

平成19年度

船舶起源の粒子状物質(PM)の  
環境影響に関する調査研究報告書

平成20年6月

海洋政策研究財団  
(財団法人 シップ・アンド・オーシャン財団)

# はじめに

本報告書は、競艇交付金による日本財団の助成事業として平成18年度及び平成19年度に実施した「船舶起源の粒子状物質(PM)の環境影響に関する調査研究」事業の最終成果をとりまとめたものです。

船舶の排ガス中に含まれるガス状の窒素酸化物(NO<sub>x</sub>)及び硫黄酸化物(SO<sub>x</sub>)に対しては、マルポール73/78条約附属書VIで規制が始まっておりましたが、PMについては、排ガス中での測定の困難さ、環境中での挙動の複雑さ、人体及び周辺環境への影響の複雑さなどから、規制対象に含まれていませんでした。他方、大規模港湾を抱える内外の都市圏においては、PMの環境状況は劣悪なままであり、未規制の船舶排ガスの寄与が大きくクローズアップされておりました。

このため、国際海事機関(IMO: International Maritime Organization)においては、同附属書の改正検討項目として、ガス状のNO<sub>x</sub>及びSO<sub>x</sub>に対する規制強化に加えて、PM排出規制の可能性の検討を加え、平成18年4月から多くの国際会議、中間会合及びワークショップなど、活発な科学的な議論が行われてきました。

このIMOの改正作業に対応して、当財団では、船舶起因のPMの環境影響について調査・解析を行い、将来的な規制の必要性を判断し、また、その具体的削減方法の検討を実施し、船舶排ガスの将来規制のあり方について調査研究を実施するとともに、それらの成果についてIMOの諸会議において情報を発信し、また、日本からの規制案として提案してきました。

特に船舶起因のPMの環境影響については、現地測定データと数値シミュレーションの両面から調査・解析を行い、多くの有用かつ貴重なデータを得るとともに、それらの地域的特長について欧米の科学者などとの情報交換を行ってきました。これらの活動を通じて、船舶からのPMに関しては、ガスとして排出されたNO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>などが大気中で光化学反応により粒子化する二次粒子の影響が非常に大きく、燃料中の硫黄分を削減することが間接的に二次粒子の環境影響を下げることに効果的である、との国際的な認識と理解を得ることができました。そして、平成20年3～4月に開催されましたIMO第57回海洋環境保護委員会(MEPC57)では、燃料中の硫黄分削減を、ガス状SO<sub>x</sub>規制だけでなくPM規制としても位置付けるという同附属書VIの改正案が最終化され、10月のMEPC58において採択される見込みとなりました。今後は国内での規制海域の設定が進むとともに、従来未規制であった船舶からのPMに関して大きな改善をもたらすことが期待できます。

本事業を実施するに当たりましては、平田 賢 東京大学名誉教授を委員長とする「船舶起源の粒子状物質(PM)の環境影響に関する調査研究委員会」各委員による熱心なご審議を頂きました。また、港湾域におけるPM実測調査及び実船計測調査にご協力いただきました関係各所、各海運会社、オペレータ社等関係者に対し、感謝の意を表する次第です。

平成20年6月

海 洋 政 策 研 究 財 団

(財団法人 シップ・アンド・オーシャン財団)



# 船舶起源の粒子状物質(PM)の環境影響に関する調査研究委員会 委員名簿

(順不同、敬称略)

委員長	平田 賢	日本コージェネレーションセンター会長 東京大学名誉教授
委員	高崎 講二	九州大学大学院 総合理工学研究院 環境エネルギー工学専攻 教授
	溝畑 朗	大阪府立大学 産学官連携機構 先端科学イノベーションセンター センター長
	若松 伸司	国立大学法人愛媛大学 農学部 生物資源学科 大気環境科学 教授
	村岡 英一	独立行政法人海上技術安全研究所 環境エンジン開発プロジェクトチーム 主任研究員
	速水 洋	財団法人電力中央研究所 環境科学研究所 化学環境領域 上席研究員
	山崎 雅雄	社団法人日本船主協会 海務部 係長
関係者	中橋 亨	国土交通省 総合政策局 海洋政策課 海洋渉外調査官
	(上野 大輔	国土交通省 総合政策局 海洋政策課 専門官)
	高嶺 研一	国土交通省 海事局 安全基準課 課長補佐
	柳 幸一	国土交通省 港湾局 国際・環境課 海域環境係長
	井上 清登	環境省 水・大気環境局 自動車環境対策課 課長補佐
	(唐島 聡子	環境省 水・大気環境局 自動車環境対策課 課長補佐)
	(白波瀬道英	環境省 水・大気環境局 自動車環境対策課 環境専門調査官)
	(伊藤 雄郷	環境省 水・大気環境局 自動車環境対策課)
	関根 幸雄	東京都環境局 環境改善部 大気保全課 大気係長
	(藤田 昌廣	東京都環境局 環境改善部 大気保全課 大気係長)
	小林 さや子	東京都環境局 環境改善部 大気保全課 大気係次席
	(伊藤 雄一	東京都環境局 環境改善部 大気保全課 大気係次席)
	吉澤 佳子	東京都港湾局 港湾経営部 監理課 港湾保安対策担当係長
	鈴木 潤	いであ(株) 参事
	星 周次	いであ(株) 国土環境研究所 環境技術グループ長
	太田 晶久	いであ(株) 国土環境研究所 環境技術グループ 研究員
	水野 太史	いであ(株) 国土環境研究所 環境技術グループ 研究員
事務局	工藤 栄介	海洋政策研究財団 常務理事

西田 浩之	海洋政策研究財団	海技研究グループ長
三木 憲次郎	海洋政策研究財団	海技研究グループ グループ長代理
玉眞 洋	海洋政策研究財団	海技研究グループ 調査役
華山 伸一	海洋政策研究財団	海技研究グループ 主任研究員

( ) 内は前任者

# 目 次

1. 調査の概要.....	1-1
1.1 外洋航路における PM に関するシミュレーション .....	1-1
1.2 港湾地域における PM に関するシミュレーション .....	1-2
1.3 船舶排出ガス量の算定.....	1-3
1.4 港湾域における PM の調査・解析 .....	1-4
1.5 船舶排気 PM の毒性評価 .....	1-5
2. 調査の背景と目的.....	2-1
2.1 背景と目的.....	2-1
2.2 調査計画の内容.....	2-2
3. 総説.....	3-1
3.1 粒子状物質(PM)の定義.....	3-1
3.2 PM の分類.....	3-1
3.2.1 発生源による分類.....	3-1
3.2.2 粒径による分類.....	3-2
3.3 PM の環境中の挙動の解析方法 .....	3-4
3.4 健康への影響.....	3-7
3.5 我が国における SPM 環境基準の達成状況 .....	3-9
3.6 規制による PM 排出量の変化 .....	3-12
3.7 我が国における PM に対する規制状況 .....	3-13
3.8 IMO における規制の動向 .....	3-14
4. 外洋航路における PM に関するシミュレーション .....	4-1
4.1 シミュレーションの概要 .....	4-1
4.1.1 モデルの概要.....	4-1
4.1.2 解析領域.....	4-5
4.1.3 解析期間.....	4-5
4.2 解析結果.....	4-6
4.2.1 物質収支に係る検討.....	4-6
4.2.2 SO <sub>x</sub> に係る詳細検討.....	4-10
4.2.3 NO <sub>x</sub> に係る詳細検討 .....	4-13
4.3 結論.....	4-15
5. 港湾地域における PM に関するシミュレーション .....	5-1
5.1 シミュレーション概要 .....	5-1
5.1.1 モデル概要.....	5-1
5.1.2 計算対象範囲.....	5-1
5.1.3 解析項目 .....	5-2
5.2 現況計算.....	5-2
5.2.1 計算ケース .....	5-2
5.2.2 発生源データ .....	5-2
5.2.3 現況再現性の検証.....	5-5
5.2.4 現況濃度および船舶寄与濃度計算結果.....	5-11

5.2.5 ヨーロッパにおけるシミュレーションとの比較 .....	5-27
5.3 規制効果の予測 .....	5-35
5.3.1 対象とする規制の内容および検討ケース .....	5-35
5.3.2 発生源データ .....	5-36
5.3.3 計算対象期間 .....	5-36
5.3.4 船舶寄与分の削減効果 .....	5-37
5.3.5 大気中 PM 濃度の基準超過状況の改善効果 .....	5-54
5.4 結論 .....	5-56
6. 東京湾地域における船舶からの大気汚染物質排出量算定結果 .....	6-1
6.1 概要 .....	6-1
6.2 現況排出量 .....	6-1
6.2.1 算定範囲 .....	6-1
6.2.2 対象年 .....	6-2
6.2.3 対象物質 .....	6-2
6.2.4 算定手順および算定区分 .....	6-2
6.2.5 港湾別入港船舶・係留船舶データの整理 .....	6-5
6.2.6 定格排出量算定式 .....	6-13
6.2.7 部分負荷時の排出量の算定 .....	6-26
6.2.8 タグボート .....	6-30
6.2.9 時間率および月稼働率の設定 .....	6-31
6.2.10 排出源の位置 .....	6-35
6.2.11 大気汚染物質排出量の算定結果 .....	6-40
6.3 規制時の大気汚染物質排出量 .....	6-50
6.3.1 算定ケース .....	6-50
6.3.2 排出係数 .....	6-51
6.3.3 排出量算定結果 .....	6-53
6.3.4 メッシュ別排出量 .....	6-55
6.4 結論 .....	6-60
6.4.1 排出量算定結果 .....	6-60
6.4.2 排出量算定における留意事項 .....	6-63
7. 港湾域における PM の調査解析 .....	7-1
7.1 調査目的 .....	7-1
7.2 調査の構成 .....	7-1
7.3 大気中 PM 調査結果 .....	7-1
7.3.1 調査内容 .....	7-1
7.3.2 調査時期 .....	7-1
7.3.3 調査地点 .....	7-1
7.3.4 PM <sub>2.5</sub> 濃度および SO <sub>4</sub> 濃度の測定方法 .....	7-3
7.3.5 PM <sub>2.5</sub> 成分分析 .....	7-4
7.3.6 調査期間中の気象状況 .....	7-8
7.3.7 PM <sub>2.5</sub> 濃度および粒子状 SO <sub>4</sub> 濃度測定結果 .....	7-12
7.3.8 質量濃度および成分分析結果 .....	7-26
7.4 船舶排気 PM 調査 .....	7-42
7.4.1 調査内容 .....	7-42

7.4.2	調査時期	7-42
7.4.3	調査対象船	7-42
7.4.4	試料の採取方法	7-43
7.4.5	分析項目および分析方法	7-43
7.4.6	PM 成分の分析結果	7-44
7.4.7	燃料成分の分析結果	7-48
7.4.8	船舶からの寄与割合の検討	7-50
7.4.9	まとめ	7-59
7.5	結論	7-60
8.	船舶排気 PM の毒性評価	8-1
8.1	調査の概要と背景	8-1
8.2	調査方法	8-1
8.2.1	調査対象船	8-1
8.2.2	サンプリング方法	8-2
8.2.3	測定項目	8-2
8.2.4	分析方法	8-2
8.3	PAHs の基礎情報	8-3
8.3.1	物性情報	8-3
8.3.2	毒性情報	8-5
8.4	PAHs 測定結果	8-8
8.4.1	PM 中の PAHs	8-8
8.4.2	燃料および潤滑油	8-12
8.4.3	燃料と PM 中の PAHs の比較	8-15
8.4.4	PM の毒性等量	8-18
8.5	PAHs 排出量の試算	8-19
8.5.1	船舶から排出される PAHs の排出係数	8-19
8.5.2	ディーゼル車との比較	8-21
8.6	PAHs の大気中の基準および大気中 PAHs 濃度の現状	8-24
8.7	結論	8-27
9.	調査結果のまとめ	9-1
9.1	外洋航路における PM に関するシミュレーション	9-1
9.2	港湾地域における PM に関するシミュレーション	9-2
9.3	船舶排出ガス量の算定	9-3
9.4	港湾域における PM の調査・解析	9-4
9.5	船舶排気 PM の毒性評価	9-5
9.6	まとめ	9-6

## 資料編

1. 港湾地域シミュレーション
2. 東京湾地域における船舶からの大気汚染物質排出量算定結果
3. 港湾域における PM の調査解析





## 1. 調査の概要

本調査では PM に関するシミュレーションおよび港湾域における PM の調査解析を行い、わが国周辺地域における船舶から排出された PM の影響を把握した。調査の概要は以下のとおりである。

### 1.1 外洋航路における PM に関するシミュレーション

調査方法	東アジア域の外洋を航行する船舶の排ガスに起因する PM の影響を把握するため、九州大学応用力学研究所による RAMS/CMAQ 連携システム(大気質の移流拡散モデル)を用いてシミュレーションを実施し、ガスとして排出された NO <sub>x</sub> 、SO <sub>x</sub> が大気中で化学反応により粒子化した二次粒子の挙動を解析した。
調査結果	<ul style="list-style-type: none"><li>東アジア域の航路帯から排出された SO<sub>2</sub> の濃度は、航路帯から 100 km 以上離れた点では、絶対値としても、バックグラウンド濃度との比較においても無視しうる。</li><li>ヨーロッパにおいては船舶起源の SO<sub>x</sub> は 1,000km 遠方までほとんど沈着せずに輸送されると言われているが、日本付近においては船舶起源の SO<sub>x</sub> は発生源近傍で 23~31 %沈着しており、特に夏季においては風下 1,000 km の範囲内に 70 %以上が沈着することが期待される。これはヨーロッパと日本では、気温・湿度、降水量などの気象条件や船舶発生源の広がり等が異なるためと考えられる。 なお、日本付近の海域においても、季節風の卓越する冬季は 1,000 km 範囲内の総沈着量は排出量の 40 %未満であり、遠方まで輸送される可能性がある。</li><li>外洋航路帯の船舶からの SO<sub>2</sub> の影響は、日本付近においてもヨーロッパにおいても影響範囲は狭い。一方、SO<sub>4</sub> 粒子の影響範囲は、日本付近とヨーロッパでは大きな差異があることが想定される。これは、気象条件、SO<sub>4</sub> 粒子の大気中の挙動に関連する物質の存在量や発生量の有無、バックグラウンド濃度の違いや船舶発生源の広がり等の違い等によるものと考えられる。従って、環境保護の観点からは各海域の状況に合わせた規制が重要である。ただし、本報告書の「9.5 船舶排気 PM の毒性評価」を考慮すると、IMO 第 57 回海洋環境保護委員会(MEPC57)で最終化されたグローバルアプローチ(全ての海域において低硫黄燃料を使用)は、実質的に良質燃料への転換を意味し、発がん性等の毒性を有する多環芳香族炭化水素(PAHs)の削減効果も期待されることから、グローバルアプローチについても必要性はあると考えられる。</li><li>船舶排出ガス中の PM には SO<sub>2</sub> の凝縮性粒子(SO<sub>4</sub> 粒子)が多く含まれる。今回のシミュレーション結果によれば、航路帯から排出された SO<sub>2</sub> は SO<sub>4</sub> 粒子に変換されて遠方まで輸送され、SO<sub>2</sub> よりも SO<sub>4</sub> 粒子の影響範囲が広いことが示された。これらのことから、燃料中硫黄分を削減することは、船舶起源の PM の削減に効果のあることが示された。MEPC においても燃料中硫黄分を規制することにより、SO<sub>x</sub> 削減効果のみならず PM 削減効果もあることが認められた。</li><li>東アジア域の航路帯から排出された NO・NO<sub>2</sub> は、人体に有害な NO<sub>2</sub> へ、更に HNO<sub>3</sub> にまで比較的速やかに酸化される。ただし、NO<sub>3</sub> 粒子はほとんど存在せず、ガス状物質として大気中に存在する割合が高い。これは、SO<sub>4</sub> 粒子が硫酸ミストとして単</li></ul>

	<p>体でも粒子化するのに対して、<math>\text{HNO}_3</math>はアンモニアなどアルカリイオンが存在しないと粒子化が進まないことに起因している。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>その<math>\text{HNO}_3</math>は沈着速度が大きいことから、航路帯から300 km以上離れた地点でのガス状物質としての濃度は、絶対値としても、バックグラウンド濃度との比較において無視できる。</li> <li><math>\text{NO}_3</math>粒子まで変化する船舶起源の<math>\text{NO}_x</math>は少ないことから、<math>\text{NO}_x</math>から生じるPMの影響範囲は<math>\text{SO}_x</math>から生じるPMの影響範囲に比較して狭く、<math>\text{NO}_x</math>に対しては局地的な対策が望ましい。MEPC57で最終化された<math>\text{NO}_x</math>規制のうち2016年から適用されるTier3は排出規制海域(ECA)にのみ適用するものであり、本調査結果においても十分な効果があると推定できる規制方法である。</li> </ul>
--	---

## 1.2 港湾地域におけるPMに関するシミュレーション

調査方法	<p>東京湾域における船舶の排ガスに起因するPMの影響を把握するため、電力中央研究所が開発した大気中二次粒子の濃度予測モデルを用いてシミュレーションを実施し、ガスとして排出された<math>\text{NO}_x</math>、<math>\text{SO}_x</math>が大気中で化学反応により粒子化した二次粒子の挙動を解析した。</p>
調査結果	<ul style="list-style-type: none"> <li>船舶からの<math>\text{SO}_2</math>が影響する範囲(船舶寄与割合が25%以上)は、4月から8月にかけて内陸部に広がっている。一方、北よりの季節風が強くなる冬季においては港湾の北に位置する内陸部へは広がっていない。<math>\text{SO}_4</math>粒子の船舶寄与濃度については、<math>\text{SO}_2</math>と比べて濃度は低いものの、<math>\text{SO}_2</math>と同様に6月から8月にかけて高くなっている。</li> <li><math>\text{NO}_2</math>の船舶寄与濃度は、5月から9月にかけて高くなっており、特に8、9月は湾外航路付近における船舶寄与割合は<math>\text{SO}_2</math>よりもむしろ高くなっている。船舶からの<math>\text{NO}_2</math>が影響する範囲(船舶寄与割合が25%以上)は、<math>\text{SO}_2</math>に比べて狭く、船舶寄与が大きくなる6月から9月においても<math>\text{SO}_2</math>ほど内陸部に広がっていない。<math>\text{HNO}_3</math>の船舶寄与濃度は<math>\text{NO}_2</math>に比べて小さく、航路帯に分布している。<math>\text{NO}_3</math>粒子の船舶寄与濃度は<math>\text{NO}_2</math>に比べて小さく、内陸部に分布している。</li> <li>燃料中硫黄分規制による環境濃度改善効果は、<math>\text{SO}_2</math>濃度で顕著であり、燃料中硫黄分を0.5%に規制(一般海域における2020年以降の規制に相当)することにより、月平均値の濃度分布でみられた港湾域および東京湾海上の<math>\text{SO}_2</math>の高濃度域はほぼ解消された。また、8月における<math>\text{SO}_2</math>濃度の日平均値の月最大値についても大きな改善効果が予想され、国内の大気環境基準より厳しい世界保健機関(WHO)の日平均値のガイドライン値(<math>20 \mu\text{g}/\text{m}^3</math>)を、港湾域に存在する測定地点においても達成できると考えられる。一方、<math>\text{SO}_4</math>粒子濃度でも、燃料中硫黄分を0.5%に規制することにより、月平均値の濃度分布でみられた港湾域の高濃度域はほぼ解消され、削減割合は<math>\text{SO}_4</math>粒子濃度で最大2割程度であった。<math>\text{SO}_2</math>濃度ほどではないにしても、燃料中硫黄分規制が、間接的にSPM(PM2.5)の大気環境改善に一定の効果があることが期待できる。</li> </ul> <p>燃料中の硫黄分を削減することが、PMのうち相当の割合をもつ二次粒子削減に間接的に繋がることは、MEPCにおいても船舶排ガスの特徴として認識されており、</p>

	<p>PM の規制として燃料中硫黄分の削減が最終的に盛り込まれた。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tier2 の NOx 規制を全船に導入した場合の環境濃度改善効果は、必ずしも充分ではなく港湾周辺部および航路帯周辺部の影響範囲は解消されず、また港湾周辺地点における改善率も 10%前後にとどまる。一方、Tier3 規制を全船に導入した場合の環境濃度改善効果は顕著であり、月平均値の濃度分布でみられた港湾域および東京湾海上の高濃度域はかなり改善される。また、改善率も 20 %近くに達し、8 月の月平均値の濃度分布において、Tier3 規制を全船に導入することにより日本の環境基準より厳しい世界保健機関(WHO)の年平均値のガイドライン値(40 <math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)超過が解消することが期待できる。ただし、ここまでの改善効果が実際に期待されるのは、船齢の長さなどから 2040 年以降になることに留意する必要がある。実際に、2020 年における期待できる Tier3 適合船の導入割合を考慮すると、8 月においても月平均値の削減率は 5 %程度である。</li> <li>• NOx 規制については、SOx 規制のような全船を対象にした実効性のある規制方法が現状では考えられないため、Tier3 のように厳しい規制を新船に対して適用することに環境面から考えても合理性があると考えられる。なお、MEPC57 では、排出規制海域の大型既存船に対しても Tier1 規制が導入されることが最終化され、早期の環境改善効果を期待できる規制の枠組みとなっている。</li> </ul>
--	---

### 1.3 船舶排出ガス量の算定

調査方法	東京湾の各港湾を利用する船舶を対象として、係留時および航行時に排出される大気汚染物質量を算定した。
調査結果	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2000 年の東京湾外を含めたシミュレーション範囲全体における船舶からの排出量は SO<sub>2</sub> が約 57,000 t、NOx が約 101,000 t、PM が約 7,000 t 等であり、陸上発生源を含めた関東エリアの排出量のそれぞれ約 31 %、約 16 %、約 14 %を占め、SO<sub>2</sub> の寄与率が高い。なお、東京湾内における排出量は SO<sub>2</sub> が約 21,000 t、NOx が約 37,000 t、PM が約 2,600 t 等である。</li> <li>• MEPC 57 において最終化された燃料中硫黄分の削減による SO<sub>2</sub> および PM に対する規制、ならびに新造船を対象にした NOx 規制が内航船にも適用された場合を想定して、IMO 規制による削減量を推定した。</li> <li>• SO<sub>2</sub> 排出量については、燃料中硫黄分を 0.5 %以下とした場合(一般海域における 2020 年以降の規制に相当)、SO<sub>2</sub> は 72 %、PM は 64 %が削減される。さらに、0.1 %以下に規制した場合(排出規制海域における 2015 年以降の規制に相当)、SO<sub>2</sub> は 95 %、PM は 84 %が削減されると推計された。</li> <li>• 船舶は陸上発生源と比較して排出ガス規制がゆるく、特に PM は従来未規制であった。しかし、燃料中硫黄分の削減は PM 排出量の削減に効果が高く、PM の規制手法として MEPC57 で最終化された附属書VIに新たに盛り込まれた。</li> <li>• NOx 排出量については、新たな規制において定められた NOx の削減率は、Tier1 で 23 %、Tier2(2016 年以降の規制に相当)で 38 %、Tier3(排出規制海域における 2016 年以降の建造船に適用)で 83 %であり、各規制の混在率を考慮した 2020 年には 27 %、</li> </ul>

	<p>2025年には41%が削減されると推計された。なお、MEPC57においては大型の現存船についてもNOx規制が導入されることが盛り込まれたため、今回推計した2020年および2025年のNOx排出量よりもさらに削減されることが期待できる。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>本調査では排出量の推定・算定精度の向上とともに、大気シミュレーションの計算条件とするため排出量の空間的な分布や時間変動を反映できるよう留意した。また、算定方法等については、具体的に記述し、他の地域でも活用できるマニュアルとして整備した。</li> <li>排出量の精度をさらに高めるためには、PM排出係数に関するデータの蓄積、補助ボイラーの排出実態の把握、燃料消費量の実態把握および個々の船舶の活動量の把握など、一層のデータの蓄積・把握が必要である。</li> </ul>
--	--

#### 1.4 港湾域におけるPMの調査・解析

調査方法	<p>近年、船舶起源PMの大気中での寄与率が相対的に増加していることが懸念されている。港湾周辺の大気環境に及ぼす船舶起因の微小なPMの寄与について検討するため、東京湾周辺においてPMを採取して成分分析を行った。調査は大気環境PM調査を夏季に2地点、また船舶排気PM調査を停泊・荷役中のコンテナ船で実施した。</p>
調査結果	<ul style="list-style-type: none"> <li>大型コンテナ船の接岸場所が近い測定点ではSO<sub>2</sub>については周辺発生源からの局所的な影響が示唆されたが、PMについては明確ではなかった。その理由として、二次粒子を含むPMはSO<sub>2</sub>よりも発生源近傍で影響が現れにくいことや、バックグラウンド濃度の変動が大きいことなどにより、現地の測定ではとらえられなかったことが考えられた。</li> <li>排出ガス中のPMは、RFO使用船とA重油使用船でイオン成分および金属成分の組成比が異なり、RFO使用船は硫酸イオン、バナジウム、ニッケルなどの成分の割合が高く、一方、A重油使用船では潤滑油に含まれるカルシウム、亜鉛が原因で、PM中のカルシウムと亜鉛の割合がRFO使用船に比べて相対的に高くなることが示唆された。</li> <li>船舶排気PM中のSO<sub>4</sub>粒子の割合が希釈法による測定結果と比較して低いが、これはPMの採取方法の違い(希釈法では53℃以下に冷却した状態で採取するのに対して、本調査では高温状態で煙突排気口から直接採取している)によるものと考えられる。</li> <li>調査で得られた船舶排気PMの成分組成を用いて、CMB計算により船舶の寄与率を試算した結果、船舶の寄与率は10%前後であった。</li> <li>ただし、CMB計算で求めた寄与には二次粒子を含んでいない。二次粒子を含めた船舶の寄与はこれよりもさらに大きくなる可能性がある。</li> <li>船舶の寄与率は燃料種類別にはRFOがA重油よりも大きく、また、時間帯別には昼間が夜間よりも大きかった。</li> <li>ただし、本調査で求めた寄与率は、船舶排出ガス中のPM成分にはばらつきが大きく、成分組成の代表性が確保されていない可能性のある中での寄与率の試算であることに留意する必要がある。</li> </ul>

### 1.5 船舶排気 PM の毒性評価

調査方法	ディーゼルエンジンの排気中に含まれる PM は、発がん性等の毒性を有する PAHs(多環芳香族炭化水素)を微量ながら含有することが知られているが、船舶を対象として調査した事例は少ない。そこで、本事業では、接岸中の船舶の補機ディーゼルエンジンから排出される PM を採取し PM 中の PAHs を測定するとともに、燃料および潤滑油中の PAHs を測定した。
調査結果	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ PM 中の PAHs 濃度(PM 単位量当たりの PAHs 含有量)については、船舶によってバラツキが大きく、RFO と A 重油による明確な違いは認められなかった。</li> <li>・ PM と燃料の PAHs 組成は異なっていた。また、潤滑油は RFO と比較して PAHs 濃度は 1 桁から 2 桁程度低かった</li> <li>・ RFO は A 重油と比較して PM 排出量が多いため、燃料消費量当たりの PAHs 排出量に換算した場合、RFO は A 重油よりも PAHs が多く排出されると推計された。</li> <li>・ また、RFO は A 重油よりも毒性の強い PAHs を含む割合が高いため、PAHs の個々の物質の毒性の強さを合計した毒性等量で評価すると、RFO の毒性は A 重油よりもさらに大きくなることが示唆された。なお、このことは、燃料の良質化などの PM 削減対策により、PAHs の排出量を削減できることを示している。</li> <li>・ 陸上における PAHs の代表的な発生源であるディーゼル車と比較すると、船舶は PM 排出量が多いため PAHs 排出量も多く、船舶の燃料消費量当たりの PAHs 排出量はディーゼル車の数倍から数十倍程度と推計された。また、港湾地域における船舶からのベンゾ[a]ピレン排出量を試算したところ、船舶の寄与は陸上発生源に比べ少ないことが示唆された。</li> <li>・ 我が国のベンゾ[a]ピレン濃度は現状で WHO のガイドライン値を超過している。船舶の PAHs 排出量は陸上の主要な発生源であるディーゼル車と比較しても少なくとも、船舶を含めた各発生源がベンゾ[a]ピレンなど PAHs の削減に一層努力することが望まれる。船舶からの PAHs 排出量は、燃料の良質化などにより削減することが可能であり、PM 規制として MEPC57 で最終化された燃料中硫黄分の削減が良質燃料への転換を進め、結果として PAHs の排出量削減につながると期待できる。</li> <li>・ 船舶の排出ガス対策についてはこれまで SO<sub>2</sub> や PM の削減効果を中心に検討されてきたが、船舶からの PAHs 排出量が陸上発生源と比較して少なくないことと、現状のベンゾ[a]ピレン濃度が WHO のガイドラインを超過していることを考慮すると、人への健康リスクの低減の観点からの排出ガス対策の検討も今後必要になると考えられる。</li> </ul>



## 2. 調査の背景と目的

### 2.1 背景と目的

船舶からの排気ガスに含まれる粒子状物質(Particulate Matter; 以下 PM)については、平成 17 年 5 月に発効したマルポール 73/78 条約附属書 VI(船舶の環境汚染防止のための国際条約のうち、窒素酸化物(NOx)、硫黄酸化物(SOx)など大気汚染物質に関する排出規制を定めた附属書)において規制の対象にはなっていない。しかしながら、国際海事機関(International Maritime Organization; IMO)においては、平成 18 年 4 月から開始された同附属書の改正作業において、PM 規制の可否についての検討が始まっている。また、我が国においても、一部自治体で港湾付近における PM 対策を検討していることなどから、船舶に起因する PM については早急に実態を把握するとともに対応を検討する必要がある。

PM は、ディーゼルエンジンから排出時に粒子として排出される一次粒子(黒い粒子と呼ばれる)と、ガスとして排出された NOx、SOx などが大気中で光化学反応により固体化する二次粒子(白い粒子と呼ばれる)に大別できる。両者は、粒径、化学組成などが異なることから、大気中での寿命や挙動、健康影響の度合いも様々である。

船舶起源の PM の環境影響については、NOx、SOx に比較して、情報量が少ない。特に、二次粒子の生成とその環境への影響については、国内だけでなく欧州の港湾などにおいても無視できないと言われており、正確な実態把握と科学的分析による知見およびそれらに基づく見識を確立し、今後の具体的方策を提案することは社会全体に大いに貢献するものである。

そこで本事業では、船舶起因の PM の環境影響について現地データなどに基づいた調査・解析を行い、将来的な規制の必要性を判断し、またその具体的削減方法の検討を実施し、船舶排ガスの将来規制のあり方について提言を行うことで、大気環境改善を通じて、我が国の海運、造船、及び造船関連工業の持続的発展に寄与することを目的とする。



## 2.2 調査計画の内容

調査は平成 18 年度から 2 年計画とし、このうち平成 18 年度には、特に港湾周辺の大気環境に及ぼす船舶起因 PM の寄与について検討を行った。すなわち、一次粒子に関する現地調査を行うとともに、排ガス中の一次粒子の粒径分布の既存測定データなどから、一次粒子を中心に解析を行いこれらの寄与分についてまとめ、シミュレーション結果とともに規制の必要性に関して港湾大気環境の改善を目指した提言を行うため、以下を実施した。

### (1) 平成 18 年度

#### (a) 船舶起源の PM の大気環境に対する影響の調査

##### ① PM に関するシミュレーション

海洋上および港湾付近における既存のモデルの調査や、入力データの整備を行い、二次生成モデルを使用して船舶からの影響について予備的な計算を実施した。

##### ② 港湾域における PM の調査解析

影響が懸念される横浜港周辺において PM を採取した。成分分析などからその一次粒子(発生源から PM の状態で排出された粒子)および二次粒子(発生源からはガス状物質として排出され大気中で固体に変換した粒子)の組成割合と粒度分布を実測した。また一次粒子の由来について、成分分析結果に基づき解析した。

#### (b) PM の削減ポテンシャルに関する調査

削減技術のレビューとその評価を行い、既存データの整理およびメーカーへの聞き取りなどから、(a)の影響が PM 一次粒子の対策による PM 削減の可能性評価を行った。

#### (c) PM の将来規制の枠組みに関する提言

情報収集および成果の発表の場として IMO など国際会議および国際学会に出席し、上記成果および PM 規制の必要性に関して欧米諸国と議論を行った上で、PM の将来規制の枠組みに関して提言を行った。

さらに、平成 19 年度は、平成 18 年度の調査結果などに基づき、一次粒子の解析について、調査地点数を増やし、調査項目を追加などして調査研究を進めるとともに、シミュレーションにより二次粒子についての定量的な評価を行った。

### (2) 平成 19 年度

#### (a) 船舶起源の PM の大気環境に対する影響の調査

##### ① 港湾域における PM の調査解析

平成 18 年度に引き続き、東京湾地域において環境大気中の PM を採取した。同試料中の重金属類などの成分分析から、一次粒子の由来及び二次粒子の割合について解析を行った。

## ② PMに関するシミュレーション

平成 18 年度と同様の二次粒子生成モデルを用い、NO<sub>x</sub> 及び SO<sub>x</sub> を前駆体とした PM の二次生成および二次粒子の海洋や地表面への沈着を考慮したシミュレーション計算および評価を行うとともに、我が国沿岸域に対する影響及び各種規制の定量的効果を検討した。

## ③ PM の毒性評価の検討

PM 表面に吸着していると思われる多環芳香族など有害物質について環境中・排ガス中の PM の採取及び測定検討を行った。

## ④ 総合評価

①から③で検討した結果に基づいて、港湾周辺及び航路帯から船舶起源の PM の寄与を評価し、PM 規制及び間接的に PM 濃度に影響する SO<sub>x</sub> 規制強化の必要性について検討を行った。

### (b) PM の削減ポテンシャルに関する調査

平成 18 年度に引き続き、削減技術のレビューとその評価を行い、既存データの整理及びメーカーへの聞き取りなどから、二次粒子削減のための効果的な方策について評価を行った。特に PM に吸着した多環芳香族など有害物についての除去方法について検討を行った。

### (c) PM の将来規制の枠組みに関する提言

情報収集及び成果の発表の場として、IMO など国際会議及び国際学会に出席し、上記成果及び PM 規制の必要性に関して欧米諸国と議論を行った上で、PM の将来規制の枠組みに関して提言を行った。

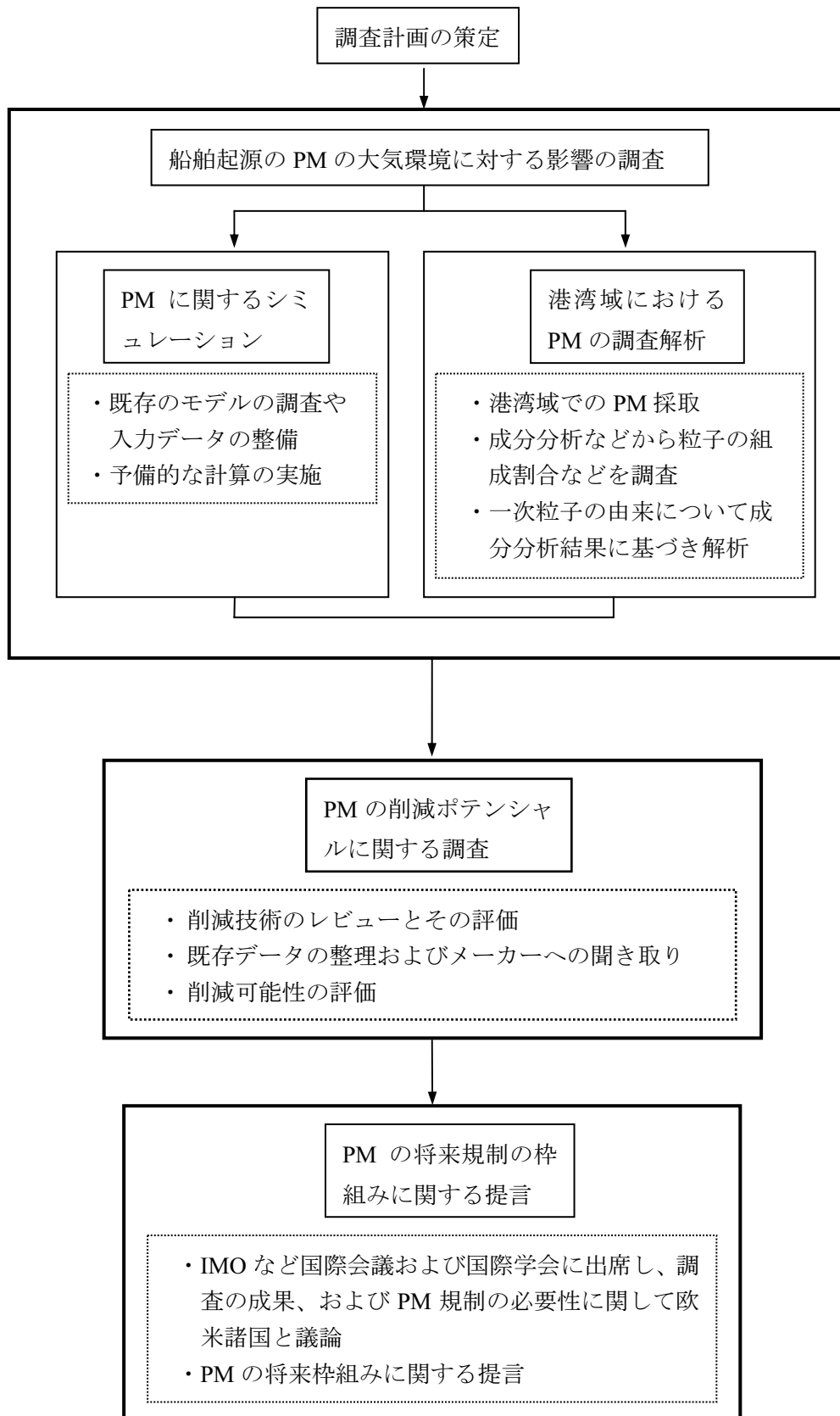


図 2.2-1 本調査のフロー図

### 3. 総説

#### 3.1 粒子状物質(PM)の定義

大気汚染物質は、気体であるガス状物質と、大気中に浮遊する PM に大きく分かれる。このうち PM は大気中に固体または液体の形で浮遊する微小な粒子である。

また、PM の発生源には様々なものがあり、発生過程によって粒径(粒子の大きさ)や化学組成などが異なるため、大気中の挙動、寿命など大気環境への影響や健康影響について、未知な点も多い。

#### 3.2 PM の分類

##### 3.2.1 発生源による分類

発生源・生成機構による PM の分類を表 3.2-1 に示す。

大気中の PM の起源は様々であり、発生源からみた場合は、燃料などが燃焼する過程で排出されるばいじん(いわゆる「すす」)のような人為起源のものと、土壌や海塩粒子のような自然起源のものに分類される。また、生成機構の違いからみた場合は、粒子として大気中に直接排出される一次粒子と、ガス状物質として排出された SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>、VOC(Volatile Organic Compounds : 揮発性有機化合物)から光化学反応などにより生成される二次粒子とに分類される。

本調査の対象となる船舶起源の PM についても、燃料の燃焼に伴い排出されるディーゼル黒煙などの一次粒子と、ガスとして排出された SO<sub>x</sub> 等が大気中で粒子化して生成される二次粒子がある。船舶では燃料として硫黄分が多い重油が使われ、SO<sub>x</sub> の排出量が多いため、船舶起源の PM は、ディーゼル車などの陸上発生源と比べると、二次粒子の割合が大きい可能性がある。

表 3.2-1 PM の主な発生源と生成機構

	人為起源	自然起源
一次粒子	<b>【固定発生源】</b> ・ばいじん、粉じん発生施設 ・一般家庭等 <b>【移動発生源】</b> ・自動車 ・船舶 ・建設機械、航空機	・海塩粒子 ・土壌粒子 ・中国大陸からの黄砂 ・花粉 ・火山灰
二次粒子	・SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 、NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> : 燃焼由来の SO <sub>x</sub> 、NO <sub>x</sub> ガスからの変換 ・VOC : 燃焼や蒸発系発生源(塗装、給油所など)由来の VOC からの変換	・SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> : 火山由来の SO <sub>x</sub> などからの変換、海洋の DMS からの変換 ・NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> : 雷放電、森林火災由来の NO <sub>x</sub> からの変換 ・NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> : 土壌などから発生する NH <sub>3</sub> からの変換

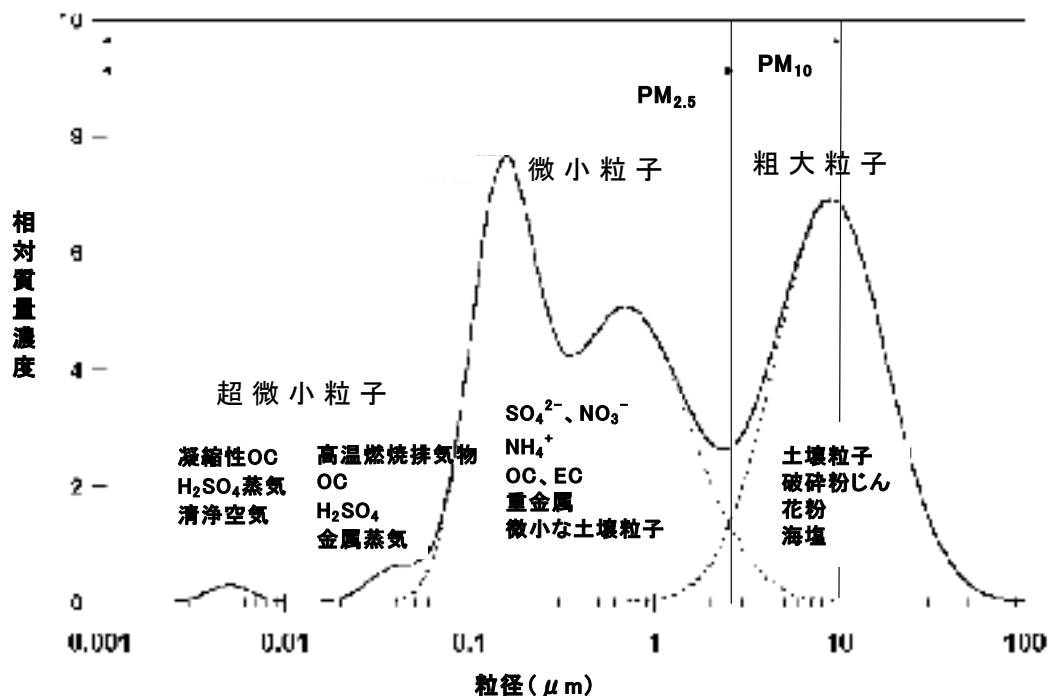
### 3.2.2 粒径による分類

PM は発生源や生成機構によって粒径が異なる。PM を粒径によって区分すると、粗大粒子(おおむね粒径 2~10  $\mu\text{m}$ )、微小粒子(おおむね粒径 0.1~2  $\mu\text{m}$ )、超微小粒子(おおむね粒径 0.1  $\mu\text{m}$  未満)に分けられる(図 3.2-1 参照)。粗大粒子は、主として機械的な力により飛散した土壌粒子や海塩粒子などの自然起源の一次粒子からなる。これに対して、微小粒子や超微小粒子(以下、両者を合わせて「微小粒子」と言う。)は、主として燃焼過程による人為起源の一次粒子や、大気中でガスが粒子化してできる人為起源・自然起源の二次粒子からなる。このため、人為起源の炭素成分、金属成分(バナジウムなど)や硫酸塩、硝酸塩などは微小粒子に多く含まれている。人為起源の微小粒子について一次粒子と二次粒子の粒径を比較すると、一次粒子の粒径のほうが大きい。一般に、粒子は粒径が大きいものほど重力によって早く落下するため、二次粒子の方が輸送距離は長くなると考えられる。また、排出ガスには一次粒子のみが含まれるが、大気中では輸送過程で生成される二次粒子が加わるため、排出ガスと環境大気では PM の粒径分布は異なる。

船舶起源の PM は、燃焼過程によるものであり、一次粒子、二次粒子ともに微小粒子である。二次粒子についてはガスから生成されるため、粒径はディーゼル車と同様と考えられるが、一次粒子については使用燃料の違いが粒径に影響している可能性が考えられる。

なお、PM は、測定対象とする粒径範囲によって表 3.2-2 に示すように分類される。

後述する「港湾域における PM の調査解析」においては、海外のデータとの比較や、船舶起源の PM の多くが PM<sub>2.5</sub>(おおむね粒径 2.5  $\mu\text{m}$  以下)の領域に含まれることなどを考慮して、PM<sub>2.5</sub> を対象に調査および解析の結果を記載した。



出典) John G. Watson : Visibility: Science and Regulation , Air & Waste Manage. Assoc , 52 , pp.628-713(2002).

図 3.2-1 大気中 PM の粒径別質量濃度の代表的分布

表 3.2-2 測定対象とする粒径範囲による粒子状物質の分類

種類	内容
TSP	大気環境中に浮遊する全 PM(Total Suspended Particulates)のこと。
SPM、PM <sub>10</sub>	大気環境中に浮遊する PM のうち、おおむね粒径 10 μm 以下の粒子のこと。日本では SPM (Suspended Particulate Matter : 浮遊粒子状物質)として環境基準が設定されている。
PM <sub>2.5</sub>	大気環境中に浮遊する PM のうち、おおむね粒径 2.5 μm 以下の粒子のこと。米国、カナダ、オーストラリアなどの基準値となっており、WHO からも指針値が示されている。
ばいじん 粉じん	排出時の粒子状物質の区分。 「ばいじん」は、「ばい煙」のひとつで、すすや燃えかすの固体粒子状物質のことをいう。燃焼以外から発生する固体粒子は、法的には「粉じん」として区別する。「ばいじん」、「粉じん」は人為起源から直接排出される PM であり、粒径の規定はないが、一般的には環境中の PM よりは大きな粒子を含む。

### 3.3 PM の環境中の挙動の解析方法

環境中の PM の解析手法として、移流・拡散モデルによる手法とリセプターモデルによる手法がある。

移流・拡散モデルは、排出量データ、気象データ、拡散パラメータ、粒子の生成・変換・除去過程等を考慮した数値シミュレーションを行い、環境濃度を推定する方法である。移流・拡散モデルでは、排出量や気象条件と環境濃度との関係の検討や、将来において排出量を削減した場合の環境濃度低減への効果の検討などについては広域でのシミュレーションが可能である。しかし、広域での排出量を正確に把握することや、粒子の生成過程を正確に再現することなどに困難が伴う。また、粒子の生成・変換過程を含んだ数値シミュレーションを狭い範囲の港湾区域に適用することは、船舶発生源に比べて他の発生源の比率が圧倒的に大きいため、船舶影響を抽出することが困難である。

一方、リセプターモデルは統計的手法により PM の発生源寄与を解析する方法であり、リセプターモデルの代表的な手法として、CMB 法(Chemical Mass Balance Method; 化学質量収支法)がある。CMB 法とは、環境中のある地点で PM を採取した場合、採取された PM が様々な発生源から排出された PM の合計であることと、発生源が特徴的な成分組成を持つことを利用し、発生源の成分組成と環境中で採取された PM の成分組成から統計的に発生源別の寄与を推定する方法である(図 3.3-1 参照)。CMB 法は比較的簡易な手法で発生源別の寄与を推定できるという利点があり、自治体や環境省の調査でよく採用されている。環境省による解析例を図 3.3-2 に示す。

なお、CMB 法に使用する発生源の成分組成は、自動車排出ガス規制や工場等で使用する燃料油種の低硫黄化などから、近年、大きく変化している可能性がある。

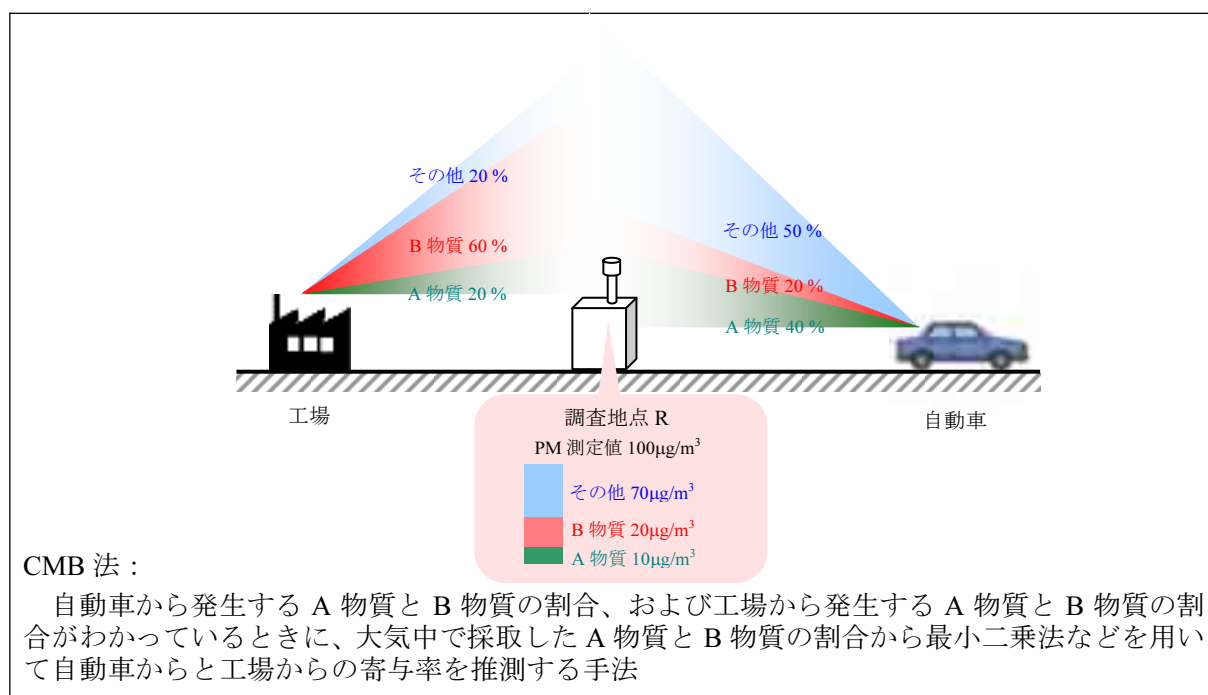
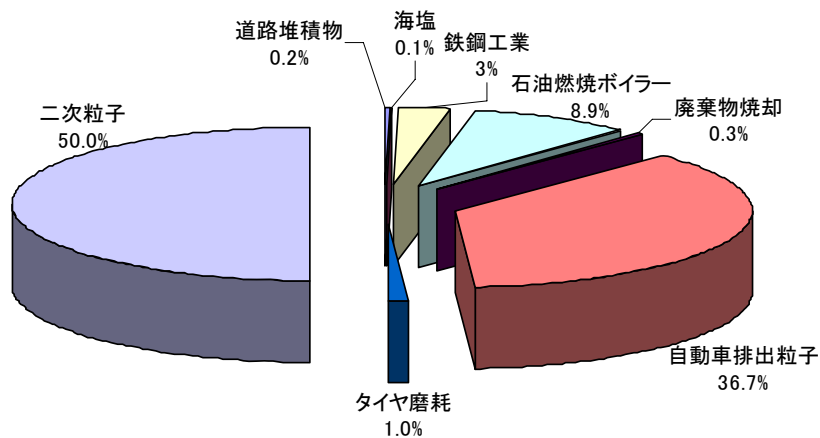


図 3.3-1 CMB 解析手法のイメージ図



出典) 「粒子状物質総量削減計画に係る粒子状物質実態調査 調査報告書」(2001年11月、環境省環境管理局)より作成

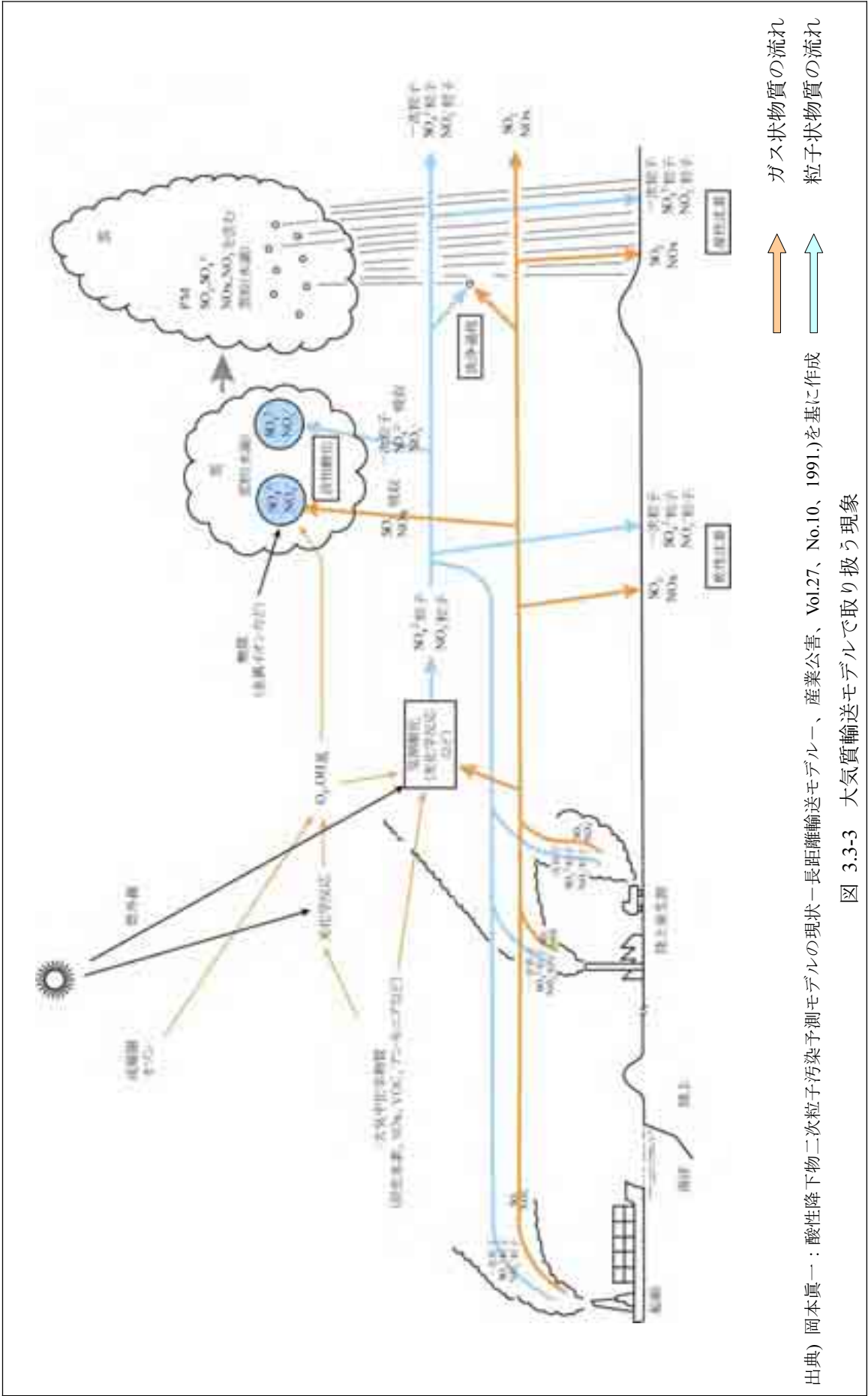
図 3.3-2 CMB法を用いた微小粒子の発生源別寄与の解析例(神奈川県池上交差点)

本調査では、外洋を航行する船舶及び港湾地域における船舶からのPMの影響範囲については移流・拡散モデルによる手法を用いて解析を行った。一般に、船舶からガスとして排出されたNO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>は、大気中で化学反応により粒子化しPMとなることが知られている。このため、大気中の様々な大気汚染物質を、汚染物質相互の影響や、ガス状物質から二次粒子生成過程などの化学反応過程、乾性沈着過程(重力による沈降や地表への衝突・吸収などにより大気から除去される過程)・湿性沈着過程(雨や雪に取り込まれて大気から除去される過程)などの物理過程を含めて取り扱うことができる広域シミュレーションモデルを用いた(図 3.3-3 参照、モデルの詳細は本報告書「4. 外洋航路におけるPMに関するシミュレーション」参照)。

また、広域シミュレーションモデルでは解析できない局所的なPMの影響を把握するため、これまでほとんど情報が得られていない港湾地域におけるPMの環境濃度の測定、および船舶排出ガス中のPMの成分分析を行った。

さらに、本調査では、船舶の排出ガス調査によって得られた排出ガス成分の分析結果や既存の発生源の成分組成と現地調査結果で得られた環境大気中のPM<sub>2.5</sub>の成分分析結果から、リセプターモデルのCMB法を用いて港湾地域における船舶の寄与割合について試算した。





### 3.4 健康への影響

PMによる健康影響は、PMの粒径によって異なる。一般に、粒径が10 μmより大きい粒子は、呼吸により鼻から入っても大部分は鼻腔の粘膜に捕捉されるが、10 μm以下の小さな粒子は気管に入りやすく、健康上有害な影響を及ぼす。このため、わが国では、粒径10 μm以下の粒子を浮遊粒子状物質(SPM)と定義し、大気環境基準の設定や大気汚染防止法による規制・監視が行われてきた。粒径10 μm以下の粒子を対象とした根拠は下記のとおりであり、基準値そのものは当時の知見をもとに、呼吸器系器官に対する長期的影響および短期的影響を考慮して設定されている(「浮遊粒子状物質に係る環境基準の設定について」(昭和47年環大企27号))。

- (1) 粒径10 μm以下の粒子は、沈降速度が小さいため大気中に比較的長期間滞留すること。
- (2) 粒径10 μm以下の粒子は、そのほとんどが気道又は肺胞に沈着し、人の健康上有害な影響を与えること。

一方、その後のPMによる健康影響に関する研究・知見の集積によって、PMと呼吸器系疾患や循環器系疾患、発がん性、アレルギー性喘息、花粉症等の様々な健康影響との関連性が懸念されるようになり、その原因として微小粒子が注目されるようになった。これは、粗大粒子と微小粒子の成分組成の違いと、粒径が小さい粒子ほど肺の奥に達しやすく、かつ体外から排除されにくいことによる。粗大粒子は自然由来の物質が多く、人体に有害な物質が少ない一方で、微小粒子は、粒子が小さいため、気道や肺に沈着しやすく、成分組成も人為的な燃焼起源の粒子、例えばディーゼル排気微小粒子(DEP)や硫酸塩、硝酸塩などの人体に有害な物質が多く含まれている。このため、PMによる健康影響は微小粒子が主な原因であり、「今後の自動車排出ガス低減対策のあり方について」(平成12年11月1日自動車排出ガス専門委員会第四次報告)においても、微小粒子による発がん性、気管支ぜん息、花粉症等の健康影響との関連が懸念されるとの見解が示された。

近年は、さらに小さな領域の超微小粒子(0.1 μm以下、図3.2-1)による健康影響が注目されている。この領域は、ナノ粒子あるいはPM0.1とも呼ばれ、粒径が小さいため肺に長く沈着する割合が高いこと、沈着した粒子は毛細血管などに入り全身に影響を及ぼす可能性があることなどの健康影響が懸念されており、生体影響や大気中の計測方法などについて日本を含め各国で研究が進められている。

また、環境省では、大気中における微小粒子状物質(PM<sub>2.5</sub>)に係る健康影響評価について検討するため、「微小粒子状物質健康影響評価検討会」を平成19年度に設置し、平成20年4月に「微小粒子状物質健康影響評価検討会報告書」がとりまとめられた。報告書の概要を以下に示す。

- ・ 呼吸器系・循環器系の死亡リスクの増加、症状・機能の変化及び入院・受診数の増加に関する疫学知見から、粒子状物質において従前から認められている呼吸器系の健康影響が微小粒子状物質においてもみられた。
- ・ 新たに微小粒子状物質による循環器系や肺がんの健康影響がみられた。
- ・ 大気中粒子状物質の曝露に関して観察される相対リスクは他の曝露要因と比較して必ずしも大きくはないものの、公衆衛生の観点から微小粒子による健康影響を軽視

することはできない。

- ・ 今回の検討で判明した微小粒子に関する様々な影響について、さらに定量的な評価に関する考察を進める必要がある。

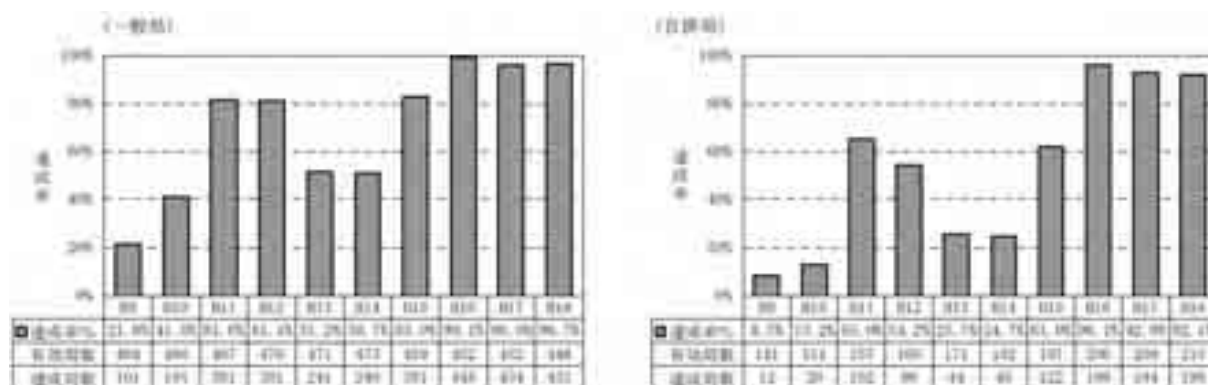
また、曝露評価の分野に関して、以下の点に課題があることが示され、これらの課題についても十分に検討を行うべきであると報告している。

- ① 日本は米国と異なり湿度が高い環境にあり、正確な濃度測定を行うためには、秤量測定法や自動測定法に関する測定精度の改良に関する取組みを行う必要がある。
- ② 微小粒子の生成機構は、一次生成のみならず光化学反応による二次生成や東アジアからの越境輸送も考慮する必要がある、また、排出源も多岐にわたる。定量的評価には、微小粒子の生成機構や大気中の組成解明及び排出源の把握に関する情報の整理を行ったうえで、現時点における曝露評価を実施する必要がある。

### 3.5 我が国における SPM 環境基準の達成状況

我が国では SPM を対象に 1972 年(昭和 47 年)に大気汚染に係る環境基準「1 時間値の 1 日平均値が  $0.10 \text{ mg/m}^3$  以下であり、かつ、1 時間値が  $0.20 \text{ mg/m}^3$  以下であること」が定められている。「自動車から排出される窒素酸化物および粒子状物質の特定地域における総量の削減等に関する特別措置法」(平成 4 年法律第 70 号)(以下、「自動車 NOx・PM 法」と言う。)の対象地域における SPM の環境基準の達成率は図 3.5-1 に示すとおりであり、平成 15 年度以降大きく改善されたものの、全局達成には至っていない。平成 14 年 10 月には、自動車 NOx・PM 法に基づいてディーゼルトラック等に対する車種規制(「3.7 我が国における PM に対する規制状況」参照)が施行されており、このようなディーゼル車に対する規制強化が平成 15 年度からの SPM 濃度の改善につながったと考えられる。

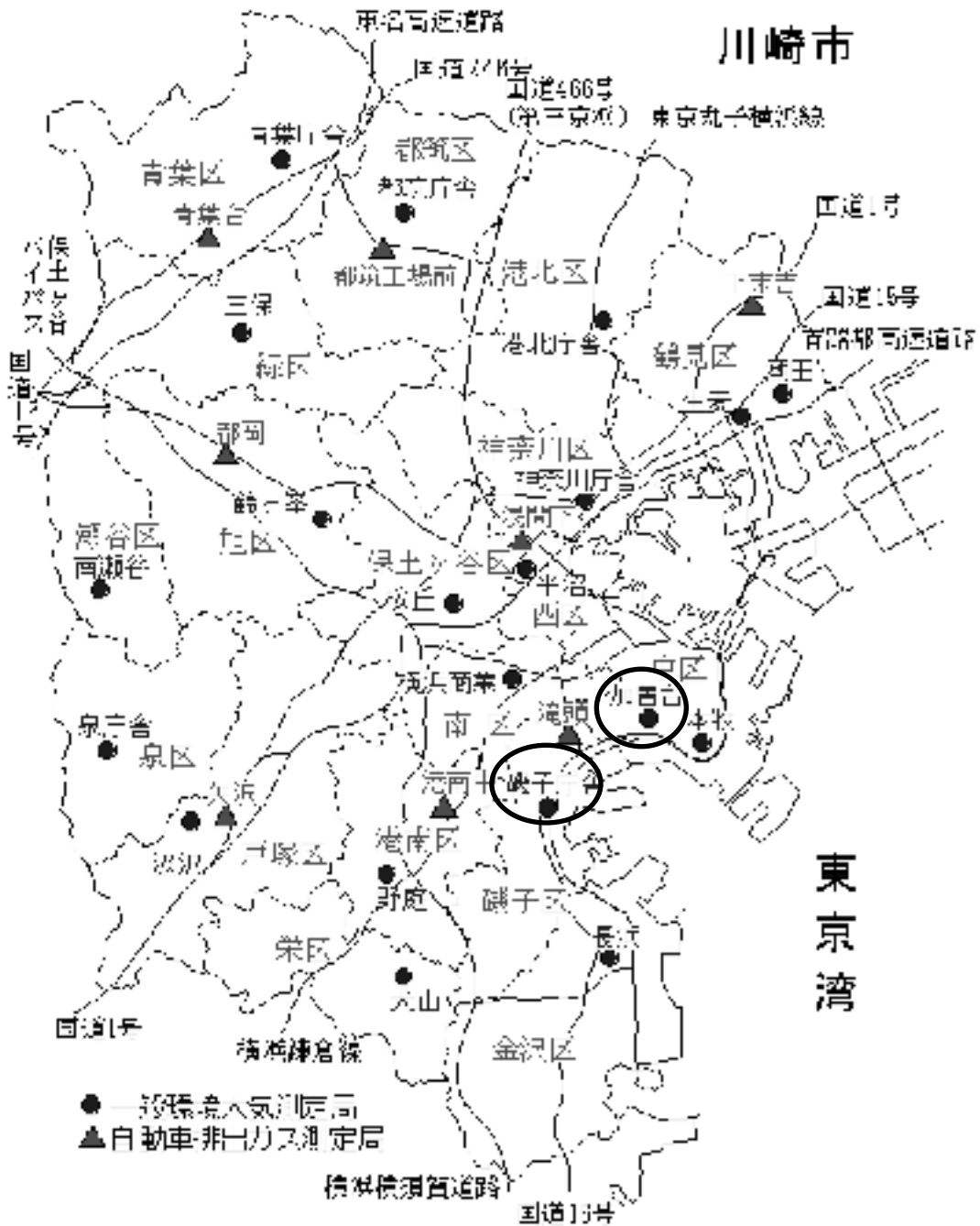
なお、SO<sub>2</sub> についてはほぼ 100 %の環境基準達成率で推移しているが、NO<sub>2</sub> については、SPM と同様に基準を達成していない測定局があり、自動車に対する規制強化が行われている。



出典) 「平成 18 年度大気汚染状況について」(2007 年 11 月、環境省水・大気環境局)

図 3.5-1 自動車 NOx・PM 法の対象地域における SPM の環境基準達成率の推移

横浜市が市内 28 局(一般局 : 20 局、自排局 8 局、図 3.5-2 参照)で行っている常時監視結果によると、平成 16 年度においては、一般局の磯子区総合庁舎を除いて環境基準が達成されている。また、一般局中で 1 時間値が環境基準  $0.20 \text{ mg/m}^3$  を超えた局は、中区加曾台と磯子区総合庁舎の 2 局のみである(表 3.5-1、表 3.5-2)。このように、平成 16 年度においては、道路周辺に存在する自排局において環境基準が達成されているにもかかわらず、港湾の近辺において達成されていない一般局が存在した。固定発生源および自動車の規制が強化されていることを考慮すると、船舶からの寄与が近年相対的に増加している可能性が考えられる。



出典) 「平成 16 年度の大気汚染状況について」(横浜市環境創造局環境科学研究所)

図 3.5-2 横浜市による大気汚染常時監視測定局の位置

表 3.5-1 SPM の環境基準適合局数の推移

(適合局数/全測定局数)

年	平成 8	9	10	11	12	13	14	15	16
一般局	2/19	5/20	4/20	17/20	5/20	19/20	16/20	13/20	19/20
自排局	0/8	0/8	0/8	4/8	3/8	4/8	3/8	3/8	8/8

備考 一般局：一般環境大気測定局  
自排局：自動車排出ガス測定局

出典) 「平成 16 年度の大気汚染状況について」(横浜市環境創造局環境科学研究所)

表 3.5-2 一般局における SPM の環境基準の達成状況(平成 16 年度)

測定局	年平均値	1 日平均値の年間 2%除外値	短期的評価		長期的評価		
			1 時間値が 0.20 mg/m <sup>3</sup> を超えた 時間数	日平均値が 0.10 mg/m <sup>3</sup> を超えた日 数	2 日連 続超過 の有無	長期的評価に よる 0.10 mg/m <sup>3</sup> を超えた日数	環境基準 の適否
			時間	日		日	適○・否×
	mg/m <sup>3</sup>	mg/m <sup>3</sup>					
鶴見区潮田交流プラザ	0.032	0.071	0	1	無	0	○
神奈川区総合庁舎	0.032	0.070	0	0	無	0	○
港北区総合庁舎	0.029	0.061	0	0	無	0	○
中区加曽台	<u>0.031</u>	<u>0.069</u>	<u>3</u>	<u>1</u>	無	<u>0</u>	<u>○</u>
磯子区総合庁舎	<u>0.030</u>	<u>0.074</u>	<u>7</u>	<u>2</u>	有	<u>2</u>	<u>×</u>
保土ヶ谷区桜丘高校	0.027	0.065	0	0	無	0	○
西区平沼小学校	0.027	0.063	0	1	無	0	○
金沢区長浜	0.020	0.045	0	0	無	0	○
鶴見区生麦小学校	0.030	0.068	0	0	無	0	○
中区本牧	0.029	0.059	0	0	無	0	○
戸塚区汲沢小学校	0.030	0.066	0	0	無	0	○
港南区野庭中学校	0.033	0.070	0	0	無	0	○
旭区鶴ヶ峯小学校	0.029	0.060	0	0	無	0	○
瀬谷区南瀬谷小学校	0.034	0.067	0	0	無	0	○
南区横浜商業高校	0.029	0.068	0	0	無	0	○
栄区犬山小学校	0.027	0.063	0	0	無	0	○
緑区三保小学校	0.029	0.062	0	0	無	0	○
青葉区総合庁舎	0.029	0.062	0	0	無	0	○
都筑区総合庁舎	0.027	0.060	0	0	無	0	○
泉区総合庁舎	0.029	0.066	0	1	無	0	○

備考：SPM の環境基準評価

短期的評価：1 時間値の 1 日平均値が 0.10 mg/m<sup>3</sup> 以下であり、かつ、1 時間値が 0.20 mg/m<sup>3</sup> 以下であること。

長期的評価：1 年間の測定を通じて得られた 1 日平均値のうち、高いほうから数えて 2% の範囲にある測定値を除外した後の最高値(1 日平均値の年間 2% 除外値)を環境基準と比較して評価を行う。ただし、上記の方法に関わらず環境基準を超える日が 2 日以上連続した場合には非達成とする。

出典) 「平成 16 年度の大気汚染状況について」(横浜市環境創造局環境科学研究所)

### 3.6 規制による PM 排出量の変化

PM の排出量のうち、人為起源による PM の排出量の推定例として、神奈川県における PM 排出量の推計値を表 3.6-1 に示す。平成 17 年度推計値によると、一次粒子は 5,800 トン、二次粒子は 14,440 トンであり、一次粒子が約 3 割、二次粒子が約 7 割を占めている。都市域では、一次粒子の主要な発生源はディーゼル車であったが、近年の排出ガス規制の導入により削減が進んでおり、自動車の一次粒子排出推計量は平成 9 年度の 2,960 トン(12.4 %)に対し、平成 17 年度では 980 トン(4.8 %)と小さくなっている。これは、後述するように、自動車 NOx・PM 法などによる規制の効果である。一方、船舶の一次粒子排出推計量は平成 17 年度においても同程度と推定され、相対的に船舶からの寄与が大きくなってきている。

他方、二次粒子については、平成 9 年度の 15,480 トン(65.1 %)に対し、平成 17 年度では 14,440 トン(71.3 %)と削減量は約 7 %となっており、同時期の一次粒子の削減量 30 %と比べ少ない。このように二次粒子対策は陸上発生源を含め遅れており、相対的に二次粒子の影響が大きくなっている可能性がある。

表 3.6-1 神奈川県における PM 排出量の推計値

発生源区分		平成 9 年度		平成 17 年度	
		排出量 (トン/年)	構成比 (%)	排出量 (トン/年)	構成比 (%)
一次粒子 排出量	自動車	2,960	12.4	980	4.8
	その他(工場・事業場、 家庭、船舶等)	5,340	22.5	4,820	23.8
	小計	8,300	34.9	5,800	28.7
二次粒子生成量		15,480	65.1	14,440	71.3
一次・二次粒子計		23,780	100.0	20,240	100.0

出典)「神奈川県自動車排出窒素酸化物および自動車排出粒子状物質総量削減計画」(2003 年 7 月、神奈川県)より作成

### 3.7 我が国における PM に対する規制状況

我が国では、PM に対する規制は、かつては工場・事業場に対するばいじん対策が主であったが、平成 5 年からディーゼル車に対する排出ガス規制が始まり、以降、規制値が順次強化されている。また、大都市地域において環境基準の達成率が特に低いことから、自動車 NOx・PM 法が平成 13 年に制定され、首都圏・中部圏・近畿圏の一部を対象に排出基準に適合しない車両の登録を規制する措置が導入された。このような排出規制や自動車 NOx・PM 法による規制に加え、首都圏では条例により、自動車 NOx・PM 法の適用を受けない地域からの流入車をも含め、排出基準に適合しない自動車の運行を禁止する独自の制度が設けられている(表 3.7-1 参照)。このように自動車に対する規制は、排出規制値の設定、指定地域における全国一律規制よりも厳しい上乗せ規制の設定による地域規制、さらに規制適用外の地域からの流入規制という流れで、移動発生源に対しても厳しい規制の枠組みがつけられている。

表 3.7-1 自動車 NOx・PM 法による車種規制と自治体の条例による運行規制の概要

	自動車 NOx・PM 法による車種規制	一都三県における条例による運行規制
対象地域	8 都道府県(埼玉県、千葉県、東京都、神奈川県、愛知県、三重県、大阪府および兵庫県)の一部	埼玉県、千葉県、東京都、神奈川県の全域(島部を除く)
規制物質	NOx、PM	PM
対象自動車	対象地域内に車検登録されている車両	対象地域内を運行する自動車
対象車種	トラック、バス、特種車、ディーゼル乗用車	トラック、バス、特種車
規制開始時期	平成 14 年 10 月	平成 15 年 10 月

出典) 「自動車 NOx・PM 法の車種規制について」(2005 年 9 月、環境省・国土交通省)より作成

さらに、排出ガス中の NOx・PM 除去のための排気後処理装置を十分に機能させるためには軽油中の硫黄分の低減が必要なことから、燃料規制が導入され、軽油中の硫黄分は平成 15 年には当時の基準の 500 ppm から 50 ppm へ、さらに平成 19 年からは 10 ppm へと大幅に低減された。

PM に対する規制は、国際的にも強化される方向にあり、WHO(World Health Organization : 世界保健機関)では、平成 18 年に PM<sub>2.5</sub>および PM<sub>10</sub>に対する大気質指針を初めて設定した。また、米国では平成 18 年 12 月から PM<sub>2.5</sub>のより厳しい大気環境基準が施行されている。

一方、船舶に対する規制は、「海洋汚染等および海上災害の防止に関する法律」(昭和 45 年法律第 136 号)に基づき、平成 17 年 5 月から、NOx 排出規制および燃料規制(硫黄分の規制)が導入された。これは、マルポール 73/78 条約附属書 VI の内容を取り込んだものである。しかし、附属書 VI においても PM は規制外であり、二次粒子対策に結びつく燃料規制については、実態の硫黄分 2.8%に対して規制値は 4.5%と高く実質的な規制効果は非常に小さいと考える。



### 3.8 IMOにおける規制の動向

IMOにおいては、2006年4月から附属書VIの見直しにばら積み液体と気体物質に関する小委員会(Bulk Liquids and Gases; BLG)にて開始され、PM規制の追加およびNOx規制の強化について審議されてきた。2008年4月のMEPC57(IMO第57回海洋保護委員会)において、NOx規制、SOxおよびPM規制案が審議され、最終化された改正内容を表3.8-1に示す。

今回の改正の特徴は、燃料中硫黄分の削減によるPM規制効果がIMOにおいて正式に認められ、新たにPM規制として追加された点である。また、SOxおよびPM規制、NOx規制ともに、全海域共通の規制強化に加え、「排出規制海域(Emission Control Area; ECA)」を設定して地域の汚染状況に応じてさらに厳しい規制を行う規制手法が採用された。さらに、NOx規制については、従来、新造船のみを対象としていたが、今回の改正により現存船に対する規制が新たに導入された。

MEPC57にて最終化された附属書VI改正案については、2008年10月開催予定のMEPC58で採択のための審議が行われることになっている。参考として、IMOにおけるこれまでの排出ガス規制の検討開始までの背景を表3.8-2に、検討の経緯を表3.8-3に示す。

なお、MEPC57ではこのほか、オゾン層破壊物質、VOC、排出ガス洗浄装置の規制について附属書VIの改正が議論されており、その概要を以下に示す。

#### オゾン層破壊物質

船舶業界へのハロン供給が今後不足することが見込まれるため、船舶業界のハロンへの依存を今後縮小していくことを各国に周知するための海上安全委員会(Maritime Safety Committee; MSC)と海洋環境保護委員会(Marine Environment Protection Committee; MEPC)の共同回覧文書案がMEPC57にて策定された。同文書案は次回MSCにて検討される予定。同文書案では、ハロンの供給不足に関して各国政府が自国の船舶業界に勧告するとともに、自国のハロン使用状況をモントリオール議定書事務局に報告することを求めている。

#### VOC(Volatile Organic Compounds: 揮発性有機化合物)

附属書VIの規則15(6)では、原油タンカーは管轄機関により承認されたVOC管理計画を策定・実行することが定められている。BLG12にて策定された「VOC管理計画の策定のためのガイドライン案」が現行案通りMEPC57にて承認され、今後MEPC58にて採択される予定である。

#### 排出ガス洗浄装置

BLG及び大気汚染WGにより策定された改正版「排出ガス洗浄装置のガイドライン」がMEPC57にて採択された。なお同ガイドラインの洗浄水排水基準に関しては海洋環境保護の科学的事項に関する国連の専門家合同グループ(Group of Experts of Scientific Aspects of Marine Environmental Protection; GESAMP)により今後レビューされ、必要に応じて改正されていく予定である。

表 3.8-1 改正後の附属書 VI の SOx および PM 規制、NOx 規制の内容

●SOx および PM 規制

区分	対象物質	内容
改正前	SOx	SOx 規制として燃料中硫黄分を削減 一般海域 4.50%未満 SOx 排出規制海域 1.50%未満
改正後	SOx、PM	新たに PM 規制を追加し、SOx・PM 規制として燃料中硫黄分を削減 一般海域 2012年1月1日以降 3.50%未満 2020年1月1日以降 0.50%未満(注) 排出規制海域 2010年3月1日以降 1.00%未満 2015年1月1日以降 0.10%未満  (注)2018年に硫黄分0.5%の燃料の需要供給状況等をレビューし、一般海域の0.5%規制開始時期を2020年とするか、2025年とするか決定する。

●NOx 規制

区分	対象	内容
改正前 (現行規制)	新造船	Tier1：全海域に適用 ・規制値(NOx 排出係数)：定格回転数(n)ごとに設定 130rpm 未満 : 17.0 g/kW・時 130rpm 以上 2,000rpm 未満 : $45.0 \times n^{-0.2}$ g/kW・時 2,000rpm 以上 : 9.8 g/kW・時
改正後	新造船	Tier2：全海域に適用(2016年1月1日以降は排出規制海域を除く) ・開始時期：2011年1月1日以降 ・規制値(NOx 排出係数)：定格回転数(n)ごとに設定 130rpm 未満 : 14.4 g/kW・時 (現行規制 15.5%減) 130rpm 以上 2,000rpm 未満 : $44 \times n^{-0.23}$ g/kW・時(現行規制 15.5~21.8%減) 2,000rpm 以上 : 7.7 g/kW・時 (現行規制 21.8%減)  Tier3：排出規制海域に適用(注1) ・開始時期：2016年1月1日以降(注2) ・規制値(NOx 排出係数)：定格回転数(n)ごとに設定 130rpm 未満 : 3.4 g/kW・時 (現行規制 80%減) 130rpm 以上 2,000rpm 未満 : $9 \times n^{-0.2}$ g/kW・時 (現行規制 80%減) 2,000rpm 以上 : 2.0 g/kW・時 (現行規制 80%減)  (注1)長さ24m以下のリクリエーション用船舶、及び合計推進出力が750kw以下の達成困難と認められた船舶に搭載されるエンジンは免除。 (注2)2012~2013年に、Tier3規制を実行するための技術開発状況をレビューし、必要であればTier3規制開始時期を調整する。
	現存船	規制対象：1990年1月1日から1999年12月31日に建造された現存船のエンジンのうち、シリンダー容積90L以上かつ出力5,000kW以上 規制値 : Tier1 規制 開始時期：主管庁が規制適合手法を認証し、IMOに通報してから1年以後の最初の定期検査

表 3.8-2 IMO における SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub> 規制の検討開始までの背景

年	内容
1960 年代 終り頃	スウェーデン等の湖・森林で酸性雨による汚染 (英・東独・ポーランド等の工業活動が原因)
1972 年	国連人間環境会議開催(ストックホルム)
1972 年	オスロ条約(船舶及び航空機からの投棄による海洋汚染の防止のための条約)採択
1974 年	パリ条約(陸上源からの海洋汚染の防止のための条約)採択
1974 年	ヘルシンキ条約(バルト海海洋環境保護条約)採択

表 3.8-3 (1) IMO における SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub> 規制の経緯

年月	会議	内容
1988 年 9 月	MEPC26	船舶による大気汚染問題を取り上げることを決定
1990 年 3 月	MEPC29	ノルウェーから汚染に関する調査報告書が提出
1990 年 11 月	MEPC30	船舶からの大気汚染物質削減の目標レベル(NO <sub>x</sub> 30%減、SO <sub>x</sub> 50%減)が定められた
1991 年 7 月	MEPC31	MARPOL73/78 条約新附属書策定に向けたアクションプラン作成
1991 年 9 月	BCH21	船舶からの大気汚染防止に関する具体的、実質的な審議開始
1994 年 9 月	BCH24	BCH での検討がほぼ終了 サルファーキャップ等 BCH で決定できない事項は MEPC での審議に戻された
1994 年 10 月	MEPC36	上記未決事項について MEPC で審議開始
1997 年 9 月	採択会議	1997 年議定書が採択され、附属書 VI が追加
2004 年		5 月 18 日サモアが附属書 VI を批准し、15 カ国の発効要件が満たされた
2005 年		5 月 19 日附属書 VI 発効
2005 年 7 月	MEPC53	附属書 VI の改正案策定作業開始に合意。BLG へ 2 年間の作業期間として、船舶からの NO <sub>x</sub> ,SO <sub>x</sub> ,PM に関して包括的な見直し作業が付託。 「北海」を SECA に追加することが採択
2006 年 4 月	BLG10	BLG にて附属書 VI の見直しを開始、検討スケジュールの再検討が行われ、作業期間の 1 年間の延長を検討 <ul style="list-style-type: none"> <li>・ NO<sub>x</sub> 規制 2010 年 Tier2 規制、2014~15 年 Tier3 規制を目標 グローバル規制を念頭 現存船に対する規制の必要性を認識</li> <li>・ SO<sub>x</sub> 規制 Global Cap の数値の議論なし</li> <li>・ PM 規制 PM 削減のためには燃料中硫黄分削減が必須であることを認識</li> </ul>

2006年10月	MEPC55	BLG10の報告
----------	--------	----------

表 3.8-3 (2) IMOにおけるSOx、NOx規制の経緯

年月	会議	内容
2006年11月	BLG WGAP-1	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ NOx 規制の見直し 規制強化(Tier2 および Tier3 規制値) 現存船への規制について検討 地理的規制導入の検討</li> <li>・ SOx &amp; PM 規制の見直し 4つのオプションを審議 A案：現行維持 B案：特別海域のみ規制強化 C案：全海域の規制強化 C2案：C案で、船内処理装置の場合、残渣油使用</li> </ul>
2007年4月	BLG11	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ NOx 規制の見直し 2段階の規制強化(Tier2 および Tier3 規制値)を確認。規制値は未定。 現存船への規制案(ノルウェー、デンマーク、米国案)を検討</li> <li>・ SOx &amp; PM 規制の見直し 以下の2案を加えた6つのオプションについて審議 米国案：沿岸海域で規制強化 BIMCO案：港湾・河口付近、その他の海域を分けて規制</li> <li>・ BLG12で改正案の最終化、MEPC57で承認を求める旨のスケジュールがIMO事務局より示された</li> </ul>
2007年7月	MEPC56	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ BLG11の検討スケジュール変更を承認した</li> <li>・ SOx 規制オプションについて、科学的見地から検討するための専門家会合グループ(SG)が設置された</li> </ul>
2007年10月	BLG WGAP-2	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ NOx 規制の見直し Tier2 および Tier3 の規制値、現存船への規制について審議</li> <li>・ SOx &amp; PM 規制の見直し</li> </ul>

表 3.8-3 (3) IMO における SOx、NOx 規制の経緯

年月	会議	内容
2008 年 2 月	BLG12	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ NOx 規制の見直し Tier2 規制案および Tier3 規制案(指定海域)が合意された。 現存船へ Tier1 規制値を適用する 2 つのオプションを作成。 (1) 規制開始時の対象エンジンに規制適合を求める方法 (2) 削減キットができたエンジンから規制する方法</li> <li>・ SOx &amp; PM 規制の見直し 3 つのオプションを作成し、MEPC57 で更に議論を行い最終化すること で合意。 PM 独自の規制は設けず、燃料中硫黄分削減により PM を削減 (1) 一般海域      2012 年まで 4.5%                          2012 年以降 1.0%                          2015 年以降 0.5%     排出規制海域 2012 年に廃止 (2) 一般海域      4.5%     排出規制海域 2012 年まで 1.5%                          2012 年以降 0.1% (3) 一般海域      2012 年まで 4.5%                          2012 年以降 3.0%     排出規制海域 2010 年まで 1.5%                          2010 年以降 1.0%                          2015 年以降 0.5%      小特別海域(沿岸 24 海里内の IMO 指定海域) 0.1%</li> </ul>
2008 年 4 月	MEPC57	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 附属書 VI の改正内容が最終化された</li> <li>・ NOx 規制の見直し 新造船新造船のエンジンに対する規制     2011 年以降 Tier2：現行規制(Tier1)の 15.5～21.8 %削減     2016 年以降 排出規制海域 Tier3：現行規制(Tier1)の 80 %削減                          一般海域 Tier2：現行規制(Tier1)の 15.5～21.8 %削減 現存船のエンジンに対する規制     対象:1990 年以降のシリンダー容積 90L 以上出力 5,000kW 以上のエンジン     規制値:Tier1 規制     時期:主管庁が規制適合手法を認証し、IMO に通報してから 1 年以         後の最初の定期検査</li> <li>・ SOx &amp; PM 規制の見直し     一般海域      2012 年以降      3.5%                          2020/25 年以降 0.5%     排出規制海域 2010 年以降      1.0%                          2015 年以降      0.1%</li> </ul>
2008 年 10 月	MEPC58	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 附属書 VI 改定案を採択の予定</li> </ul>

※会議名の正式名称は以下のとおり。

- MEPC            : 海洋環境保護委員会
- BLG             : バラ積み液体・気体小委員会
- BLG WGAP    : バラ積み液体・気体小委員会大気汚染作業グループ(中間会合)
- BCH            : バルク・ケミカル小委員会

## 4. 外洋航路における PM に関するシミュレーション

### 4.1 シミュレーションの概要

ここでは東アジア域の外洋を航行する船舶の排出ガスに起因する PM の影響範囲を検討するため、九州大学応用力学研究所による RAMS/CMAQ 連携システム(大気質の移流拡散モデル)を用いてシミュレーションを実施し、船舶からガスとして排出された NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub> が大気中で化学反応により粒子化した二次粒子の挙動を調査した。

#### 4.1.1 モデルの概要

外洋航路におけるシミュレーションには、RAMS/CMAQ 連携システム(図 4.1-1、表 4.1-1 参照)による大気汚染物質の長距離輸送シミュレーションシステムの計算結果(九州大学応用力学研究所 鶴野研究室作成)を参考として活用し、代表的な外洋の航路帯からの船舶排出ガスによる影響について検討を行った。

CMAQ(Community Multiscale Air Quality model)は、アメリカ環境保護庁(EPA)が 1998 年にリリースした大気シミュレーションモデルで、大気中の様々な大気汚染物質を、汚染物質相互の影響も含めて同時に取扱い、また、それらに関係する多くの物理・化学過程を含めて取り扱うことにより現象を解明することを目的として作成されたモデルで、広域での大気汚染シミュレーションが可能である。CMAQ では数種の気相反応系モデル、エアロゾル反応系モデルが用意されており、今回用いた CMAQ(ver.4.3)では、表 4.1-2 に示すモデルが選択可能である。ただし、今回用いた AERO2 モデルを含め、AERO3 モデルおよび MADRID モデルでも、ガス状物質の SO<sub>x</sub>・NO<sub>x</sub> と粗大粒子である海塩粒子の反応はモデルに取り込んでいない。

なお、このモデルを用いた計算結果については、日本周辺での大気の清浄な地点(隠岐、辺戸、小笠原、八丈島等)の観測結果と対比して検討され、SO<sub>2</sub>、O<sub>3</sub>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>等について、その変動は良い再現性のあることが確認されている(図 4.1-2～図 4.1-3)。

また、このモデルで用いられた東アジア域の人為・自然起源の大気汚染物質排出量のうち、燃料燃焼起源については、Streets et al.(2003a)<sup>1)</sup>のデータを用いており、バイオマス燃料による発生量については Takemura et al.(2000)<sup>2)</sup>および Streets et al. (2003b)<sup>3)</sup>などのデータを用いている。

なお、本調査では船舶の影響を、船舶起源の他に人為起源・自然起源を含めた計算結果(①)から、船舶起源を除いた人為起源・自然起源の計算結果(バックグラウンド濃度：②)を引いて求めている(①－②)。そのため、バックグラウンド濃度が清浄である外洋上では、付加された船舶排出ガスが環境中の汚染物質を消費する反応が進む場合もあるため、船舶の影響(①－②)が負として計算されることもある。

1) Streets, D.G., T.C. Bond, G.R. Carmichael, S.D. Fernandes, Q.Fu, D.He, Z.Klimont, S.M. Nelson, N.Y. Tsai, M.Q. Wang, J.-H. Woo, and K.F. Yarber : An inventory of gaseous and primary aerosol emissions in Asia in the year 2000, *J. Geophys. Res.*, 108(D21), 8809, doi: 10.1029/2002JD003093, (2003a).

2) Takemura, T., H. Okamoto, Y. Maruyama, A. Numaguti, A. Higurashi, and T. Nakajima : Global three-dimensional simulation of aerosol optical thickness distribution of various origins. (2000).

3) Streets, D.G., K.F. Yarber, J.-H. Woo and G.R. Carmichael : Biomass burning in Asia : Annual and seasonal estimates and atmospheric emissions., *Global Biogeochem. Cycles*, 17(4), 1099, doi:10.1029/2003GB002040, (2003b).

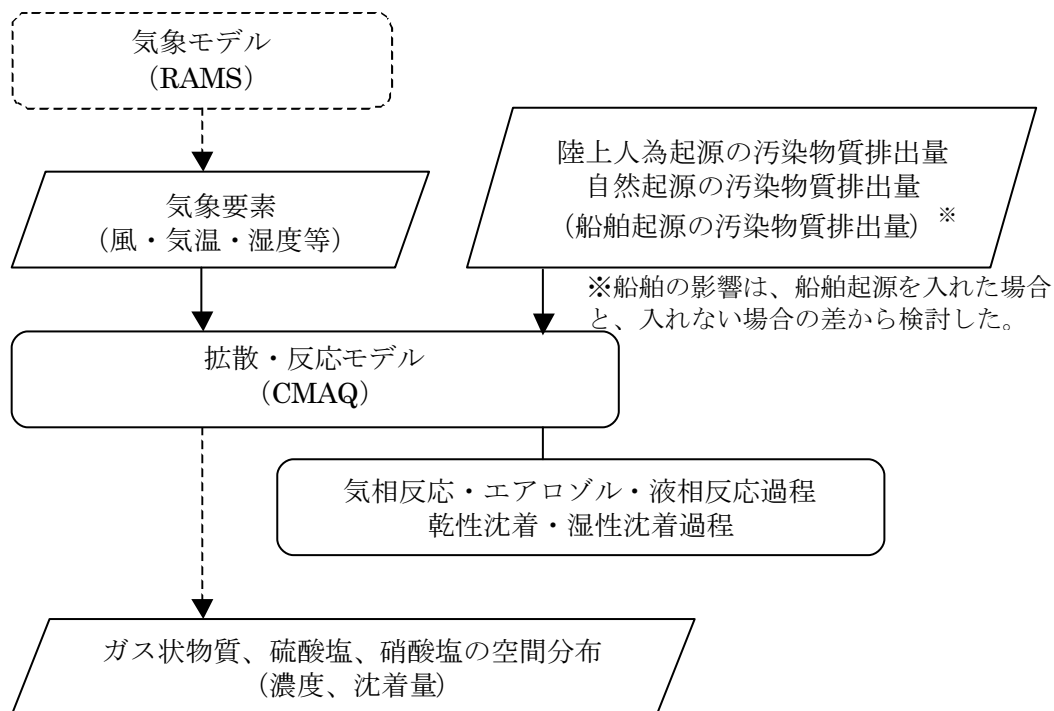


図 4.1-1 RAMS/CMAQ 連携システムの概要図

表 4.1-1 RAMS/CMAQ 連携システムの概要

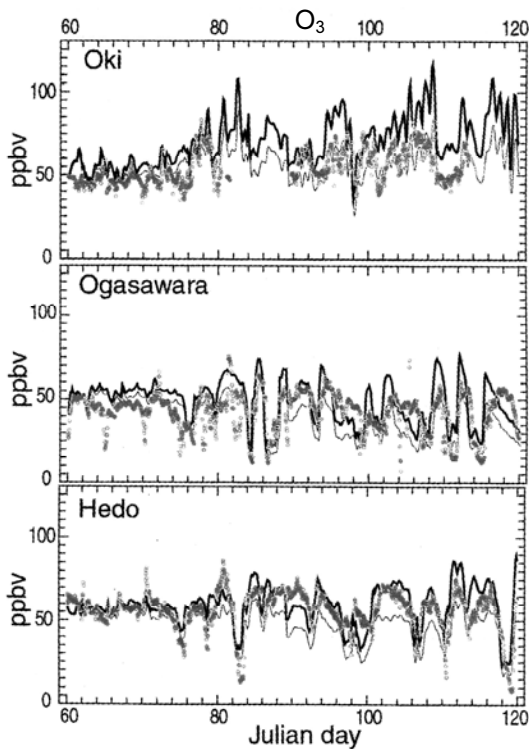
	モデル名	モデルの概要
気象モデル	RAMS	コロラド州立大学が開発した圧縮性非静力学方程式をベースに開発された領域気象モデルで、3次元の気象成分(温度、水蒸気、風速、風向、降水、降雪、雲など)の時間変化をシミュレートする。 この気象モデルでの計算範囲は東西 8,000 km、南北 7,200 km (80 km 格子)である。鉛直方向には上空 23 km までの 22 層に分割して計算している。
気相反応系モデル	SAPRC-99	214 の反応式、72 の反応成分を用いたモデル。
エアロゾル反応系	AERO3	大気エアロゾルの発生、核形成、無機・有機成分の反応・凝縮・凝集を計算するモデルで、粒径分布は Aitken モード、accumulation モード、Coarse モードによる 3 つの対数正規分布の重ね合わせで表現されており、粒子生成、凝集、乾性・湿性沈着などのプロセスが含まれる。 なお、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$ については Aitken モードと accumulation モードで表現されている。
液相反応系	RADM	化学種の雲水への取り込み、ガス成分と雲水中の成分との間の気液平衡、粒子の雲水への取り込みを計算する。
乾性沈着スキーム	—	エアロゾルの乾性沈着速度は、動力学抵抗、分子粘性抵抗、重力沈降が考慮され、粒径別に乾性沈着速度が算出される。 ガスの乾性沈着速度は動力学抵抗、分子粘性抵抗、表面抵抗の 3 種類の抵抗から算出される。
湿性沈着スキーム	—	ガス状物質はヘンリー則に従って雲水・雨水に吸収され、エアロゾルは完全に雲水・雨水に吸収されると仮定する。湿性沈着量はこのようにして求められた物質の雲中濃度と降水強度を雲のライフタイム(1 時間)の間に積分することで計算する。

表 4.1-2 CMAQ (Ver4.3)で選択可能なモデル

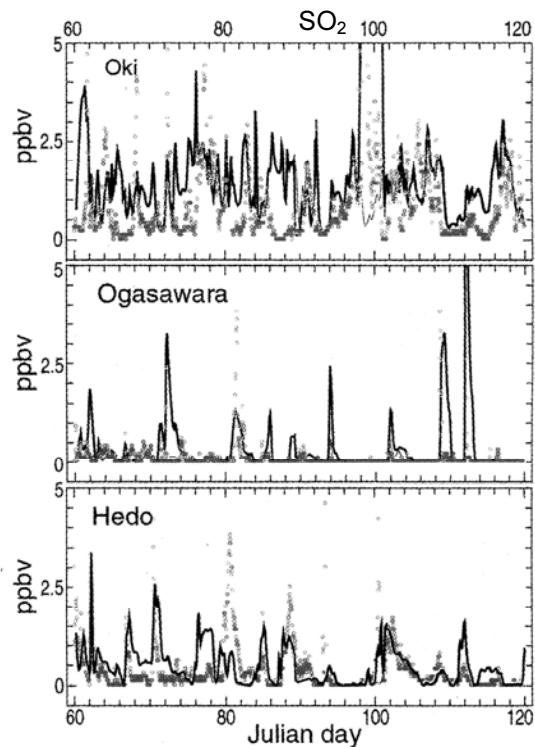
反応系	モデル
気相反応系	CBM-IV、RADM2、 <b>SAPRC-99</b>
エアロゾル反応系	AERO2、 <b>AERO3</b> 、MADRID

**太字**は今回用いたモデル





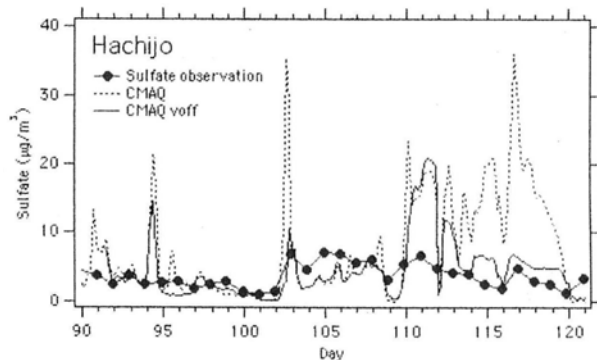
Comparison of observed and model simulated surface  $O_3$  concentration. Red symbols are EANET observation, thick line is CMAQ  $O_3$  corrected based on the  $O_3$  observation at Happo site, and thin line is the CMAQ  $O_3$  based on the default BCON setting.



Comparison of observed and model simulated surface  $SO_2$  concentration. Red symbols are EANET observation, thick line is CMAQ  $SO_2$  including the effect of eruption of Mt. Miyakejima-Oyama, and thin line is the CMAQ  $SO_2$  without the effect of eruption of Mt. Miyakejima-Oyama.

出典) 鶴野伊津志、大原利眞、管田誠治、黒川純一、古橋規尊、山地一代、谷本直隆、弓本桂也、植松光夫：RAMS/CMAQの連携システムによるアジア域の物質輸送シミュレーションの構築、大気環境学会誌、40(4)、148～164、(2005)。

図 4.1-2 観測値と計算結果の比較(左： $O_3$ 、右： $SO_2$ )



Comparison of observed and model simulated surface  $SO_4$  concentration (VMAP) for Hachijo island. Thick dashed line is CMAQ  $SO_4$  including the effect of eruption of Mt. Miyakejima-Oyama, and straight line is the CMAQ  $SO_4$  without the effect of eruption of Mt. Miyakejima-Oyama.

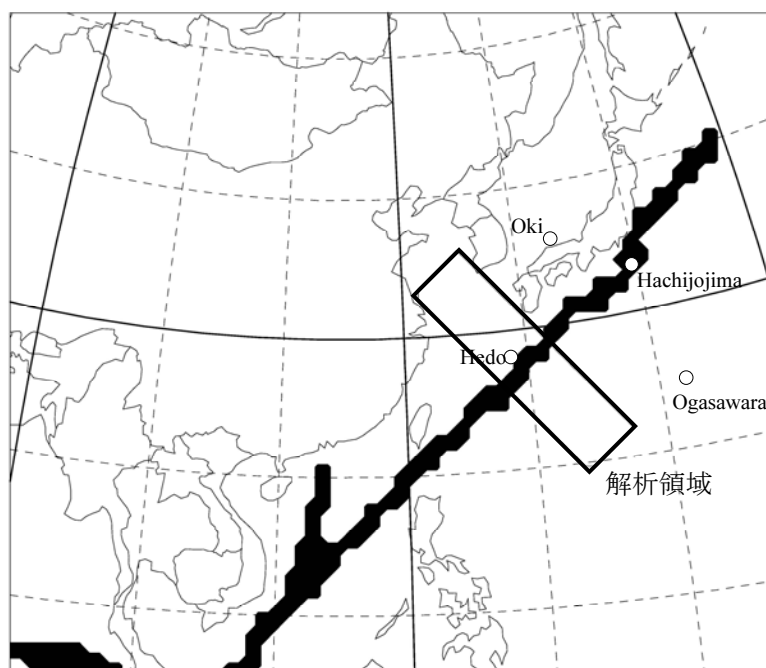
出典) 鶴野伊津志、大原利眞、管田誠治、黒川純一、古橋規尊、山地一代、谷本直隆、弓本桂也、植松光夫：RAMS/CMAQの連携システムによるアジア域の物質輸送シミュレーションの構築、大気環境学会誌、40(4)、148～164、(2005)。

図 4.1-3  $SO_4^{2-}$ の観測値と計算結果の比較

#### 4.1.2 解析領域

日本近海の主要外航航路を含む約 2,000 km × 500 km の領域を対象として、航行船舶からの PM の大気中濃度や沈着量について航路からの距離による変化等を解析した(図 4.1-4 参照)。この解析領域は、以下の理由により船舶起源の PM の海洋上での挙動を把握するのに適しているため選定した。

- ①大気汚染物質排出量はほとんどが船舶発生源であること
- ②陸上発生源から離れているため陸上からの影響が小さいこと
- ③領域内のほとんどが海面であるため気候条件が海洋性であること
- ④アジア・日本・北アメリカを結ぶ主要航路であり代表性があること





凡例	
	解析領域
	排出源として考慮した航路

図 4.1-4 調査領域

#### 4.1.3 解析期間

風向・風速、気温・湿度、降水量などの気象条件によって船舶からの PM の影響範囲が変化すると考えられるため、夏季と冬季について解析を行った。解析期間は以下のとおりである。

夏季 2000年8月16日～31日

冬季 2000年1月16日～31日

## 4.2 解析結果

### 4.2.1 物質収支に係る検討

#### (1) 船舶起源汚染物質の計算領域全体と解析領域における物質収支

船舶起源の SO<sub>x</sub> および NO<sub>x</sub> の計算領域全体と解析領域における物質収支は図 4.2-1 に示すとおりである。

8月に計算領域全体の物質収支が100%を超えているが、これは計算領域外の発生源からの寄与が加わっているためと思われる。

解析領域における SO<sub>x</sub> の物質収支は、8月では約80%、1月では約40%、NO<sub>x</sub> の物質収支は8月では約85%、1月では約30%となっている。解析領域における SO<sub>x</sub> の物質収支が冬季で少なくなっているが、計算領域全体でも同様の傾向が見られることから、アジア地域の特性であると考えられる。

なお、解析領域では航路帯を挟んだ約1,000 kmの領域を対象として物質収支を調査したが、当然航路帯と平行方向の領域外へ出て行く物質や領域外から入ってくる物質がある。このため、解析領域の物質収支は、あくまでも航路帯と平行方向に解析領域外へ出て行く物質と入ってくる物質が同量であると仮定した時のものである。

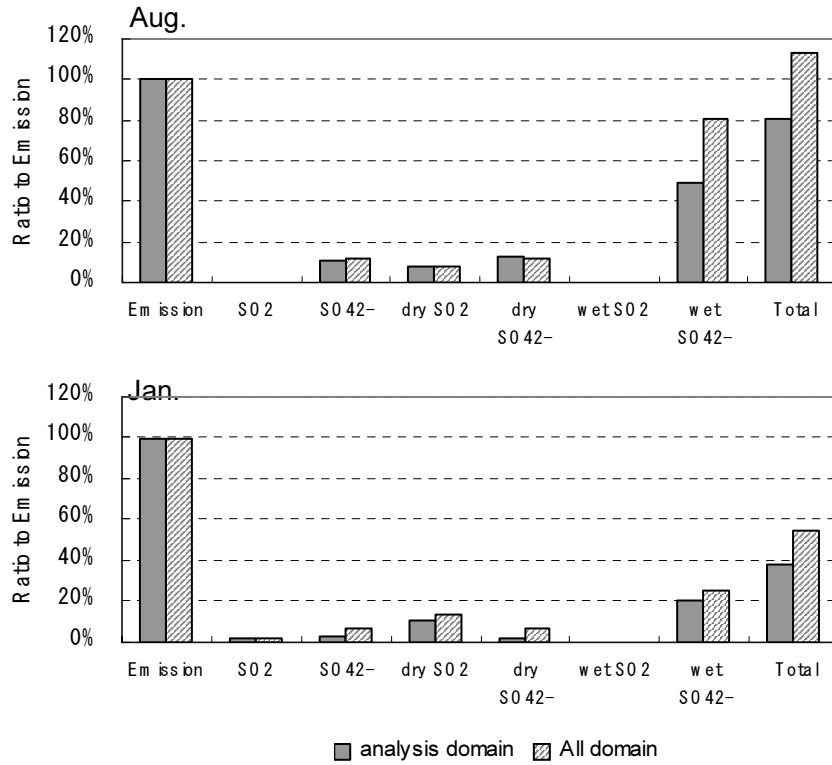


図 4.2-1(1) 計算領域全体と解析領域における SO<sub>x</sub> の収支バランス比較(船舶寄与分)

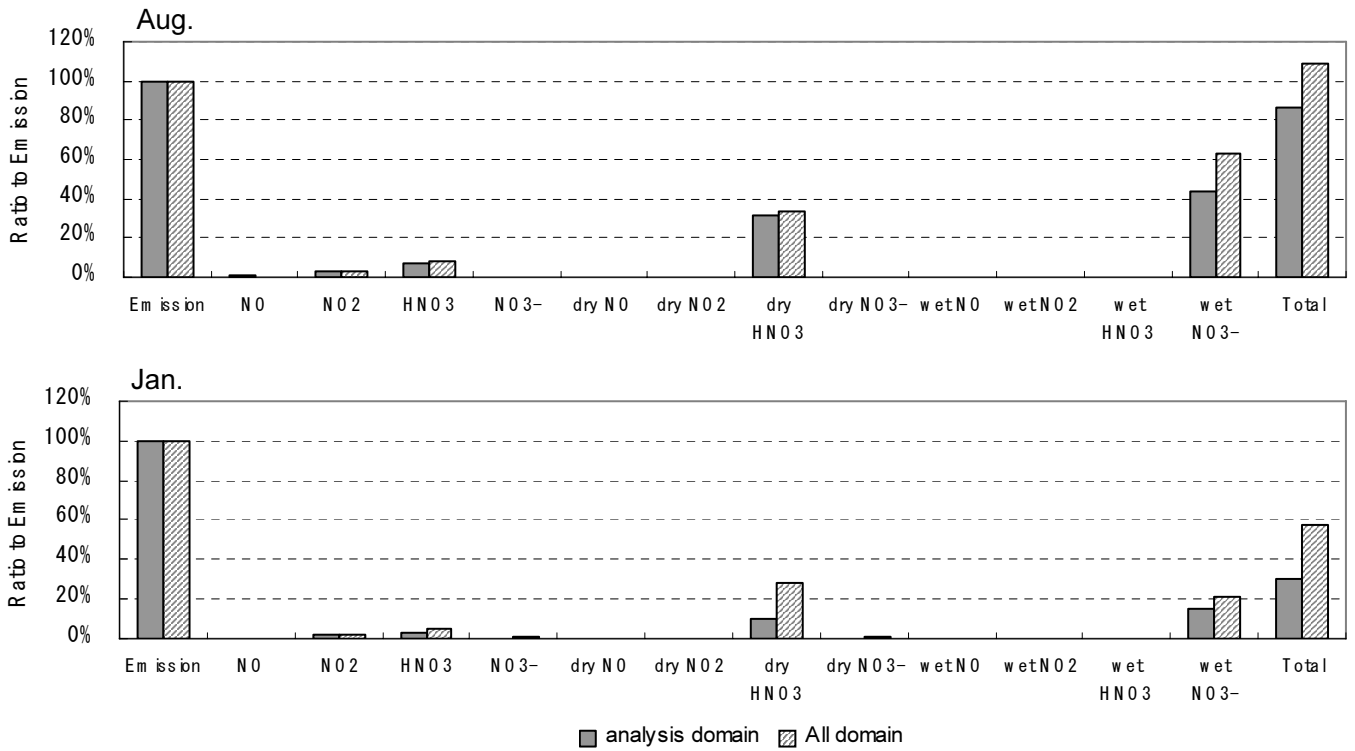


図 4.2-1(2) 計算領域全体と解析領域における NO<sub>x</sub> の収支バランス比較(船舶寄与分)

## (2) 解析領域内の物質収支の詳細検討

船舶から排出された SOx と NOx の影響範囲を検討するため、SOx・NOx それぞれについて、船舶からの排出量に対する距離帯別の沈着量と大気中の存在量を調査した。なお、NOx については、船舶排出量の増加が NOx 濃度の増加につながるも限らないが、船舶あり・なしの計算結果の差分を船舶寄与分とした。

本調査では航路帯を中心として、両側約 1,000 km 幅の解析領域を設定し、船舶の影響について検討を行った(図 4.1-4 参照)。

SOx の調査結果は図 4.2-2 に示すとおりである。8月の SOx については、発生源から 300 km までに 31 %が沈着しており、1,000 km までに 70 %が沈着している。これに対して1月の沈着量は、発生源から 300 km までに 23 %、1,000 km までに 33 %であり、8月に比べて季節風の卓越する1月は解析領域内に沈着する割合が低く、SOx の多くの部分が解析領域外の遠方へ輸送される可能性が高い。

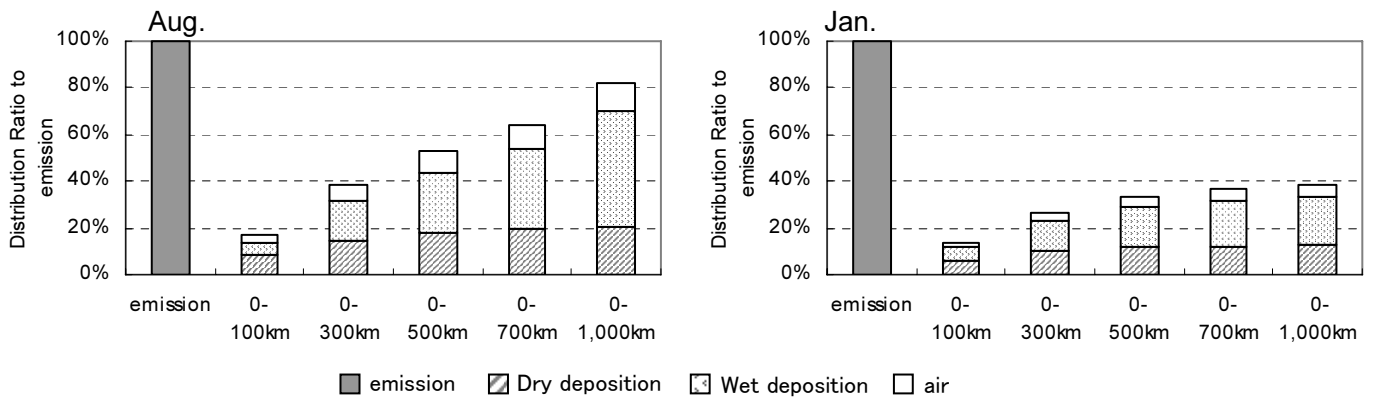


図 4.2-2 SOx の収支バランス(船舶寄与分)

NO<sub>x</sub> の調査結果は図 4.2-3 に示すとおりである。NO<sub>x</sub> についても SO<sub>x</sub> と同様に、8 月に比べて 1 月は解析領域内に沈着する割合が低い傾向が見られた。1 月に解析領域内に沈着する割合が低い原因としては、8 月ほど降水量が多くないため湿性沈着量が少ないことや、乾性沈着の主成分である HNO<sub>3</sub> が 8 月ほど生成されないため乾性沈着量が少ないこと、8 月に比べて 1 月は上空の風が強く拡散を促進させる方向に働いていることなどが考えられる。

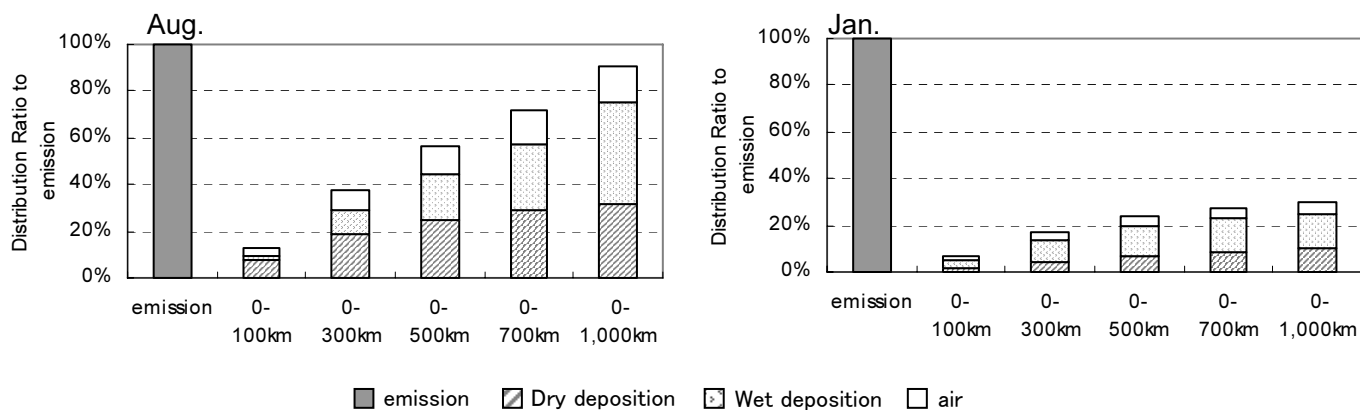


図 4.2-3 NO<sub>x</sub> の収支バランス(船舶寄与分)

ヨーロッパにおいては、船舶起源の SO<sub>x</sub> は 1,000km までほとんど沈着せずに輸送されると言われているが、日本付近における外洋航路帯の計算では 1,000km までに 70% が沈着する結果となった。これは、気温・湿度、降水量などの気象条件や船舶発生源の広がり等が異なるためと考えられる。

## 4.2.2 SO<sub>x</sub>に係る詳細検討

### (1) 距離帯別の大気中濃度

SO<sub>x</sub> の距離帯別の大気中濃度は図 4.2-4 に示すとおりである。

SO<sub>2</sub> の大気中濃度は、航路帯から 100 km 以上離れたとかなり低くなっており、SO<sub>4</sub> 粒子よりも減衰速度が大きく影響範囲が狭い。このため、SO<sub>2</sub> による陸上住宅地での人体健康もしくは陸上への酸性物質の沈着を考慮すると、沿岸から 100km 以上離れた航路帯の陸上への影響は無視しうると考えられる。

一方 SO<sub>4</sub> 粒子は、気相からの総物質量の減少過程として海面への沈着だけであるため、SO<sub>2</sub> と比較すると、航路帯からより離れた地域まで到達することを示している。

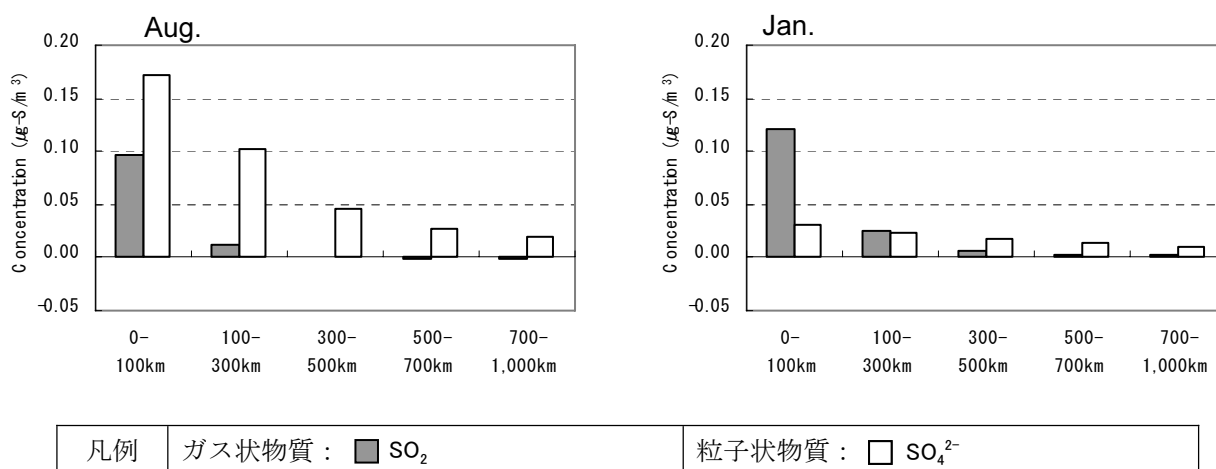


図 4.2-4 SO<sub>x</sub> の距離帯別の大気中濃度(最下層)

SO<sub>2</sub> の影響は、日本付近においてもヨーロッパと同様に影響範囲は狭い。しかし、SO<sub>4</sub> 粒子の影響範囲は大きな差異があることが想定される。これは、気象条件、SO<sub>4</sub> 粒子の大気中の挙動に関連する物質の存在量や発生量の有無、バックグラウンド濃度の違いや船舶発生源の広がり等の違い等によるものと考えられる。従って、環境保護の観点からは各海域の状況に合わせた規制が重要である。

ただし、今回行った毒性評価(本報告書「9.5 船舶排気 PM の毒性評価」)を考慮すると、MEPC57 で最終化されたグローバルアプローチ(全ての海域において低硫黄燃料を使用)は、実質的に良質燃料への転換を意味し、発がん性等の毒性を有する PAHs の削減効果も期待されることから、グローバルアプローチについても必要性はあると考えられる。

船舶排出ガスの実測調査によれば、船舶排出ガス中の PM には SO<sub>2</sub> の凝縮性粒子(SO<sub>4</sub> 粒子)が多く含まれることが示されている。また、今回のシミュレーション結果によれば、航路帯から排出された SO<sub>2</sub> は SO<sub>4</sub> 粒子に変換されて遠方まで輸送され、影響範囲は SO<sub>4</sub> 粒子の方が広いことが示された。これらのことから、燃料中硫黄分を削減することは、船舶起源の PM の削減に効果があると考えられる。MEPC においても燃料中硫黄分を規制することにより、SO<sub>x</sub> 削減効果のみならず PM 削減効果もあることが認められた。

## (2) 乾性沈着量

SO<sub>x</sub> の距離帯別の乾性沈着量は図 4.2-5 に示すとおりである。

乾性沈着量は最下層の大気濃度に乾性沈着速度を乗じることにより算出されるため、乾性沈着量の距離減衰傾向は大気中濃度とほぼ同様の傾向を示している。

SO<sub>4</sub> 粒子の大気中濃度が SO<sub>2</sub> 濃度よりも高いにもかかわらず、SO<sub>4</sub> 粒子の乾性沈着量が小さいのは、一般に SO<sub>4</sub> 粒子の乾性沈着速度が SO<sub>2</sub> に比べて小さいためである。藤田(1996)<sup>4)</sup>によれば、乾性沈着速度の平均値は、SO<sub>2</sub> が 0.41 cm/s (7 月)と 0.35 cm/s (8 月)、SO<sub>4</sub> 粒子が 0.11 cm/s (11 月)であり、大気中濃度と乾性沈着量から推計した本調査の乾性沈着速度は同様の傾向が見られた。

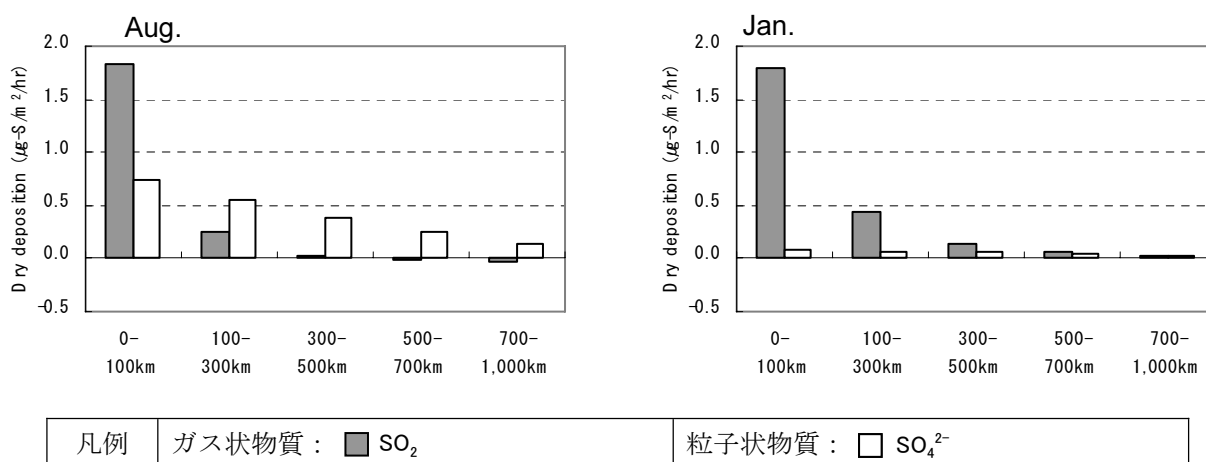


図 4.2-5 SO<sub>x</sub> の距離帯別の乾性沈着量

4) 藤田慎一：日本列島における硫黄酸化物の収支、環境科学会誌、9、185-199、(1996)



### (3) 湿性沈着量

SOx の距離帯別の湿性沈着量は図 4.2-6 に示すとおりである。

湿性沈着量のほとんどは SO<sub>4</sub> 粒子であり、8 月に多い傾向が見られるが、1 月は降水量が少ないにもかかわらず、湿性沈着量は多めに出ている。

湿性沈着量は降水に取り込まれる高さの大気状態や降水現象発生地域の SO<sub>4</sub> 粒子の存在量など様々な要因によって変化するが、1 月の大気中の雲水量・雨水量は 8 月よりも多く、大気中で雲水・雨水に取り込まれやすい状況であったと考えられ、相対的に濃度の高い SO<sub>4</sub> 粒子が大気中に存在していたことが考えられる。

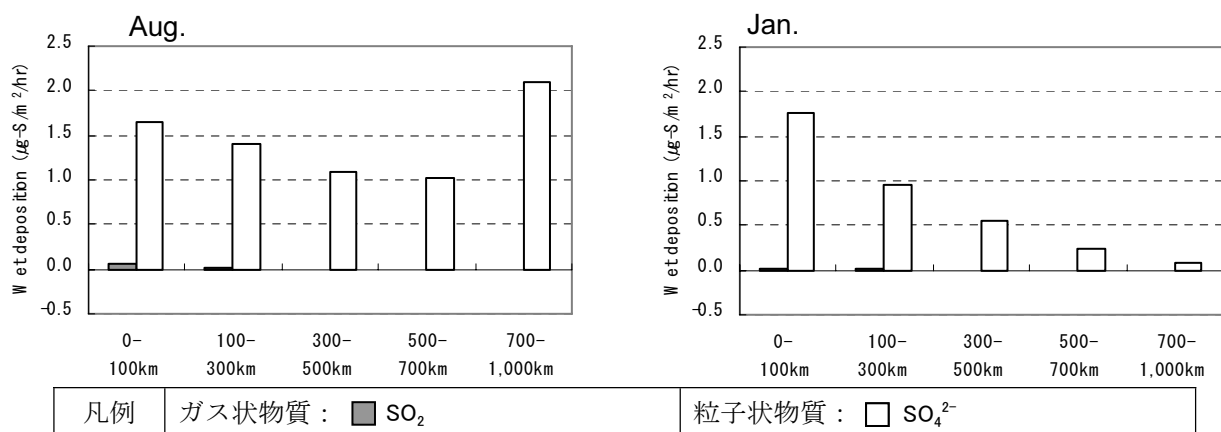


図 4.2-6 SOx の距離帯別の湿性沈着量

### 4.2.3 NOxに係る詳細検討

#### (1) 距離帯別の大気中濃度

NOx の距離帯別の大気中濃度は図 4.2-7 に示すとおりである。

NO を主成分とする排出ガスは人体に有害な NO<sub>2</sub> へ、更に HNO<sub>3</sub> にまで比較的速やかに酸化されていることを示している。しかし、NO<sub>3</sub> 粒子はほとんど存在せず、ガス状物質として大気中に存在する割合が高いことを示している。

海上では NH<sub>3</sub> はほとんど発生せず、また陸上起源の NH<sub>3</sub> は海上に輸送されてくるまでに陸上起源の SO<sub>2</sub> や NOx などの酸性物質の中和に消費されている。このため、船舶起源の SO<sub>2</sub> や NOx の粒子化に必要な NH<sub>3</sub> が海上には十分に存在せず、粒子化が促進されないため、NO<sub>3</sub> 粒子がほとんど存在しないと考えられる。なお、使用したモデルでは海塩粒子を扱っていないことも NO<sub>3</sub> 粒子がほとんど存在しないことに影響している可能性がある。一方、SO<sub>4</sub> 粒子は HNO<sub>3</sub> よりも揮発性が低いため液滴となりやすく、大気中で NH<sub>3</sub> がなくても硫酸ミストとして単体で粒子化していると考えられる。

HNO<sub>3</sub> は沈着速度が大きいことから、航路帯から 300 km 以上離れた地点でのガス状物質としての濃度は、絶対値としても、バックグラウンド濃度との比較において無視できる。

8 月に HNO<sub>3</sub> が多いのは、気温が高いことや日射量が多いため気相反応がより進むためと考えられる。

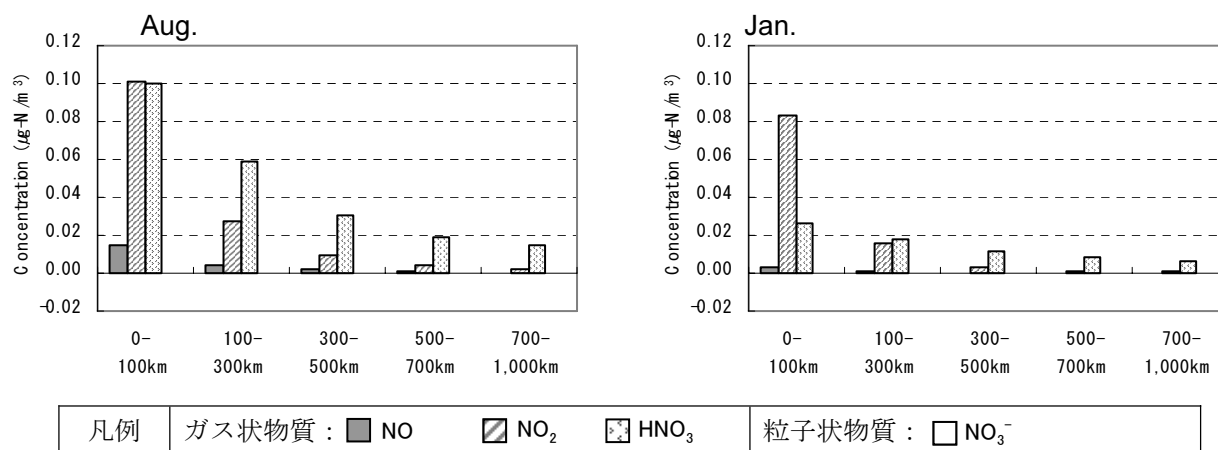


図 4.2-7(1) NOx の距離帯別の大気中濃度(最下層)

上記のように、NO<sub>3</sub> 粒子まで変化する船舶起源の NOx は少ないことから、NOx から生じる PM の影響範囲は SOx から生じる PM の影響範囲に比較して狭く、NOx に対しては局地的な対策が望ましいと考えられる。MEPC57 で最終化された NOx 規制のうち 2016 年から適用される Tier3 は排出規制海域(ECA)にのみ適用するものであり、本調査結果においても十分な効果があると推定できる規制方法である。

## (2) 乾性沈着量

NO<sub>x</sub> の距離帯別の乾性沈着量は図 4.2-8 に示すとおりである。

乾性沈着量はほとんどが HNO<sub>3</sub> であるが、これは乾性沈着速度に大きく寄与するヘンリー定数(水面への溶解のしやすさを示す定数)の違いによるものと考えられる。NO、NO<sub>2</sub> のヘンリー定数はそれぞれ 0.002、0.01 mole atm<sup>-1</sup> であるのに対し、HNO<sub>3</sub> は  $1.0 \times 10^{14}$  mole atm<sup>-1</sup> であり、HNO<sub>3</sub> が NO、NO<sub>2</sub> に比べて非常に水に溶解し易いと考えられる。

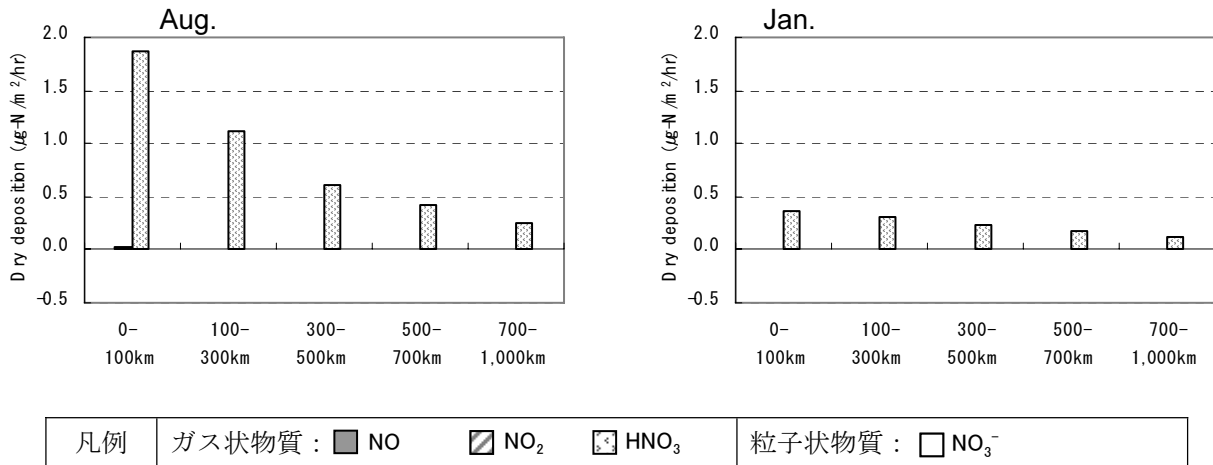


図 4.2-8 NO<sub>x</sub> の距離帯別の乾性沈着量

## (3) 湿性沈着量

NO<sub>x</sub> の距離帯別の湿性沈着量は図 4.2-9 に示すとおりである。

SO<sub>x</sub> と同様に、1月 は降水量が比較的少ないにもかかわらず湿性沈着量は多くなっている。これは、前述のように、1月は大気中で水蒸気に取り込まれやすい状況となっていたことが考えられる。

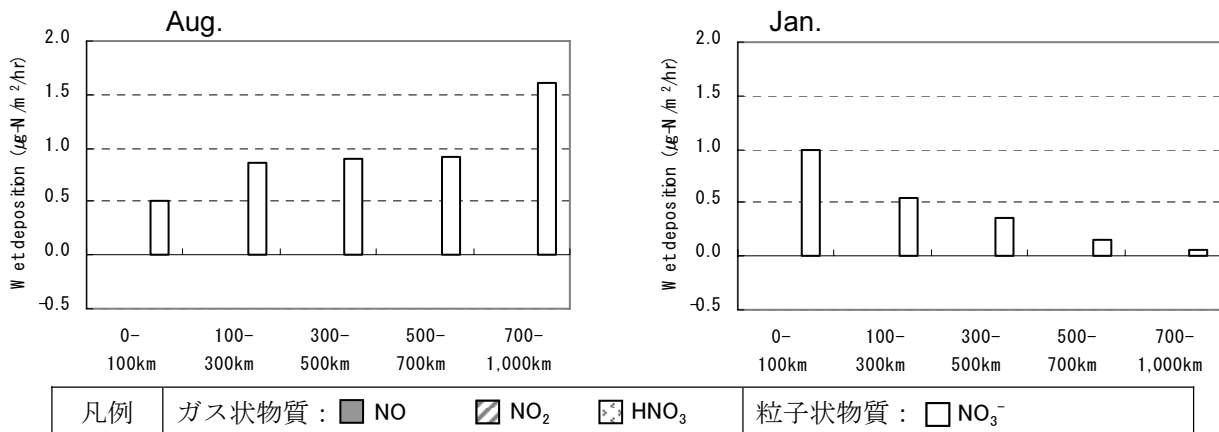


図 4.2-9 NO<sub>x</sub> の距離帯別の湿性沈着量

### 4.3 結論

- ・ 東アジア域の航路帯から排出された  $\text{SO}_2$  の濃度は、航路帯から 100 km 以上離れた地点では、絶対値としても、バックグラウンド濃度との比較においても無視しうる。
- ・ ヨーロッパにおいては船舶起源の  $\text{SO}_x$  は 1,000 km 遠方までほとんど沈着せずに輸送されると言われているが、日本付近においては船舶起源の  $\text{SO}_x$  は発生源近傍で 23~31 %沈着しており、特に夏季においては風下 1,000 km の範囲内に 70 %以上が沈着することが期待される。これはヨーロッパと日本では、気温・湿度、降水量などの気象条件や船舶発生源の広がり等が異なるためと考えられる。  
なお、日本付近の海域においても、季節風の卓越する冬季は 1,000 km 範囲内の総沈着量は排出量の 40 %未満であり、遠方まで輸送される可能性がある。
- ・ 外洋航路帯の船舶からの  $\text{SO}_2$  の影響は、日本付近においてもヨーロッパにおいても影響範囲は狭い。一方、 $\text{SO}_4$  粒子の影響範囲は、日本付近とヨーロッパでは大きな差異があることが想定される。これは、気象条件、 $\text{SO}_4$  粒子の大気中の挙動に関連する物質の存在量や発生量の有無、バックグラウンド濃度の違いや船舶発生源の広がり等の違い等によるものと考えられる。  
従って、環境保護の観点からは各海域の状況に合わせた規制が重要である。ただし、本報告書の「9.5 船舶排気 PM の毒性評価」を考慮すると、MEPC57 で最終化されたグローバルアプローチ(全ての海域において低硫黄燃料を使用)は、実質的に良質燃料への転換を意味し、発がん性等の毒性を有する PAHs の削減効果も期待されることから、グローバルアプローチについても必要性はあると考えられる。
- ・ 船舶排出ガス中の PM には  $\text{SO}_2$  の凝縮性粒子( $\text{SO}_4$  粒子)が多く含まれる。今回のシミュレーション結果によれば、航路帯から排出された  $\text{SO}_2$  は  $\text{SO}_4$  粒子に変換されて遠方まで輸送され、 $\text{SO}_2$  よりも  $\text{SO}_4$  粒子の影響範囲が広いことが示された。これらことから、燃料中硫黄分を削減することは、船舶起源の PM の削減に効果があることが示された。  
MEPC においても燃料中硫黄分を規制することにより、 $\text{SO}_x$  削減効果のみならず PM 削減効果もあることが認められた。
- ・ 東アジア域の航路帯から排出された  $\text{NO} \cdot \text{NO}_2$  は、人体に有害な  $\text{NO}_2$  へ、更に  $\text{HNO}_3$  にまで比較的速やかに酸化される。ただし、 $\text{NO}_3$  粒子はほとんど存在せず、ガス状物質として大気中に存在する割合が高い。これは、 $\text{SO}_4$  粒子が硫酸ミストとして単体でも粒子化するのに対して、 $\text{HNO}_3$  はアンモニアなどアルカリイオンが存在しないと粒子化が進まないことに起因している。

- その  $\text{HNO}_3$  は沈着速度が大きいことから、航路帯から 300 km 以上離れた地点でのガス状物質としての濃度は、絶対値としても、バックグラウンド濃度との比較において無視できる。
- $\text{NO}_3$  粒子まで変化する船舶起源の  $\text{NO}_x$  は少ないことから、 $\text{NO}_x$  から生じる PM の影響範囲は  $\text{SO}_x$  から生じる PM の影響範囲に比較して狭く、 $\text{NO}_x$  に対しては局地的な対策が望ましい。MEPC57 で最終化された  $\text{NO}_x$  規制のうち 2016 年から適用される Tier3 は排出規制海域(ECA)にのみ適用するものであり、本調査結果においても十分な効果があると推定できる規制方法である。
- $\text{SO}_x$  の乾性沈着量は、陸上では主に  $\text{SO}_2$  であるのに対して海洋上では  $\text{SO}_2$  と  $\text{SO}_4$  粒子は同程度である(図 4.3-1 参照)。一方  $\text{NO}_x$  は陸上では主成分の  $\text{HNO}_3$  に加え  $\text{NO}$  や  $\text{NO}_3$  粒子も沈着するのに対して海洋上では  $\text{HNO}_3$  のみである(図 4.3-2 参照)。陸上と海洋上で沈着過程が異なることが示唆された。

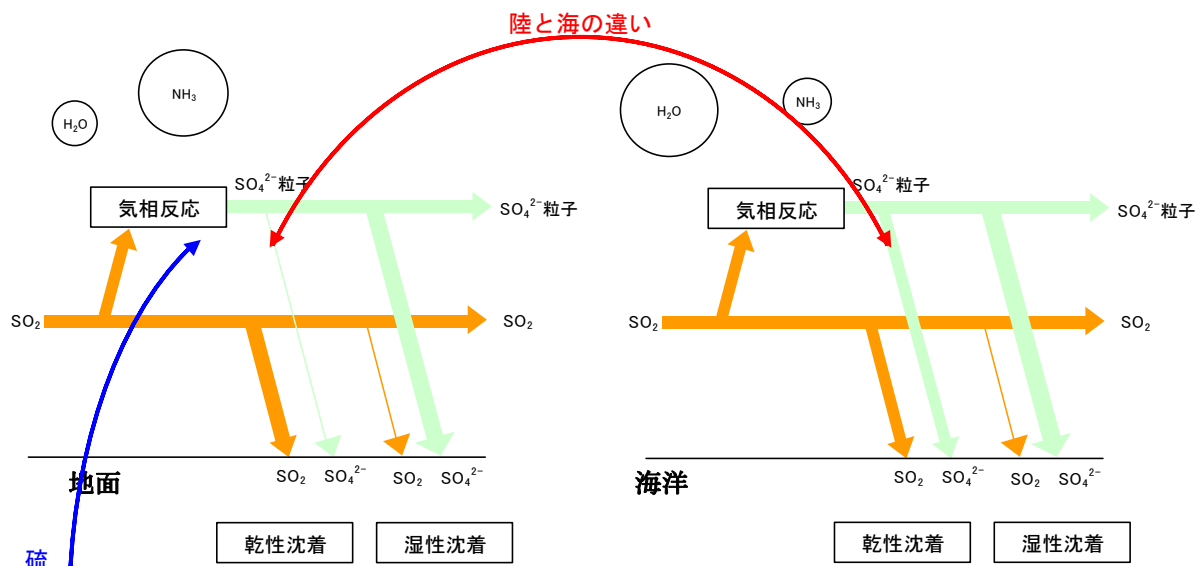


図 4.3-1  $\text{SO}_x$  の流れ(左：陸上部、右：海洋上)

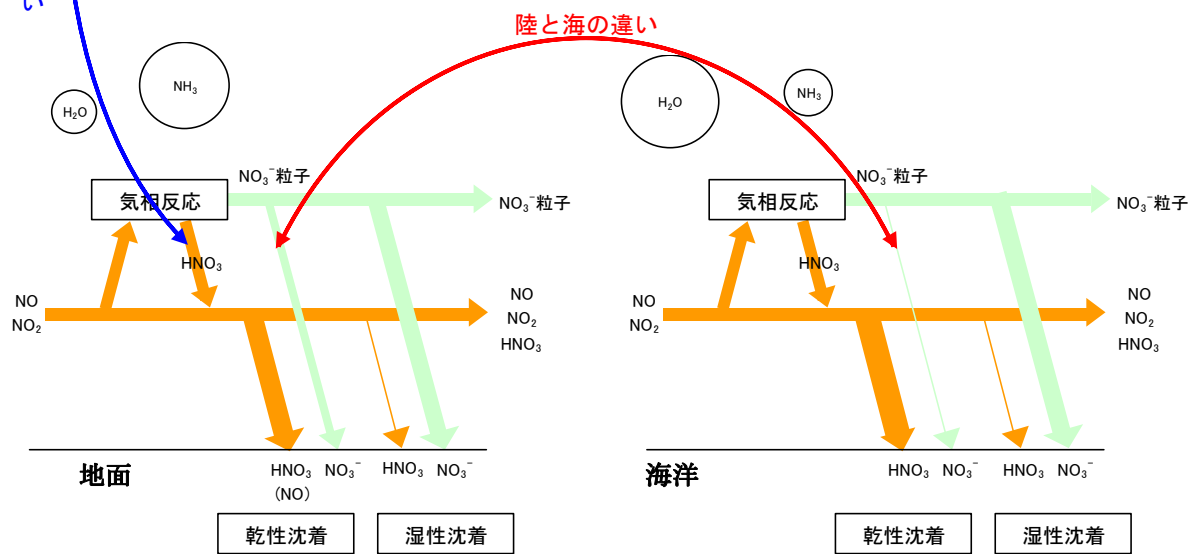


図 4.3-2  $\text{NO}_x$  流れ(左：陸上部、右：海洋上)

- ガス状物質の流れ
- 粒子状物質の流れ

注) 上の 2 図は、PM とガス状物質の流れのうち、気相反応から沈着過程での陸上部と海洋上との相違を定性的に強調したもの。



## 5. 港湾地域におけるPMに関するシミュレーション

### 5.1 シミュレーション概要

ここでは、港湾地域として東京湾域を選定し、港湾地域における船舶の排出ガスに起因するPMの影響範囲を検討するため、電力中央研究所が開発した大気中二次粒子の濃度予測モデル(以下、電力中央研究所モデルという)<sup>1</sup>を用いてシミュレーションを実施し、船舶からガスとして排出されたNO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>が大気中で化学反応により粒子化した二次粒子の挙動を調査した。また、船舶に対する規制の定量的効果についても検討した。

#### 5.1.1 モデル概要

港湾地域におけるシミュレーションは、外洋航路と同じCMAQをベースとした電力中央研究所モデルを用いて行った(CMAQについては4.1.1参照)。電力中央研究所モデルは海塩発生モデルが組み込まれたCMAQ ver4.5をベースとし、独自にガスと海塩粒子の反応過程を組み込んだモデルであり、現況濃度との再現性については港湾域を対象とした計算結果で妥当性が検証されている。また、CMAQの計算に必要な気象モデルは、米国大気研究センター(NCAR)で開発された数値気象モデルMM5(Fifth Generation Mesoscale Model)を用いている。

前章の外洋航路では、東アジア域を対象に80kmメッシュで計算を行ったが、本章で取り扱った港湾地域では、関東エリアを対象に6kmメッシュで計算を行った。

#### 5.1.2 計算対象範囲

計算対象範囲は関東エリア(約230km×約290km、計算格子6km×6km)とし、図5.1-1に示すとおりである。

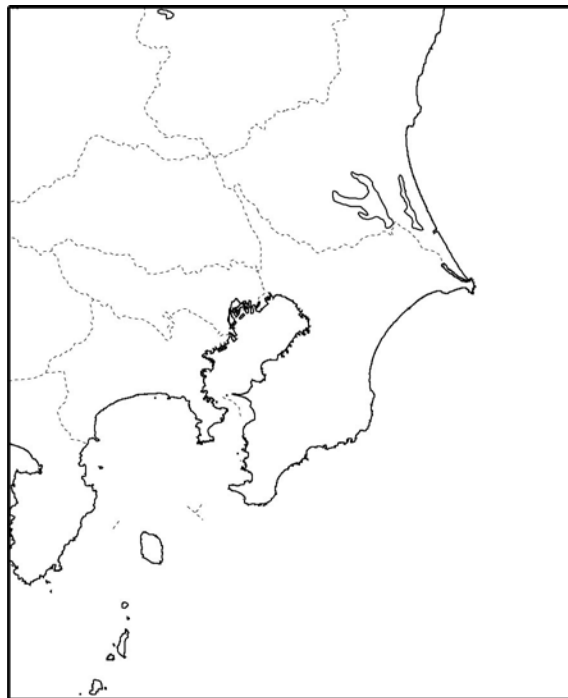


図 5.1-1 計算対象範囲

<sup>1</sup> 速水洋(2006)：首都圏における大気中二次粒子の発生源寄与評価、電力中央研究所研究報告、2006.7



### 5.1.3 解析項目

解析項目は表 5.1-1 のとおりである。

表 5.1-1 解析項目

区分	ガス状物質	粒子状物質	備考
大気中濃度	SO <sub>2</sub> , NO, NO <sub>2</sub> , HNO <sub>3</sub> NH <sub>3</sub> , O <sub>3</sub> ,	一次粒子, 硫酸塩, 硝酸塩 アンモニウム塩(NH <sub>4</sub> -N)	
沈着量	SO <sub>2</sub> , NO, NO <sub>2</sub> , HNO <sub>3</sub> NH <sub>3</sub> , O <sub>3</sub>	一次粒子, 硫酸塩, 硝酸塩 アンモニウム塩(NH <sub>4</sub> -N)	乾性, 湿性別

## 5.2 現況計算

### 5.2.1 計算ケース

2000 年度ベースの排出量を用いて、1 年間の現況計算を行った。

また、船舶の影響については、排出量に船舶を含めたケース(船舶あり)と船舶を含めないケース(船舶なし)の計算を行い、両者の差から検討を行った(表 5.2-1 参照)。

表 5.2-1 計算ケース

No	時期	計算内容	船舶	三宅島 噴火	計算 期間
1	現況	現況再現計算	あり	あり	1 年間
2	現況	現況船舶なし	—	あり	1 年間

### 5.2.2 発生源データ

船舶の発生源データについては、東京湾に入港する船舶の港湾内および航路上での排出量を港湾統計年報などを用いて算出した。算出方法の詳細は、「6. 東京湾地域における船舶からの大気汚染物質排出量算定結果」に示すとおりである。P.5-1 で説明した電力中央研究所モデルからの主な変更点は、排出係数・活動量・地理的配置の見直し、湾外航行の追加、蒸発系 NMVOC の追加である。なお、船舶発生源の PM は SO<sub>2</sub> の凝縮性粒子(SO<sub>4</sub> 粒子)を含んでいる。

船舶以外の発生源データについては、電力中央研究所モデルで用いられている発生源データを用いた(表 5.2-2 参照)。発生源種別の年間発生量は表 5.2-3 に示すとおりであり、東京湾地域における船舶からの SO<sub>2</sub> の割合は 31.2 % と多く、船舶が主な排出源となっている。NO<sub>x</sub> の主な発生源は自動車、工場・事業場であり、船舶の割合は 14.1 % と少ない。CO についても、自動車からの排出が約 8 割を占めており、船舶の割合は 0.8 % と非常に少ない。

排出量の分布図は図 5.2-1 に示すとおりである。

表 5.2-2 発生源データの概要

対象年	2000 年度
メッシュ	1km×1km
発生源物質	全発生源 PM、NO <sub>x</sub> 、SO <sub>2</sub> 、CO、NMHC、HCl、NH <sub>3</sub> (うち船舶： PM、NO <sub>x</sub> 、SO <sub>2</sub> 、CO、NMHC)

表 5.2-3 発生源種別の年間発生量 (2000 年を対象年)

単位：kt/年

発生源	船舶		工場 事業場	自動車	航空機	その他	合計	船舶の 割合
	(湾内)	(湾外)						
SO <sub>2</sub>	21.3	35.8	116.8	7.2	0.0	2.0	183.1	31.2 %
PM	2.7	4.6	19.4	20.5	0.3	3.7	51.1	14.1 %
NO <sub>x</sub>	37.1	63.8	178.9	255.7	7.0	94.8	637.3	15.8 %
CO	4.7	6.2	241.6	1059.0	7.4	18.1	1337.0	0.8 %
NMHC	10.9	2.0	543.8	144.5	2.8	158.1	862.1	1.5 %
HCl			20.3				20.3	
NH <sub>3</sub>			50.0	4.0		58.7	112.6	

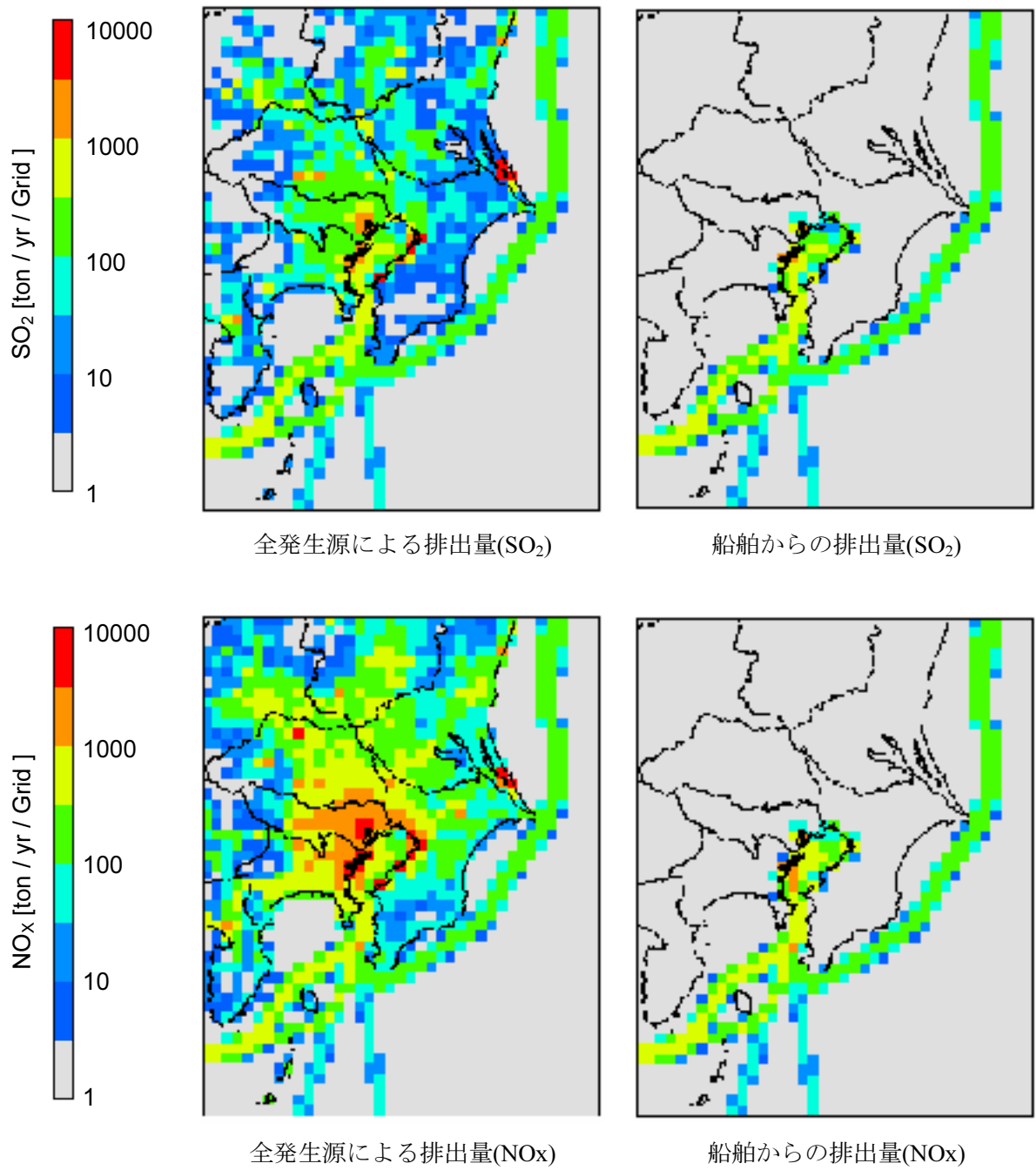


図 5.2-1 排出量の分布図

### 5.2.3 現況再現性の検証

現況再現性の検証は、二次粒子成分の2000年度1年間の測定結果が得られている電力中央研究所の観測地点(狛江)において、ガス状物質も含めて行った。検証内容は表5.2-4に示すとおりである。

また、ガス状物質については一般環境大気測定局においても測定されているため、港湾域の大気環境測定局(晴海、台場、八潮、加曽台)についても、表5.2-4に示す項目・期間について検証した。

表 5.2-4 現況再現性の検証地点等

地点	項目	期間
狛江	SO <sub>2</sub> 、NO <sub>2</sub> 、O <sub>3</sub> 、SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> 、NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> 、NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	日平均値(2000年度の1年間)
港湾域の測定局 (晴海、台場、八潮、 加曽台)	SO <sub>2</sub> 、NO <sub>2</sub> 、O <sub>3</sub>	日平均値(2000年度の1年間)

#### (1) 狛江地点(郊外部)

狛江における観測結果と計算結果の日平均値の変動は図5.2-2に示すとおりである。

SO<sub>2</sub>の計算結果は、10月以降にやや過大に予測する傾向であるが、年間を通じて変動パターンは観測結果によく一致している。

NO<sub>2</sub>の計算結果は、年間を通じて濃度値、変動パターンとも観測結果によく一致している。

O<sub>3</sub>についても、年間を通じて濃度値、変動パターンとも観測結果によく一致している。

SO<sub>4</sub>粒子の計算結果は、9月前半に観測された2度の高濃度や1月から2月の低い濃度を過小に予測しているが、それらを除くと濃度値、変動パターンとも観測結果によく一致している。

NO<sub>3</sub>粒子の計算結果は、暖候期を中心に過小評価の傾向にあるが、変動パターンはよく再現されている。

以上の結果から、本調査のモデルではよい再現性が得られていると判断した。

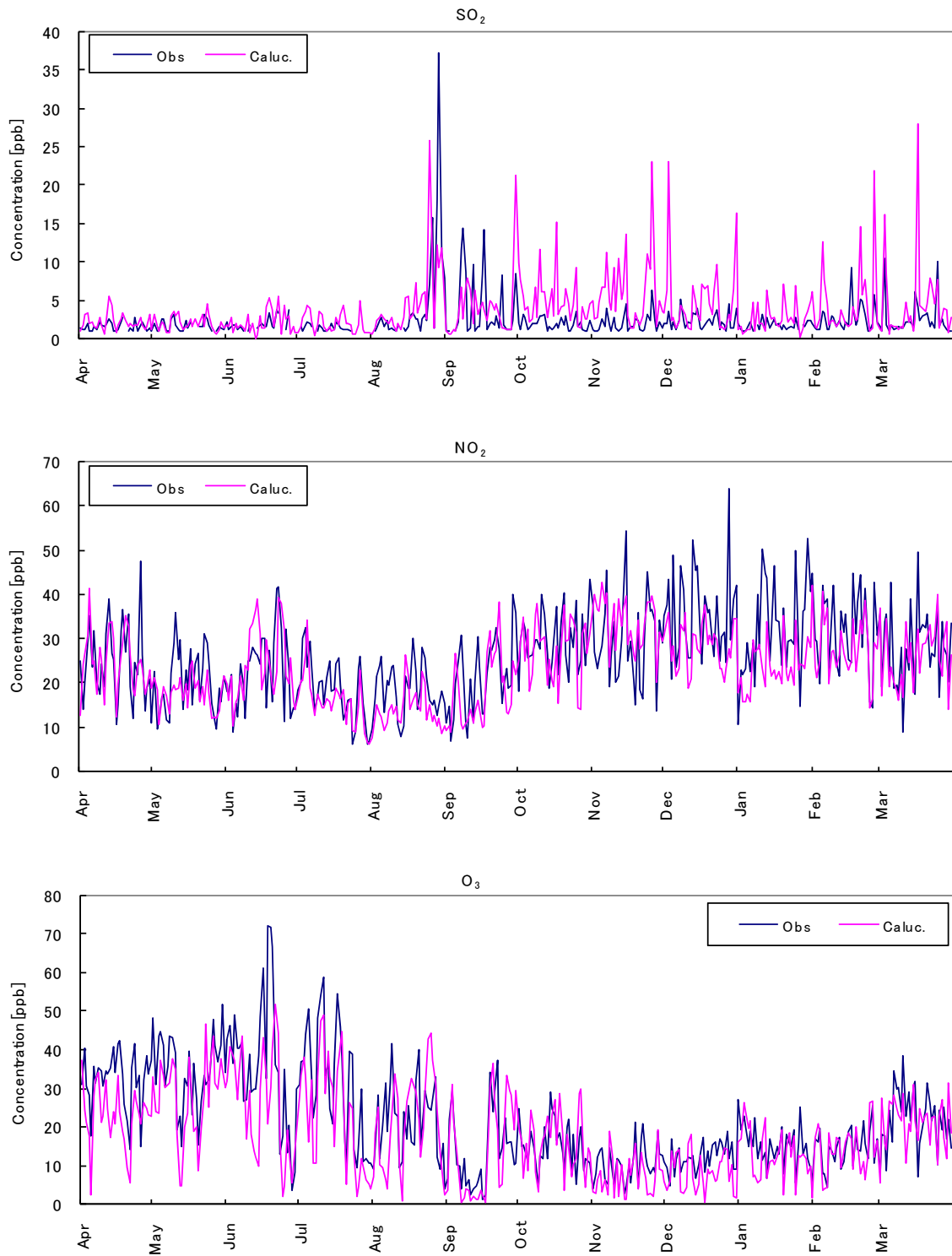


図 5.2-2(1) 狛江における観測結果と計算結果の日平均値の変動(ガス状物質)

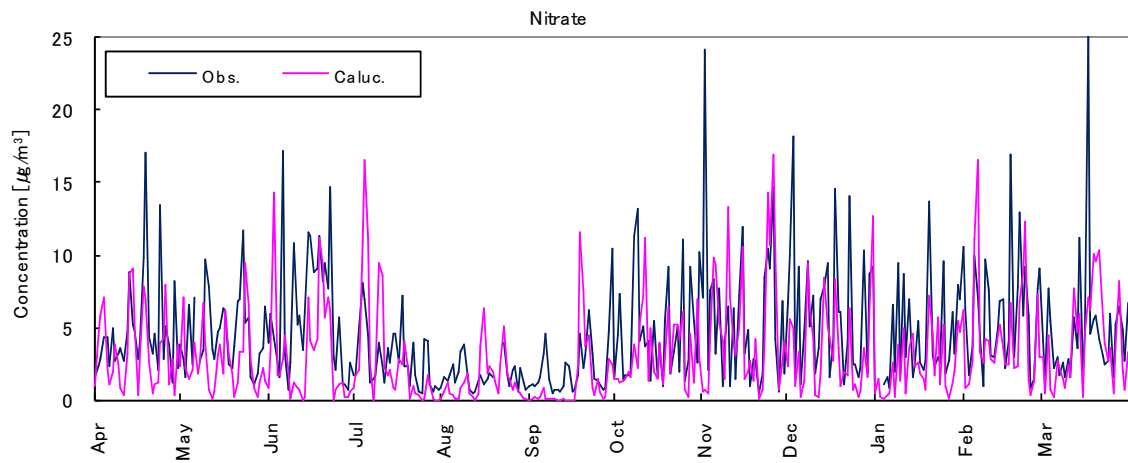
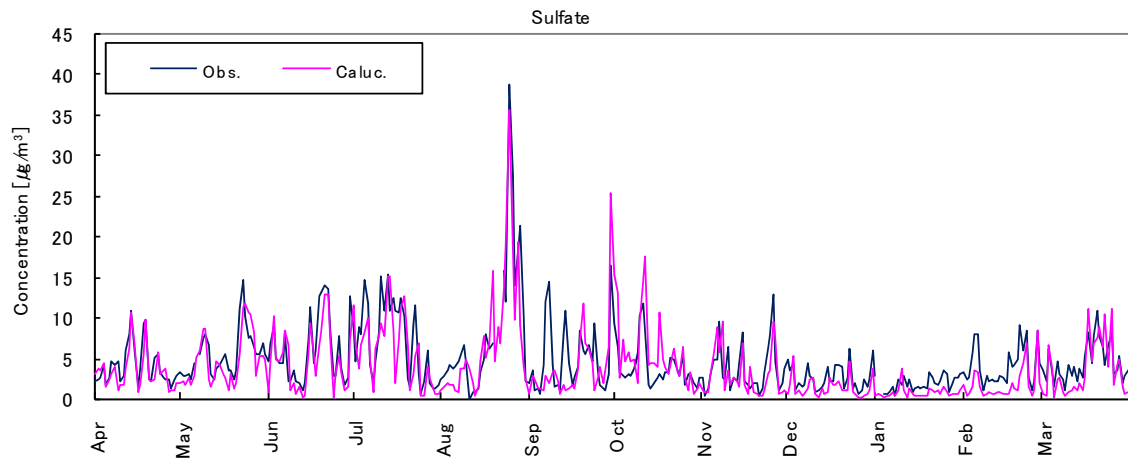


図 5.2-2(2) 狛江における観測結果と計算結果の日平均値の変動(粒子状物質)

## (2) 晴海地点(港湾域)

港湾域の測定局のうち、晴海における観測結果と計算結果の日平均値の変動は図 5.2-3 に示すとおりである。

SO<sub>2</sub> の計算結果は、高濃度のピーク値を低く予測する傾向にあるが、年間を通じて濃度値、日変動パターンともに観測結果とよく一致している。NO<sub>2</sub> の計算結果は、高濃度のピーク値を低く予測する傾向にあるが、日変動は観測結果とよく一致している。O<sub>3</sub> の計算結果は、12月にやや低く見積もる傾向にあるが、日変動は観測結果とよく一致している。

観測結果と計算結果の散布図は図 5.2-4 に示すとおりである。SO<sub>2</sub> と NO<sub>2</sub> の計算結果はほぼすべてが、観測結果のファクター2(観測結果の 1/2 倍～2 倍)の範囲に入っており、モデルの再現性は高いといえる。O<sub>3</sub> に対しては、モデルはやや過小予測する傾向にあるが、計算結果の大半が観測結果のファクター2 の範囲に入っており、本調査のモデルではよい再現性が得られていると判断した。

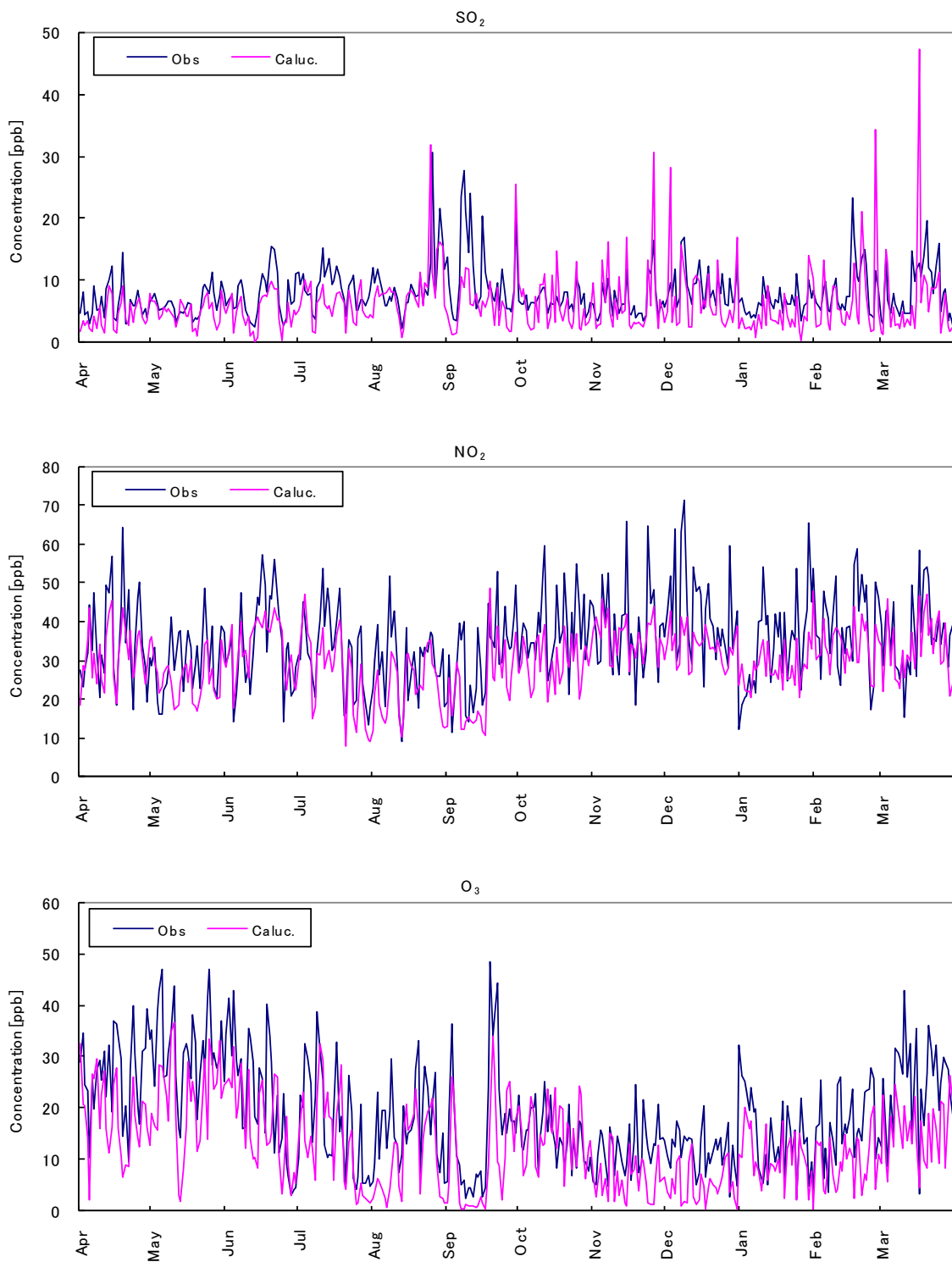


図 5.2-3 晴海における観測結果と計算結果の日平均値の変動



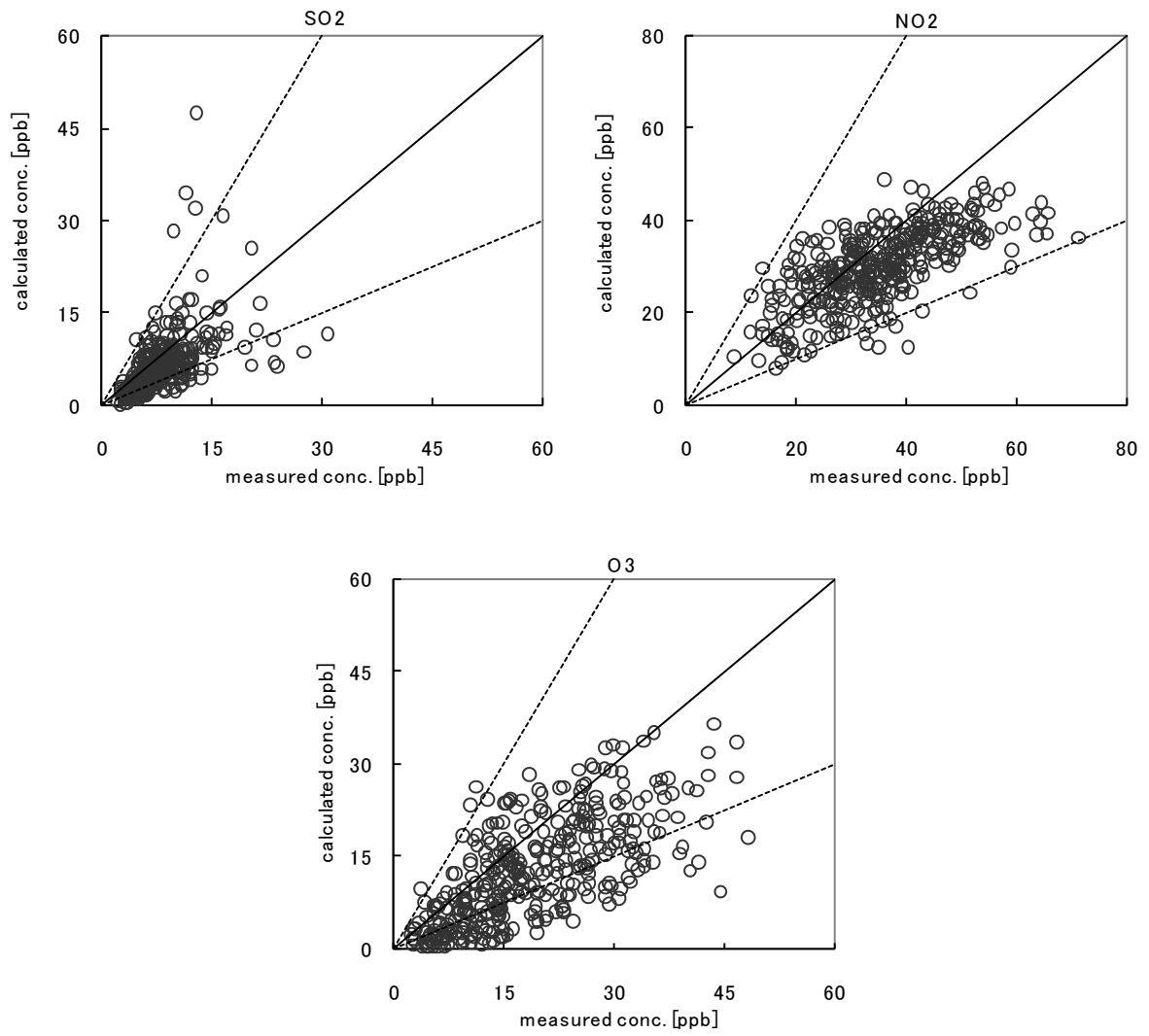


図 5.2-4 晴海における観測結果と計算結果の散布図

## 5.2.4 現況濃度および船舶寄与濃度計算結果

### (1) 大気中濃度

#### (a) SO<sub>x</sub>

SO<sub>2</sub>およびSO<sub>4</sub>粒子の大気中濃度の月平均濃度分布は資料編 資料図 1-1 および資料編 資料図 1-2 に示すとおりである。

SO<sub>2</sub>濃度(資料編 資料図 1-1 (1))は、年間を通して港湾域周辺で高くなっている。これは、船舶を含めた港湾域の発生源が大きく寄与しているためと考えられる。また、参考に下記のWHOの日平均値のガイドライン値 20 μg/m<sup>3</sup>と比較すると、港湾周辺で超過している月が見られる。

船舶寄与濃度(資料編 資料図 1-1 (2))は東京港付近では6月から9月にかけて高くなっている。これは、冬季は北よりの強い季節風により南方へ拡散されやすいのに対し、夏季は風が弱く、また海陸風・局地風循環などにより東京湾上空に大気汚染塊が定常的に発生しやすい状況を再現しているためと考えられる。逆に横浜港付近では、10月から12月にかけて高くなっており、東京湾奥で排出された船舶排出ガスが北よりの季節風により南側の横浜港付近に輸送されるためと考えられる。

船舶寄与割合(資料編 資料図 1-1 (3))は東京湾周辺および湾外航路周辺で高くなっている。船舶の影響している範囲(船舶寄与割合が25%以上)は、4月から8月にかけて内陸部に広がっており、特に6月では北側航路も影響して、千葉県・茨城県全域に広がっている。一方、冬季には内陸部へは広がらず、浦賀水道付近の沿岸から10kmの範囲に限られている。

SO<sub>4</sub>粒子濃度(資料編 資料図 1-2 (1))は、年間を通じて計算領域でほぼ一様であるが、4月から8月にかけて港湾域周辺・湾外航路周辺で濃度がやや高くなっている。このようにSO<sub>4</sub>粒子がSO<sub>2</sub>に比べて一様に分布して見られるのは、領域外から移流されてきた二次粒子によるものと推察される。なお、8月に関東全域で濃度が高くなっているのは三宅島の影響と考えられる。

SO<sub>4</sub>粒子の船舶寄与濃度(資料編 資料図 1-2 (2))は、絶対値は小さいもののSO<sub>2</sub>と同様に6月から9月にかけて高くなっている。

#### (参考) WHOのガイドライン値

項目	評価時間	ガイドライン値
SO <sub>2</sub>	24時間平均値	20 μg/m <sup>3</sup>
PM <sub>10</sub>	24時間平均値	50 μg/m <sup>3</sup>
	年平均値	20 μg/m <sup>3</sup>
PM <sub>2.5</sub>	24時間平均値	25 μg/m <sup>3</sup>
	年平均値	10 μg/m <sup>3</sup>
NO <sub>2</sub>	24時間平均値	200 μg/m <sup>3</sup>
	年平均値	40 μg/m <sup>3</sup>

## (b) NO<sub>x</sub>

NO<sub>2</sub>、HNO<sub>3</sub>およびNO<sub>3</sub>粒子の大気中濃度の月平均濃度分布は資料編 資料図 1-3、資料編 資料図 1-4 および資料編 資料図 1-5 に示すとおりである。

NO<sub>2</sub>濃度(資料編 資料図 1-3 (1))は、都心部を中心に10月から4月にかけて高くなっており、主に自動車などの移動発生源からの排出によるものと考えられる。

NO<sub>2</sub>の船舶寄与濃度(資料編 資料図 1-3 (2))は、5月から9月にかけて高くなっており、特に8月、9月の東京湾外の航路付近の船舶寄与割合(資料編 資料図 1-3(3))がSO<sub>2</sub>よりも高くなっている。陸域への影響範囲(船舶寄与割合が25%以上)はSO<sub>2</sub>に比べて狭く、船舶寄与が大きくなる6月から9月においてもSO<sub>2</sub>ほど内陸部に広がっていない。

HNO<sub>3</sub>濃度(資料編 資料図 1-4 (1))は、6月から8月の夏季に内陸部で高くなっているが、冬季にはほとんど存在していない。

HNO<sub>3</sub>の船舶寄与濃度(資料編 資料図 1-4 (2))はNO<sub>2</sub>濃度に比べて低く、分布状況は海上航路帯付近で高く内陸部では低くなっている。

NO<sub>3</sub>粒子濃度(資料編 資料図 1-5 (1))は、年間を通じて内陸部で高くなっており、特に6月、8月、10月、11月が顕著である。

NO<sub>3</sub>粒子の船舶寄与濃度(資料編 資料図 1-5 (2))は、NO<sub>2</sub>濃度に比べて小さく、5月から8月にかけての関東一帯の陸上で高くなっている。NO<sub>3</sub>粒子の船舶寄与濃度が冬季の海上で負となるのは、船舶の排出がなくなったことによって、O<sub>3</sub>濃度が上昇し、HNO<sub>3</sub>ができたためと考えられる。

## (c) O<sub>3</sub>濃度

O<sub>3</sub>濃度の大气中濃度の月平均濃度分布は資料編 資料図 1-6 に示すとおりである。

O<sub>3</sub>濃度(資料編 資料図 1-6 (1))は、年間を通じて郊外部より都市域で低くなっており、主に都市域で排出されたNOの酸化に消費されたものと考えられる。

O<sub>3</sub>の船舶寄与濃度(資料編 資料図 1-6 (2))は港湾域周辺で負となっているが、これは年間の変動や分布の傾向はSO<sub>2</sub>やNO<sub>2</sub>の船舶寄与と類似していることから、主に船舶からのNOの酸化により消費されていると考えられる。

## (2) 沈着量

### (a) SOx

#### ① SOx の収支 (船舶寄与分)

計算対象範囲を対象として、排出量に対する SOx 沈着量の収支バランスは図 5.2-5 に示すとおりである。

SO<sub>2</sub> の乾性沈着量は年間を通して多く、排出量の 2 割弱を占めている。湿性沈着については降水量の多い 6 月に多く、SO<sub>4</sub> 粒子が 2 割弱を占めている。本報告書「4. 外洋航路における PM に関するシミュレーション」の結果を考慮すると、東京湾地域外へ輸送される 6 割から 8 割の SOx は、夏季については湿性沈着により 1,000km の範囲内にほとんど沈着することが期待できるが、冬季については湿性沈着による効果は期待できず、遠方まで輸送される可能性が考えられる。

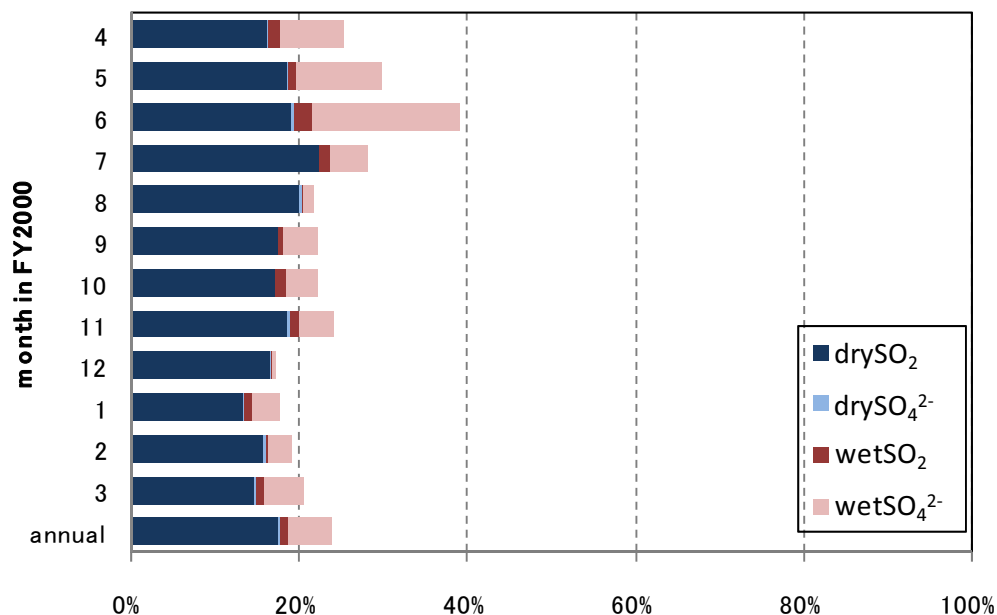


図 5.2-5 SOx の沈着量の収支バランス(船舶寄与分)

## ② 乾性沈着量

SO<sub>2</sub>およびSO<sub>4</sub>粒子の月別乾性沈着量分布は資料編 資料図 1-7 および資料編 資料図 1-8 に示すとおりである。

SO<sub>2</sub>の乾性沈着量(資料編 資料図 1-7 (1))は、大気濃度ほど顕著ではないが、大気濃度と同様に年間を通して港湾域周辺で多くなっている。船舶寄与(資料編 資料図 1-7 (2))も大気濃度と同様の傾向を示しており、東京港付近では6月から9月にかけて、横浜港付近では、10月から12月にかけて多くなっている。

また、SO<sub>x</sub>の乾性沈着量はSO<sub>2</sub>が大部分を占めている。

SO<sub>4</sub>粒子の乾性沈着量(資料編 資料図 1-8 (1))は大気濃度と傾向がやや異なっており、ピークは東京湾内ではなく、東京湾に面した陸上部に見られる。また、月変化はそれほど大きくないが、5月、7月、8月の東京湾に面した陸上部、10月の東京都区部の内陸部で多くなっている。

船舶寄与(資料編 資料図 1-8 (2))は、4月から9月にかけては陸上部のみに沈着している傾向が顕著であり、7月、8月に沈着量が多く、特に8月は内陸部まで広がっている。

## ③ 湿性沈着量

SO<sub>2</sub>およびSO<sub>4</sub>粒子の月別湿性沈着量分布は資料編 資料図 1-9 および資料編 資料図 1-10 に示すとおりである。

SO<sub>2</sub>の湿性沈着量(資料編 資料図 1-9 (1))は、6月、10月、11月、1月に多くなっているが、乾性沈着量に比べて少なく2~3割程度である。船舶寄与(資料編 資料図 1-9 (2))は航路帯を中心に分布しており、4月、6月は内陸部に沈着が見られる。

SO<sub>4</sub>粒子の湿性沈着量(資料編 資料図 1-10 (1))は7、8月には見られず、10月、1月は全領域に見られる。大気濃度分布に見られた航路帯のゆるやかなピークは湿性沈着量では見られない。

船舶寄与(資料編 資料図 1-10 (2))は、5月、6月に多く、ピークの位置は大気濃度分布とは異なって、内陸部にもピークが見られる。

(b) NOx

① NOx の収支 (船舶寄与分)

計算対象範囲を対象として、排出量に対する NOx 沈着量の収支バランスは図 5.2-6 に示すとおりである。なお、NOx については、船舶排出量がなくなると O<sub>3</sub> 濃度が上昇し HNO<sub>3</sub> が増加することもあるため、船舶排出量の増加が NOx の増加につながることも限らないが、船舶あり・なしの計算結果の差分を船舶寄与分とした。

夏季は、HNO<sub>3</sub> の乾性沈着量が多く、排出量の 9~14% を占めている。湿性沈着については降水量の多い 6 月に多く、NO<sub>3</sub> 粒子が 10% を占めている。本報告書「4. 外洋航路における PM に関するシミュレーション」の結果を考慮すると、東京湾地域外へ輸送される 8 割から 9 割の NOx は、SOx 同様、夏季については湿性沈着により 1,000km の範囲内にほとんど沈着することが期待できるが、冬季については湿性沈着による効果は期待できず、遠方まで輸送される可能性が考えられる。

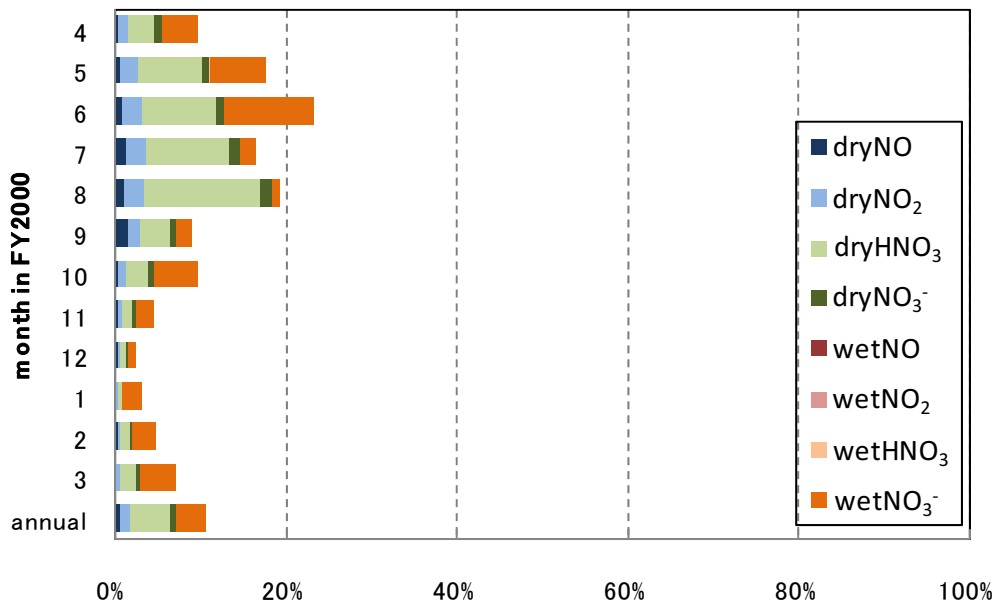


図 5.2-6 NOx の沈着量の収支バランス(船舶寄与分)

## ② 乾性沈着量

NO<sub>2</sub>、HNO<sub>3</sub>およびNO<sub>3</sub>粒子の月別乾性沈着量分布は資料編 資料図 1-11～資料編 資料図 1-13 に示すとおりである。

NO<sub>2</sub>の乾性沈着量(資料編 資料図 1-11 (1))は5月から9月にかけて内陸部で多くなっている。NO<sub>2</sub>の大気濃度が最大となる10月にNO<sub>2</sub>の乾性沈着量が多くなっていないことから、NO<sub>2</sub>の乾性沈着量は気温や湿度などの気象条件や地表面条件などに影響されている可能性が考えられる。

船舶寄与(資料編 資料図 1-11 (2))は、東京湾内・外洋の海上にはほとんど見られず、5月から9月にかけて三浦半島・房総半島の浦賀水道に面した陸上部でピークが見られる。11月から3月にかけては船舶寄与はほとんど見られない。

HNO<sub>3</sub>の乾性沈着量(資料編 資料図 1-12 (1))は5月から8月にかけて多くなっており、東京都区部にピークが見られる。船舶寄与(資料編 資料図 1-12 (2))は5月から8月に見られ、8月では広範囲に広がっている。

NO<sub>x</sub>の乾性沈着量はHNO<sub>3</sub>が大部分を占めている。

NO<sub>3</sub>粒子の乾性沈着量(資料編 資料図 1-13 (1))は東京湾に面した東京都区部を中心として3月から10月まで多くなっており、7月に最大となっている。船舶寄与(資料編 資料図 1-13 (2))も同様の傾向が見られる。

## ③ 湿性沈着量

NO<sub>3</sub>粒子の月別湿性沈着量分布は資料編 資料図 1-14 に示すとおりである。

NO<sub>x</sub>の湿性沈着量(資料編 資料図 1-14 (1))はNO<sub>3</sub>粒子が大部分を占めており、NO<sub>2</sub>、HNO<sub>3</sub>の沈着はほとんど見られない。また、NO<sub>3</sub>粒子の湿性沈着量は2月から6月と10月に多く、内陸部でピークが見られる。

船舶寄与(資料編 資料図 1-14 (2))は、SO<sub>4</sub>粒子と同様に、5月、6月に多い。船舶寄与のピークの位置は大気濃度分布とは異なっている。

### (3) 東京湾地域と外洋航路帯の距離減衰の比較

#### (a) 方法

東京湾地域と外洋航路帯の距離減衰を比較するため、東京湾地域の計算結果について南北断面の濃度分布を整理した。

濃度分布を整理する南北断面は、船舶寄与濃度の最も高くなる南北断面とし、図 5.2-7 に示す断面を中心とした東西 30km(5 メッシュ)の平均とした。

なお、平均化時間は、外洋航路帯：8/16～31 の 16 日間、東京湾地域：8/1～31 の 31 日間である。

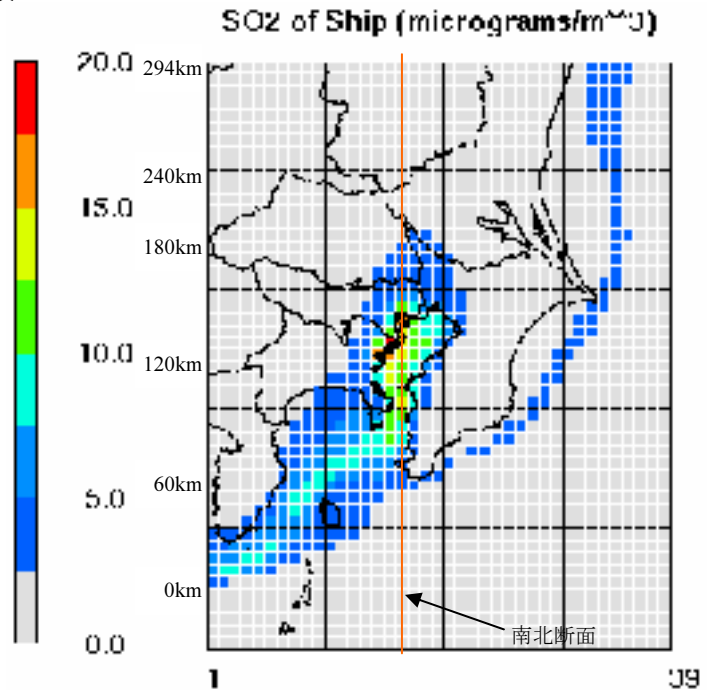


図 5.2-7 南北断面と東西 30km の平均幅

#### (b) 比較結果

最大濃度が出現する南北断面についての濃度分布図は図 5.2-8～図 5.2-10 に示すとおりである。

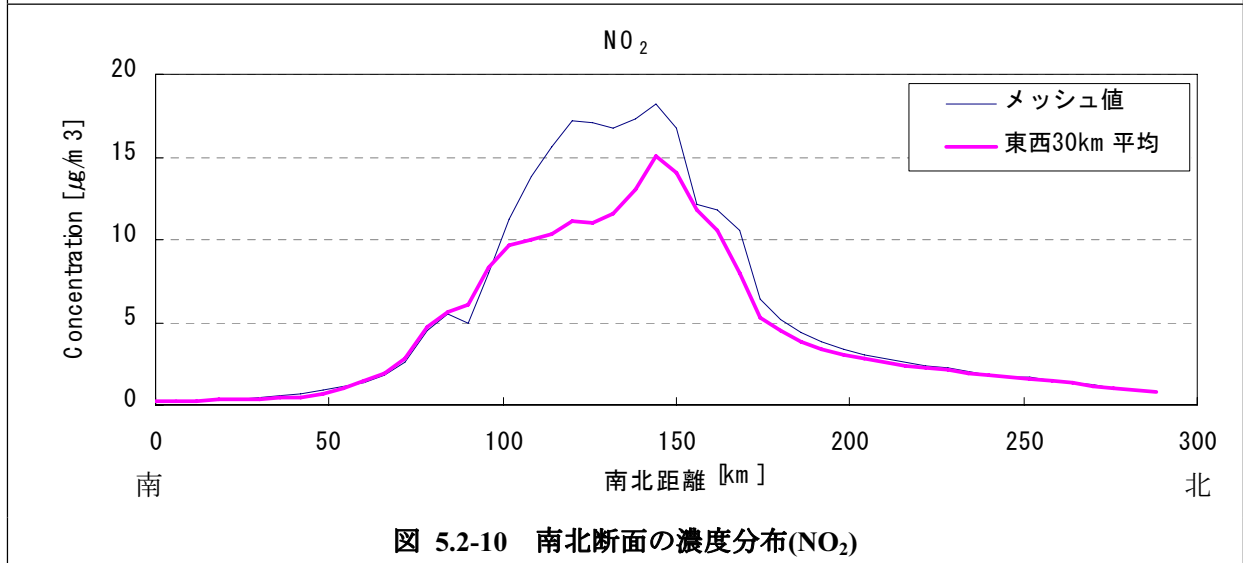
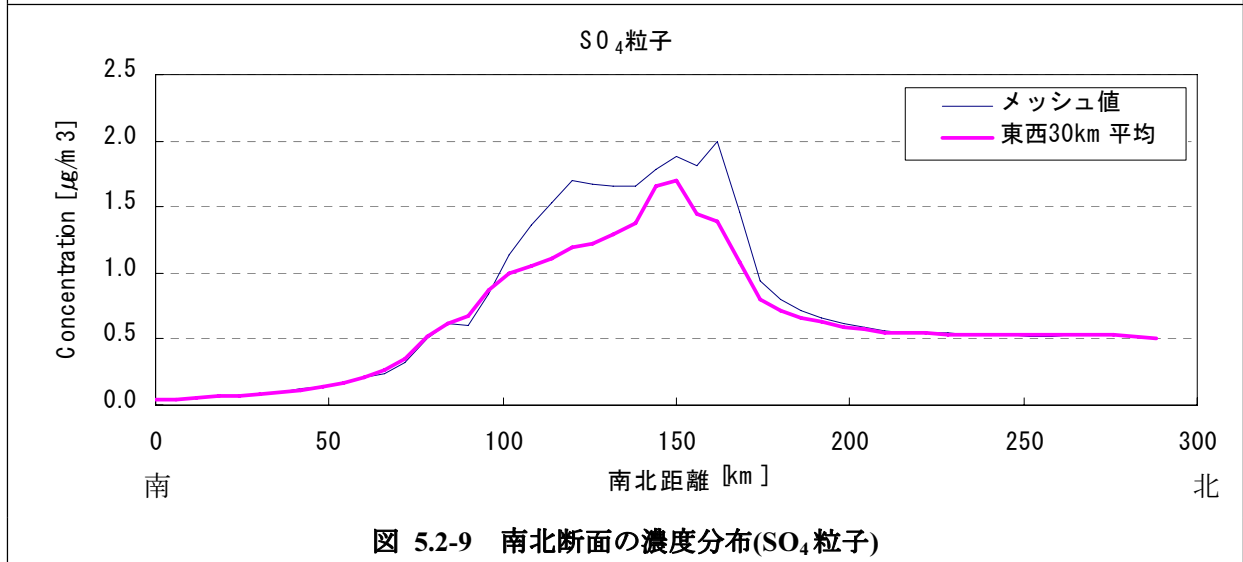
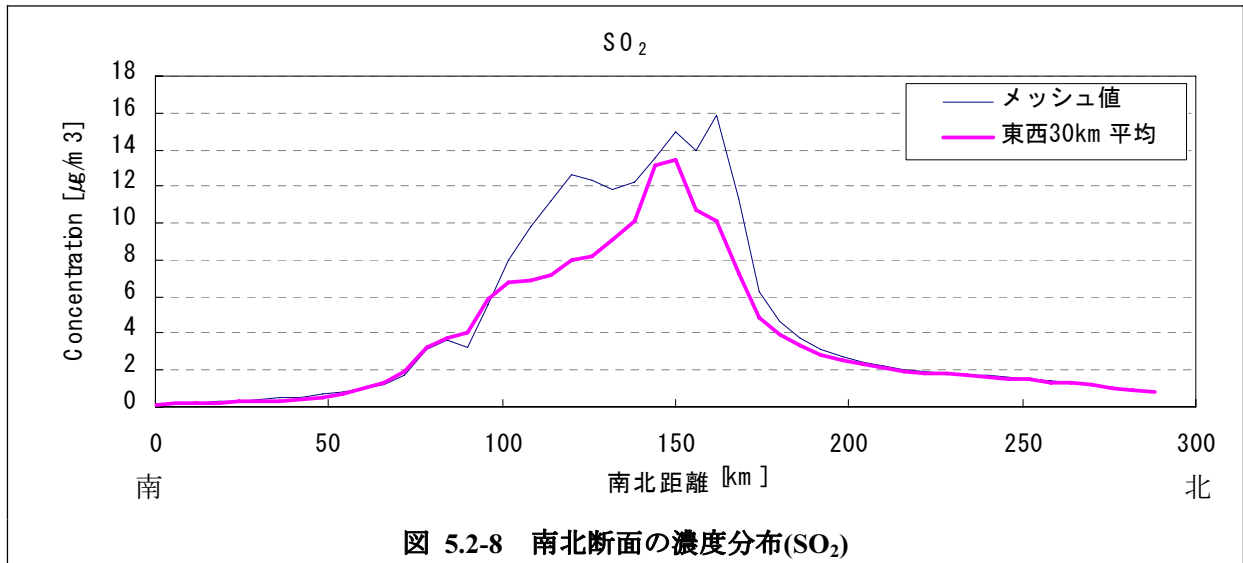
発生源付近の  $\text{SO}_2$  濃度と  $\text{SO}_4$  粒子濃度の比率は、外洋航路帯と東京湾地域で異なっており、外洋航路帯では  $\text{SO}_4$  粒子濃度が  $\text{SO}_2$  濃度の 1.7 倍程度あるのに対し、東京湾地域では  $\text{SO}_4$  粒子濃度は  $\text{SO}_2$  濃度の 0.1 倍程度である。

外洋航路帯で見られた「 $\text{SO}_4$  粒子が  $\text{SO}_2$  濃度に比較して遠距離まで到達する」という傾向(図 5.2-11、図 5.2-12 参照)は、東京湾地域でも見られる。しかし、発生源から北へ 100km 離れた地点における  $\text{SO}_4$  粒子濃度は、外洋航路帯では発生源付近の濃度の 59%程度であったのに対し、東京湾地域では発生源付近の濃度の 26%程度となっている。

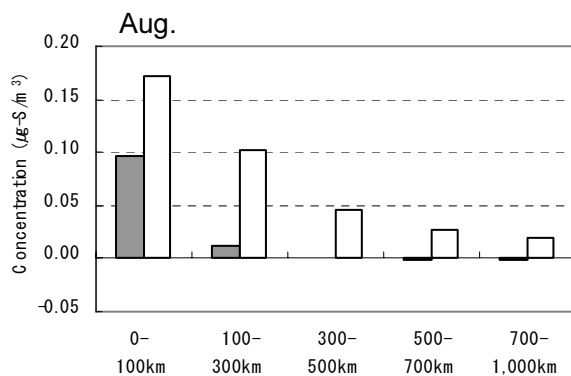
外洋航路帯で  $\text{SO}_4$  粒子の割合が高いのは、外洋航路帯の海洋上では、大気中の湿度が高いことや発生源付近の  $\text{SO}_2$  濃度が東京湾地域より低いこと、また  $\text{SO}_4$  粒子の大気中の挙動に関連する物質の存在量や発生量が少ないことなどから、東京湾地域よりも酸性化・粒子化が促進されやすい状況であったためと考えられる。

東京湾地域で距離減衰割合が大きくみえるのは、 $\text{SO}_2$  排出量の 5%を  $\text{SO}_4$  粒子(凝縮性粒子)として与えられていること、および粒子への変換が促進されないことにより、見かけ上は一次粒子の拡散状況と類似の距離減衰割合になったためと考えられる。



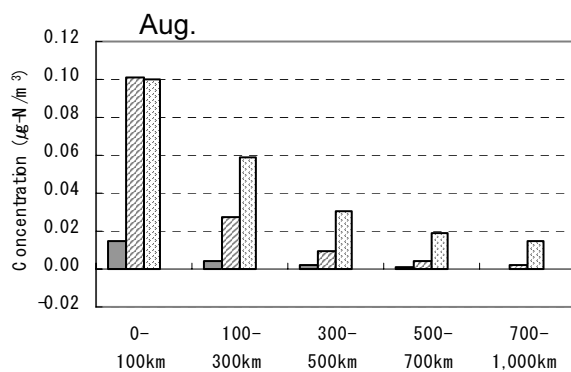


(参考) 外洋航路帯の距離減衰図



凡例	ガス状物質濃度 : ■ SO <sub>2</sub>	粒子状物質濃度 : □ SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
----	-----------------------------	---

図 5.2-11 外洋航路帯における SOx の距離帯別の大気中濃度

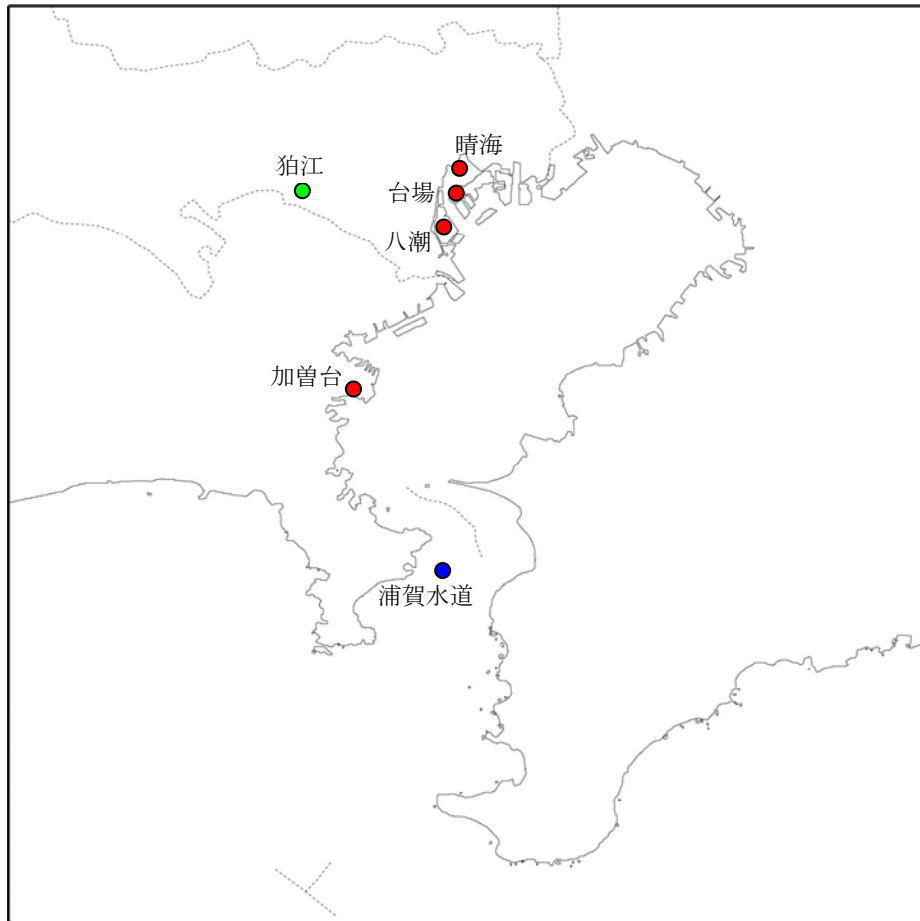


凡例	ガス状物質濃度 : ■ NO	▨ NO <sub>2</sub>	▩ HNO <sub>3</sub>	粒子状物質濃度 : □ NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
----	----------------	-------------------	--------------------	--

図 5.2-12 外洋航路帯における NOx の距離帯別の大気中濃度

#### (4) 評価地点における寄与濃度

港湾域を代表する地点として晴海、台場、八潮、加曽台の4地点(図中●)、郊外部の代表地点として狛江(図中●)、航路上の地点として浦賀水道(図中●)を評価地点として選定し、船舶寄与濃度の月変動を整理した。評価地点位置は図 5.2-13 に示すとおりである。



- 港湾域：晴海、台場、八潮、加曽台
- 郊外部：狛江
- 航路帯：浦賀水道

図 5.2-13 評価地点位置

#### (a) SO<sub>2</sub>

評価地点における SO<sub>2</sub> の「現況」、「船舶なし」および「船舶寄与」の月平均濃度と船舶寄与率は図 5.2-14 に示すとおりである。

晴海、台場、八潮の SO<sub>2</sub> の現況濃度は 8 月に最大となっており、寄与濃度の最大月と一致している。寄与濃度は、5 月から 9 月にかけて高くなっており、加曽台を除いて 8 月が最も高くなっている。また、寄与率も 5 月から 9 月にかけて高くなっており、50 % を超過する地点や月も見られる。加曽台については、現況濃度・寄与濃度ともに 10 月が最大となっており、多くの地点と傾向が異なっている。内陸に位置する狛江においても、20 % 程度の船舶寄与が見られた。

#### (b) SO<sub>4</sub> 粒子

評価地点における SO<sub>4</sub> 粒子の「現況」、「船舶なし」および「船舶寄与」の月平均濃度と船舶寄与率は図 5.2-15 に示すとおりである。

SO<sub>4</sub> 粒子については、すべての地点において現況濃度の月平均値が 8 月に最も高く、船舶寄与濃度も 8 月に最も高い地点が多い。船舶寄与率は夏季・冬季に高くなっており、晴海、台場、八潮では 20～30 % 程度、加曽台では 50 % 程度である。狛江では 10 % 以下となっている。

#### (c) NO<sub>2</sub>・NO<sub>x</sub>

評価地点における NO<sub>2</sub> の「現況」、「船舶なし」および「船舶寄与」の月平均濃度と船舶寄与率は図 5.2-16 に示すとおりである。

NO<sub>2</sub> については、現況濃度は秋季に高く、夏季に低くなっているが、船舶寄与濃度および船舶寄与率はすべての地点において 8 月に高くなっている。港湾域の 8 月の船舶寄与率は、15～30 % である。

評価地点における NO<sub>x</sub> の「現況」、「船舶なし」および「船舶寄与」の月平均濃度と船舶寄与率は図 5.2-17 に示すとおりである。

NO<sub>x</sub> についても、現況濃度は秋季に高く、夏季に低くなっている。船舶寄与濃度および船舶寄与率は、8 月に高くなっており、港湾域の寄与率は 20～40 % 程度である。

#### (d) NO<sub>3</sub> 粒子

評価地点における NO<sub>3</sub> 粒子の「現況」、「船舶なし」および「船舶寄与」の月平均濃度と船舶寄与率は図 5.2-18 に示すとおりである。

NO<sub>3</sub> 粒子についても、NO<sub>x</sub> と同様に秋季に高く、夏季に低い傾向となっており、船舶寄与濃度および船舶寄与率はすべての地点において 8 月に高くなっている。港湾域の 8 月の船舶寄与率は、20 % 程度である。

8 月の SO<sub>2</sub> の船舶寄与濃度は、すべての地点において比較的高くなっている。

以上の結果を踏まえて、本報告書「5.3 規制効果の予測」で検討する船舶排出ガスの規制効果の検証については、船舶の影響が大きいと考えられる 8 月を対象とした。

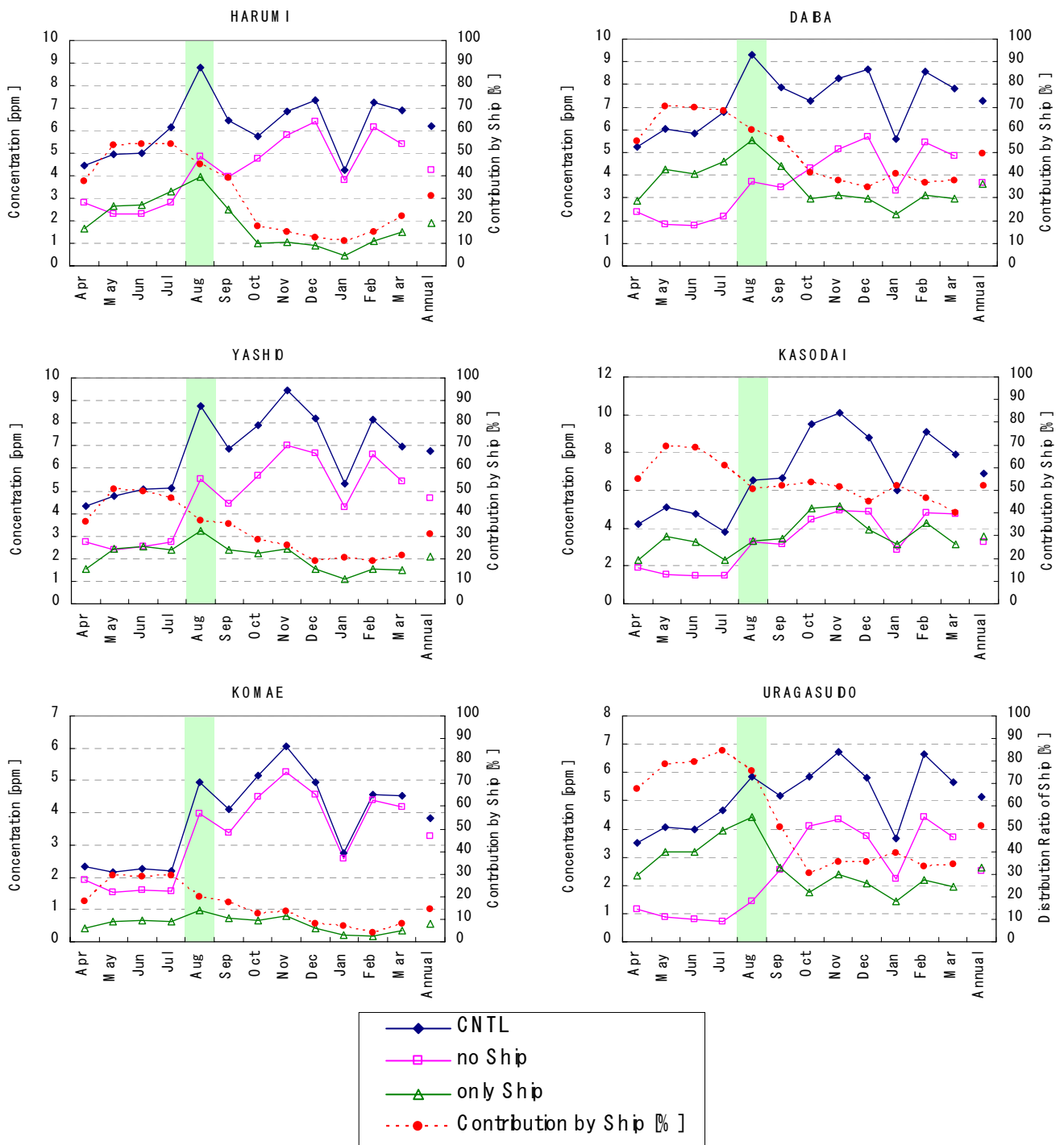


図 5.2-14 「現況」、「船舶なし」および「船舶寄与」の月平均濃度と船舶寄与率(SO<sub>2</sub>)

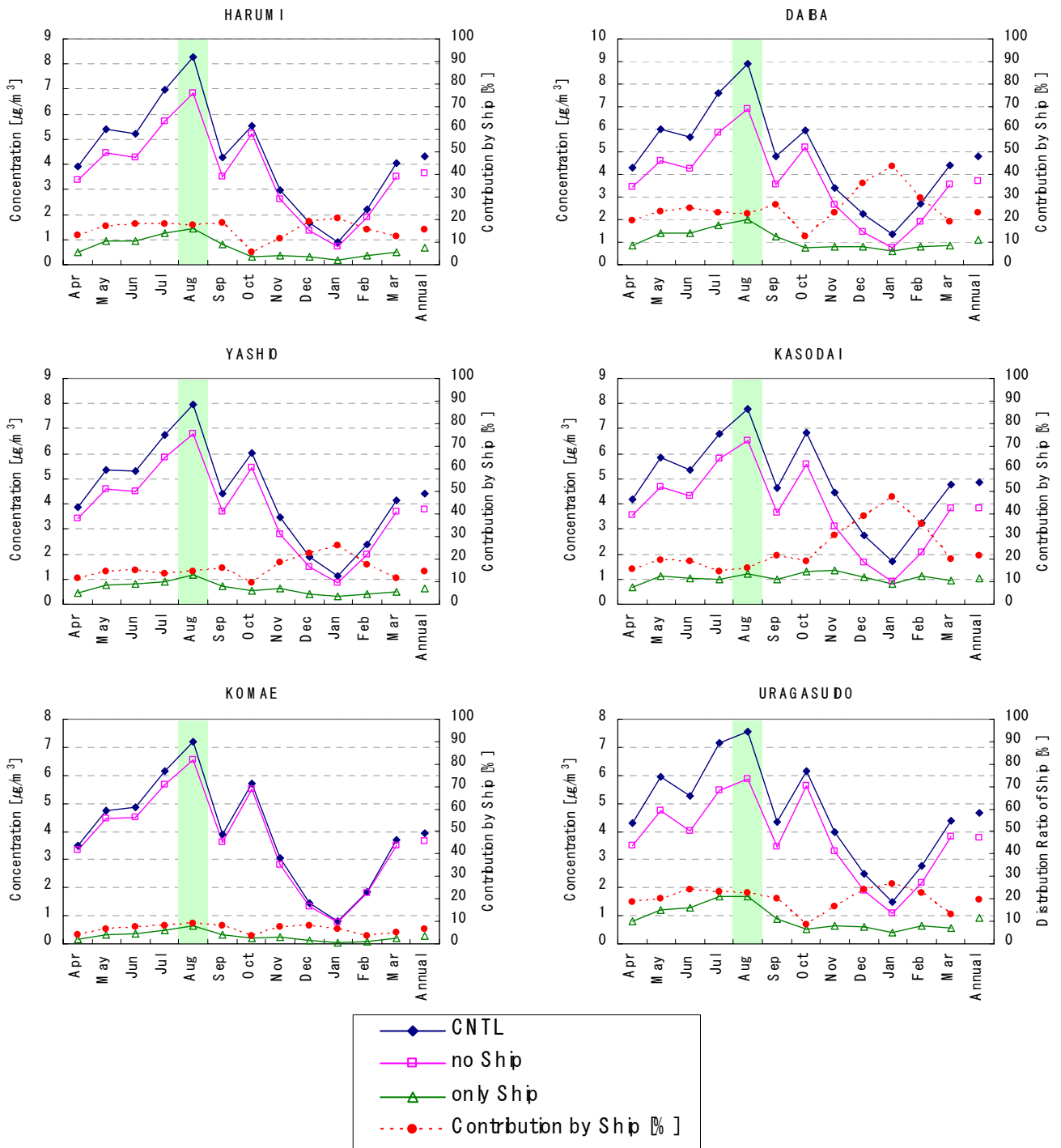


図 5.2-15 「現況」、「船舶なし」および「船舶寄与」の月平均濃度と船舶寄与率(SO<sub>4</sub>粒子)

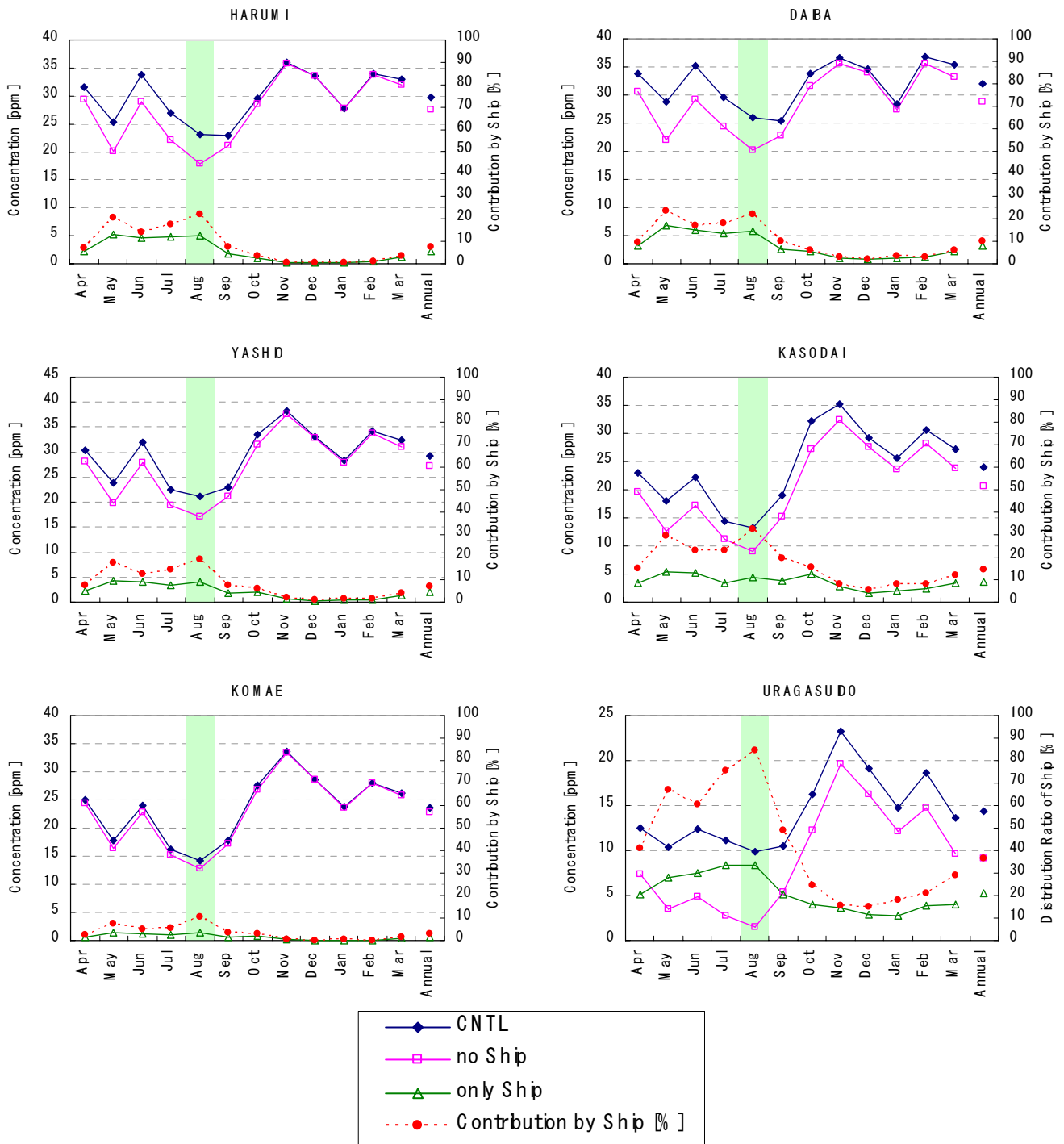


図 5.2-16 「現況」、「船舶なし」および「船舶寄与」の月平均濃度と船舶寄与率(NO<sub>2</sub>)

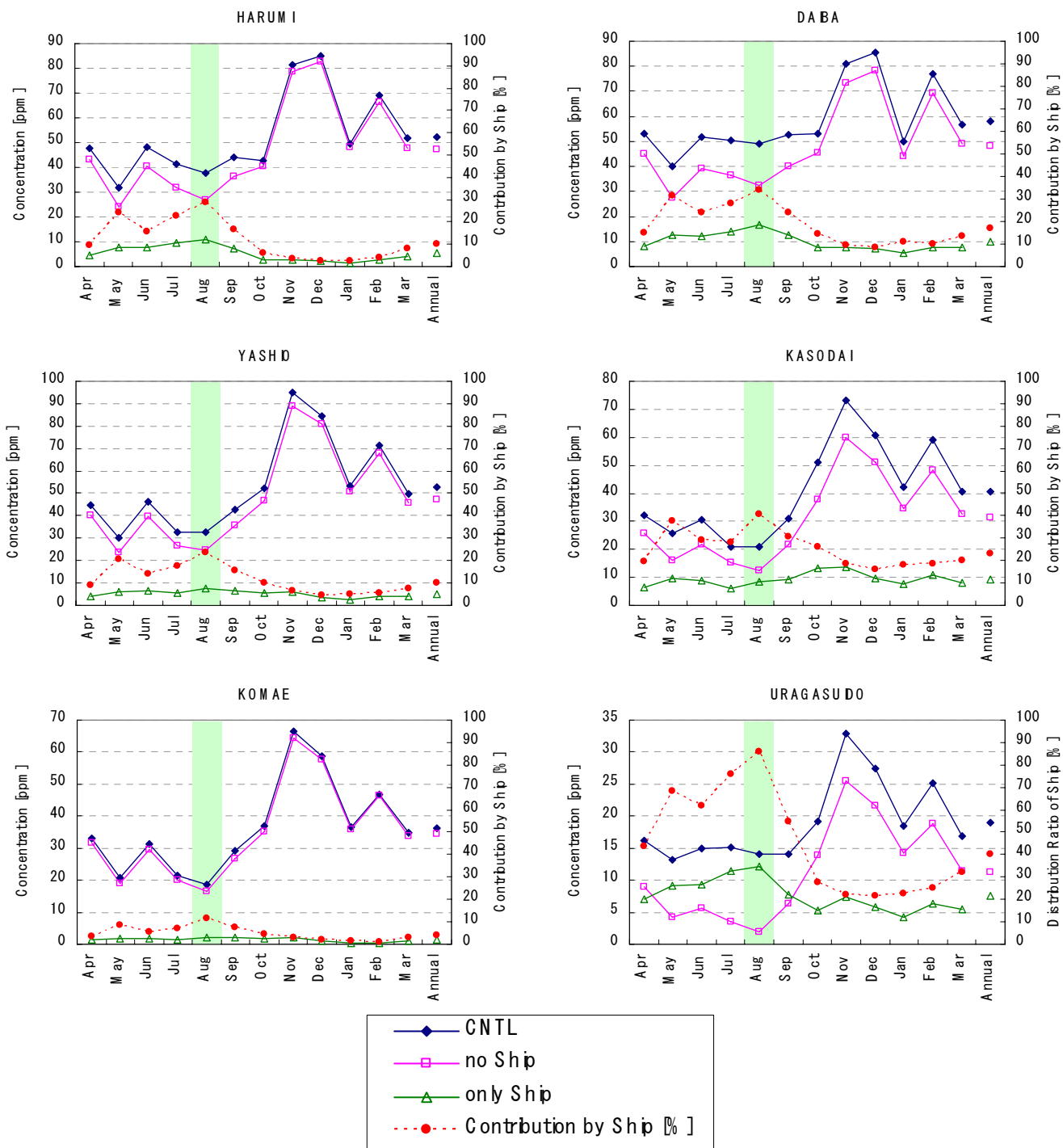


図 5.2-17 「現況」、「船舶なし」および「船舶寄与」の月平均濃度と船舶寄与率(NO<sub>x</sub>)



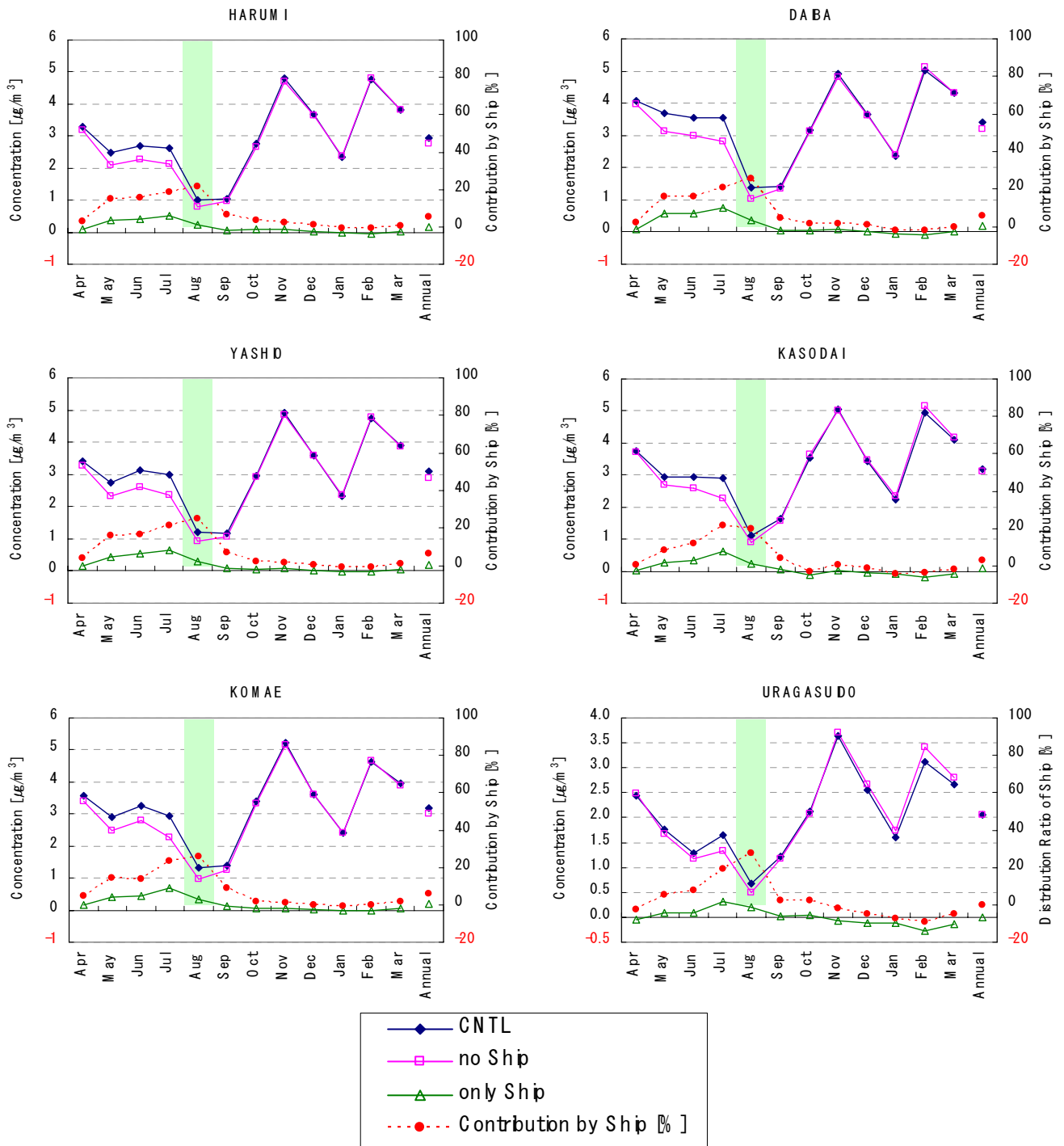


図 5.2-18 「現況」、「船舶なし」および「船舶寄与」の月平均濃度と船舶寄与率( $\text{NO}_3$ 粒子)

## 5.2.5 ヨーロッパにおけるシミュレーションとの比較

ヨーロッパにおいても、シミュレーションによる船舶排出ガスの影響が検討されており、本調査で実施したシミュレーションの計算条件等について比較を行った。

### (1) 計算条件の比較

水平メッシュ、鉛直メッシュの比較は表 5.2-5 に示すとおりである。また、計算領域の比較は図 5.2-19～図 5.2-21 に、鉛直方向の層厚の比較は図 5.2-22 に示すとおりである。

表 5.2-5 比較項目

項目	外洋航路帯領域	東京湾領域	ヨーロッパ(EMEP)
拡散モデル	CMAQ Ver4.3	CMAQ ver4.5	EMEP Eulerian acid deposition model
気象モデル	RAMS	MM5	
計算領域	78 メッシュ×68 メッシュ (6240km×5440km)	39 メッシュ×49 メッシュ (234km×294km)	132 メッシュ×111 メッシュ (6100km×5550km)
水平メッシュ	80km×80km	6km×6km	50km×50km
鉛直メッシュ	19 層に区分。 上端は約 23km。 層厚は地表面に近いほど薄く、最下層は約 150m。	$\sigma$ 気圧座標系で 13 層に区分。 上端は 100hPa (約 16km)。 層厚は地表面に近いほど薄く、最下層は約 30m。	$\sigma$ 気圧座標系で 20 層に区分。 上端は 100hPa (約 16km)。 層厚は地表面に近いほど薄く、最下層は約 90m。

出典 鶴野伊津志, 大原利真, 管田誠治, 黒川純一, 古橋規尊, 山地一代, 谷本直隆, 弓本桂也, 植松光夫 : RAMS/CMAQ の連携システムによるアジア域の物質輸送シミュレーションの構築, 大気環境学会誌, 40(4), 2005

速水 洋, 首都圏における人為燃焼発生源の排出量抑制と二次粒子無機イオン成分濃度の関係, 大気環境学会, 42(4), 2007

D. Simpson, H. Fagerli, J.E. Jonson, S. Tsyro, P. Wind, and J. -P. Tuovinen, Transboundary acidification and eutrophication and ground level ozone in Europe: Unified EMEP Model Description, EMEP Status Report 1/2003 Part I, EMEP/MSC-W Report, The Norwegian Meteorological Institute, Oslo, Norway, 2003.

H. Fagerli, D. Simpson and S. Tsyro, Transboundary acidification, eutrophication and ground level ozone in Europe, EMEP Status Report 1/2004, Unified EMEP model: Updates, pp.11-18, The Norwegian Meteorological Institute, Oslo, Norway, 2004.

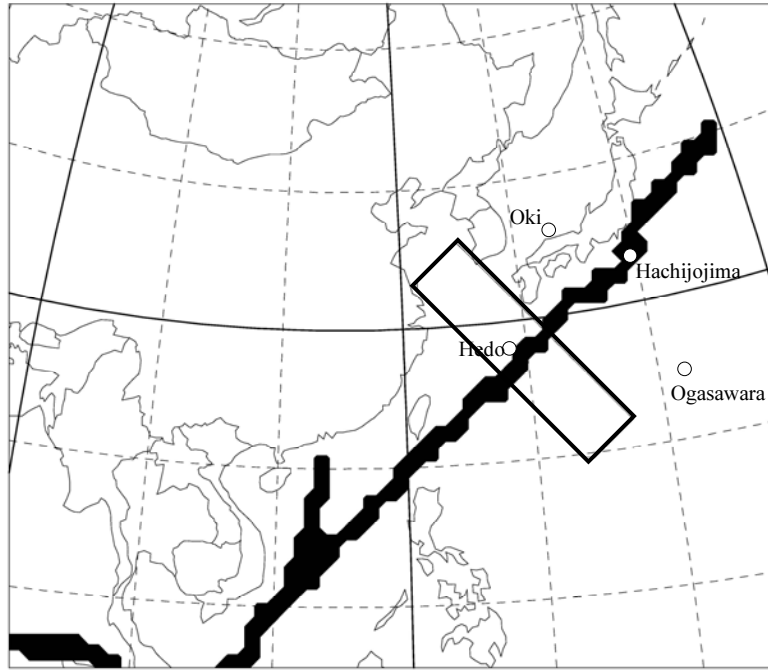


図 5.2-19 外洋航路帯の計算対象範囲（領域 6240km×5440km、格子 80km×80km）

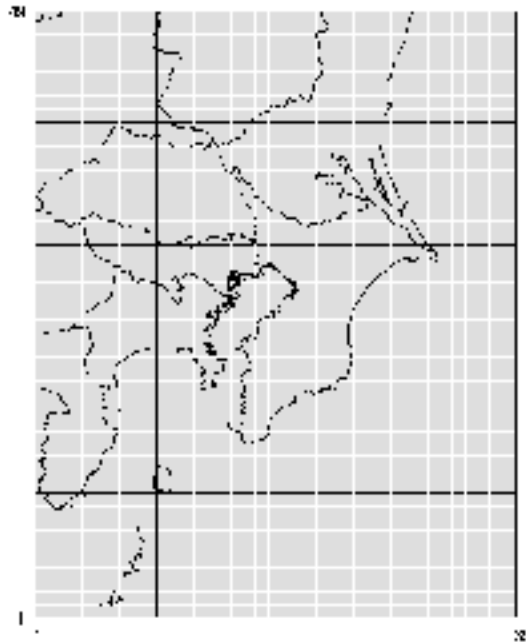
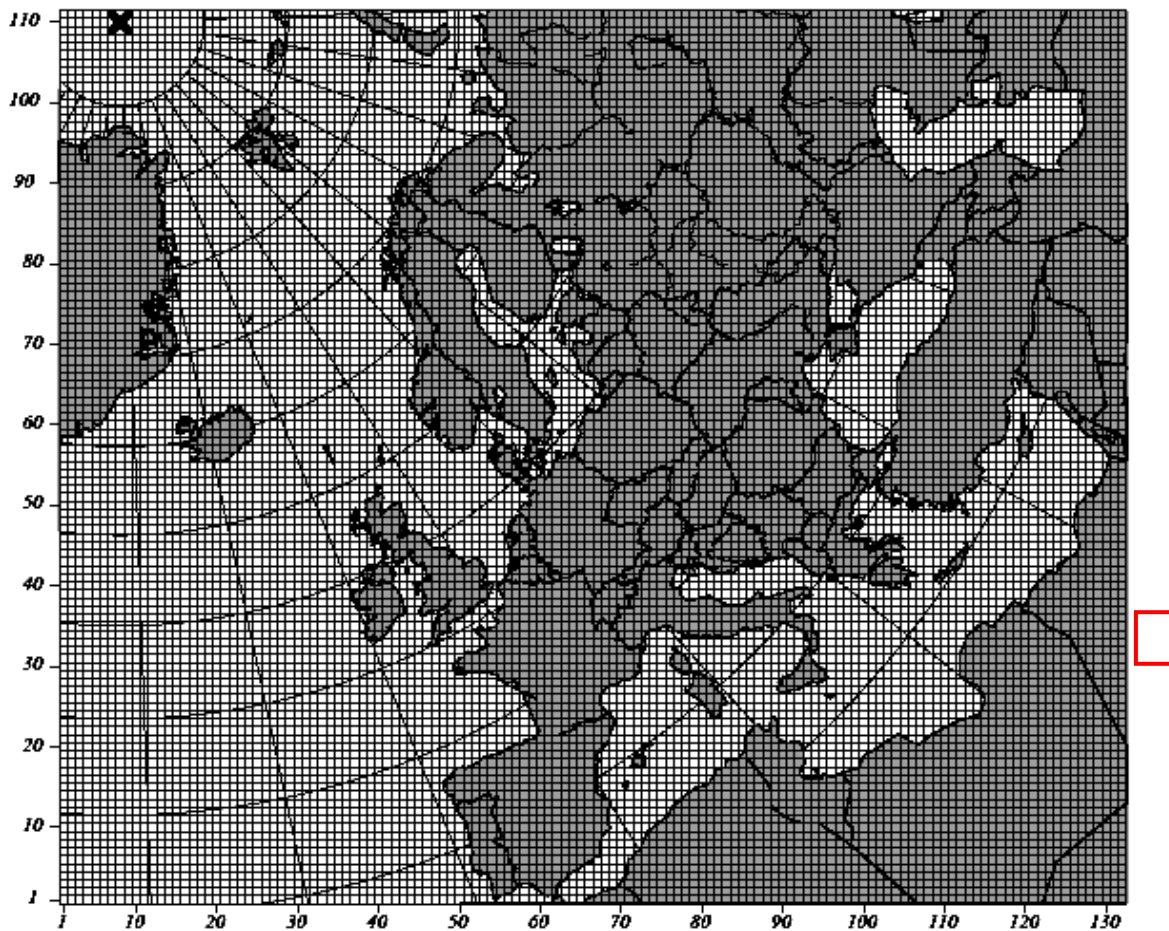


図 5.2-20 東京湾領域の計算対象範囲（領域 234km×294km、格子 6km×6km）



注) 右の赤枠は同縮尺での東京湾計算領域の広さを示す。

図 5.2-21 EMEP の計算対象範囲 (領域 6100km×5550km、格子 50km×50km)

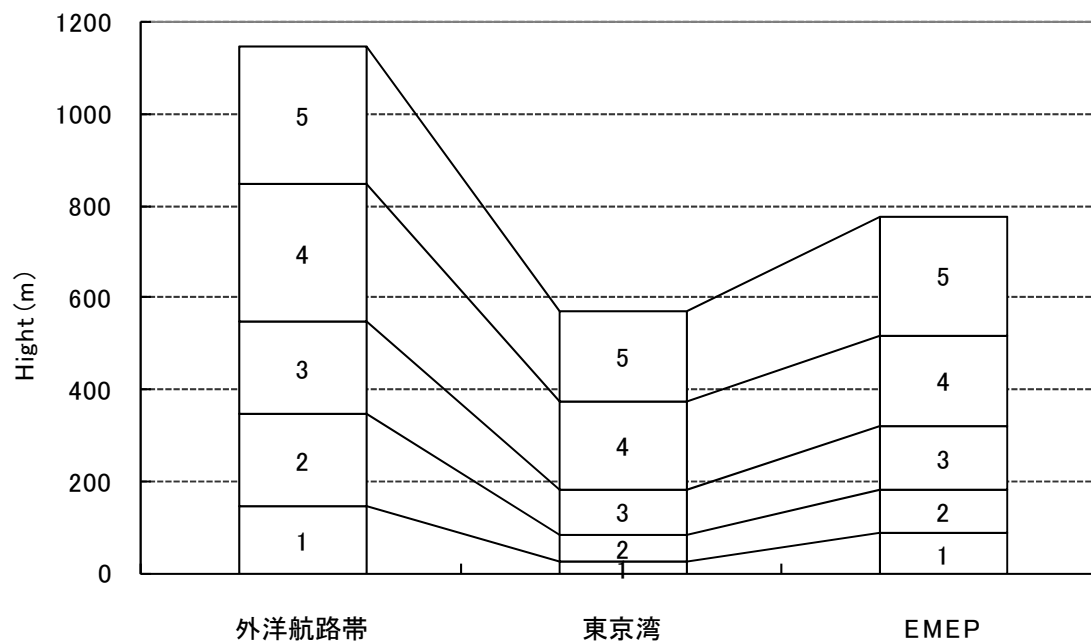


図 5.2-22 鉛直層厚の比較 (下層の5層)

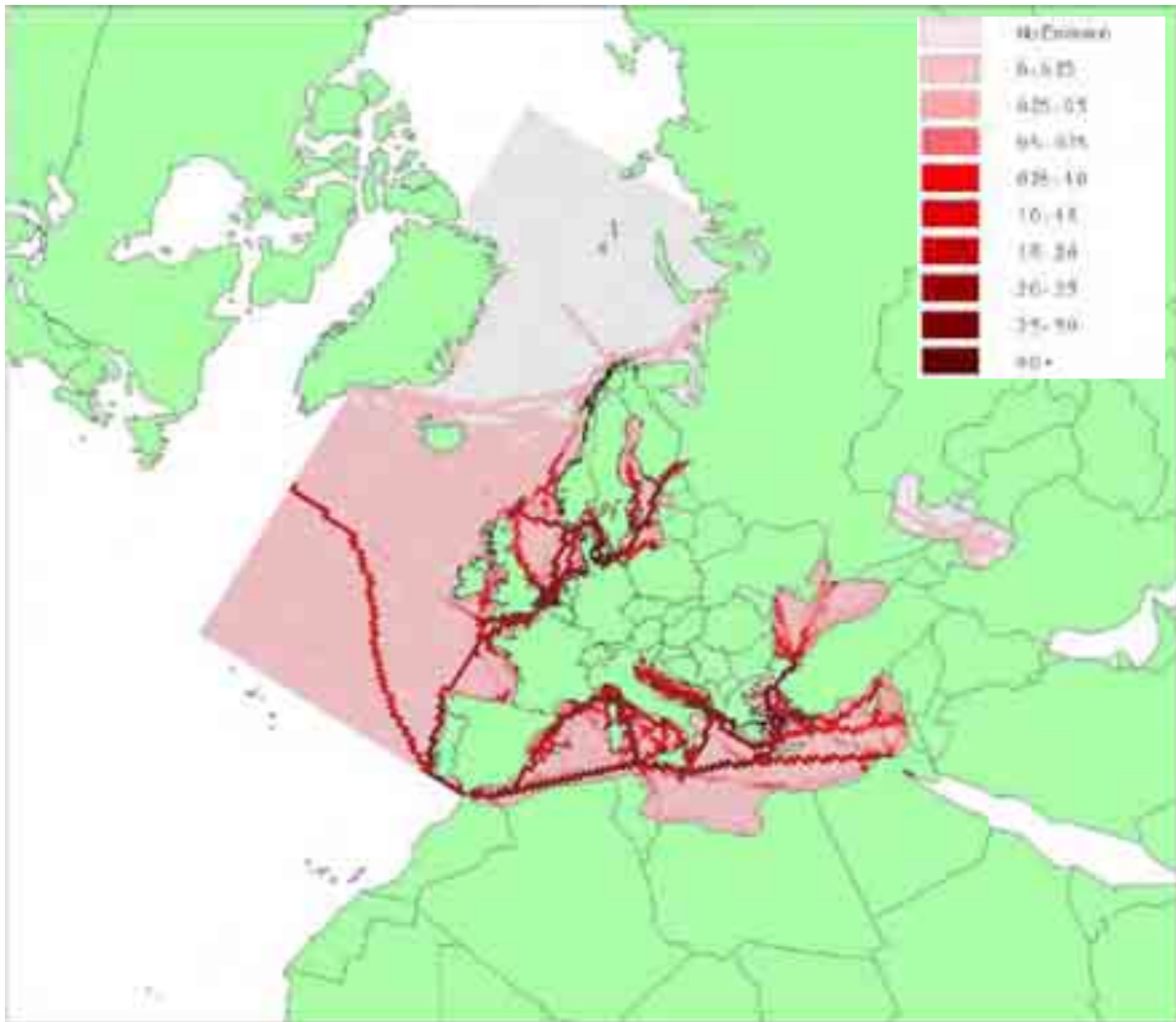
(2) 排出強度の比較

50km メッシュあたりの排出強度は表 5.2-6 に示すとおりである。本調査で用いた外洋航路帯の排出強度はヨーロッパよりも小さく、数分の 1 以下である。

また、ヨーロッパにおける船舶排出量の分布図は図 5.2-23 に示すとおりである。外洋航路帯の船舶発生源は線上に分布しているのに対し、ヨーロッパの船舶発生源は面的に広がりを持った分布で計算を行っている。

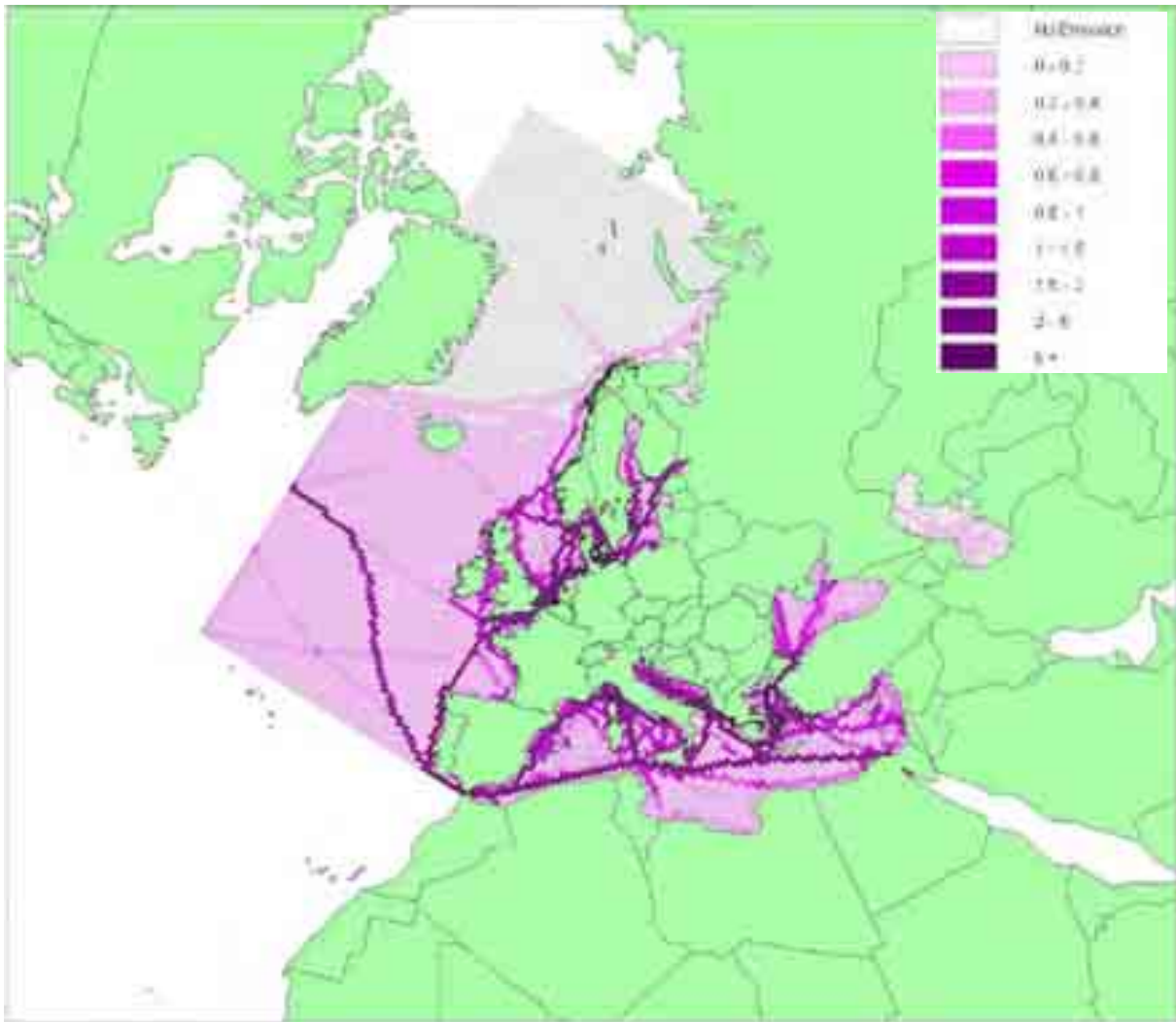
表 5.2-6 船舶の排出強度 (kt/yr/50km メッシュ)

	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>
外洋航路帯	1.36	1.79
東京湾	17.2	29.7
ヨーロッパ(バルト海付近)	5.0～	5.0～



Final report from Entec UK Ltd for the European Commission “Quantification of emissions from ships associated with ship movements between ports in the European Community”.

図 5.2-23(1) ヨーロッパにおける船舶からの SO<sub>2</sub> 排出量分布図(kt/ yr/50km<sup>2</sup>)



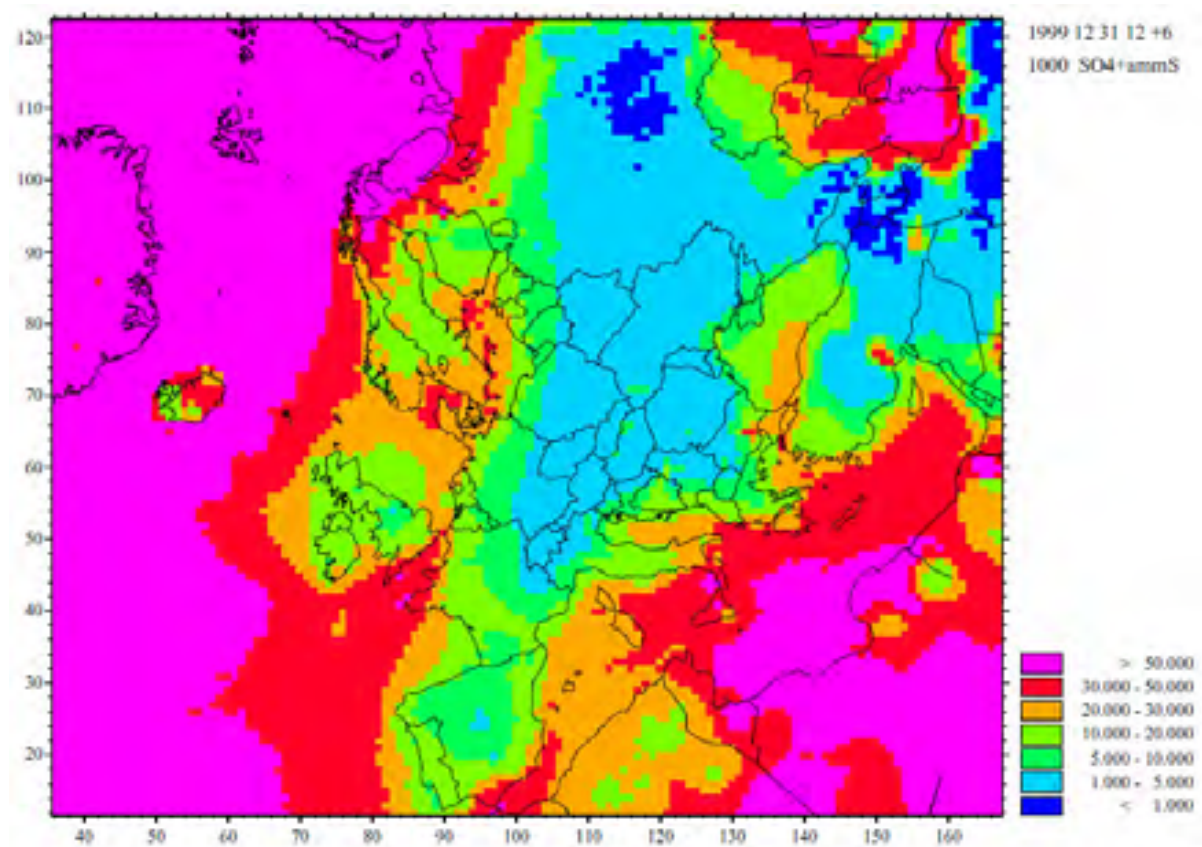
Final report from Entec UK Ltd for the European Commission “Quantification of emissions from ships associated with ship movements between ports in the European Community”.

図 5.2-23(2) ヨーロッパにおける船舶からの NOx 排出量分布図(kt/ yr/50km<sup>2</sup>)

### (3) 計算結果の比較

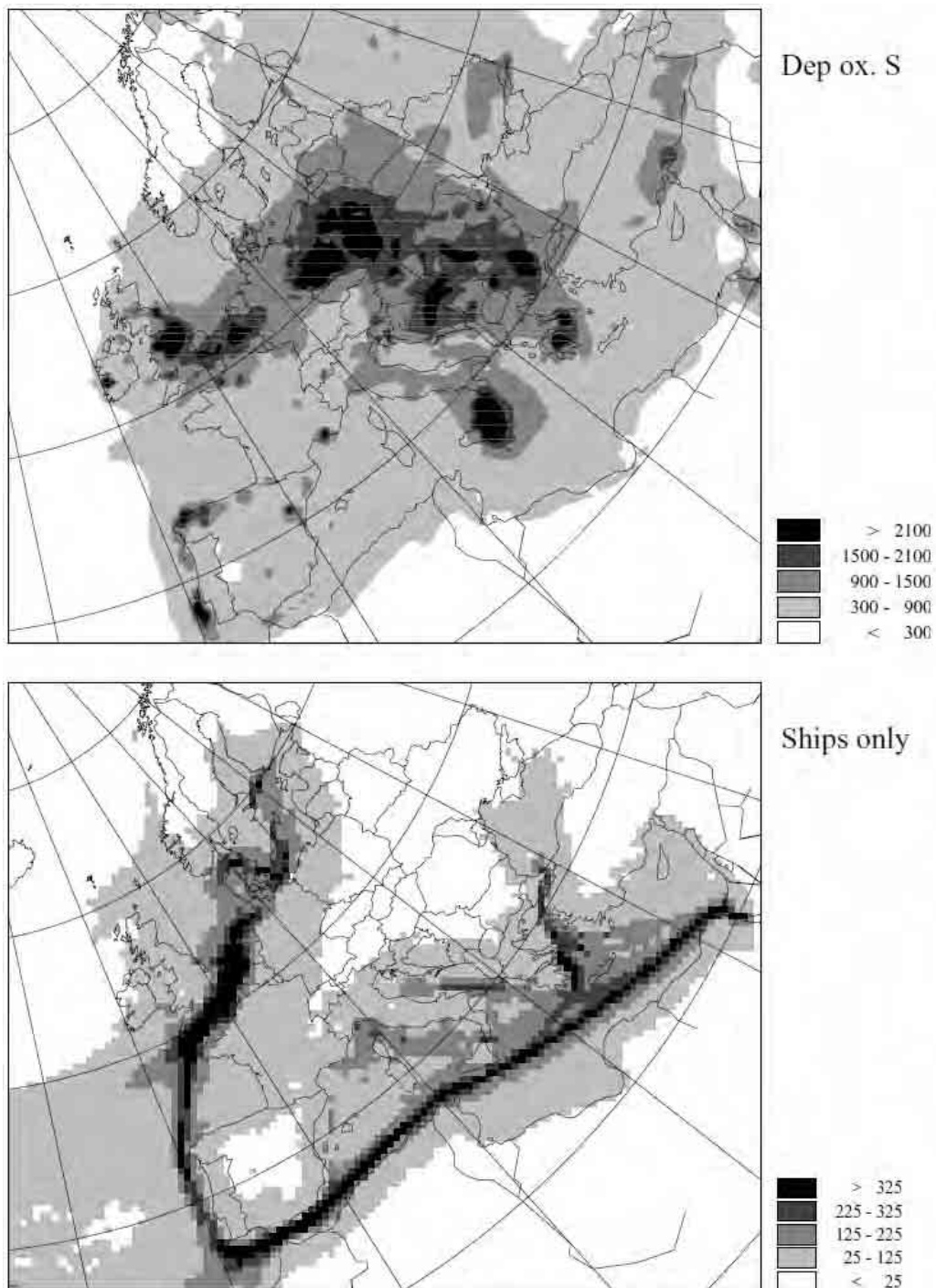
ヨーロッパにおける船舶の寄与濃度計算結果は図 5.2-24～図 5.2-26 に示すとおりである。

ヨーロッパにおいては、船舶起源の SO<sub>x</sub> は遠方まで影響があると言われており、航路帯から 1,000km 程度離れた地点における船舶寄与の SO<sub>x</sub> 沈着量は 25～125 mg-S/m<sup>2</sup>/年程度である。本調査のシミュレーションによれば、外洋航路帯から 1,000km 程度離れた地点における SO<sub>x</sub> 沈着量は 8 月で 19 mg-S/m<sup>2</sup>/年程度、1 月で 1 mg-S/m<sup>2</sup>/年程度であり、ヨーロッパに比べて影響は小さくなっている。



The influence of ship traffic emissions on the air concentrations of particulate matter. Preliminary estimate from EMEP/MSC/W under request of DG Environment. November 2001.

図 5.2-24 ヨーロッパの二次粒子に対する船舶の寄与割合(%)

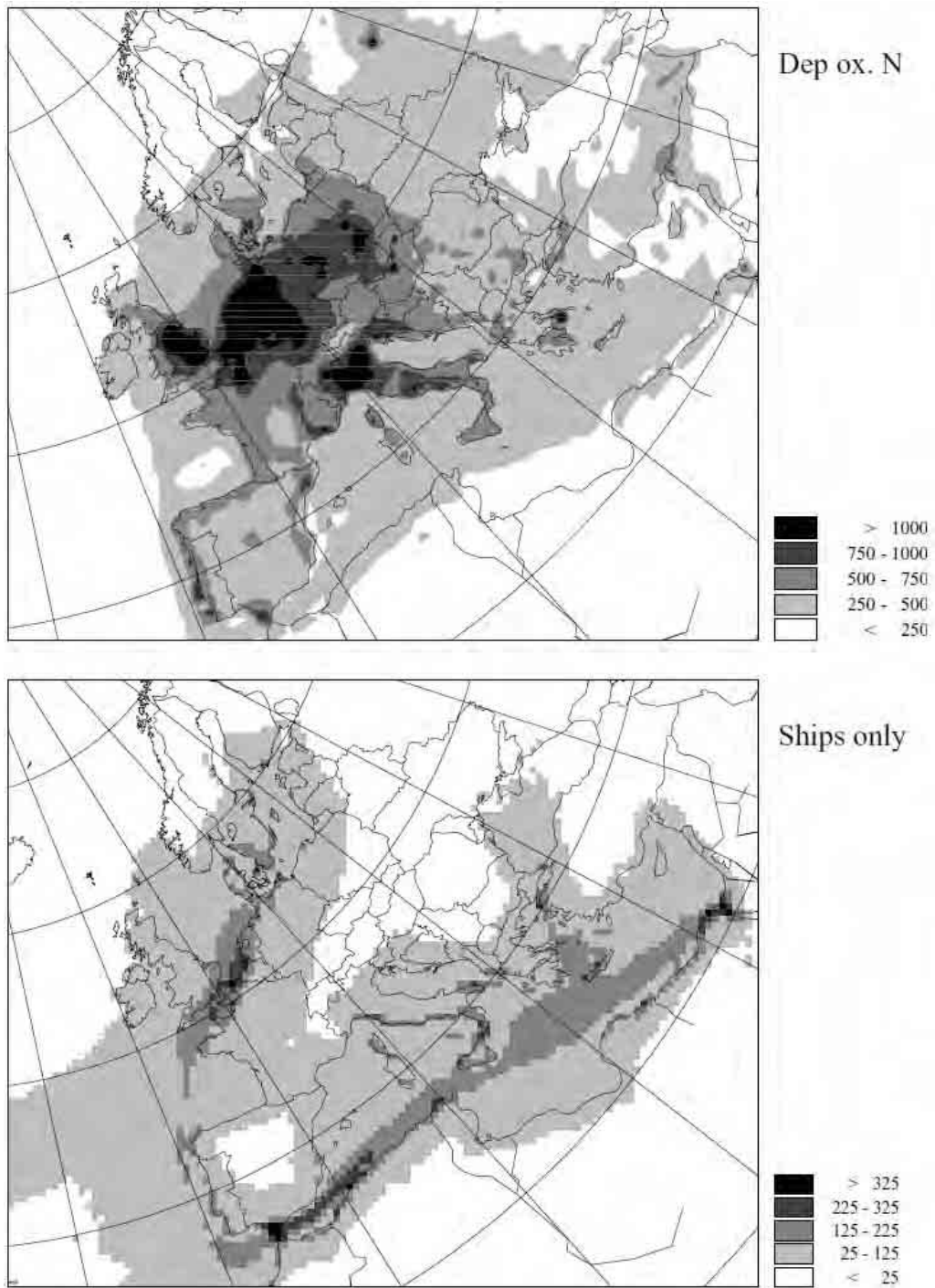


EMEP/MSC-W Note 5/00, July 2000.

"Effects of international shipping on European pollution levels".By Jan Eiof Jonson, Leonor Tarrasón and Jerzy Bartnicki

図 5.2-25 ヨーロッパの SOx 沈着量(上：全体、下：船舶)(mg-S/m<sup>2</sup>/年)





EMEP/MSC-W Note 5/00, July 2000.

"Effects of international shipping on European pollution levels". By Jan Eiof Jonson, Leonor Tarrasón and Jerzy Bartnicki

図 5.2-26 ヨーロッパの NOx 沈着量(上：全体、下：船舶)(mg-S/m<sup>2</sup>/年)

### 5.3 規制効果の予測

#### 5.3.1 対象とする規制の内容および検討ケース

船舶排出ガス規制については、2008年4月の国際海事機関(IMO)第57回海洋環境保護委員会(MEPC57)により表5.3-1に示すSO<sub>x</sub>およびPM規制、NO<sub>x</sub>規制が最終化された。このうち、PMについては、燃料の硫黄分に起因するものが多いことから、燃料中硫黄分規制を優先させることで合意されている。

燃料中の硫黄分規制によるPM削減効果を検証するケースとしては、ディーゼル機関で使用する燃料をA重油相当に転換するケースとし、燃料中硫黄分を0.5%(規制S<sub>0.5%</sub>)、0.1%(規制S<sub>0.1%</sub>)の2ケースとした。この2ケースはMEPC57において最終化されたSO<sub>x</sub>およびPM規制において、それぞれ一般海域の2020年以降の燃料中硫黄分規制、排出規制海域の2015年以降の燃料中硫黄分規制に相当する。

NO<sub>x</sub>規制によるPM削減効果を検証するケースとしては、現行船舶すべてがTier2規制値をクリアするケース(規制N<sub>Tier2</sub>)、現行船舶すべてがTier3規制値をクリアするケース(規制N<sub>Tier3</sub>)および2020年を想定したpre2000、Tier1、Tier2、Tier3混在ケース(規制N<sub>2020</sub>)の3ケースとした。規制N<sub>Tier2</sub>、規制N<sub>Tier3</sub>については、現実にはあり得ない設定だが、Tier2およびTier3のそれぞれの規制効果を把握するために設定した。

効果検証する規制の内容を表5.3-2に示す。

なお、MEPC57においては大型の現存船についても規制されることが最終案に盛り込まれたため、今回設定した規制ケースN<sub>2020</sub>よりもNO<sub>x</sub>排出量の削減が期待できる。

表 5.3-1 MEPC57で最終化された附属書VIの改正の概要(SO<sub>x</sub> および PM 規制、NO<sub>x</sub> 規制)

規制の種類	内容
SO <sub>x</sub> および PM 規制	燃料中硫黄分を規制 一般海域 2012年以降：3.50%、2020年以降：0.50% 排出規制海域 2010年以降：1.00%、2015年以降：0.10%
NO <sub>x</sub> 規制	新造船のエンジンに対する規制 2011年以降 Tier2：現行規制(Tier1)の15.5～21.8%削減(全海域で適用) 2016年以降 Tier3：現行規制(Tier1)の80%削減 (排出規制海域にのみ適用) 現存船のエンジンに対する規制 対象：1990年以降に建造された現存船のエンジンのうち、シリンダー容積90L以上かつ出力5,000kW以上 規制値：Tier1規制 時期：主管庁が規制適合手法を認証し、IMOに通報してから1年以降の最初の定期検査

表 5.3-2 効果検証する規制ケース

ケース	内容	NOx 規制	燃料 規制	期間
規制 S_0.5%	使用燃料の硫黄分を 0.5 %以下に規制 (一般海域の 2020 年以降の規制に相当)	—	○	1 ヶ月
規制 S_0.1%	使用燃料の硫黄分を 0.1 %以下に規制 (排出規制海域の 2015 年以降の規制に相当)	—	○	1 ヶ月
規制 N_Tier2	すべての船舶に Tier2 規制(30 %削減、現行船舶も対象)	○	—	1 ヶ月
規制 N_Tier3	すべての船舶に Tier3 規制(80 %削減、現行船舶も対象)	○	—	1 ヶ月
規制 N_2020	2020 年を想定(新造船に Tier2,3 規制、既存船は規制なし)	○	—	1 ヶ月

### 5.3.2 発生源データ

各種規制による削減量の推計においては、将来における活動量の変化は考慮せずに、解析対象年における規制船舶隻数と、規制により想定される排出係数のみから、将来排出量を設定した。算定方法の詳細は本報告書「6. 東京湾地域における船舶からの大気汚染物質排出量算定結果」に示すとおりである。

なお、三宅島からの SO<sub>2</sub> の大量放出は 2000 年の特異現象と考え、規制効果の検討においては、三宅島からの火山ガスは発生源データに含めていない。

### 5.3.3 計算対象期間

現況の対象年とした 2000 年度のうち、本報告書「5.2.4 (4) 評価地点における寄与濃度」で船舶の影響が大きいと考えられる月として選定した 1 ヶ月(8 月)を計算対象期間とした。

### 5.3.4 船舶寄与分の削減効果

#### (1) 燃料中硫黄分規制による削減効果

##### (a) 月平均濃度分布

現況、規制 S\_0.5%、規制 S\_0.1%における月平均濃度分布は図 5.3-1 に示すとおりである。  
各規制ケースの削減効果は以下のとおりである。

##### ① SO<sub>2</sub>

SO<sub>2</sub>の月平均濃度分布は図 5.3-1(1)に示すとおりであり、現況では9 µg/m<sup>3</sup>以上の高濃度域は沿岸から約40kmの内陸部まで広がっているが、規制 S\_0.5%により大幅に改善され、9 µg/m<sup>3</sup>以上の高濃度域は沿岸周辺に限られている。規制 S\_0.1%では、9 µg/m<sup>3</sup>以上の高濃度域はさらに縮小され、千葉港周辺に限られ、港湾の高濃度域はほぼ解消される。

現況では、WHOの日平均値のガイドライン値20 µg/m<sup>3</sup>を月平均値で超えている地域も見られるが、規制により月平均値でガイドライン値を超える地域は見られなくなる。

##### ② SO<sub>4</sub>粒子

SO<sub>4</sub>粒子の月平均濃度分布は図 5.3-1(2)に示すとおりであり、現況で見られている4.5 µg/m<sup>3</sup>以上の港湾周辺の高濃度域は、規制 S\_0.5%によりほぼ見られなくなる。この港湾周辺の改善効果は、船舶排出ガスに含まれる一次粒子成分のSO<sub>4</sub>粒子が減少するためと考えられる。

燃料中硫黄分規制によるSO<sub>4</sub>粒子の濃度低減効果は、港湾周辺ほど明確ではないものの、内陸部にも見られており、排出ガス中SO<sub>2</sub>から生成される二次粒子としてのSO<sub>4</sub>粒子も規制により減少すると考えられる。

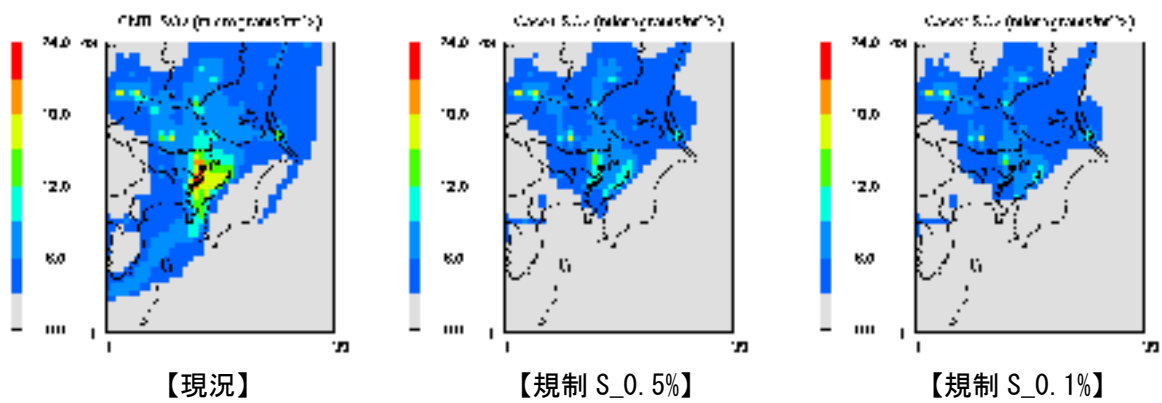


図 5.3-1 (1)  $\text{SO}_2$  の月平均濃度

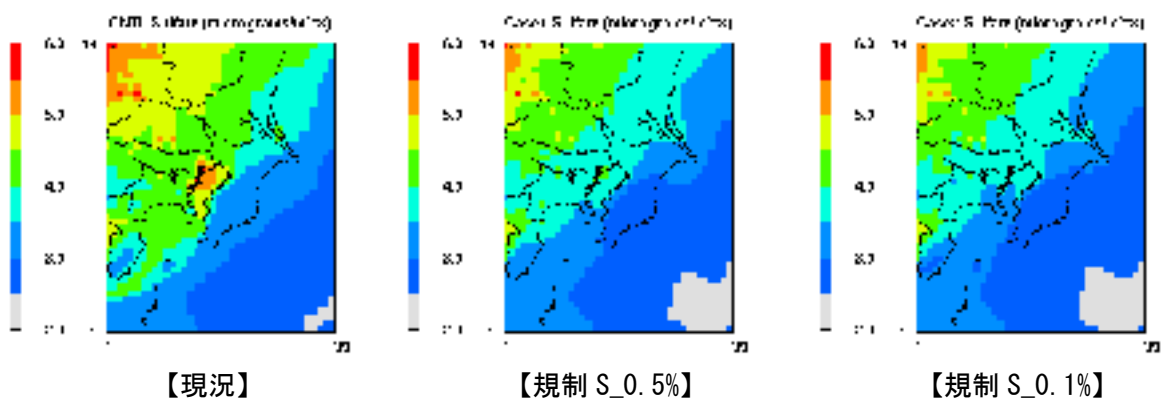


図 5.3-1 (2)  $\text{SO}_4$  粒子の月平均濃度

- ※ 規制 S\_0.5% : 使用燃料の硫黄分を 0.5 %以下に規制 (一般海域の 2020 年以降の規制に相当)
- 規制 S\_0.1% : 使用燃料の硫黄分を 0.1 %以下に規制 (排出規制海域の 2015 年以降の規制に相当)

(b) 評価地点における環境濃度

評価地点における燃料中硫黄分規制による削減効果は表 5.3-3 に、評価地点における現況、規制 S<sub>0.5%</sub>および規制 S<sub>0.1%</sub>の月平均値、日平均値の月最大値は図 5.3-2 および図 5.3-3 に示すとおりである。

① SO<sub>2</sub>

月平均値は、規制 S<sub>0.5%</sub>により港湾域で 47～62 %、郊外部(狛江)で 71 %、航路帯(浦賀水道)で 29 %まで低減している。規制 S<sub>0.1%</sub>では港湾域で 31～50 %、郊外部(狛江)で 64 %、航路帯(浦賀水道)で 13 %まで低減している。

日平均値の月最大値は、港湾域では現況において日平均値のガイドライン値 20 μg/m<sup>3</sup> を超過しているが、規制 S<sub>0.5%</sub>によりガイドライン値をクリアし、港湾域で 51～62 %、郊外部(狛江)で 72 %、航路帯(浦賀水道)で 49 %まで低減している。規制 S<sub>0.1%</sub>では港湾域で 37～52 %、郊外部(狛江)で 65 %、航路帯(浦賀水道)で 37 %まで低減している。

② SO<sub>4</sub> 粒子

月平均値は、規制 S<sub>0.5%</sub>により港湾域で 74～82 %、郊外部(狛江)で 89 %、航路帯(浦賀水道)で 73 %まで低減している。規制 S<sub>0.1%</sub>では港湾域で 66～78 %、郊外部(狛江)で 86 %、航路帯(浦賀水道)で 66 %まで低減している。

日平均値の月最大値は、規制 S<sub>0.5%</sub>により港湾域で 87～95 %、郊外部(狛江)で 95 %、航路帯(浦賀水道)で 89 %まで低減している。規制 S<sub>0.1%</sub>では港湾域で 84～93 %、郊外部(狛江)で 94 %、航路帯(浦賀水道)で 87 %まで低減している。

このことは、SO<sub>2</sub> 濃度ほどではないが、燃料中硫黄分規制が、間接的に SPM (PM<sub>2.5</sub>) の大気環境改善に一定の効果があることを示している。MEPC57 においてもこの効果については認識されており、PM 独自の規制は設けずに燃料中硫黄分の削減により PM を削減することが合意され、SO<sub>x</sub> 規制および PM 規制として燃料中硫黄分の規制が最終化された。

表 5.3-3 燃料中硫黄分規制による削減効果

項目	統計値	ケース	HARUMI	DAIBA	YASHIO	KOMAE	KASODAI	URAGASUIDO
SO <sub>2</sub>	月平均値	CNTL	100%	100%	100%	100%	100%	100%
		S <sub>0.5%</sub>	56%	47%	62%	71%	48%	29%
		S <sub>0.1%</sub>	44%	31%	50%	64%	34%	13%
	日平均値の月最大値	CNTL	100%	100%	100%	100%	100%	100%
		S <sub>0.5%</sub>	62%	53%	62%	72%	51%	49%
		S <sub>0.1%</sub>	52%	39%	52%	65%	37%	37%
SO <sub>4</sub>	月平均値	CNTL	100%	100%	100%	100%	100%	100%
		S <sub>0.5%</sub>	79%	74%	82%	89%	80%	73%
		S <sub>0.1%</sub>	73%	66%	78%	86%	75%	66%
	日平均値の月最大値	CNTL	100%	100%	100%	100%	100%	100%
		S <sub>0.5%</sub>	88%	87%	93%	95%	95%	89%
		S <sub>0.1%</sub>	85%	84%	91%	94%	93%	87%

※ 規制 S<sub>0.5%</sub> : 使用燃料の硫黄分を 0.5 %以下に規制 (一般海域の 2020 年以降の規制に相当)  
 規制 S<sub>0.1%</sub> : 使用燃料の硫黄分を 0.1 %以下に規制 (排出規制海域の 2015 年以降の規制に相当)

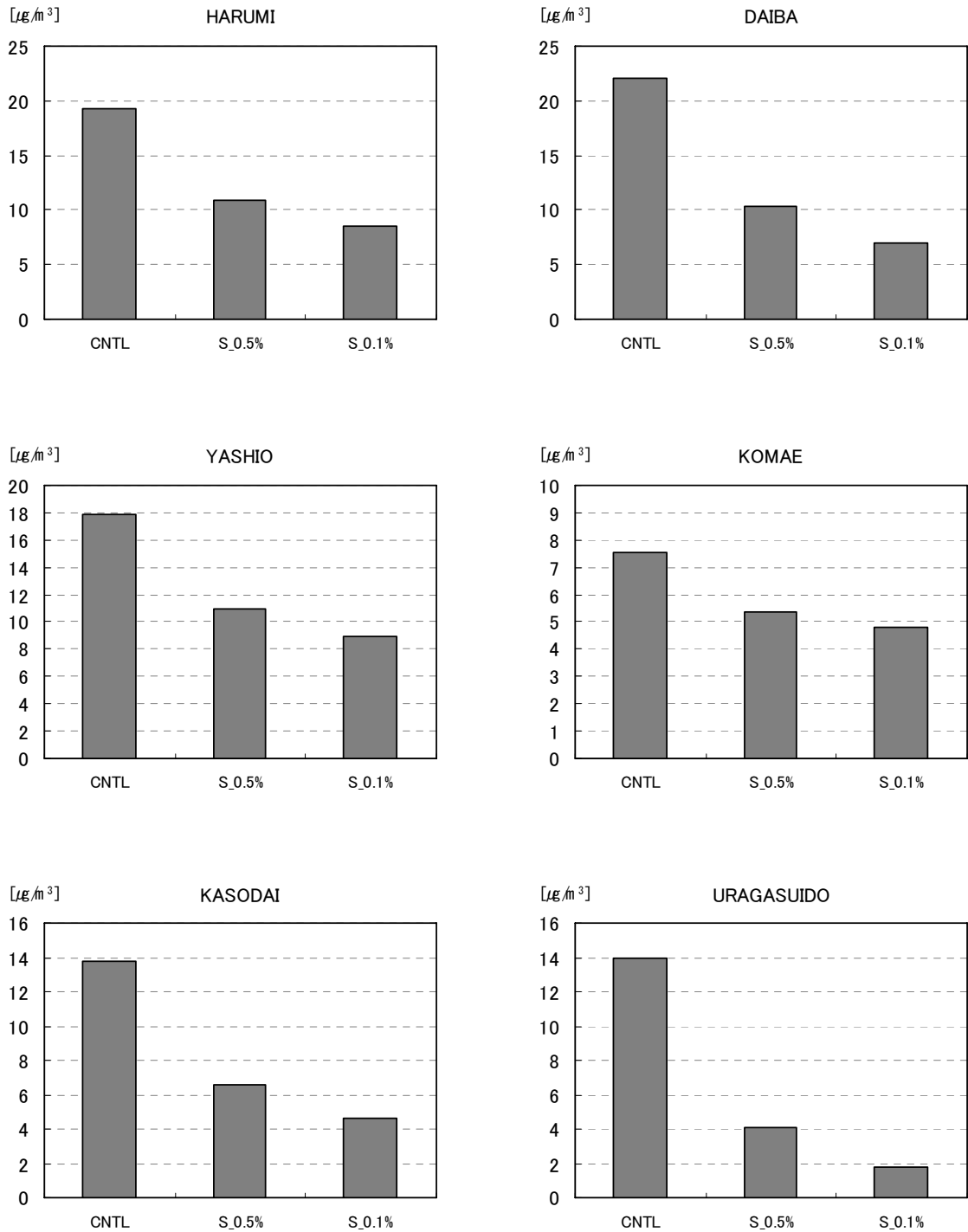


図 5.3-2 (1) SO<sub>2</sub> の月平均濃度

※ 規制 S\_0.5% : 使用燃料の硫黄分を 0.5%以下に規制 (一般海域の 2020 年以降の規制に相当)  
 規制 S\_0.1% : 使用燃料の硫黄分を 0.1%以下に規制 (排出規制海域の 2015 年以降の規制に相当)

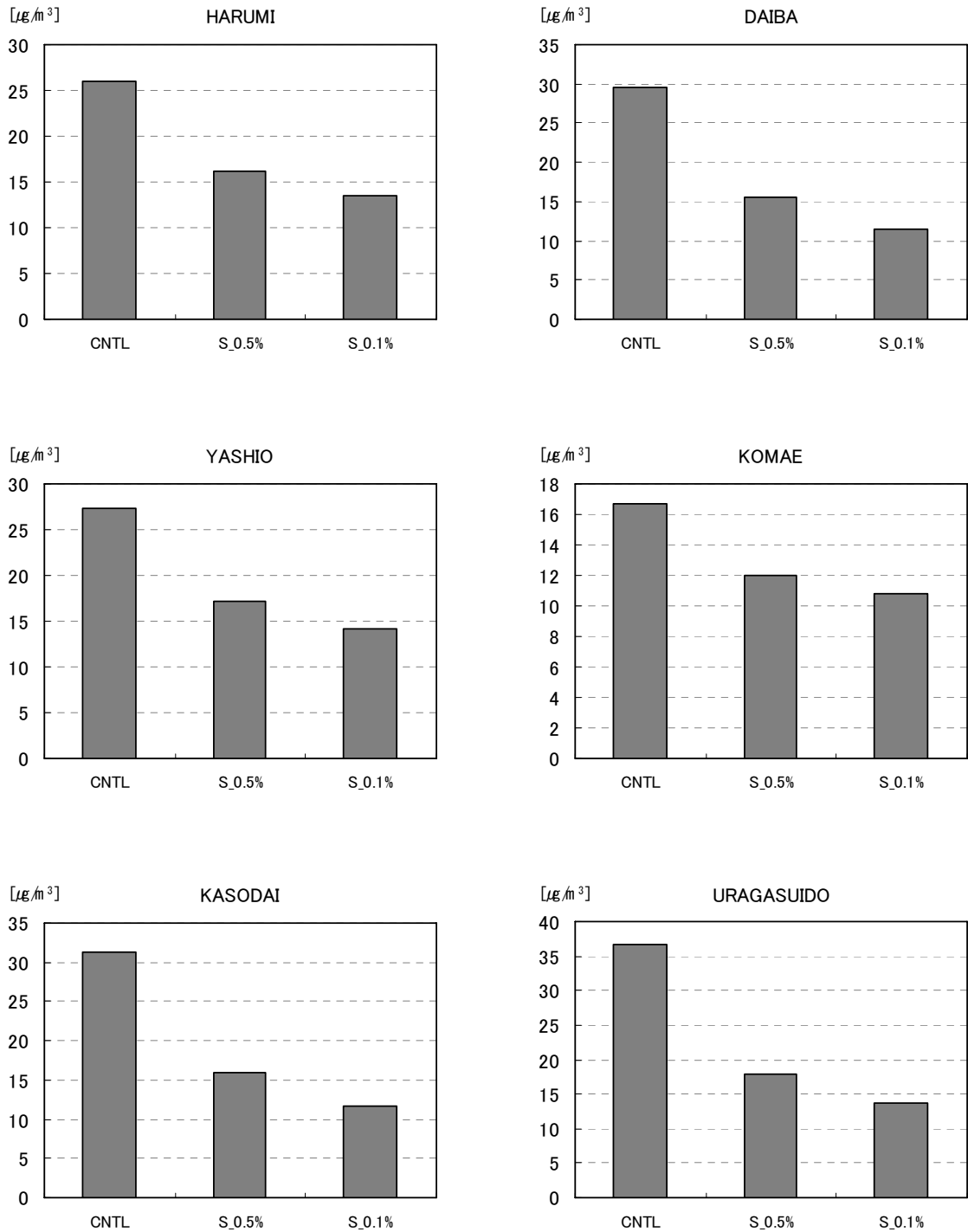


図 5.3-2 (2) SO<sub>2</sub> の日平均値の月最大値

- ※ 規制 S\_0.5% : 使用燃料の硫黄分を 0.5%以下に規制 (一般海域の 2020 年以降の規制に相当)  
 規制 S\_0.1% : 使用燃料の硫黄分を 0.1%以下に規制 (排出規制海域の 2015 年以降の規制に相当)



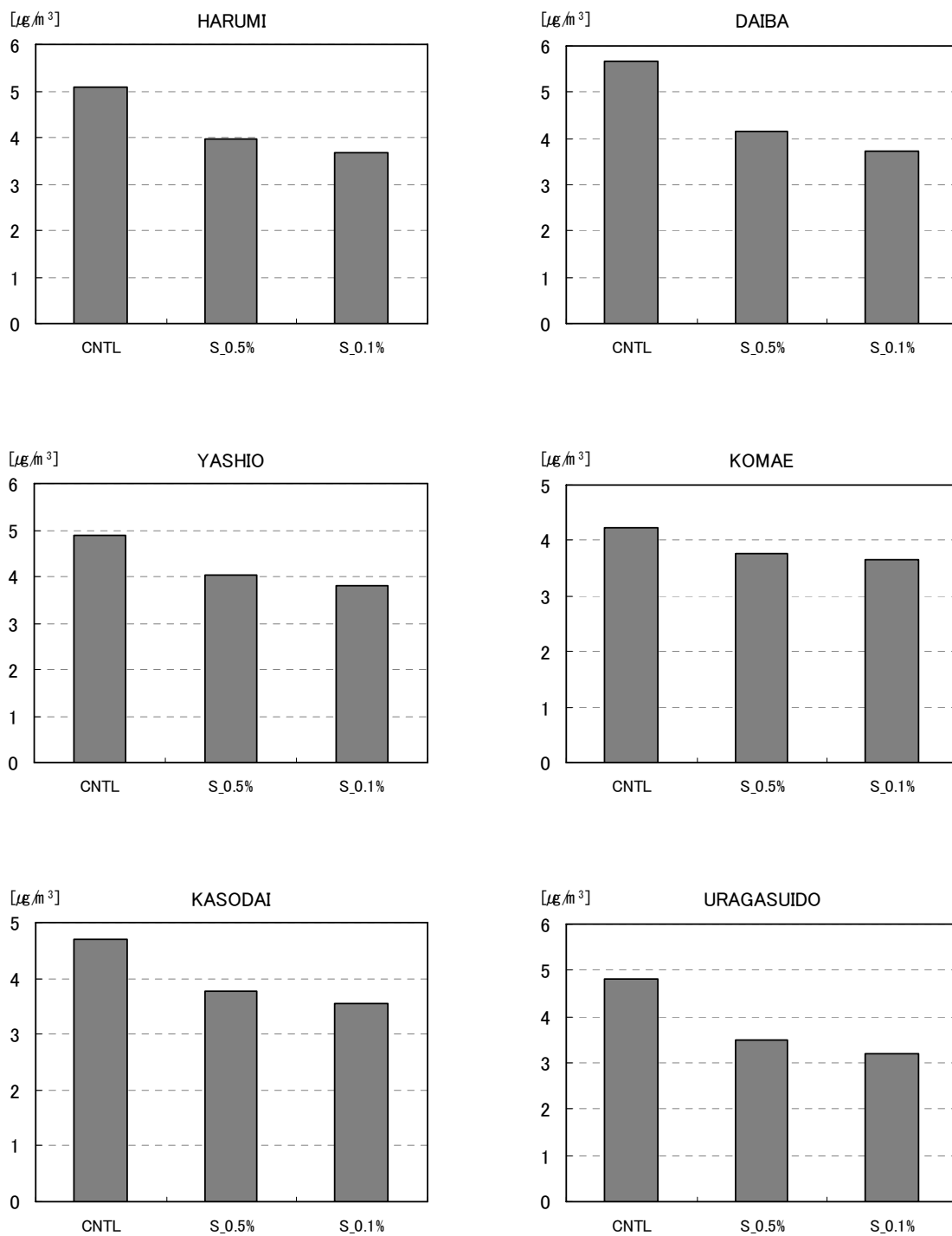


図 5.3-3 (1) SO<sub>4</sub>粒子の月平均濃度

※ 規制 S\_0.5% : 使用燃料の硫黄分を 0.5%以下に規制 (一般海域の 2020 年以降の規制に相当)  
 規制 S\_0.1% : 使用燃料の硫黄分を 0.1%以下に規制 (排出規制海域の 2015 年以降の規制に相当)

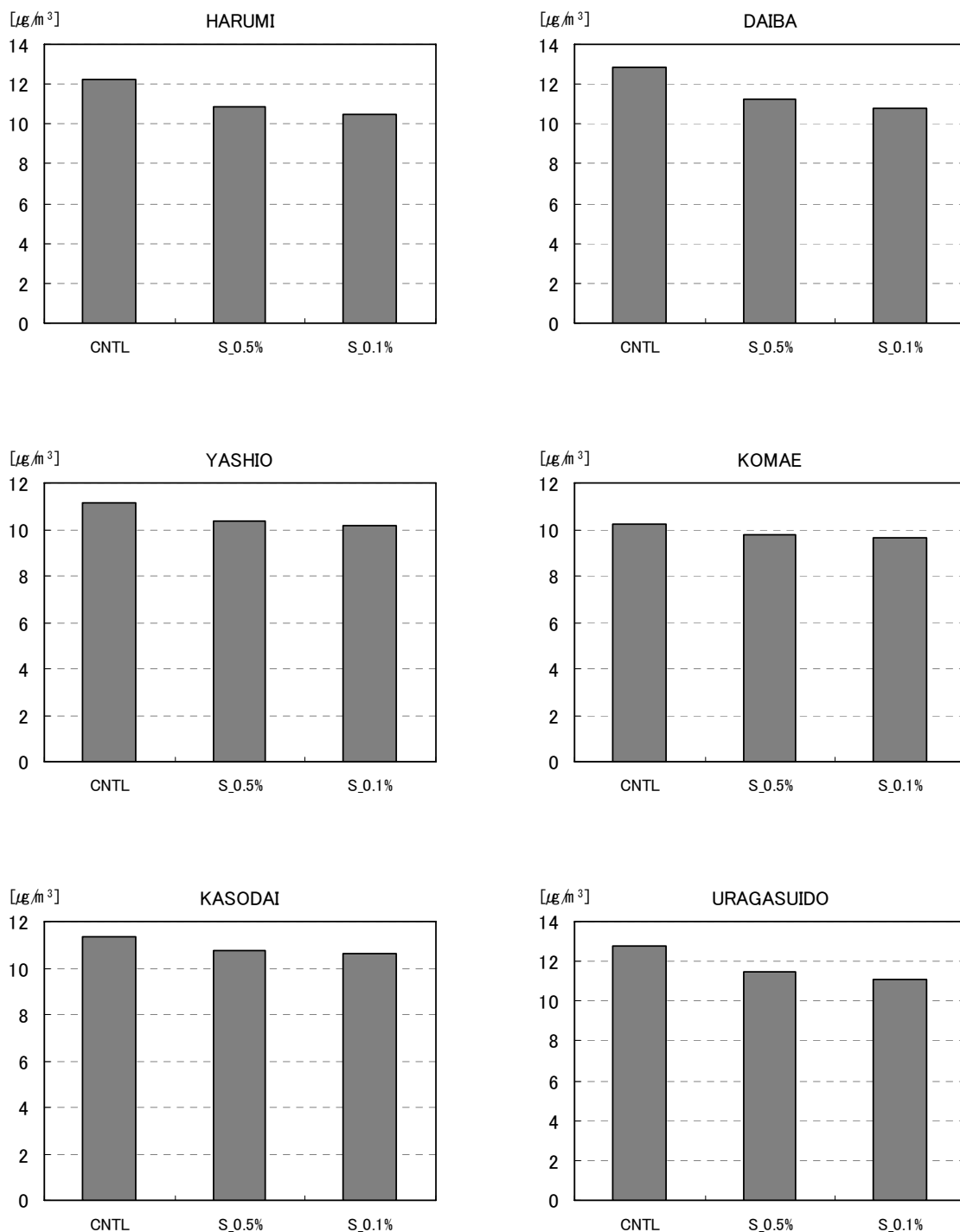


図 5.3-3 (2) SO<sub>4</sub>粒子の日平均値の月最大値

※ 規制 S\_0.5% : 使用燃料の硫黄分を 0.5%以下に規制 (一般海域の 2020 年以降の規制に相当)  
 規制 S\_0.1% : 使用燃料の硫黄分を 0.1%以下に規制 (排出規制海域の 2015 年以降の規制に相当)

### (c) 排出量削減割合と環境濃度改善効果の関係

燃料中硫黄分規制による排出量削減割合と評価地点における環境濃度改善効果の関係は図 5.3-4 に示すとおりである。

SO<sub>2</sub> は船舶排出量の削減効果が大きく、船舶からの SO<sub>2</sub> 排出量を 0 に近づければ、港湾部においては、現況濃度の 3～5 割程度まで、郊外部の狛江においても、現況濃度の 6 割程度まで改善できる可能性がある。

SO<sub>4</sub> 粒子の船舶排出量の削減効果は、SO<sub>2</sub> ほど顕著ではないが、船舶からの凝縮性粒子である SO<sub>4</sub> 粒子排出量を 0 に近づければ、港湾部においては、現況濃度の 6～7 割程度まで、郊外部の狛江においても、現況濃度の 8 割程度まで改善できる可能性がある。なお、船舶発生源近傍の港湾域において SO<sub>4</sub> 粒子の削減効果が見られるのは一次粒子(凝縮性粒子)に対する効果と考えられる。

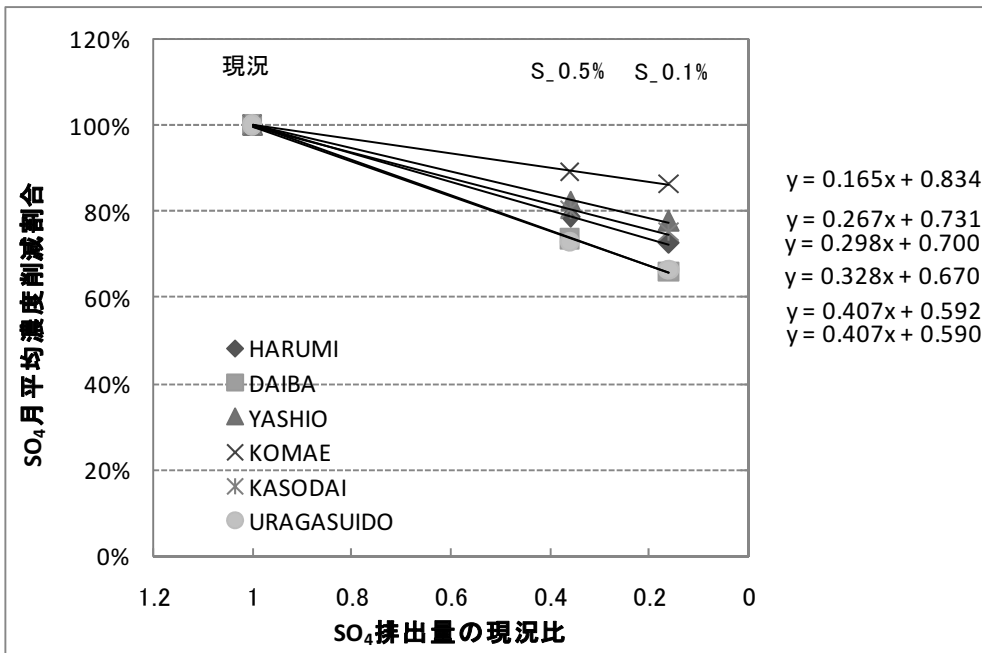
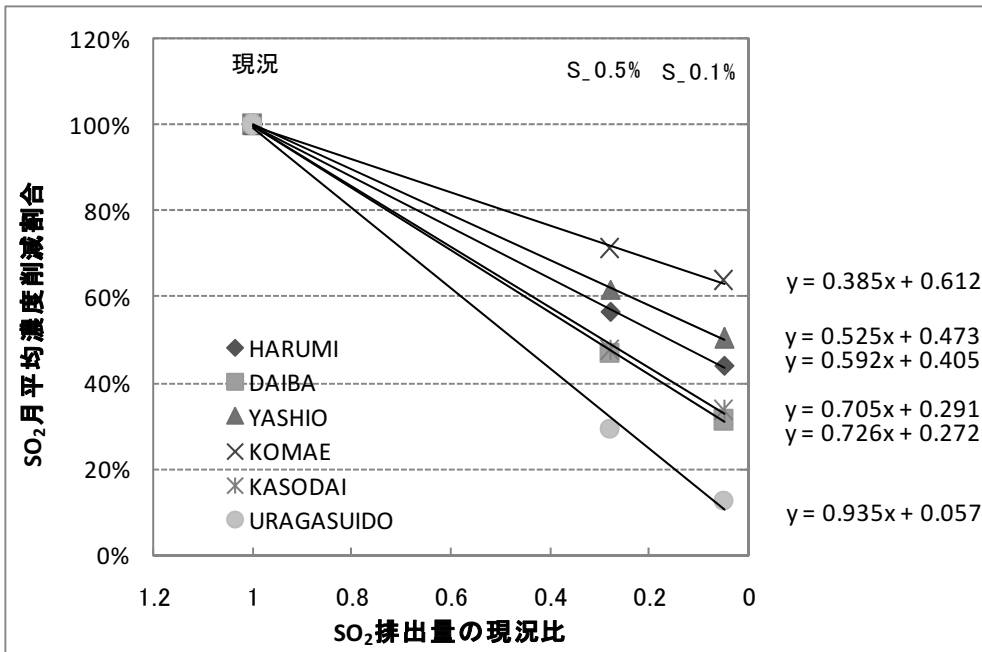


図 5.3-4 排出量削減割合と環境濃度改善効果の関係

## (2) NOx 規制による削減効果

### (a) 月平均濃度分布

現況、規制 N\_Tier2、規制 N\_Tier3 および規制 N\_2020 における月平均濃度分布は図 5.3-5～図 5.3-7 に示すとおりである。

規制 N\_Tier2 により東京湾内および沿岸の NO<sub>2</sub> 濃度は若干低減される程度であり、港湾周辺部および航路帯周辺部の影響範囲は解消されず、環境濃度改善効果は必ずしも十分ではない。規制 N\_Tier3 により東京湾および航路帯の NO<sub>2</sub> 濃度の高濃度域はかなり低減され、環境改善効果は顕著である。

現況で WHO の年平均値のガイドライン値(40 μg/m<sup>3</sup>)を超過するエリア(赤色)は、規制 N\_Tier3 によりほぼすべてガイドライン値を下回る。ただし、船舶の耐用年数を考慮すると、ここまでの効果が期待できるのは 2040 年以降となることに留意する必要がある。実際に、2020 年において期待できる導入速度を考慮すると(規制 N\_2020)、8 月においても月平均値の削減率は 5 % 程度である。

NOx 規制については、SO<sub>2</sub> 規制のような全船を対象にした実効性のある規制方法が現状では考えられないため、Tier3 のように厳しい規制を新船に対して適用することは環境面から考えても合理性があると考えられる。なお、MEPC57 では、排出規制海域の大型既存船に対しても Tier1 規制が導入されることが最終化され、今回の結果の懸念事項である早期の環境改善効果を期待できる規制の枠組みとなっている。

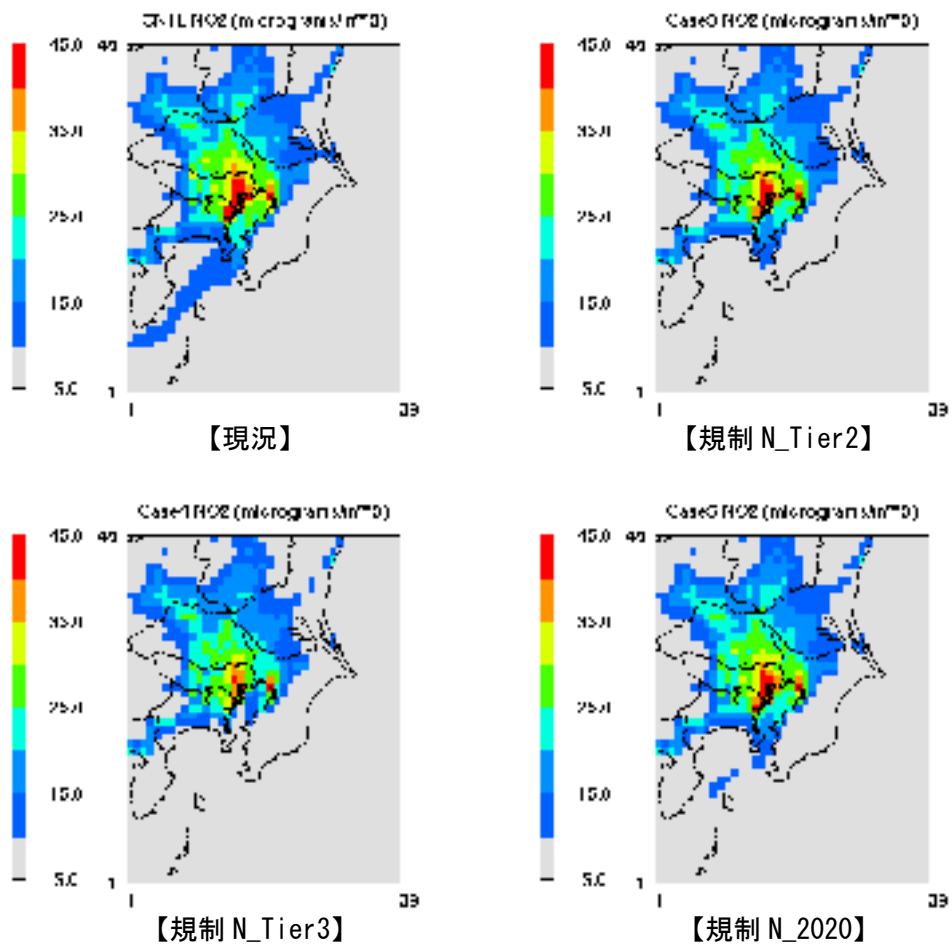


図 5.3-5 NO<sub>2</sub>の月平均濃度

- ※ 規制 N\_Tier2 : すべての船舶に Tier2 規制(30%削減、現行船舶も対象)
- 規制 N\_Tier3 : すべての船舶に Tier3 規制(80%削減、現行船舶も対象)
- 規制 N\_2020 : 2020年を想定(新造船に Tier2,3 規制)

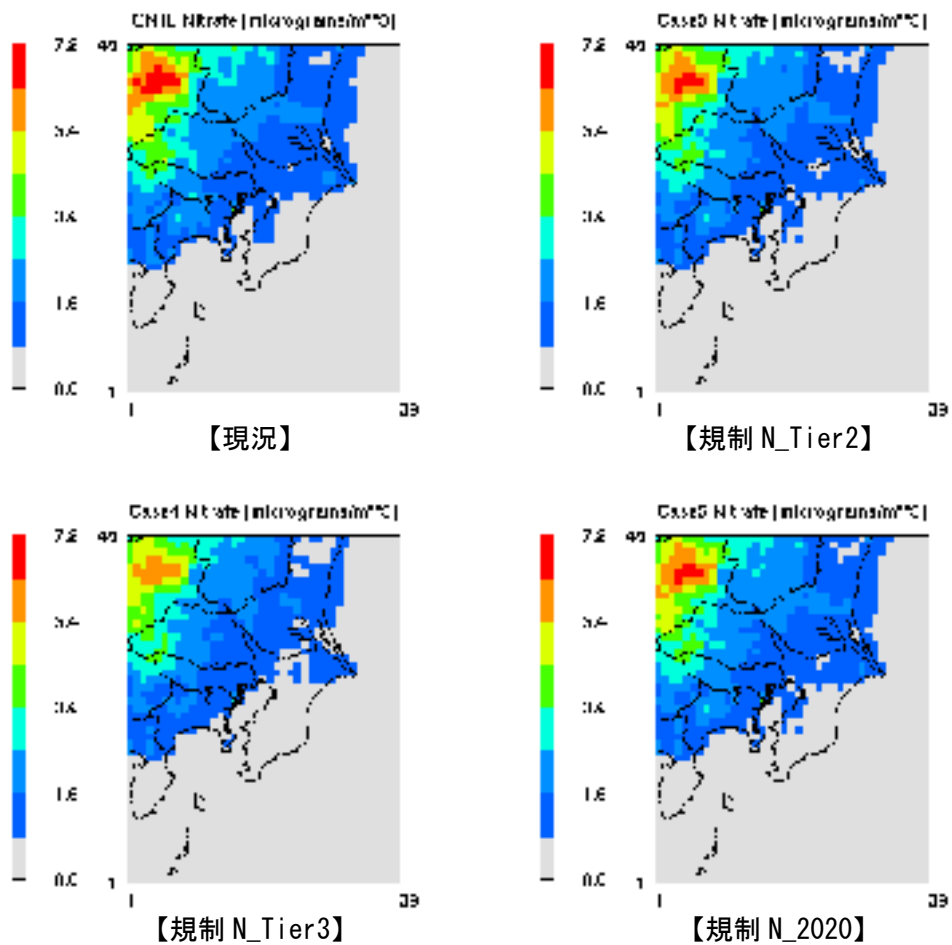


図 5.3-6 NO<sub>3</sub>粒子の月平均濃度

- ※ 規制 N\_Tier2 : すべての船舶に Tier2 規制(30%削減、現行船舶も対象)
- 規制 N\_Tier3 : すべての船舶に Tier3 規制(80%削減、現行船舶も対象)
- 規制 N\_2020 : 2020年を想定(新造船に Tier2,3 規制)

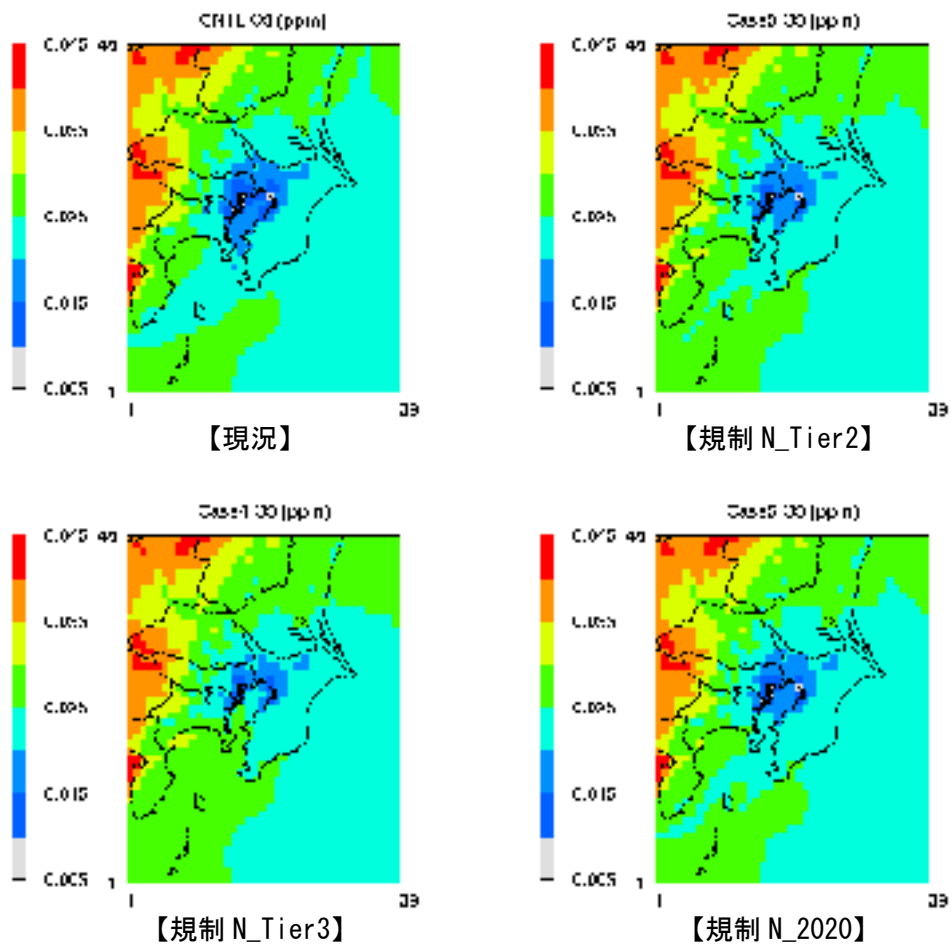


図 5.3-7 O<sub>3</sub>の月平均濃度

- ※ 規制 N\_Tier2 : すべての船舶に Tier2 規制(30 %削減、現行船舶も対象)
- 規制 N\_Tier3 : すべての船舶に Tier3 規制(80 %削減、現行船舶も対象)
- 規制 N\_2020 : 2020 年を想定(新造船に Tier2,3 規制)



(b) 評価地点における環境濃度

評価地点における NOx 規制による削減効果は表 5.3-4 に、評価地点における現況、規制 N\_Tier2、規制 N\_Tier3 および規制 N\_2020 の月平均値、日平均値の月最大値は図 5.3-8 に示すとおりである。

NO<sub>2</sub> 濃度の月平均値は、規制 N\_Tier2 により港湾域で 89～93 %、郊外部(狛江)で 96 %、航路帯(浦賀水道)で 71 %まで低減している。規制 N\_Tier3 では港湾域で 74～85 %、郊外部(狛江)で 91 %、航路帯(浦賀水道)で 29 %まで低減している。規制 N\_Tier3 の船舶からの NOx 排出量は現況の 16 %であるが、NO<sub>2</sub> の環境濃度の低減効果は顕著には見られていない。

2020 年を想定した規制 N\_2020 では、港湾域で 92～95 %まで低減している。

NO<sub>2</sub> 濃度の日平均値の月最大値は、規制 N\_Tier2 により港湾域で 88～91 %、郊外部(狛江)で 88 %、航路帯(浦賀水道)で 74 %まで低減している。規制 N\_Tier3 では港湾域で 72～80 %、郊外部(狛江)で 88 %、航路帯(浦賀水道)で 42 %まで低減している。

2020 年を想定した規制 N\_2020 では、港湾域で 92～94 %まで低減している。

表 5.3-4 NOx 規制による削減効果

項目	統計値	ケース	HARUMI	DAIBA	YASHIO	KOMAE	KASODAI	URAGASUIDO
NO <sub>2</sub>	月平均値	CNTL	100%	100%	100%	100%	100%	100%
		N_Tier2	92%	93%	93%	96%	89%	71%
		N_Tier3	82%	83%	85%	91%	74%	29%
		N_2020yr	95%	95%	95%	97%	92%	79%
	日平均値の月最大値	CNTL	100%	100%	100%	100%	100%	100%
		N_Tier2	89%	91%	91%	94%	88%	74%
		N_Tier3	75%	76%	80%	88%	72%	42%
		N_2020yr	92%	94%	93%	96%	92%	81%

- ※ 規制 N\_Tier2 : すべての船舶に Tier2 規制(30 %削減、現行船舶も対象)
- 規制 N\_Tier3 : すべての船舶に Tier3 規制(80 %削減、現行船舶も対象)
- 規制 N\_2020 : 2020 年を想定(新造船に Tier2,3 規制)

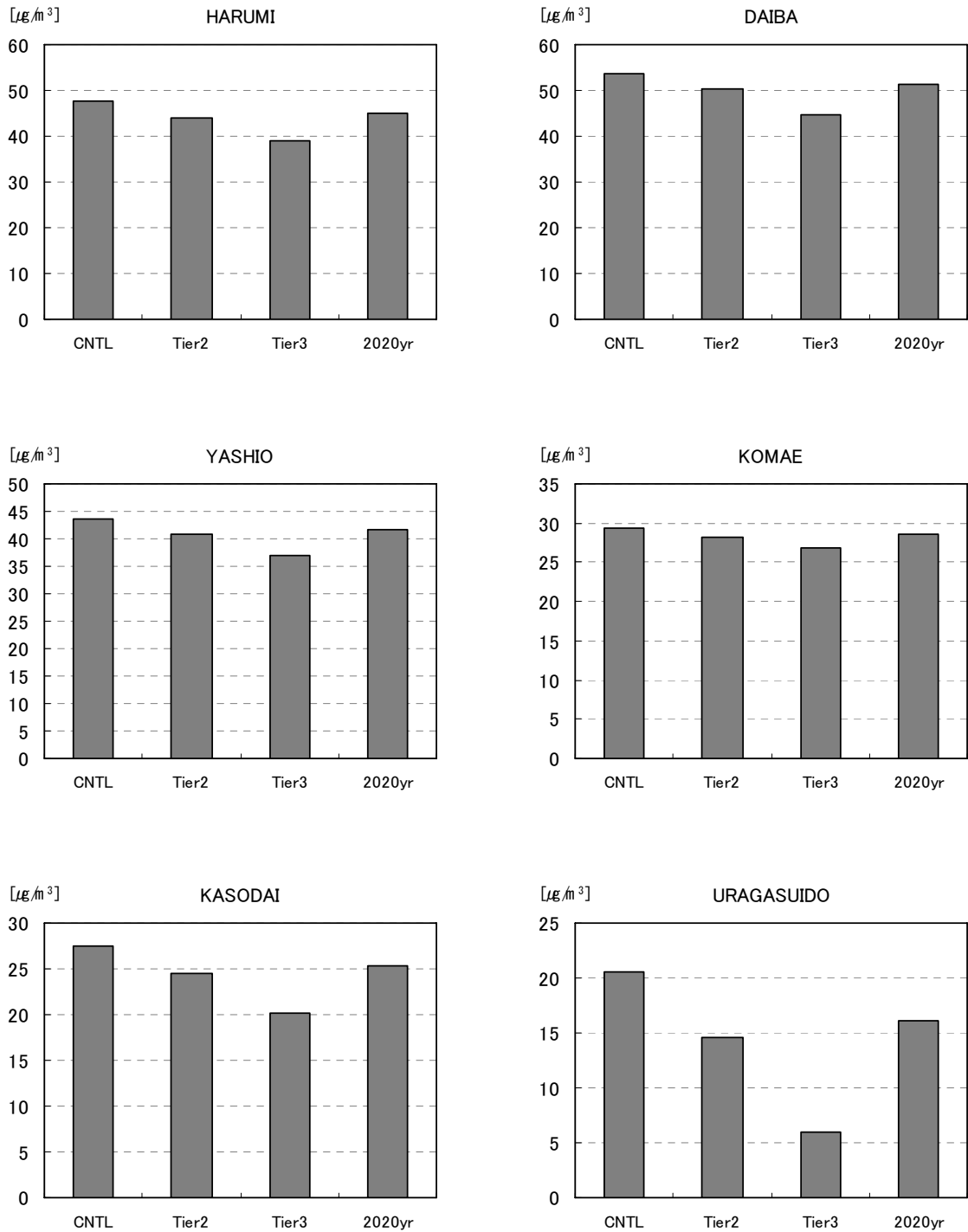


図 5.3-8 (1) NO<sub>2</sub> の月平均濃度

- ※ 規制 N\_Tier2 : すべての船舶に Tier2 規制(30%削減、現行船舶も対象)
- 規制 N\_Tier3 : すべての船舶に Tier3 規制(80%削減、現行船舶も対象)
- 規制 N\_2020 : 2020年を想定(新造船に Tier2,3 規制)

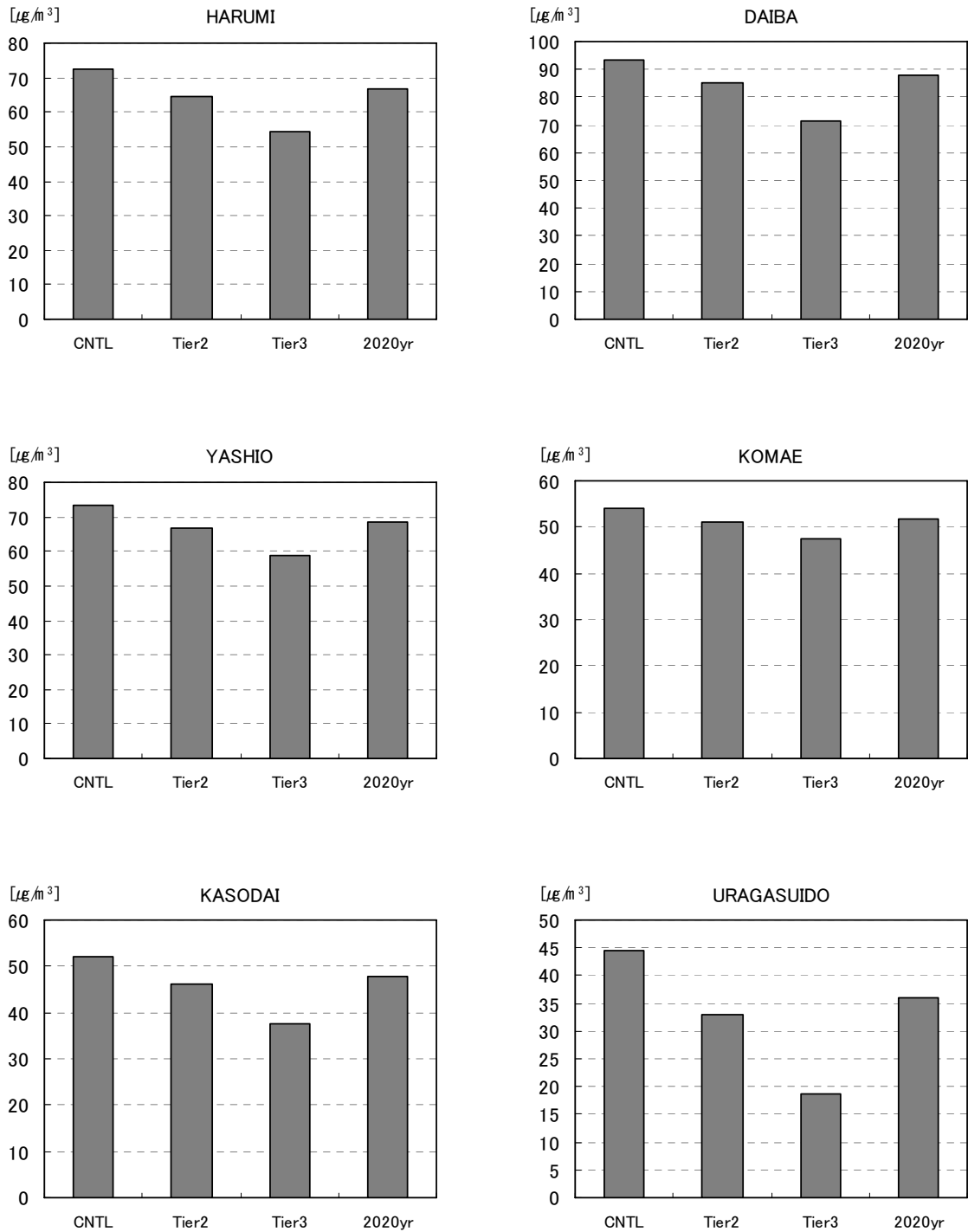


図 5.3-8 (2) NO<sub>2</sub> の日平均値の月最大値

- ※ 規制 N\_Tier2 : すべての船舶に Tier2 規制(30%削減、現行船舶も対象)
- 規制 N\_Tier3 : すべての船舶に Tier3 規制(80%削減、現行船舶も対象)
- 規制 N\_2020 : 2020年を想定(新造船に Tier2,3 規制)

(c) 排出量削減割合と環境濃度改善効果の関係

NO<sub>x</sub> 規制による排出量削減割合と評価地点における環境濃度改善効果の関係は図 5.3-9 に示すとおりである。

NO<sub>2</sub> の船舶排出量の削減効果は、SO<sub>2</sub> ほど顕著ではないが、船舶排出量を 0 に近づければ、港湾部においては現況濃度の 7~8 割程度まで、郊外部の狛江においては現況濃度の 9 割程度まで改善できる可能性がある。

なお、シミュレーションに用いた陸上発生源の排出量は 2000 年のままであるが、現実には陸上発生源についてはかなり規制が進んでいるため、環境濃度としてはさらに改善されていることが期待される。

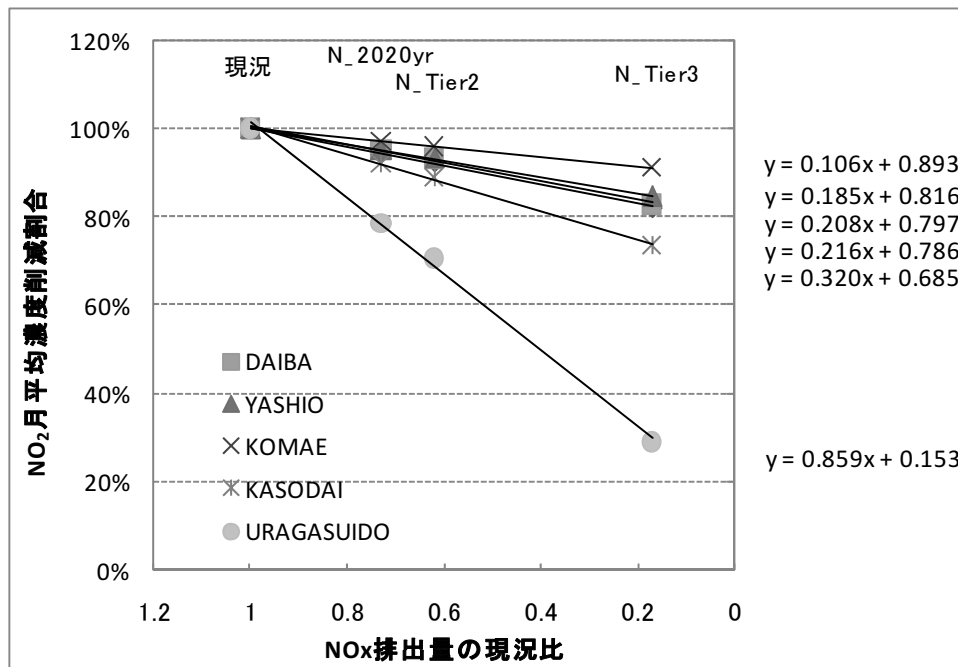


図 5.3-9 排出量削減割合と環境濃度改善効果の関係

### 5.3.5 大気中 PM 濃度の基準超過状況の改善効果

全国の都市部の一般環境大気測定局(以下「一般局」という)14局、自動車排出ガス測定局(以下「自排局」という)16局における PM<sub>2.5</sub> 濃度は近年減少傾向にあるが、依然として WHO のガイドライン値 (年平均値 10 µg/m<sup>3</sup>) を上回る高いレベルにある (図 5.3-10)。また首都圏における PM<sub>2.5</sub> 濃度についても同様に、近年、明らかな減少傾向にある (Minoura et al., 2006<sup>2</sup>; 速水・藤田, 2006<sup>3</sup>) が、依然として WHO のガイドライン値 (年平均値 10 µg/m<sup>3</sup>) を上回る高いレベルにある (図 5.3-11 参照)。

PM<sub>2.5</sub> 中の成分は、全国の一般局では SO<sub>4</sub> 粒子の占める割合が最も多く 23~29% を占めており、自排局では EC に次いで SO<sub>4</sub> 粒子が多く 19% を占めていた (環境省, 2008<sup>4</sup>)。今回行った東京港周辺における大気中 PM 調査結果 (本報告書「7.3.8 質量濃度および成分分析結果」参照) では、硫酸イオンが PM<sub>2.5</sub> の主成分であり 20~40% を占めていることが示されている。

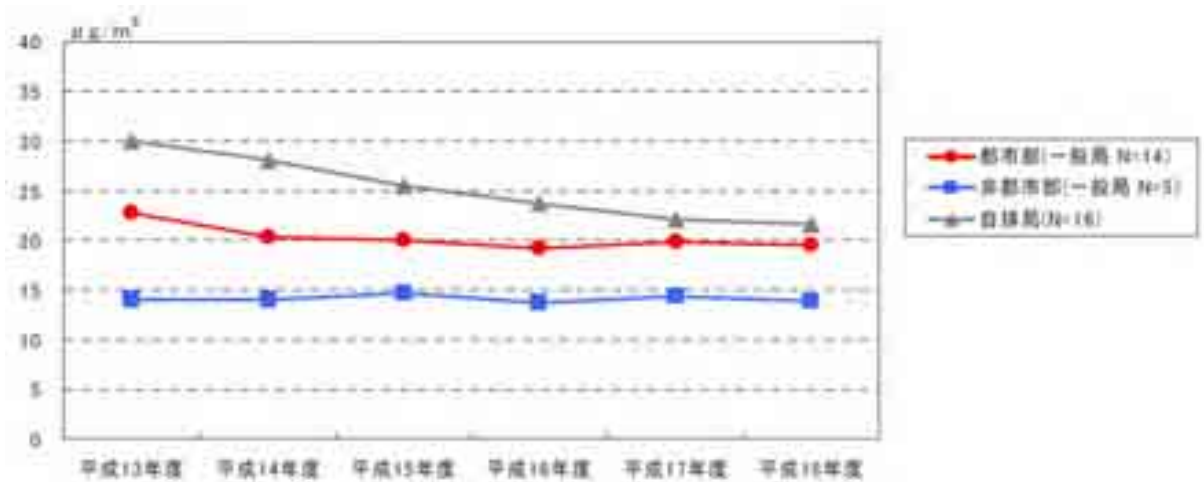
今回のシミュレーション結果により、使用燃料の硫黄分を 0.1% 以下に規制することで、港湾域において、SO<sub>4</sub> 粒子濃度は 2~3 割削減される効果が示された。SO<sub>4</sub> 粒子は PM<sub>2.5</sub> の主成分であることから、燃料中硫黄分規制により最大 10% 程度の PM<sub>2.5</sub> 濃度の低減が期待され、大気濃度基準の超過状況の改善に一定の効果があるものと考えられる。

---

<sup>2</sup> Minoura et al.(2006) : Multi-year Trend in Fine and Coarse Particle Mass, Carbon, and Ions in Downtown Tokyo, Japan, Atmospheric Environment, 40, 2006

<sup>3</sup> 速水・藤田(2006) : 東京都狛江市における PM<sub>2.5</sub> 質量濃度と無機イオン成分の経年変化, J.Aerosol Res., 21(4)

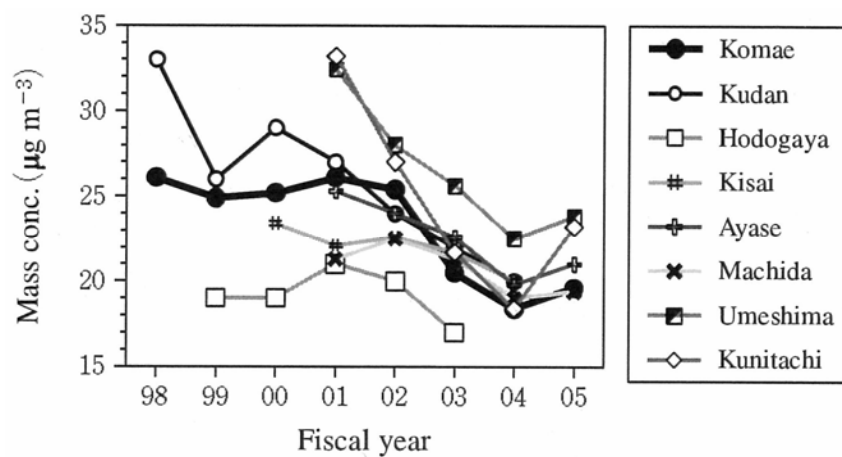
<sup>4</sup> 「微小粒子状物質健康影響評価検討会報告書」 (環境省、平成 20 年 4 月)



※ N=調査地点数

出典) 「微小粒子状物質健康影響評価検討会報告書」(環境省、平成20年4月)

図 5.3-10 全国におけるPM<sub>2.5</sub>濃度の経年変化



※ 九段はPM<sub>2.1</sub>のデータを示している。

出典) 速水・藤田(2006)

図 5.3-11 首都圏におけるPM<sub>2.5</sub>濃度の経年変化

## 5.4 結論

- 船舶からの  $\text{SO}_2$  が影響する範囲 (船舶寄与割合が 25 %以上)は、4月から8月にかけて内陸部に広がっている。一方、北よりの季節風が強くなる冬季においては港湾の北に位置する内陸部へは広がっていない。 $\text{SO}_4$  粒子の船舶寄与濃度については、 $\text{SO}_2$  と比べて濃度は低いものの、 $\text{SO}_2$  と同様に6月から8月にかけて高くなっている。
- $\text{NO}_2$  の船舶寄与濃度は、5月から9月にかけて高くなっており、特に8、9月は湾外航路付近における船舶寄与割合は  $\text{SO}_2$  よりもむしろ高くなっている。船舶からの  $\text{NO}_x$  が影響する範囲(船舶寄与割合が 25 %以上)は、 $\text{SO}_2$  に比べて狭く、船舶寄与が大きくなる6月から9月においても  $\text{SO}_2$  ほど内陸部に広がっていない。 $\text{HNO}_3$  の船舶寄与濃度は  $\text{NO}_2$  に比べて小さく、航路帯に分布している。 $\text{NO}_3$  粒子の船舶寄与濃度は  $\text{NO}_2$  に比べて小さく、内陸部に分布している。
- 燃料中硫黄分規制による環境濃度改善効果は、 $\text{SO}_2$  濃度で顕著であり、燃料中硫黄分を 0.5 %に規制(一般海域における 2020 年以降の規制に相当)することにより、月平均値の濃度分布で見られた港湾域および東京湾海上の  $\text{SO}_2$  の高濃度域はほぼ解消された。また、8月における  $\text{SO}_2$  濃度の日平均値の月最大値についても大きな改善効果が予想され、国内の大気環境基準より厳しい WHO の日平均値のガイドライン値( $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )を、港湾域に存在する測定地点においても達成できると考えられる。一方、 $\text{SO}_4$  粒子濃度でも、燃料中硫黄分を 0.5 %に規制することにより、月平均値の濃度分布で見られた港湾域の高濃度域はほぼ解消され、削減割合は  $\text{SO}_4$  粒子濃度で最大 2 割程度であった。 $\text{SO}_2$  濃度ほどではないにしても、燃料中硫黄分規制が、間接的に  $\text{SPM}$  ( $\text{PM}_{2.5}$ )の大気環境改善に一定の効果があることが期待できる。このことは MEPC57 においても認識されており、PM 独自の規制は設けずに燃料中硫黄分の削減により PM を削減することが合意され、 $\text{SO}_x$  規制および PM 規制として燃料中硫黄分の規制が最終化された。
- Tier2 の  $\text{NO}_x$  規制を全船に導入した場合の環境濃度改善効果は、必ずしも充分ではなく港湾周辺部および航路帯周辺部の影響範囲は解消されず、また港湾周辺地点における改善率も 10 %前後にとどまる。一方、Tier3 規制を全船に導入した場合の環境濃度改善効果は顕著であり、月平均値の濃度分布で見られた港湾域および東京湾海上の高濃度域はかなり改善される。また、改善率も 20 %近くに達し、8月の月平均値の濃度分布において、Tier3 規制を全船に導入することにより日本の環境基準より厳しい WHO の年平均値のガイドライン値( $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )超過が解消することが期待できる。ただし、ここまでの改善効果が実際に期待されるのは、船齢の長さなどから 2040 年以降になることに留意する必要がある。実際に、2020 年における期待できる Tier3 適合船の導入割合を考慮すると、8月においても月平均値の削減率は 5 %程度である。

- NOx 規制については、SO<sub>2</sub> 規制のような全船を対象にした実効性のある規制方法が現状では考えられないため、Tier3 のように厳しい規制を新船に対して適用することは環境面から考えても合理性があると考えられる。なお、MEPC57 では、排出規制海域の大型既存船に対しても Tier1 規制が導入されることが最終化され、今回の結果の懸念事項である早期の環境改善効果を期待できる規制の枠組みとなっている。





## 6. 東京湾地域における船舶からの大気汚染物質排出量算定結果

### 6.1 概要

東京湾地域の大気シミュレーションのための発生源データとして用いるため、東京湾内の港湾を利用する船舶を対象として、現況の大気汚染物質排出量を算定するとともに、IMO を中心に検討されている船舶排出ガス規制の内容を踏まえ、燃料中の硫黄分を規制した場合およびディーゼルエンジン排出ガス中のNO<sub>x</sub>を規制した場合の排出量を算定した。

### 6.2 現況排出量

排出量算定の概要を表 6.2-1 に示す。

表 6.2-1 船舶からの大気汚染物質排出量の算定内容(概要)

対象港湾	東京港、川崎港、横浜港、千葉港、木更津港および横須賀港
算定範囲	東京湾および周辺沿岸域
メッシュサイズ	基準地域メッシュ(第3次メッシュ) 約1km×1km
対象年	2000年度
対象物質	PM、NO <sub>x</sub> 、SO <sub>2</sub> 、CO、NMVOC

#### 6.2.1 算定範囲

排出量の算定範囲は東京湾および周辺沿岸域とし、大気シミュレーションの計算範囲と同じとした。算定範囲を図 6.2-1 に示す。なお、排出量は、基準地域メッシュ(第3次メッシュ、約1km)ごとに設定した。

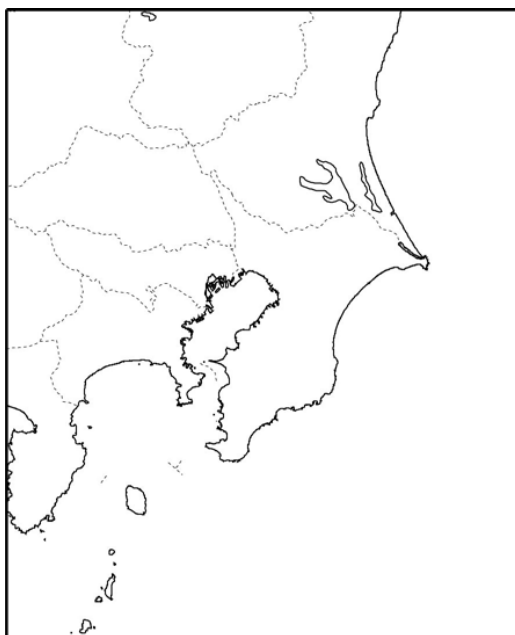


図 6.2-1 排出量の算定範囲(東京湾および周辺海域)

## 6.2.2 対象年

大気シミュレーションモデルに合わせ、2000年度を対象とした。

## 6.2.3 対象物質

大気シミュレーションの計算条件に合わせ、粒子状物質(PM)、窒素酸化物(NO<sub>x</sub>)、二酸化硫黄(SO<sub>2</sub>)、一酸化炭素(CO)、非メタン揮発性有機化合物(NMVOC)を対象に排出量を算定した。

## 6.2.4 算定手順および算定区分

### (1) 基本手順

排出量の算定フローは図 6.2-2 に示すとおりである。

本調査では、係留施設ごとに統計化されたデータ(船種別船型別の隻数、総トン数および係留時間)を入手し、船舶の総トン数から原単位式により定格排出量を求め、これに機関別負荷率、係留時間、航行時間等を考慮して排出量を以下のとおり算定した。

係留時については、補助ディーゼルおよび補助ボイラーを対象として、定格時の1隻当たりの大気汚染物質排出量(定格排出量)を求め、これに荷役・非荷役別の負荷率および時間、年間隻数を乗じることにより、年間の排出量を求めた。

#### 【係留時】

$$E(\text{kg/年})=E_0 \times (A_1 \times T_1 + A_2 \times T_2) \times C$$

E<sub>0</sub> : 定格排出量(kg/隻・時)

A<sub>1</sub> : 荷役時の負荷率

A<sub>2</sub> : 非荷役時の負荷率

T<sub>1</sub> : 荷役時間(時)

T<sub>2</sub> : 非荷役時間(時)

C : 年間隻数(隻/年)

航行時については、主機ディーゼル、補助ディーゼルおよび補助ボイラーを対象として、定格時の1隻当たりの大気汚染物質排出量(定格排出量)を求め、これに航行時の負荷率および時間、年間隻数を乗じることにより、年間の排出量を求めた。

#### 【航行時】

$$E(\text{kg/年})=E_0 \times \sum (A_i \times T_i) \times C$$

E<sub>0</sub> : 定格排出量(kg/隻・時)

A<sub>i</sub> : 航行モード別負荷率

T<sub>i</sub> : 航行モード別の運転時間(時)

C : 年間隻数(隻/年)

排出量の算定には、個々の船舶ごとの情報(総トン数、搭載機関の出力・負荷率、機関の負荷率ごとの稼働時間など)を用いることが望ましいが、統計上の制約などの理由から、個々の船舶の情報を入手することができなかった。このため、本調査では係留施設ごとに統計化されたデータを用いて排出量を算定した。

なお、本調査は、大気シミュレーションの条件として用いるため、特に、排出量の位置、時間変動が実態を反映したものとなるよう留意して細かい検討を行ったが、東京湾や港湾全体の

平均的な排出量を求める場合などには、港湾統計に記載されているレベルのデータを用いて簡易的に算定する手法も有効と考えられる。

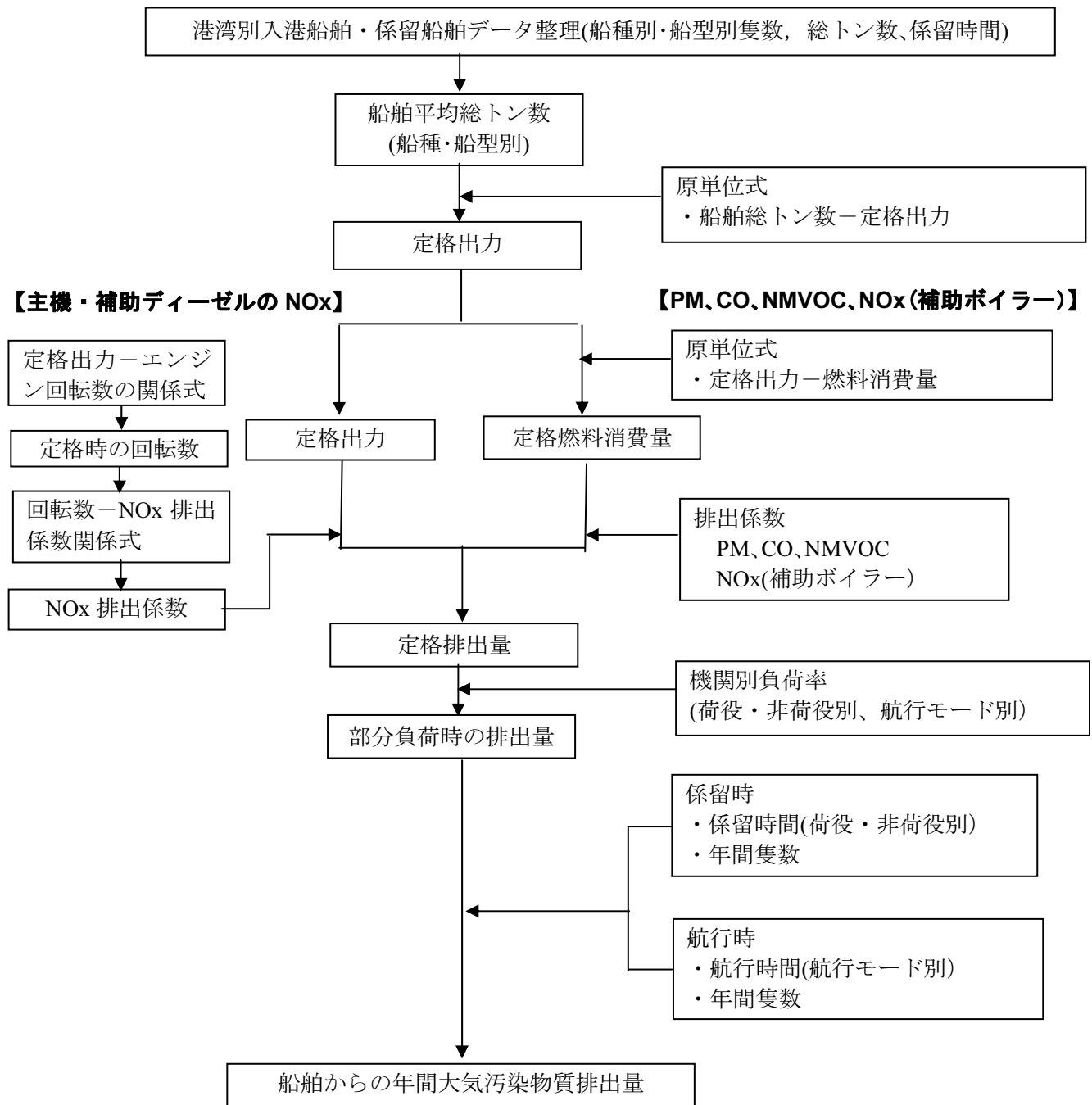


図 6.2-2 船舶からの大気汚染物質排出量の算定フロー

(2) 算定区分

排出量の算定区分は表 6.2-2 および表 6.2-3 を基本とし、規制効果による削減量の内訳を把握できるように、内航・外航別、船種別・船型別・排出形態別に算定した。

表 6.2-2 排出量の算定区分

内外	船種	船型(トン階級区分)	排出形態
内航/外航	コンテナ船	500 総トン未満	係留(荷役/非荷役) 航行
	貨物船	500 ~ 1,000 総トン未満	
	タンカー	1,000 ~ 3,000 総トン未満	
	貨客船	3,000 ~ 6,000 総トン未満	
	フェリー	6,000 ~ 10,000 総トン未満	
	RoRo 船	10,000 ~ 30,000 総トン未満	
	客船	30,000 ~ 60,000 総トン未満	
	その他	60,000 ~ 100,000 総トン未満 100,000 総トン以上	
	タグボート	—	航行

表 6.2-3 本調査で用いた船種区分

船種区分	定格出力 算定式で の区分	係留時の形態		主な該当船種
		荷役	非荷役	
コンテナ船	コンテナ船	○	○	フルコンテナ船、セミコンテナ船
貨物船	貨物船	○	○	鋼材船、木材船、チップ船、砂利・砂・石材船、セメント船、石炭船、鉍石船、穀物船、一般貨物船、自動車専用船、その他の専用船
RoRo 船	RoRo 船	○	○	RoRo 船
タンカー	タンカー	○	○	油送船、LPG 船、LNG 船、プロダクトオイルタンカー、内航ケミカル船、その他のタンカー・タンク船
		—	○	公共ふ頭に係留しているタンカー
貨客船	貨客船・ フェリー・ 客船	○	○	貨客船
フェリー		○	○	フェリー
客船		—	○	客船
その他	その他	○	○	その他の船舶
		—	○	官公庁船

## 6.2.5 港湾別入港船舶・係留船舶データの整理

### (1) 船舶隻数、総トン数

#### (a) 入港隻数と係留隻数

同一港湾内において複数の施設を利用する船舶があるため、係留隻数は入港隻数よりも多い。そこで、本算定では、「港湾への入港隻数(以下、「入港隻数」と言う。)」と「係留施設を利用した船舶の隻数(以下、「係留隻数」と言う。)」を区別し、係留時の排出ガス量の算定には係留隻数を、航行時の排出量の算定には入港隻数を用いた。

#### (b) 入港隻数、係留隻数の設定

東京港および川崎港(公共ふ頭)については、港湾管理者から得られたふ頭・係留施設別のデータを基に、その他の港湾については港湾統計資料および東洋信号通信社の入港出港情報<sup>(※)</sup>を参考に係留施設ごとに入港隻数と係留隻数を設定した。

なお、横浜港については入港隻数に鶴見航路を經由して川崎港に入港する船舶が含まれており、川崎港の入港隻数と重複するため、横浜港の入港隻数は鶴見航路を經由して川崎港に入る船舶を除いて集計した。

#### (※) 東洋信号通信社の入出港情報

東洋信号通信社では個々の船舶ごとに、着岸時刻、着岸した岸壁の名称、離岸時刻等を記録している。本調査では、着岸から離岸までの時間を係留時間とし、係留施設ごとの船種別・船型別の隻数、総トン数および係留時間のデータを入手し、係留施設ごとのデータを設定に用いた。

### (2) 係留時間

東京港および川崎港(公共ふ頭)については、港湾管理者から得られた係留施設別の係留時間を用いた。その他の港湾については、東洋信号通信社の入港出港記録を基に係留施設別の係留時間を設定した。ただし、東洋信号通信社の係留時間のデータがない場合は、以下の手順により平均的な係留時間を設定した。

手順 1. 東洋信号通信社の係留時間を用いて、公共専用別、外内航別、船種別、船型別の係留時間の平均値を算定(東京湾、各港湾別)。

手順 2. 係留時間のデータがない船舶については、同一港湾内の船種・船型が同じ船舶の平均係留時間を当てはめ、同じ船舶が無い、もしくは隻数が少ないため、平均係留時間を当てはめることが出来ない場合は東京湾の平均的な係留時間を当てはめた。係留時間を当てはめる際の優先順位を以下に示す。

- ① 同一港内の公共・専用別船種別・船型別平均係留時間
- ② 東京湾内の公共・専用別船種別・船型別平均係留時間
- ③ 東京湾内の船種別・船型別平均係留時間

ここで、川崎港については、「川崎港統計年報」に公共・専用ふ頭別・トン階級別の平均係留時間が記載されているため、①の同一港内の公共・専用別船種別・船型別平均係留を適用できない場合は、この平均時間を用いた。また、横須賀港については、500 総トン以上の船舶は「横須賀港港湾統計年報」に記載されている公共・専用ふ頭別係留時間を用い、500 総トン未満の船舶は

東洋信号通信社のデータによる③東京湾内の船種別・船型別平均係留時間を用いた。

なお、東洋信号通信社のデータは大型船舶や外航船についてはほぼ完全に記録がとられているが、比較的小さな内航船に対しては補足率が低く、入港記録がない係留施設もある。特に、専用ふ頭を利用する 500 総トン未満の内航船は隻数が極めて多いにも関わらず入出港の情報はほとんど把握されていないことに留意する必要がある。このため、本調査では得られたデータから平均的な係留時間を求め、係留時間が把握されていない船舶に代用し、港湾統計に記載されている係留時間の総数と積上げた係留時間を比較し、港湾統計の係留時間に合うよう補正を行った。

### (3) 荷役・非荷役時間の設定

補助ディーゼルエンジンおよび補助ボイラーは荷役時と非荷役時で機関負荷率が異なるため、係留時間については、荷役時間と非荷役時間に分割して図 6.2-3 のとおり設定した。設定方法を以下に示す。

- ・ 係留時間が 120 時間を超える場合は停泊時間中ほとんどが非稼働と仮定し、荷役時間、非荷役時間とも 0 時間とした。
- ・ 荷役時間の上限を、10 万総トン未満は 24 時間、10 万総トン以上は 36 時間とした。
- ・ 荷役時間と非荷役時間の割合については係留時間が 12 時間以下の船舶は全て荷役、12 時間を超える時間については、荷役時間と非荷役時間を同じ時間数とした。
- ・ 外航船については、係留時間が短い場合にも入出港手続き等の時間を必要とすることから、係留時間が 12 時間以下の船舶についても 30 分から 1 時間の非荷役時間を設定した。

なお、以下の船舶については、通常、荷揚・荷積みは行われていないと考えられるため係留時間をすべて非荷役時間として扱った。

#### 【非荷役船】

- ・ 公共ふ頭を利用するタンカー(公共ふ頭では一般に荷揚・荷積みを行うことがほとんどないと考えられるため非荷役扱いとした)
- ・ 客船
- ・ 官公庁船
- ・ 沖合停泊(泊地、錨地)

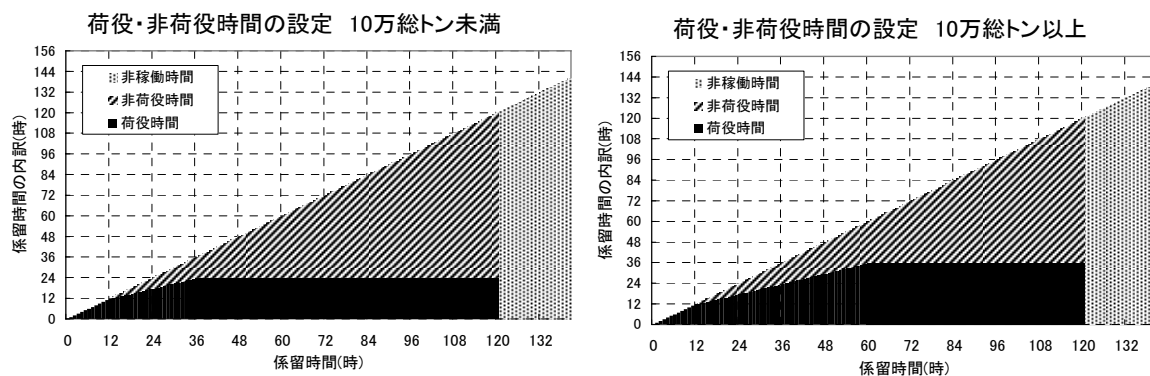


図 6.2-3 荷役時間・非荷役時間の設定

### (4) 船舶隻数、総トン数および係留時間等の設定結果

係留施設ごとに設定した外航内航別・船種別・船型別の隻数、総トン数、係留時間(荷役・非荷役時間)を港湾ごとに集計した値を表 6.2-4～表 6.2-7 に示す。

排出量算定の対象とした船舶は約 274,000 隻、平均総トン数は約 2,800 総トン/隻である。また、延べ係留時間の総数は約 350 万時間であり、うち、荷役時間は約 187 万時間を占め、1 隻



あたりの係留時間は平均で約 13 時間、荷役時間は約 7 時間、非荷役時間は約 6 時間である。

なお、係留時間は外航と内航の違いや船種の違いによって大きく異なっており、係留時間の正確な把握には、入手可能な範囲でできるだけ個別のデータに近い情報から積み上げを行うことが望ましい。

表 6.2-4 係留時の排出量算定に用いた船舶データ集計値(2000 年)

港湾	外航/ 内航	隻数・総トン数			延べ時間			平均時間		
		隻数	総トン 数	平均 トン数	係留時間	荷役	非荷役	係留 時間	荷役	非荷 役
		隻/年	千トン	トン /隻	時間/年	時間/年	時間/年	時間 /隻	時間 /隻	時間 /隻
東京港	外	5,640	111,883	19,837	99,001	70,768	28,233	17.6	12.5	5.0
	内	38,162	47,290	1,239	433,584	180,314	253,270	11.4	4.7	6.6
	計	43,802	159,173	3,634	532,585	251,082	281,503	12.2	5.7	6.4
川崎港	外	2,707	62,402	23,052	60,448	42,195	18,253	22.3	15.6	6.7
	内	38,384	29,927	780	469,318	173,660	295,658	12.2	4.5	7.7
	計	41,091	92,330	2,247	529,767	215,855	313,911	12.9	5.3	7.6
横浜港	外	15,301	247,668	16,186	315,819	143,421	172,398	20.6	9.4	11.3
	内	39,506	38,632	978	434,257	224,867	209,390	11.0	5.7	5.3
	計	54,807	286,300	5,224	750,076	368,288	381,788	13.7	6.7	7.0
千葉港	外	5,122	84,954	16,586	157,912	95,182	62,730	30.8	18.6	12.2
	内	80,121	57,205	714	1,007,540	574,510	433,031	12.6	7.2	5.4
	計	85,243	142,159	1,668	1,165,452	669,691	495,761	13.7	7.9	5.8
木更津港	外	1,295	31,714	24,489	56,227	30,326	25,900	43.4	23.4	20.0
	内	24,832	11,309	455	287,313	266,099	21,213	11.6	10.7	0.9
	計	26,127	43,023	1,647	343,539	296,426	47,113	13.1	11.3	1.8
横須賀港	外	412	6,749	16,393	6,036	4,596	1,440	14.7	11.2	3.5
	内	22,894	29,892	1,306	186,483	67,906	118,578	8.1	3.0	5.2
	計	23,306	36,641	1,572	192,519	72,502	120,017	8.3	3.1	5.1
合計	外	30,477	545,370	17,895	695,443	386,488	308,955	22.8	12.7	10.1
	内	243,899	214,256	878	2,818,495	1,487,356	1,331,139	11.6	6.1	5.5
	計	274,376	759,626	2,769	3,513,938	1,873,844	1,640,094	12.8	6.8	6.0

注) 上記は係留船舶隻数を集計したものである。係留時間 120 時間以上の船舶は活動量が無いものとして含んでいない。

東京港：東京港港勢(島しょ港湾を含む) 平成 12 年(2000 年)港湾統計 東京都

東京都港湾局提供の施設別係留船舶隻数、総トン数、係留時間

川崎港：川崎港統計年報 平成 12 年 川崎市

川崎市港湾局提供の施設別係留船舶隻数、総トン数、係留時間(公共埠頭のみ)

横浜港：第 61 回 横浜港統計年報 平成 12 年(2000 年) 横浜市

千葉港、木更津港：平成 12 年 千葉県港湾統計年報 千葉県土木部

横須賀港：平成 12 年 横須賀港統計年報 横須賀市港湾部

東洋信号通信社の入出港情報による

表 6.2-5 東京湾における船種別隻数・総トン数・係留時間(2000年)

地域	外内	船種	隻数・総トン数			延べ係留時間			平均係留時間			
			隻数/年	総トン数	平均トン/隻	係留時間/年	荷役時間/年	非荷役時間/年	係留時間/隻	荷役時間/隻	非荷役時間/隻	
東京湾	外航	コンテナ船	11,725	243,717	20,786	155,983	91,763	64,219	13.3	7.8	5.5	
		貨物船	13,458	168,958	12,555	415,295	220,743	194,552	30.9	16.4	14.5	
		タンカー	4,253	124,318	29,231	97,334	60,883	36,451	22.9	14.3	8.6	
		貨客船	60	332	5,526	1,335	919	417	22.3	15.3	6.9	
		フェリー	0	0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	
		RoRo 船	818	6,609	8,079	20,574	10,251	10,323	25.2	12.5	12.6	
		客船	34	752	22,109	850	0	850	25.0	0.0	25.0	
		その他	129	686	5,317	4,072	1,930	2,143	31.6	15.0	16.6	
		内航	コンテナ船	1,407	3,387	2,407	15,676	13,296	2,380	11.1	9.4	1.7
			貨物船	99,157	81,285	820	1,126,580	933,031	193,549	11.4	9.4	2.0
			タンカー	97,994	64,405	657	1,403,351	388,774	1,014,577	14.3	4.0	10.4
			貨客船	1,300	6,135	4,720	11,755	10,335	1,420	9.0	8.0	1.1
			フェリー	7,434	23,164	3,116	3,784	0	3,784	0.5	0.0	0.5
			RoRo 船	2,420	13,768	5,689	27,131	25,796	1,335	11.2	10.7	0.6
客船	3,049		9,695	3,180	28,411	0	28,411	9.3	0.0	9.3		
計	その他	31,138	12,416	399	201,808	116,124	85,683	6.5	3.7	2.8		
	コンテナ船	13,132	247,103	18,817	171,658	105,059	66,599	13.1	8.0	5.1		
	貨物船	112,615	250,242	2,222	1,541,875	1,153,774	388,101	13.7	10.2	3.4		
	タンカー	102,247	188,723	1,846	1,500,685	449,657	1,051,028	14.7	4.4	10.3		
	貨客船	1,360	6,467	4,755	13,090	11,254	1,836	9.6	8.3	1.4		
	フェリー	7,434	23,164	3,116	3,784	0	3,784	0.5	0.0	0.5		
	RoRo 船	3,238	20,377	6,293	47,705	36,047	11,658	14.7	11.1	3.6		
	客船	3,083	10,447	3,389	29,261	0	29,261	9.5	0.0	9.5		
	その他	31,267	13,102	419	205,880	118,054	87,826	6.6	3.8	2.8		

表 6.2-6 東京湾における船型別隻数・総トン数・係留時間(2000年)

地域	外内	トン階級	隻数・総トン数			延べ係留時間			平均係留時間				
			隻数	総トン数	平均トン数	係留時間	荷役	非荷役	係留時間	荷役	非荷役		
			隻/年	千トン	トン/隻	時間/年	時間/年	時間/年	時間/隻	時間/隻	時間/隻		
東京湾	外航	500 総	271	118	437	5,507	3,244	2,263	20.3	12.0	8.4		
		500 ~ 1,000 総	1,068	865	810	22,885	14,273	8,612	21.4	13.4	8.1		
		1,000 ~ 3,000 総	4,676	9,252	1,979	134,996	76,984	58,012	28.9	16.5	12.4		
		3,000 ~ 6,000 総	5,890	25,224	4,282	133,497	66,077	67,421	22.7	11.2	11.4		
		6,000 ~ 10,000 総	4,833	38,728	8,013	88,423	47,306	41,116	18.3	9.8	8.5		
		10,000 ~ 30,000 総	7,984	144,058	18,044	178,896	96,889	82,006	22.4	12.1	10.3		
		30,000 ~ 60,000 総	4,049	171,727	42,412	78,316	46,901	31,415	19.3	11.6	7.8		
		60,000 ~ 100,000 総	1,195	90,042	75,349	32,407	21,515	10,892	27.1	18.0	9.1		
		100,000 総	510	65,355	128,147	20,517	13,300	7,217	40.2	26.1	14.2		
				500 総	176,032	50,430	286	2,127,430	1,054,411	1,073,020	12.1	6.0	6.1
				500 ~ 1,000 総	31,329	22,703	725	354,971	211,701	143,270	11.3	6.8	4.6
				1,000 ~ 3,000 総	23,633	56,673	2,398	195,571	110,303	85,268	8.3	4.7	3.6
				3,000 ~ 6,000 総	8,525	35,292	4,140	94,106	76,320	17,786	11.0	9.0	2.1
				6,000 ~ 10,000 総	2,407	18,163	7,546	21,721	19,307	2,414	9.0	8.0	1.0
				10,000 ~ 30,000 総	1,889	25,997	13,762	23,307	14,354	8,953	12.3	7.6	4.7
				30,000 ~ 60,000 総	30	1,486	49,546	479	332	147	16.0	11.1	4.9
				60,000 ~ 100,000 総	54	3,512	65,035	910	628	282	16.8	11.6	5.2
				100,000 総	0	0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0
				計	176,303	50,548	287	2,132,937	1,057,655	1,075,283	12.1	6.0	6.1
				500 ~ 1,000 総	32,397	23,568	727	377,856	225,974	151,882	11.7	7.0	4.7
		1,000 ~ 3,000 総	28,309	65,925	2,329	330,567	187,287	143,280	11.7	6.6	5.1		
		3,000 ~ 6,000 総	14,415	60,516	4,198	227,603	142,397	85,207	15.8	9.9	5.9		
		6,000 ~ 10,000 総	7,240	56,892	7,857	110,144	66,613	43,531	15.2	9.2	6.0		
		10,000 ~ 30,000 総	9,873	170,055	17,225	202,203	111,243	90,959	20.5	11.3	9.2		
		30,000 ~ 60,000 総	4,079	173,213	42,465	78,795	47,233	31,562	19.3	11.6	7.7		
		60,000 ~ 100,000 総	1,249	93,554	74,903	33,316	22,143	11,174	26.7	17.7	8.9		
		100,000 総	510	65,355	128,147	20,517	13,300	7,217	40.2	26.1	14.2		

表 6.2-7 東京湾における船種別・船型別平均係留時間(2000年)

地域	平均係留時間 外内	船種	(時間/隻)									
			500 総ト ン未満	500～ 1,000 総ト ン未満	1,000～ 3,000 総ト ン未満	3,000～ 6,000 総ト ン未満	6,000～ 10,000 総ト ン未満	10,000～ 30,000 総ト ン未満	30,000～ 60,000 総ト ン未満	60,000～ 100,000 総ト ン未満	100,000 総ト ン以上	
東京湾	外航	コンテナ船	5.0	16	10	13	14	15	16			
		貨物船	21	33	34	26	30	24	46	53		
		タンカー	12	13	17	22	30	33	29	38		
		貨客船			19	42	48					
		フェリー										
	内航	RoRo 船		29	28	24	18	18				
		客船		48			25	13				
		その他	37	27	35	19	37	48				
		コンテナ船	4.9	12	14	18	15					
		貨物船	11	11	12	10	15					
計	外航	タンカー	15.6	11.7	9.3		38	16	17			
		貨客船	47	16	7.3	8.7						
		フェリー						4.4				
		RoRo 船	8	21	13	6.4	9.4					
		客船		48	2.7	5.0	13					
	内航	その他	6	18	41	35	9					
		コンテナ船	4.9	12	11	13	14	15	16			
		貨物船	11	11	20	18	27	24	46	53		
		タンカー	15.6	11.7	13	22	30	32	27	38		
		貨客船	47	16	7.9	9.5	48					
計	フェリー					4						
	RoRo 船			13	11	14	18					
	客船	8.1	21	3	5	14	13					
	その他	5.6	18	39	26	30	48					

また、係留施設ごとに設定した係留時間(荷役・非荷役時間)について、東京湾全体で外航内航別・船型別に集計した結果と既存設定値との比較を表 6.2-8 に示す。本調査で設定した係留時間は、既存設定値と比較して外航船では 6,000 総トン未満、内航船では 500 総トン未満の比較的規模の小さな船舶については長くなっているが、その他の船型については既存設定値よりも係留時間は短く、その傾向は特に 10,000 総トン以上の船舶において顕著である。また、既存設定値では船型が大きいほど係留時間は長くなっているが、本調査により積上げた係留時間はそのような結果になっていない。

このように既存設定値と本調査で積上げた係留時間には違いがみられ、このことから、係留時間の正確な把握には、平均的な値を用いるのではなく、できるだけ細かいデータから積み上げを行うことが望ましいと言える。

表 6.2-8 係留時間等の既存設定値との比較

(時間/隻)

船型区分	本調査：外航船			本調査：内航船			既存設定値		
	係留	荷役	非荷役	係留	荷役	非荷役	係留	荷役	非荷役
500 総トン未満	20.3	12.0	8.4	12.1	6.0	6.1	6.8	6.8	0.0
500～ 1,000 総トン未満	21.4	13.4	8.1	11.3	6.8	4.6	16.3	8.6	7.7
1,000～ 3,000 総トン未満	28.9	16.5	12.4	8.3	4.7	3.6	16.3	8.6	7.7
3,000～ 6,000 総トン未満	22.7	11.2	11.4	11.0	9.0	2.1	16.3	8.6	7.7
6,000～ 10,000 総トン未満	18.3	9.8	8.5	9.0	8.0	1.0	19.5	12.6	6.9
10,000～ 30,000 総トン未満	22.4	12.1	10.3	12.3	7.6	4.7	39.3	27.1	12.2
30,000～ 60,000 総トン未満	19.3	11.6	7.8	16.0	11.1	4.9	39.3	27.1	12.2
60,000～100,000 総トン未満	27.1	18.0	9.1	16.8	11.6	5.2	39.3	27.1	12.2
100,000 総トン以上	40.2	26.1	14.2	—	—	—	39.3	27.1	12.2

出典： 既存設定値は、「船舶排出大気汚染物質削減手法検討調査報告書」(平成 7 年 3 月 社団法人日本船舶機関学会)による。

注)網掛けは、本調査での設定値が既存設定値よりも少ない場合を示す。

## 6.2.6 定格排出量算定式

### (1) 定格出力および定格容量の算定式

#### (a) 主機ディーゼルおよび補助ディーゼルの定格出力

船舶総トン数から機関出力を求める関係式としては、「窒素酸化物総量規制マニュアル」による式や日本船用機関学会による式があるが、ともに根拠となるデータが古く、現在の船型と機関出力に対応できていない可能性が考えられる。このため、本調査では、表 6.2-9 に示す Lloyd's データ(2006年)に登録されている船舶の総トン数と機関定格出力の関係式から作成された「船舶総トン数と機関出力の関係式」を用いた。

$$\text{機関合計定格出力(kW/隻)} = a \times (\text{総トン数})^b$$

**表 6.2-9 主機合計出力および補助合計出力の算定式の係数 a・b**

船種	主機ディーゼル機関		補助ディーゼル機関	
	係数 a	係数 b	係数 a	係数 b
コンテナ船	1.3549	0.9425	2.169	0.7428
RoRo 船	21.471	0.6569	1.1536	0.8036
タンカー	18.608	0.6043	18.327	0.4597
貨物船	2.8854	0.8285	0.4578	0.875
客船・フェリー・貨客船	61.136	0.5611	0.9252	0.8594
その他	155.84	0.4401	0.4578	0.875

注) その他の補助ディーゼル機関の係数は、貨物船と同じとした。

出典：「既存船舶からの世界的な大気汚染物質排出量に関する調査研究」(平成 19 年 船舶技術研究協会資料)より設定

参考として、船舶総トン数から機関出力を求める関係式の設定例を表 6.2-10 および図 6.2-4 に示す。窒素酸化物総量規制マニュアル式では、補助ディーゼル機関について出力が過小に見積もられる可能性がある。

表 6.2-10 船舶総トン数から機関出力を求める関係式の設定例

(1) 窒素酸化物総量規制マニュアル

船種	主機ディーゼル機関の定格出力(PS)	補助ディーゼル機関の定格出力(kW)および基数(基)
客船	$7.9 \times X^{0.83}$	$1.5 \times X^{0.63} \times 3$
フェリー	$4.1 \times X^{0.95}$	$1.4 \times X^{0.70} \times 3$
フルコンテナ船	$1.9 \times X^{0.97}$	$2.2 \times X^{0.60} \times 2$
タンカー(油)	$12 \times X^{0.70}$	$10 \times X^{0.37} \times 2$
貨物船	$19 \times X^{0.65}$	$7.7 \times X^{0.40} \times 2$
漁船	$73 \times X^{0.50}$	$13 \times X^{0.43} \times 3$
その他	$33 \times X^{0.61}$	$0.089 \times X \times 2$

- 注) 1. X は、船舶の総トン数である。  
 2. 補助ディーゼル機関は、1 基辺りの定格出力および一般的な搭載台数を示す。  
 3. 船舶分類のうち、貨物船には、鉱石、穀物、木材、自動車専用船等を含む。  
 4. kW 数を PS 数に直す場合は、港湾調査等により換算係数を求める必要がある。(但し、調査が困難な場合は、kW 数を 1.88 で乗じて PS 数として用いてもよい。)

出典：「窒素酸化物総量規制マニュアル(新版)」(平成 12 年 公害研究対策センター)

(2) 日本船用機関学会

船種	主機ディーゼル機関の定格出力(PS)	補助ディーゼル機関の定格出力(kW)および基数(基)
船舶全体	$67.45 \times X^{0.50}$	$7.18 \times X^{0.54} \times 2$

出典：「平成 6 年度船舶排出大気汚染物質削減手法検討調査」(平成 7 年 5 月 (社)日本船用機関学会)

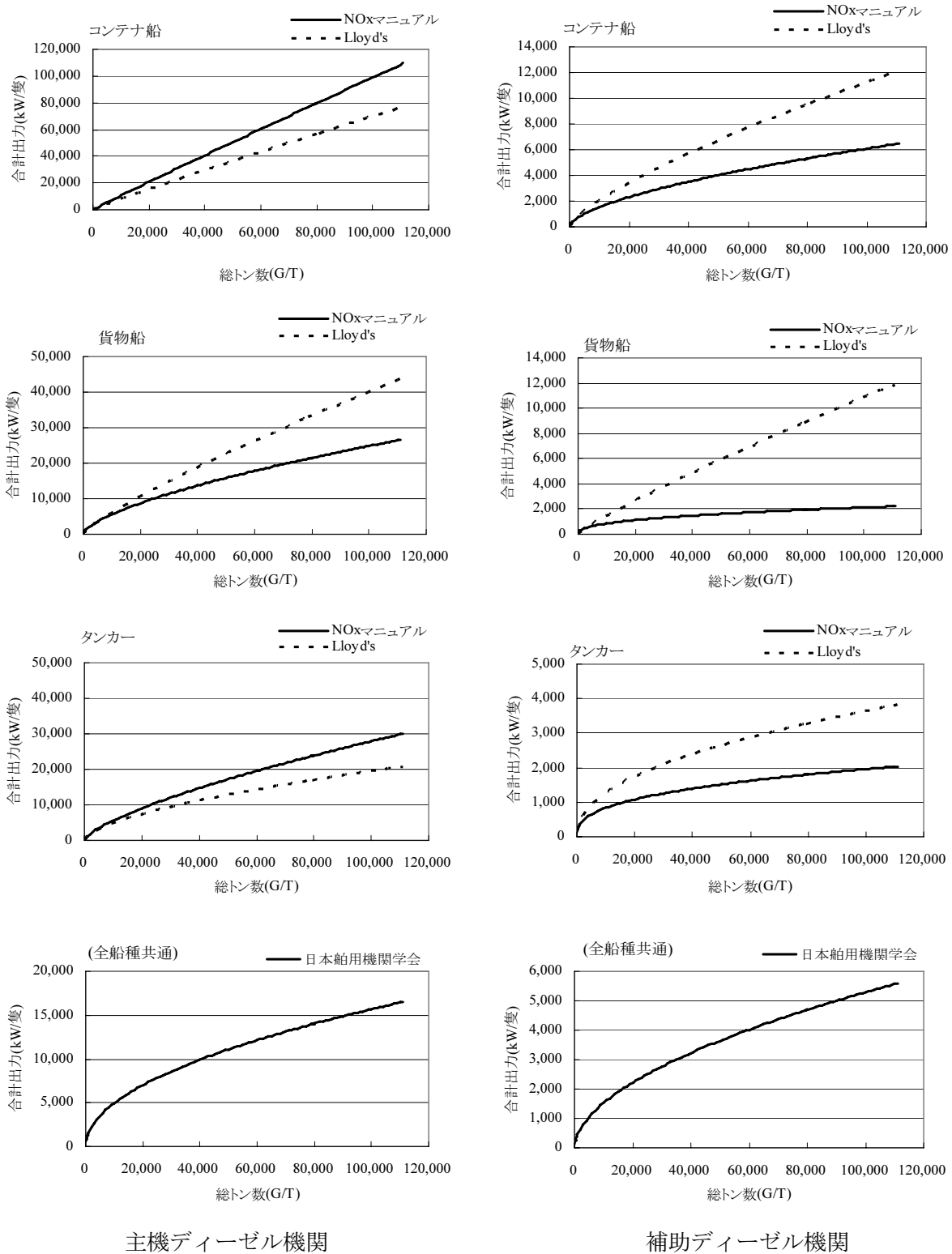


図 6.2-4 船舶総トン数と機関出力の関係式



## (b) 補助ボイラーの定格容量

補助ボイラーは、主に燃料や積荷の加温、暖房、厨房等に利用されているが、その容量については Lloyd's データや船舶明細書にはほとんど記載されていないため、本調査では、下記に示す「平成 6 年度 船舶排出大気汚染物質削減手法検討調査」(平成 7 年 5 月 (社)日本船舶機関学会)による船舶総トン数とボイラー容量の関係式を用いた。

船舶総トン数とボイラー容量の関係式

$$B=0.0267X^{0.48} \quad (B: \text{定格容量(t時)}, X: \text{総トン数(総トン)})$$

なお、補助ボイラーについては、日本内航海運組合総連合会による A 重油使用船の搭載率および表 6.2-14 に示した A 重油使用率を基に、タンカーとその他の船舶に区分して船型ごとの補助ボイラーの搭載率を設定した。設定結果は表 6.2-11 に示すとおりである。

表 6.2-11 補助ボイラーの搭載率

総トン数	A 重油使用船舶の補助ボイラー搭載率(%)		A 重油使用率(%)	A 重油使用率を考慮した補助ボイラー平均搭載率(%)	
	タンカー	一般貨物		タンカー	その他
500 未満	47.1	9.1	56	70.4	49.1
500-1000	47.6	20.0	38	80.1	69.6
1000-3000	60.0	54.5	38	84.8	82.7

出典：補助ボイラー搭載率は、「内航船の機器・装置の現状と仕様に関する調査報告書」(平成 13 年 9 月 日本内航海運組合総連合会)による。

## (2) 燃料消費量の原単位式

機関出力等から燃料消費量を求める関係式を表 6.2-12 に示す。

SFC(Specific Fuel Consumption ; 燃料消費率)は、一般に低速もしくは大型の機関ほど熱効率が良いため小さくなる。ところが、これまで使用されていた推定式(平成 6 年度日本船用機関学会および窒素酸化物総量規制マニュアル式)では両者の関係が逆転する場合がある。また、特に補助ディーゼル機関においては、低負荷で稼働している時間が多いと考えられ、SFC がさらに悪化した状態で使用されることが多いと推定される。以上を勘案して、本調査では機関の規模に関わらず、主機ディーゼルと補助ディーゼルでそれぞれ一定の SFC を用いることとした。なお、本調査で用いた SFC は浮遊粒子状物質汚染予測マニュアルおよび平成 16 年度マリンエンジニアリング学会報告書で採用されている式と同じである。

主機ディーゼル機関	$W=0.18 \times P$
補助ディーゼル機関	$W=0.20 \times P$
補助ボイラー	$W=73.48 \times B^{0.41}$

ここで

- W : 燃料使用量 (kg/時)
- P : 機関合計出力(PS)
- B : ボイラー合計容量(t/時)

表 6.2-12 機関出力等から燃料消費量を求める関係式

報告書等	主機ディーゼル機関	補助ディーゼル機関	補助ボイラー
平成 6 年度 日本船用機関学会報告書	$W=0.21 \times P^{0.95}$	$W=0.26 \times P^{0.83}$	$W=73.48 \times B^{0.41}$
窒素酸化物総量規制 マニュアル	$W=0.21 \times P^{0.95}$	$W=0.17 \times P^{0.98}$	タンカー $W_L=0.29 \times X^{0.88}$ タンカー以外 $W_L=0.27 \times X^{0.67}$
浮遊粒子状物質 汚染予測マニュアル	$W=0.18 \times P$	$W=0.20 \times P$	タンカー $W_L=0.29 \times X^{0.88}$ タンカー以外 $W_L=0.27 \times X^{0.67}$
平成 16 年度マリンエン 지니어リング学会報告書	$W=0.18 \times P$	$W=0.20 \times P$	$W=73.48 \times B^{0.41}$

注) W : 燃料使用量(kg/時)、P : 機関出力(PS)、B : ボイラー容量(t/時)

$W_L$  : 燃料使用量(L/時)、X : 総トン数

出典 :

- 「平成 6 年度船舶排出大気汚染物質削減手法検討調査」(平成 7 年 5 月 (社)日本船用機関学会)
- 「窒素酸化物総量規制マニュアル(新版)」(平成 12 年 公害研究対策センター)
- 「浮遊粒子状物質汚染予測マニュアル」(平成 9 年 環境庁大気保全局大気規制課監修)
- 「平成 16 年度船舶排出大気汚染物質削減技術検討調査報告書」(平成 17 年 3 月 (社)日本マリンエンジニアリング学会)

(3) 排出係数

(a) SO<sub>2</sub>の排出係数

表 6.2-13 に示す燃料中の硫黄含有量と、表 6.2-14 に示す燃料の使用割合(A 重油の使用割合)から、燃料中の硫黄分の割合および SO<sub>2</sub> 排出係数を表 6.2-15 のとおり設定した。

表 6.2-13 燃料中の硫黄分(%)

区分	A 重油	C 重油(RFO; Residual Fuel Oil)
外航	0.5	2.7
内航	0.5	2.3

出典)内航船の硫黄分は、日本内航海運組合総連合会による調査結果から設定した。外航船は A 重油については内航船を同じとし、C 重油については IMO が実施している全世界の燃料中硫黄分のモニタリング Sulphur Monitoring(MEPC 47/INF.2)による 2000 年の結果から、2.7%とした。

表 6.2-14 A 重油の使用割合

船型	A 重油使用割合(%)		
	主機ディーゼル機関	補助ディーゼル機関	補助ボイラー
500 総トン未満	79	100	56
500 ~ 1,000 総トン未満	13	100	38
1,000 ~ 3,000 総トン未満	13	100	38
3,000 ~ 6,000 総トン未満	2	69	0
6,000 ~ 10,000 総トン未満	0	69	0
10,000 ~ 30,000 総トン未満	0	41	0
30,000 総トン以上	0	0	0

出典) 主機ディーゼル機関は「第 11 回内航海運における使用燃料油、潤滑油に関する実態調査報告書」(平成 19 年 9 月 日本内航海運組合総連合会)、補助ディーゼル機関および補助ボイラーは「平成 16 年度船舶排出大気汚染物質削減技術検討調査報告書」(平成 17 年 3 月 (社)日本マリンエンジニアリング学会) を基に設定した。

表 6.2-15 機関別燃料中硫黄分および SO<sub>2</sub> 排出係数の設定結果

外/内	船型	硫黄分(%)			排出係数(g/kg-Fuel)		
		主機 ディーゼル	補助 ディーゼル	補助 ボイラー	主機 ディーゼル	補助 ディーゼル	補助 ボイラー
外航	500 総トン未満	0.96	0.50	1.47	19	10	29
	500 ~ 1,000 総トン未満	2.41	0.50	1.86	48	10	37
	1,000 ~ 3,000 総トン未満	2.41	0.50	1.86	48	10	37
	3,000 ~ 6,000 総トン未満	2.66	1.18	2.70	53	24	54
	6,000 ~ 10,000 総トン未満	2.70	1.18	2.70	54	24	54
	10,000 ~ 30,000 総トン未満	2.70	1.80	2.70	54	36	54
	30,000 総トン以上	2.70	2.70	2.70	54	54	54
内航	500 総トン未満	0.88	0.50	1.29	18	10	26
	500 ~ 1,000 総トン未満	2.07	0.50	1.62	41	10	32
	1,000 ~ 3,000 総トン未満	2.07	0.50	1.62	41	10	32
	3,000 ~ 6,000 総トン未満	2.26	1.06	2.30	45	21	46
	6,000 ~ 10,000 総トン未満	2.30	1.06	2.30	46	21	46
	10,000 ~ 30,000 総トン未満	2.30	1.56	2.30	46	31	46
	30,000 総トン以上	2.30	2.30	2.30	46	46	46

注) SO<sub>2</sub> が凝縮して SO<sub>4</sub> 粒子として排出される量を差し引いた値である。

(b) NOx の排出係数

① 主機ディーゼルおよび補助ディーゼル

主機ディーゼルおよび補助ディーゼルの NOx 排出量の算定手順を図 6.2-5 に示す。

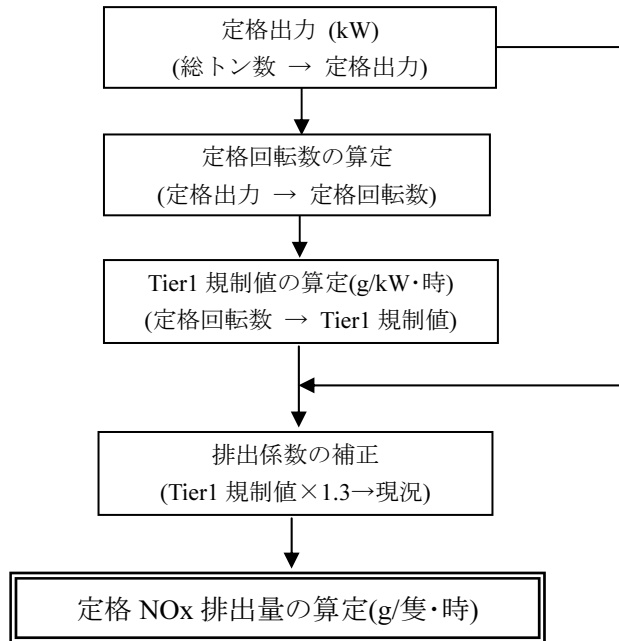


図 6.2-5 定格時の NOx 排出量の算定手順

i. 排出係数式

IMO の Tier1 規制に対応した排出係数式を以下に示す。

NOx 排出係数(Tier1 規制)	
定格回転数 130rpm 未満	: 17 g/kW・時
定格回転数 130rpm 以上 2,000rpm 未満	: $45 \times (\text{定格回転数})^{-0.2}$ g/kW・時
定格回転数 2,000rpm 以上	: 9.8 g/kW・時

本調査で対象とした 2000 年は Tier1 規制適用前である。Tier1 規制による NOx 削減効果は一般に 30%程度といわれているため、上記の式により求めた Tier1 規制に対応した排出係数を 1.3 倍した値を 2000 年の排出係数として設定した。

現在は Tier1 規制が外航船、内航船ともに適用されているので、排出係数を設定する際には、Tier1 規制適用船の混入率を考慮する必要がある。

なお、IMO の排出係数は ISO 8178 のサイクルモードで重み付けられたものであるが、今回は定格時にも同じ排出係数を用いた。

ii. 定格出力および回転数の算定

前述の総トン数と定格出力の関係式から定格出力を算定し、定格出力と機関回転数の関係式から排出係数を設定した。

排出係数の設定に用いたディーゼル機関の回転数と定格出力の関係を図 6.2-6 に示す。本調査では、「既存船舶からの世界的な大気汚染物質排出量に関する調査研究」(平成 19 年 3 月 (財)船舶技術研究協会資料)による定格出力と回転数の関係式を用いた。同式は、Lloyd's のデータに登録されている船舶の主機ディーゼル機関の定格出力と定格回転数から作成されたものである。

**主機ディーゼル機関の回転数と定格出力の関係式**

$$\text{回転数(rpm)} = 101.275 \times (\text{定格出力(kW/船)})^{-0.7005} \times 10^3 \quad (R=0.82)$$

注)出力(kW)への換算は 1(PS)=0.7355(kW)とした。

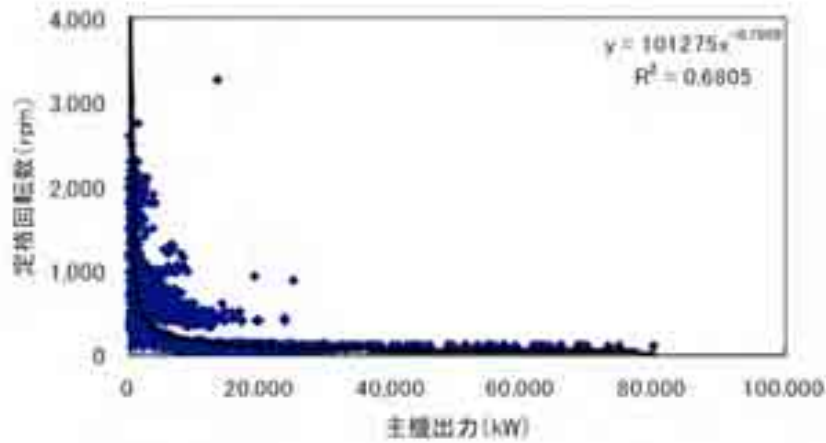
また、補助ディーゼル機関の定格回転数は、Lloyd's のデータに登録されていないため、主機出力と回転数の関係式を用い、基数を考慮して算定した。

**補助ディーゼル機関の回転数と定格出力の関係式**

$$\text{回転数(rpm)} = 101.275 \times (\text{定格出力(kW/基)})^{-0.7005} \times 10^3$$

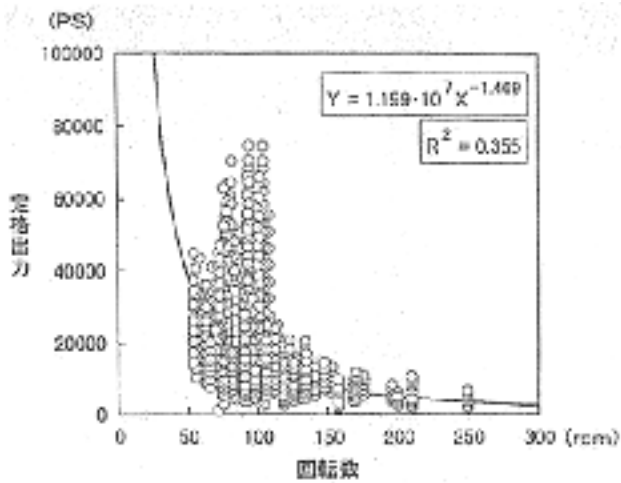
注)機関の基数：5000 総トン未満は 2 基、5000 総トン以上は 3 基とした。

ディーゼル機関の回転数と定格出力の関係式の設定例としては、「平成 15 年度船舶排出大気汚染物質削減技術検討調査報告書」(平成 16 年 3 月 (社)日本マリンエンジニアリング学会)に記載されている「国産エンジンデータブック 94-95」から作成された式があるが、同式は図 6.2-7 に示すようにばらつきが大きく相関係数は低い。

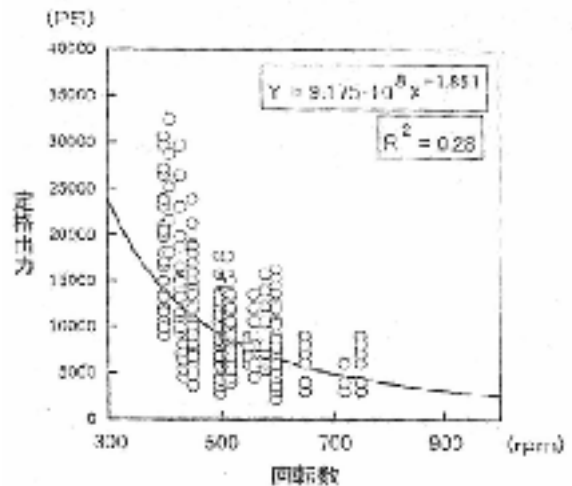


出典：「既存船舶からの世界的な大気汚染物質排出量に関する調査研究」(平成 19 年 3 月 (財)船舶技術研究協会資料)

図 6.2-6 本調査で採用した回転数と定格出力の関係



(2 サイクル機関)



(4 サイクル機関)

出典：「平成 15 年度船舶排出大気汚染物質削減技術検討調査報告書」(平成 16 年 3 月 (社)日本マリンエンジニアリング学会)

図 6.2-7 回転数と定格出力の関係

## ② 補助ボイラー

補助ボイラーについては、「平成 16 年度船舶排出大気汚染物質削減技術検討調査報告書」(平成 17 年 3 月 (社)日本マリンエンジニアリング学会)、「窒素酸化物総量規制マニュアル(新版)」を参考に、燃料消費量当たりの排出係数 8 g/kg-Fuel を用いた。

なお、陸上施設のボイラーの排出係数の算定例を表 6.2-16 に示す。排出係数は A 重油で 2.5 g/kg-Fuel、C 重油で 4.4 g/kg-Fuel であり、低 NOx バーナーが一般に用いられている陸上施設のボイラーと比べると、船舶の排出係数は大きい。

表 6.2-16 「窒素酸化物総量規制マニュアル」による排出係数算定例(ボイラー)

施設	燃料種類	排出係数
ボイラー	A 重油	2.5 g/kg-Fuel
	C 重油	4.4 g/kg-Fuel

出典：「窒素酸化物総量規制マニュアル(新版)」(平成 12 年 公害研究対策センター)より作成

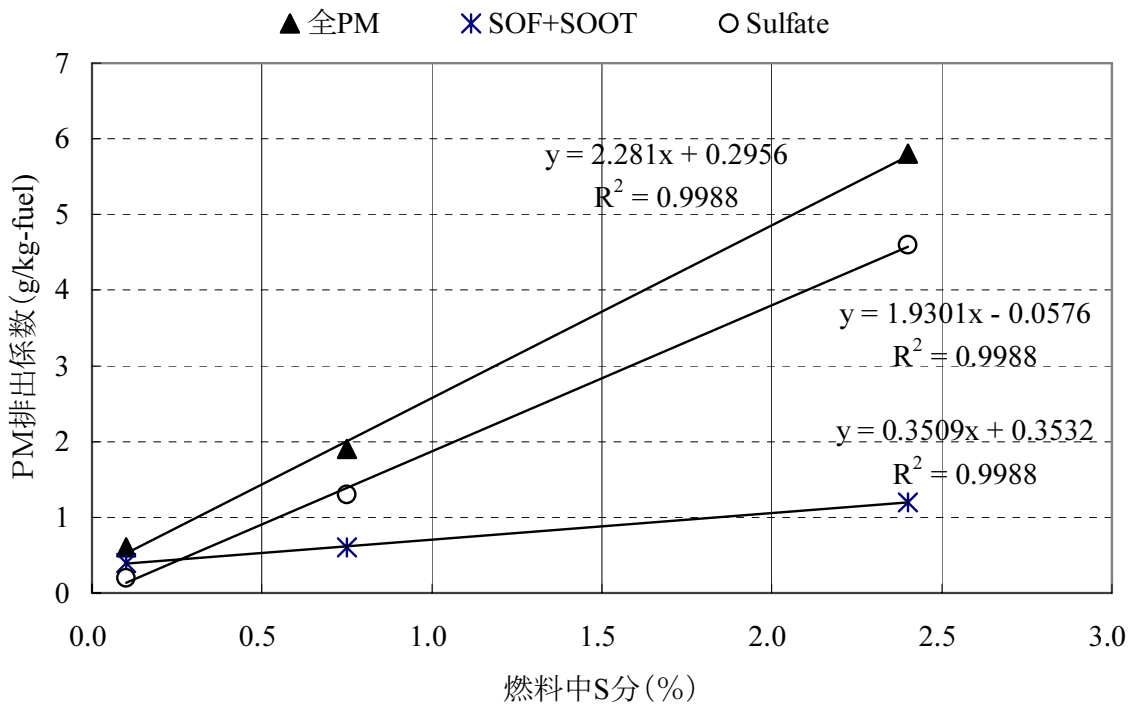
## (c) PM の排出係数

### ① 主機ディーゼルおよび補助ディーゼル

船舶から排出される PM については、燃料油中の硫黄分に起因するものを考慮する必要がある。A 重油と C 重油による PM の排出量の違いについては、「平成 16 年度船舶排出大気汚染物質削減技術検討調査報告書」(平成 17 年 3 月 (社)日本マリンエンジニアリング学会)では、5～10 倍の差が見られ、その原因として、燃料油中の硫黄分から生成される SO<sub>4</sub> が寄与していると指摘している。

本調査では、燃料中の硫黄分の規制に対応した PM 排出量の削減効果を検討するため、図 6.2-8 に示す燃料中の硫黄分と PM 成分の変化の測定例から、燃料中の硫黄分と PM 成分の関係式を作成し、燃料中の硫黄分に対応した PM の排出係数を設定した。

なお、PM に含まれる SO<sub>4</sub> 粒子は、SO<sub>2</sub> の凝縮性粒子と考えられることから、SO<sub>2</sub> の排出係数から PM 中の SO<sub>4</sub> 粒子に相当する量を差し引くことにより、SO<sub>2</sub> 排出係数の補正を行った。(表 6.2-17 参照)



注) PM : 全 PM 排出量、SOF(ソフ) : 有機性可溶成分(Soluble Organic Fraction)  
 SOOT(スート) : すず、Sulfate (サルフェート) : 硫酸成分

出典 : 「平成 16 年度船舶排出大気汚染物質削減技術検討調査」(平成 17 年 3 月 (社)マリンエンジニアリング学会)

図 6.2-8 燃料中の硫黄分による PM 成分の変化

表 6.2-17 SO<sub>2</sub> 排出係数の補正結果(算定例)

燃料中の硫黄分(%)	PM 排出係数 (g/kg-fuel)		SO <sub>2</sub> 排出係数 (g/kg-fuel)			
	全量	SO <sub>4</sub> 粒子	補正前	SO <sub>4</sub> 粒子に相当する SO <sub>2</sub> 量	補正後	凝縮性粒子率(%)
0.5	1.44	0.91	10.0	0.60	9.4	6.05
1.0	2.58	1.87	20.0	1.25	18.8	6.24
1.5	3.72	2.84	30.0	1.89	28.1	6.31
2.0	4.86	3.80	40.0	2.54	37.5	6.34
2.5	6.00	4.77	50.0	3.18	46.8	6.36



## ② 補助ボイラー

補助ボイラーの排出係数については、「浮遊粒子状物質汚染予測マニュアル」(平成9年12月 環境庁大気保全局大気規制課監修)を参考に、A重油については小型ボイラーの排出係数を2 g/kgとした。また、C重油については「浮遊粒子状物質汚染予測マニュアル」の船舶の排出係数の例3~4 g/kg、「平成10年度船舶に係る窒素酸化物低減対策検討調査報告書」(東京都)に記載されている陸上小規模施設(C重油使用)の2.5 g/kgを参考に3 g/kgとし、A重油とC重油の使用割合を考慮して排出係数を設定した。

PMの排出係数の設定結果を表6.2-18に示す。

表 6.2-18 PMの排出係数

外内	船型	全 PM (g/kg-Fuel)			全 PM 中の SO <sub>4</sub> (g/kg-Fuel)		
		主機 ディーゼル	補助 ディーゼル	補助 ボイラー	主機 ディーゼル	補助 ディーゼル	補助 ボイラー
外航	500 総トン未満	2.49	1.44	2.4	1.80	0.91	0.15
	500 ~ 1,000 総トン未満	5.80	1.44	2.6	4.60	0.91	0.19
	1,000 ~ 3,000 総トン未満	5.80	1.44	2.6	4.60	0.91	0.19
	3,000 ~ 6,000 総トン未満	6.35	2.99	3.0	5.07	2.22	0.28
	6,000 ~ 10,000 総トン未満	6.45	2.99	3.0	5.15	2.22	0.28
	10,000 ~ 30,000 総トン未満	6.45	4.40	3.0	5.15	3.41	0.28
	30,000 ~ 60,000 総トン未満	6.45	6.45	3.0	5.15	5.15	0.28
	60,000 ~ 100,000 総トン未満	6.45	6.45	3.0	5.15	5.15	0.28
	100,000 総トン以上	6.45	6.45	3.0	5.15	5.15	0.28
内航	500 総トン未満	2.30	1.44	2.4	1.64	0.91	0.13
	500 ~ 1,000 総トン未満	5.01	1.44	2.5	3.93	0.91	0.17
	1,000 ~ 3,000 総トン未満	5.01	1.44	2.5	3.93	0.91	0.17
	3,000 ~ 6,000 総トン未満	5.46	2.71	2.8	4.31	1.98	0.24
	6,000 ~ 10,000 総トン未満	5.54	2.71	2.8	4.38	1.98	0.24
	10,000 ~ 30,000 総トン未満	5.54	3.86	2.8	4.38	2.96	0.24
	30,000 ~ 60,000 総トン未満	5.54	5.54	2.8	4.38	4.38	0.24
	60,000 ~ 100,000 総トン未満	5.54	5.54	2.8	4.38	4.38	0.24
	100,000 総トン以上	5.54	5.54	2.8	4.38	4.38	0.24

(d) CO および NMVOC の排出係数

燃焼由来のCOおよびNMVOCの排出係数を表 6.2-19に示す。燃焼由来のCOおよびNMVOCについては、燃焼状態によって大きく影響を受けることが考えられるが、排出データの蓄積が少ないことから、本調査では機関全体で一定とした。

なお、既存の排出係数設定例として、「平成10年度船舶排ガスの地球環境への影響と防止技術の調査報告書」(平成11年3月 (財)シップ・アンド・オーシャン財団)があるが、同報告書ではCOは9 g/kg-Fuel、NMVOCは1.9 g/kg-Fuelとしており、本調査での設定値と比べ、COは約20%高く、反対にNMVOCは約20%低い。

また、本調査では、「平成17年度船舶からの揮発性有機化合物(VOC)の排出影響に関する調査報告書」(平成18年3月 海洋政策研究財団)を基に、NMVOCについては原油等の輸送に伴いタンカーから揮発する排出量として、東京湾全体で9.4千トン/年を見込んだ。

**表 6.2-19 燃焼由来のCOおよびNMVOCの排出係数 (g/kg-fuel)**

物質	CO	NMVOC
排出係数	7.4	2.4

出典) EMEP/CORINAIR Emission Inventory Guidebook – 2006, Technical report No 11/2006, Group 8: Other mobile sources and machinery, SHIPPING ACTIVITIES, National sea traffic, National Fishing, International sea traffic, Inland goods carrying vessels (2006/12/21 EEA (European Environment Agency))

## 6.2.7 部分負荷時の排出量の算定

### (1) 排出量算定式

船型と出力との関係式や、出力あたりの燃料消費量、燃料・出力あたりの排出係数は、負荷率によって影響を受けると考えられるが、負荷率との関係に関するデータの蓄積が少ないため、本調査ではこれらの関係は定格時と同じとし、「部分負荷時の排出量＝定格時の排出量×負荷率」により、部分負荷時の排出量を算定した。

### (2) 負荷率の設定

#### (a) 補助ディーゼル機関および補助ボイラー

補助ディーゼル機関および補助ボイラーの負荷率を表 6.2-20 に示す。

既存の負荷率として、日本舶用機関学会が設定した船型別の負荷率(表 6.2-21)があるが、日本内航海運組合総連合会の燃料消費量の実態調査結果「第 11 回内航海運における使用燃料油、潤滑油に関する実態調査報告書」(平成 19 年 9 月日本内航海運組合総連合会)と比較すると、日本舶用機関学会の負荷率では燃料を過大に見積もる傾向があった。また、EMEP/CORINAIR Emission Inventory Guidebook – 2006 によると、荷役時には 40 %、停泊時には 20 %として負荷率が設定されている。本調査では、これらを踏まえ、排出量がより実態に合うように、船種の特性を考慮しつつ、既存の負荷率よりも全体として低くなるよう負荷率を設定した。

なお、フェリーについては、荷役時に船倉内で換気ファンが稼働し補助ディーゼル機関の負荷率が高くなることが考えられるが、RoRo 船や貨物船と比較すると、その負荷の上昇は少なくまた時間も短いと考えられることから、ここでは非荷役時と同じ扱いとした。

また、船舶は方向転換や離着岸時にサイドスラスター装置を使用する際に最も多くの電力を使用するため、補助ディーゼル機関の負荷率も大きくなるが、サイドスラスター装置の稼働はごく短時間であるため、本調査では考慮していない。

また、タンカーは荷揚時に本船のカーゴポンプを使用するため、荷揚と荷積みで補助ディーゼル機関の負荷率は異なるが、東京湾では荷揚と荷積みはどちらも行われているため、本調査では荷揚、荷積みの区分は行わずに負荷率を設定した。

表 6.2-20 補助ディーゼルおよび補助ボイラーの荷役・非荷役別の負荷率

(単位：%)

船種	補助ディーゼル		補助ボイラ	
	荷役時	非荷役時 航行時	荷役時	非荷役時 航行時
コンテナ船	50	30	20	20
貨物船	40	30	20	20
タンカー	50	30	40	20
貨客船	50	40	20	20
フェリー	30	30	30	20
RoRo 船	60	30	20	20
客船	-	40	-	20
その他	50	30	20	20

出典：EMEP/CORINAIR Emission Inventory Guidebook – 2006, Technical report No 11/2006, Group 8: Other mobile sources and machinery, SHIPPING ACTIVITIES, National sea traffic, National Fishing, International sea traffic, Inland goods carrying vessels (2006/12/21 EEA (European Environment Agency))等を参考に設定した。

表 6.2-21 日本舶用機関学会による補助ディーゼルの荷役・非荷役別の負荷率

(単位：%)

大きさ 停泊形態	I	II	III	IV
	500 t 未満	500 t 以上 5,000 t 未満	5,000 t 以上 10,000 t 未満	10,000 t 以上
荷役中負荷率	54	62	56	63
非荷役中負荷率	42	47	48	52

出典：「平成 6 年度船舶排出大気汚染物質削減手法検討調査」(平成 7 年 5 月 (社)日本舶用機関学会)

(b) 主機ディーゼル機関

主機ディーゼル機関の負荷率を表 6.2-22 に示す。

主機ディーゼル機関については、一般に「負荷率が船速の 3 乗に比例する」とされていることから、「大気汚染対策推進のための基礎調査報告書」(平成 4 年 3 月 東京都)による船速と主機ディーゼル機関の負荷率の関係式を用いて、航行モード別の船速から負荷率を設定した。

なお、航行モード別の速度は表 6.2-23 に示すとおりである。

表 6.2-22 主機ディーゼルの負荷率

東京湾内(単位：%)

航行モード \ ランク	I	II	III	IV
	500 t 未満	500 t 以上 5,000 t 未満	5,000 t 以上 10,000 t 未満	10,000 t 以上
フル	89	38	25	23
スタンバイフル	54	27	16	14
ハーフ	33	21	13	11
スロー	19	18	9	8
デッドスロー	18	17	9	8

出典：「大気汚染対策推進のための基礎調査報告書」(平成 4 年 3 月 東京都)

東京湾外(単位：%)

船種 \ ランク	I	II	III	IV
	500 t 未満	500 t 以上 5,000 t 未満	5,000 t 以上 10,000 t 未満	10,000 t 以上
コンテナ船	89	82	80	77
貨物船	89	82	59	43
タンカー	89	52	36	27
貨客船	89	82	80	77
フェリー	89	82	80	77
RoRo 船	89	82	80	77
客船	89	82	80	77
その他	89	82	59	43

出典：「大気汚染対策推進のための基礎調査報告書」(平成 4 年 3 月 東京都)より作成した次式を用いて負荷率を設定した。

500 総トン未満	$PR = 7.11 \times 10^{-4} \times V^3 + 0.175$
500～5,000 総トン未満	$PR = 1.58 \times 10^{-4} \times V^3 + 0.171$
5,000～10,000 総トン未満	$PR = 1.23 \times 10^{-4} \times V^3 + 0.085$
10,000 総トン以上	$PR = 8.71 \times 10^{-5} \times V^3 + 0.076$
ここで	
PR	: 主機の負荷率
V	: 対地速度(ノット)

表 6.2-23 東京湾内における航行モード別の航行速度および東京湾外における巡航速度

東京湾内

(単位：ノット)

航行モード \ ランク	I	II	III	IV
	500 t 未満	500 t 以上 5,000 t 未満	5,000 t 以上 10,000 t 未満	10,000 t 以上
フル	10	11	11	12
スタンバイフル	8	8.5	8.5	9
ハーフ	6	6	7	7
スロー	3	3	3.5	3.5
デッドスロー	2	2	2	2

出典：「平成 6 年度 船舶排出大気汚染物質削減手法検討調査」(平成 7 年 5 月 (社)日本船用機関学会)

東京湾外

(単位：ノット)

船種 \ ランク	I	II	III	IV
	500 t 未満	500 t 以上 5,000 t 未満	5,000 t 以上 10,000 t 未満	10,000 t 以上
コンテナ船	10	16	18	20
貨物船	10	16	16	16
タンカー	10	13	13	13
貨客船	10	16	18	20
フェリー	10	16	18	20
RoRo 船	10	16	18	20
客船	10	16	18	20
その他	10	16	16	16

出典：「平成 10 年度船舶排ガスの地球環境への影響と防止技術の調査報告書」(平成 11 年 3 月 (財)シップ・アンド・オーシャン財団)を参考に設定した。

## 6.2.8 タグボート

タグボートについては、各港湾に所属するタグボートの隻数を基に、平均馬力、稼働時間、エンジン負荷率等を設定し排出量を算定した。排出量の算定に用いたタグボートの隻数を表 6.2-24 に、タグボートの馬力、稼働時間、負荷率等表 6.2-25 に示す。

なお、エンジン負荷率については、タグボートは低負荷で運転する割合が高いため、500 総トン未満の船舶のスローの負荷率を用いた。

**表 6.2-24 港湾別所属タグボートの隻数**

	東京港	川崎港・横浜港	千葉港	木更津港	横須賀港
曳船隻数	13	34	14	4	10

出典：「日本の港湾 2001」(財)日本海事広報協会

**表 6.2-25 タグボートの稼働条件**

項目	設定値
平均馬力	3,000 PS
航行時間	8 時間/日(2 時間/回×4 回/日)
年間稼働時間	2,400 時間/隻
エンジン負荷率	19%(500 総トン未満の Slow)
燃料中の硫黄分	0.5%(A 重油使用)

前述の排出量算定式にタグボートの稼働条件をあてはめ、排出量を算定した。

## 6.2.9 時間率および月稼働率の設定

### (1) 時間率

#### (a) 係留時

係留時の時間率の設定の考え方は表 6.2-26 に示すとおりであり、船舶は原則として 8 時に着岸すると想定し、荷役時の排出量を時間率に応じて配分した。また、非荷役時については、24 時間均等に排出量を配分した。係留時における時刻別排出量の配分結果の例として、時刻別燃料消費量を図 6.2-9 に示す。なお、NMVOC のうち、燃烧由来ではない、原油等の輸送に伴いタンカーから揮発する NMVOC については、すべて日中に排出されるものとした。

表 6.2-26 係留時の時間率設定の考え方

区分	荷役時の排出量	非荷役時の排出量
係留時間が 3 時間超	8 : 00 に着岸すると想定 ただし、荷役時間が 15 時間を超える船舶については、8 : 00 ~ 18 : 00 に配分した	均等配分
係留時間が 3 時間以下かつ船型が 1,000 総トン未満	8 : 00、13 : 00 に着岸すると想定	均等配分

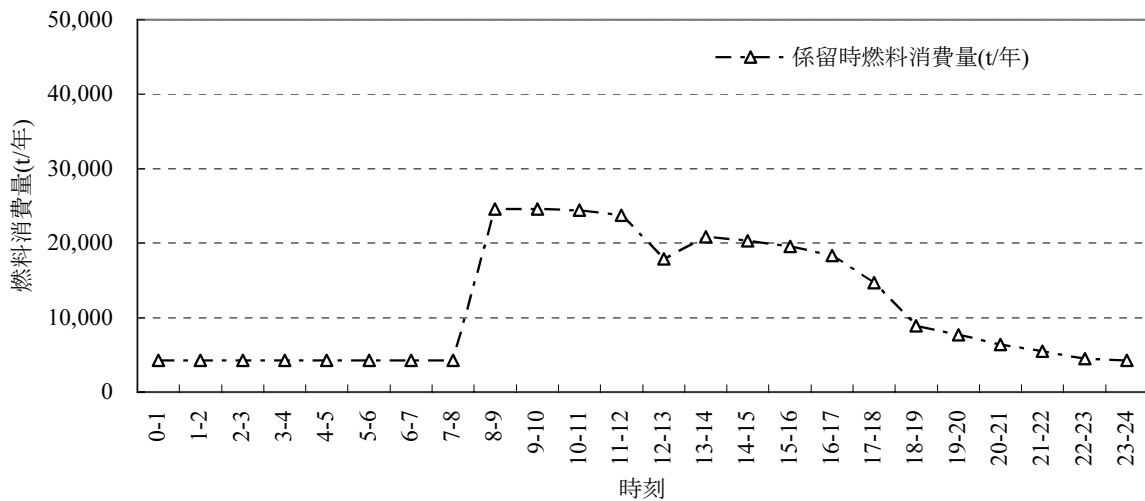


図 6.2-9 係留時における時刻別燃料消費量算定結果(東京湾内)



(b) 航行時

航行時の時間率は、図 6.2-10 に示す東京湾の港湾における平均的な入港・出港時刻割合を基に設定した。なお、浦賀水道より湾口側の航路については、入港・出港時刻との時間的なずれが大きいと考えられるため、入港・出港時刻別の割合を前後 1 時間シフトさせた。航行時における時刻別排出量の配分結果の例として、時刻別燃料消費量を図 6.2-11 に示す。

東京湾(東京港,川崎港,横浜港,千葉港,木更津港,横須賀港)における入港・出港時刻の時間分布(2000年)

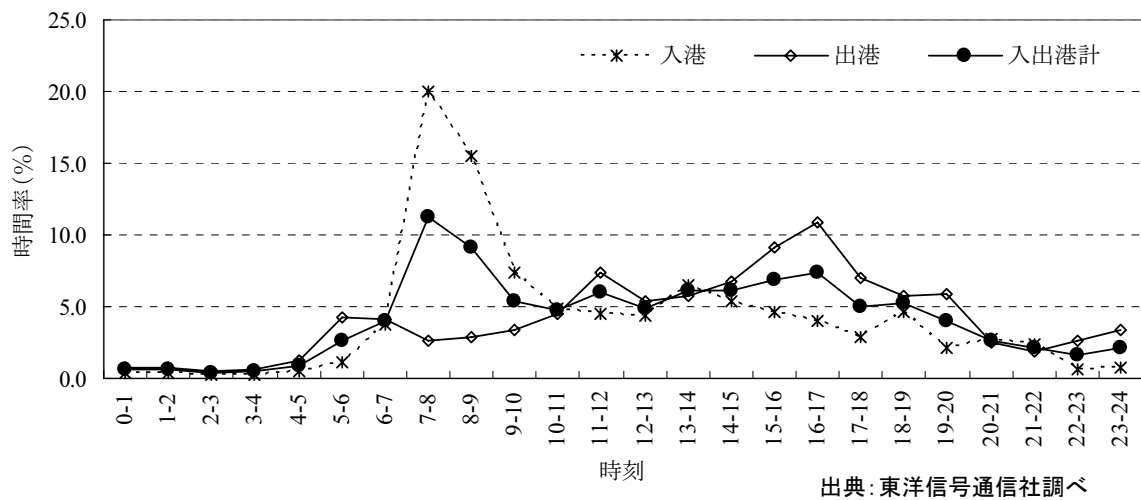


図 6.2-10 東京湾における入港・出港時刻

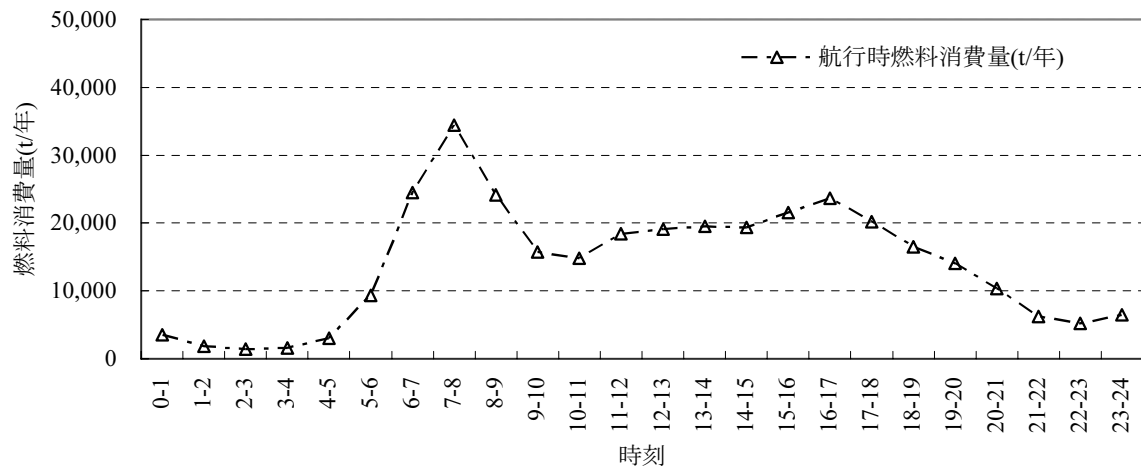
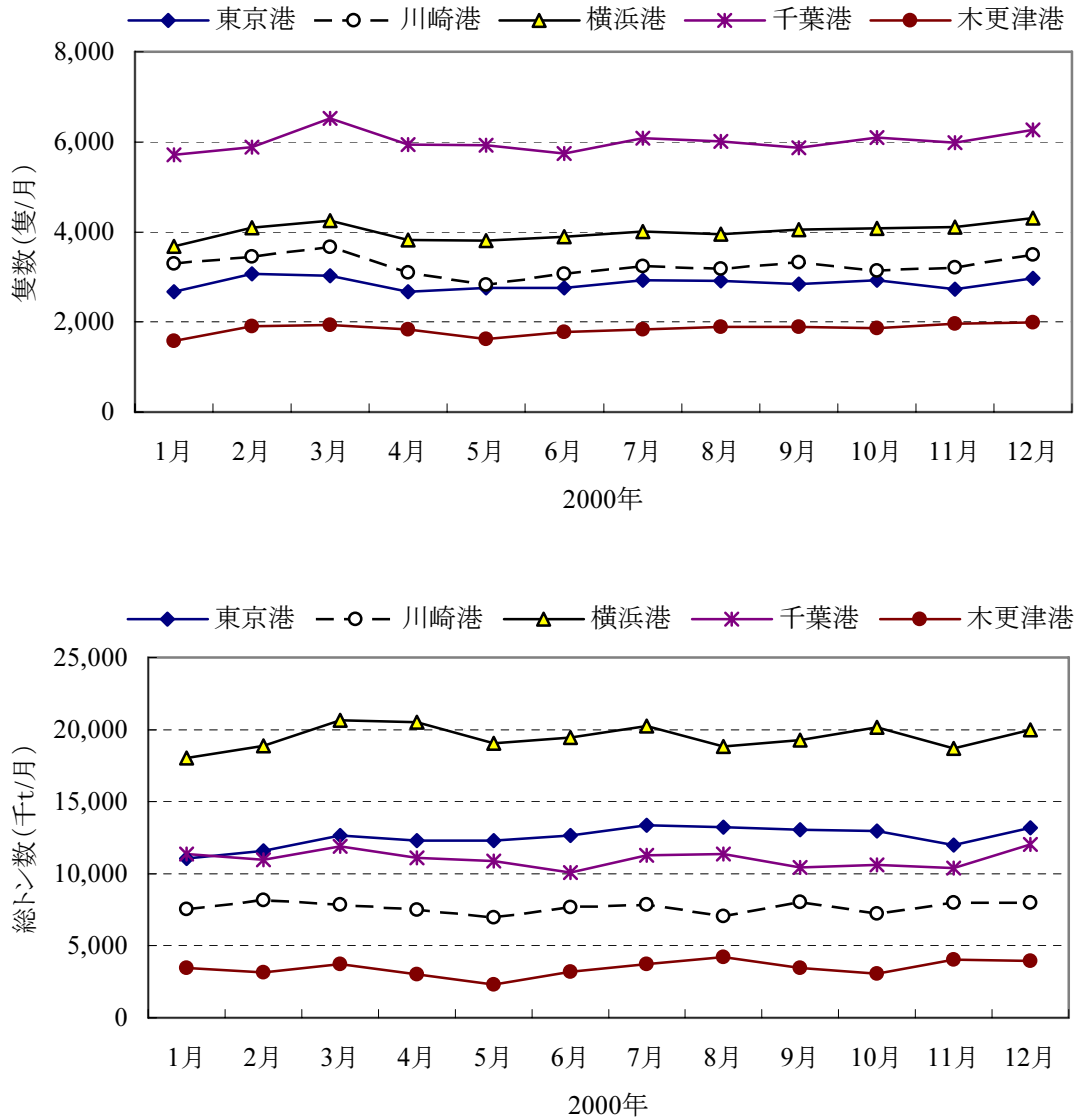


図 6.2-11 航行時における時刻別燃料消費量算定結果(東京湾内)

## (2) 月変動率

各港湾の入港船舶隻数および総トン数の月変化を図 6.2-12 に、横浜港における外航・内航別の主な船種別の入港船舶隻数および総トン数の月変化を図 6.2-13 に示す。

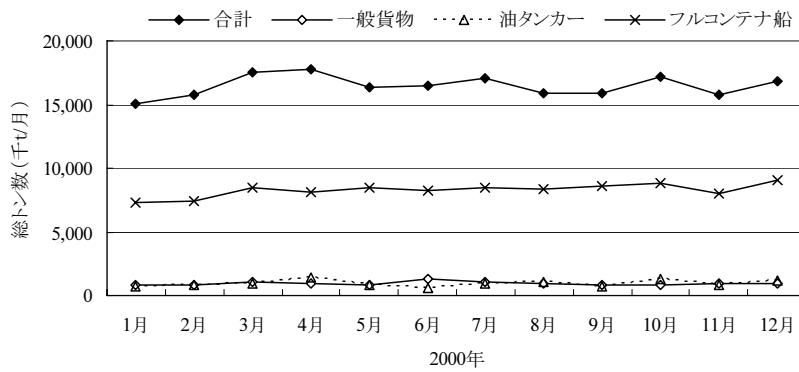
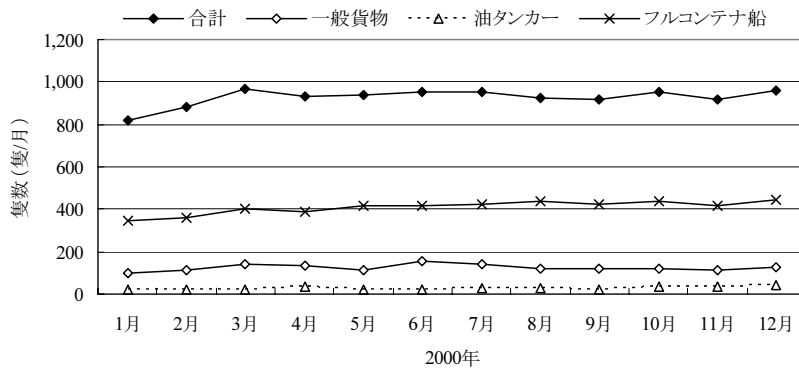
いずれの港湾についても月変化は小さいこと、また、船種による特異な変動も見られないことから、排出量の月変動は考慮しないこととした。



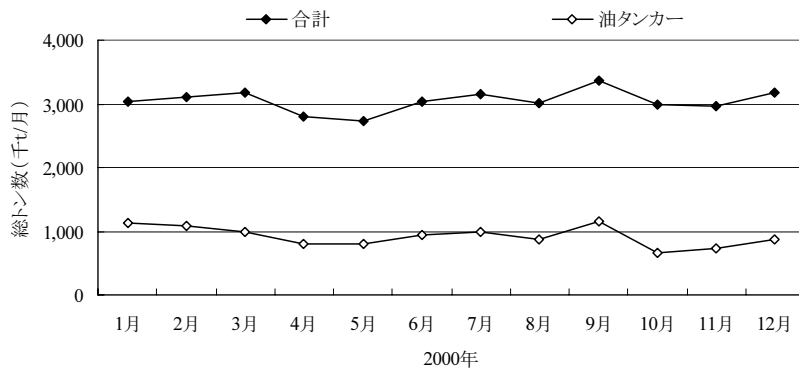
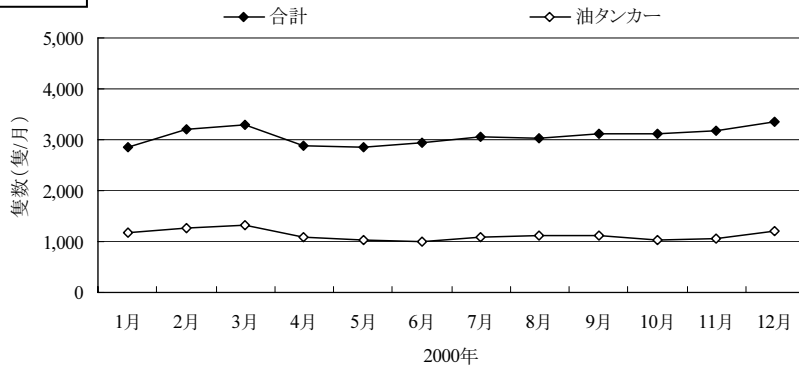
出典：各港湾の港湾統計年報(2000年)より作成

図 6.2-12 各港湾における月別入港船舶隻数および総トン数

外航



内航



出典：「横浜港港湾統計月報 平成 12 年」(横浜市港湾局)

図 6.2-13 横浜港における外航・内航別月別入港船舶隻数および総トン数(上段：外航、下段：内航)

## 6.2.10 排出源の位置

### (1) 東京湾内

東京湾における航路、係留位置をメッシュ(約 1 km 格子)ごとにまとめ、モデル化した。排出位置として想定した航路を図 6.2-14 に示す。

なお、原油等の輸送に伴いタンカーから揮発する NMVOC については、係留施設別の荷役タンカーの隻数に応じて排出量を配分した。また、タグボートからの排出量については、入出港時の航路の排出量に応じて配分した。

各港から東京湾口までの概算距離を表 6.2-27 に示す。

なお、外航船については全てが湾外～各港湾を往復するものとし、内航船については総トン数相当で約 6 割が湾外～各港湾を往復し、残りの 4 割については中ノ瀬航路～各港湾を往復するものとして設定した。

表 6.2-27 各港から東京湾口までの概算距離

港湾	概算距離(km)
東京港	80
川崎港	55
横浜港	45
千葉港	75
木更津港	50
横須賀港	30

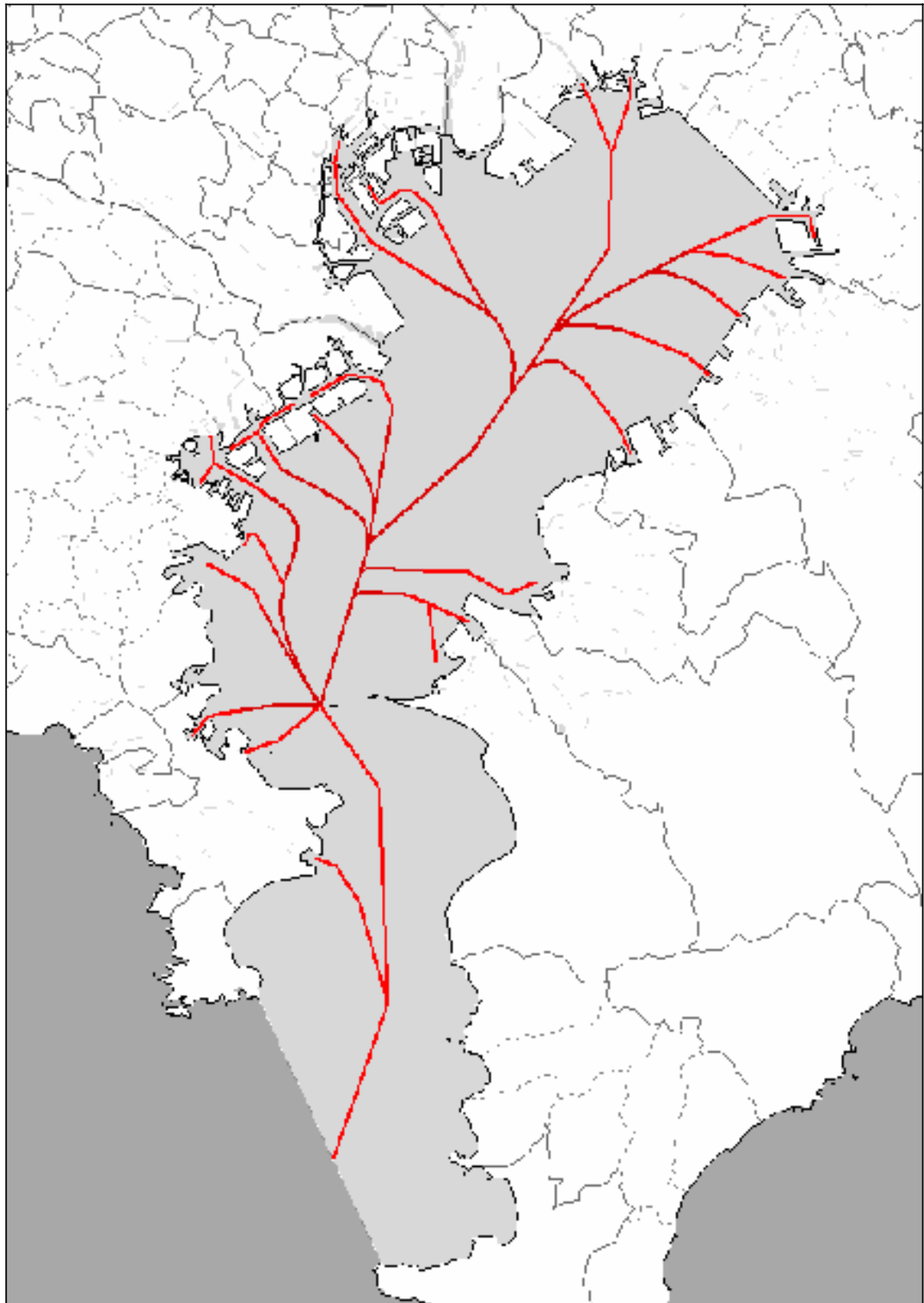


図 6.2-14(1) 東京湾内の航路位置(入港時)

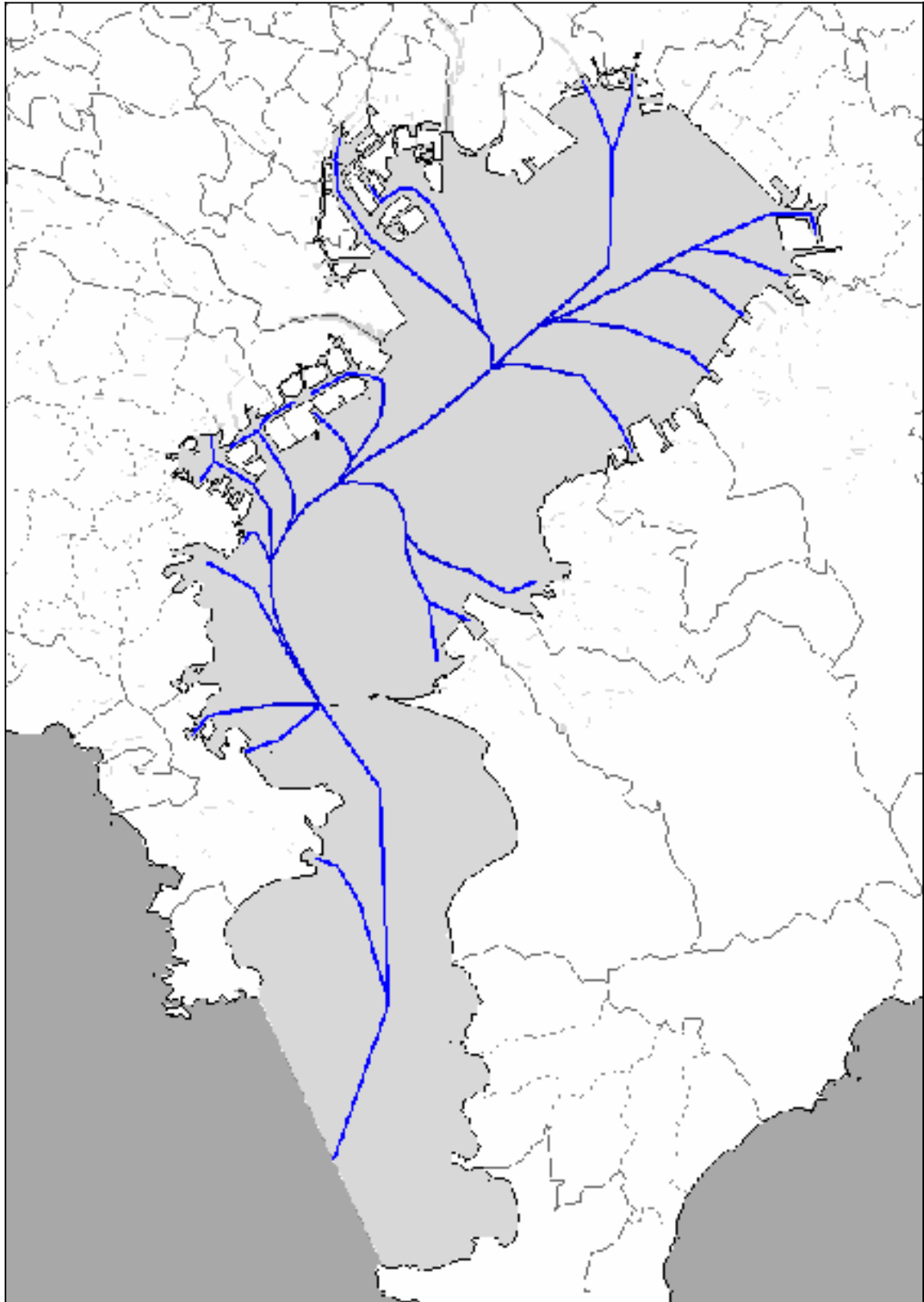


図 6.2-14(2) 東京湾内の航路位置(出港時)

## (2) 外洋航路の設定

我が国の外航貨物定期輸送の大部分を占める定期コンテナ輸送における主要な航路としては、太平洋を經由してアジア・日本と北米を結ぶ北米航路、マラッカ・シンガポール海峡、スエズ運河、地中海を經由してアジア・日本とヨーロッパ間を結ぶ欧州航路、日本とオーストラリアを結ぶ航路などがある。本調査では、外航船については北米航路、欧州航路およびオーストラリア航路を設定した。それぞれ取扱貨物量および航跡図を参考(表 6.2-28、表 6.2-29 参照)に、各航路に排出量を配分した。設定した外洋航路の位置および排出量の配分比を図 6.2-15に示す。また、内航船については、北米航路と欧州航路(南①)を利用するものとした。

表 6.2-28 外航船の方面別海上貿易量および航路別配分率の設定

(千トン)

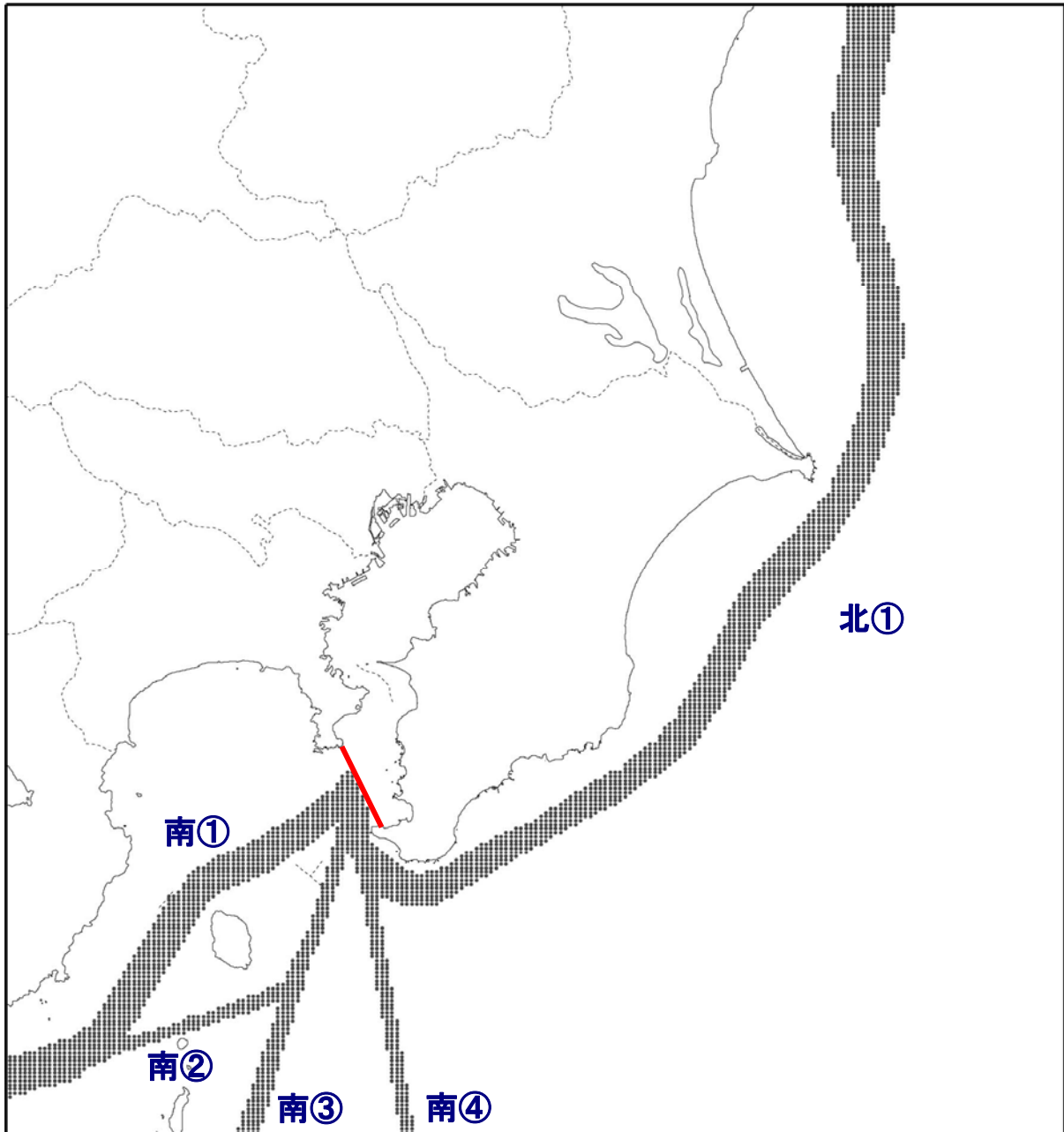
方面	不定期貨物	コンテナ 貨物	計	航路別配分	
				北米航路	欧州・太平洋 航路
中東	210,895		210,895		210,895
アジア	170,287	35,178	205,465		205,465
大洋	158,714		158,714		158,714
北米	87,776	16,404	104,180	104,180	0
中南米	51,331		51,331	51,331	0
アジア	46,674		46,674		46,674
アフリカ	16,836		16,836		16,836
その他	25,371	7,431	32,802		32,802
欧州		8,443	8,443		8,443
計	767,884	67,456	835,340	155,511	679,829
航路別割り当て(%)				18.6	81.4

出典：国土交通省資料より作成

表 6.2-29 内航船の航路配分率の設定

	北米航路	欧州・太平洋航路	計
内貿貨物(千トン)	40,468	92,454	132,922
配分割合(%)	30.0	70.0	—

出典：内貿貨物は、「貨物地域流動調査(平成 12 年度)」(国土交通省)の地域相互間輸送トン数表(海運)より設定



航路	外航	内航	備考
南①	0.4	0.7	欧州航路
南②	0.3	0.0	欧州航路
南③・④	0.1	0.0	オーストラリア航路
北①	0.2	0.3	北米航路

図 6.2-15 外洋航路の位置および排出量配分比の設定結果



## 6.2.11 大気汚染物質排出量の算定結果

### (1) 算定結果

排出量の算定結果を表 6.2-30 に示す。

東京湾についてみると、年間排出量はSO<sub>2</sub>が約2万1千トン、NO<sub>x</sub>が約3万7千トン、PMが約2.7千トン(うち、SO<sub>4</sub>は1.9千トン)、COが約4.7千トン、NMVOCが約1万1千トンとなっている。東京湾内における港湾別排出量は図 6.2-16～図 6.2-18 に示すとおりであり、図 6.2-18 の係留時と航行時を合わせた排出量でみると、港湾別には横浜港、東京港、千葉港で排出量が多く、横浜港および東京港では外航船、千葉港および川崎港では内航船の割合が相対的に高い。

また、東京湾全体における船種別・トン階級別の排出量は図 6.2-19 ～図 6.2-21 に示すとおりであり、船種別にはコンテナ船、貨物船、タンカーが多い。

表 6.2-30 年間排出量のまとめ(トン/年)

区分		燃料	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	PM			CO	NMVOC
					全 PM	SOOT 等	SO <sub>4</sub>		
東京湾	係留時	280,414	8,953	13,338	1,082	329	753	2,075	673
	蒸発性 NMVOC								9,356
	タグボート	18,468	185	1,313	27	10	17	137	44
	湾内航行時	335,011	12,189	22,447	1,546	372	1,174	2,479	804
	計	633,893	21,327	37,098	2,655	711	1,944	4,691	10,877
湾外航行		834,586	35,806	63,762	4,563	993	3,570	6,176	2,003
総計		1,468,479	57,134	100,860	7,218	1,704	5,514	10,867	12,880

注)NMVOC の下段は蒸発由来の NMVOC を示す。

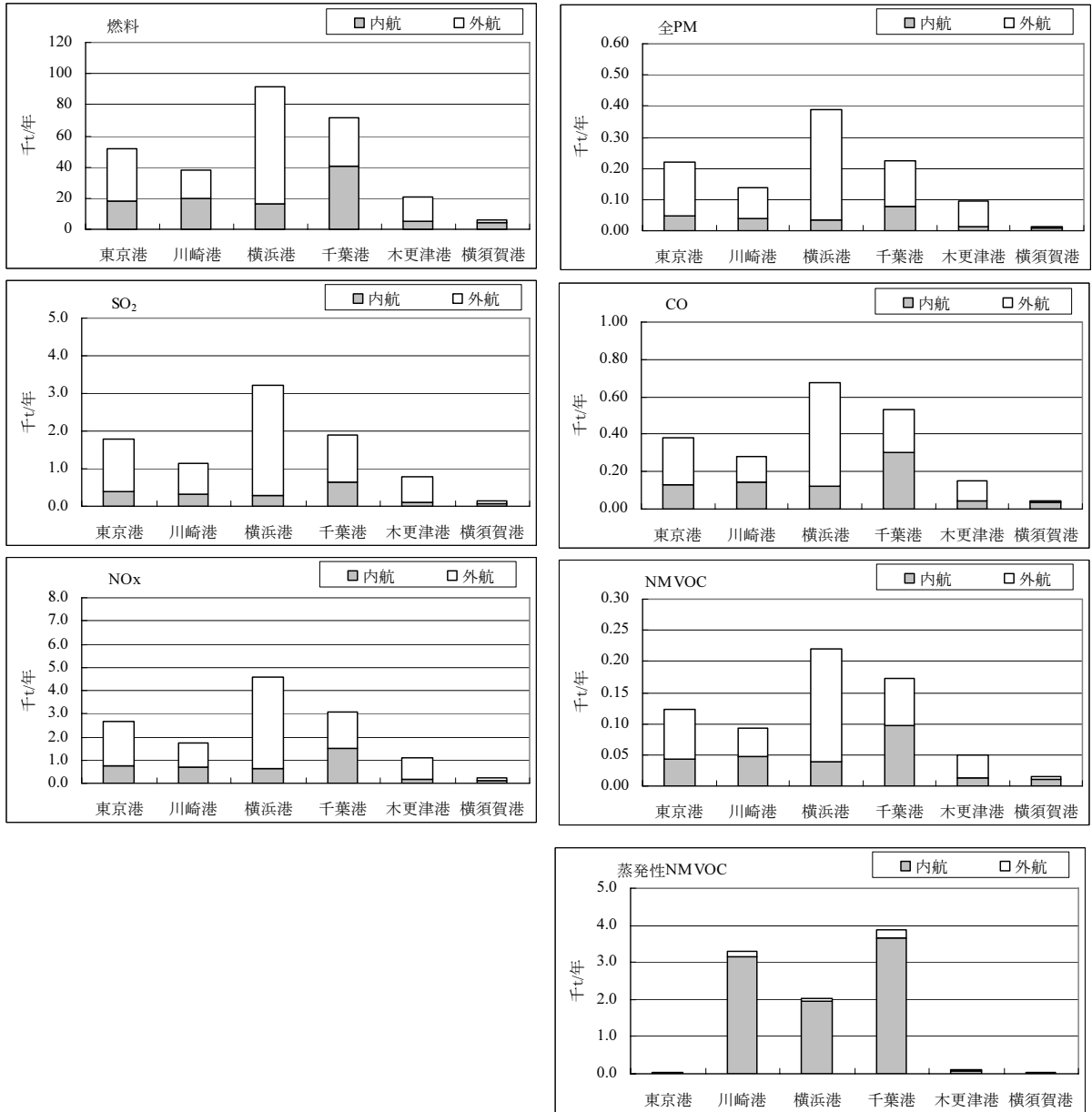
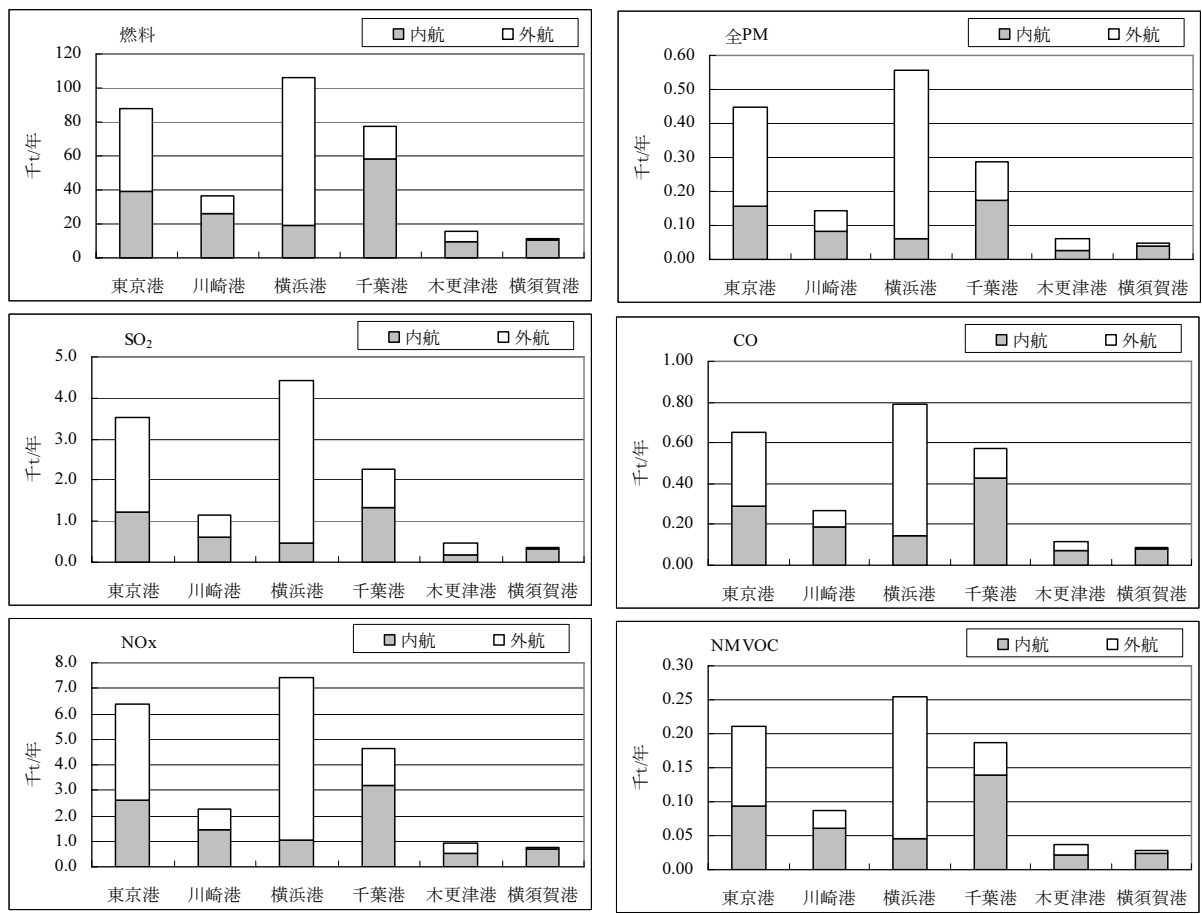
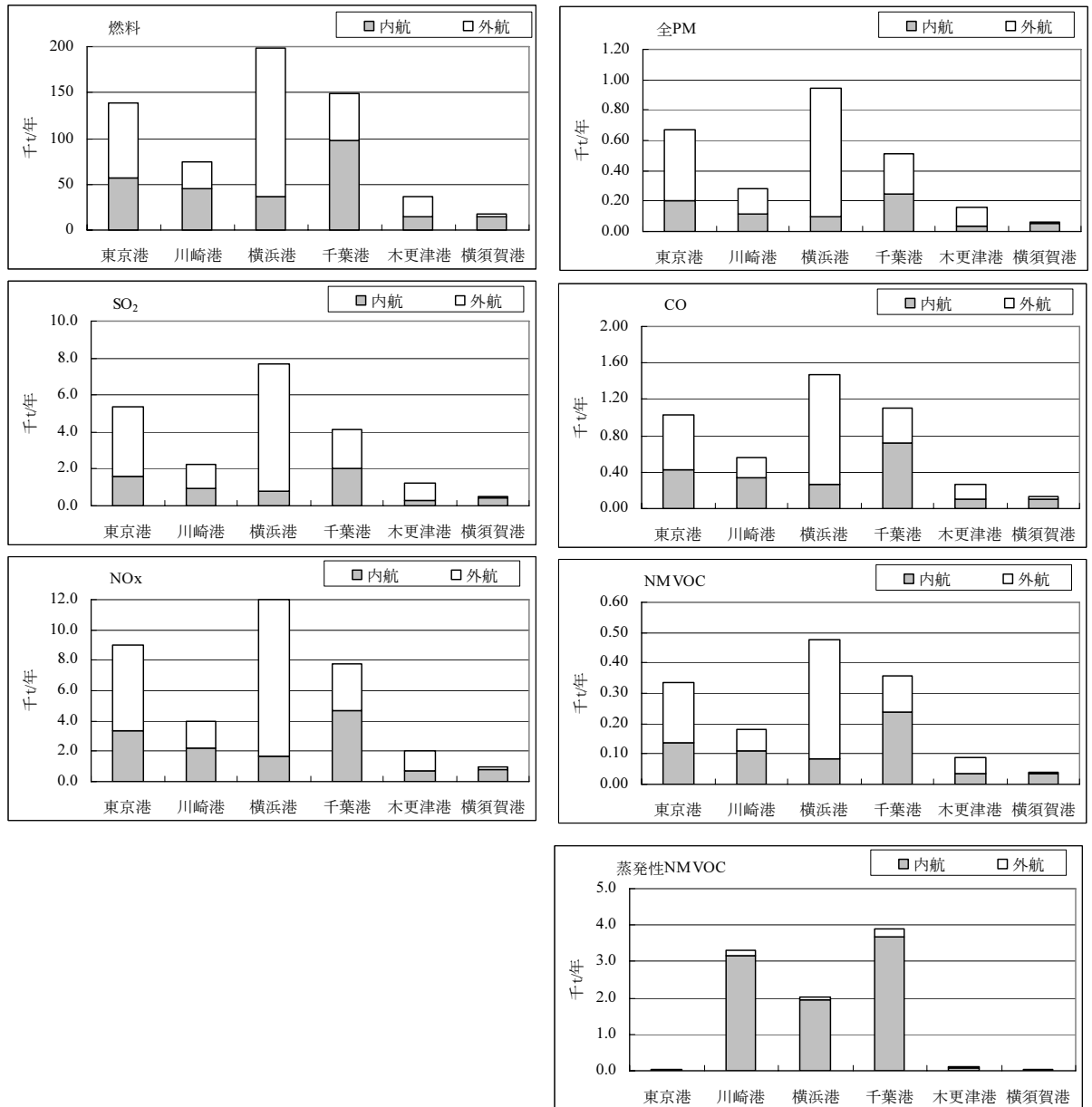


図 6.2-16 東京湾における港湾別外内航別排出量(係留時)



注) タグボートを除く。

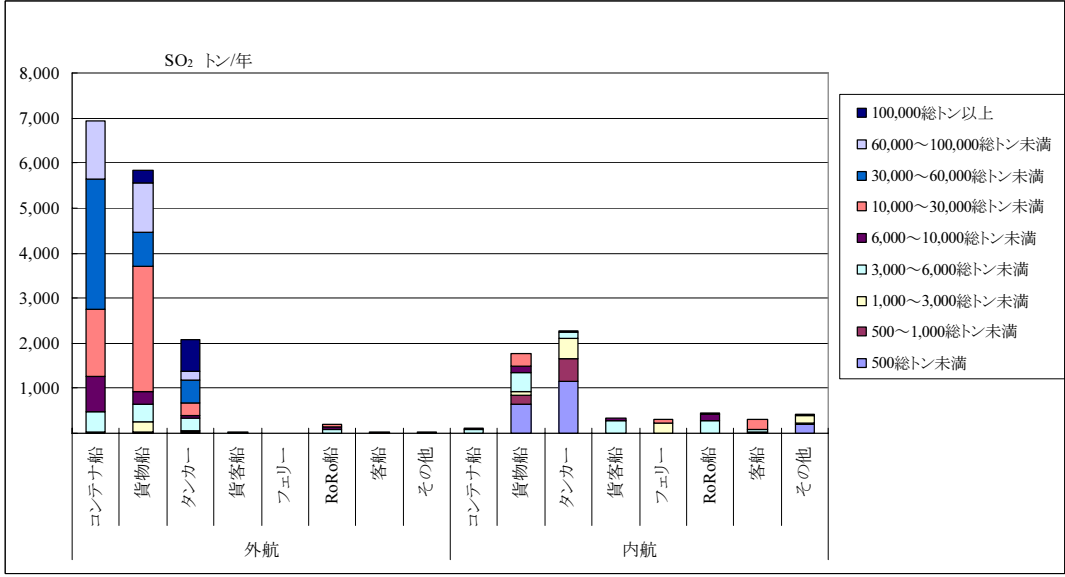
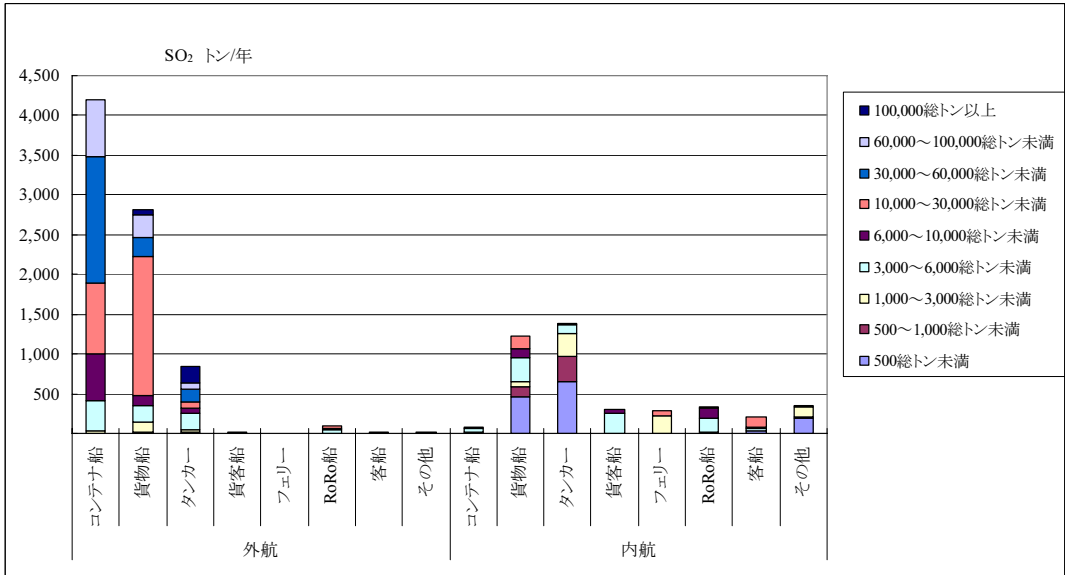
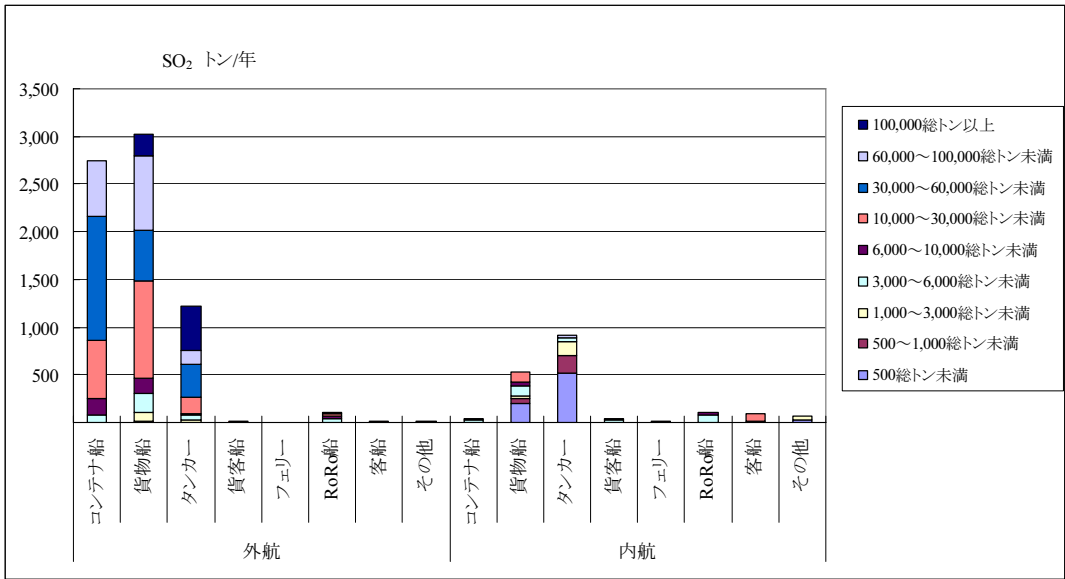
図 6.2-17 東京湾における港湾別外内航別排出量(航行時)



注) タグボートを除く。

図 6.2-18 東京湾における港湾別外内航別排出量(係留時+航行時)

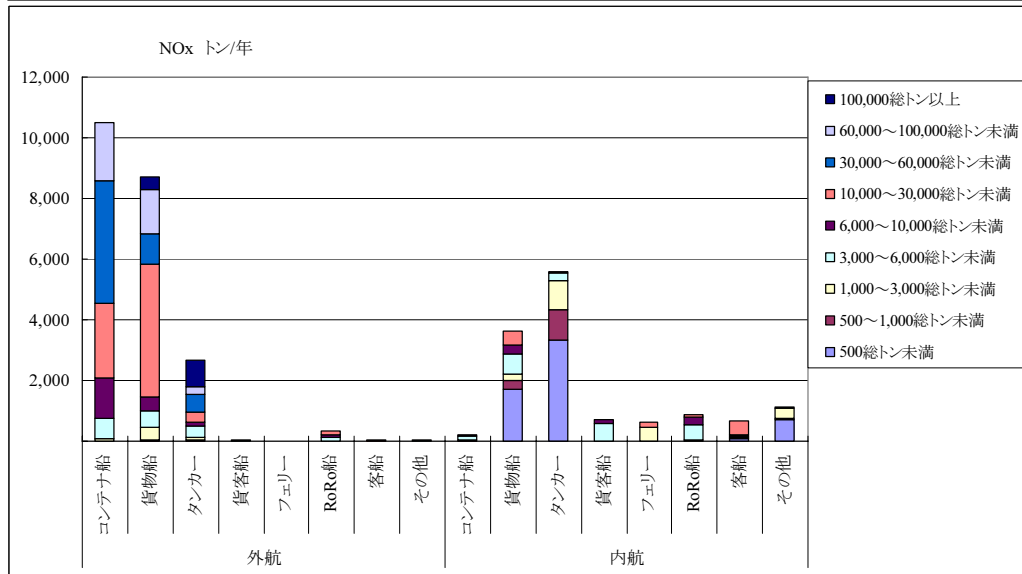
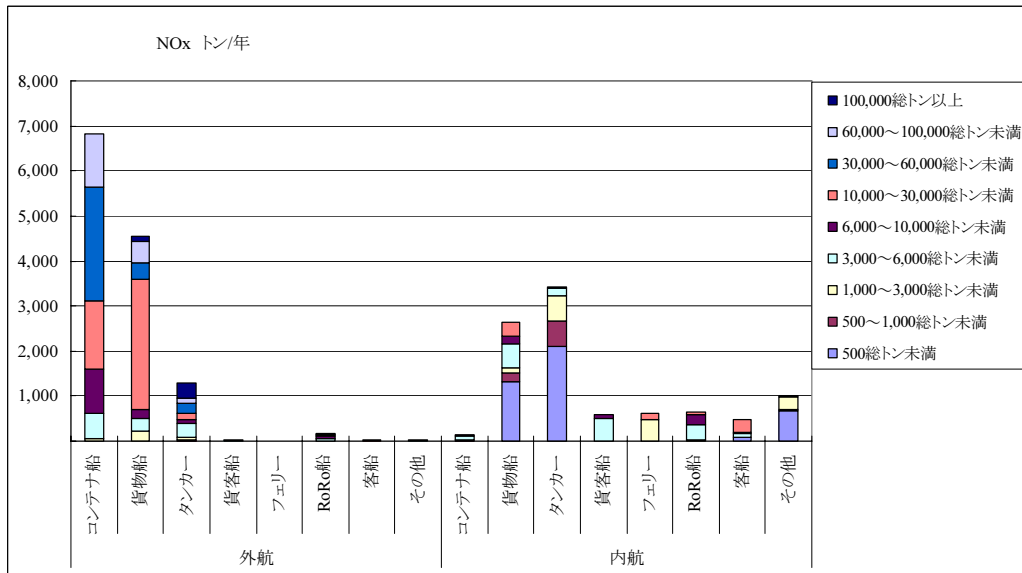
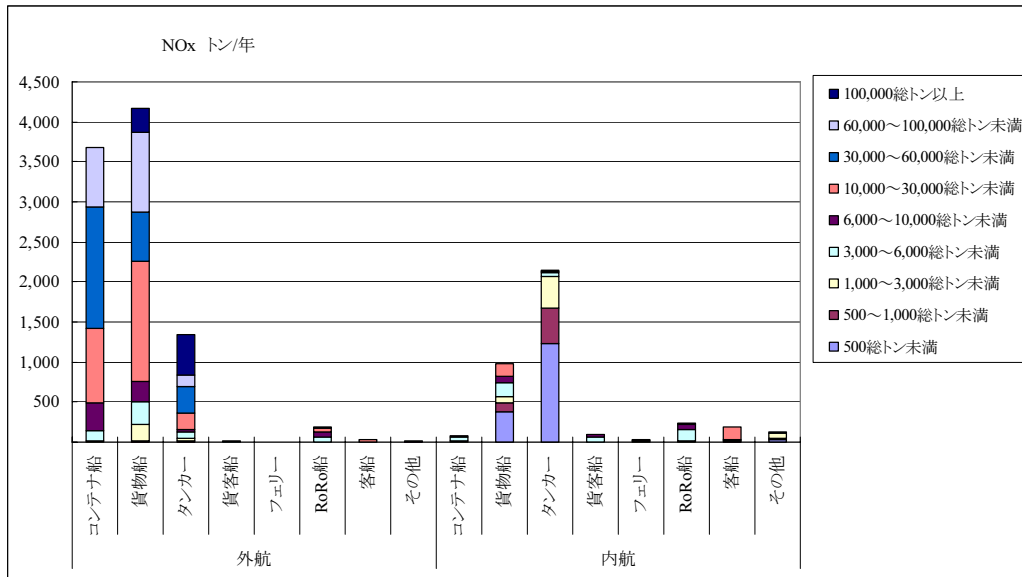
上段：係留時、中段：航行時：下段：係留+航行時



注) タグボートを除く。

図 6.2-19 東京湾内における外航内航別・船種別・トン階級別排出量

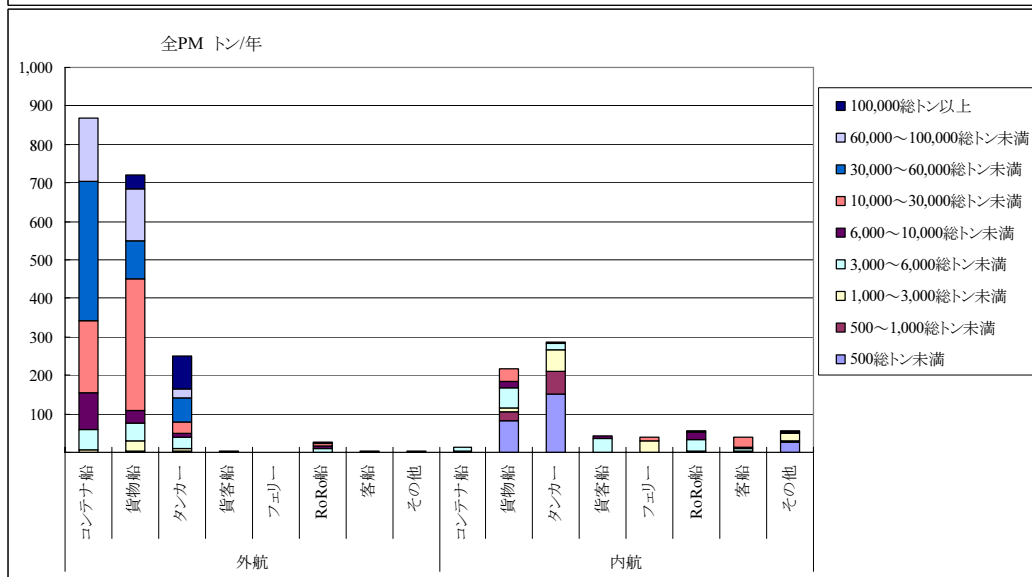
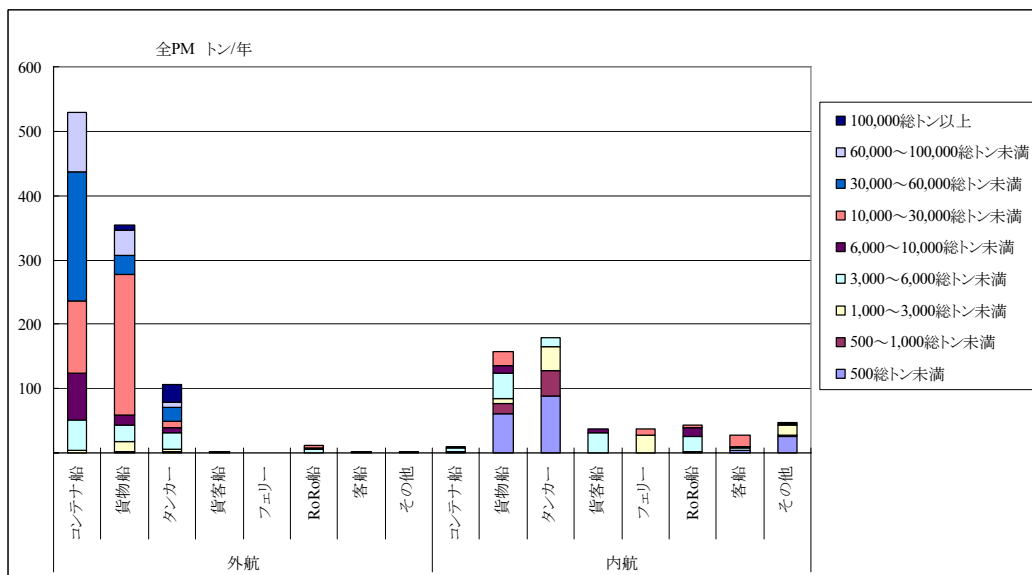
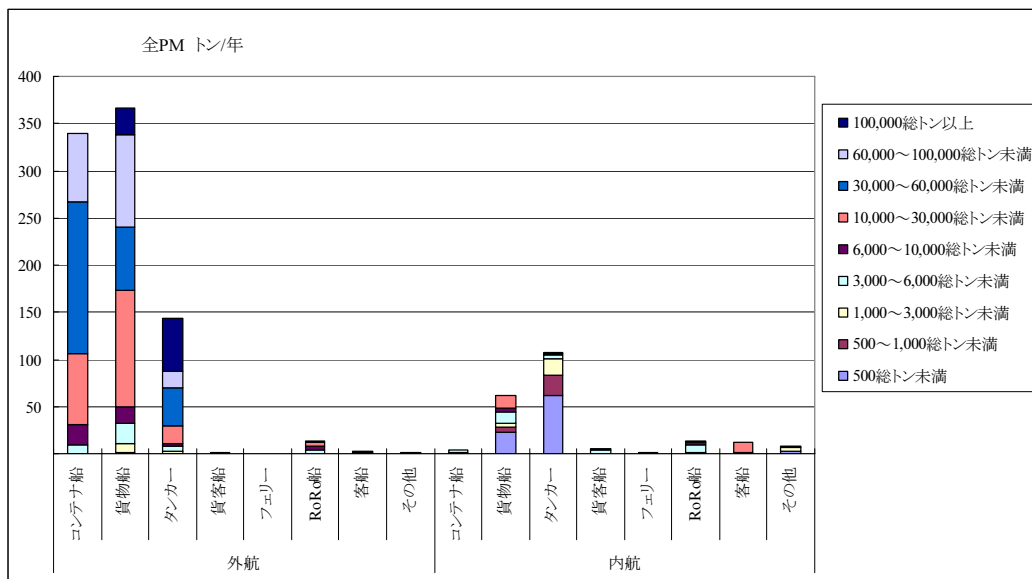
上段：係留時、中段：航行時：下段：係留+航行時



注) タグボートを除く。

図 6.2-20 東京湾内における外航内航別・船種別・トン階級別排出量

上段：係留時、中段：航行時：下段：係留+航行時



注) タグボートを除く。

図 6.2-21 東京湾内における外航内航別・船種別・トン階級別排出量

## (2) 既存排出量算定結果との比較

本調査で算定した船舶からの排出量について、日本マリンエンジニアリング学会が過去に算定した東京湾における排出量および東京都が算定した東京港における排出量との比較を行った。

東京湾における排出量の比較を表 6.2-31 および表 6.2-32 に、東京港における排出量の比較を表 6.2-33 に示す。東京湾および東京港のどちらの場合も SO<sub>2</sub> については本調査の排出量がやや少ないが、NO<sub>x</sub> および PM については本調査で高くなっている。

表 6.2-31 東京湾における既存排出量との比較

(トン/年)

年	SO <sub>2</sub>		NO <sub>x</sub>	
	本調査	既存調査	本調査	既存調査
1994 年	—	23,194	—	31,927
2000 年	21,143	22,811	35,785	30,943
2002 年	—	20,905	—	28,131

注) タグボートを除く。

出典：既存調査は「平成 16 年度船舶排出大気汚染物質削減技術検討調査報告書」(平成 17 年 3 月 (社)日本マリンエンジニアリング学会)による

表 6.2-32 東京湾における既存排出量との比較(2000 年推計値)

(千トン/年)

	SO <sub>2</sub>			NO <sub>x</sub>			PM		
	本調査	既存	本調査/ 既存	本調査	既存	本調査/ 既存	本調査	既存	本調査/ 既存
東京港	1.80	3.31	0.54	2.65	3.39	0.78	0.22	0.42	0.53
川崎港	1.13	1.81	0.62	1.74	1.95	0.89	0.14	0.25	0.54
横浜港	3.22	4.58	0.70	4.57	4.64	0.98	0.39	0.57	0.68
千葉港	1.88	2.90	0.65	3.08	3.32	0.93	0.22	0.41	0.55
木更津港	0.79	0.85	0.93	1.10	0.95	1.15	0.10	0.12	0.80
横須賀港	0.13	0.91	0.14	0.21	0.93	0.23	0.01	0.14	0.11
航行	12.19	8.63	1.41	22.45	15.76	1.42	1.55	0.34	4.58
計	21.14	22.99	0.92	35.79	30.95	1.16	2.63	2.25	1.17

注) 既存調査には港湾区域内の航行による排出量を含む。  
タグボートを除く。

出典：既存調査は「平成 16 年度船舶排出大気汚染物質削減技術検討調査報告書」(平成 17 年 3 月 (社)日本マリンエンジニアリング学会)より作成



表 6.2-33 東京港における既存排出量との比較(係留時)

(トン/年)

項目	本調査	既存調査	本調査/既存
SO <sub>2</sub>	1,802	1,898	0.95
NO <sub>x</sub>	2,645	2,086	1.27
PM	222	145	1.53

注) タグボートを除く。

既存調査は 2003 年の入港隻数ベースに算定された排出量である。

出典：既存調査は「東京港における停泊中の船舶への大気汚染対策」(東京都環境局)による

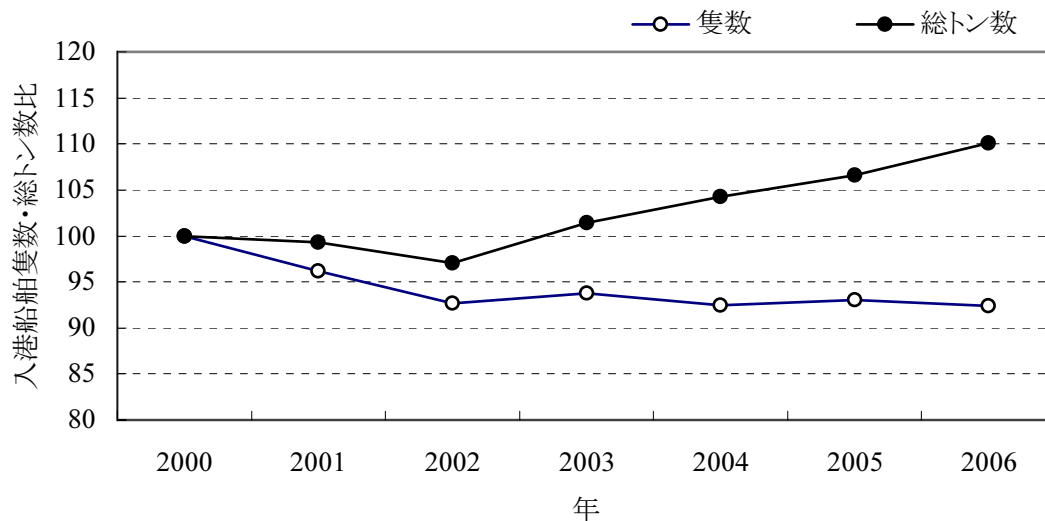
東京港における既存調査と排出係数の比較を表 6.2-34 に示す。既存調査と本調査で NO<sub>x</sub> および PM の排出量に違いがみられた原因の一つに排出係数の違いが考えられ、特に、PM の既存調査では SO<sub>4</sub> 粒子としての排出が考慮されていないため、低めの排出量になっていると思われる。

表 6.2-34 東京港における既存排出量調査との排出係数の比較(係留時)

	SO <sub>x</sub> 排出係数	NO <sub>x</sub> 排出係数	PM 排出係数
本調査	燃料中硫黄分 外航船 A 重油 0.5 % C 重油 2.3 %	IMO Tier1 規制式 × 1.3 倍 (対象年が規制適用前であるため、Tier1 規制値を 30% 割り増し)	4.3 g/kg-fuel (*) 「平成 16 年度船舶排出大気汚染物質削減技術検討調査」(平成 17 年度 (社)マリンエンジニアリング学会)より設定
既存調査	内航船 A 重油 0.5 % C 重油 2.7 %	$N=7.81 \times P \times A \times 0.001 + 1.45$ N : NO <sub>x</sub> 排出量(kg/時) P : 出力(PS) A : 負荷率 (東京港内係留船舶の実測により設定)	補助ディーゼル : 3 g/kg-fuel 補助ボイラー : 2 g/kg-fuel (「浮遊粒子状物質汚染予測マニュアル」(平成 9 年 環境庁)記載値)

注) \* : 東京港係留船舶について、個別に積上げた PM 排出量と燃料消費量から算出した平均値である。

なお、参考として、2000年以降の東京湾における入港船舶を図 6.2-22 に示す。2000年と比較すると、隻数は減少しているものの、総トン数はここ数年増加が続いており、近年は、船舶の大型化が進むとともに、船舶の活動量が増加していることが考えられる。



注)東京港、川崎港、横浜港、千葉港および木更津港の合計値。

図 6.2-22 東京湾における入港船舶隻数・総トン数の推移(2000年に対する増減率)

## 6.3 規制時の大気汚染物質排出量

### 6.3.1 算定ケース

MEPC57において最終化されたSO<sub>x</sub>、PMおよびNO<sub>x</sub>規制内容を表6.3-1に示す。本調査においては、この内容を踏まえて大気汚染物質排出量を算定する規制ケースを設定した。排出量の算定を行った規制ケースを表6.3-2に示す。

SO<sub>x</sub>およびPM規制の効果を検討するケースとして、燃料中硫黄分を0.5%以下に規制したケースと、0.1%以下に規制したケースを設定した。また、NO<sub>x</sub>規制の効果を検討するケースとして、現行船舶すべてがTier2規制をクリアしたケース、現行船舶すべてがTier3規制をクリアしたケース、および船舶の船齢を考慮して2020年頃と2025年頃を想定した規制混在ケースを設定した。

**表 6.3-1 MEPC57で最終化された附属書VIの改正の概要(SO<sub>x</sub>、PMおよびNO<sub>x</sub>規制)**

規制の種類	内容
SO <sub>x</sub> およびPM規制	燃料中硫黄分を規制 一般海域 2012年以降：3.50%、2020年以降：0.50% 排出規制海域 2010年以降：1.00%、2015年以降：0.10%
NO <sub>x</sub> 規制	新造船のエンジンに対する規制 2011年以降 Tier2：現行規制(Tier1)の15.5～21.8%削減(全海域で適用) 2016年以降 Tier3：現行規制(Tier1)の80%削減 (排出規制海域にのみ適用) 現存船のエンジンに対する規制 対象：1990年以降に建造された現存船のエンジンのうち、シリンダー容積90L以上かつ出力5,000kW以上 規制値：Tier1規制 時期：主管庁が規制適合手法を認証し、IMOに通報してから1年以降の最初の定期検査

**表 6.3-2 大気汚染物質排出量の算定ケース**

対象	算定ケース	本調査で設定した排出係数または設定の考え方
SO <sub>x</sub> ,PM	硫黄分0.5%規制	燃料中硫黄分0.5%以下
SO <sub>x</sub> ,PM	硫黄分0.1%規制	燃料中硫黄分0.1%以下
NO <sub>x</sub>	全船舶Tier1相当	全船舶にTier1規制を適用
NO <sub>x</sub>	全船舶Tier2相当	全船舶にTier2規制を適用(Tier1規制排出係数-2.5g/kW・時)
NO <sub>x</sub>	全船舶Tier3相当	全船舶にTier3規制を適用(Tier1規制排出係数×0.2)
NO <sub>x</sub>	2020年規制混在	2020年頃におけるpre2000(未規制)、Tier1、2、3規制混在ケース
NO <sub>x</sub>	2025年規制混在	2025年頃におけるpre2000(未規制)、Tier1、2、3規制混在ケース

注) 「全船舶Tier1相当ケース」および「2025年規制混在ケース」は総排出量を算出したのみで、メッシュごとの排出量の設定およびシミュレーション計算は行っていない。

### 6.3.2 排出係数

規制時の排出量は、現況排出量の算定に用いた算定式および算定条件に対して、排出係数を変更することにより算定した。排出量の算定に用いた燃料中の硫黄分を表 6.3-3 に、PM 排出係数を表 6.3-4 に、NOx 排出係数を図 6.3-1 に示す。

なお、本調査で設定したNOxの規制はMEPC57で最終化された規制値とはやや異なっているが、その差は小さく排出量に大きく影響しない。

表 6.3-3 燃料中の硫黄分(%)

外内	船型	現況			硫黄分 0.5%規制			硫黄分 0.1%規制		
		主機 ディーゼル	補助 ディーゼル	補助 ボイラー	主機 ディーゼル	補助 ディーゼル	補助 ボイラー	主機 ディーゼル	補助 ディーゼル	補助 ボイラー
外航	500 総トン未満	0.96	0.50	1.47	0.50	0.50	0.50	0.10	0.10	0.10
	500 ~ 1,000 総トン未満	2.41	0.50	1.86	0.50	0.50	0.50	0.10	0.10	0.10
	1,000 ~ 3,000 総トン未満	2.41	0.50	1.86	0.50	0.50	0.50	0.10	0.10	0.10
	3,000 ~ 6,000 総トン未満	2.66	1.18	2.70	0.50	0.50	0.50	0.10	0.10	0.10
	6,000 ~ 10,000 総トン未満	2.70	1.18	2.70	0.50	0.50	0.50	0.10	0.10	0.10
	10,000 ~ 30,000 総トン未満	2.70	1.80	2.70	0.50	0.50	0.50	0.10	0.10	0.10
	30,000 総トン以上	2.70	2.70	2.70	0.50	0.50	0.50	0.10	0.10	0.10
内航	500 総トン未満	0.88	0.50	1.29	0.50	0.50	0.50	0.10	0.10	0.10
	500 ~ 1,000 総トン未満	2.07	0.50	1.62	0.50	0.50	0.50	0.10	0.10	0.10
	1,000 ~ 3,000 総トン未満	2.07	0.50	1.62	0.50	0.50	0.50	0.10	0.10	0.10
	3,000 ~ 6,000 総トン未満	2.26	1.06	2.30	0.50	0.50	0.50	0.10	0.10	0.10
	6,000 ~ 10,000 総トン未満	2.30	1.06	2.30	0.50	0.50	0.50	0.10	0.10	0.10
	10,000 ~ 30,000 総トン未満	2.30	1.56	2.30	0.50	0.50	0.50	0.10	0.10	0.10
	30,000 総トン以上	2.30	2.30	2.30	0.50	0.50	0.50	0.10	0.10	0.10

注) SO<sub>2</sub>が凝縮してSO<sub>4</sub>粒子として排出される量を差し引いた値である。

表 6.3-4 規制時の PM 排出係数 (g/kg-fuel)

外内	船型	現況			硫黄分 0.5 %規制			硫黄分 0.1 %規制		
		主機 ディーゼル	補助 ディーゼル	補助 ボイラー	主機 ディーゼル	補助 ディーゼル	補助 ボイラー	主機 ディーゼル	補助 ディーゼル	補助 ボイラー
外航	500 総トン未満	2.49	1.44	2.4	1.44	1.44	2.00	0.52	0.52	1.82
	500 ~ 1,000 総トン未満	5.80	1.44	2.6	1.44	1.44	2.00	0.52	0.52	1.82
	1,000 ~ 3,000 総トン未満	5.80	1.44	2.6	1.44	1.44	2.00	0.52	0.52	1.82
	3,000 ~ 6,000 総トン未満	6.35	2.99	3.0	1.44	1.44	2.00	0.52	0.52	1.82
	6,000 ~ 10,000 総トン未満	6.45	2.99	3.0	1.44	1.44	2.00	0.52	0.52	1.82
	10,000 ~ 30,000 総トン未満	6.45	4.40	3.0	1.44	1.44	2.00	0.52	0.52	1.82
	30,000 総トン以上	6.45	6.45	3.0	1.44	1.44	2.00	0.52	0.52	1.82
内航	500 総トン未満	2.30	1.44	2.4	1.44	1.44	2.00	0.52	0.52	1.82
	500 ~ 1,000 総トン未満	5.01	1.44	2.5	1.44	1.44	2.00	0.52	0.52	1.82
	1,000 ~ 3,000 総トン未満	5.01	1.44	2.5	1.44	1.44	2.00	0.52	0.52	1.82
	3,000 ~ 6,000 総トン未満	5.46	2.71	2.8	1.44	1.44	2.00	0.52	0.52	1.82
	6,000 ~ 10,000 総トン未満	5.54	2.71	2.8	1.44	1.44	2.00	0.52	0.52	1.82
	10,000 ~ 30,000 総トン未満	5.54	3.86	2.8	1.44	1.44	2.00	0.52	0.52	1.82
	30,000 総トン以上	5.54	5.54	2.8	1.44	1.44	2.00	0.52	0.52	1.82

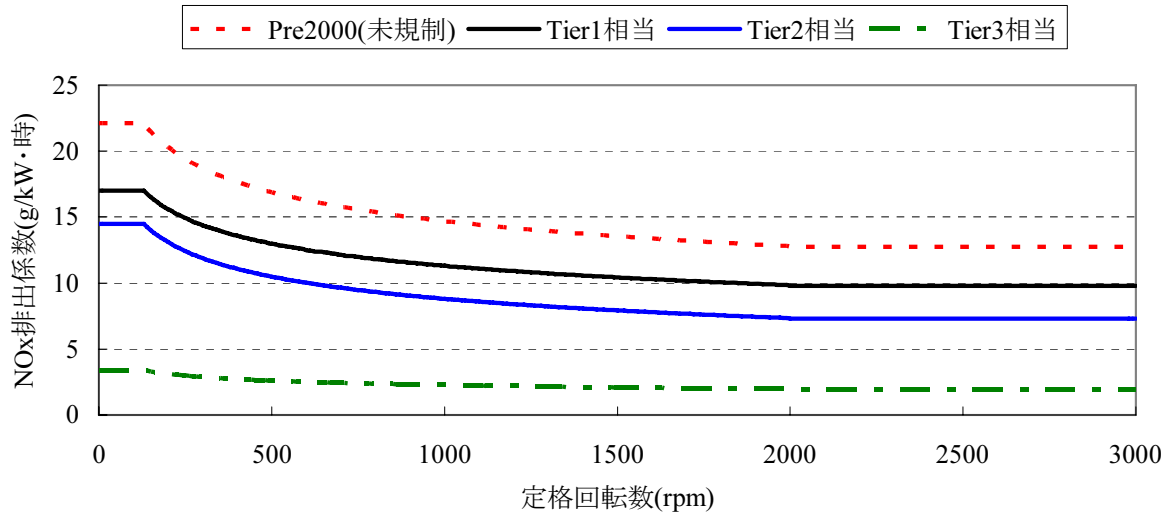


図 6.3-1 本調査で用いた NOx 排出係数

また、2020年頃および2025年頃を想定した規制混在ケースについては、船齢別の構成比と規制開始年を用いて、表 6.3-5 のとおりとした。

**表 6.3-5 規制混在ケースで想定した2020年頃および2025年頃における規制段階別構成比**

規制段階	2020年頃		2025年頃	
	対応する船齢	構成比(%)	対応する船齢	構成比(%)
Pre2000(未規制)	20年以上	26	25年以上	16
Tier1	10～20年	44	15～25年	27
Tier2	5～10年	18	10～15年	28
Tier3	0～5年	12	0～10年	30

注) 規制段階別構成比は、「船舶の大気汚染防止に係る基準に関する調査研究(MP3)(2006年度報告書)」(2007年3月財団法人日本船舶技術研究協会)を参考に設定した。

### 6.3.3 排出量算定結果

規制時の排出量算定結果は表 6.3-6 に示すとおりである。なお、燃料中の硫黄分を削減する場合、燃料の性状が変わり NOx 等の他の排出量も変化することが考えられる。また、NOx 規制を行う場合についても、特に、Tier3 については、SCR(選択式触媒脱硝)技術が想定されるため、使用燃料の性状の変化や触媒としてアンモニアを使うことなどの影響が考えられるが、今回の調査では、燃料中の硫黄分によって PM が変化することのみを考慮して排出量を算定した。

表 6.3-6 船舶からの排出量算定結果(現況・規制ケースのまとめ)

現況(2000年) (t/年)

区分	燃料	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	PM			CO	NMVOC	
				全PM	SOOT等	SO <sub>4</sub>			
東京湾内	係留時	280,414	8,953	13,338	1,082	329	753	2,075	673
	蒸発性VOC	—	—	—	—	—	—	—	9,356
	タグボート	18,468	185	1,313	27	10	17	137	44
	湾内航行	335,011	12,189	22,447	1,546	372	1,174	2,479	804
	計	633,893	21,327	37,098	2,655	711	1,944	4,691	10,877
湾外航行	834,586	35,806	63,762	4,563	993	3,570	6,176	2,003	
計	1,468,479	57,134	100,860	7,218	1,704	5,514	10,867	12,880	

規制ケース別 SO<sub>2</sub> 排出量 (t/年)

区分	現況	硫黄分0.5%	硫黄分0.1%	
東京湾内	係留時	8,953	2,620	503
	タグボート	185	185	37
	湾内航行	12,189	3,141	627
	計	21,327	5,946	1,167
	湾外航行	35,806	7,834	1,579
計	57,134	13,780	2,746	
対現況比(東京湾内)	1.00	0.28	0.05	

参考：現況の燃料中硫黄分(%)

区分	硫黄分	
東京湾内	係留時	1.6
	タグボート	0.5
	湾内航行	1.8
	計	1.7
	湾外航行	2.1
全平均	1.9	

規制ケース別 PM 排出量 (t/年)

区分	現況			硫黄分0.5%			硫黄分0.1%			
	全PM	SOOT等	SO <sub>4</sub>	全PM	SOOT等	SO <sub>4</sub>	全PM	SOOT等	SO <sub>4</sub>	
東京湾内	係留時	1,082	329	753	428	211	217	204	172	32
	タグボート	27	10	17	27	10	17	10	7	3
	湾内航行	1,546	372	1,174	491	203	288	199	156	43
	計	2,655	711	1,944	946	424	522	413	335	78
	湾外航行	4,563	993	3,570	1,210	469	740	463	352	111
計	7,218	1,704	5,514	2,155	893	1,262	876	687	189	
対現況比(東京湾内)	1.00	1.00	1.00	0.36	0.60	0.27	0.16	0.47	0.04	

規制ケース別 NO<sub>x</sub> 排出量 (t/年)

区分	現況	Tier1	Tier2	Tier3	2020年	2025年	
東京湾内	係留時	13,338	10,342	8,171	2,352	9,772	7,917
	タグボート	1,313	1,010	821	202	958	773
	湾内航行	22,447	17,301	14,145	3,577	16,424	13,295
	計	37,098	28,653	23,138	6,131	27,153	21,985
湾外航行	63,762	49,084	40,855	9,943	46,722	37,875	
計	100,860	77,736	63,993	16,074	73,875	59,860	
対現況比(東京湾内)	1.00	0.77	0.62	0.17	0.73	0.59	
対Tier1比(東京湾内)	1.29	1.00	0.81	0.21	0.95	0.77	

注)Tier1~Tier3は全船舶に各規制を適用した場合を想定したケース。

#### 6.3.4 メッシュ別排出量

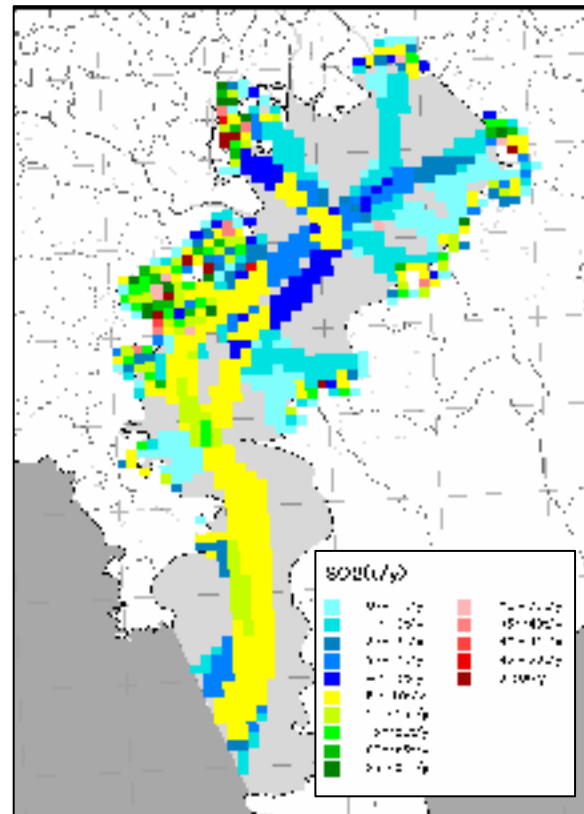
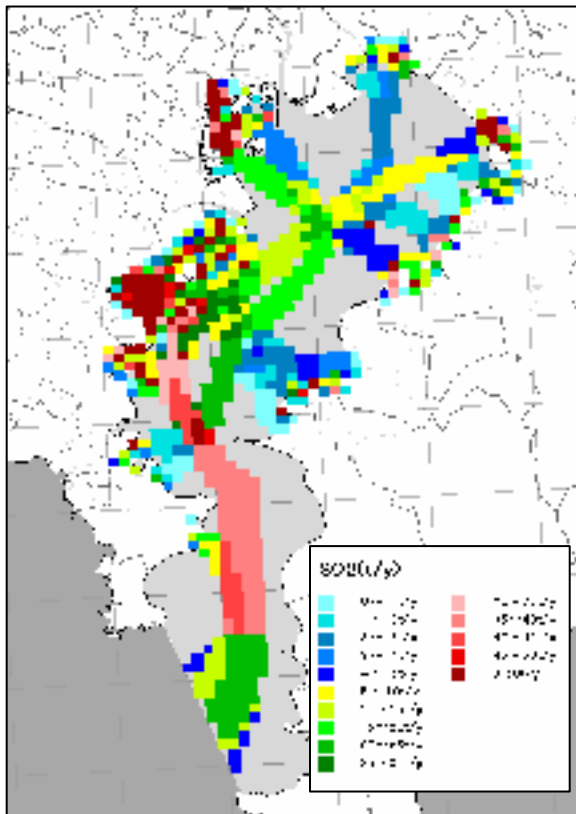
東京湾におけるメッシュ(約 1 km 格子)別排出量を図 6.3-2 に示す。



■SO<sub>2</sub>

現況

硫黄分 0.5%規制



硫黄分 0.1%規制

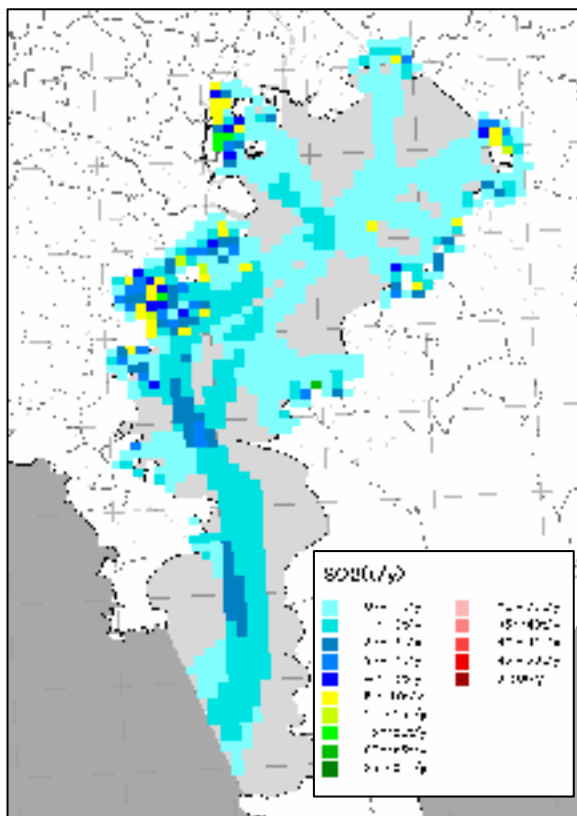
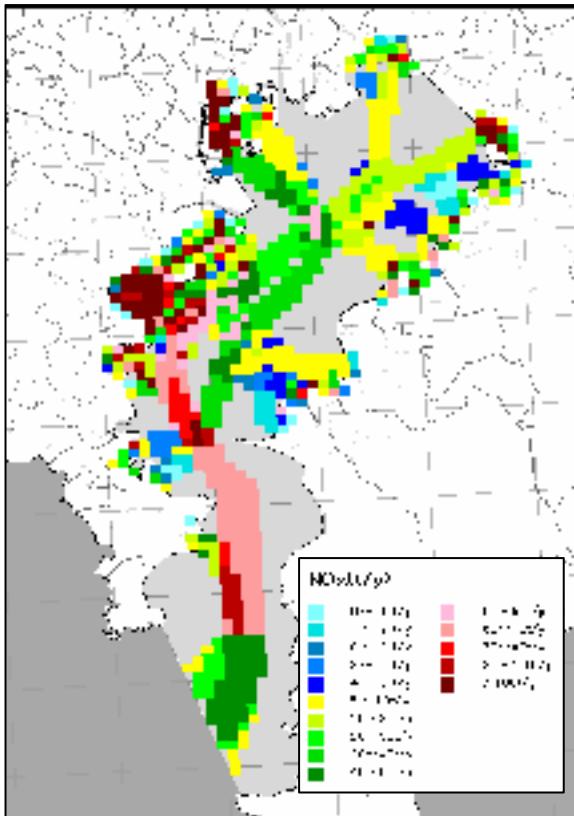


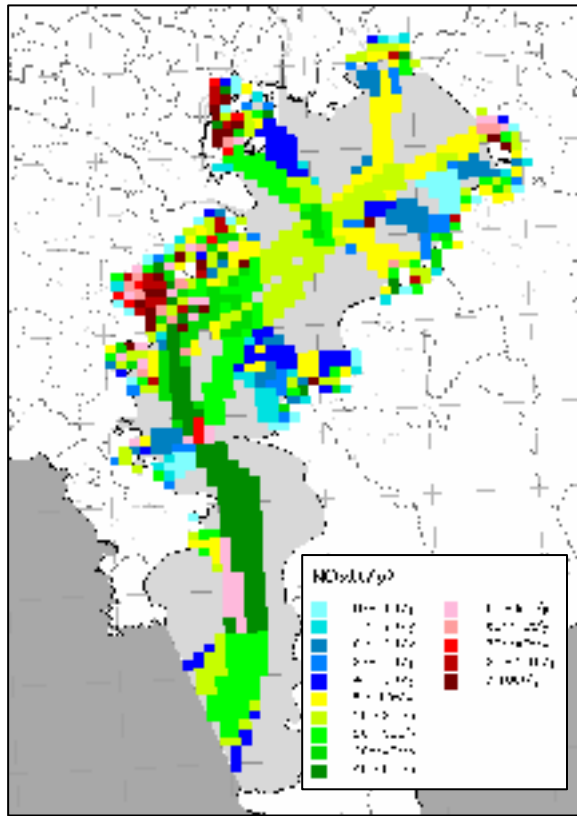
図 6.3-2(1) 東京湾メッシュ別排出量

■NOx

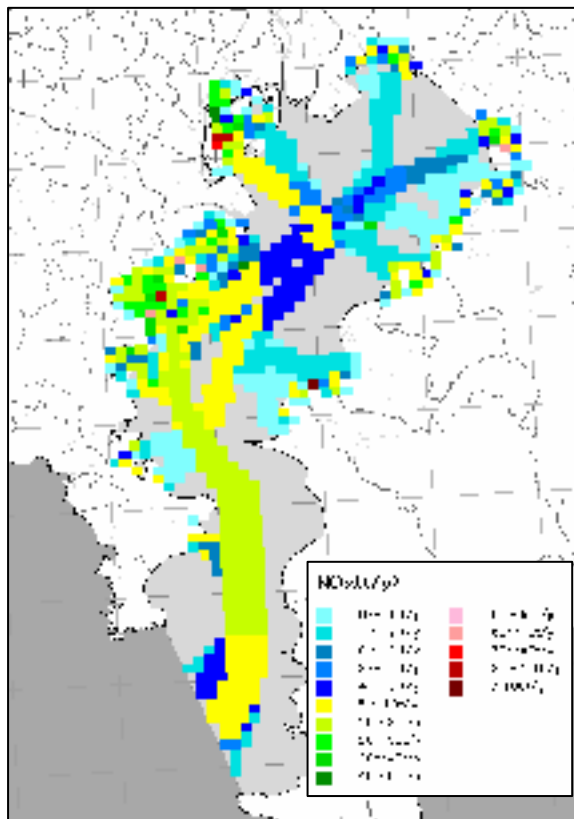
現況



全船舶 Tier2 相当



全船舶 Tier3 相当



2020年規制混在

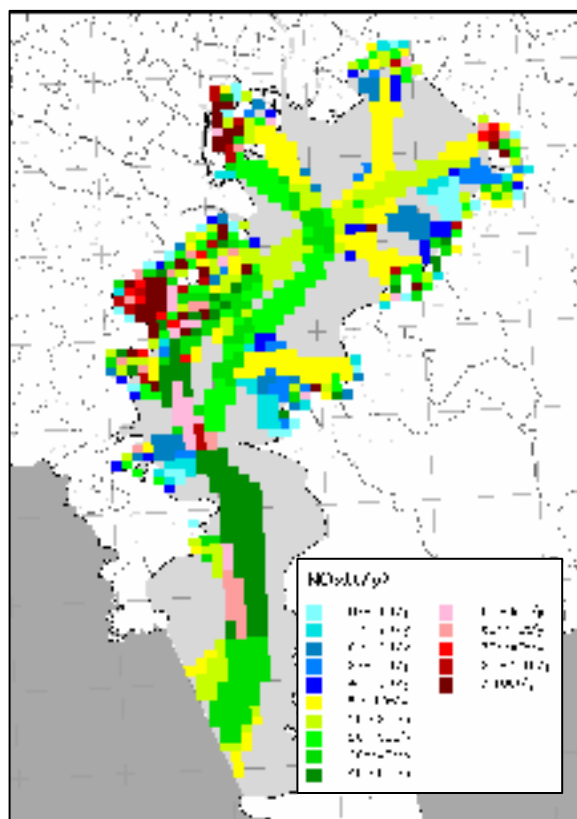
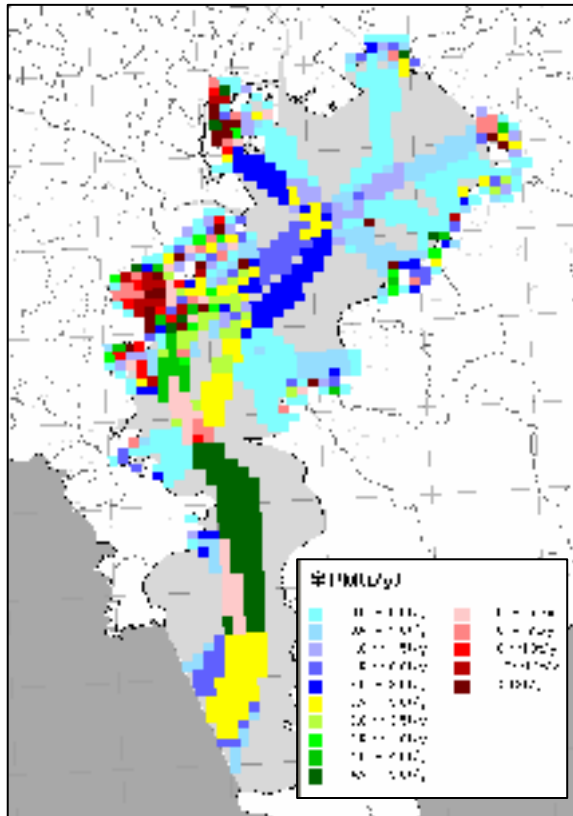


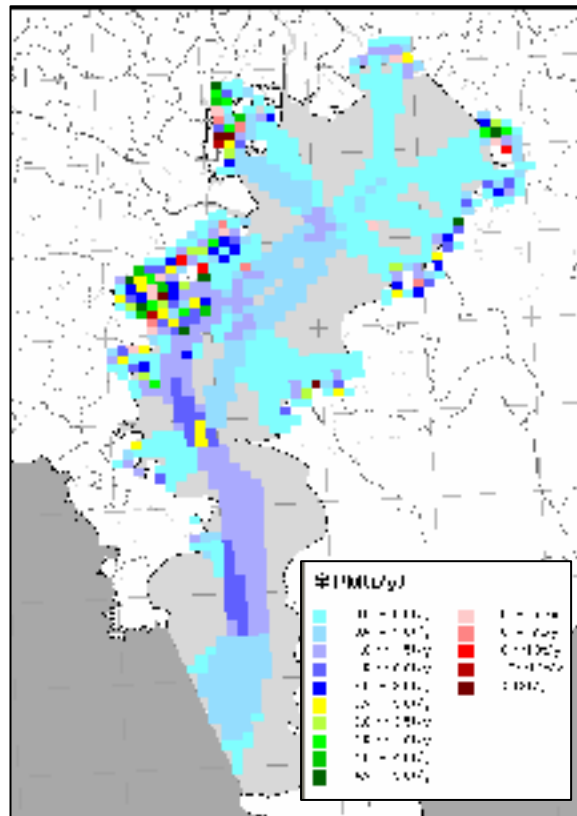
図 6.3-2 (2) 東京湾メッシュ別排出量

■全PM

現況



硫黄分 0.5%規制



硫黄分 0.1%規制

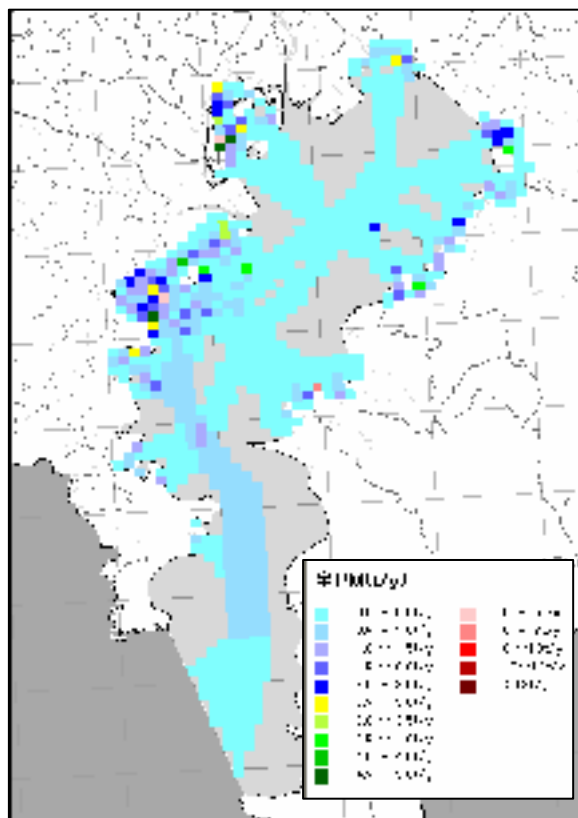
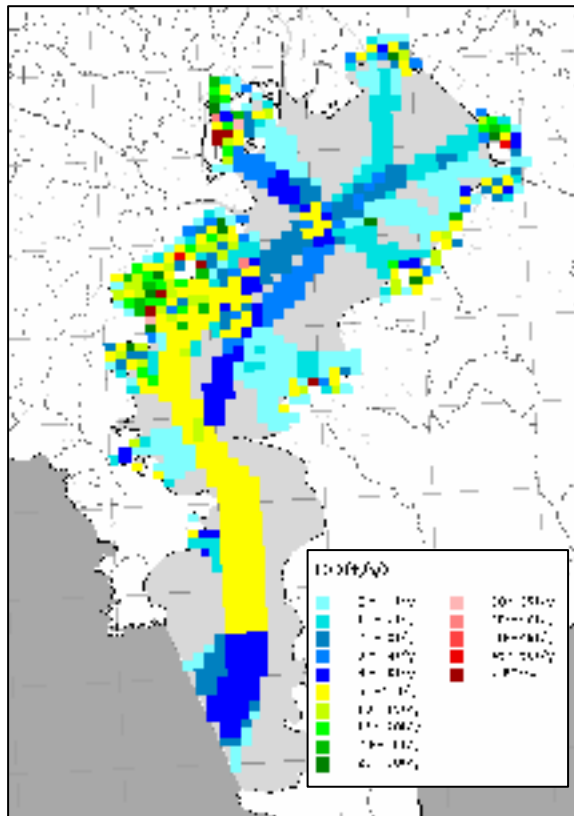


図 6.3-2 (3) 東京湾メッシュ別排出量

■CO

現況



■NMVOC

現況

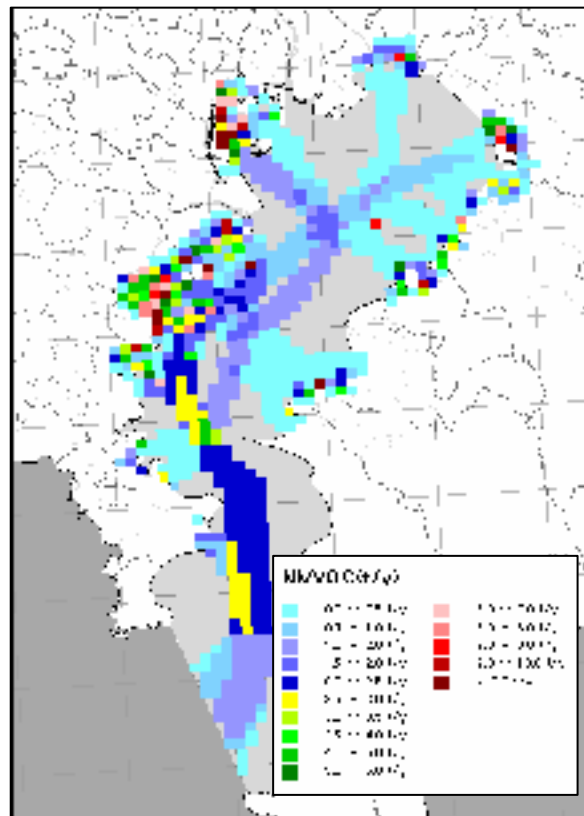


図 6.3-2 (4) 東京湾メッシュ別排出量

## 6.4 結論

### 6.4.1 排出量算定結果

本調査では東京湾の各港湾を利用する船舶を対象として、係留時および航行時に排出される大気汚染物質量を算定した。算定結果の概要は表 6.4-1 のとおりである。

- 2000 年の東京湾外を含めたシミュレーション範囲全体における船舶からの排出量は SO<sub>2</sub> が約 57,000 t、NO<sub>x</sub> が約 101,000 t、PM が約 7,000 t 等であり、陸上発生源を含めた関東エリアの排出量のそれぞれ約 31 %、約 16 %、約 14 %を占め、SO<sub>2</sub> の寄与率が高い。なお、東京湾内における排出量は SO<sub>2</sub> が約 21,000 t、NO<sub>x</sub> が約 37,000 t、PM(SO<sub>4</sub> 粒子を含む)が約 2,600 t 等である。
- MEPC 57 において最終化された燃料中硫黄分の削減による SO<sub>2</sub> および PM に対する規制、ならびに新造船を対象にした NO<sub>x</sub> 規制が内航船にも適用された場合を想定して、IMO 規制による削減量を推定した。
- SO<sub>2</sub> 排出量については、燃料中硫黄分を 0.5 %以下とした場合(一般海域における 2020 年以降の規制に相当)、SO<sub>2</sub> は 72 %、PM(SO<sub>4</sub> 粒子を含む)は 64 %が削減される。さらに、0.1 %以下に規制した場合(排出規制海域における 2015 年以降の規制に相当)、SO<sub>2</sub> は 95 %、PM(SO<sub>4</sub> 粒子を含む)は 84 %が削減されると推計された。
- NO<sub>x</sub> 排出量については、新たな規制において定められた NO<sub>x</sub> の削減率は、Tier1 で 23 %、Tier2(2016 年以降の規制に相当)で 38 %、Tier3(排出規制海域における 2016 年以降の建造船に適用)で 83 %であり、各規制の混在率を考慮した 2020 年には 27 %、2025 年には 41 %が削減されると推計された。なお、MEPC57 においては大型の現存船についても NO<sub>x</sub> 規制が導入されることが盛り込まれたため、今回推計した 2020 年および 2025 年の NO<sub>x</sub> 排出量よりもさらに削減されることが期待できる。
- 規制による PM および NO<sub>x</sub> 排出量の削減効果について自動車との比較を図 6.4-1 に示す。ここで、自動車の排出量は「東京都自動車排出窒素酸化物及び自動車排出粒子状物質総量削減計画」による排出量を記載した。船舶は陸上発生源と比較して排出ガス規制がゆるく、特に PM は従来未規制であった。しかし、今回、MEPC57 により最終化された附属書 VI の改正による燃料中硫黄分の削減により、PM の排出量についても削減が進むものと期待される。

表 6.4-1 船舶からの排出量算定結果(まとめ)

現況(2000年) (t/年)

区分	燃料	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	PM			CO	NMVOC
				全PM	SOOT等	SO <sub>4</sub>		
東京湾内	633,893	21,327	37,098	2,655	711	1,944	4,691	10,877
湾外航行	834,586	35,806	63,762	4,563	993	3,570	6,176	2,003
計	1,468,479	57,134	100,860	7,218	1,704	5,514	10,867	12,880

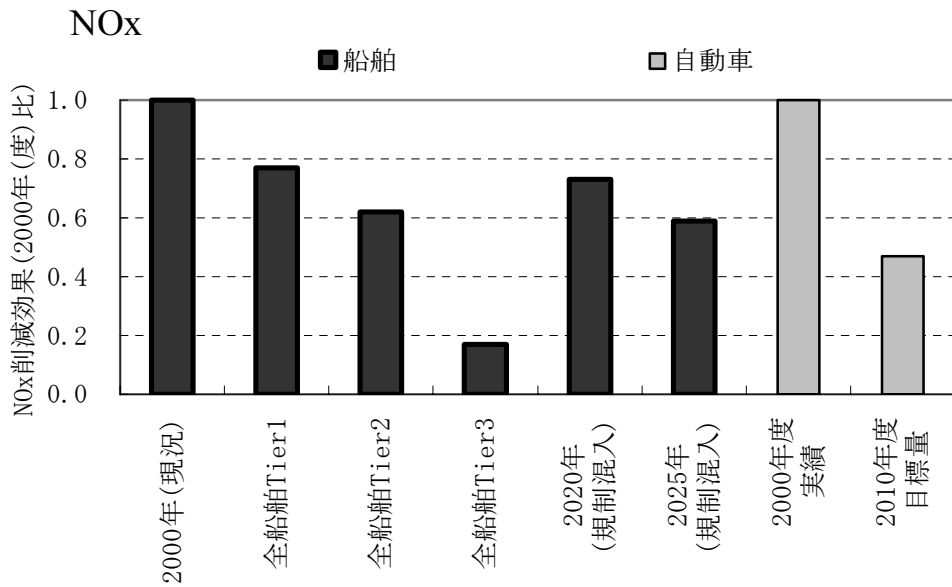
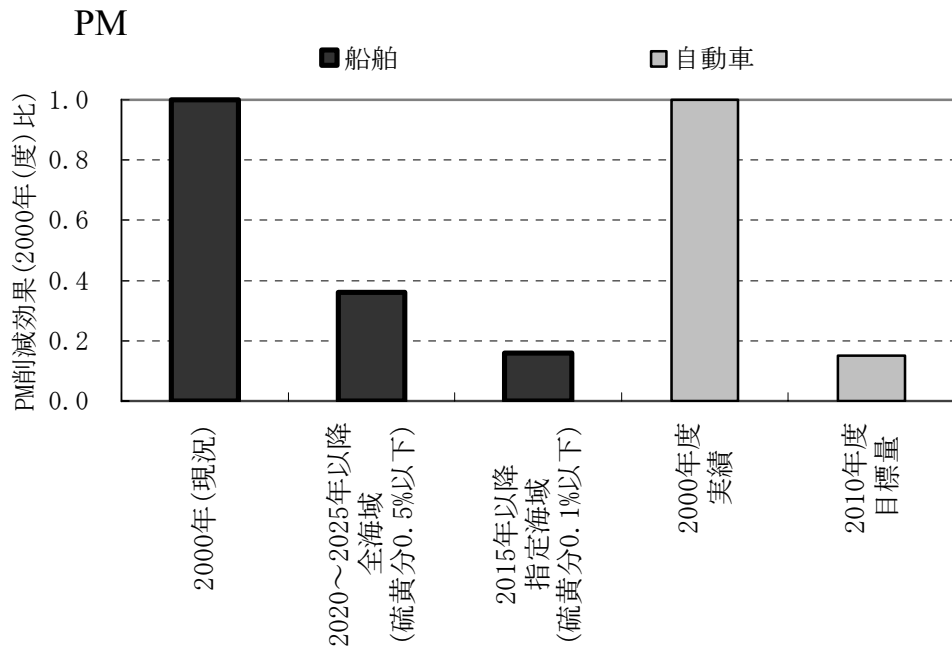
燃料中硫黄分の規制による排出量削減効果 (t/年)

区分	SO <sub>2</sub>			全PM(SO <sub>4</sub> 粒子を含む)		
	現況	硫黄分	硫黄分	現況	硫黄分	硫黄分
		0.5%	0.1%		0.5%	0.1%
東京湾内	21,327	5,946	1,167	2,655	946	413
湾外航行	35,806	7,834	1,579	4,563	1,210	463
計	57,134	13,780	2,746	7,218	2,155	876
対現況比(東京湾内)	-	0.28	0.05	-	0.36	0.16

NO<sub>x</sub> 規制による排出量削減効果 (t/年)

区分	現況	Tier1	Tier2	Tier3	2020年	2025年
東京湾内	37,098	28,653	23,138	6,131	27,153	21,985
湾外航行	63,762	49,084	40,855	9,943	46,722	37,875
計	100,860	77,736	63,993	16,074	73,875	59,860
対現況比(東京湾内)	1.00	0.77	0.62	0.17	0.73	0.59
対Tier1比(東京湾内)	1.29	1.00	0.81	0.21	0.95	0.77

注)Tier1~Tier3 は全船舶に各規制を適用した場合を想定したケース



注) 自動車の排出量は「東京都自動車排出窒素酸化物及び自動車排出粒子状物質総量削減計画」による。

図 6.4-1 規制による PM および NOx 排出量の削減効果(自動車との比較)

## 6.4.2 排出量算定における留意事項等

船舶排出ガス量の推定・算定精度には、以下のような様々な基礎データや原単位等の精度が関係する。

- ① 船舶の隻数、総トン数、係留時間(荷役時間、非荷役時間)
- ② 船舶搭載機関の出力等を推定するための原単位式
- ③ 燃料、汚染物質の排出係数
- ④ 機関負荷率、航行時間
- ⑤ 排出位置、排出量の時間変動、月変動

本調査では排出量の推定・算定精度の向上とともに、大気シミュレーションの計算条件とするため排出量の空間的な分布や時間変動を反映できるよう以下の点に留意した。また、算定方法等については、具体的に記述し、他の地域でも活用できるマニュアルとして整備した。

- ① 係留施設ごとの係留時間の違いを反映
  - ・ 港湾管理者、信号通信社のデータを用いることにより、係留施設別の係留隻数や係留時間等を推定した。
- ② 係留時間の長短を考慮した荷役時間比の設定
  - ・ 係留時間の長短によって荷役時間比は変化すると考え、係留時間の長短によって荷役と非荷役の比率を変化させる方法を採用した。荷役時間比を一定とする方法と比較すると、より実態に近いと考えられる。
- ③ 燃料中の硫黄分を考慮したPMの排出係数の設定
  - ・ 船舶排出ガスには多くの硫黄分が含まれる実態を踏まえ、PMについてはSO<sub>4</sub>粒子として排出される量を設定した。
- ④ IMO規制式をベースとしたNO<sub>x</sub>排出係数の設定
  - ・ IMO規制によるNO<sub>x</sub>削減効果を評価できるよう、IMO規制式をベースに排出係数を設定した。
- ⑤ 船種ごとの機関負荷率の設定
  - ・ 係留時については船種ごとに、荷役の実態等を考慮して負荷率を設定した。
  - ・ 航行時については、航行速度と機関負荷率の関係式から航行時の機関負荷率を設定した。これにより、東京湾内では航行速度により負荷率が低く、東京湾外ではほぼフルスピードで航行する実態を反映することができた。
- ⑥ GIS(地理情報システム)の活用による排出量の地理的配分
  - ・ GIS(地理情報システム)を活用して、係留位置、航路位置を地理的に配置し、1 km 格子ごとの排出量を設定した。
- ⑦ 排出量の時間変動を考慮
  - ・ 航行時については係留時間、航行時については入港・出港時間を考慮して、排出量の時間配分を設定した。

排出量の精度をさらに高めるためには、PM 排出係数に関するデータの蓄積、補助ボイラーの



排出実態の把握、燃料消費量の実態把握および個々の船舶の活動量の把握など以下の点について、一層のデータの蓄積・把握が必要である。

① PM 排出係数に関するデータの蓄積

- ・ 本調査では、マリンエンジニアリング学会の報告書を基に、燃料中の硫黄分に応じた PM の排出係数を設定した。燃料中の硫黄分と PM 排出量の関係は、硫黄分以外に、燃料の製造方法(蒸留油と残渣油の混合のされ方など)などによって異なると考えられるため、燃料中の硫黄分と PM 排出係数に関するデータが蓄積されることが望まれる。

② 補助ボイラーの排出実態の把握

- ・ 従来の算定方法には、補助ボイラーの排出量を過大に見積もる傾向がある。補助ボイラーに関しては、ボイラーの容量、燃料消費率、排出係数、稼働率等に関するデータが少ない。ディーゼル機関に対する規制強化により、今後、船舶全体の排出量に補助ボイラーが占める割合が相対的に高まると予想されることから、補助ボイラーからの排出量をより正確に算定するための情報の蓄積が望まれる。

③ 燃料消費量の実態把握

- ・ 本調査では総トン数と機関、機関と燃料消費率の関係式を用いて、燃料消費量を推計した。これら関係式は、統計的な手法により作成されたものであり、平均的な燃料消費量を算定するには適当な手法といえるが、個々の船舶による違い等は考慮されていない。燃料消費量は SO<sub>2</sub>、PM 等の排出量のベースとなるものであることから、ヒアリング、アンケート等により、燃料消費量のより正確な把握を行うことが望ましい。

④ 個々の船舶の活動量の把握

- ・ 本調査では、個々の船舶ごとの情報を入手できなかったため、係留施設やふ頭ごとに集計された情報を用いた。港湾管理者は少なくとも公共ふ頭については個々の船舶ごとの着岸、離岸時間を把握しており、これらの情報が管理者から開示されれば、より正確な活動量を設定できる。

## 7. 港湾域における PM の調査解析

### 7.1 調査目的

本調査では、平成 18 年度調査と同様に、大気中 PM および船舶排気 PM の採取・分析を行うとともに、PM および SO<sub>4</sub> の毎時連続測定による調査などを実施し、港湾周辺における船舶起源の PM の環境影響の実態を把握した。

また、本調査結果を基に、CMB 法による寄与率の推定、連続測定データの解析(風向・風速、ガス状物質濃度との関連性等)等により、港湾周辺における船舶起源の一次粒子および二次粒子の影響の程度について検討を行った。

### 7.2 調査の構成

- ・ 大気中 PM 調査
- ・ 船舶排気 PM 調査

### 7.3 大気中 PM 調査結果

#### 7.3.1 調査内容

PM<sub>2.5</sub> 質量濃度(1 時間値の自動観測)

SO<sub>4</sub> 濃度(1 時間値の自動観測)

PM<sub>2.5</sub> 成分分析(質量濃度、炭素、イオン、金属成分の各昼夜別濃度のバッチ観測)

#### 7.3.2 調査時期

2007 年 7 月 25 日 10 時～8 月 1 日-9 時(連続 7 日間)

#### 7.3.3 調査地点

調査は東京都が船舶排ガスの影響を調査することを目的に、臨時で測定器を設置している測定点の地点配置などを踏まえ、以下の 2 地点で行った。

調査地点の位置を図 7.3-1 に示す。

St.A 中央防波堤外側埋立地(東京都臨時測定地点と同一地点)

St.B 船の科学館近傍(東京都臨時測定地点「青海南埠頭公園」から北西約 850 m)



東京都臨時測定地点の概要

番号	名称	所在地	備考
1	中央防波堤外側埋立地	江東区青海2丁目地先	東京港湾域におけるバックグラウンド地点として位置づけられる
2	コンテナ埠頭公園	品川区八潮2丁目	品川航路の影響および周辺コンテナふ頭からの影響が想定されている
3	青海南埠頭公園	江東区青海2丁目	同上
4	東京ビッグサイト	江東区有明3丁目	周辺フェリーふ頭からの影響が想定されている

東京都常時監視測定局における測定項目

測定局名称	項目(○:測定)												
	SO <sub>2</sub>	NO	NO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	O <sub>3</sub>	NMHC	CH <sub>4</sub>	THC	SPM	風向	風速	気温	湿度
中央区晴海	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
港区台場	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
品川区八潮	○	×	×	×	○	×	×	×	○	○	○	○	○

図 7.3-1 調査地点の位置

### 7.3.4 PM<sub>2.5</sub>濃度およびSO<sub>4</sub>濃度の測定方法

PM<sub>2.5</sub>質量濃度およびSO<sub>4</sub>濃度の測定方法を表 7.3-1 に示す。

表 7.3-1 PM<sub>2.5</sub>質量濃度およびSO<sub>4</sub>濃度の測定方法(自動測定)

項目	型式	測定機	備考
PM <sub>2.5</sub> 質量濃度 (1 時間値)	TEOM1400a (TEOM(SES))	TEOM 社製パーティキュレイトモニター 測定原理：固有の振動数で振動している円錐状の秤量素子の先端にフィルターが取り付けられ、フィルター上に捕集された PM の質量の増加に伴い、素子の振動周波数が減少する原理を用いた測定法。 TEOM1400a(TEOM(SES))は、従来の TEOM1400 に除湿と調温機能を備えた SES(Sample Equilibration System)が組み込まれている。	本調査ではセンサー部等の温度を 30℃に設定した。
SO <sub>4</sub> 濃度 (1 時間値)	8400S 5020SPA	R&P 社製 大気用サルフェイトモニター 測定原理：SO <sub>4</sub> 粒子を蒸発・分解し SO <sub>2</sub> に変換させた後、紫外線パルス蛍光法で SO <sub>2</sub> を分析する。	

#### (1) 測定方法

##### (a) PM<sub>2.5</sub>質量濃度

PM<sub>2.5</sub> 質量濃度の自動測定方法としては、TEOM、BAM(β線吸収法)および光散乱式自動測定機を用いる方法が実用・商品化されている。これらの自動測定機と PM<sub>2.5</sub> の標準測定法である FRM(秤量法)との比較は表 7.3-2 に示すように、いずれも傾きは“1”とはならず、測定値には偏りがみられるものの、本調査を実施する夏季については TEOM が最も 1 に近い。そこで、本調査では PM<sub>2.5</sub> 質量濃度の自動測定方法として TEOM を採用した。

また、表 7.3-2 によると TEOM は冬季には傾き 0.88 と RFM に比べ低めの値となっている。これは、比較に用いられた従来型の TEOM では、センサー部等の温度が 50℃に設定されているため、気温が低く、装置内との温度差が大きい冬季には、加温によって揮発性・半揮発性物質が揮散して質量が減少したためと考えられている。本調査は夏季に測定するため揮散の影響は小さいと考えられる。しかし、測定時の気温によっては揮散の影響が生じる可能性もあるため、本調査では表 7.3 1 に示したように、加温による揮散の影響を抑制できる TEOM1400a(TEOM(SES))を用いて測定を行った。

表 7.3-2 FRM と PM<sub>2.5</sub> 自動測定機による PM<sub>2.5</sub> 質量濃度の相関比較

基準測定機	測定機器	2000 年夏季(n=20)		2000 年冬季(n=20)	
		回帰式の傾き	相関係数	回帰式の傾き	相関係数
FRM	TEOM	1.04	0.98	0.88	0.98
	BAM	1.27	0.98	1.14	0.98
	光散乱式	1.32	0.97	0.79	0.87

出典：根津、坂本：大気中微小粒子(PM<sub>2.5</sub>)質量濃度の測定、大気環境学会誌、37、1(2002)

## (b) SO<sub>4</sub>濃度

平成 18 年度に実施した大気中 PM 調査および船舶排気 PM 調査によると、SO<sub>4</sub>が PM<sub>2.5</sub>中に占める割合は高く(大気濃度で 30 %前後、排気 PM 中で 40 %弱)、SO<sub>4</sub>は大気中および船舶排気中ともに PM<sub>2.5</sub>の主要な成分となっていた。船舶は硫黄を多く含む重油を燃料としているため、船舶から排出される SO<sub>2</sub>が環境大気中で酸化されて生成する SO<sub>4</sub>粒子や、船舶から直接排出される SO<sub>4</sub>粒子が港湾域の SO<sub>4</sub>濃度に寄与している可能性が考えられる。このため、本調査では PM<sub>2.5</sub>質量濃度の測定と同時に、SO<sub>4</sub>濃度の 1 時間値の測定を実施した。

### 7.3.5 PM<sub>2.5</sub>成分分析

#### (1) 測定方法

PM<sub>2.5</sub> サンプラーを用いて大気環境中の PM<sub>2.5</sub>を採取し、質量濃度および成分別濃度を調査した。サンプリング期間は連続 7 日間とし、12 時間ごとにフィルター交換を行った。

測定項目、サンプリングに用いたサンプラーおよびフィルターを表 7.3-3 に示す。本調査では PM-2.5 サンプラーを 1 地点につき 2 台設置し、それぞれ石英フィルターとテフロンフィルターに成分分析用の試料を採取した。

表 7.3-3 測定項目、サンプリングに用いたサンプラー、フィルター

測定項目	PM <sub>2.5</sub> サンプラー	フィルター
質量濃度	型式：FRM-2000 (2 台/地点) 吸引流量：16.7 L/min フィルター径：47 φ mm カット特性：2.5 μm(50 %カット)	石英(炭素成分、イオン成分測定用)
炭素成分		テフロン(質量濃度、金属成分測定用)
イオン成分		
金属類		

#### (2) 測定期間・時期

1 週間(7 日間連続)とし、1 日 2 回のフィルター交換を行った。

フィルターの交換時間帯については、海陸風が変化する時間帯等を考慮して、9~10 時と 21~22 時に行った。フィルターに採取された粒子のうち揮発性の高い一部成分が再度気化してフィルター上から失われることがあると言われていたが、本年度調査ではフィルターの交換間隔を、平成 18 年度の 24 時間毎から 12 時間毎に変更し、揮散による誤差影響を少なくした。

#### (3) 成分分析項目

大気中 PM<sub>2.5</sub>試料の分析項目は次のとおりである。

- ・ 質量濃度
- ・ 炭素成分：EC(Elemental Carbon;元素状炭素)、OC(Organic Carbon;有機炭素)
- ・ 無機成分：イオン SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>(硫酸イオン)、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>(硝酸イオン)、Cl<sup>-</sup>(塩素イオン)、Na<sup>+</sup>(ナトリウムイオン)、Ca<sup>2+</sup>(カルシウムイオン)、K<sup>+</sup>(カリウムイオン)、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>(アンモニウムイオン)
- 金属類 Na(ナトリウム)、Al(アルミニウム)、K(カリウム)、Ca(カルシウム)、

V(バナジウム)、Mn(マンガン)、Fe(鉄)、Zn(亜鉛)、Se(セレン)、Ni(ニッケル)、As(ヒ素)、W(タングステン)

なお、サンプリングは7日間実施し、その中から、PM<sub>2.5</sub>質量濃度およびSO<sub>4</sub>濃度が比較的高い日の試料を4検体(2日間×昼・夜)選定し、成分分析に供した。

#### (4) 測定・分析方法

PM<sub>2.5</sub>の質量濃度の測定は、「大気中微小粒子状物質(PM<sub>2.5</sub>)質量濃度測定方法暫定マニュアル」(環境庁大気保全局企画課、平成12年9月)に準拠して行った。炭素成分はIMPROVE法(熱分離光学補正法)、イオン成分はイオンクロマトグラフ法、金属成分はICP-MS法によった。

なお、「大気中微小粒子状物質(PM<sub>2.5</sub>)質量濃度測定方法暫定マニュアル」では、フィルターの秤量については温度20～23℃、相対湿度50±5%の状態に24時間以上放置した後に行うこと、また、PM<sub>2.5</sub>捕集後のフィルターは秤量まで冷暗所(長期保管の場合は4℃以下)に保管することが規定されている。本調査ではフィルターの秤量においては、平成18年度と同様に上記マニュアルに従って温度・湿度管理を行った。また、PM<sub>2.5</sub>捕集後のフィルターの保管については、平成18年度はマニュアルに従い冷蔵保管(4℃以下)としたが、平成19年度は保管中の変質をより小さくするため、冷凍保管(約-35℃)とした。

#### (5) 精度管理

PMのサンプリング、秤量および成分分析に際しては、測定誤差をできるだけ小さくするため、次のとおり精度管理を実施した。

##### (a) フィルターの選定

フィルターは、捕集効率、圧力損失、吸湿性、帯電性などの性能を考慮して以下を選定した。

石英フィルター：

東京ダイレック株式会社 PALLFLEX PRODUCT CORP. 2500QAT-UP 径47mm

テフロンフィルター：

Whatman Inc. 2um PTFE 46.2 mm Filter PP Ring Supported For PM 2.5

##### (b) 捕集前フィルターの準備(捕集前秤量)

- ・ フィルターを温度20～23℃、相対湿度50±5%で24時間以上放置した後、秤量した。同様の操作を24時間後に行い、1回目と2回目で秤量値に大きな違いの無いことを確認の上、測定に用いた。
- ・ 捕集前秤量後はフィルターを清浄な容器内に密閉し、冷凍にて保管した。
- ・ フィルターのナンバリングは、成分分析に影響しないよう容器に行った。

##### (c) フィルターホルダへのフィルターの装着

- ・ 装着の前にフィルターホルダのフィルターと接触する部分や、大気が通過する部分の周辺をメタノール等により洗浄し、洗浄に用いたメタノール等を完全に除去した後、フィルターを装着した。
- ・ フィルターを取扱う際は、ピンセットを使用するなど、直接、手で触れないようにした。

#### (d) PM の捕集

- ・ PM<sub>2.5</sub> サンプラー装置のマニュアルに従い、装置外部への空気漏れ等が無いことを確認の上、捕集を開始した。
- ・ 1日当たりの捕集時間は約 12 時間とし、フィルター交換は毎日ほぼ同じ時刻に行った。

#### (e) 捕集後のフィルターの回収

- ・ 捕集後のフィルターについては、ピンセットを使用するなど、直接、手で触れないように取り外し、フィルター回収時に試料空気の漏れがないことを確認の上、捕集後の変質による値のばらつきをできるだけ少なくするため、清浄な収納容器に保管し、外気から密封した後に遮光した。
- ・ 収納容器は冷暗所にてその日のうちに分析室に搬入し、分析室において冷凍保管した。

#### (f) 捕集後のフィルターの秤量

- ・ 捕集後のフィルターは捕集前と同一の条件で秤量した。
- ・ 秤量後のフィルターは密封・遮光して 4℃以下に保管し、2 週間以内に分析用試料の抽出を行った。

#### (g) 成分分析

平成 18 年度調査では、カルシウムなど同一成分について、石英フィルターに捕集してイオンクロマトグラフ法により測定した値と、テフロンフィルターに捕集して ICP-MS 法により測定した値が整合しないことがみられた。両者が一致しない理由として、フィルター上に捕集された試料そのものの成分濃度が異なることや、分析方法による違いが考えられる。このため、平成 19 年度においては、測定精度を高めるため、分析機関における自主検討として予備測定を行い、イオンクロマトグラフ法と ICP-MS 法による測定値の整合性を確認した上で、調査を行った。

以上の精度管理を徹底して実施したことにより、フィルターの運搬や装着、保管時における水分の吸収等による質量変化の影響を少なくすることができ、ブランク試験(PM を捕集していない状態での試験)ではフィルター重量の変化は 5~7 µg 程度と PM の秤量値と比べて十分に小さく、精度よい秤量を行うことができた。

また、平成 18 年度はフィルターに捕集されたイオン成分の揮散(蒸発)や、吸湿性成分への水分の結合による誤差が大きかった可能性が考えられたが、今年度は精度管理の徹底とサンプリング時間を 24 時間から 12 時間に短くしたことにより、フィルター上で変質しやすいイオン成分を平成 18 年度に比べ精度よく測定することができた。一例として、平成 18 年度調査と平成 19 年度調査の硝酸イオン構成比の比較を表 7.3-4 に示す。硝酸イオンは気温等の条件により粒子態とガス態に変化しやすく、平成 18 年度調査では硝酸イオンの割合は 0.6~1.1%とごく少なかった。一方、平成 19 年度調査では昼間は 0.2~1.0%と平成 18 年度と同様であったが、夜間は 10.4~20.7%と高い割合で測定され、夜間の低温時に硝酸イオンが実際に存在していることを示している。その結果、硝酸イオンの割合は日平均で 6.8~12.5%となり、平成 18 年度の 0.6~1.1%を大きく上回る結果となり、フィルター交換回数の倍増により日中の揮散の影響を小さくすることができた。

表 7.3-4 平成 18 年度調査と平成 19 年度調査の硝酸イオン構成比の比較

【平成 18 年度調査】

項目	時間区分	大黒海づり公園		中区加曾台	
		1 回目	2 回目	1 回目	2 回目
質量濃度( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	日平均	39.3	42.4	38.3	37.9
硝酸イオン( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	日平均	0.43	0.26	0.31	0.26
硝酸イオン構成比(%)	日平均	1.1	0.6	0.8	0.7

【平成 19 年度調査】

項目	時間区分	St.A		St.B	
		1 回目	2 回目	1 回目	2 回目
質量濃度( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	昼間	56	40	59	43
	夜間	83	56	59	54
	日平均	70	48	59	49
硝酸イオン( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	昼間	0.2	0.3	0.9	1.0
	夜間	17.2	8.0	7.9	5.6
	日平均	8.7	4.2	4.4	3.3
硝酸イオン構成比(%)	昼間	0.4	0.8	1.5	2.3
	夜間	20.7	14.3	13.4	10.4
	日平均	12.5	8.6	7.5	6.8



### 7.3.6 調査期間中の気象状況

#### (1) 概況

調査期間中の東京管区気象台および新木場における天候・降水量等の観測値を表 7.3-5 に、調査期間中の天気図を図 7.3-2 に示す。

7月28日までは晴れもしくは曇、日照時間は2~9時間/日であり、周辺のアメダスデータによるといずれも降水量は0mmであった。7月29日以降、天候がくずれ、30日にはまとまった降雨が観測されている。

なお、7月26日、27日は横浜市および川崎市で、29日は横浜市で光化学スモッグ注意報が発令されていた(同年夏季においては、7月には横浜市で4回、川崎市で2回、8月には横浜市で5回、川崎市で8回の注意報が発令された)。

表 7.3-5 調査期間中の天候・降水量

【東京管区気象台における観測結果】

日	気温(°C)			湿度(%)		日照時間(h)	天気概況	
	平均	最高	最低	平均	最小		(06:00-18:00)	(18:00-翌日06:00)
7/25	26.2	30.8	22.4	68	46	8.9	晴一時曇	晴後一時曇
<b>7/26</b>	<b>27.8</b>	<b>32</b>	<b>24.9</b>	<b>68</b>	<b>52</b>	<b>3.3</b>	<b>曇時々晴一時雨</b>	<b>曇</b>
7/27	28.8	32.7	26.1	64	45	8.2	晴一時曇	晴後一時曇
<b>7/28</b>	<b>28.7</b>	<b>32.3</b>	<b>25.6</b>	<b>66</b>	<b>55</b>	<b>8.6</b>	<b>晴後一時曇</b>	<b>晴時々曇</b>
7/29	27.1	31.6	22.8	73	55	2.0	曇後一時雨、雷を伴う	雨後曇、雷を伴う
7/30	22.4	24.6	19.8	80	67	0.3	曇時々雨、雷を伴う	曇時々大雨、雷を伴う
7/31	23.6	27	19.5	74	59	3.2	曇後一時晴	晴一時曇
8/1	27.4	31.8	23.3	69	44	8.9	晴時々曇	曇

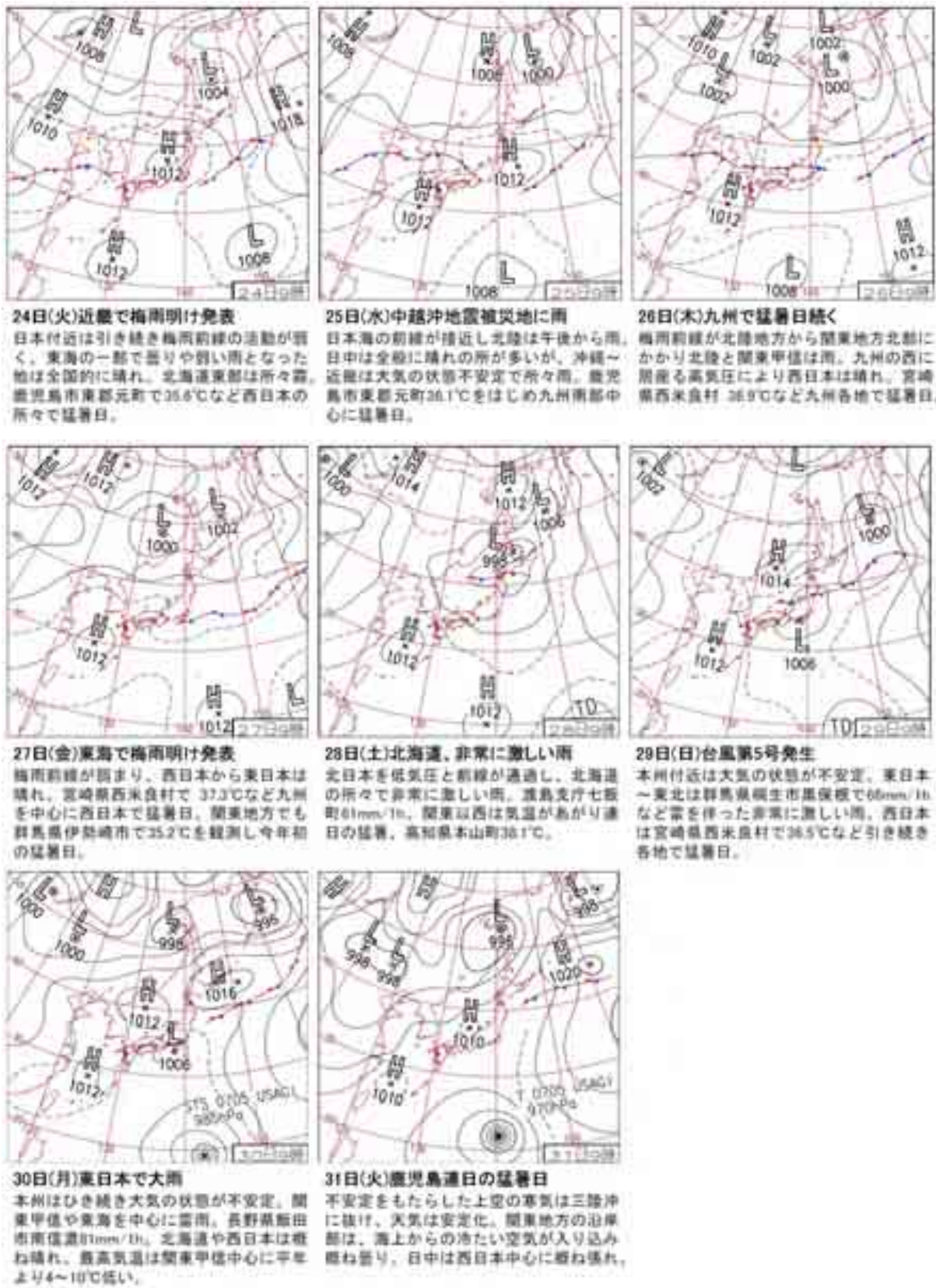
注)太字はPMの成分分析を行った時期を示す。

出典：気象庁 <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>

【新木場(アメダス：地域気象観測所)における降水量】

時刻	時間降水量(mm/h)
2000/7/29 22:00	4
2000/7/29 23:00	1
2000/7/30 12:00	6
2000/7/30 13:00	17
2000/7/30 14:00	2
2000/7/30 23:00	9
2000/7/31 0:00	3
2000/7/31 3:00	2

出典：気象庁 <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>



出典：気象庁 <http://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/hibiten/index.html>

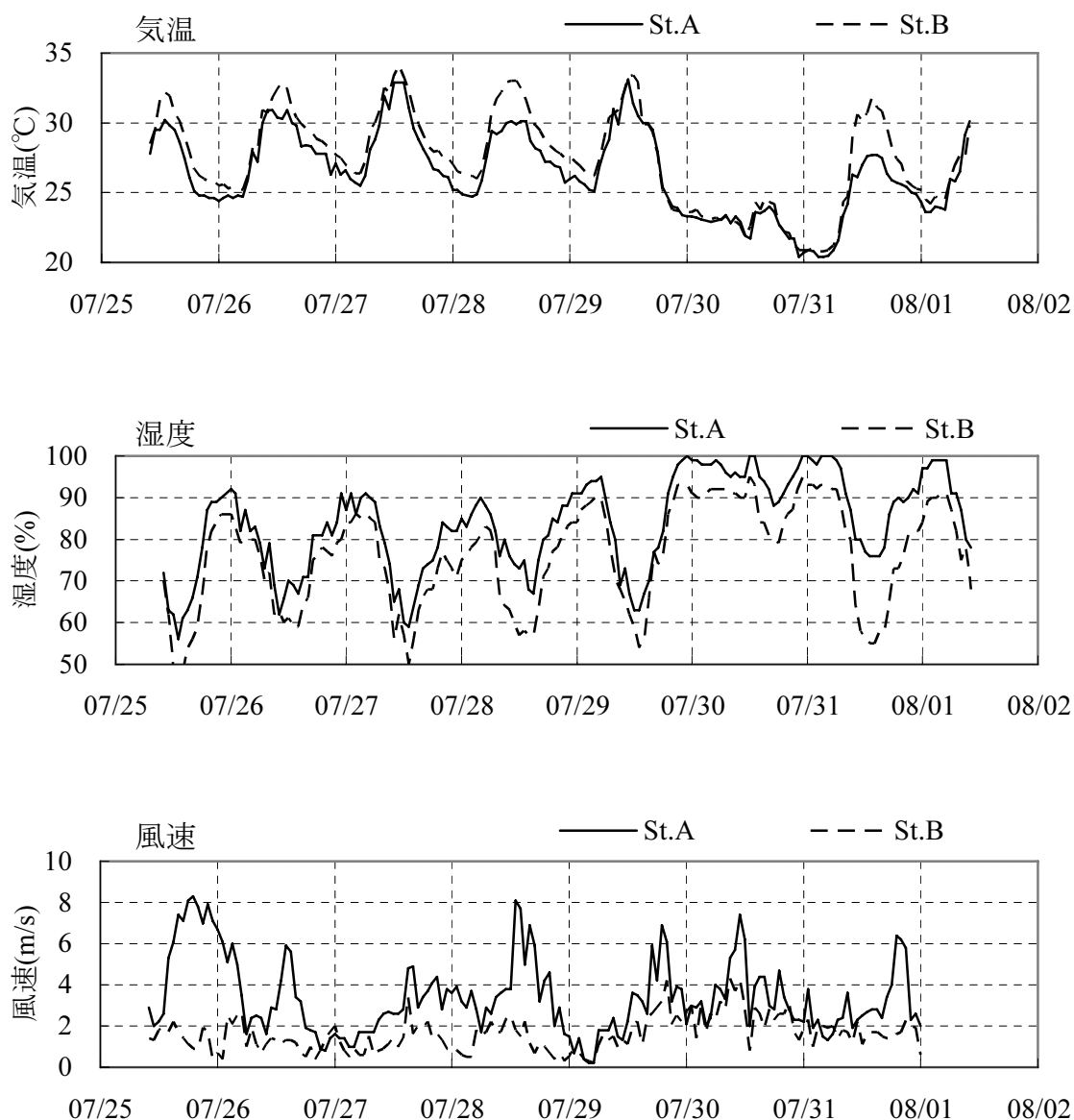
図 7.3-2 調査期間中の天気図

## (2) 現地観測結果

調査地点における気温・湿度、風速の毎時の測定結果を図 7.3-3 に、風向・風速階級別出現頻度を図 7.3-4 に示す。

調査期間中の日最高気温は約 32~33℃、相対湿度の最高値は約 90~100%であった。風速は St.A では平均 3.4 m/s、青海南埠頭公園では平均 1.6 m/s であった。風向は、昼間と夜間で異なり、昼間は南東から南南西、夜間は北北東から北東の風が卓越していた。

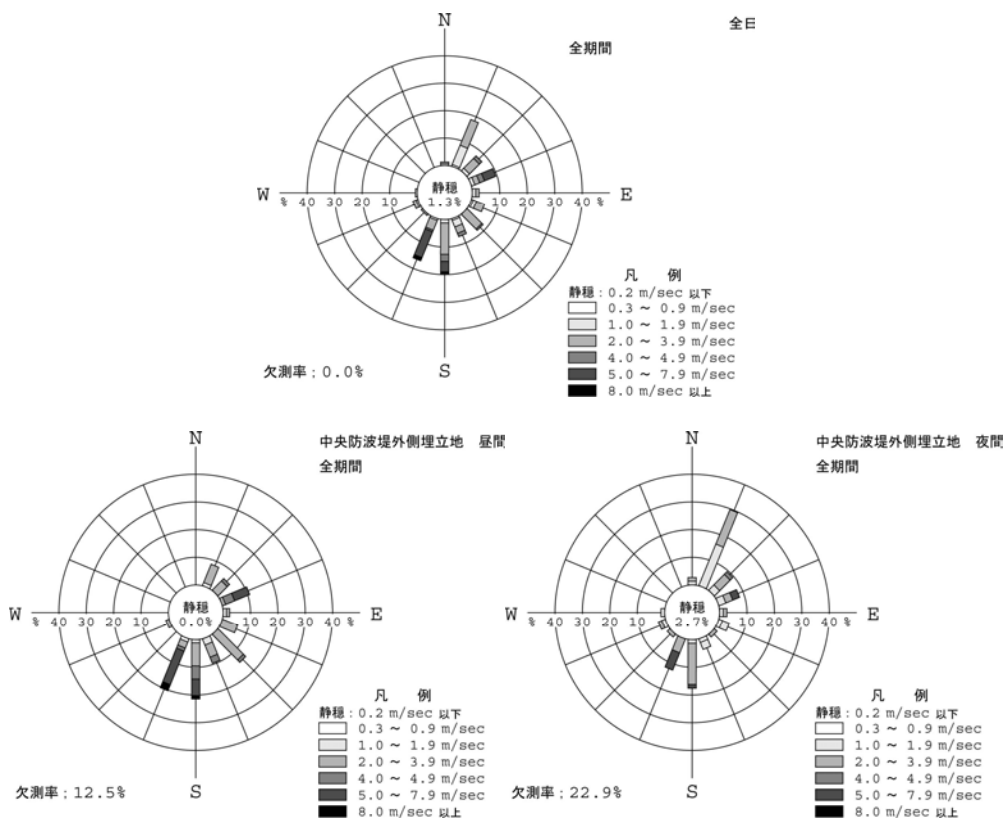
なお、昼夜の時間帯は、成分分析用のフィルターの交換時間に合わせ、10時から21時を昼間、22時から翌日9時を夜間とした。



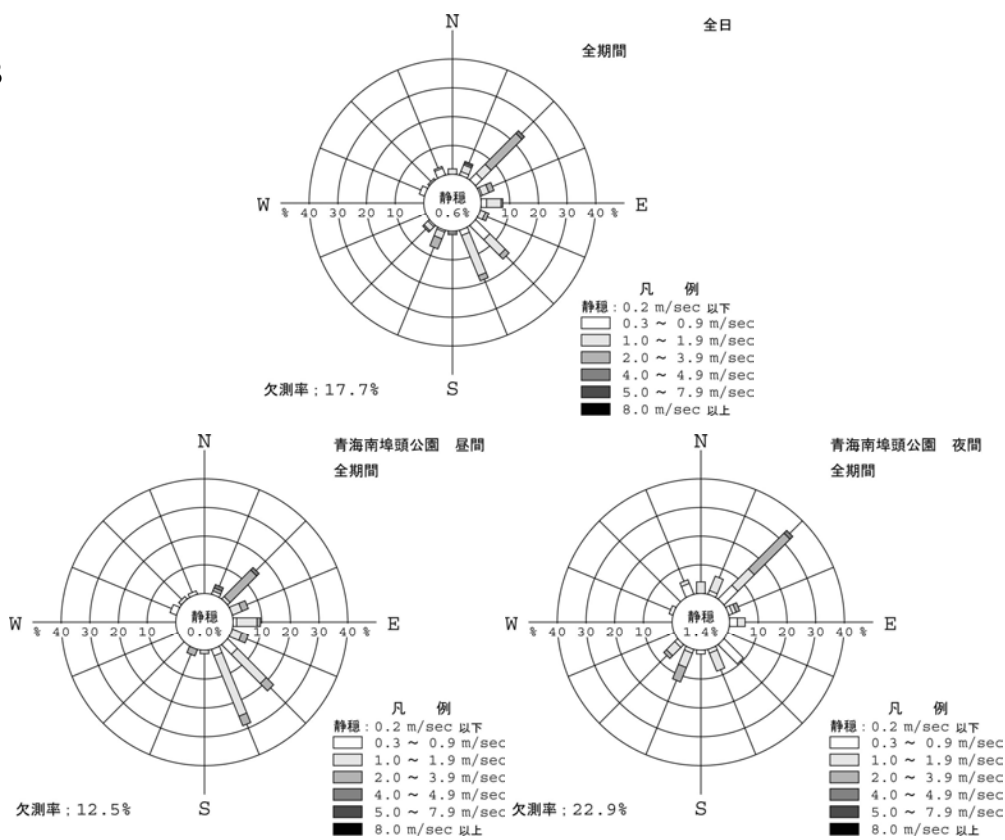
注) 風速は東京都測定結果による。

図 7.3-3 気温、湿度および風速の経時変化

St.A



St.B



注)東京都測定結果による。(昼夜の区分はフィルターの交換時間帯に合わせた)

図 7.3-4 調査期間中の風向・風速階級別出現頻度

### 7.3.7 PM<sub>2.5</sub> 濃度および粒子状 SO<sub>4</sub> 濃度測定結果

PM<sub>2.5</sub> 濃度および粒子状 SO<sub>4</sub> 濃度の連続測定結果を以下に示す。

各地点の測定結果の解析にあたっては、東京都から資料提供を受けた東京都臨時測定地点における下記の同時測定データを併用した。

St.A：中央防波堤外側埋立地の SPM、SO<sub>2</sub>、風向、風速

St.B：青海南埠頭公園船(科学館から約 850 m)の SPM、SO<sub>2</sub>、風向、風速

#### (1) 各物質の濃度変化

##### (a) 濃度の時間変動

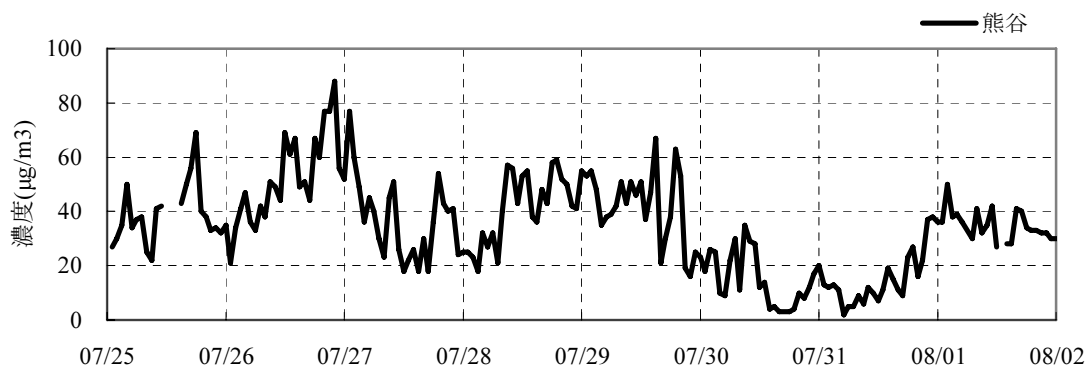
PM<sub>2.5</sub>、SO<sub>4</sub>、SPM および SO<sub>2</sub> の毎時の測定結果を図 7.3-5 に、昼夜別平均値等を図 7.3-6 および表 7.3-6 に示す。

PM(粒子状物質)である PM<sub>2.5</sub>、SO<sub>4</sub>、SPM はほぼ同じようなパターンの濃度変化を示し、7 月 26 日から 27 日と、28 日から 29 日に濃度の大きな上昇がみられた。一方、SO<sub>2</sub> にはこのような濃度変化はみられず、PM と SO<sub>2</sub> で濃度変化のパターンは異なっていた。

上記期間における SPM 濃度上昇現象は、東京港周辺の測定局や横浜市内、埼玉県内の測定局でも観測されていたことから、この間は、東京湾周辺において広域的な PM 濃度上昇現象が現出していたと考えられる。

(東京港および横浜港周辺の測定局データは巻末資料に記載)

##### 【参考図】 埼玉県熊谷測定局における SPM 濃度



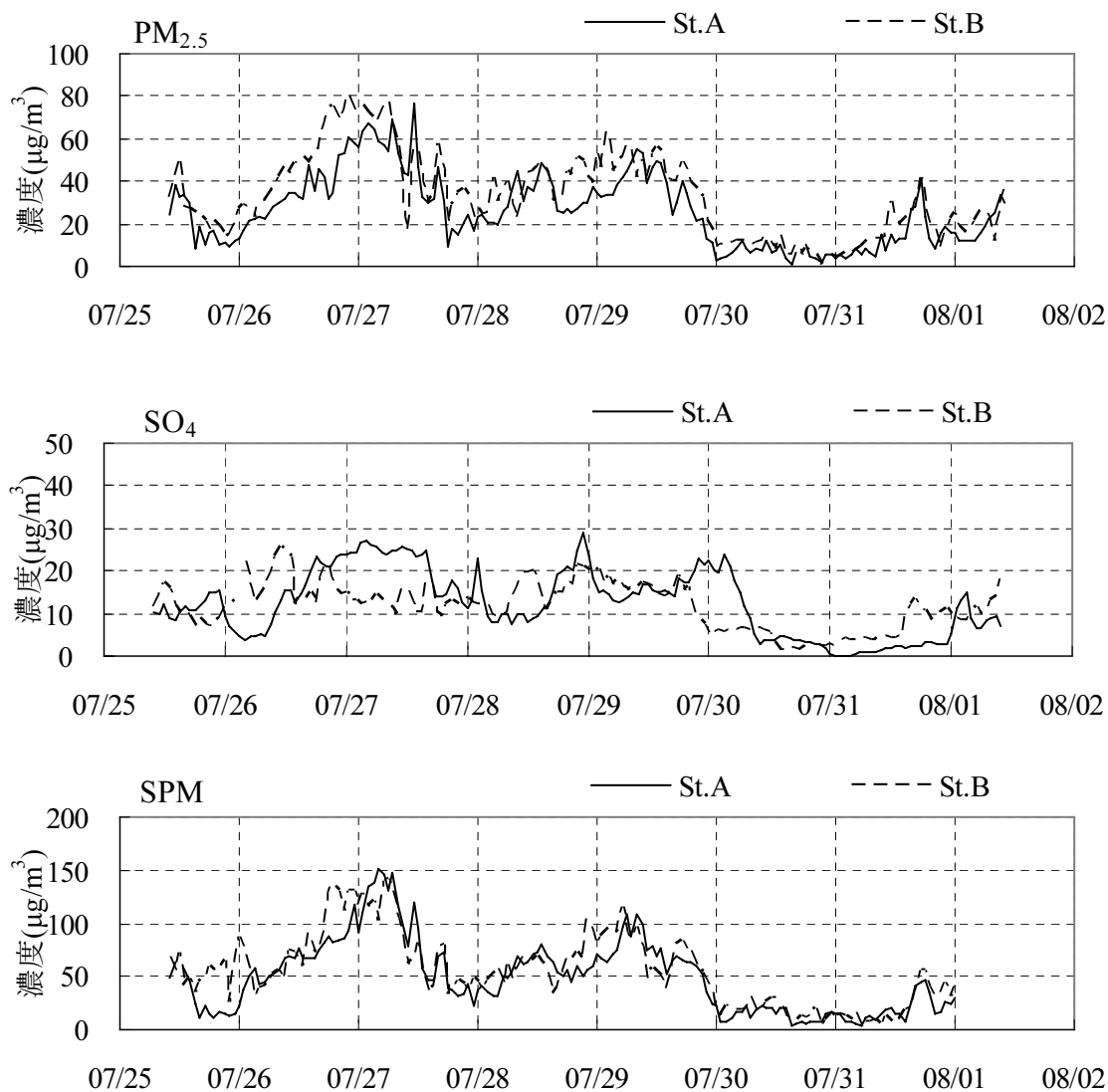
##### (b) 地点間の比較

PM については地点による大きな濃度差はなかった。一方、SO<sub>2</sub> については、St.B では St.A よりも濃度が高く、また、急激な濃度上昇が時折観測されるなど、観測地点による顕著な濃度差が認められた。なお、St.A における PM<sub>2.5</sub> 濃度については、「7.3.8(2)TEOM による測定結果との比較」に記載したように過小評価の可能性があり、測定値の評価の際には注意が必要である。

さらに、全期間の平均値(表 7.3-6 参照)でみると、St.A では PM<sub>2.5</sub>、SO<sub>4</sub>、SPM および SO<sub>2</sub> のいずれも昼夜の違いはほとんどなかった。一方、St.B では、PM<sub>2.5</sub> 等の粒子については昼夜の差はほとんどなかったが、SO<sub>2</sub> については昼間の平均値が夜間の 2 倍近くまで高かった。

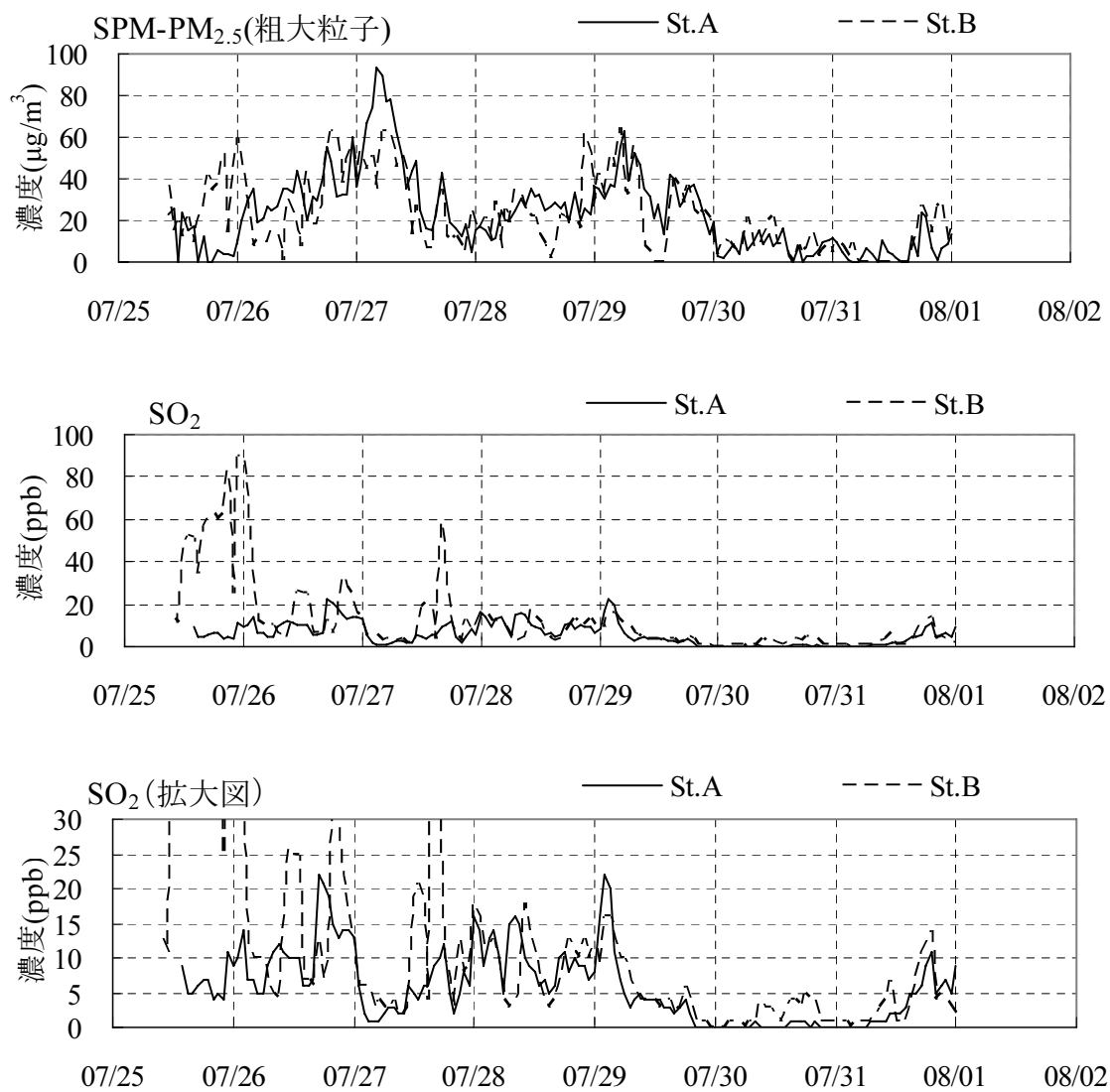
以上の結果、SO<sub>2</sub>については、St.Bで濃度が高く、時折、濃度の急上昇があったこと、また、夜間に比べ発生源の活動が盛んな昼間に濃度が高かったことから、St.Bではごく近傍の発生源からの局所的な影響があった可能性が示唆された。

一方、PMについては、PM<sub>2.5</sub>およびSO<sub>4</sub>を測定したが、地点間の違いや昼夜の大きな差は認められず、周辺発生源との関連性は明確でなかった。また、St.BにおいてはSO<sub>2</sub>の急激な濃度上昇があったが、PM<sub>2.5</sub>の濃度が同時期に上昇するような現象は現地調査では確認されなかった。



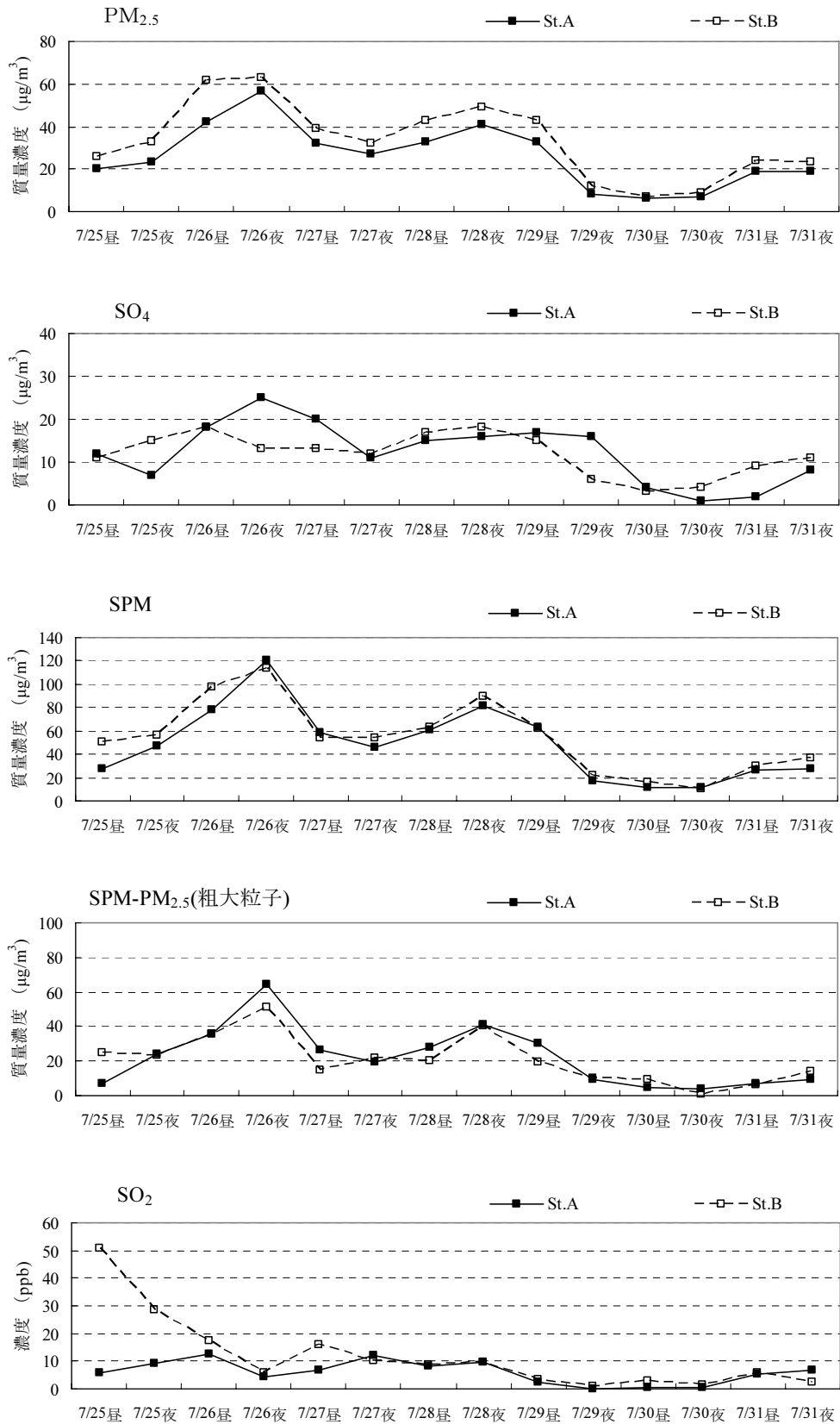
注)SPMは東京都測定結果による。

図 7.3-5(1) 各種粒子状物質とガス状SO<sub>2</sub>の濃度変化(1時間値)



注)SPM および SO<sub>2</sub> は東京都測定結果による。

図 7.3-5(2) 各種粒子状物質とガス状 SO<sub>2</sub> の濃度変化(1 時間値)



注) 1 昼夜の区分はフィルターの交換時間帯に合わせた。  
 2 SPMおよびSO<sub>2</sub>は東京都測定結果による。

図 7.3-6 各種粒子状物質とガス状SO<sub>2</sub>の昼夜別平均濃度の推移



表 7.3-6 昼夜別測定結果一覧

St.A

回目	区分	PM2.5	SO <sub>4</sub>	SPM	粗大粒子 (SPM- PM2.5)	SO <sub>2</sub>	PM2.5 /SPM	SO <sub>4</sub> /PM2.5	SO <sub>4</sub> / (SO <sub>4</sub> +SO <sub>2</sub> )	S換算後の SO <sub>4</sub> / (SO <sub>4</sub> +SO <sub>2</sub> )	南風 割合
		μg/m <sup>3</sup>	μg/m <sup>3</sup>	μg/m <sup>3</sup>	μg/m <sup>3</sup>	μg/m <sup>3</sup>	%	%	%	%	%
7/25	昼	20	12	27	7	17	74.1	60.0	41.4	32.0	100
7/25	夜	23	7	47	24	26	48.9	30.4	21.2	15.2	83
7/26	昼	42	18	78	36	36	53.8	42.9	33.3	25.0	92
7/26	夜	57	25	121	64	12	47.1	43.9	67.6	58.1	8
7/27	昼	32	20	58	26	19	55.2	62.5	51.3	41.2	92
7/27	夜	27	11	46	19	34	58.7	40.7	24.4	17.7	92
7/28	昼	33	15	61	28	23	54.1	45.5	39.5	30.3	100
7/28	夜	41	16	82	41	27	50.0	39.0	37.2	28.3	25
7/29	昼	33	17	63	30	7	52.4	51.5	70.8	61.8	8
7/29	夜	8	16	17	9	0	47.1	200.0	100.0	100.0	0
7/30	昼	6	4	11	5	1	54.5	66.7	80.0	72.7	0
7/30	夜	7	1	11	4	1	63.6	14.3	50.0	40.0	0
7/31	昼	19	2	26	7	15	73.1	10.5	11.8	8.2	67
7/31	夜	19	8	28	9	20	67.9	42.1	28.6	21.1	17
昼間平均		26	13	46	20	17	57.1	47.6	57.3	33.2	65
夜間平均		26	12	50	24	17	51.7	46.2	58.8	31.8	32
全日平均		26	12	48	22	17	54.3	46.9	58.0	32.5	49

St.B

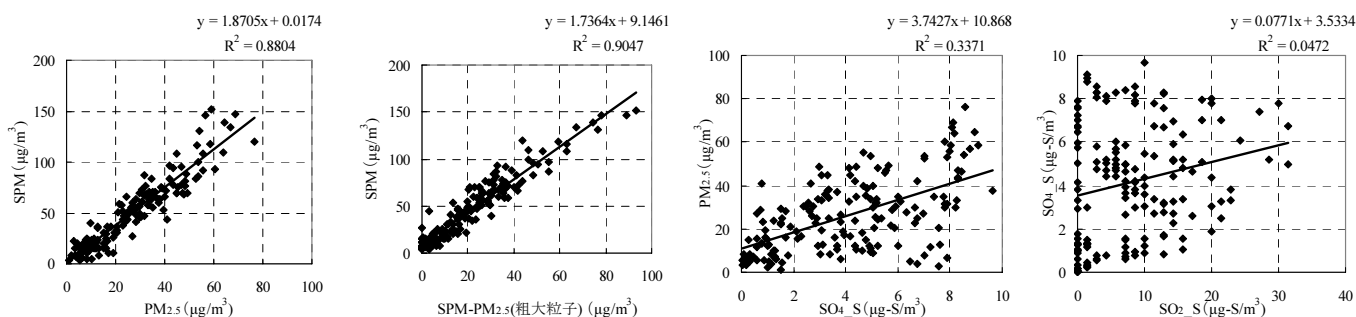
回目	区分	PM2.5	SO <sub>4</sub>	SPM	粗大粒子 (SPM- PM2.5)	SO <sub>2</sub>	PM2.5 /SPM	SO <sub>4</sub> /PM2.5	SO <sub>4</sub> / (SO <sub>4</sub> +SO <sub>2</sub> )	S換算後の SO <sub>4</sub> / (SO <sub>4</sub> +SO <sub>2</sub> )	南風 割合
		μg/m <sup>3</sup>	μg/m <sup>3</sup>	μg/m <sup>3</sup>	μg/m <sup>3</sup>	μg/m <sup>3</sup>	%	%	%	%	%
7/25	昼	26	11	51	25	145	51.0	42.3	7.1	4.8	100
7/25	夜	33	15	56	23	82	58.9	45.5	15.5	10.9	83
7/26	昼	62	18	98	36	50	63.3	29.0	26.5	19.4	50
7/26	夜	63	13	114	51	16	55.3	20.6	44.8	35.1	8
7/27	昼	39	13	54	15	46	72.2	33.3	22.0	15.9	58
7/27	夜	32	12	54	22	29	59.3	37.5	29.3	21.6	100
7/28	昼	43	17	63	20	25	68.3	39.5	40.5	31.2	100
7/28	夜	49	18	89	40	28	55.1	36.7	39.1	30.0	17
7/29	昼	43	15	62	19	9	69.4	34.9	62.5	52.6	8
7/29	夜	12	6	22	10	3	54.5	50.0	66.7	57.1	0
7/30	昼	7	3	16	9	8	43.8	42.9	27.3	20.0	0
7/30	夜	9	4	10	1	4	90.0	44.4	50.0	40.0	8
7/31	昼	24	9	30	6	17	80.0	37.5	34.6	26.1	67
7/31	夜	23	11	37	14	7	62.2	47.8	61.1	51.2	17
昼間平均		35	12	53	19	43	65.2	35.2	77.7	16.0	55
夜間平均		32	11	55	23	24	57.9	35.7	68.1	23.8	33
全日平均		33	12	54	21	34	61.5	35.5	74.0	19.0	44

- 注) 1. 昼夜の区分はフィルターの交換時間帯に合わせた。  
 2. 太字は成分分析を行った時期を示す。  
 3. 南風はSSE~S~SSWとした。  
 4. SPMおよびSO<sub>2</sub>は東京都測定結果による。

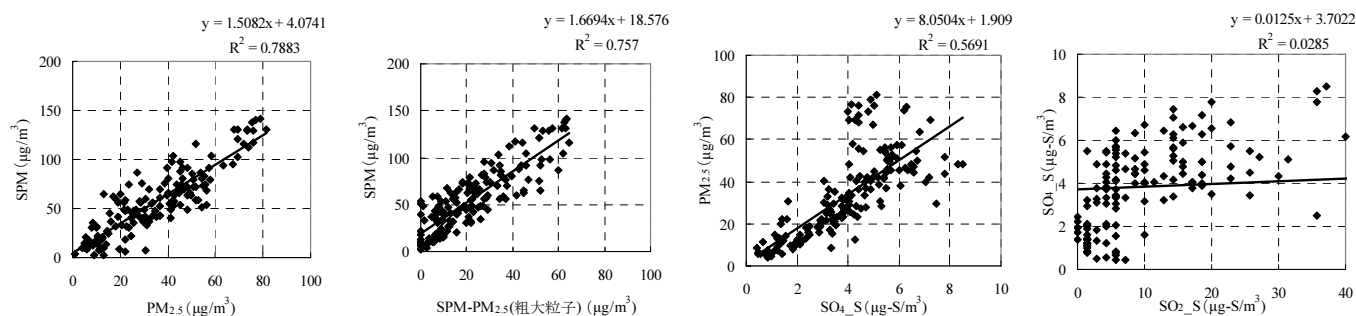
## (2) 項目間の関係

項目間の相関を図 7.3-7 に示す。SPM と PM<sub>2.5</sub> の間、SPM と粗大粒子の間には強い相関、PM<sub>2.5</sub> と SO<sub>4</sub> の間には弱い相関がみられたが、SO<sub>2</sub> と SO<sub>4</sub> はほとんど関連性がみられなかった。SPM と PM<sub>2.5</sub> との相関を細かくみると、近似直線の傾きから SPM に占める PM<sub>2.5</sub> の割合は約 50～70 % 程度であると予想され、既存の測定例(「騎西・鴻巣地域における春季から夏季を中心とした PM2.5 汚染実態」(平成 13 年度埼玉県環境科学国際センター報)、「東京都における大気中微小粒子(PM2.5)と浮遊粒子状物質の週平均濃度(平成 17 年度)」(東京都健康安全センター年報 2006)) の範囲と一致していた。また、PM<sub>2.5</sub> に占める SO<sub>4</sub> の割合はおおむね 30～60 % であった(表 7.3-6)。

St.A



St.B



注)SPM および SO<sub>2</sub> は東京都測定結果による。

図 7.3-7 測定項目間の相関(全期間)

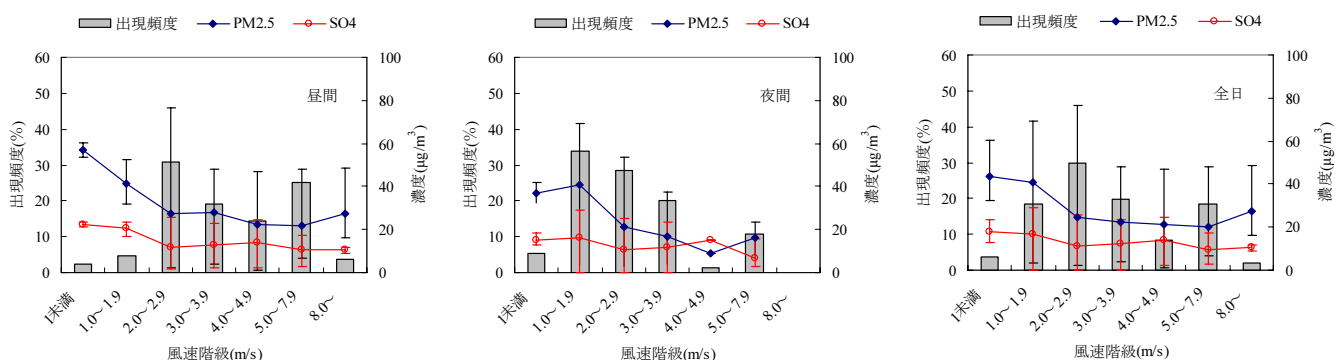
### (3) PM<sub>2.5</sub> および SO<sub>4</sub> 濃度と気象要因との関係

#### (a) 風速

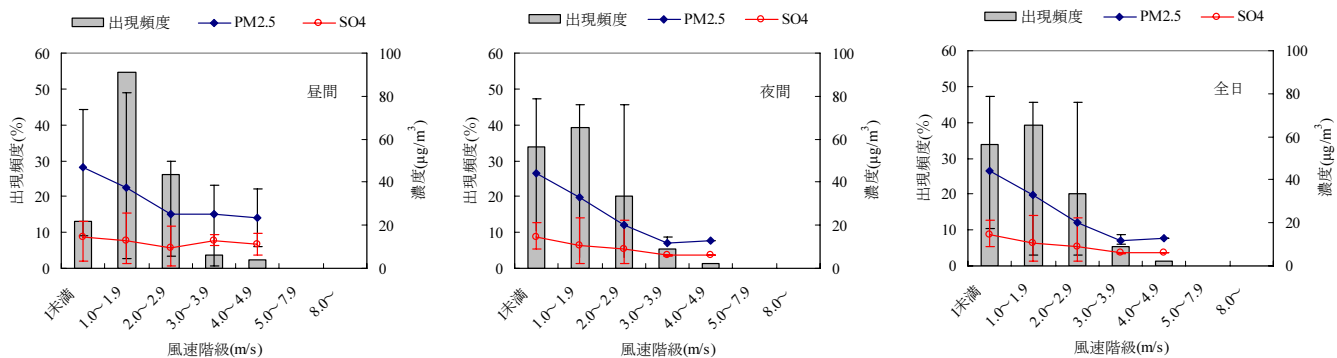
風速階級別の PM<sub>2.5</sub> および SO<sub>4</sub> 濃度を図 7.3-8 に、風速と PM<sub>2.5</sub> および SO<sub>4</sub> 濃度の相関を図 7.3-9 に示す。

データにはばらつきはあるものの、PM<sub>2.5</sub> および SO<sub>4</sub> 濃度は、風速が弱い場合に高くなる傾向がみられ、この傾向は、St.B の PM<sub>2.5</sub> で最もよく現れていた。St.B では、St.A と比較して、周辺に一次粒子を含む PM<sub>2.5</sub> の発生源があることから、風が弱い場合に発生源からの汚染物質が十分に拡散せず滞留し、濃度が高くなったことが可能性として考えられる。

#### St.A



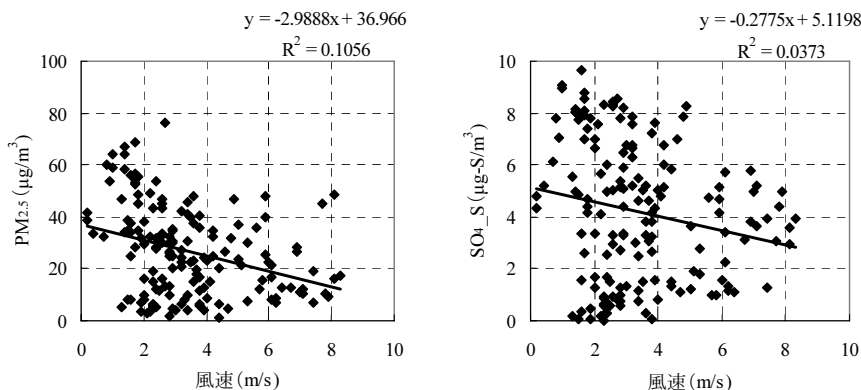
#### St.B



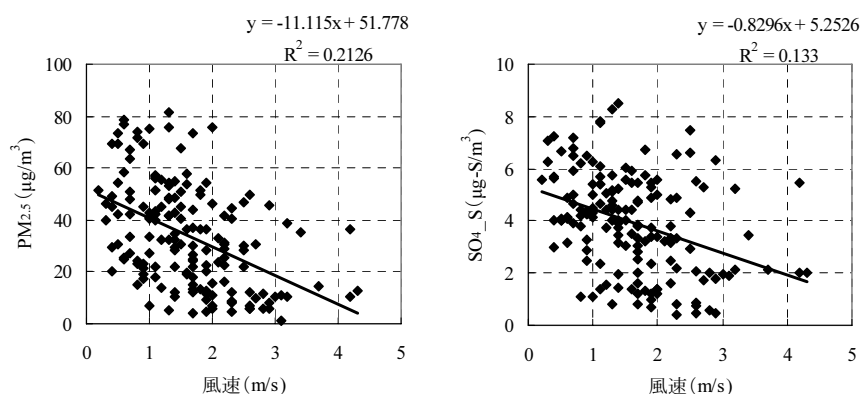
注)風速は東京都測定結果による。濃度は平均値および範囲(最小値~最大値)を示す。

図 7.3-8 風速階級別の PM<sub>2.5</sub>、SO<sub>4</sub> 濃度

St.A



St.B



注)風速は東京都測定結果による。

図 7.3-9 風速と PM<sub>2.5</sub>、SO<sub>4</sub>濃度の相関

(b) 風向

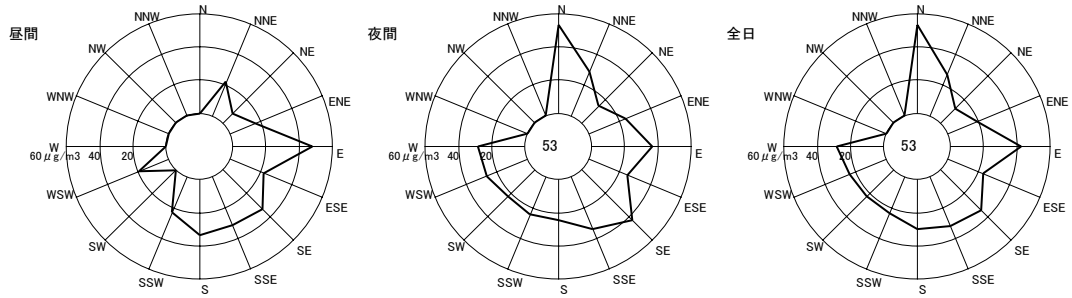
風向区分別の PM<sub>2.5</sub> および SO<sub>4</sub> 濃度を図 7.3-10 に示す。

風向区分別濃度は、PM<sub>2.5</sub> および SO<sub>4</sub> ともに、昼間は東～南南西の方位での濃度が相対的に高いのに対し、夜間は北～東の風の場合にも濃度が相対的に高くなっている。

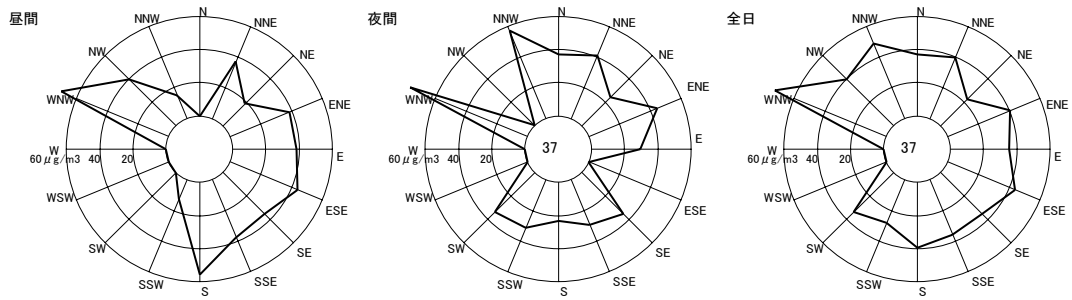
本結果については、データ数が少なく、極端に高濃度になっている場合もあるため、実際に高濃度が観測された日における風向風速と PM<sub>2.5</sub> 濃度等の関係を図 7.3-11 に示す。7月26日から27日と28日から29日にかけての濃度上昇は、ともに南寄りの海風が卓越する日中に始まり、海風から弱い陸風が変わった後も濃度は上昇もしくは高濃度を維持し、その後、比較的強い風(27日は南寄り、29日は北東寄り)に変わった後に、濃度が低下していた。

風系の変化により PM 濃度が変化していたこと、周辺地域でも同様のパターンの濃度変化がみられていたことから、この間の PM の高濃度については、汚染大気塊の海陸風などによる移動が要因のひとつとして考えられる。

PM<sub>2.5</sub>  
St.A

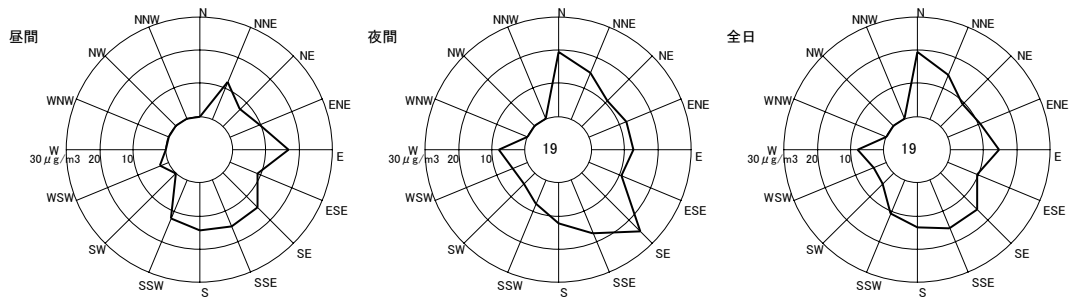


St.B

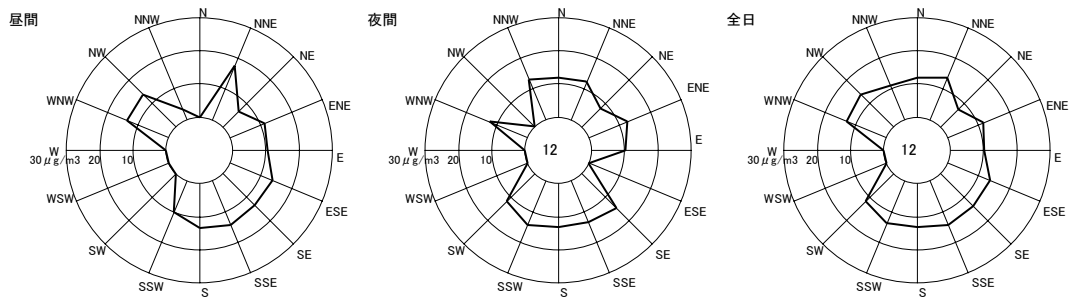


SO<sub>4</sub>

St.A



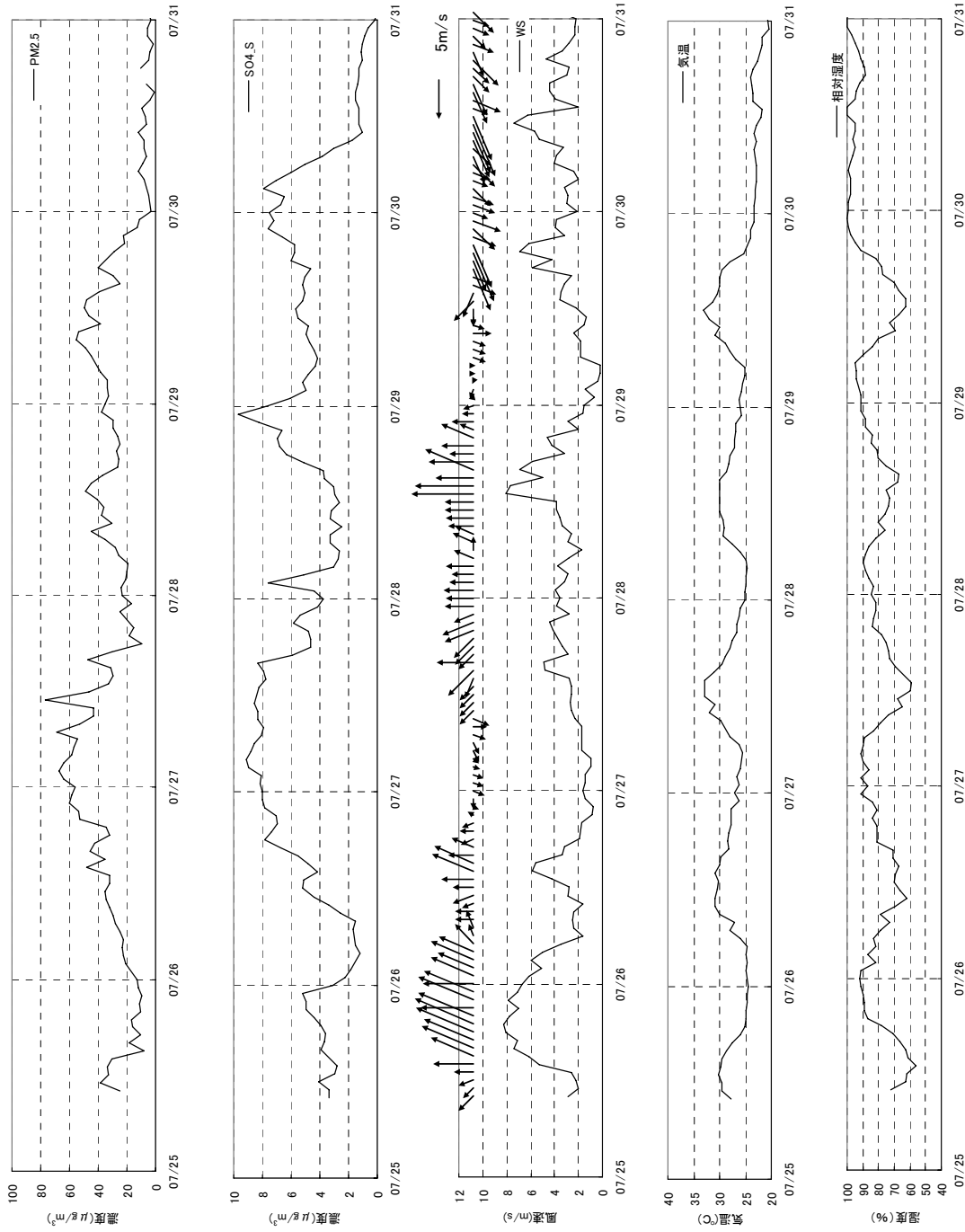
St.B



注)風向は東京都測定結果による。円内は静穏(風速 0.2m/s 以下の濃度 :  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

図 7.3-10 風向区別平均濃度

St.A

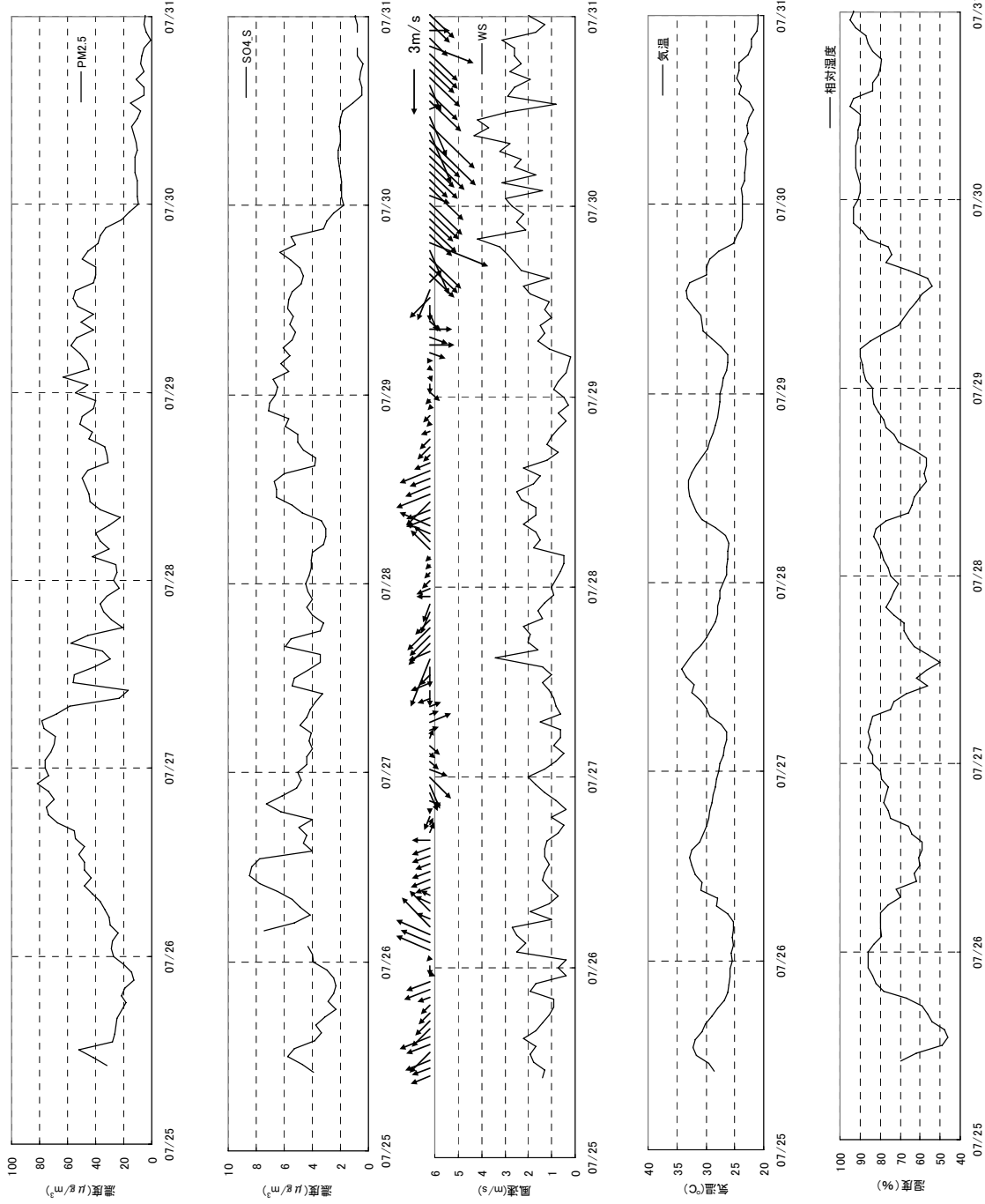


注) St.A と St.B では  
風ベクトルのスケ  
ールが異なる。

注) 風向・風速は東京都測定結果による。

図 7.3-11(1) 高濃度日における風向・風速と PM<sub>2.5</sub> 濃度、SO<sub>4</sub> 濃度 (St.A)

St.B



注) St.A と St.B では  
風ベクトルのスケ  
ールが異なる。

注) 風向・風速は東京都測定結果による。

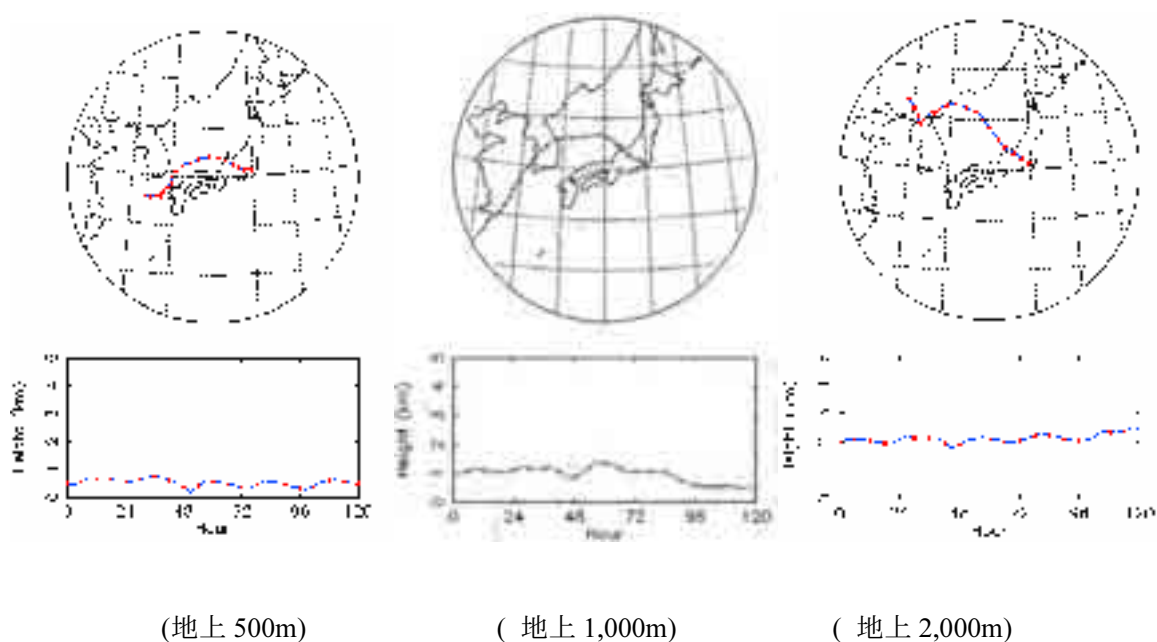
図 7.3-11(2) 高濃度日における風向・風速と PM<sub>2.5</sub> 濃度、SO<sub>4</sub> 濃度(St.B)

ある地点に到達した大気塊が、どのような経路を通過してきたかを調べる手段のひとつにバックトラジェクトリー解析(後方流跡線解析)手法がある。ここでは、PMが高濃度となった7月27日0時を対象に、St.Bに到達する大気塊の輸送経路を考察した。

バックトラジェクトリーの計算にはCGER-METEXを用いた。CGER-METEXは、国立環境研究所地球環境研究センターが開発したシステムであり、気象データには米国の環境予測センター(NCEP: National Centers for Environmental Prediction)の客観解析データを用いた。

計算の起点はSt.B上空(地上500m、1,000m、2,000m)とし、5日間(120時間)のバックトラジェクトリー計算を行った。

結果を図7.3-12に示す。計算結果は高度によって異なるが、7月27日0時は日本海から北陸に侵入した大気塊が中部地域、関東北西部を通過して東京湾に移流していることが確認された。7月26日は図7.3-13に示すように内陸部の群馬県において高濃度のSPMが観測されており、これらのことから、7月27日の高濃度現象は、関東地域内陸部からPMが高濃度の大気塊が東京湾に輸送されたことが原因の一つとして考えられた。



注) 計算開始地点 北緯 35.6 度、東経 139.8 度(高度 500m、1000m、2000m)  
計算時間 120 時間(6 時間間隔)

図 7.3-12 バックトラジェクトリー計算結果(2007年7月27日0時)



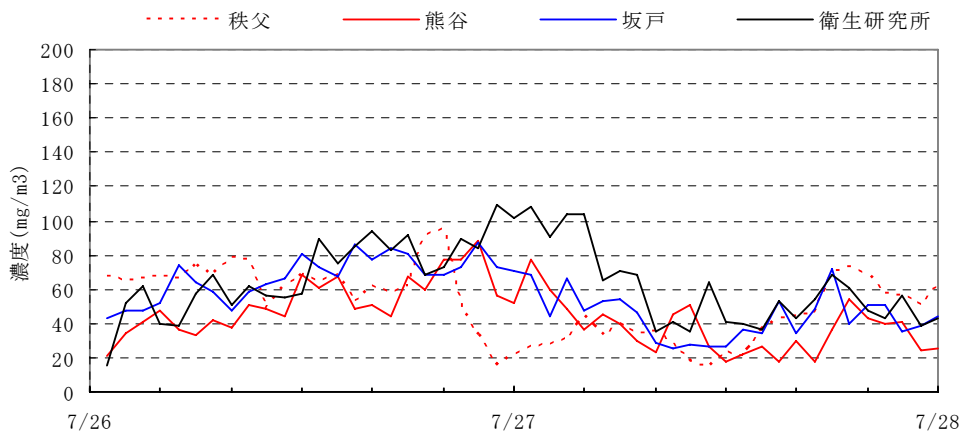
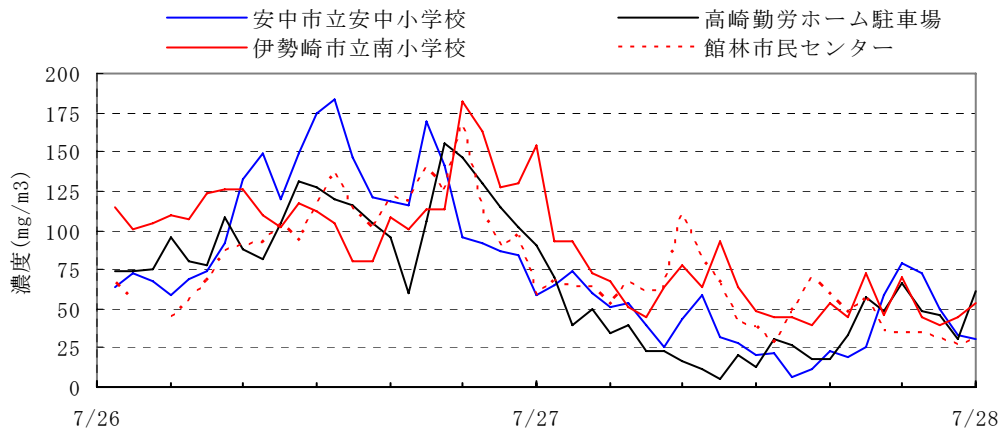


図 7.3-13 内陸部における SPM 濃度の推移(2007 年 7 月 26 日~27 日)

#### (4) まとめ

PM<sub>2.5</sub>濃度およびSO<sub>4</sub>濃度測定結果のまとめは以下のとおりである。

- SO<sub>2</sub>については周辺発生源からの排ガスの局所的な影響が測定により示唆されたが、PMについては明確ではなかった。
- この理由としては、以下が考えられる。
  - ✓ 影響範囲の違い：SO<sub>2</sub>は発生源から比較的近い場所で局所的な影響を及ぼすが、二次粒子を含むPMについては、二次生成が十分進むために時間を要し、その間、海風等により他の地域に輸送されるため、SO<sub>2</sub>よりも発生源近傍で影響が現れにくい。
  - ✓ バックグラウンド濃度の違い：SO<sub>2</sub>はバックグラウンド濃度が低く安定しているため、発生源からの寄与が濃度変化となって現れやすい。一方、PMはバックグラウンド濃度が高く、広域的な汚染現象による濃度変動も大きいため、発生源からの影響が現地の測定ではとらえにくい。
  - ✓ 排出量の違い：仮に、発生源として船舶を仮定した場合、船舶からの排ガスのSO<sub>2</sub>濃度と比較して、一次粒子の濃度は相対的に小さい。
- 項目間の相関については、SPMとPM<sub>2.5</sub>、SPMと粗大粒子には強い相関、PM<sub>2.5</sub>とSO<sub>4</sub>には弱い相関がみられたが、SO<sub>2</sub>とSO<sub>4</sub>はほとんど相関がみられなかった。
- 風速との関係は、風速が弱い場合に濃度が高くなる傾向がみられ、この傾向は、St.BのPM<sub>2.5</sub>で最もよく現れていた。St.Bでは、St.Aと比較して、周辺に一次粒子を含むPM<sub>2.5</sub>の発生源があることから、風が弱い場合に汚染物質が滞留し、濃度が高くなったことが可能性として考えられる
- 7月26日から27日と28日から29日にかけての濃度上昇は、風系の変化によりPM濃度に変化していたこと、周辺地域でも同様のパターンの濃度変化がみられていたことから、汚染大気塊の海陸風などによる移動が要因の1つとして考えられる。

### 7.3.8 質量濃度および成分分析結果

#### (1) 質量濃度測定結果

秤量法による質量濃度の測定結果を図 7.3-14 に示す。

成分分析に要するサンプルとして、PM<sub>2.5</sub>、SO<sub>4</sub>およびSPMの濃度の上昇があった7月26日(水)の昼間および夜間、7月28日(金)の昼間および夜間の4検体を選定した(表 7.3-7 参照)。

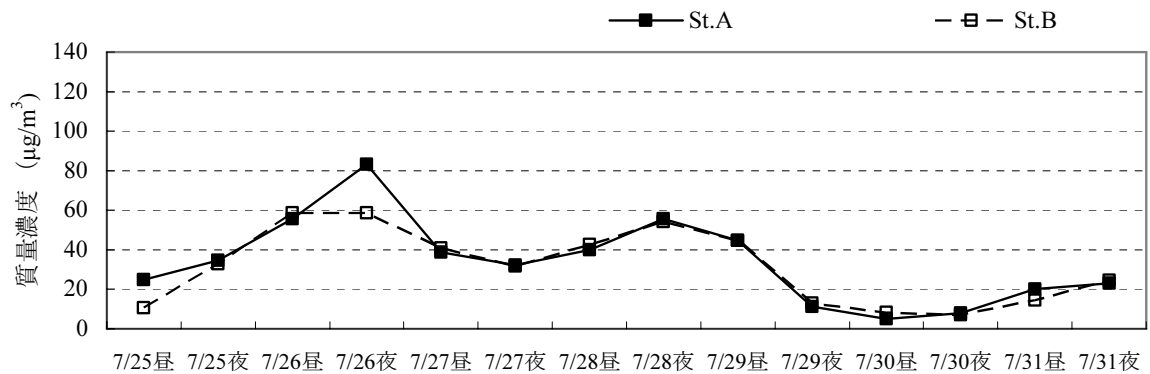


図 7.3-14 PM<sub>2.5</sub> 質量濃度測定結果(秤量法)

表 7.3-7 昼夜別測定結果一覧(秤量法)

回目	区分	St.A	St.B
		µg/m <sup>3</sup>	µg/m <sup>3</sup>
1	昼	25	11
2	夜	35	33
3	昼	<b>56</b>	<b>59</b>
4	夜	<b>83</b>	<b>59</b>
5	昼	39	41
6	夜	32	32
7	昼	<b>40</b>	<b>43</b>
8	夜	<b>56</b>	<b>54</b>
9	昼	45	45
10	夜	11	13
11	昼	5	8
12	夜	8	7
13	昼	20	15
14	夜	23	24
昼間平均		33	31
夜間平均		35	32
全日平均		34	32

注) **太字**は成分分析に供した試料を示す。

## (2) TEOM による測定結果との比較

本調査では、PM<sub>2.5</sub> 質量濃度の測定方法として、TEOM による連続測定とフィルター捕集による秤量の 2 種類の方法を採用した。

TEOM と秤量法による PM<sub>2.5</sub> 質量濃度の比較を図 7.3-15 の上段に示す。また、図 7.3-15 の中段には SPM 濃度と秤量法による PM<sub>2.5</sub> 質量濃度、下段には SPM 濃度と TEOM による PM<sub>2.5</sub> 質量濃度の関係を示した。

TEOM と秤量法の PM<sub>2.5</sub> 質量濃度は St.B では傾き 1 の直線とよく合っており、両者の測定値はほぼ一致し、測定法による差は小さかった。一方、St.A では、相関係数は高いものの、TEOM の測定値は秤量法の測定値の 7 割程度しかなく、測定法による値の違いが認められた。

PM<sub>2.5</sub> と SPM との相関をみると、秤量法による PM<sub>2.5</sub> と SPM、St.B における TEOM による PM<sub>2.5</sub> と SPM の回帰式の傾きは 1.5~1.7 であったのに対して、St.A における TEOM による PM<sub>2.5</sub> と SPM の回帰式の傾きは 2.1 であり、他と比べて高かった。秤量法による PM<sub>2.5</sub> 濃度および東京都測定 of SPM 濃度が正しいとすると、St.A における TEOM の測定値が低めの値となっていた可能性がある。このため、St.A における TEOM と秤量法による PM<sub>2.5</sub> の関係式を用いて、TEOM の測定値の補正を行った。補正に用いた関係式を以下に示す。

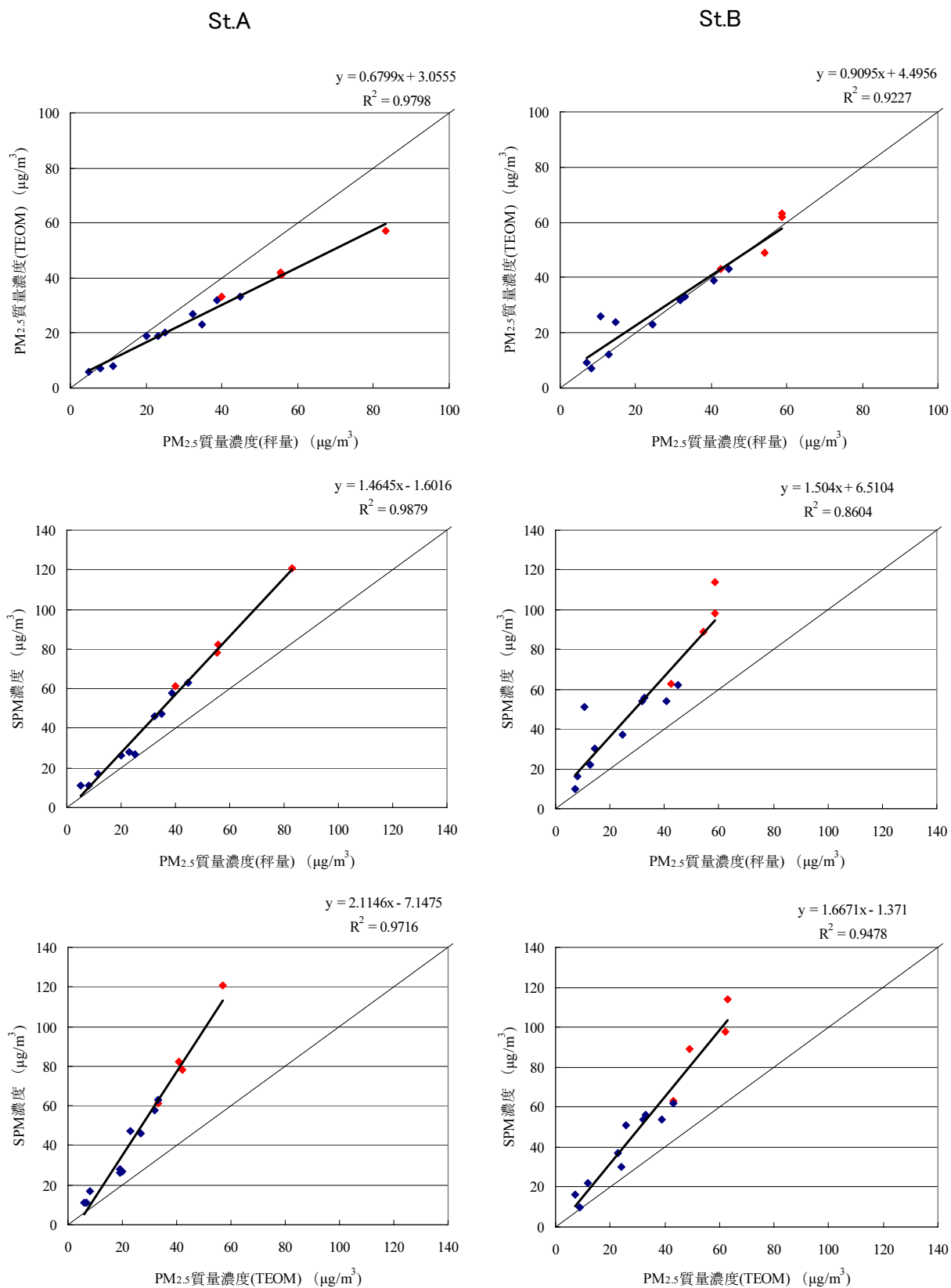
$$\text{補正值} = (\text{測定値} - 3.0555) \div 0.6799$$

補正值：秤量法による測定値を用いて TEOM の測定値を補正した値 (μg/m<sup>3</sup>)

測定値：TEOM による測定値 (μg/m<sup>3</sup>)

TEOM による St.A の PM<sub>2.5</sub> 濃度を補正した結果を表 7.3-8 に示す。St.A の PM<sub>2.5</sub> 濃度は平均で 34 μg/m<sup>3</sup> となり、St.B とほぼ同程度の結果となった。

St.A と St.B を比較すると、SPM 濃度は St.B がやや高くなっているが、PM<sub>2.5</sub> は 2 地点でほとんど変わらなかった。このことから、SPM 濃度の地点による平均濃度の違いは粗大粒子の濃度の違いが起因していたことが考えられる。



注) ◆は、成分分析を行った期間の測定値。(SPMは東京都測定結果)

図 7.3-15 TEOM と秤量法による PM<sub>2.5</sub> 質量濃度の比較

表 7.3-8 TEOM による PM<sub>2.5</sub> 質量濃度測定値の補正(St.A)

St.A

回目	区分	補正前				補正後			
		PM2.5	SPM	粗大粒子 (SPM- PM2.5)	PM2.5/SPM	PM2.5	SPM	粗大粒子 (SPM- PM2.5)	PM2.5/SPM
		μg/m <sup>3</sup>	μg/m <sup>3</sup>	μg/m <sup>3</sup>	%	μg/m <sup>3</sup>	μg/m <sup>3</sup>	μg/m <sup>3</sup>	%
7/25	昼	20	27	7	74.1	25	27	2	92.3
7/25	夜	23	47	24	48.9	29	47	18	62.4
<b>7/26</b>	<b>昼</b>	<b>42</b>	<b>78</b>	<b>36</b>	<b>53.8</b>	<b>57</b>	<b>78</b>	<b>21</b>	<b>73.4</b>
<b>7/26</b>	<b>夜</b>	<b>57</b>	<b>121</b>	<b>64</b>	<b>47.1</b>	<b>79</b>	<b>121</b>	<b>42</b>	<b>65.6</b>
7/27	昼	32	58	26	55.2	43	58	15	73.4
7/27	夜	27	46	19	58.7	35	46	11	76.6
<b>7/28</b>	<b>昼</b>	<b>33</b>	<b>61</b>	<b>28</b>	<b>54.1</b>	<b>44</b>	<b>61</b>	<b>17</b>	<b>72.2</b>
<b>7/28</b>	<b>夜</b>	<b>41</b>	<b>82</b>	<b>41</b>	<b>50.0</b>	<b>56</b>	<b>82</b>	<b>26</b>	<b>68.1</b>
7/29	昼	33	63	30	52.4	44	63	19	69.9
7/29	夜	8	17	9	47.1	7	17	10	42.8
7/30	昼	6	11	5	54.5	4	11	7	39.4
7/30	夜	7	11	4	63.6	6	11	5	52.7
7/31	昼	19	26	7	73.1	23	26	3	90.2
7/31	夜	19	28	9	67.9	23	28	5	83.8
昼間平均		26	46	20	57.1	34	46	12	74.3
夜間平均		26	50	24	51.7	34	50	17	67.1
全日平均		26	48	22	54.3	34	48	14	70.5

St.B

回目	区分	PM2.5	SPM	粗大粒子 (SPM- PM2.5)	PM2.5/SPM
		μg/m <sup>3</sup>	μg/m <sup>3</sup>	μg/m <sup>3</sup>	%
7/25	昼	26	51	25	51.0
7/25	夜	33	56	23	58.9
<b>7/26</b>	<b>昼</b>	<b>62</b>	<b>98</b>	<b>36</b>	<b>63.3</b>
<b>7/26</b>	<b>夜</b>	<b>63</b>	<b>114</b>	<b>51</b>	<b>55.3</b>
7/27	昼	39	54	15	72.2
7/27	夜	32	54	22	59.3
<b>7/28</b>	<b>昼</b>	<b>43</b>	<b>63</b>	<b>20</b>	<b>68.3</b>
<b>7/28</b>	<b>夜</b>	<b>49</b>	<b>89</b>	<b>40</b>	<b>55.1</b>
7/29	昼	43	62	19	69.4
7/29	夜	12	22	10	54.5
7/30	昼	7	16	9	43.8
7/30	夜	9	10	1	90.0
7/31	昼	24	30	6	80.0
7/31	夜	23	37	14	62.2
昼間平均		35	53	19	65.2
夜間平均		32	55	23	57.9
全日平均		33	54	21	61.5

注) 太字は成分分析を行った時期を示す。

### (3) 成分分析結果

大気環境中 PM<sub>2.5</sub> の成分分析結果を表 7.3-9 および図 7.3-16～図 7.3-18 に示す。

PM<sub>2.5</sub> に占める主な成分割合は、炭素成分が 15～27 %、硫酸イオンが 20～40 %、アンモニウムイオンが 12～17 %、であった。また、硝酸イオンは、昼間はわずかであったが、夜間には 10～20 % の高い割合を示した。

硫酸イオンは夏季に濃度が上昇することが知られているが、今回の 4 回の測定でも高い値を示しており、とくに 7 月 26 日から 27 日の結果では、4 試料とも 20 µg/m<sup>3</sup> を超えていた。

硫酸イオン濃度の成分分析結果とサルフェイトモニターによる測定値の比較を表 7.3-10 に示す。両者の測定値を比較すると、7 月 26 日は試料によってばらつきが見られたが、7 月 28 日は値がほぼ一致していた。

また、硝酸イオンについては、夏季はガスとして存在しやすいことと、フィルター上に捕集された粒子が再びガス化して抜け出してしまうため、平成 18 年度の調査結果では十分に捕捉されていないことが考えられたが、今回、1 日 2 回のサンプリングとしたことにより、夜間の硝酸イオンを捕捉することができた。濃度レベルとしては St.A の 7 月 26 日の夜間の測定では 15 µg/m<sup>3</sup> を超えており、硫酸イオンに近い値であった。

質量濃度から分析対象成分の濃度を差し引いたその他不明分の割合は、7～25 % (平均 21 %) であり、平成 18 年度の PM<sub>2.5</sub> で 29～35 % と比べ改善できた(図 7.3-19、図 7.3-20)。

なお、OC は PM に含まれる有機物中の炭素を測定した値である。有機物には炭素以外に酸素や窒素、水素などが含まれ、一般に PM 中の有機物量は OC として測定された値の 1.4 から 1.5 倍以上と言われている。また、金属成分については酸化物等の化合物として存在しているため、PM の質量バランスを正確に求めるには化合物に換算した質量を用いて構成比を計算する必要がある。そこで、本調査では OC については実測値の 1.5 倍、金属成分についてはすべて鉱物と見なして酸化物としての質量に換算し、PM の構成比を求めた。化合物に換算後の構成比を図 7.3-21 に示す。化合物に換算した場合の有機物、EC、イオン成分、金属酸化物、その他の割合はそれぞれ St.A では平均で 20 %、5.4 %、58 %、2.2 %、14 %、St.B では平均で 22 %、7.1 %、57 %、2.5 %、11 % である。

表 7.3-9 PM<sub>2.5</sub>中の成分分析結果一覧

調査地点			St. A			
調査日			7月26日	7月26日	7月28日	7月28日
昼夜			昼間	夜間	昼間	夜間
質量濃度	PM	μg/m <sup>3</sup>	56	83	40	56
炭素成分	OC	μg/m <sup>3</sup>	7.03	11.09	4.58	8.37
	EC	μg/m <sup>3</sup>	3.28	4.74	1.61	3.14
	TC	μg/m <sup>3</sup>	10.32	15.84	6.19	11.51
イオン成分	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	μg/m <sup>3</sup>	24.2	20.3	17.4	14.8
	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	μg/m <sup>3</sup>	0.2	17.2	0.3	8.0
	Cl <sup>-</sup>	μg/m <sup>3</sup>	<0.05	0.22	<0.05	0.24
	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	μg/m <sup>3</sup>	6.8	12.7	6.0	7.8
	Na <sup>+</sup>	μg/m <sup>3</sup>	0.2	<0.2	0.2	0.2
	Ca <sup>2+</sup>	μg/m <sup>3</sup>	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2
	K <sup>+</sup>	μg/m <sup>3</sup>	<0.2	0.4	<0.2	0.9
金属成分	Na	ng/m <sup>3</sup>	160	110	140	170
	Al	ng/m <sup>3</sup>	<68	140	<68	120
	K	ng/m <sup>3</sup>	87	210	120	670
	Ca	ng/m <sup>3</sup>	<200	300	<200	<200
	V	ng/m <sup>3</sup>	59	22	38	51
	Mn	ng/m <sup>3</sup>	6.3	12	4.8	9.7
	Fe	ng/m <sup>3</sup>	63	110	<56	85
	Ni	ng/m <sup>3</sup>	19	6.5	9.2	17
	Zn	ng/m <sup>3</sup>	35	85	28	92
	As	ng/m <sup>3</sup>	1.3	2.7	1.4	4.2
	Se	ng/m <sup>3</sup>	1.3	1.4	0.92	1.7
W	ng/m <sup>3</sup>	0.25	0.50	0.33	0.67	

調査地点			St. B			
調査日			7月26日	7月26日	7月28日	7月28日
昼夜			昼間	夜間	昼間	夜間
質量濃度	PM	μg/m <sup>3</sup>	59	59	43	54
炭素成分	OC	μg/m <sup>3</sup>	8.18	10.28	5.90	8.19
	EC	μg/m <sup>3</sup>	4.36	5.35	2.44	3.12
	TC	μg/m <sup>3</sup>	12.53	15.64	8.34	11.31
イオン成分	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	μg/m <sup>3</sup>	22.8	20.0	17.1	15.7
	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	μg/m <sup>3</sup>	0.9	7.9	1.0	5.6
	Cl <sup>-</sup>	μg/m <sup>3</sup>	<0.05	<0.05	<0.05	0.13
	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	μg/m <sup>3</sup>	8.3	10.0	6.5	6.9
	Na <sup>+</sup>	μg/m <sup>3</sup>	0.2	<0.2	0.2	0.2
	Ca <sup>2+</sup>	μg/m <sup>3</sup>	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2
	K <sup>+</sup>	μg/m <sup>3</sup>	<0.2	0.4	<0.2	1.3
金属成分	Na	ng/m <sup>3</sup>	180	160	180	200
	Al	ng/m <sup>3</sup>	79	100	<68	160
	K	ng/m <sup>3</sup>	130	290	150	1100
	Ca	ng/m <sup>3</sup>	<200	<200	<200	<200
	V	ng/m <sup>3</sup>	44	24	41	54
	Mn	ng/m <sup>3</sup>	14	17	8.3	14
	Fe	ng/m <sup>3</sup>	180	210	77	160
	Ni	ng/m <sup>3</sup>	17	8.5	14	19
	Zn	ng/m <sup>3</sup>	61	140	43	90
	As	ng/m <sup>3</sup>	1.5	2.4	1.8	3.1
	Se	ng/m <sup>3</sup>	1.9	1.9	1.6	3.0
W	ng/m <sup>3</sup>	0.50	0.52	0.61	0.67	



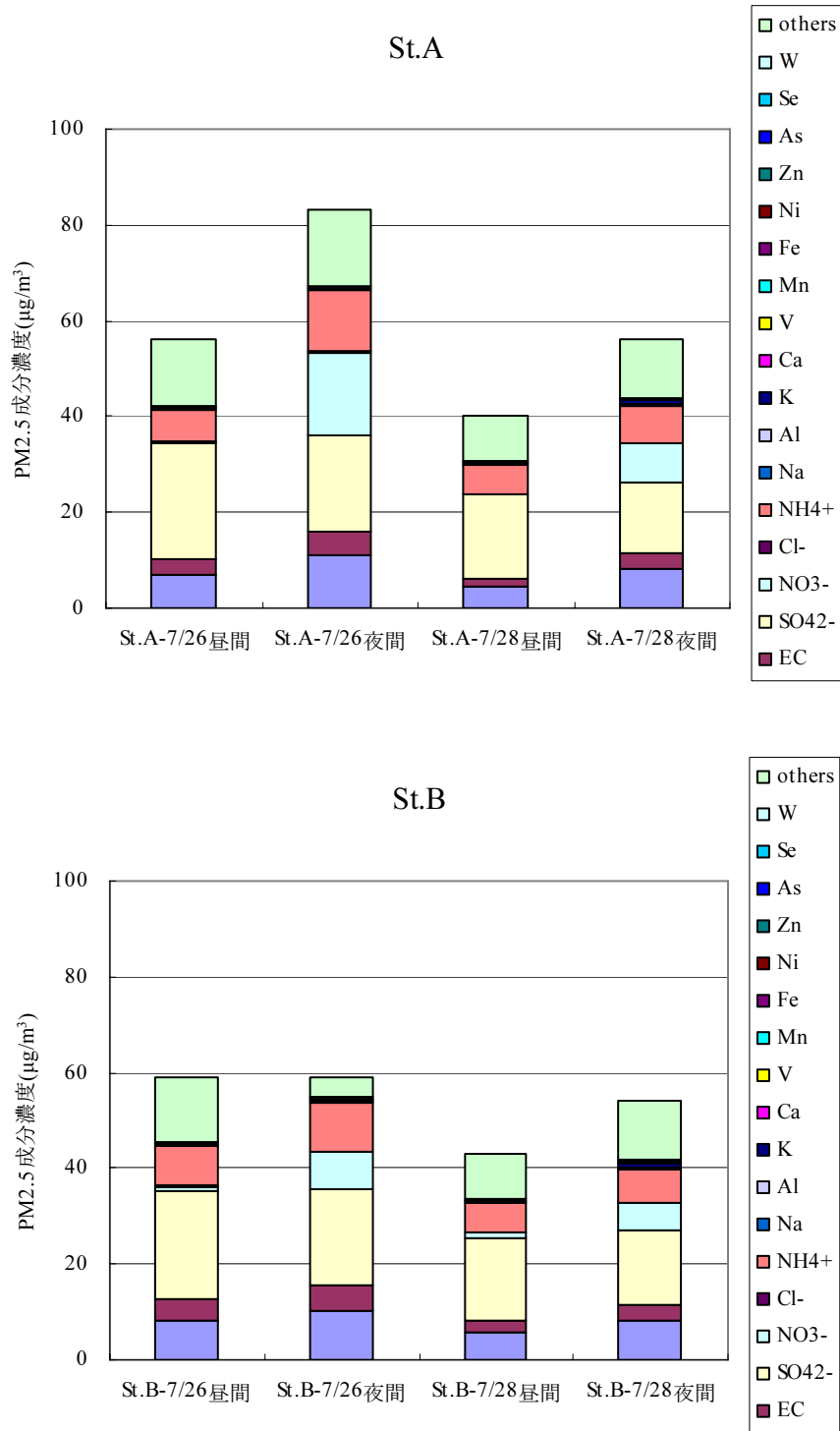


図 7.3-16 PM<sub>2.5</sub>の成分分析結果(成分濃度)

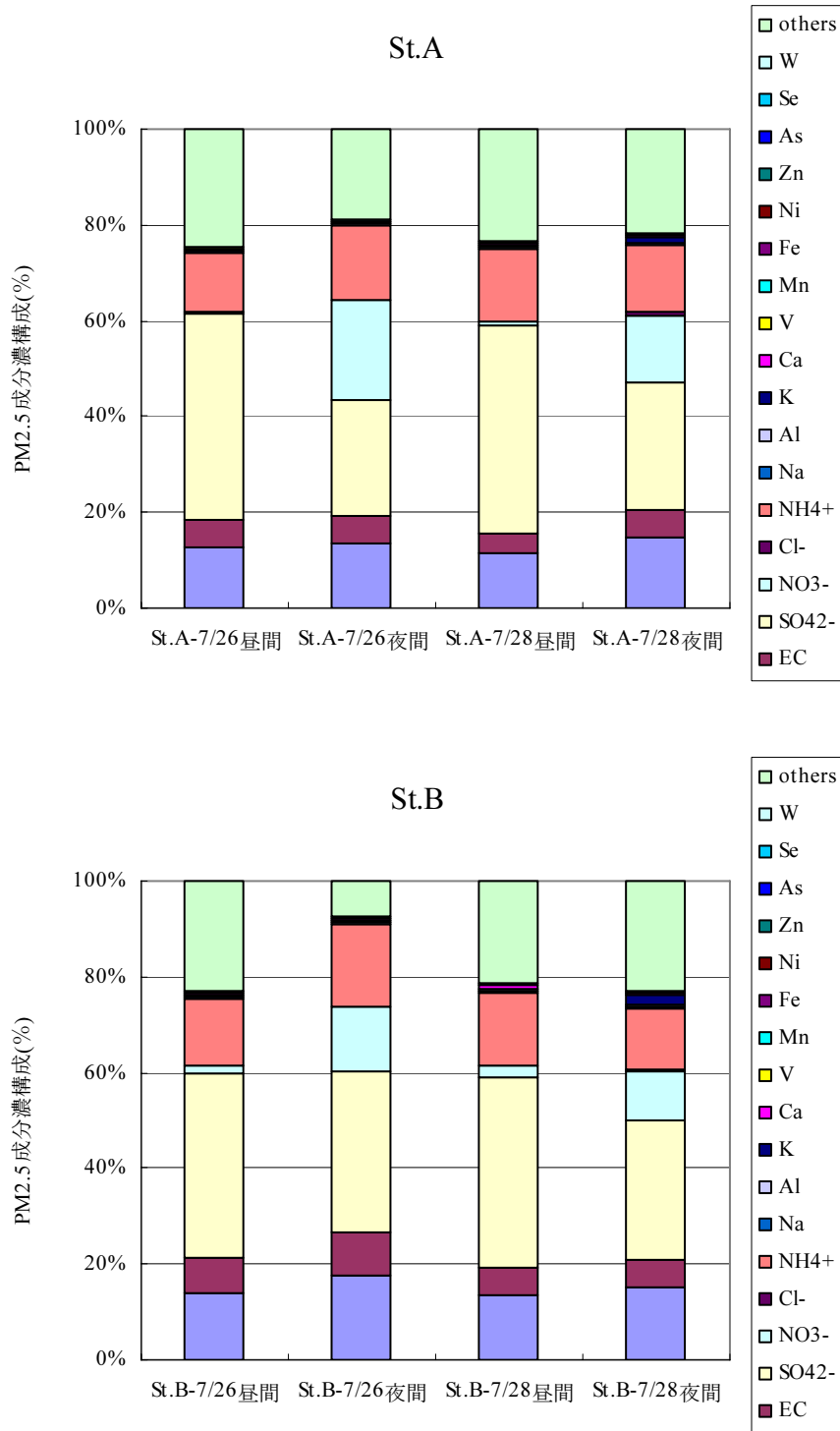


図 7.3-17 PM<sub>2.5</sub>の成分割合

(成分濃度)

(成分割合)

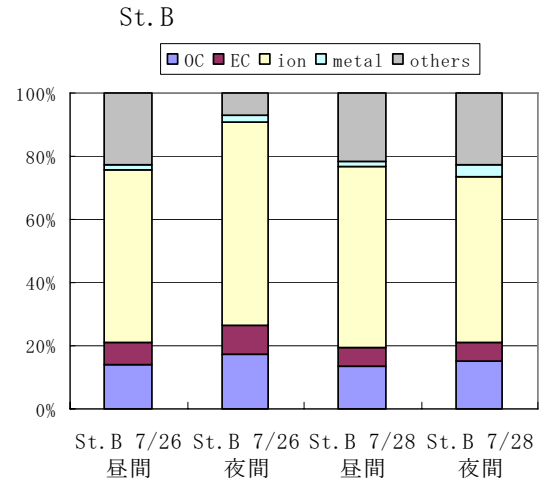
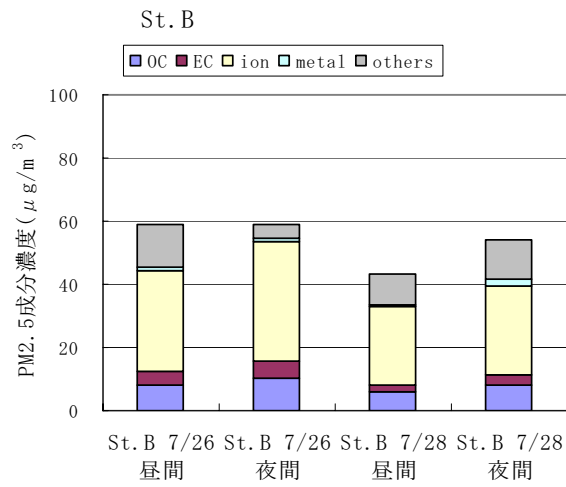
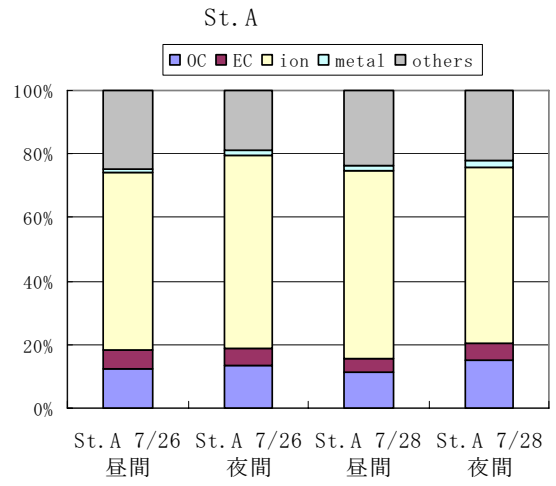
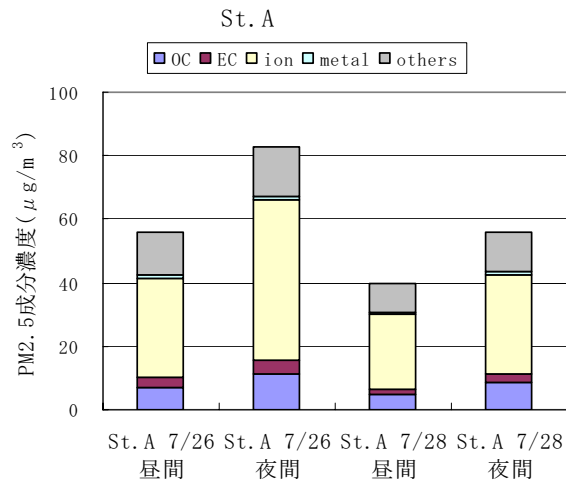
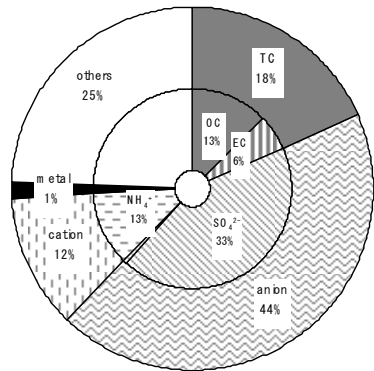


図 7.3-18 PM<sub>2.5</sub>の主な成分濃度および割合

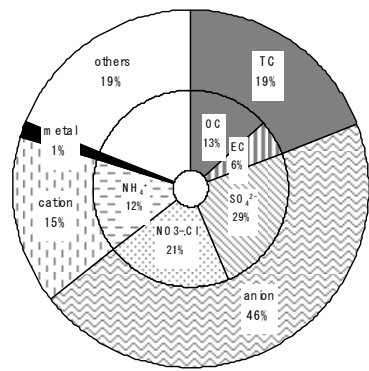
表 7.3-10 硫酸イオン濃度の成分分析結果とサルフェイトモニターによる測定値の比較

( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

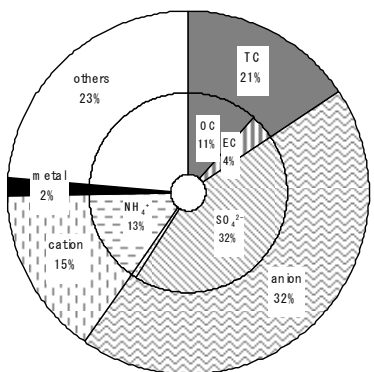
調査地点	測定方法	7月26日	7月26日	7月28日	7月28日	平均
		昼間	夜間	昼間	夜間	
St.A	成分分析	24	20	17	15	19
	サルフェイトモニター	18	25	15	16	19
St.B	成分分析	23	20	17	16	19
	サルフェイトモニター	18	13	17	18	17



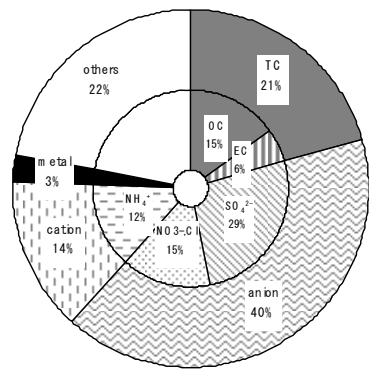
StA-7/26昼間



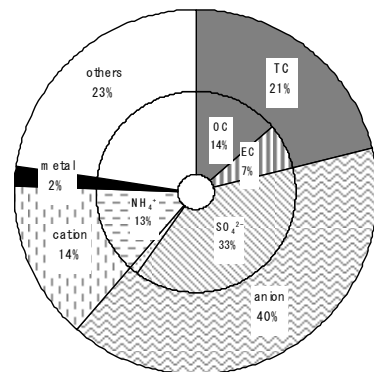
StA-7/26夜間



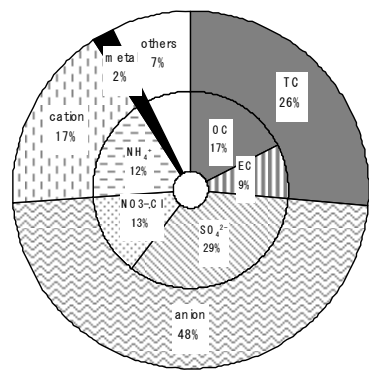
StA-7/28昼間



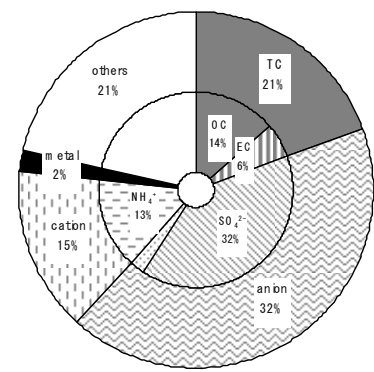
StA-7/28夜間



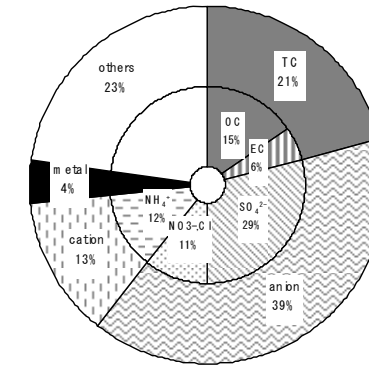
StB-7/26昼間



StB-7/26夜間

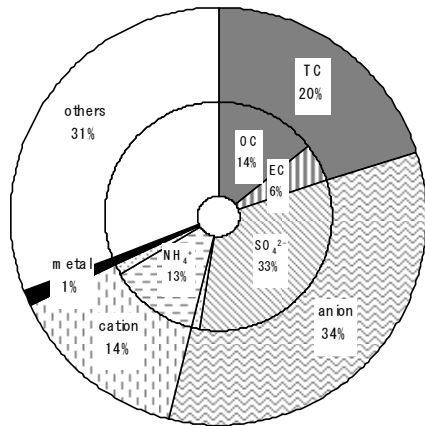


StB-7/28昼間

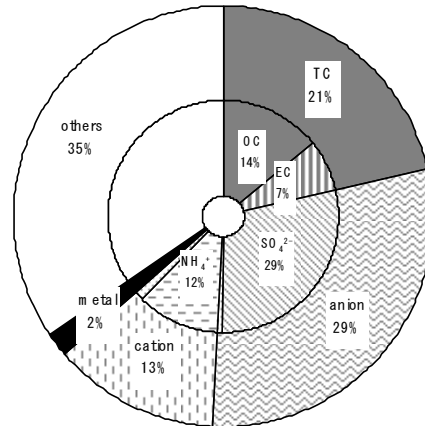


StB-7/28夜間

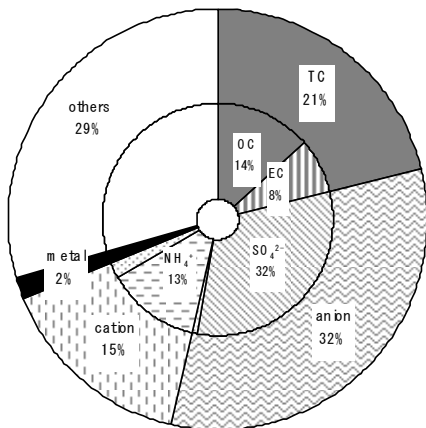
図 7.3-19 平成 19 年度成分分析結果のまとめ(PM<sub>2.5</sub>成分)



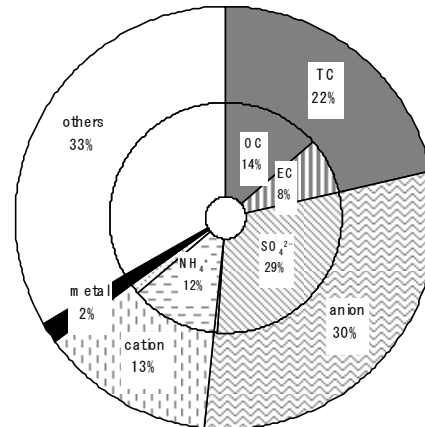
DAKOKU No.3 (8/1-8/2)



DAKOKU No.6 (8/4-8/5)



KASODAI No.3 (8/1-8/2)



KASODAI No.6 (8/4-8/5)

注)平成 18 年度は横浜港を対象に調査している。また PM<sub>2.5</sub> とともに SPM の成分分析も行った。

図 7.3-20 平成 18 年度成分分析結果のまとめ(PM<sub>2.5</sub> 成分)

(分析値による構成比)

(化合物換算後の構成比)

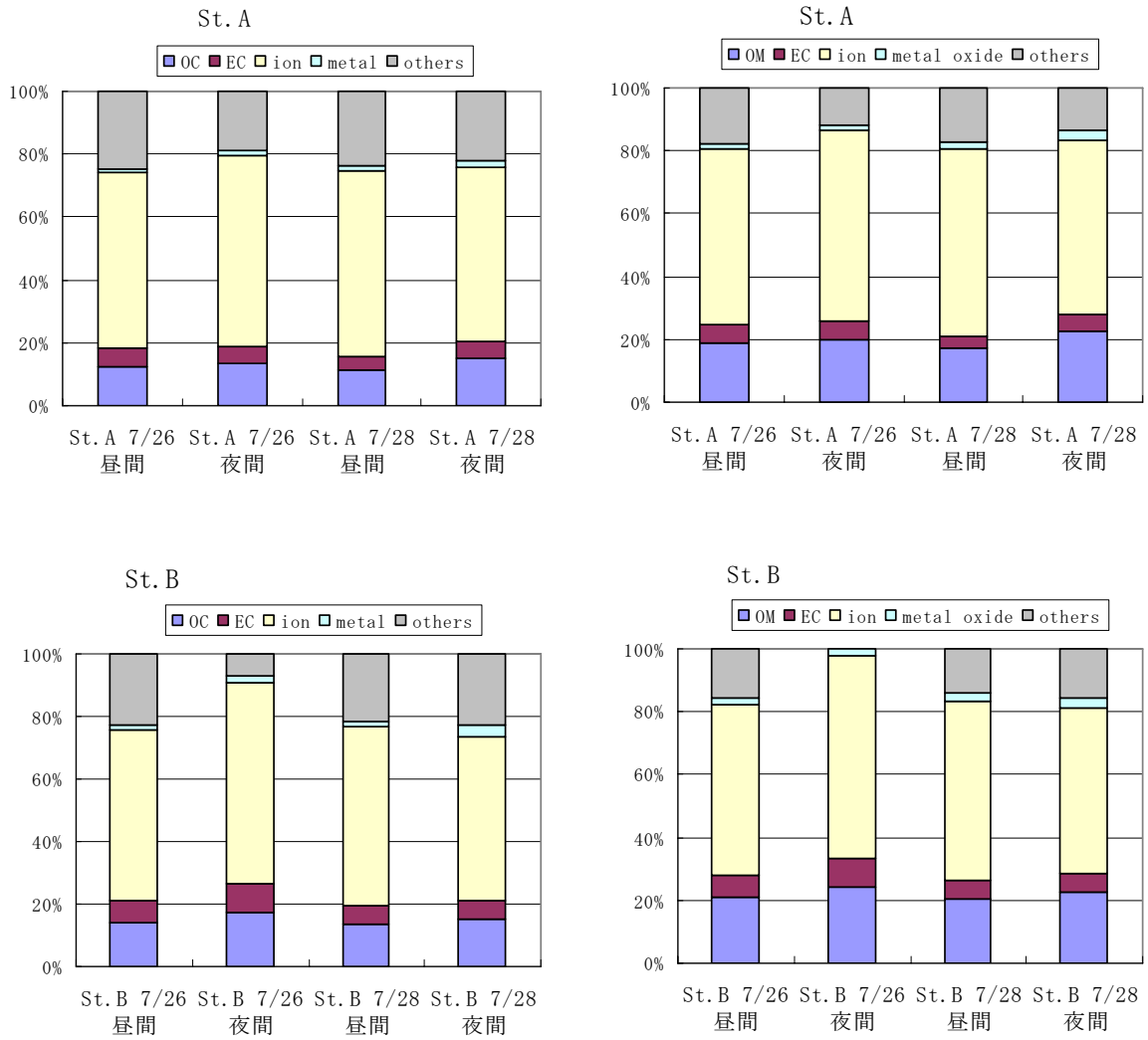


図 7.3-21 PM<sub>2.5</sub>の分析値の構成比と化合物換算後の構成比

#### (4) イオンバランス

イオン成分のイオンバランスを図 7.3-22 および図 7.3-23 に示す。

陰イオン(アニオン)、陽イオン(カチオン)の比率はほぼ 1 : 1 であったが、St.A の 7 月 26 日昼間の測定では、硫酸イオンが過剰となり、陰イオン側に偏っていた。陰イオン側に偏った原因の一つとして、陽イオンと結合していない硫酸ミストが捕集されたことが考えられる。

昼間と夜間を比較すると、陰イオンについては、昼間は硫酸イオンがほとんどであったが、夜間は硝酸イオンが 10~20 % を占めていた。陽イオンについてはアンモニウムイオンが大部分を占めていることから、PM<sub>2.5</sub> のイオン成分はその大部分がアンモニウム塩に由来すると考えられる。

また、カリウムイオンが夜間に高く、特に、7 月 28 日の夜間に高かった。金属成分分析結果でもカリウムは夜間に高く、同様の傾向はアルミニウム、マンガン、鉄、亜鉛、ヒ素、セレン、タンゲステンでもみられた。

#### (5) まとめ

- PM<sub>2.5</sub> に占める主な成分割合は、炭素成分が 15~27 %、硫酸イオンが 20~40 %、アンモニウムイオンが 12~17 %、であった。
- 硝酸イオンは、昼間はわずかであったが、夜間には 10~20 % の高い割合を示した。
- イオンバランスについては、陰イオンと陽イオンのバランスがほぼとれていた。また、日中は硫酸イオンが、夜間には硫酸イオンと硝酸イオンがアンモニウムイオンと結合して粒子を形成していることが示唆された。



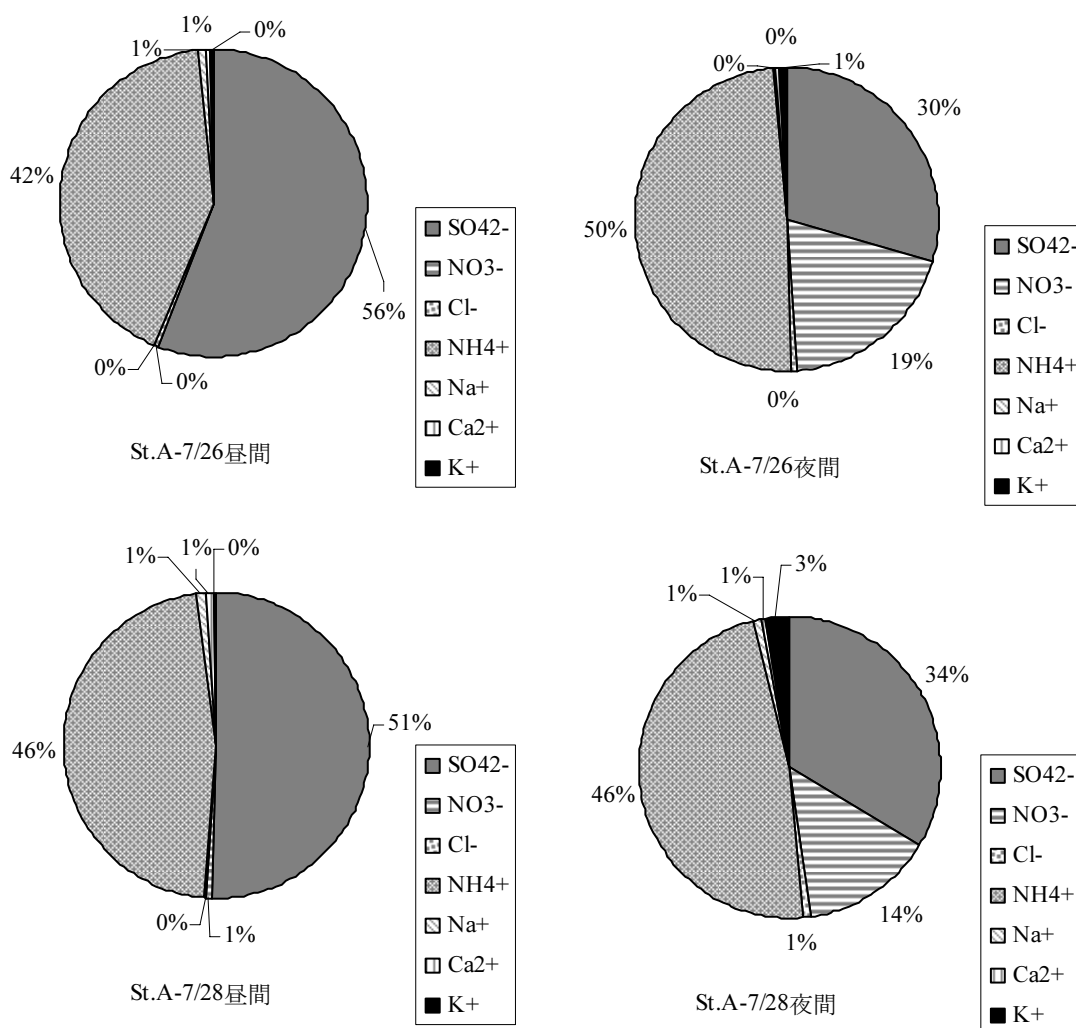


図 7.3-22 イオンバランス(St.A)

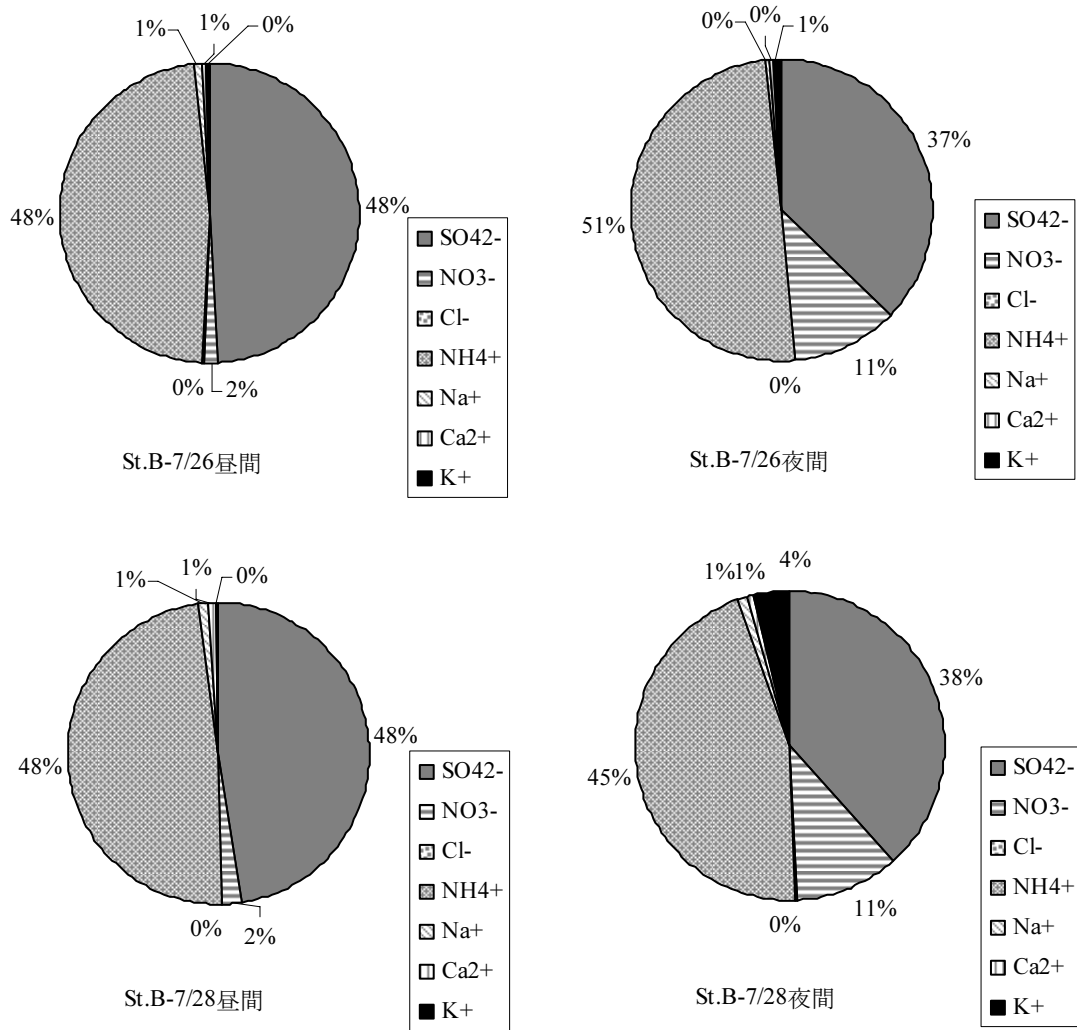


図 7.3-23 イオンバランス(St.B)

## 7.4 船舶排気 PM 調査

### 7.4.1 調査内容

船舶以外の発生源から排出される PM の成分は様々な文献によってある程度判明しているが、船舶については情報が少ない。本調査は船舶起源 PM の成分組成を得ることを目的として、外航コンテナ船および内航貨物船を対象に、停泊時に稼働中のディーゼル発電機から排出される PM を採取し、その成分分析を行って船舶起源一次粒子の代表的な成分組成を作成した。

### 7.4.2 調査時期

平成 19 年 11 月~12 月 (6 日間)

### 7.4.3 調査対象船

港内に停泊中の船舶 6 隻を対象に、補助ディーゼル発電機運転時の排ガス中の PM を煙突口にて採取した。

なお、航行中の 2 サイクル主機機関は、補助ディーゼル発電機とは潤滑油の供給形式が異なり、また使用される燃料に対応してシリンダー油の性状も大きく異なることが知られている。これに伴い両者の PM の成分組成が異なる可能性が十分に考えられる。しかし、港湾域における両者の活動量を考えると、コンテナ船の補助ディーゼル発電機は停泊中の冷凍冷蔵コンテナへの電力供給などで 10 年前に比較して負荷・搭載定格容量の双方で大きくなっているのに対して、主機機関は港湾域内では負荷が 20 %以下に低減していることなどがこれまでの調査から明らかになっている。また、ディーゼル補機からの排ガス量は、主機機関のそれより 50 倍以上になるとの推計結果もある。このことから、本港湾域で排出される船舶由来の PM については、補助ディーゼル発電機からの影響がほとんどであると判断し、本調査では補助ディーゼル発電機のみを調査の対象とした。

対象船の内訳を表 7.4-1 に示す。調査は内航船 6 隻(RFO;Residual Fuel Oil)使用船 4 隻、A 重油使用船 2 隻)を対象に行った。

表 7.4-1 船舶排気 PM 調査対象船

試料採取日	11月26日	12月4日	12月6日	12月14日	12月23日	12月23日
番号	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6
船種	コンテナ	コンテナ	コンテナ	コンテナ	RORO 船	RORO 船
総トン数(GT)	約 50,000	約 50,000	約 50,000	約 75,000	約 4,000	約 7,000
外航/内航	外航	外航	外航	外航	内航	内航
分析試料	排気 PM	排気 PM RFO	排気 PM	排気 PM RFO 潤滑油	排気 PM A 重油 潤滑油	排気 PM A 重油
燃料	種類	RFO	RFO	RFO	RFO	A 重油
	密度 (g/cm <sup>3</sup> ,15°C)	0.9845	0.9902	0.9726	1.0086	0.8678
	動粘度 (mm <sup>2</sup> /s,50°C)	376.4	200	335	441.6	2.359
	S 分 (%)	2.00	1.97	3.21	2.43	0.60

注) 燃料性状試験データ(船社提供資料)による

#### 7.4.4 試料の採取方法

船舶排気 PM については、船舶のディーゼル発電機の運転により排出される PM を煙突口においてフィルターにより採取した。フィルターは、石英フィルターおよびテフロンフィルターを用い、毎分 20 L の吸引速度で、約 10 分間のサンプリングを行った。

燃料および潤滑油については、機関室より直接提供を受けた。

#### 7.4.5 分析項目および分析方法

成分分析の項目および分析方法は、大気中 PM 調査と同様とした(「PM<sub>2.5</sub>成分分析」参照)。

なお、大気中 PM 調査は粒径 2.5 μm 以下の粒子(微小粒子)を対象に採取している。一方、船舶排気 PM 調査は、粒径 2.5 μm より大きな粒子も含む全粒径(微小粒子+粗大粒子)の粒子を採取しており、両方で採取した PM の粒径範囲が異なると考えられる。しかし、燃料の燃焼に伴い排出される PM は大部分が粒径 2.5 μm 以下であると考えられることから、粒径範囲によって成分組成が異なる影響は小さいものと考えられる。

#### 7.4.6 PM 成分の分析結果

船舶排気 PM の成分分析結果を表 7.4-2 および表 7.4-3 に示す。

成分別に見ると炭素成分が約 30～50 %を占め、また TC に占める EC の割合は 30～80 %であった。イオン成分は数%～数十%と船舶による違いが大きく、成分別には  $\text{SO}_4^{2-}$  が最も多く No.3 では 46 %を占めていた。また、金属成分は 0.5 %～10 %弱の範囲にあり、イオン成分が比較的少なかった No.2 と No.5 は金属成分も少なかった。なお、 $\text{SO}_4^{2-}$  の割合が希釈法を用いた PM の採取における成分分析結果と比較して低い。希釈法では 53℃以下に冷却した状態で採取するのに対して、本調査では高温状態で煙突排気口から直接採取しているため、希釈法においては粒子として採取される  $\text{SO}_4^{2-}$  の一部が本測定条件下においては未だガス状で存在しフィルターを通過してしまうことに起因していると考えられる。

RFO 使用船と A 重油使用船を比較すると、炭素成分については本調査の結果からは燃料の種類による違いは認められなかった。一方、イオン成分については A 重油使用船よりも RFO 使用船で  $\text{SO}_4^{2-}$  の割合が高く、燃料中の硫黄分の違いを反映した結果と考えられる。また、金属成分については、重油の指標成分であるバナジウム、ニッケルは RFO 使用船で割合が高く、反対にカルシウムや亜鉛は A 重油使用船で割合が高かった。

なお、OC は PM に含まれる有機物中の炭素を測定した値であり、有機物には炭素以外に酸素や窒素、水素などが含まれる。また、金属成分については酸化物等の化合物として存在しているため、PM の質量バランスを正確に求めるには化合物に換算した質量を用いて構成比を計算する必要がある。そこで、本調査では OC については実測値の 1.5 倍、金属成分についてはすべて鉱物と見なして酸化物としての質量に換算し、PM の構成比を求めた。化合物に換算後の構成比を表 7.4-4 に示す。化合物に換算した場合の成分割合は、有機物 11.1～44.6 %、EC 16.6～39.1 %、イオン成分 3.7～44.2 %、金属酸化物 0.8～13.6 %、その他 5.5～45.2 %である。

表 7.4-2 船舶排気 PM の主要成分構成(概要)

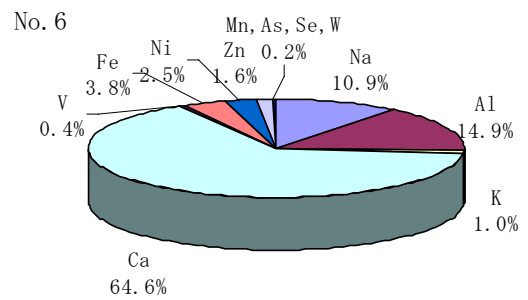
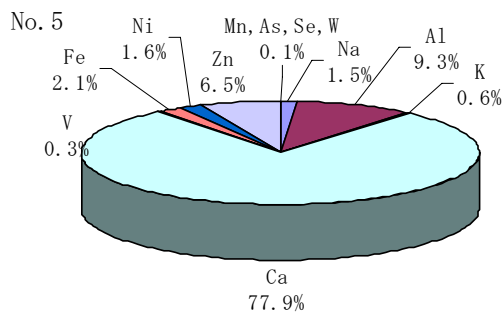
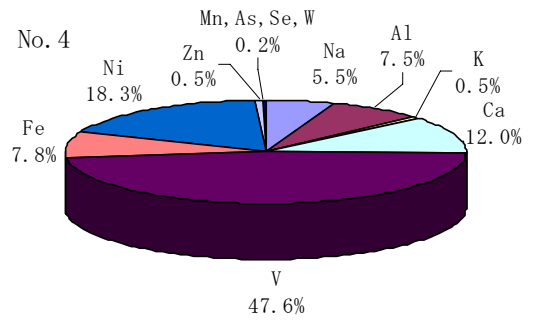
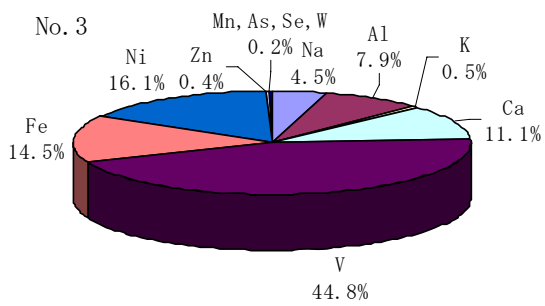
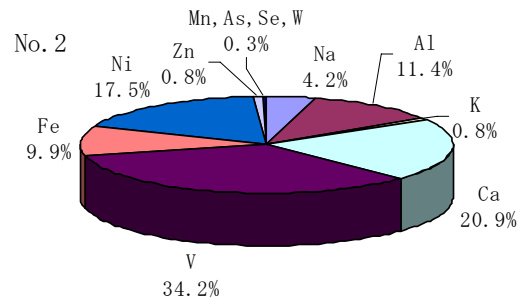
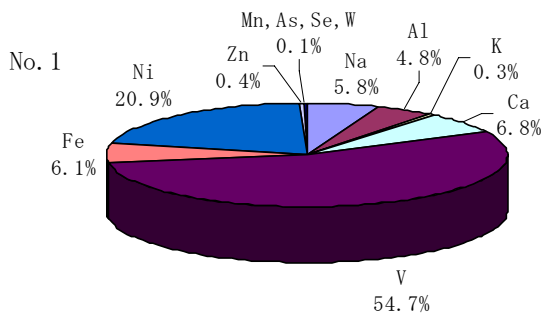
(%)

項目	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6
	RFO	RFO	RFO	RFO	A 重油	A 重油
有機炭素(OC)	22.9	7.4	15.2	16.9	29.8	8.5
元素状炭素(EC)	17.1	39.1	16.6	30.8	13.9	30.1
イオン成分(ion)	16.2	3.7	44.2	23.5	5.8	24.4
金属成分(metal)	8.5	0.5	6.8	5.2	2.3	8.0
小計	64.7	50.8	82.8	76.5	51.8	71.0
不明分(others)	35.3	49.2	17.2	23.5	48.2	29.0
合計	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

表 7.4-3 船舶排気 PM の主要成分構成

(%)

項目		No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	RFO	A 重油
燃料 性状	種類	RFO	RFO	RFO	RFO	A 重油	A 重油	平均	平均
	硫黄分	2.0	2.0	3.2	2.4	0.6	0.3	2.4	0.45
	密度	0.9845	0.9902	0.9726	1.0086	0.8678	0.8731	0.9890	0.8705
	動粘度	376.4	200	335	441.6	2.359	2.472	338.3	2.4
炭 素 成 分	有機炭素 OC	22.9	7.4	15.2	16.9	29.8	8.5	15.6	19.1
	元素状炭素 EC	17.1	39.1	16.6	30.8	13.9	30.1	25.9	22.0
	全炭素 TC	40.0	46.5	31.8	47.8	43.7	38.6	41.5	41.2
	元素状炭素/全炭素 EC/TC	42.8	84.0	52.2	64.5	31.9	77.9	62.4	53.5
イ オ ン 成 分	硫酸イオン $\text{SO}_4^{2-}$	14.9	2.7	42.4	22.2	5.1	20.5	20.6	12.8
	硝酸イオン $\text{NO}_3^-$	<1.0	0.9	<1.4	<1.0	<0.5	<3.0	1.1	1.8
	塩素イオン $\text{Cl}^-$	<0.2	0.1	<0.2	<0.2	<0.1	<0.5	0.2	0.3
	アンモニウムイオン $\text{NH}_4^+$	<0.1	<0.0	<0.2	<0.1	<0.1	<0.4	0.1	0.2
	ナトリウムイオン $\text{Na}^+$	0.4	0.1	0.7	1.0	0.1	2.1	0.5	1.1
	カルシウムイオン $\text{Ca}^{2+}$	<0.7	0.1	<0.9	0.7	0.4	2.0	0.6	1.2
	カリウムイオン $\text{K}^+$	<0.2	<0.3	<0.2	<0.9	<1.3	<5.4	0.4	3.4
金 属 類	ナトリウム Na	0.492	0.022	0.307	0.286	<0.035	0.873	0.277	0.454
	アルミニウム Al	<0.410	<0.060	<0.542	<0.390	<0.216	<1.190	0.350	0.703
	カリウム K	<0.027	<0.004	<0.036	<0.026	<0.014	<0.079	0.023	0.047
	カルシウム Ca	<0.574	0.109	<0.758	0.624	1.802	5.159	0.516	3.481
	バナジウム V	4.645	0.179	3.069	2.471	0.008	0.035	2.591	0.021
	マンガン Mn	0.004	0.001	0.005	0.004	<0.001	0.004	0.003	0.002
	鉄 Fe	0.519	0.052	0.993	0.403	<0.048	0.306	0.492	0.177
	ニッケル Ni	1.776	0.091	1.101	0.949	<0.037	<0.202	0.979	0.120
	亜鉛 Zn	0.033	0.004	0.031	0.027	0.151	0.131	0.024	0.141
	ヒ素 As	0.001	0.000	0.001	0.001	<0.000	<0.001	0.001	0.000
	セレン Se	0.005	0.000	0.001	0.002	<0.000	<0.000	0.002	0.000
	タングステン W	<0.003	<0.000	<0.003	<0.002	<0.001	<0.008	0.002	0.004



注) No.1~4 : RFO 使用、No.5~6 : A 重油使用

図 7.4-1 金属成分のみの構成比

表 7.4-4 化合物換算後の PM の主要成分構成比

(%)

項目	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6
	RFO	RFO	RFO	RFO	A 重油	A 重油
有機物(OM)	34.3	11.1	22.8	25.4	44.6	12.8
元素状炭素(EC)	17.1	39.1	16.6	30.8	13.9	30.1
イオン成分(ion)	16.2	3.7	44.2	23.5	5.8	24.4
金属酸化物 (metal oxide)	13.6	0.8	10.9	8.3	3.3	11.7
小計	81.3	54.8	94.5	88.0	67.7	79.0
不明分(others)	18.7	45.2	5.5	12.0	32.3	21.0
合計	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0



#### 7.4.7 燃料成分の分析結果

燃料および潤滑油の成分分析結果を表 7.4-5 に示す。

RFO と A 重油を比較すると、RFO はバナジウムとニッケルが多く、PM の成分分析結果とよく一致していた。一方、A 重油はほとんどの項目で RFO に比べ低濃度であった。

また、潤滑油は燃料と比較してカルシウムと亜鉛の割合が高かった。

前述したように PM 中のカルシウムと亜鉛の割合は RFO 使用船に比べて A 重油使用船で高いが、その理由として、潤滑油に含まれるカルシウムおよび亜鉛が排ガス中の PM に含まれていたことが考えられる。

表 7.4-5 船用燃料及び潤滑油の金属成分分析結果

( $\mu\text{g/g}$ )

分析対象		燃料				潤滑油	
		2	4	5	6	4	5
船舶 No		RFO	RFO	A 重油	A 重油	RFO	A 重油
使用燃料		RFO	RFO	A 重油	A 重油	RFO	A 重油
ナトリウム	Na	<10	29	<10	<10	17	<10
アルミニウム	Al	<30	<30	<30	<30	<30	<30
カリウム	K	<10	<10	<10	<10	<10	<10
カルシウム	Ca	<100	140	<100	<100	4500	3200
バナジウム	V	67	140	0.82	0.91	38	1.2
マンガン	Mn	<0.25	0.27	<0.25	<0.25	1.3	0.31
鉄	Fe	16	34	<10	<10	25	11
ニッケル	Ni	37	55	<0.25	0.29	15	0.72
亜鉛	Zn	1.8	2.7	<1.5	1.6	300	400
ヒ素	As	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
セレン	Se	<1.5	<1.5	<1.5	<1.5	<1.5	<1.5
タングステン	W	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5

また、燃料中の金属成分と排ガス中 PM の金属成分の測定結果から、燃料に含まれる金属が PM として捕集された割合を試算した。

試算結果を表 7.4-6 に示す。燃料中の金属類に対する PM 中の金属類の割合、すなわち捕集率はおおむね数十%以上であった。本調査では排出口前面で PM をサンプリングしたため、サンプリング中の外気の引き込みなどにより、捕集率が数十%程度にとどまった可能性が考えられる。なお、No.1 および No.3 では燃料の成分を測定していないため、No.2 と No.4 の燃料中の金属成分の平均値を用いて捕集率を計算した。No.1 ではバナジウムの捕集率が 100%を超えていたが、その原因の一つとして、実際に No.1 で使われていた燃料中のバナジウムが No.2 と No.4 の平均値よりも高かったことが考えられる。

東京湾における係留時のバナジウムおよびニッケルの排出量を燃料消費量(280.4 千トン、(本報告書「6.2.11 大気汚染物質の排出量算定結果」参照))を用いて試算すると、全隻が RFO を使用した場合の排出量はバナジウム 19~39t、ニッケル 10~15t、全隻が A 重油を使用した場合の

排出量はバナジウム 0.2~0.3t、ニッケル 0.1t となり、使用する燃料の種類によってバナジウムなどの重金属類の排出量が大きく変わることが示唆された。

表 7.4-6 燃料中金属成分と PM 中金属排出量の比較

項目	No.1			No.2		
	燃料中 金属(1) (mg/kg)	PM 中 金属(2) (mg/kg)	(2)/(1) (%)	燃料中 金属(1) (mg/kg)	PM 中 金属(2) (mg/kg)	(2)/(1) (%)
Na	20	13	64.1	10	3	34.9
Ca	120	15	12.2	100	17	17.4
V	104	118	114.1	67	29	42.6
Fe	25	13	52.8	16	8	51.5
Ni	46	45	98.1	37	15	39.4
Zn	2	1	37.0	2	1	38.7

項目	No.3			No.4		
	燃料中 金属(1) (mg/kg)	PM 中 金属(2) (mg/kg)	(2)/(1) (%)	燃料中 金属(1) (mg/kg)	PM 中 金属(2) (mg/kg)	(2)/(1) (%)
Na	20	6	29.9	29	7	24.7
Ca	120	14	12.0	140	16	11.2
V	104	58	56.2	140	62	44.3
Fe	25	19	75.3	34	10	29.7
Ni	46	21	45.4	55	24	43.3
Zn	2	1	25.9	3.0	1	25.4

注) 1. A 重油の燃料は定量下限値未満が多いため、RFO 使用船の比較のみを示した。

2. 燃料の実測は No.2、No.4 で行っている。No.1 と No.3 は実測した No.2、No.4 の 2 隻の平均値を用いた。

**【PM 中金属成分排出量の推定式】**

$$\text{推定排出ガス量(m}^3\text{/kg-fuel)} = \text{排出ガス係数(m}^3\text{N/L-fuel)} / \text{密度(kg/L-fuel)} \\ \times (273.15 + \text{排出ガス温度(}^\circ\text{C)}) / 273.15 \times 21 / (21 - \text{O}_2)$$

ここで、

排出ガス係数 : 12.2 m<sup>3</sup>N/L-fuel (RFO)

比重、排出ガス温度 : No.2 0.9902 、262°C

No.4 1.0086 、288°C

O<sub>2</sub> : 13 %

$$\text{PM 中金属成分排出量(}\mu\text{g/kg-fuel)} = \text{推定排出ガス量(m}^3\text{/kg-fuel)} \times \text{採取ガス中金属濃度(}\mu\text{g/ m}^3\text{)}$$

ここで、

$$\text{採取ガス中の金属濃度(}\mu\text{g/ m}^3\text{)} = \text{採取 PM 中の金属量(}\mu\text{g)} / \text{採取ガス量(m}^3\text{)}$$

注) 排出ガス係数は「窒素酸化物総量規制マニュアル(新版)」による。

## 7.4.8 船舶からの寄与割合の検討

### (1) 発生源別成分組成の設定

本調査結果および既存資料をもとに、CMB 計算に用いる発生源別成分組成の設定を行った。設定結果は表 7.4-7 のとおりである。なお、船舶排ガス中の PM には水分が多く含まれている。CMB 計算に成分組成を用いるには水分の影響を取り除く必要があり、本調査では質量バランスから求めた不明成分(表 7.4-4 参照)が水分であると仮定して、各成分の分析値に対して RFO は 1.5 倍、A 重油船は 1.6 倍した値から CMB 計算用の組成比を設定した。

船舶の成分組成は、本調査における船舶排出ガス中の PM の成分分析結果から、燃料種類ごとに平均値を算出しこれを組成比として設定した。また、誤差については標準偏差を用いることが考えられるが、測定した船舶の数が少なく測定結果のばらつきが大きかったため、本調査では一律 30%と設定した。

船舶以外の主要発生源は、環境省や地方自治体などで発生源の特定を行う際に多く用いられている道路堆積物、海塩、鉄鋼工業、石油系燃焼ボイラー、廃棄物焼却、自動車排気とした。

成分組成としては、EC は自動車排気、Na は海塩、Al、Ca は道路堆積物や鉄鋼工業、K は廃棄物焼却、V、Ni は石油系燃焼ボイラーや船舶、Fe、Mn、Zn は鉄鋼工業のそれぞれ指標成分として選定した。

なお、OC は二次粒子として生成される割合が都市域では比較的高いと考えられるため、CMB 計算からは除外した。また、金属成分については 12 成分を測定したが、CMB 計算には「平成 16 年度浮遊粒子状物質合同調査報告書」(2006 年 3 月 関東地方環境対策推進本部大気環境部会浮遊粒子状物質調査会議)で発生源の検討に用いられている項目(Na、Al、Ca、K、V、Mn)を参考に 9 成分を選定した。

ただし、鉄鋼工業、廃棄物焼却、石油系燃焼ボイラーの成分組成は、20 数年前の測定値である。特に、石油系燃焼ボイラーの成分組成は A、B、C 重油燃焼を併せたものであり、現在の A 重油燃焼がほとんどである状況とは異なると考えられるため注意が必要である。

表 7.4-7 発生源別の成分組成

成分	船舶RFO		船舶A重油		道路堆積物		海塩		鉄鋼工業		石油系燃焼 ボイラー		廃棄物焼却		自動車排ガス	
	比率	誤差	比率	誤差	比率	誤差	比率	誤差	比率	誤差	比率	誤差	比率	誤差	比率	誤差
元素炭素	362,725	108,817	327,700	98,310	10,800	0	0.00000	0.00000	5,000	5,000	500,000	250,000	50,000	50,000	494,000	49,400
ナトリウム	2,630	789	2,810	843	10,200	500	304,000	15,200	13,600	2,720	10,000	5,000	120,000	12,000	76.4	7.6
アルミニウム	526	158	562	169	57,000	3000	0.3	0.00000	9990	2000	2100	1100	4200	840	1,570	157
カリウム	268	80	541	162	11,196	600	11,000	1,100	13,200	2,640	850	850	200,000	20,000	197	19.7
カルシウム	6,227	1,868	48,789	14,637	52,044	3000	11,700	585	45,100	9,020	850	430	11,000	2,200	1,460	146
バナジウム	23,768	7,130	266	80	140	7	0.10000	0.00000	125	25	4600	2300	27	13.5	7.3	0.7
マンガン	39	12	27	8	1,044	50	0.10000	0.00000	22,000	2,200	120	40	330	330	19.3	1.9
鉄	4,829	1,449	1,944	583	50,841	2,000	0.30000	0.00000	157,000	15,700	4600	2300	6,100	6,100	989	98.9
ニッケル	9,629	2,889	1,380	414	0	0	0.00000	0.00000	2,900	2,900	2500	1250	0	0	9.9	1.0
亜鉛	279	84	2,253	676	986.8	50	0.00000	0.00000	51,500	10,300	400	200	26,000	13,000	624	62.4

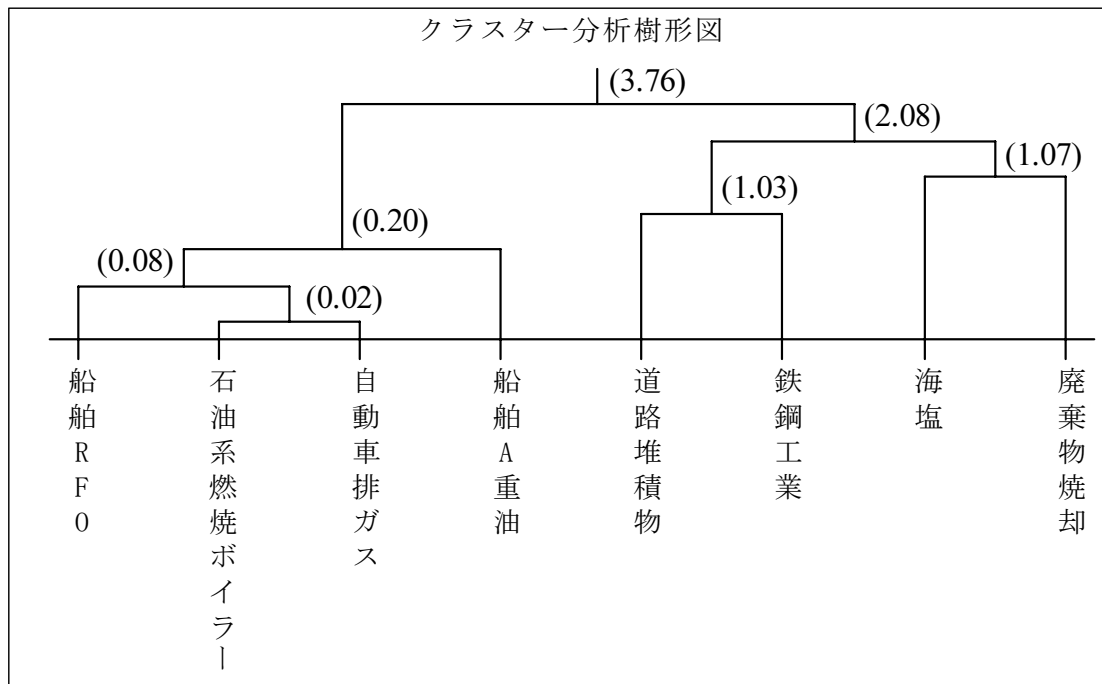
注) 1. 船舶の構成比は本調査結果による (RFO: No.1~4、A重油: No.5~6の平均値とし、誤差は平均値の30%とした)。なお、AIについては石油系ボイラーの組成を参考に、Naの値の20%として設定した。

2. 船舶以外の発生源は、「粒子状物質総量削減計画に係る粒子状物質実態調査(平成13年11月 環境省環境管理局) P.65」による。

## (2) 本調査で用いた発生源プロファイルのクラスター分析

発生源別成分組成が各発生源を特徴付けるものとして利用可能かどうかを判断するため、まず発生源間の類似性についてクラスター分析\*1を行った。

クラスター分析結果は、図 7.4-2 のとおりである。石油燃焼系の船舶、石油系燃焼ボイラー、自動車排出ガスは PM の成分組成が比較的近く、特に、自動車排出ガスと石油系燃焼ボイラーが類似しており、CMB 計算を行った場合、石油燃焼系の寄与をうまく分離できない可能性が考えられる。



注：( )内の数字はユークリッド距離\*2

図 7.4-2 PM 発生源別成分構成比のクラスター分析結果

### \*1 クラスター分析

クラスター分析は、対象となるデータ群を数学的に類似しているサンプル同士で順次グルーピングする方法の総称である。クラスター分析の結果は、データ群の類似性を視覚的に示すデンドログラム(樹形図)として表現される。

### \*2 ユークリッド距離

データ群の類似性の判定基準はいくつかあるが、取扱が容易なユークリッド距離が良く用いられる。ユークリッド距離は異なるデータ群間で要素の差の2乗和を、その異なるデータ間の距離の指標とするもので、それが近いほど2つのデータ群は類似している指標となる。

### (3) 本調査で実施した CMB 計算手法

表 7.4-7 のとおり設定した発生源別組成を用いて、CMB 計算により港湾地域における大気中 PM 濃度(一次粒子の濃度)に対する船舶の寄与を検討した。なお、本調査で得られた船舶排気 PM の成分組成は、船舶によって大きく異なっており、成分組成の代表性が確保されていない可能性はあるが、ここでは、試みとして測定値の平均値を用い CMB 計算により船舶の寄与率を試算した。

#### (a) 基本式

CMB 計算の基本的な考え方は以下のとおりである。

環境大気中で観測される PM の成分  $i$  の質量濃度  $C_i$  は、発生源別の成分  $i$  の質量濃度を重ね合わせたものと仮定する。発生源  $j$  の成分  $i$  の質量濃度は、発生源  $j$  粒子の成分  $i$  の含有率  $F_{ij}$  に、測定点にもたらされる発生源  $j$  からの寄与濃度  $S_j$  を掛け合わせたものになる。これを式に示すと次のようになり、この考え方に基づいて各発生源の寄与を求めている。

$$C_i = \sum_{j=1}^N F_{ij} \cdot S_j \quad (i = 1 \sim M) \cdots \cdots \text{(式 1)}$$

- ここで、
- $M$  : 成分数
  - $N$  : 発生源数
  - $C_i$  : 環境大気中で観測される PM の成分  $i$  の質量濃度( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
  - $F_{ij}$  : 発生源  $j$  粒子の成分  $i$  の含有率
  - $S_j$  : 発生源  $j$  からの寄与濃度( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

#### (b) CMB 計算の方法

測定された化学成分数  $M$  が発生源数  $N$  と同数以上であると、それぞれの発生源の寄与濃度  $S_j$  は、(式 1)の連立方程式を解いて求めることができる。

CMB の解析手法としては指標元素法、線形計画法、最小二乗法、重み付き最小二乗法などの手法があるが、本調査の CMB 計算では、測定誤差を計算に反映することができる重み付き最小二乗法を用いることとした。

#### 【重み付き最小二乗法】

最小二乗法は、環境大気中の成分別質量濃度  $C_i$  についての残差二乗和  $\chi^2$ (式 2)を最小にする寄与濃度  $S_j$  の組を求める方法である。

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^M (C_i - \sum_{j=1}^N F_{ij} \cdot S_j)^2 \quad \cdots \cdots \text{(式 2)}$$

- ここで、 $M$ 、 $N$ 、 $C_i$ 、 $F_{ij}$ 、 $S_j$  : (式 1)に同じ
- $\chi^2$  : 残差二乗和

環境大気 PM の化学成分データは個別の測定誤差を伴い、計算に際して測定誤差を考慮する場合、残差二乗和  $\chi^2$  は(式 2)の代わりに(式 3)とする。ここでは、環境大気中で観測された PM の成分  $i$  の質量濃度  $C_i$  と、発生源の寄与濃度  $S_j$  と成分  $i$  の含有率  $F_{ij}$  とから算出される質量濃度の総和とが同等の誤差を持つと仮定している。

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^M \frac{1}{\sigma_{C_i}^2} (C_i - \sum_{j=1}^N F_{ij} S_j)^2 \quad \dots \dots \dots \text{(式 3)}$$

$\sigma_{C_i}$  :  $C_i$  の標準偏差

残差二乗和  $\chi^2$  が最小になるのは、残差二乗和  $\chi^2$  を寄与濃度  $S_j$  で偏微分しその結果がゼロとなる場合(式 4)である。この条件を解くことで寄与濃度  $S_j$  の組が求められる(式 5)。

$$\frac{\partial \chi^2}{\partial S_j} = 0 \quad (j=1 \sim N) \quad \dots \dots \dots \text{(式 4)}$$

$$S = (F \cdot W \cdot F)^{-1} \cdot {}^t F \cdot W \cdot C \quad \dots \dots \dots \text{(式 5)}$$

ここで、 $C$  :  $C_i(i=1 \sim M)$  を要素とする  $i \times 1$  行列

$S$  :  $S_j(j=1 \sim N)$  を要素とする  $j \times 1$  行列

$F$  :  $F_{ij}(i=1 \sim M, j=1 \sim N)$  を要素とする  $M \times N$  行列

$W$  :  $(1/\sigma_{C_i})^2(i=1 \sim M)$  を対角成分にもつ  $M \times M$  正方行列

${}^t F$  :  $F$  の転置行列

$( )^{-1}$  : 逆行列

#### (4) CMB 計算に用いる環境濃度

CMB 計算に用いる環境濃度測定結果を表 7.4-8 に示す。

誤差は測定誤差を考慮して下記のとおり設定した。

(測定誤差の設定方法)

金属成分については測定値が定量下限値の 10 倍以上の場合は測定値の 10% を誤差とし、測定値が定量下限値の 10 倍未満の場合には定量下限値を誤差とした。また、炭素成分については測定時の誤差を測定値の 20% とした。

なお、環境省の調査事例「平成 15 年度 浮遊粒子状物質成分別環境濃度解析調査報告書」(2004 年 3 月 (財)日本気象協会)における測定誤差は、EC で約 5%、Ca で 40%、V で 3~9%、他の成分は 10% 前後に設定されており、本調査での測定誤差と比較すると、本調査の誤差の方が大きく設定されている傾向にある。

表 7.4-8 CMB 計算に使用する環境濃度測定結果

St.A

( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

項目	7月26日				7月28日			
	昼間		夜間		昼間		夜間	
	測定値	誤差	測定値	誤差	測定値	誤差	測定値	誤差
EC	3.283	0.657	4.744	0.949	1.612	0.322	3.138	0.628
Na	0.160	0.054	0.110	0.054	0.140	0.054	0.170	0.054
Al	0.068	0.068	0.140	0.068	0.068	0.068	0.120	0.068
K	0.087	0.057	0.210	0.057	0.120	0.057	0.670	0.067
Ca	0.200	0.200	0.300	0.200	0.200	0.200	0.200	0.200
V	0.059	0.006	0.022	0.002	0.038	0.004	0.051	0.005
Mn	0.006	0.001	0.012	0.001	0.005	0.000	0.010	0.001
Fe	0.063	0.056	0.110	0.056	0.056	0.056	0.085	0.056
Ni	0.019	0.006	0.007	0.006	0.009	0.006	0.017	0.006
Zn	0.035	0.015	0.085	0.015	0.028	0.015	0.092	0.015

St.B

( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

項目	7月26日				7月28日			
	昼間		夜間		昼間		夜間	
	測定値	誤差	測定値	誤差	測定値	誤差	測定値	誤差
EC	4.358	0.872	5.347	1.069	2.438	0.488	3.117	0.623
Na	0.216	0.073	0.148	0.073	0.189	0.073	0.229	0.073
Al	0.128	0.128	0.264	0.128	0.128	0.128	0.227	0.128
K	0.105	0.069	0.253	0.069	0.145	0.069	0.807	0.081
Ca	0.280	0.280	0.420	0.280	0.280	0.280	0.280	0.280
V	0.105	0.011	0.039	0.004	0.068	0.007	0.091	0.009
Mn	0.008	0.001	0.015	0.002	0.006	0.001	0.013	0.001
Fe	0.090	0.080	0.157	0.080	0.080	0.080	0.122	0.080
Ni	0.024	0.008	0.008	0.008	0.012	0.008	0.022	0.008
Zn	0.044	0.019	0.106	0.019	0.035	0.019	0.115	0.019



## (5) CMB 計算結果

CMB 計算結果を表 7.4-9 および図 7.4-3 に示す。

船舶の寄与率は St.A で日平均 8.1%(昼間 13.7%、夜間 2.5%)、St.B で日平均 11.8%(昼間 20.6%、夜間 2.9%)であった。また、昼夜間別には昼間が夜間よりも寄与率が大きく、燃料種類別には A 重油に比べ RFO の寄与率が大きかった。

船舶以外の発生源では自動車排出ガスの寄与率が圧倒的に大きく、最大で 70%の寄与率を占め、平均寄与率は St.A では船舶のほぼ 2 倍、St.B では船舶のほぼ 3 倍であった。

なお、「5.港湾地域における PM に関するシミュレーション」では、PM<sub>2.5</sub>そのものは予測していないため、ガス状物質および SO<sub>4</sub>粒子について船舶の 8 月の平均寄与率を見ると、東京港近傍では SO<sub>2</sub> が 40~60%、NO<sub>2</sub>および SO<sub>4</sub>粒子が 20%前後と予測されており、CMB 計算結果はこれよりも低い寄与率であった。

CMB 計算により、港湾地域における一次粒子に対する船舶の寄与率は 10%前後と推計されたが、CMB により計算した寄与率は環境中で一次粒子として測定される PM の寄与率であり、船舶から大量に排出される SO<sub>2</sub> から生成される二次粒子等の寄与を含んでいない。船舶は環境中の PM 源となる SO<sub>2</sub>、VOC などを高い割合で排出していることから、これら CMB 計算で考慮していない二次粒子などの影響を加味すると、船舶の PM の寄与はさらに大きくなることも考えられる。

表 7.4-9 CMB 法による発生源別寄与率の計算結果

St.A

(%)

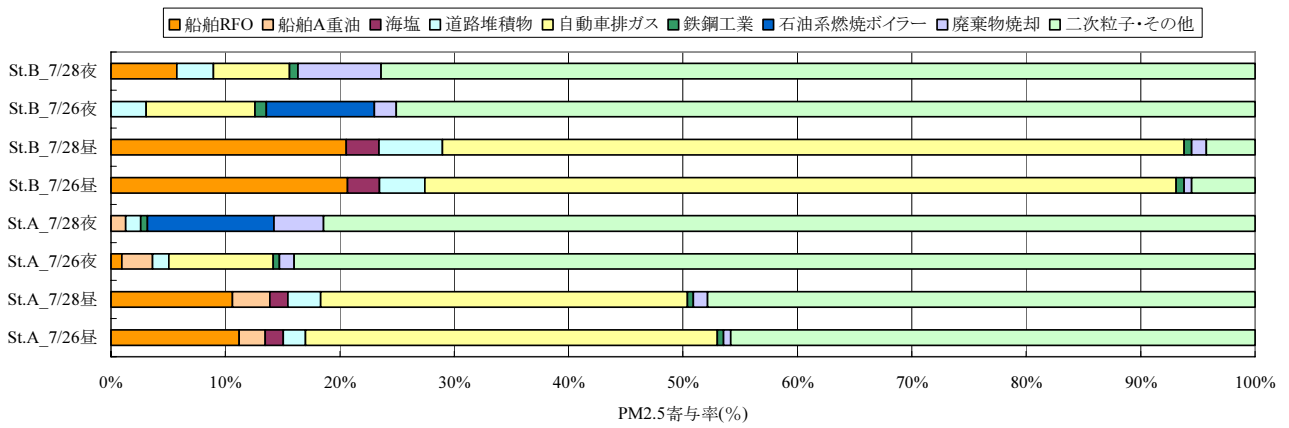
PM 発生源	7/26 昼間	7/28 昼間	7/26 夜間	7/28 夜間	最小	最大	全平均	昼間 平均	夜間 平均
船舶 RFO	11.2	10.6	1.0	0.0	0.0	11.2	5.7	10.9	0.5
船舶 A 重油	2.3	3.3	2.7	1.3	1.3	3.3	2.4	2.8	2.0
(船舶計)	(13.5)	(13.9)	(3.7)	(1.3)	(1.3)	(13.9)	(8.1)	(13.7)	(2.5)
海塩	1.6	1.6	0.0	0.0	0.0	1.6	0.8	1.6	0.0
道路堆積物	1.9	2.9	1.4	1.3	1.3	2.9	1.9	2.4	1.4
自動車排ガス	36.0	32.1	9.1	0.0	0.0	36.0	19.3	34.0	4.6
鉄鋼工業	0.5	0.5	0.6	0.6	0.5	0.6	0.6	0.5	0.6
石油系燃焼ボイラー	0.0	0.0	0.0	11.0	0.0	11.0	2.8	0.0	5.5
廃棄物焼却	0.6	1.2	1.3	4.3	0.6	4.3	1.9	0.9	2.8
二次粒子・その他	45.8	47.8	84.0	81.4	45.8	84.0	64.8	46.8	82.7
計	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

St.B

(%)

PM 発生源	7/26 昼間	7/28 昼間	7/26 夜間	7/28 夜間	最小	最大	平均	昼間 平均	夜間 平均
船舶 RFO	20.7	20.6	0.0	5.8	0.0	20.7	11.8	20.6	2.9
船舶 A 重油	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
(船舶計)	(20.7)	(20.6)	(0.0)	(5.8)	(0.0)	(20.7)	(11.8)	(20.6)	(2.9)
海塩	2.8	2.9	0.0	0.0	0.0	2.9	1.4	2.8	0.0
道路堆積物	4.0	5.5	3.1	3.2	3.1	5.5	3.9	4.7	3.1
自動車排ガス	65.7	64.8	9.5	6.6	6.6	65.7	36.7	65.2	8.1
鉄鋼工業	0.7	0.7	1.0	0.7	0.7	1.0	0.8	0.7	0.9
石油系燃焼ボイラー	0.0	0.0	9.5	0.0	0.0	9.5	2.4	0.0	4.7
廃棄物焼却	0.6	1.3	1.9	7.3	0.6	7.3	2.8	1.0	4.6
二次粒子・その他	5.6	4.3	75.0	76.4	4.3	76.4	40.3	4.9	75.7
計	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

### 【発生源別寄与率】



### 【発生源別寄与濃度】

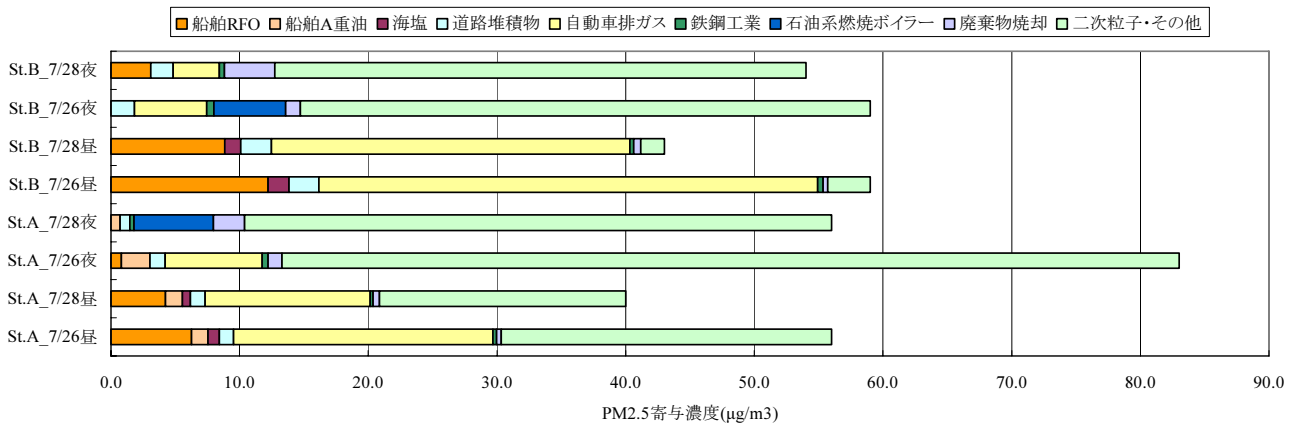


図 7.4-3 CMB 法による発生源別寄与率および寄与濃度の計算結果

#### 7.4.9 まとめ

船舶排出ガスの PM 成分は、炭素成分が約 30～50 %、イオン成分が数%～数十%、金属成分が 0.5 %～10 %弱であった。RFO 使用船と A 重油使用船を比較すると、炭素成分については本調査の結果からは燃料の種類による違いは認められなかった。一方、イオン成分については A 重油使用船よりも RFO 使用船で  $\text{SO}_4^{2-}$  の割合が高く、燃料中の硫黄分の違いを反映した結果と考えられた。また、金属成分については、重油の指標成分であるバナジウム、ニッケルは RFO 使用船で割合が高く、反対にカルシウムや亜鉛の割合は A 重油使用船で高かった。なお、 $\text{SO}_4^{2-}$  の割合が希釈法による測定結果と比較して低いが、これは PM の採取方法の違い(希釈法では 53°C 以下に冷却した状態で採取するのに対して、本調査では高温状態で煙突排気口から直接採取している)によるものと考えられる。

燃料および潤滑油の金属成分の分析結果から、RFO は A 重油と比較してバナジウムやニッケルの濃度が高く、RFO 使用船の PM の成分とよく一致していた。また、A 重油使用船ではカルシウムと亜鉛の割合が高かったが、潤滑油に高濃度に含まれるカルシウムがその原因となっており、金属成分については PM と燃料および潤滑油中の成分組成の対応が比較的よくとれていると考えられた。

本調査で得られた船舶排気 PM の成分組成を用いて、CMB 法により船舶の寄与率を試算した結果、RFO、A 重油を合わせた寄与率は 10%前後であった。また、燃料種類別に見ると、A 重油に比べ RFO の寄与率が大きく、夜間より昼間に寄与率が大きかった。

なお、本調査では港湾地域における PM 濃度に対する船舶の寄与率は 10%前後と推計されたが、CMB 計算では考慮していない二次粒子などの寄与を含めると、船舶の寄与率はさらに高くなることも考えられる。

船舶排気 PM の成分組成は、船舶によって大きく異なっており、今後、これらのデータの蓄積が望まれる。

## 7.5 結論

東京港における大気中 PM 調査および他の調査から、船舶排出ガスの寄与等についておおむね以下の点が明らかとなった。

- 大型コンテナ船の接岸場所が近い測定点では  $\text{SO}_2$  については周辺発生源からの局所的な影響が示唆されたが、PM については明確ではなかった。その理由として、二次粒子を含む PM は  $\text{SO}_2$  よりも発生源近傍で影響が現れにくいことや、バックグラウンド濃度の変動が大きいことなどにより、現地の測定ではとらえられなかったことが考えられた。
- 排出ガス中の PM は、RFO 使用船と A 重油使用船でイオン成分および金属成分の組成比が異なり、RFO 使用船は硫酸イオン、バナジウム、ニッケルなどの成分の割合が高く、一方、A 重油使用船では潤滑油に含まれるカルシウム、亜鉛が原因で、PM 中のカルシウムと亜鉛の割合が RFO 使用船に比べて相対的に高くなることが示唆された。
- 船舶排気 PM 中の  $\text{SO}_4$  粒子の割合が希釈法による測定結果と比較して低いが、これは PM の採取方法の違い(希釈法では  $53^\circ\text{C}$  以下に冷却した状態で採取するのに対して、本調査では高温状態で煙突排気口から直接採取している)によるものと考えられる。
- 調査で得られた船舶排気 PM の成分組成を用いて、CMB 計算により船舶の寄与率を試算した結果、船舶の寄与率は 10 %前後であった。ただし、CMB 計算で求めた寄与には二次粒子を含んでいない。二次粒子を含めた船舶の寄与はこれよりもさらに大きくなる可能性がある。
- 船舶の寄与率は燃料種類別には RFO が A 重油よりも大きく、また、時間帯別には昼間が夜間よりも大きかった。
- ただし、本調査で求めた寄与率は、船舶排出ガス中の PM 成分にはばらつきが大きく、成分組成の代表性が確保されていない可能性のある中での寄与率の試算であることに留意する必要がある。

## 8. 船舶排気 PM の毒性評価

### 8.1 調査の概要と背景

ディーゼルエンジンから排出される PM の周囲には比較的沸点の高い有機物(SOF)が吸着している。SOF は燃焼の過程で生成された分解物や未燃の燃料や潤滑油であり、微量ながら、発がん性や変異原性を示すベンゾ[a]ピレンなどの多環芳香族炭化水素(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)を含んでいる。

船舶のディーゼルエンジンから排出される PM について PAHs を測定した例は少なく、その排出量はほとんど調べられていない。そこで、本調査では、船舶排気 PM に含まれる PAHs の実態把握を目的として、停泊中の船舶について、補機ディーゼルエンジンから排出される PM を採取し PAHs を測定した。

調査は燃料の種類が異なる船舶 4 隻について行い、また、一部の船舶については燃料および潤滑油の PAHs の測定も合わせて行った。

### 8.2 調査方法

#### 8.2.1 調査対象船

船会社の協力のもと、東京湾に停泊した船舶 4 隻を対象に調査を行った。4 隻の内訳は表 8.2-1 に示すとおりであり、No.2~No.4 の RFO(Residual Fuel Oil)使用船 3 隻、No.5 の A 重油使用船 1 隻について PM の測定を行い、さらに No2 については RFO、No.4 については RFO および潤滑油を測定した。

表 8.2-1 PAHs の調査対象船

試料採取日		12月4日	12月6日	12月14日	12月23日
項目		No.2	No.3	No.4	No.5
船種		コンテナ	コンテナ	コンテナ	RoRo 船
総トン数(GT)		約 50,000	約 50,000	約 75,000	約 4,000
外航/内航		外航	外航	外航	内航
採取試料		排気 PM RFO	排気 PM	排気 PM RFO 潤滑油	排気 PM
燃料	種類	RFO	RFO	RFO	A 重油
	密度 (g/cm <sup>3</sup> ,15°C)	0.9902	0.9726	1.0086	0.8678
	動粘度 (mm <sup>2</sup> /s,50°C)	200	335	441.6	2.359
	S 分 (%)	1.97	3.21	2.43	0.60

注) 燃料性状試験データ(船社提供資料)による

## 8.2.2 サンプルング方法

PM の採取方法を以下に示す。

- ・ 採取場所：発電用補機ディーゼルエンジン排出ガス用のファンネル(甲板上部の煙突)の排気口前面
- ・ 採取時期：発電用補機ディーゼルエンジン稼働時
- ・ フィルター：直径 47 mm の石英繊維フィルター
- ・ 吸引ガス量：約 20 L

ファンネル内部の排出ガス温度は 250°C以上の高温であったため、サンプルングはファンネル出口から数 10 cm～50 cm 程度離れた位置で行った。このことにより、排出ガスに加え、一般大気の一部を吸引した可能性があるが、一般大気中に含まれる PAHs 成分は船舶排出ガスと比べるとごく小さいことから、PM 中の成分組成の測定には支障がないと考えられる。

なお、燃料および潤滑油については、PM 採取時に実際に使用していた試料を船主から提供してもらい分析に供した。

## 8.2.3 測定項目

PAHs の分析項目は、アメリカ環境保護庁(US EPA)において環境汚染の優先取組物質に指定されている表 8.2-2 に示す 16 物質とした。

表 8.2-2 PAHs 成分の分析項目

物質名	分子式	英語名
ナフタレン	C <sub>10</sub> H <sub>8</sub>	naphthalene
アセナフチレン	C <sub>12</sub> H <sub>8</sub>	acenaphthylene
アセナフテン	C <sub>12</sub> H <sub>10</sub>	acenaphthene
フルオレン	C <sub>13</sub> H <sub>10</sub>	fluorene
フェナントレン	C <sub>14</sub> H <sub>10</sub>	phenanthrene
アントラセン	C <sub>14</sub> H <sub>10</sub>	anthracene
フルオランテン	C <sub>16</sub> H <sub>10</sub>	fluoranthene
ピレン	C <sub>16</sub> H <sub>10</sub>	pyrene
ベンゾ[a]アントラセン	C <sub>18</sub> H <sub>12</sub>	benzo[a]anthracene
クリセン	C <sub>18</sub> H <sub>12</sub>	chrysene
ベンゾ[b]フルオランテン	C <sub>20</sub> H <sub>12</sub>	benzo[b]fluoranthene
ベンゾ[k]フルオランテン	C <sub>20</sub> H <sub>12</sub>	benzo[k]fluoranthene
ベンゾ[a]ピレン	C <sub>20</sub> H <sub>12</sub>	benzo[a]pyrene
インデノ[1,2,3-cd]ピレン	C <sub>22</sub> H <sub>12</sub>	indeno[1,2,3-cd]pyrene
ジベンゾ[a,h]アントラセン	C <sub>22</sub> H <sub>14</sub>	dibenzo[a,h]anthracene
ベンゾ[g,h,i]ペリレン	C <sub>22</sub> H <sub>12</sub>	benzo[g,h,i]perylene

## 8.2.4 分析方法

PAHs の分析は、加熱環流分解溶媒抽出法によりヘキサンで溶媒抽出した試料を、ガスクロマトグラフ質量分析計により測定した。

〔測定条件〕

測定装置	Agilent 社製 6890GC/5973MSD
使用カラム	Agilent 社製 DB-5MS 膜厚：0.25 μm 長さ、内径：30 m × 0.25 mm
カラム温度	50°C(1分)－ 20°C/分－ 120°C－ 5°C/分－ 265°C － 20°C/分－ 320°C(10分)
注入法	スプリットレス法
注入口温度	280°C
キャリアーガス流量	1mL/min(Costant Flow)
インタフェース温度	300°C
イオン源温度	230°C

### 8.3 PAHs の基礎情報

#### 8.3.1 物性情報

PAHs は、ベンゼン環を二つ以上持つ炭化水素化合物の総称であり、石油、石炭等の化石燃料の燃焼だけでなく、バイオマス(動植物など)の燃焼などによっても生成する。本調査で対象とした PAHs の物性情報を表 8.3-1 に、構造式を図 8.3-1 に示す。

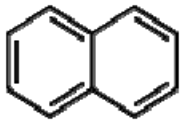
なお、炭素数 16 以下(ナフタレン～ピレン)は、一般大気中でもガス態として存在する割合が高いため、多くはガス化していて補足されなかった可能性がある。

表 8.3-1 PAHs 成分の物性情報

物質名	分子式	環数	分子量	融点(°C)	沸点(°C)	CAS 登録番号
ナフタレン	C <sub>10</sub> H <sub>8</sub>	2	128.2	80.2	217.9	91-20-3
アセナフチレン	C <sub>12</sub> H <sub>8</sub>	3	152.2	91.8	280	208-96-8
アセナフテン	C <sub>12</sub> H <sub>10</sub>	3	154.2	95	279	83-32-9
フルオレン	C <sub>13</sub> H <sub>10</sub>	3	166.2	116-117	295	86-73-7
フェナントレン	C <sub>14</sub> H <sub>10</sub>	3	178.2	100	340	85-01-8
アントラセン	C <sub>14</sub> H <sub>10</sub>	3	178.2	216	342	120-12-7
フルオランテン	C <sub>16</sub> H <sub>10</sub>	4	202.3	111-120	367-382	206-44-0
ピレン	C <sub>16</sub> H <sub>10</sub>	4	202.3	151	404	129-00-0
ベンズ[a]アントラセン	C <sub>18</sub> H <sub>12</sub>	4	228.3	155-157	438	56-55-3
クリセン	C <sub>18</sub> H <sub>12</sub>	4	228.3	254	448	218-01-9
ベンゾ[b]フルオランテン	C <sub>20</sub> H <sub>12</sub>	5	252.3	168	481	205-99-2
ベンゾ[k]フルオランテン	C <sub>20</sub> H <sub>12</sub>	5	252.3	217	480	207-08-9
ベンゾ[a]ピレン	C <sub>20</sub> H <sub>12</sub>	5	252.3	179	495	50-32-8
インデノ[1,2,3-cd]ピレン	C <sub>22</sub> H <sub>12</sub>	6	276.3	164	536	193-39-5
ジベンズ[a,h]アントラセン	C <sub>22</sub> H <sub>14</sub>	5	278.4	266	524	53-70-3
ベンゾ[g,h,i]ペリレン	C <sub>22</sub> H <sub>12</sub>	6	276.3	278	550	191-24-2

注) CAS 登録番号：化学物質を特定するための番号である。アメリカ化学会が発行している Chemical Abstracts 誌で使用される化合物番号で、同学会の下部組織 Chemical Abstract Service (CAS)が登録を行っている。重複割り当てのない ID 番号である。





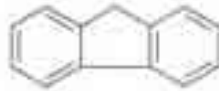
naphthalene



acenaphthylene



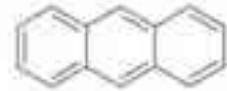
acenaphthene



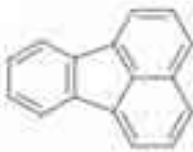
fluorene



phenanthrene



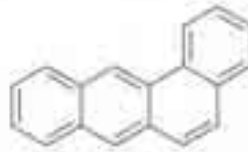
anthracene



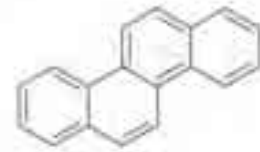
fluoranthene



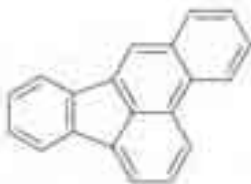
pyrene



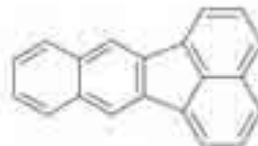
benzo(a)anthracene



chrysene



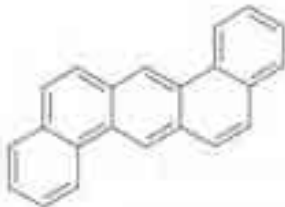
benzo(b)fluoranthene



benzo(k)fluoranthene



benzo(a)pyrene



dibenzo(a,h)anthracene



indeno(1,23-cd)pyrene



benzo(a,b,i)perylene

図 8.3-1 PAHs の構造式

### 8.3.2 毒性情報

PAHs のいくつかの物質には発がん性や変異原性などの毒性のあることが知られている。EU、EPA および IARC(国際がん研究機関)の発がん性ランクを表 8.3-2 に示す。

IARC の発がん性ランクによると、ベンゾ[a]ピレンが「ランク 1：人に対して発がん性が有る」、ジベンズ[a,h]アントラセンが「2A：人に対して恐らく発がん性が有る」、ベンゾ[a]アントラセン、クリセン、ベンゾ[b]フルオランテン、ベンゾ[k]フルオランテン、インデノ[1,2,3-cd]ピレンが「2B：人に対して発がん性が有るかもしれない」にランクされている。

変異原性については、実験生物を使った試験結果により多くの物質で「陽性」となっている。

表 8.3-2 PAHs の発がん性ランク

物質	発がん性ランク		
	IARC	EPA	EU
ナフタレン	2B	C	3
アセナフチレン	—	D	—
アセナフテン	3	—	—
フルオレン	3	D	—
フェナントレン	3	D	—
アントラセン	3	D	—
フルオランテン	3	D	—
ピレン	3	D	—
ベンゾ[a]アントラセン	2B	B2	2
クリセン	2B	B2	2
ベンゾ[b]フルオランテン	2B	B2	2
ベンゾ[k]フルオランテン	2B	B2	2
<b>ベンゾ[a]ピレン</b>	<b>1</b>	<b>B2</b>	<b>2</b>
インデノ[1,2,3-cd]ピレン	2B	B2	—
ジベンズ[a,h]アントラセン	2A	B2	2
ベンゾ[g,h,i]ペリレン	3	D	—

#### 【発がん性ランク】

##### (1) IARC(International Agency for Research on Cancer；国際がん研究機関)

IARC は WHO(世界保健機関)の機関であり、ヒトのがんの原因、発がん性のメカニズム、発がんの制御の科学的方法の開発についての研究を行い、公表している。発がん性の分類基準を以下に示す。

- 1：人に対して発がん性が有る
- 2A：人に対して恐らく発がん性が有る
- 2B：人に対して発がん性が有るかもしれない
- 3：人に対する発がん性については分類できない
- 4：人に対して恐らく発がん性がない

##### (2) US EPA(U.S. Environmental Protection Agency；アメリカ環境保護庁)

US EPA は、IRIS(Integrated Risk Information System)の中で、個々の化学物質の発がん性の評

価、分類を公表している。発がん性の分類基準を以下に示す。

- [1] ヒトに対して発がん性があることが知られている物質
  - [2] ヒトに対して発がん性があるとみなされるべき物質
  - [3] 発がん作用を及ぼす可能性があるため、ヒトに対して懸念を引き起こすが、それについて十分なアセスメントを行うための適切な情報が利用できない物質
- A : ヒト発がん性物質
- B1 : 限定されたヒト発がん性を示す証拠および動物での十分な証拠に基づき、おそらくヒト発がん性物質
- B2 : 動物での十分な証拠に基づいて、おそらくヒト発がん性物質
- C : ヒト発がん性がある可能性がある物質
- D : ヒト発がん性が分類できない
- E : ヒト発がん性がないという証拠がある物質

(3) EU(European Union ; 欧州連合)

EU は、「危険な物質の分類、包装、表示に関する法律、規制、行政規定の近似化に係る理事会指令 67/548/EEC」の第 29 次適応化指令において、危険な物質を発がん性などから分類し、ラベルを付けている。発がん性の分類基準を以下に示す。

- [1] ヒトに対して発がん性があることが知られている物質。
- [2] ヒトに対して発がん性があるとみなされるべき物質。
- [3] 発がん作用を及ぼす可能性があるため、ヒトに対して懸念を引き起こすが、それについて十分なアセスメントを行うための適切な情報が利用できない物質。

また、PAHs は、毒性の強さの異なる化合物で構成されるため、それぞれの濃度をそのまま合計しても PAHs 全体の毒性の強さを表すことはできない。そこで、ベンゾ[a]ピレンの毒性を 1 として他の物質の毒性の強さを相対的に表した毒性等価係数(TEF)が考えられている。

PAHs にはダイオキシン類のように WHO が定めた世界共通の TEF はないが、ここでは、参考として、研究者らが設定した TEF の例を表 8.3-3 に示す。

なお、ここで示した TEF のうち、Nisbet & LaGoy(1992) の TEF はアメリカ毒性物質疾病登録機関(ATSDR)の報告書などに採用されている。

表 8.3-3 PAHs の毒性等価係数(Toxic Equivalency Factors;TEF)の例

物質名	Nisbet & LaGoy (1992)*1	OEHHA (1993) *2	Hashimoto & Yamagishi (2004) *2
ナフタレン	0.001	-	-
アセナフチレン	0.001	-	0.01
アセナフテン	0.001	-	0.01
フルオレン	0.001	-	-
フェナントレン	0.001	-	0.001
アントラセン	0.01	-	0.001
フルオランテン	0.001	-	0.001
ピレン	0.001	-	0.001
ベンズ[a]アントラセン	0.1	0.1	0.4
クリセン	0.01	0.01	0.07
ベンゾ[b]フルオランテン	0.1	0.1	8
ベンゾ[k]フルオランテン	0.1	0.1	10
<b>ベンゾ[a]ピレン</b>	<b>1.0</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
インデノ[1,2,3-cd]ピレン	0.1	0.1	-
ジベンズ[a,h]アントラセン	5.0	1.1	6
ベンゾ[g,h,i]ペリレン	0.01	-	-

出典：\*1 Nisbet ICT, LaGoy PK. 1992. Toxic equivalency factors (TEFs) for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs). Reg Toxicol Pharmacol 16:290-300.

\*2 橋本・山岸, 2003. 多環芳香族炭化水素(PAH)の健康(発がん)リスク評価手法. 大気環境学会誌 39(3):119-136.

## 8.4 PAHs 測定結果

### 8.4.1 PM 中の PAHs

船舶排気 PM の PAHs 測定結果を表 8.4-1 および図 8.4-1 に示す。また、炭素数 18 以上の成分組成を図 8.4-1 の右図および図 8.4-2 に示す。

なお、炭素数 16 以下(ナフタレン～ピレン)は、排ガス中においてはガス態として存在する割合が高いため、多くはガス化していて補足されなかった可能性があり、ここでは参考値として示した。

#### (1) RFO 使用船

PM 中のベンズ[a]ピレン濃度は 0.5～4.1  $\mu\text{g/g}$  であり、RFO 使用船の間でも大きなバラツキがあった。他の PAHs についてもベンズ[a]ピレンと同じように対象船によるバラツキが大きく、炭素数 18 以上の成分では No.2>No.3>No.4 の順に濃度が高かった。

また、対象船によって、濃度レベルは異なるものの、PAHs 組成比は比較的類似していた。

#### (2) A 重油使用船

PM 中のベンズ[a]ピレン濃度は 1.1  $\mu\text{g/g}$  であり、RFO 使用船の 0.5～4.1  $\mu\text{g/g}$  の範囲内であった。PAHs 組成比は RFO 使用船とやや傾向が異なり、ベンズ[a]アントラセンとクリセンが RFO 使用船に比べると高い割合を占めていた。

なお、対象船(No.5)は PM 中の OC の割合が他の船舶に比べ高かったことから、燃焼管理が不十分であった可能性が考えられる。

本調査の結果から、以下のことが確認された

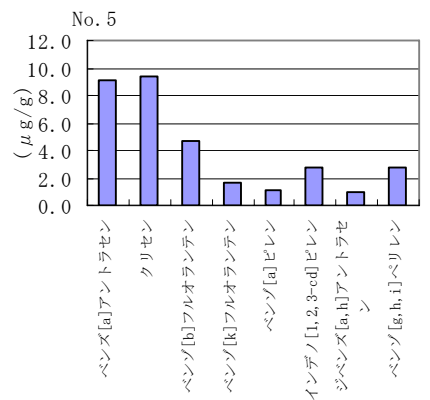
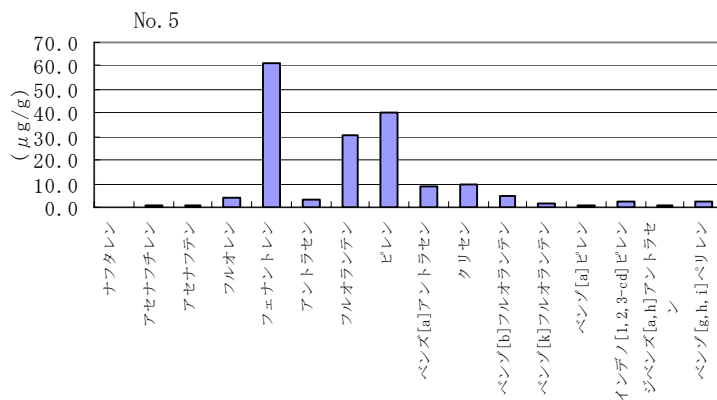
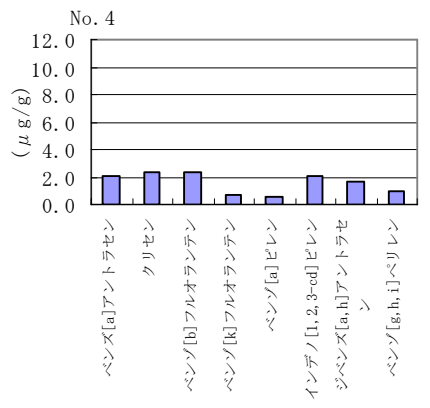
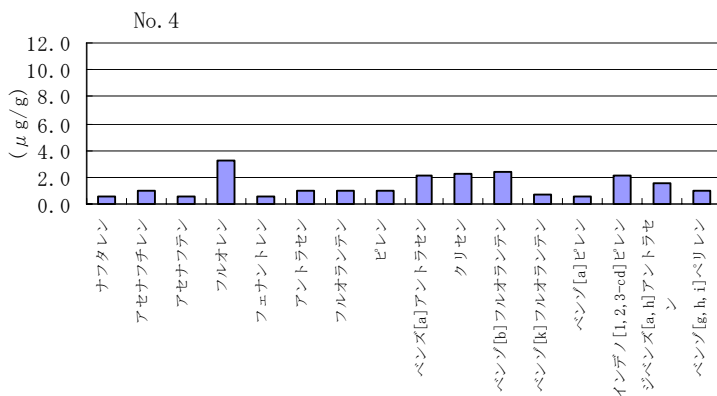
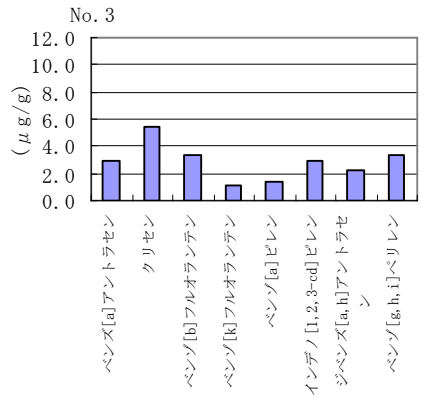
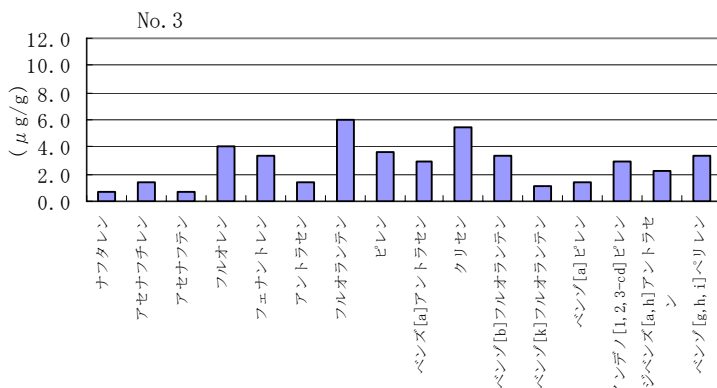
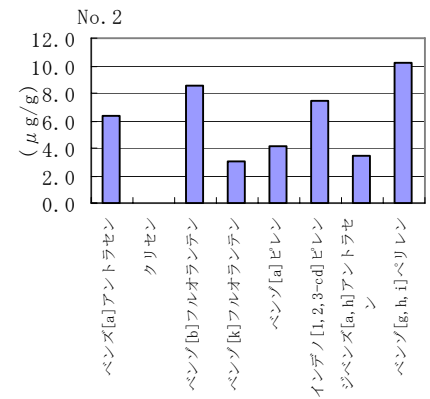
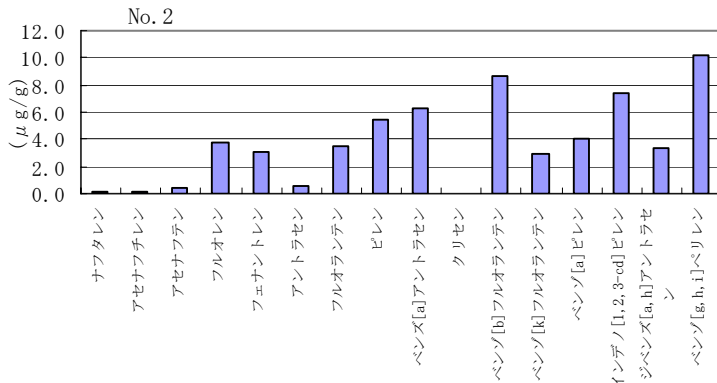
- ・ PM 中の PAHs 濃度は RFO 使用船の間でも大きなバラツキがあった。A 重油使用船の PHAs 濃度は RFO 使用船の PHAs 濃度のバラツキの範囲に入っており、本調査では PM 単位量当たりの PHAs 濃度に燃料の種類による違いは認められなかった。
- ・ PAHs の組成は RFO 使用船同士では比較的類似していた。一方、A 重油使用船は RFO 使用船よりもベンズ[a]アントラセンとクリセンが多かった。

表 8.4-1 船舶排気 PM 中の PAHs 測定結果

成分	(μg/g)			
	No.2	No.3	No.4	No.5
ナフタレン	<0.1	<0.7	<0.5	<0.3
アセナフチレン	0.2	<1.4	<1.0	<0.6
アセナフテン	0.4	<0.7	0.5	0.9
フルオレン	3.8	4.1	3.2	4.1
フェナントレン	3.1	3.3	<0.5	61
アントラセン	0.6	<1.4	<1.0	3.0
フルオランテン	3.5	6.0	<1.0	30
ピレン	5.5	3.6	<1.0	40
ベンズ[a]アントラセン	6.3	2.9	<2.1	9.1
クリセン	8.8	5.5	2.3	9.4
ベンゾ[b]フルオランテン	8.6	3.4	2.4	4.7
ベンゾ[k]フルオランテン	3.0	1.1	0.7	1.6
<b>ベンゾ[a]ピレン</b>	<b>4.1</b>	<b>1.4</b>	<b>&lt;0.5</b>	<b>1.1</b>
インデノ[1,2,3-cd]ピレン	7.4	2.9	<2.1	2.8
ジベンズ[a,h]アントラセン	3.4	<2.2	<1.6	<0.9
ベンゾ[g,h,i]ペリレン	10	3.4	<1.0	2.7

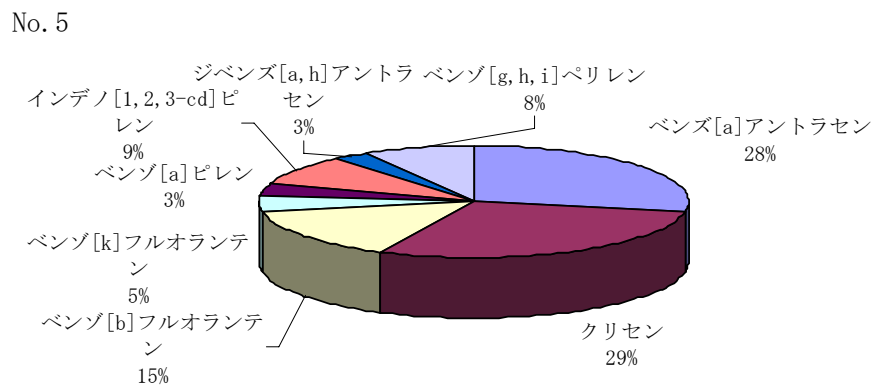
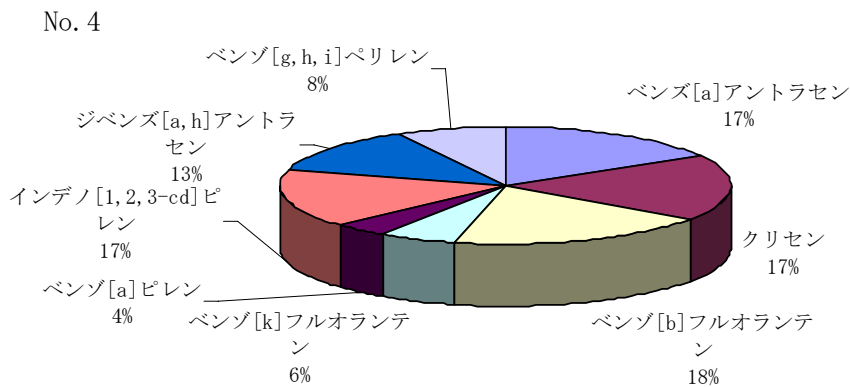
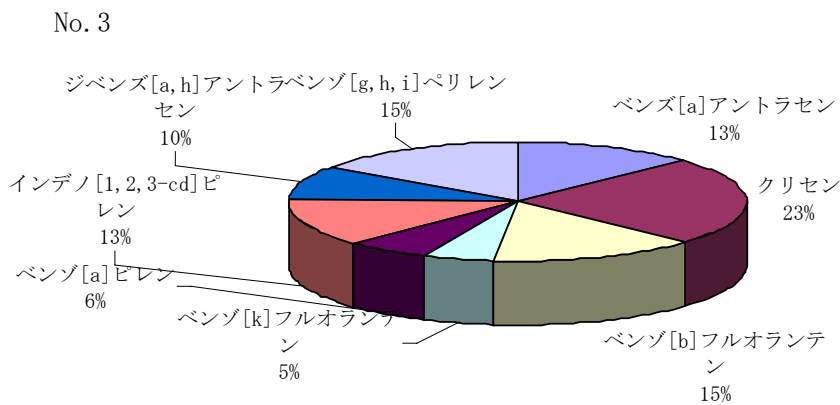
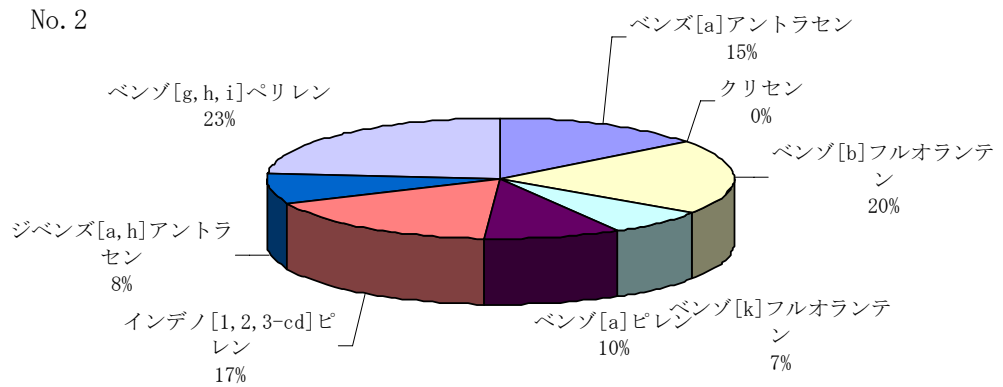
- 注) 1. No.2～No.4 は RFO 使用船、No.5 は A 重油使用船である。  
 2. 値は PM 中の PAHs 濃度を示す。  
 3. ファンネル内部の排出ガス温度は以下のとおりであった。

項目	No.2	No.3	No.4	No.5
煙道出口における排出ガス温度 (°C)	262	295	288	280



注)No.2~No.4はRFO使用船、No.5はA重油使用船を示す。

図 8.4-1 船舶排気 PM 中の PAHs 測定結果 (左図：16 物質、右図：炭素数 18 以上)



注)No.2～No.4 は RFO 使用船、No.5 は A 重油使用船を示す。

図 8.4-2 船舶排気 PM 中の PAHs 成分組成 (炭素数 18 以上)



## 8.4.2 燃料および潤滑油

RFO 使用船 2 隻を対象に、1 隻(No.2)は RFO のみ、1 隻(No.4)は RFO および潤滑油に含まれる PAHs を測定した。測定結果を表 8.4-2 および図 8.4-3 に示す。また、PM と同様に炭素数 18 以上の PAHs の組成を図 8.4-3 の右図および図 8.4-4 に示す。

RFO の PAHs は濃度レベルおよび組成比ともに 2 隻とも類似しており、ナフタレンやフェナントレンの濃度が高かった。5 環以上ではベンゾ[a]ピレンが最も高く、次いでベンゾ[b]フルオランテンやベンゾ[g,h,i]ペリレンの濃度が高かった。

潤滑油は RFO と比較して濃度レベルは 1 桁から 2 桁程度低かった。潤滑油の使用量は、一般に燃料の数%以下であることを考慮すると、PM 中の PAHs に占める潤滑油の寄与はごく小さいものと考えられる。

なお、参考として表 8.4-3 に燃料の性状を示した。RFO 使用船 2 隻のみの比較ではあるが、燃料中の PAHs と燃料の密度、動粘度、硫黄分との間には明瞭な関係は認められなかった。

表 8.4-2 船用燃料および潤滑油の PAHs 測定結果

成分	(μg/g)		
	No.2(RFO)	No.4(RFO)	No.4(潤滑油)
ナフタレン	1300	1500	21
アセナフチレン	<0.08	<0.08	0.31
アセナフテン	280	320	5.8
フルオレン	250	360	8.1
フェナントレン	830	1300	33
アントラセン	81	130	3.7
フルオランテン	21	12	2.0
ピレン	180	230	11
ベンゾ[a]アントラセン	70	140	5.7
クリセン	83	170	6.6
ベンゾ[b]フルオランテン	17	24	1.4
ベンゾ[k]フルオランテン	2.3	2.6	0.35
<b>ベンゾ[a]ピレン</b>	<b>31</b>	<b>30</b>	<b>3.4</b>
インデノ[1,2,3-cd]ピレン	2.9	3.9	0.55
ジベンズ[a,h]アントラセン	5.7	4.9	0.70
ベンゾ[g,h,i]ペリレン	16	16	3.2

表 8.4-3 対象船の燃料の性状 (参考)

項目	単位	No.2	No.4
燃料種類	—	RFO	RFO
密度	g/cm <sup>3</sup> , 15°C	0.9902	1.0086
動粘度	mm <sup>2</sup> /s, 50°C	200	441.6
硫黄分	%	1.97	2.43

出典：燃料性状試験データ(船社提供資料)より

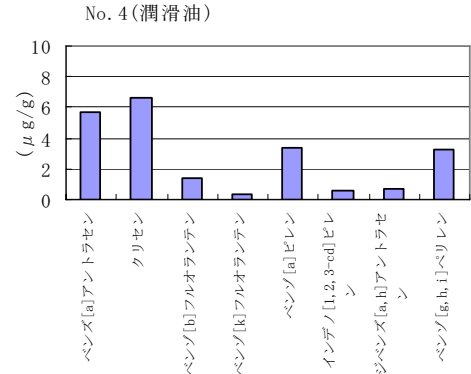
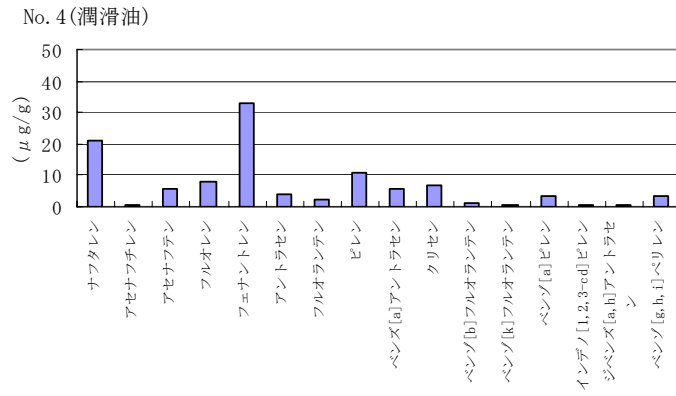
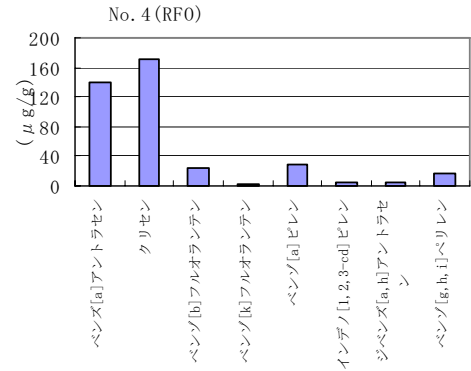
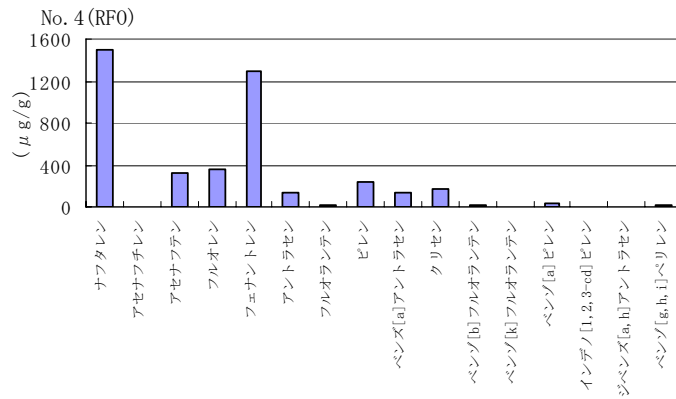
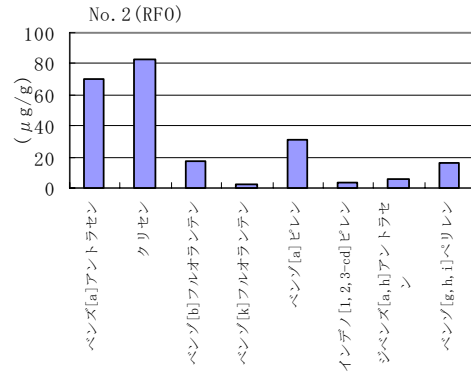
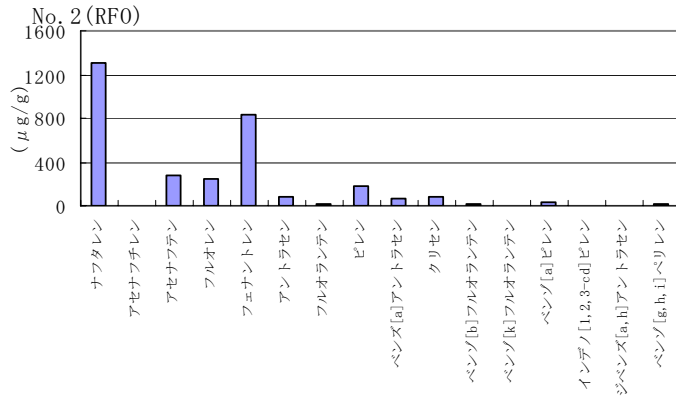
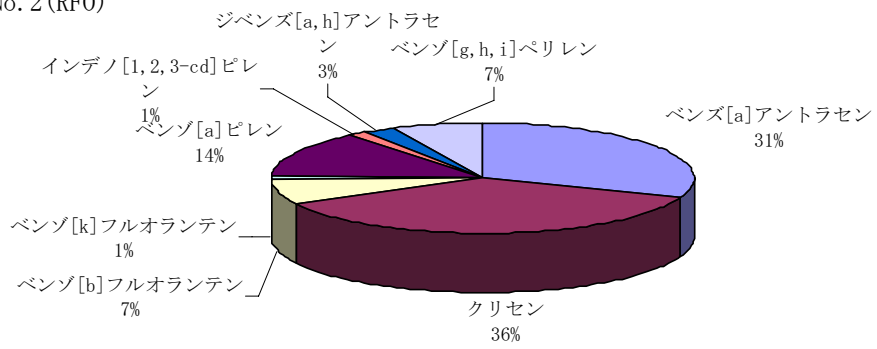
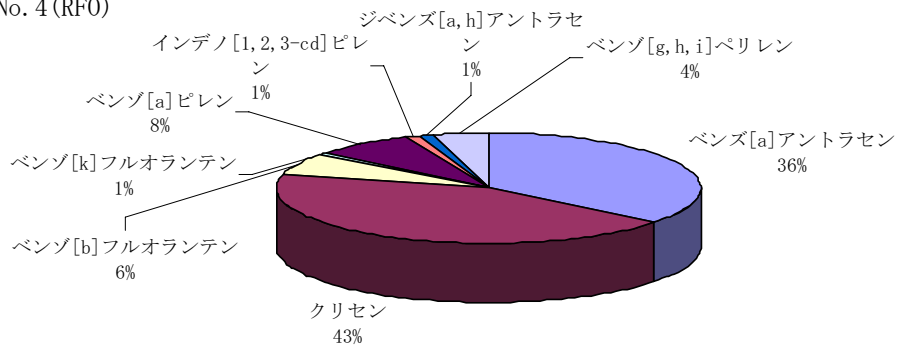


図 8.4-3 燃料および潤滑油の PAHs 測定結果 (左図 : 16 物質、右図 : 炭素数 18 以上)

No. 2 (RFO)



No. 4 (RFO)



No. 4 (潤滑油)

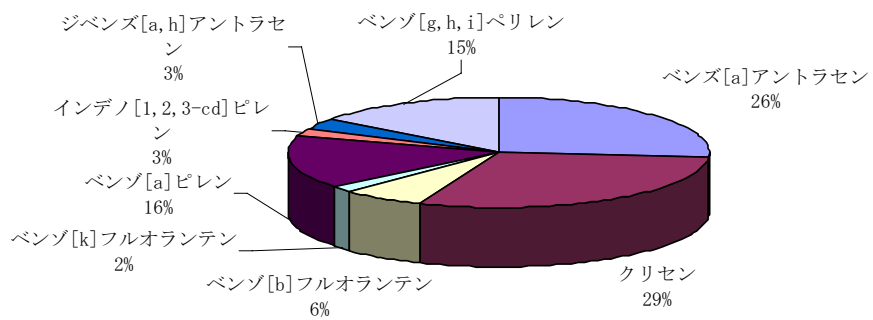


図 8.4-4 燃料および潤滑油の PAHs 成分組成 (炭素数 18 以上)

### 8.4.3 燃料と PM 中の PAHs の比較

#### (1) 組成比の比較

燃料と PM を測定した RFO 使用船 2 隻 (No.2、No.4) について、燃料と PM 中の PAHs 組成比を図 8.4-5 に示す。燃料と PM の PAHs 組成は異なり、ベンズ[a]アントラセン、クリセンおよびベンゾ[a]ピレンは燃料中で比率が高く、その他の PAHs は PM 中で比率が高かった。

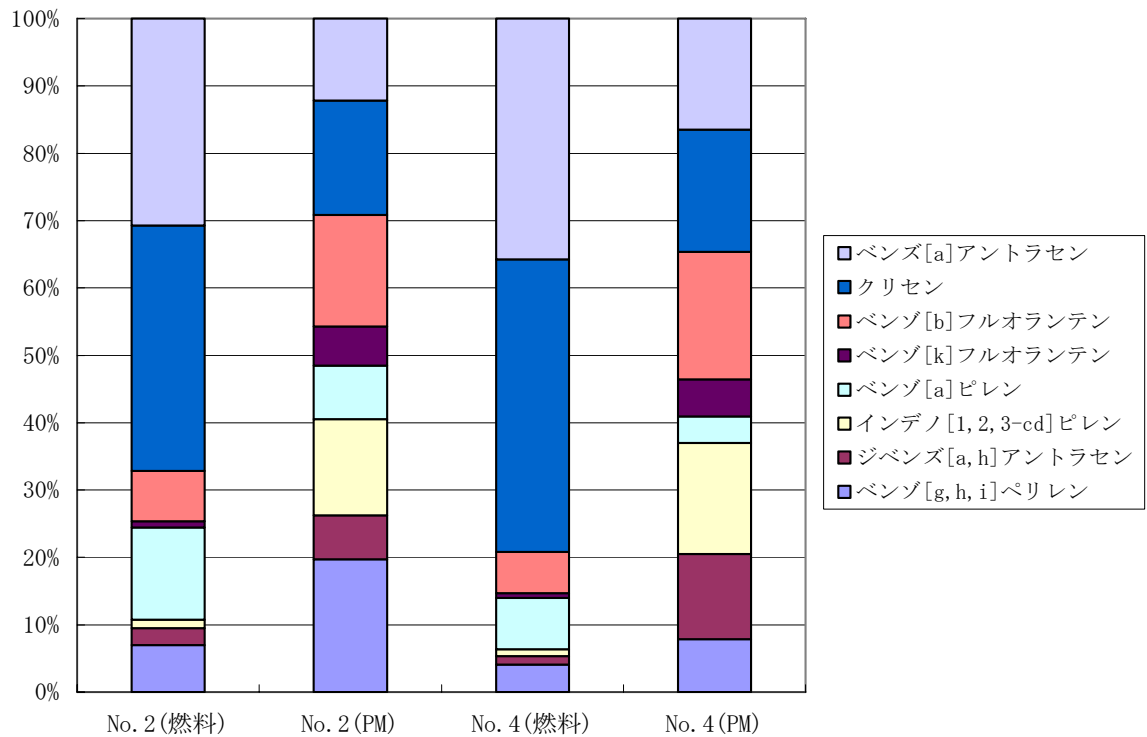


図 8.4-5 RFO 使用船の燃料と排気ガス中 PM の PAHs 組成比 (炭素数 18 以上)

(2) 排出量の比較

燃料の燃焼過程において、高温により燃料中の PAHs が分解していることが考えられる。そこで、燃料中の PAHs が全量排出されたと仮定して、PM として採取された PAHs との量的な比較を行った。なお、燃料中の PAHs については実測値を用いた。また、PM 中の PAHs については表 8.4-4 に示すように排出ガス量に採取ガス中の PAHs 濃度を乗じることにより求めた。

ベンゾ[a]ピレンを例とした比較計算例を表 8.4-5 に示す。

表 8.4-4 PM 中 PAHs 排出量の推定式

$\text{推定排出ガス量(m}^3\text{/kg-fuel)} = \text{排出ガス係数(m}^3\text{N/L-fuel)} / \text{密度(kg/L-fuel)} \\ \times (273.15 + \text{排出ガス温度(}^\circ\text{C)}) / 273.15 \times 21 / (21 - \text{O}_2)$	
ここで、	
排出ガス係数	: 12.2m <sup>3</sup> N/L-fuel (RFO)
密度、排出ガス温度	: No.2 0.9902、262°C
O <sub>2</sub>	: 13%
$\text{PM 中 PAHs 排出量(}\mu\text{g/kg-fuel)} = \text{推定排出ガス量(m}^3\text{/kg-fuel)} \times \text{採取ガス中 PAHs 濃度(}\mu\text{g/m}^3\text{)}$	
ここで、	
採取ガス中の PAHs 濃度(μg/m <sup>3</sup> )	= 採取 PM 中の PAHs 量 (μg) / 採取ガス量(m <sup>3</sup> )

注) 排出ガス係数は「窒素酸化物総量規制マニュアル(新版)」による。

表 8.4-5 燃料中 PAHs と PM 中 PAHs の比較計算例

対象物質：ベンゾ[a]ピレン				
船舶 No			No.2	
燃料種類			RFO	
燃料中の PAHs(1)		mg/kg-fuel	31	
推定排出ガス量	排出ガス係数(A)	m <sup>3</sup> N/L-fuel	12.2	
	密度(B)	kg/L-fuel	0.9902	
	排出ガス温度(C)	°C	262	
	酸素濃度(D)	%	13	
	推定排出ガス量(E) (A/B×(273.15+C)/273.15×21/(21-D))	m <sup>3</sup> /kg-fuel	63	
PM 中の PAHs(2)	採取 PM 中の PAHs 量(F) (PM 採取量 0.00503g×PAHs 濃度 4.1μg/g-PM)	μg	0.0206	
	採取ガス量(G)	m <sup>3</sup>	0.02	
	PAHs 排出量 (E×F/G/1000)	mg/kg-fuel	0.065	
燃料中 PAHs (1)と PM 中 PAHs(2)の比		(2)/(1)×100	%	0.21

上記の方法により求めた燃料中の PAHs と PM 中の PAHs の比較を表 8.4-6 に示す。PM 中の PAHs は燃料中の PAHs と比較して少なく、両者の比 (PM 中の PAHs/燃料中の PAHs)は0.1~4.2%と小さかった。PAHs と比較するため、燃焼による分解の影響を受けない金属成分について同様の手法により計算したところ、表 8.4-7 に示すように、燃料中金属成分の数十%以上あったことから、燃料中の PAHs はその大部分が燃焼によって分解されている可能性が示唆された。

表 8.4-6 燃料中 PAHs と排気 PM 中 PAHs の比較(炭素数 18 以上)

成分	No.2		
	燃料中 PAHs(1) (mg/kg)	PM 中 PAHs(2) (mg/kg)	(2)/(1) (%)
ベンズ[a]アントラセン	70	0.100	0.1
クリセン	83	0.140	0.2
ベンゾ[b]フルオランテン	17	0.137	0.8
ベンゾ[k]フルオランテン	2.3	0.048	2.1
<b>ベンゾ[a]ピレン</b>	<b>31</b>	<b>0.065</b>	<b>0.2</b>
インデノ[1,2,3-cd]ピレン	2.9	0.118	4.1
ジベンズ[a,h]アントラセン	5.7	0.054	1.0
ベンゾ[g,h,i]ペリレン	16	0.159	1.0

注) PM 中の PAHs 濃度が比較的高い No.2 を対象に試算した。

表 8.4-7 燃料中金属成分量と排気 PM 中金属成分量の比較

成分	No.1			No.2		
	燃料中 金属(1) (mg/kg)	PM 中 金属(2) (mg/kg)	(2)/(1) (%)	燃料中 金属(1) (mg/kg)	PM 中 金属(2) (mg/kg)	(2)/(1) (%)
Na	20	13	64.1	10	3	34.9
Ca	120	15	12.2	100	17	17.4
V	104	118	114.1	67	29	42.6
Fe	25	13	52.8	16	8	51.5
Ni	46	45	98.1	37	15	39.4
Zn	2	1	37.0	2	1	38.7

成分	No.3			No.4		
	燃料中 金属(1) (mg/kg)	PM 中 金属(2) (mg/kg)	(2)/(1) (%)	燃料中 金属(1) (mg/kg)	PM 中 金属(2) (mg/kg)	(2)/(1) (%)
Na	20	6	29.9	29	7	24.7
Ca	120	14	12.0	140	16	11.2
V	104	58	56.2	140	62	44.3
Fe	25	19	75.3	34	10	29.7
Ni	46	21	45.4	55	24	43.3
Zn	2	1	25.9	3	1	25.4

注) 1. A 重油の燃料は定量下限値未満が多いため、RFO 使用船の比較のみを示した。

2. 燃料の実測は No.2、No.4 で行っている。No.1 と No.3 は実測した 2 隻の平均値を用いた。

#### 8.4.4 PMの毒性等量

PAHsは、毒性の強さの異なる化合物で構成され、それぞれの濃度をそのまま合計してもPAHs全体の毒性の強さを表すことはできないため、毒性等価係数(TEF)を用いて、個々の成分の毒性の強さを合計した毒性等量(TEQ)を計算した。計算結果を表 8.4-8 に示す。

PM中のPAHs濃度の単純合計ではA重油のPAHs濃度はRFOのPAHs濃度のバラツキの範囲に入っているが、毒性等量の合計値でみると、TEF(毒性等価係数)の高いジベンズ[a,h]アントラセンの濃度の違いから、RFOの毒性等量はA重油よりも大きい結果となっている。

表 8.4-8 船舶から排出されるPM中PAHsの毒性等量(炭素数18以上)

成分	PAHs濃度(μg/g)		TEF	毒性等量(μg-TEQ/g)	
	RFO使用船	A重油使用船		RFO使用船	A重油使用船
ベンズ[a]アントラセン	2.1~6.3	9.1	0.100	0.21~0.63	0.914
クリセン	2.3~8.8	9.4	0.010	0.02~0.09	0.094
ベンゾ[b]フルオランテン	2.4~8.6	4.7	0.100	0.24~0.86	0.470
ベンゾ[k]フルオランテン	0.7~3.0	1.6	0.100	0.07~0.30	0.155
<b>ベンゾ[a]ピレン</b>	<b>0.5~4.1</b>	<b>1.1</b>	<b>1.000</b>	<b>0.50~4.1</b>	<b>1.1</b>
インデノ[1,2,3-cd]ピレン	2.1~7.4	2.8	0.100	0.21~0.74	0.282
ジベンズ[a,h]アントラセン	1.6~3.4	0.9	5.000	8.0~17.0	4.5
ベンゾ[g,h,i]ペリレン	1.0~10.2	2.7	0.010	0.01~0.10	0.027
計	12.7~51.8	32.3	—	9.3~23.8	7.7

注) 1. PM単位量当たりのPAHs量および毒性等量を示し、RFO使用船は3隻の範囲、A重油使用船は1隻のデータである。

2. 毒性等価係数(TEF)は、Nisbet ICT, LaGoy PK. 1992. Toxic equivalency factors (TEFs) for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs). Reg Toxicol Pharmacol 16:290-300. による。

## 8.5 PAHs 排出量の試算

### 8.5.1 船舶から排出される PAHs の排出係数

「8.4 PAHs 測定結果」に示したように、PM 単位量当たりの PAHs 含有量には燃料の種類による違いは認められなかった。しかし、RFO は A 重油に比べ燃料中の炭素成分や硫黄分など PM を生成させる成分を多く含み、燃料消費量当たりの PM 発生量が多いことから、PAHs についても燃料消費量当たりの排出量として見た場合には、RFO と A 重油で排出量が異なることが考えられる。

そこで、PM 中の PAHs 濃度から燃料消費量当たりの PAHs 排出量(排出係数)を燃料種類別に推計し、両者を比較した。推計結果を表 8.5-1 に示す。

ここで、船舶の PM には硫酸成分が多く含まれるため、他の発生源との比較をより正確に行えるよう、PM 単位量当たりの PAHs 濃度を炭素(OC+EC)当たりの PAHs 濃度に換算して示した。

ベンゾ[a]ピレンについてみると、PM 中の濃度は RFO 使用船 1.0~8.8  $\mu\text{g/gC}$ 、A 重油使用船 2.5  $\mu\text{g/Cg}$  であった。一方、燃料 1L 当たりの PAHs 排出量は、RFO 使用船で 2.9~19.4  $\mu\text{g/L-fuel}$ 、A 重油使用船で 1.6  $\mu\text{g/L-fuel}$  となり、RFO は A 重油と比較して PM 排出量が多いため、燃料消費量当たりの PAHs 総排出量に換算した場合、RFO は A 重油よりも PAHs が多く排出されると推計された。

表 8.5-1 船舶の PM 炭素中の PAHs 濃度と排出係数推計値(炭素数 18 以上)

成分	PM 炭素当たり PAHs 濃度( $\mu\text{g/gC}$ )		PAHs 排出係数( $\mu\text{g/L-fuel}$ )	
	RFO 使用船	A 重油使用船	RFO 使用船	A 重油使用船
ベンズ[a]アントラセン	4.4~13.5	20.8	12.4~29.9	13.1
クリセン	4.8~18.9	21.5	13.5~41.7	13.6
ベンゾ[b]フルオランテン	5.0~18.5	10.8	14.1~40.8	6.8
ベンゾ[k]フルオランテン	1.5~6.5	3.7	4.1~14.2	2.3
<b>ベンゾ[a]ピレン</b>	<b>1.0~8.8</b>	<b>2.5</b>	<b>2.9~19.4</b>	<b>1.6</b>
インデノ[1,2,3-cd]ピレン	4.4~15.9	6.4	12.4~35.1	4.0
ジベンズ[a,h]アントラセン	3.3~7.3	2.1	9.4~16.3	1.3
ベンゾ[g,h,i]ペリレン	2.1~21.9	6.2	5.9~48.4	3.9

注) 1. PAHs 濃度は PM の炭素成分当たりの PAHs 量を示す。

2. PAHs 排出係数( $\mu\text{g/L-fuel}$ )は、燃料 1 L 当たりに排出される PAHs 量で、次式により求めた。

$$\text{PAHs 排出係数} = \text{PAHs 濃度}(\mu\text{g/gC}) \times \text{PM 排出係数}(\text{g/kg-fuel}) \times \text{密度} \times \text{炭素割合}$$

PAHs 排出係数(燃料消費当たりの PAHs 排出量)の具体的な計算方法を表 8.5-2 示す。



表 8.5-2 PM 炭素中の PAHs 濃度と排出係数(燃料 1 L 当たりの PAHs 排出量)の計算例

対象物質：ベンゾ[a]ピレン							備考
船舶 No	単位	No.2	No.3	No.4	No.5		
燃料種類		RFO	RFO	RFO	A 重油		
PM 炭素当 たりの濃度	PM 中濃度(A)	µg/g	4.1	1.4	0.5	1.1	実測 <sup>注1)</sup>
	炭素割合(B)	%	46.5	31.8	47.8	43.7	実測 <sup>注1)</sup>
	炭素当たり濃度(A/B×100) (C)	µg/gC	8.8	4.4	1.0	2.5	—
排出係数 (燃料当たり の排出量)	燃料中硫黄分	%	1.97	3.21	2.43	0.6	船社 <sup>注2)</sup>
	PM 排出量(硫黄分より計算) (D)	g/kg-fuel	4.8	7.6	5.8	1.7	計算 <sup>注3)</sup>
	密度(E)	kg/L	0.9902	0.9726	1.0086	0.8678	船社 <sup>注2)</sup>
	PM 排出量(F : D×E)	g/L-fuel	4.7	7.4	5.9	1.4	—
	炭素成分排出量(G : B×F / 100)	gC/L-fuel	2.2	2.4	2.8	0.6	—
	燃料当たり PAHs 排出量(C×G)	g/L-fuel	19.4	10.4	2.9	1.6	—

- 注) 1. 実測による。  
 2. 船社提供資料による。  
 3. 燃料中硫黄分と PM 排出係数の関係式(本報告書「6.2.6(3)排出係数」)による。

また、PAHs 排出係数を毒性等量(TEQ)に換算した結果を表 8.5-3 に示す。

毒性等量の合計値は RFO54.6~113 µg-TEQ/ L-fuel、A 重油 10.9 µg-TEQ/L-fuel となり、RFO は A 重油と比較して燃料当たりの PM 排出量が多いことと、毒性の強いジベンズ[a,h]アントラセンを多く含むことにより、RFO の毒性等量は A 重油よりもさらに大きくなっている。

A 重油の毒性等量は RFO の 1/10 から 1/5 程度であり、本調査により良質燃料への転換は PM に微量に含まれる PAHs のような有害物質の排出量を削減にも効果のあることが示唆された。

表 8.5-3 船舶から排出される PM 中 PAHs の毒性等量

成分	PAHs 排出係数(µg/L-fuel)		TEF	毒性等量(µg-TEQ/L-fuel)	
	RFO 使用船	A 重油使用船		RFO 使用船	A 重油使用船
ベンズ[a]アントラセン	4.4~13.5	20.8	0.100	1.24~2.99	1.31
クリセン	4.8~18.9	21.5	0.010	0.14~0.42	0.14
ベンゾ[b]フルオランテン	5.0~18.5	10.8	0.100	1.41~4.08	0.68
ベンゾ[k]フルオランテン	1.5~6.5	3.7	0.100	0.41~1.42	0.231
<b>ベンゾ[a]ピレン</b>	<b>1.0~8.8</b>	<b>2.5</b>	<b>1.000</b>	<b>2.9~19.4</b>	<b>1.6</b>
インデノ[1,2,3-cd]ピレン	4.4~15.9	6.4	0.100	1.24~3.51	0.40
ジベンズ[a,h]アントラセン	3.3~7.3	2.1	5.000	47.1~81.5	6.5
ベンゾ[g,h,i]ペリレン	2.1~21.9	6.2	0.010	0.06~0.48	0.039
計	74.8~245.6	46.6	—	54.6~113.0	10.9

注) 毒性等価係数(TEF)は、Nisbet ICT, LaGoy PK. 1992. Toxic equivalency factors (TEFs) for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs). Reg Toxicol Pharmacol 16:290-300. による。

## 8.5.2 ディーゼル車との比較

### (1) 排出係数

PAHs は石油製品の不完全燃焼により発生し、燃焼系 PAHs 発生源はディーゼルエンジン、各種石油燃焼施設、焼却施設等多岐にわたる。このうち、ディーゼル車は PAHs 発生量が多く、道路沿道の汚染源になっているが、近年、ディーゼル車の排出ガス対策が進み、PAHs の排出量も少なくなっていると報告されている。ここでは、船舶とディーゼル車について、PAHs の排出量について比較を行った。

ディーゼル車の PM 中の PAHs 濃度測定例を表 8.5-4、PM 中の PAHs 濃度および排出係数の船舶との比較を表 8.5-5、表 8.5-6 に示す。なお、ディーゼル車の PAHs 濃度は普通貨物車(等価慣性重量約 4~7t, 7台)のシャーシダイナモ試験結果から計算により求めたものである。

ベンゾ[a]ピレンについて見ると、PM 中の濃度は 3.8~11 µg/gC であり、PM 中の PAHs 濃度には船舶とディーゼル車で大きな違いはなかった。しかし、船舶は燃料当たりの PM 排出量が多いため、燃料当たりの PAHs 総排出量に換算すると、RFO 使用船はディーゼル車の数倍から数十倍程度であった。

ディーゼル車の酸化触媒技術は PM の排出量を削減するため、PAHs 総排出量の削減に効果がある。船舶についても同様の効果があるかについては、さらなる検討が必要と考えられる。

表 8.5-4 ディーゼル車排気中の PM および PAHs 測定事例

規制年次	排出ガス対策	排気量(cc)	等価慣性重量(t)	PM排出原単位(mg/km・t)	PAHs排出原単位(0.01 µg/km・t)					
					ベンズ[a]アントラセン	ベンゾ[b]フルオランテン	ベンゾ[k]フルオランテン	ベンゾ[a]ピレン	ベンゾ[ghi]ペリレン	インデノ[1,23-cd]ピレン
H15	酸化触媒+EGR	4,777	3.810	6.3	5.7	17	3	7.1	18	n.d.
H15	酸化触媒+EGR	4,777	4.830	7	5.9	6.4	3.4	7.9	18	n.d.
H10	-	5,249	3.690	38	13	n.d.	3.9	25	33	25
H10	-	6,634	6.345	13	7.2	n.d.	2.7	4.9	17	n.d.
H10	EGR	9,203	6.585	17	28	n.d.	7.5	16	26	n.d.
H10	EGR	7,540	6.615	45	42	n.d.	10	30	55	33
H10	EGR	4,985	4.870	22	50	n.d.	8.7	22	52	20

出典：「ディーゼル車走行規制による自動車排出ガス中多環芳香族炭化水素等の低減効果について」(東京都環境科学研究所年報 2005)による。

- 注) 1. 酸化触媒：ディーゼル車の PM 減少装置。触媒による酸化作用で排出ガス中の PM 濃度を減少させる。  
 2. EGR：排出ガス再循環装置。排出ガスの一部をエンジンの吸気に戻し、燃焼温度を低くすることで NOx 排出量を少なくする装置。Exhaust Gas Recirculation の略。  
 3. n.d.は検出下限値未満を表す。

表 8.5-5 船舶とディーゼル車の PM 中の PAHs 濃度の比較(炭素数 18 以上)

成分	船舶(μg/gC)		ディーゼル車(普通貨物車)(μg/gC)	
	RFO 使用船	A 重油 使用船	酸化触媒あり	酸化触媒なし
			平均(最小～最大)	平均(最小～最大)
ベンズ[a]アントラセン	4.4～13.5	20.9	8.7 (8.4～9.0)	12 (3.4～23)
クリセン	4.9～18.9	21.6	—	—
ベンゾ[b]フルオランテン	5.1～18.6	10.8	18 (9.1～27)	n.d. (n.d.～n.d.)
ベンゾ[k]フルオランテン	1.5～6.5	3.6	4.8 (4.8～4.9)	2.7 (1.0～4.4)
<b>ベンゾ[a]ピレン</b>	<b>1.1～8.8</b>	<b>2.5</b>	<b>11 (11～11)</b>	<b>7.3 (3.8～10)</b>
インデノ[1,2,3-cd]ピレン	4.4～15.9	6.5	n.d. (n.d.～n.d.)	4.6 (n.d.～9.1)
ジベンズ[a,h]アントラセン	3.3～7.3	2.0	—	—
ベンゾ[g,h,i]ペリレン	2.2～21.9	6.1	27 (26～29)	15 (8.7～24)

注) ディーゼル車の PM 中の PAHs 濃度は、PM と PAHs の排出原単位から計算により求めた。なお、ディーゼル車は PM のほとんどが炭素成分であり、PM 全量と炭素分量は大きく変わらないため、PM 単位量当たりの PAHs 量として示した。

表 8.5-6 船舶とディーゼル車の PAHs 排出係数の比較(炭素数 18 以上)

(μg/L-fuel)

成分	船舶		ディーゼル車	
	RFO 使用船	A 重油 使用船	酸化触媒あり	酸化触媒なし
			平均(最小～最大)	平均(最小～最大)
ベンズ[a]アントラセン	12.4～29.9	13.1	0.4 (0.4～0.4)	1.5 (0.3～3.0)
クリセン	13.5～41.7	13.6	—	—
ベンゾ[b]フルオランテン	14.1～40.8	6.8	0.8 (0.4～1.3)	n.d. (n.d.～n.d.)
ベンゾ[k]フルオランテン	4.1～14.2	2.3	0.2 (0.2～0.2)	0.3 (0.1～0.5)
<b>ベンゾ[a]ピレン</b>	<b>2.9～19.4</b>	<b>1.6</b>	<b>0.5 (0.5～0.5)</b>	<b>1.1 (0.2～2.0)</b>
インデノ[1,2,3-cd]ピレン	12.4～35.1	4.0	n.d. (n.d.～n.d.)	1.0 (n.d.～2.0)
ジベンズ[a,h]アントラセン	9.4～16.3	1.3	—	—
ベンゾ[g,h,i]ペリレン	5.9～48.4	3.9	1.2 (1.1～1.4)	2.0 (0.8～3.1)

備考) ディーゼル車の PAHs 排出係数については、平均的な燃費を 0.0346 L/km・t と仮定して算出した。

## (2) 係留時における船舶からの総排出量

平成 11 年度に環境省が PRTR のパイロット事業として自動車からのベンゾ[a]ピレン排出量を推計した事例があり、川崎市における排出量の推計値を表 8.5-7 に示す。本排出量は川崎市全域を対象にディーゼル車からの排出量を推計したものであり、年間約 0.6 kg が大気中に排出すると推計している。

一方、船舶については川崎港に係留時を対象に、本調査により得られたデータを用いて船舶からのベンゾ[a]ピレン排出量を試算した。試算結果を表 8.5-8 に示す。2000 年の燃料消費量を 38.4 千 t/年とすると、船舶からのベンゾ[a]ピレン排出量は全隻が RFO を使用した場合で 0.11～0.75 kg/

年、A 重油を使用した場合で 0.07 kg/年と推計され、船舶の排出量はディーゼル車と比較して少ないこと、また、RFO を A 重油に転換することでその排出量は大きく削減される可能性のあることが示唆された。

**表 8.5-7 ディーゼル自動車からのベンゾ[a]ピレン排出量(川崎市全域)**

	ディーゼル乗 用車	ディーゼル軽 量トラック・バス	ディーゼル中 量トラック・バス	ディーゼル重 量トラック・バス	計
ベンゾ[a]ピレン 排出係数(mg/km)	0.0002	0.0002	0.00068	0.00068	—
走行量(千台 km/年)	206,592	56,284	92,488	709,813	1,065,177
ベンゾ[a]ピレン 排出量(kg/年)	0.04	0.01	0.06	0.48	0.6

出典：平成 11 年度 P R T R パイロット事業報告書(環境省 平成 12 年)

**表 8.5-8 川崎港における係留時の船舶からのベンゾ[a]ピレン排出量試算結果(2000 年)**

試算ケース	燃料消費量	ベンゾ[a]ピレン 排出係数	燃料密度	ベンゾ[a]ピレン 排出量
	千 t/y	μg/L-fuel	kg/L-fuel	kg/年
RFO を使用	38.4	2.9～19.4	0.99	0.11～0.75
A 重油を使用		1.6	0.87	0.07

注) 本表は係留時に使用される燃料が全隻 RFO、または全隻 A 重油とした場合の試算結果であり、川崎港における燃料種類ごとの使用割合の実態を考慮したものではない。

密度は対象船の燃料性状試験データより設定した。

なお、本報告書「7.4 船舶 PM 排気調査」に示したように、RFO は A 重油に比べ、バナジウムおよびニッケルを多く含んでおり、RFO 使用船からの PM も A 重油使用船に比べ重金属を多く含んでいた。このことから、RFO を A 重油に転換することは、PAHs の削減のみならず、バナジウムやニッケルなどの重金属の排出量削減にも効果が期待できると考えられる。

(参考)PRTR 法について

我が国では PRTR 法(特定化学物質の環境への排出量の把握等及び管理の改善の促進に関する法律)に基づき、有害性が判明している化学物質について、環境への排出量の把握等が行われている。しかし、PRTR 法では事業者により自主的な管理が可能な化学物質を対象としているため、非意図的に生成される PAHs は PRTR 法の対象物質となっていない。

## 8.6 PAHs の大気中の基準および大気中 PAHs 濃度の現状

EU および WHO 欧州地域事務局では表 8.6-1 に示すようにベンゾ[a]ピレンの大気濃度の基準(WHO はガイドライン)を示している。

また、我が国においても、PAHs のうちのいくつかが大気汚染防止法に基づく有害大気汚染物質に指定され、その中でベンゾ[a]ピレンについては、健康リスクが高く、優先的に取組む必要がある物質(優先取組物質)に指定されている。

各自治体では大気汚染防止法に基づきベンゾ[a]ピレンについてモニタリングを行っている。

東京都におけるベンゾ[a]ピレン濃度の推移を図 8.6-1 に示す。ベンゾ[a]ピレン濃度は大きく低下しており、その理由として、ディーゼル車や焼却施設等の排出ガスの改善が進み、ベンゾ[a]ピレンの排出量が削減された可能性などが考えられる。

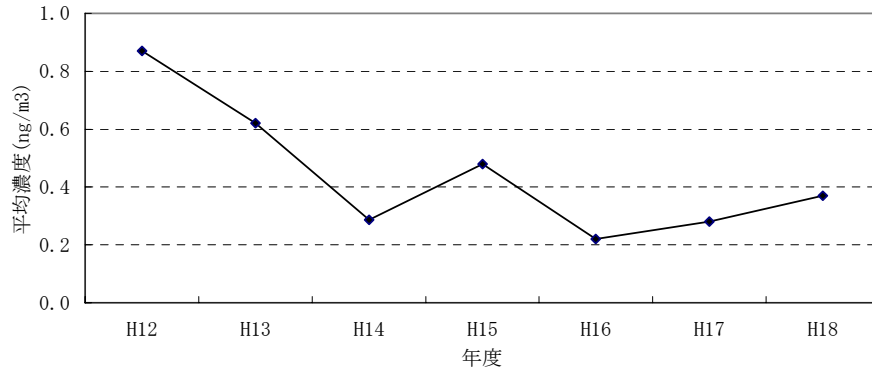
しかし、それでも WHO のガイドライン値超過の状況が続いており、表 8.6-2 に示すように平成 18 年度においてもすべての地点でガイドライン値を超過しており、船舶を含めた各発生源がベンゾ[a]ピレンに代表される PAHs の削減に一層努力することが望まれる。

表 8.6-1 PAHs の大気濃度の基準等

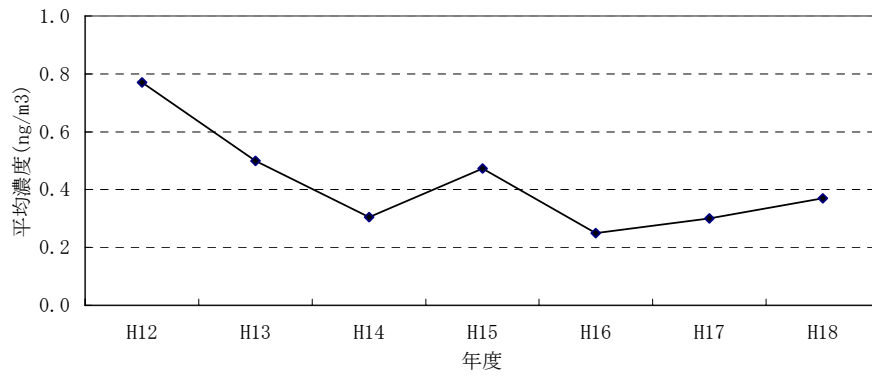
物質名	EU Air Quality Standards (ng/m <sup>3</sup> )	WHO ガイドライン (※) (ng/m <sup>3</sup> )	日本(大気汚染防止法)
ナフタレン	—	—	有害大気汚染物質
アセナフチレン	—	—	—
アセナフテン	—	—	—
フルオレン	—	—	—
フェナントレン	—	—	—
アントラセン	—	—	有害大気汚染物質
フルオランテン	—	—	—
ピレン	—	—	有害大気汚染物質
ベンゾ[a]アントラセン	—	—	有害大気汚染物質
クリセン	—	—	—
ベンゾ[b]フルオランテン	—	—	有害大気汚染物質
ベンゾ[k]フルオランテン	—	—	有害大気汚染物質
<b>ベンゾ[a]ピレン</b>	<b>1</b>	<b>0.11</b>	<b>有害大気汚染物質/優先取組</b>
インデノ[1,2,3-cd]ピレン	—	—	有害大気汚染物質
ジベンズ[a,h]アントラセン	—	—	—
ベンゾ[g,h,i]ペリレン	—	—	有害大気汚染物質

※ WHO 欧州地域事務局の 1996 年の改定ガイドライン値(ユニットリスクの 10<sup>-5</sup> レベル換算値)

【区部一般局平均】



【区部自排局平均】



出典：「東京都有害大気汚染物質のモニタリング調査結果」

図 8.6-1 東京都における大気中ベンゾ[a]ピレン濃度の推移

表 8.6-2 東京都における大気中ベンゾ[a]ピレン濃度の測定結果(平成 18 年度)

( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

測定局名		ベンゾ[a]ピレン
一般局	港区白金	0.00037
	国設東京新宿	0.00028
	大田区東糀谷	0.00045
	世田谷区世田谷	0.00035
	板橋区氷川町	0.00037
	練馬区石神井台	0.00032
	足立区西新井	0.00046
	江戸川区春江町	0.00036
	区部平均 (平成 17 年度平均)	0.00037 (0.00028)
	八王子市片倉町	0.00034
	八王子市大楽寺町	0.00035
	小金井市本町	0.00027
	東大和市奈良橋	0.00025
	多摩部平均 (平成 17 年度平均)	0.00030 (0.00024)
	都平均 (平成 17 年度平均)	0.00035 (0.00027)
自排局	京葉道路亀戸	0.00043
	環八通り八幡山	0.00032
	平均 (平成 17 年度平均)	0.00037 (0.00030)
檜原(バックグラウンド) (平成 17 年度)		0.00019 (0.00017)
基準値等 **		0.00011
定量下限値		0.00005
検出下限値		0.00002

注 1)測定数:12 回

注 2)測定値が検出下限値未満のときは、検出下限値の 1/2 として、年平均値を計算した。

注 3)指針値(環境中の有害大気汚染物質による健康リスクの低減を図るための指針となる数値)

注 4)\*\*印は、基準参考値(WHO 欧州地域事務局のガイドライン値等)

注 5)地域別等の平均値は、当該地域の全測定値の平均であるため、各地点の年平均値を平均したものとは異なる場合がある。

出典：東京都「有害大気汚染物質のモニタリング調査結果」より

## 8.7 結論

ディーゼルエンジンの排気中に含まれる PM は、発がん性等の毒性を有する PAHs(多環芳香族炭化水素)を微量ながら含有することが知られているが、船舶を対象として調査した事例は少ない。そこで、本事業では、接岸中の船舶の補機ディーゼルエンジンから排出される PM を採取し PM 中の PAHs を測定するとともに、燃料および潤滑油中の PAHs を測定した。その結果、以下のことが確認された。

- PM 中の PAHs 濃度(PM 単位量当たりの PAHs 含有量)については、船舶によってバラツキが大きく、RFO と A 重油による明確な違いは認められなかった。
- PM と燃料の PAHs 組成は異なっていた。また、潤滑油は RFO と比較して PAHs 濃度は 1 桁から 2 桁程度低かった。
- RFO は A 重油と比較して PM 排出量が多いため、燃料消費量当たりの PAHs 排出量に換算した場合、RFO は A 重油よりも PAHs が多く排出されると推計された。
- また、RFO は A 重油よりも毒性の強い PAHs を含む割合が高いため、PAHs の個々の物質の毒性の強さを合計した毒性等量で評価すると、RFO の毒性は A 重油よりもさらに大きくなることが示唆された。なお、このことは、燃料の良質化などの PM 削減対策により、PAHs の排出量を削減できることを示している。
- 陸上における PAHs の代表的な発生源であるディーゼル車と比較すると、船舶は PM 排出量が多いため PAHs 排出量も多く、船舶の燃料消費量当たりの PAHs 排出量はディーゼル車の数倍から数十倍程度と推計された。また、港湾地域における船舶からのベンゾ[a]ピレン排出量を試算したところ、船舶の寄与は陸上発生源に比べ少なくないことが示唆された。
- 我が国のベンゾ[a]ピレン濃度は現状で WHO のガイドライン値を超過している。船舶の PAHs 排出量は陸上の主要な発生源であるディーゼル車と比較しても少なくなく、船舶を含めた各発生源がベンゾ[a]ピレンなど PAHs の削減に一層努力することが望まれる。船舶からの PAHs 排出量は、燃料の良質化などにより削減することが可能であり、PM 規制として MEPC57 で最終化された燃料中硫黄分の削減が良質燃料への転換を進め、結果として PAHs の排出量削減につながると期待できる。
- 船舶の排出ガス対策についてはこれまで SO<sub>2</sub> や PM の削減効果を中心に検討されてきたが、船舶からの PAHs 排出量が陸上発生源と比較して少なくないことと、現状のベンゾ[a]ピレン濃度が WHO のガイドラインを超過していることを考慮すると、人への健康リスクの低減の観点からの排出ガス対策の検討も今後必要になると考えられる。





## 9. 調査結果のまとめ

### 9.1 外洋航路における PM に関するシミュレーション

九州大学応用力学研究所による RAMS/CMAQ 連携システム(大気質の移流拡散モデル)を用いて、東アジア域の外洋を航行する船舶の排ガスに起因する PM の影響範囲の検討を行った。一般に、船舶からガスとして排出された NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub> は、大気中で化学反応により粒子化し PM となることが知られている。そのような二次粒子の大気中での生成・挙動を含めたシミュレーションの解析結果から、以下のことがわかった。

- ・ 東アジア域の航路帯から排出された SO<sub>2</sub> の濃度は、航路帯から 100 km 以上離れた地点では、絶対値としても、バックグラウンド濃度との比較においても無視しうる。
- ・ ヨーロッパにおいては船舶起源の SO<sub>x</sub> は 1,000 km 遠方までほとんど沈着せずに輸送されると言われているが、日本付近においては船舶起源の SO<sub>x</sub> は発生源近傍で 23~31 %沈着しており、特に夏季においては風下 1,000 km の範囲内に 70 %以上が沈着することが期待される。これはヨーロッパと日本では、気温・湿度、降水量などの気象条件や船舶発生源の広がり等が異なるためと考えられる。  
なお、日本付近の海域においても、季節風の卓越する冬季は 1,000 km 範囲内の総沈着量は排出量の 40 %未満であり、遠方まで輸送される可能性がある。

- ・ 外洋航路帯の船舶からの SO<sub>2</sub> の影響は、日本付近においてもヨーロッパにおいても影響範囲は狭い。一方、SO<sub>4</sub> 粒子の影響範囲は、日本付近とヨーロッパでは大きな差異があることが想定される。これは、気象条件、SO<sub>4</sub> 粒子の大気中の挙動に関連する物質の存在量や発生量の有無、バックグラウンド濃度の違いや船舶発生源の広がり等の違い等によるものと考えられる。

従って、環境保護の観点からは各海域の状況に合わせた規制が重要である。ただし、本報告書の「9.5 船舶排気 PM の毒性評価」を考慮すると、MEPC57 で最終化されたグローバルアプローチ(全ての海域において低硫黄燃料を使用)は、実質的に良質燃料への転換を意味し、発がん性等の毒性を有する PAHs の削減効果も期待されることから、グローバルアプローチについても必要性はあると考えられる。

- ・ 船舶排出ガス中の PM には SO<sub>2</sub> の凝縮性粒子(SO<sub>4</sub> 粒子)が多く含まれる。今回のシミュレーション結果によれば、航路帯から排出された SO<sub>2</sub> は SO<sub>4</sub> 粒子に変換されて遠方まで輸送され、SO<sub>2</sub> よりも SO<sub>4</sub> 粒子の影響範囲が広いことが示された。これらことから、燃料中硫黄分を削減することは、船舶起源の PM の削減に効果があることが示された。

MEPC においても燃料中硫黄分を規制することにより、SO<sub>x</sub> 削減効果のみならず PM 削減効果もあることが認められた。

- ・ 東アジア域の航路帯から排出された NO・NO<sub>2</sub>は、人体に有害な NO<sub>2</sub>へ、更に HNO<sub>3</sub>にまで比較的速やかに酸化される。ただし、NO<sub>3</sub>粒子はほとんど存在せず、ガス状物質として大気中に存在する割合が高い。これは、SO<sub>4</sub>粒子が硫酸ミストとして単体でも粒子化するのに対して、HNO<sub>3</sub>はアンモニアなどアルカリイオンが存在しないと粒子化が進まないことに起因している。
- ・ その HNO<sub>3</sub>は沈着速度が大きいことから、航路帯から 300 km 以上離れた地点でのガス状物質としての濃度は、絶対値としても、バックグラウンド濃度との比較において無視できる。
- ・ NO<sub>3</sub>粒子まで変化する船舶起源の NO<sub>x</sub> は少ないことから、NO<sub>x</sub> から生じる PM の影響範囲は SO<sub>x</sub> から生じる PM の影響範囲に比較して狭く、NO<sub>x</sub> に対しては局地的な対策が望ましい。MEPC57 で最終化された NO<sub>x</sub> 規制のうち 2016 年から適用される Tier3 は排出規制海域(ECA)にのみ適用するものであり、本調査結果においても十分な効果があると推定できる規制方法である。

## 9.2 港湾地域における PM に関するシミュレーション

平成 19 年度は、電力中央研究所が開発した大気中二次粒子の濃度予測モデルを用いて、東京湾域における船舶の排ガスに起因する PM の影響範囲の検討を行った。検討結果から、おおむね以下のことがわかった。

- ・ 船舶からの SO<sub>2</sub> が影響する範囲 (船舶寄与割合が 25 %以上)は、4 月から 8 月にかけて内陸部に広がっている。一方、北よりの季節風が強くなる冬季においては港湾の北に位置する内陸部へは広がっていない。SO<sub>4</sub> 粒子の船舶寄与濃度については、SO<sub>2</sub> と比べて濃度は低いものの、SO<sub>2</sub> と同様に 6 月から 8 月にかけて高くなっている。
- ・ NO<sub>2</sub> の船舶寄与濃度は、5 月から 9 月にかけて高くなっており、特に 8、9 月は湾外航路付近における船舶寄与割合は SO<sub>2</sub> よりもむしろ高くなっている。船舶からの NO<sub>2</sub> が影響する範囲(船舶寄与割合が 25 %以上)は、SO<sub>2</sub> に比べて狭く、船舶寄与が大きくなる 6 月から 9 月においても SO<sub>2</sub> ほど内陸部に広がっていない。HNO<sub>3</sub> の船舶寄与濃度は NO<sub>2</sub> に比べて小さく、航路帯に分布している。NO<sub>3</sub> 粒子の船舶寄与濃度は NO<sub>2</sub> に比べて小さく、内陸部に分布している。
- ・ 燃料中硫黄分規制による環境濃度改善効果は、SO<sub>2</sub> 濃度で顕著であり、燃料中硫黄分を 0.5 % に規制(一般海域における 2020 年以降の規制に相当)することにより、月平均値の濃度分布で見られた港湾域および東京湾海上の SO<sub>2</sub> の高濃度域はほぼ解消された。また、8 月における SO<sub>2</sub> 濃度の日平均値の月最大値についても大きな改善効果が予想され、国内の大気環境基準より厳しい WHO の日平均値のガイドライン値(20 μg/m<sup>3</sup>)を、港湾域に存在する測定地点においても達成できると考えられる。一方、SO<sub>4</sub> 粒子濃度でも、燃料中硫黄分を 0.5 % に規制することにより、月平均値の濃度分布で見られた港湾域の高濃度域はほぼ解消され、

削減割合は SO<sub>4</sub> 粒子濃度で最大 2 割程度であった。SO<sub>2</sub> 濃度ほどではないにしても、燃料中硫黄分規制が、間接的に SPM (PM<sub>2.5</sub>) の大気環境改善に一定の効果があることが期待できる。燃料中の硫黄分を削減することが、PM のうち相当の割合をもつ二次粒子削減に間接的に繋がることは、MEPC においても船舶排ガスの特徴として認識されており、PM の規制として燃料中硫黄分の削減が最終的に盛り込まれた。

- Tier2 の NOx 規制を全船に導入した場合の環境濃度改善効果は、必ずしも充分ではなく港湾周辺部および航路帯周辺部の影響範囲は解消されず、また港湾周辺地点における改善率も 10 % 前後にとどまる。一方、Tier3 規制を全船に導入した場合の環境濃度改善効果は顕著であり、月平均値の濃度分布で見られた港湾域および東京湾海上の高濃度域はかなり改善される。また、改善率も 20 % 近くに達し、8 月の月平均値の濃度分布において、Tier3 規制を全船に導入することにより日本の環境基準より厳しい WHO の年平均値のガイドライン値 (40 μg/m<sup>3</sup>) 超過が解消することが期待できる。ただし、ここまでの改善効果が実際に期待されるのは、船齢の長さなどから 2040 年以降になることに留意する必要がある。実際に、2020 年における期待できる Tier3 適合船の導入割合を考慮すると、8 月においても月平均値の削減率は 5 % 程度である。
- NOx 規制については、SOx 規制のような全船を対象にした実効性のある規制方法が現状では考えられないため、Tier3 のように厳しい規制を新船に対して適用することに環境面から考えても合理性があると考えられる。なお、MEPC57 では、排出規制海域の大型既存船に対しても Tier1 規制が導入されることが最終化され、今回の結果の懸念事項である早期の環境改善効果を期待できる規制の枠組みとなっている。

### 9.3 船舶排出ガス量の算定

本調査では東京湾の各港湾を利用する船舶を対象として、係留時および航行時に排出される大気汚染物質量を算定した。算定結果の概要は次のとおりである。

- 2000 年の東京湾外を含めたシミュレーション範囲全体における船舶からの排出量は SO<sub>2</sub> が約 57,000 t、NOx が約 101,000 t、PM が約 7,000 t 等であり、陸上発生源を含めた関東エリアの排出量のそれぞれ約 31 %、約 16 %、約 14 % を占め、SO<sub>2</sub> の寄与率が高い。なお、東京湾内における排出量は SO<sub>2</sub> が約 21,000 t、NOx が約 37,000 t、PM(SO<sub>4</sub> 粒子を含む) が約 2,600 t 等である。
- MEPC 57 において最終化された燃料中硫黄分の削減による SO<sub>2</sub> および PM に対する規制、ならびに新造船を対象にした NOx 規制が内航船にも適用された場合を想定して、IMO 規制による削減量を推定した。  
SO<sub>2</sub> 排出量については、燃料中硫黄分を 0.5 % 以下とした場合(一般海域における 2020 年以降の規制に相当)、SO<sub>2</sub> は 72 %、PM(SO<sub>4</sub> 粒子を含む) は 64 % が削減される。さらに、0.1 % 以下に規制した場合(排出規制海域における 2015 年以降の規制に相当)、SO<sub>2</sub> は 95 %、PM(SO<sub>4</sub>

粒子を含む)は 84 %が削減されると推計された。

- ・ 船舶は陸上発生源と比較して排出ガス規制がゆるく、特に PM は従来未規制であった。しかし、燃料中硫黄分の削減は PM 排出量の削減に効果が高く、PM の規制手法として MEPC57 で最終化された附属書VIに新たに盛り込まれた。
- ・ NO<sub>x</sub> 排出量については、新たな規制において定められた NO<sub>x</sub> の削減率は、Tier1 で 23%、Tier2(2011 年以降の建造船に適用)で 38 %、Tier3(排出規制海域における 2016 年以降の建造船に適用)で 83 %であり、各規制の混在率を考慮した 2020 年には 27 %、2025 年には 41 %が削減されると推計された。なお、MEPC57 においては大型の現存船についても NO<sub>x</sub> 規制が導入されることが盛り込まれたため、今回推計した 2020 年および 2025 年の NO<sub>x</sub> 排出量よりもさらに削減されることが期待できる。
- ・ 本調査では排出量の推定・算定精度の向上とともに、大気シミュレーションの計算条件とするため排出量の空間的な分布や時間変動を反映できるよう留意した。また、算定方法等については、具体的に記述し、他の地域でも活用できるマニュアルとして整備した。
- ・ 排出量の精度をさらに高めるためには、PM 排出係数に関するデータの蓄積、補助ボイラーの排出実態の把握、燃料消費量の実態把握および個々の船舶の活動量の把握など、一層のデータの蓄積・把握が必要である。

#### 9.4 港湾域における PM の調査・解析

東京港における大気中 PM 調査および他の調査から、船舶排出ガスの寄与等についておおむね以下の点が明らかとなった。

- ・ 大型コンテナ船の接岸場所が近い測定点では SO<sub>2</sub> については周辺発生源からの局所的な影響が示唆されたが、PM については明確ではなかった。その理由として、二次粒子を含む PM は SO<sub>2</sub> よりも発生源近傍で影響が現れにくいことや、バックグラウンド濃度の変動が大ききことなどにより、現地の測定ではとらえられなかったことが考えられた。
- ・ 排出ガス中の PM は、RFO 使用船と A 重油使用船でイオン成分および金属成分の組成比が異なり、RFO 使用船は硫酸イオン、バナジウム、ニッケルなどの成分の割合が高く、一方、A 重油使用船では潤滑油に含まれるカルシウム、亜鉛が原因で、PM 中のカルシウムと亜鉛の割合が RFO 使用船に比べて相対的に高くなることが示唆された。
- ・ 船舶排気 PM 中の SO<sub>4</sub> 粒子の割合が希釈法による測定結果と比較して低いが、これは PM の採取方法の違い(希釈法では 53℃以下に冷却した状態で採取するのに対して、本調査では高温状態で煙突排気口から直接採取している)によるものと考えられる。

- ・ 調査で得られた船舶排気 PM の成分組成を用いて、CMB 計算により船舶の寄与率を試算した結果、船舶の寄与率は 10 %前後であった。ただし、CMB 計算で求めた寄与には二次粒子を含んでいない。二次粒子を含めた船舶の寄与はこれよりもさらに大きくなる可能性がある。
- ・ 船舶の寄与率は燃料種類別には RFO が A 重油よりも大きく、また、時間帯別には昼間が夜間よりも大きかった。
- ・ ただし、本調査で求めた寄与率は、船舶排出ガス中の PM 成分にはばらつきが大きく、成分組成の代表性が確保されていない可能性のある中での寄与率の試算であることに留意する必要がある。

## 9.5 船舶排気 PM の毒性評価

ディーゼルエンジンの排気中に含まれる PM は、発がん性等の毒性を有する PAHs(多環芳香族炭化水素)を微量ながら含有することが知られているが、船舶を対象として調査した事例は少ない。そこで、本事業では、接岸中の船舶の補機ディーゼルエンジンから排出される PM を採取し PM 中の PAHs を測定するとともに、燃料および潤滑油中の PAHs を測定した。その結果、以下のことが確認された。

- ・ PM 中の PAHs 濃度(PM 単位量当たりの PAHs 含有量)は、船舶によってバラツキが大きく、RFO と A 重油による明確な違いは認められなかった。
- ・ PM と燃料の PAHs 組成は異なっていた。また、潤滑油は RFO と比較して PAHs 濃度は 1 桁から 2 桁程度低かった。
- ・ RFO は A 重油と比較して PM 排出量が多いため、燃料消費量当たりの PAHs 排出量に換算した場合、RFO は A 重油よりも PAHs が多く排出されると推計された。
- ・ また、RFO は A 重油よりも毒性の強い PAHs を含む割合が高いため、PAHs の個々の物質の毒性の強さを合計した毒性等量で評価すると、RFO の毒性は A 重油よりもさらに大きくなることが示唆された。なお、このことは、燃料の良質化などの PM 削減対策により、PAHs の排出量を削減できることを示している。
- ・ 陸上における PAHs の代表的な発生源であるディーゼル車と比較すると、船舶は PM 排出量が多いため PAHs 排出量も多く、港湾地域における船舶からのベンゾ[a]ピレン排出量を試算したところ、船舶の寄与は陸上発生源に比べ少なくないことが示唆された。
- ・ 我が国のベンゾ[a]ピレン濃度は現状で WHO のガイドライン値を超過している。船舶の PAHs 排出量は陸上の主要な発生源であるディーゼル車と比較しても少なくなく、船舶を含

めた各発生源がベンゾ[a]ピレンなど PAHs の削減に一層努力することが望まれる。船舶からの PAHs 排出量は、燃料の良質化などにより削減することが可能であり、PM 規制として MEPC57 で最終化された燃料中硫黄分の削減が良質燃料への転換を進め、結果として PAHs の排出量削減につながると期待できる。

- ・ 船舶の排出ガス対策についてはこれまで SO<sub>2</sub> や PM の削減効果を中心に検討されてきたが、船舶からの PAHs 排出量が陸上発生源と比較して少なくないことと、現状のベンゾ[a]ピレン濃度が WHO のガイドラインを超過していることを考慮すると、人への健康リスクの低減の観点からの排出ガス対策の検討も今後必要になると考えられる。

## 9.6 まとめ

2年間にわたり、船舶からの PM について、現地調査、シミュレーション、PM 自身の物性などの観点から、総合的にその規制の可能性について検討してきた。

船舶機関は、自動車などの高速機関に比較してその燃焼特性などからいわゆる未燃焼分となるディーゼルパーティキュレートや SOF 分は原理的に少ないと言われてきた。他方、燃料が自動車に用いられる軽油に比較して低質でありかつ PAHs や重金属類などの微量の毒性物質が燃料自体に含まれていること、また世界平均で 2.7%程度と非常に硫黄含有率が高いことから硫酸ミストあるいは硫酸塩が多く含まれていることが特徴であり、これらの特徴は本調査においても確認できた。

このことは、ディーゼルパーティキュレートの正確な測定を困難にしており、現時点では希釈法を用いた PM 測定は、世界においても二つ程度の研究グループしか成功しておらず、メーカーレベルにおいては、排出レベルの確認が取れていない。したがって、PM のうち一次粒子については実効性のある規制値を定めることは、現実的に困難であると考えられる。

さて、PM の大気中の挙動は、一次粒子と二次粒子を別に考える必要があり、また長距離の影響を考慮する必要があることから、従来行政モデルなどで用いられている移流・拡散のみを扱うモデルではなく、光化学反応なども取り扱える CMAQ をベースとした高度なモデルを用いた。このことで、同等のモデルを用いた長距離拡散の計算を行っているヨーロッパ勢あるいは米国勢のモデル計算結果との比較が容易となった。モデル計算を実際に担当した九州大学応用力学研究所鶴野教授および電力中央研究所の速水委員には改めて御礼を申し上げたい。

日本付近の航路帯および東京湾からの船舶排ガスの影響を概括すると、(1) SO<sub>x</sub> 特に粒子状の硫酸塩はガス状の NO<sub>x</sub> および SO<sub>2</sub> に比較して長距離まで到達すること、(2) 東京湾のように船舶活動が物理的密度として集中するエリアにおいてはその影響は無視できず相当程度の削減が必要とされること、(3) PM については一次粒子の影響より硫酸塩に代表される二次粒子の影響が大きく、その意味で燃料中の硫黄分を削減することが二次粒子の環境濃度を下げることに有用であることがわかった。

以上の3点については、欧州のモデルにおいてもほぼ同等の結果を出してきており、MEPC の場においても国際的な認識あるいは合意を得るに至った。このため、従来未規制であった PM 規

制として燃料中の硫黄分削減が位置づけるという大きな進歩を附属書VIの改正において得ることができた。また、特にNOxについては80%減という日本提案が特に港湾付近の環境改善に有効であることがヨーロッパ勢にも理解され、最終的に支持を得るに至った。

他方で、影響範囲については大きな見解の相違が生じた。我々の計算においては、日本付近においては数100km程度までが影響範囲と考えられ、また季節によってもその方向性だけでなく範囲そのものも変化する。他方、ヨーロッパ勢の計算結果は、特に硫酸塩については1,000kmを超えても影響するという長距離越境大気汚染条約のコンセプトをそのまま踏襲した結果を出している。両者の結果の差異には、気候風土条件やバックグラウンド濃度の違いなどが考えられる。このため、影響範囲を世界で共通の数値とすることには科学的に無理があるとの認識に基づき、ECA(排出規制海域)については、各国の判断で自由に海域を設定することが可能となった。

附属書VIにおいては船舶の燃料に有害物質や大気汚染につながるような物質を添加しないよう定めている。PMがもつ毒性については、MEPCにおいては数値に基づく具体的な議論はなかったものの、本調査結果は、良質燃料への転換により多環芳香族の大気排出量が大きく削減できることを示唆しており、単純に硫黄分を0.5%に削減するだけでなく溜出油のように燃焼特性がよくかつ燃料そのものの微量有害物質含有量が少ない良質燃料を、特に港湾付近においては使用することを支持するものである。

東京湾の埠頭付近における現場調査結果では、一次粒子で10%前後の寄与が船舶排ガスからのものであることを示しており、二次粒子を含めた場合は、その寄与率が更に高くなることも考慮すると、モデルの計算結果をおおむね支持するものである。今後は、陸上の固定発生源に対する規制とのバランスや内航船への規制の導入など経済的な効果も含めて、東京湾などに対してECA(排出規制海域)を指定するのか総合的な判断が求められることになると思われる。

なお、モデルの前提となる排出量算定方法については、これまで国内で推定のスタンダードとして用いられてきた窒素酸化物総量規制マニュアルの手法に大幅に手をいれ、特に船舶1隻当たりの活動量と活動時間については、船種・船型・内航外航・荷役非荷役の有無ごとに実態調査に基づく新たな値を設定した。今後、地方自治体や港湾が港湾計画や総量規制計画策定の際の推定方法として用いられるものと期待している。

MEPC57において最終化されたマルポール73/78条約附属書VIの改正内容は、これまでの環境規制については後発であった船舶排ガスに大きな改善をもたらすものである。NOxについては現行規制値の80%削減である値は、現時点ではSCRなどの後処理装置を用いて初めて達成できるBAT(Best Available Technology)に近いものである。また、その適用範囲はECA内に限定されており、総燃料消費量に対する影響も最小化されている。港湾付近のNO<sub>2</sub>環境は2016年以降暫時改善することが期待でき、今後少なくとも10年程度はNOxについての大幅な改正の必要性は小さいと考えられる。仮に今後更なるNOx規制が行われるとすれば、現存機関も含めての停泊時の排出量に対する規制であり、たとえば陸電の積極利用となるであろう。



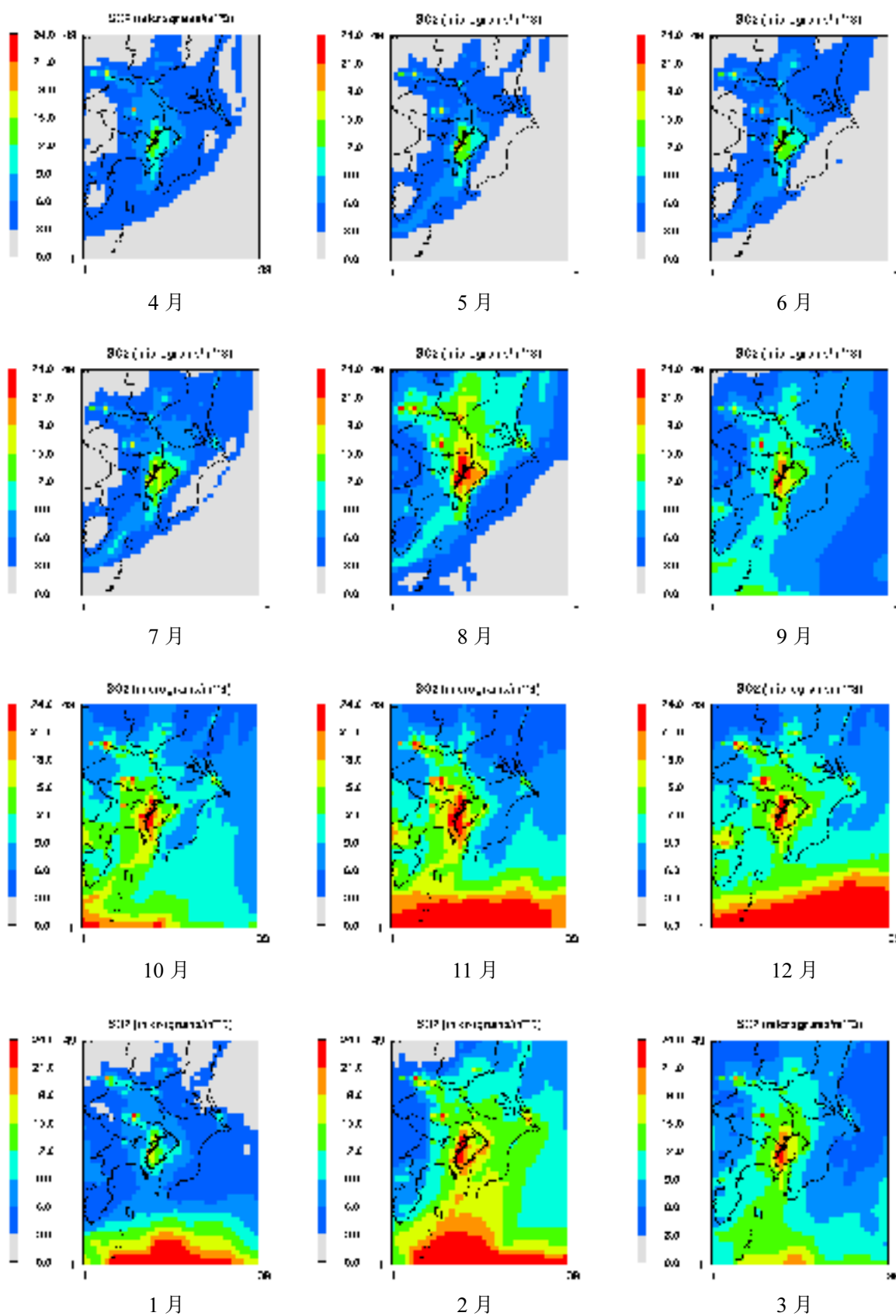
他方、SO<sub>x</sub>については、不明確な点が多い。ECA 指定地域内においては 2015 年に硫黄分 0.1 % が要求されるため、日本を含めて新たな ECA を設定することにはコストだけでなく安定した燃料供給体制の構築を含めて相当な困難が予想される。他方、SCR にとっては運転条件の緩和に繋がるため、2016 年の導入時点で使用燃料が 0.1 %相当の良質燃料への転換が終了していることが望ましいとも言える。また、附属書においてはスクラバーの使用が認められているが、RFO 相当の PM には SO<sub>2</sub> ガスおよび硫酸ミスト以外にも PAHs が含まれており、MEPC57 において最終化されたスクラバーの暫定排水ガイドライン値をクリアするには、高度な排水処理が必要となる。スクラバーの実用性については、SCR 以上にハードルが高いといわざるを得ない。つまり、ECA の設定は良質燃料の供給によって担保する必要があるといえる。SO<sub>x</sub> および PM に対する ECA の設定については慎重な総合判断が必要になるであろう。

## 資料編

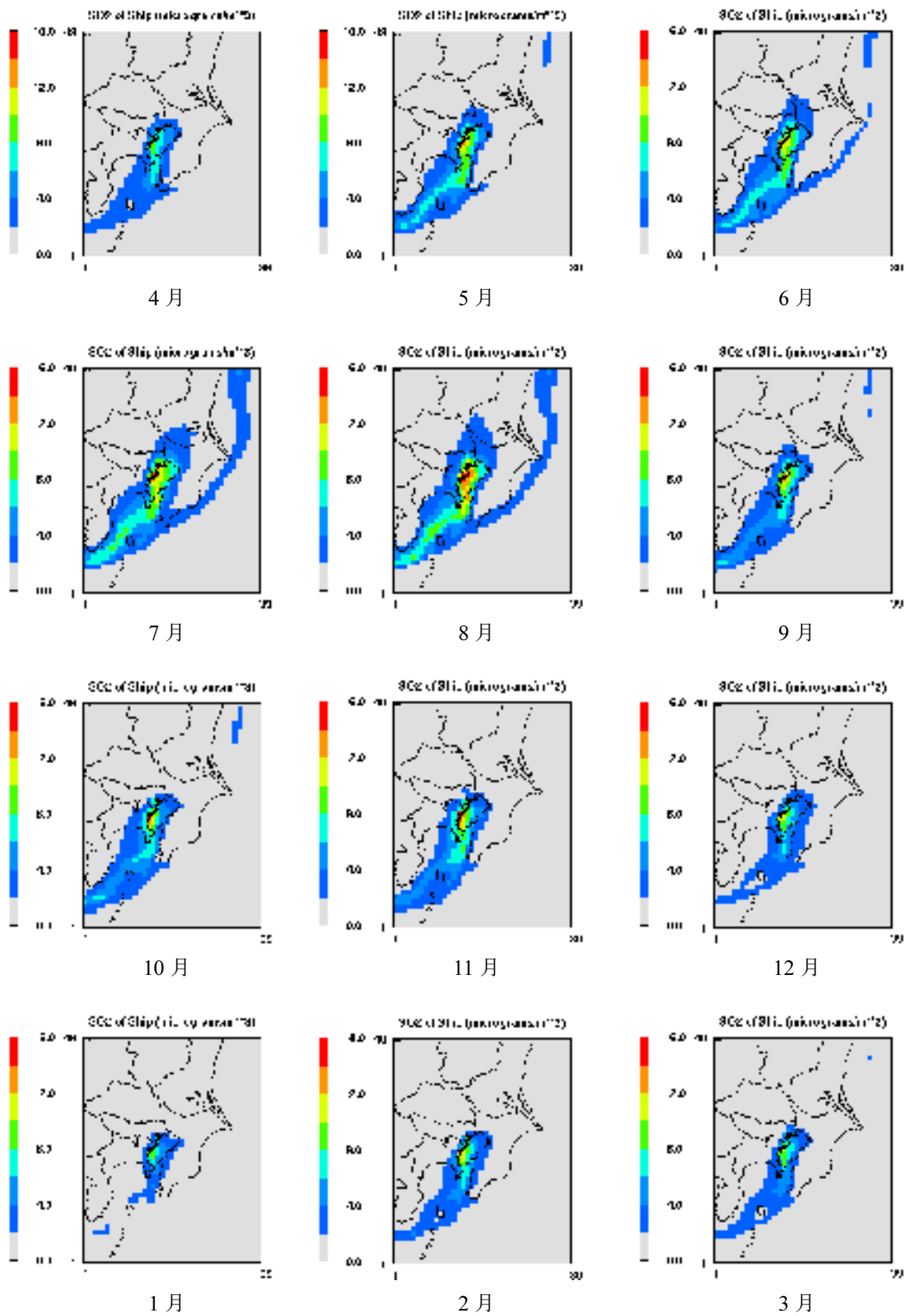
### 1. 港湾地域シミュレーション

- SO<sub>x</sub> の月平均濃度分布
- NO<sub>x</sub> の月別平均濃度分布
- SO<sub>x</sub> の月別乾性・湿性沈着量
- NO<sub>x</sub> の月別乾性・湿性沈着量

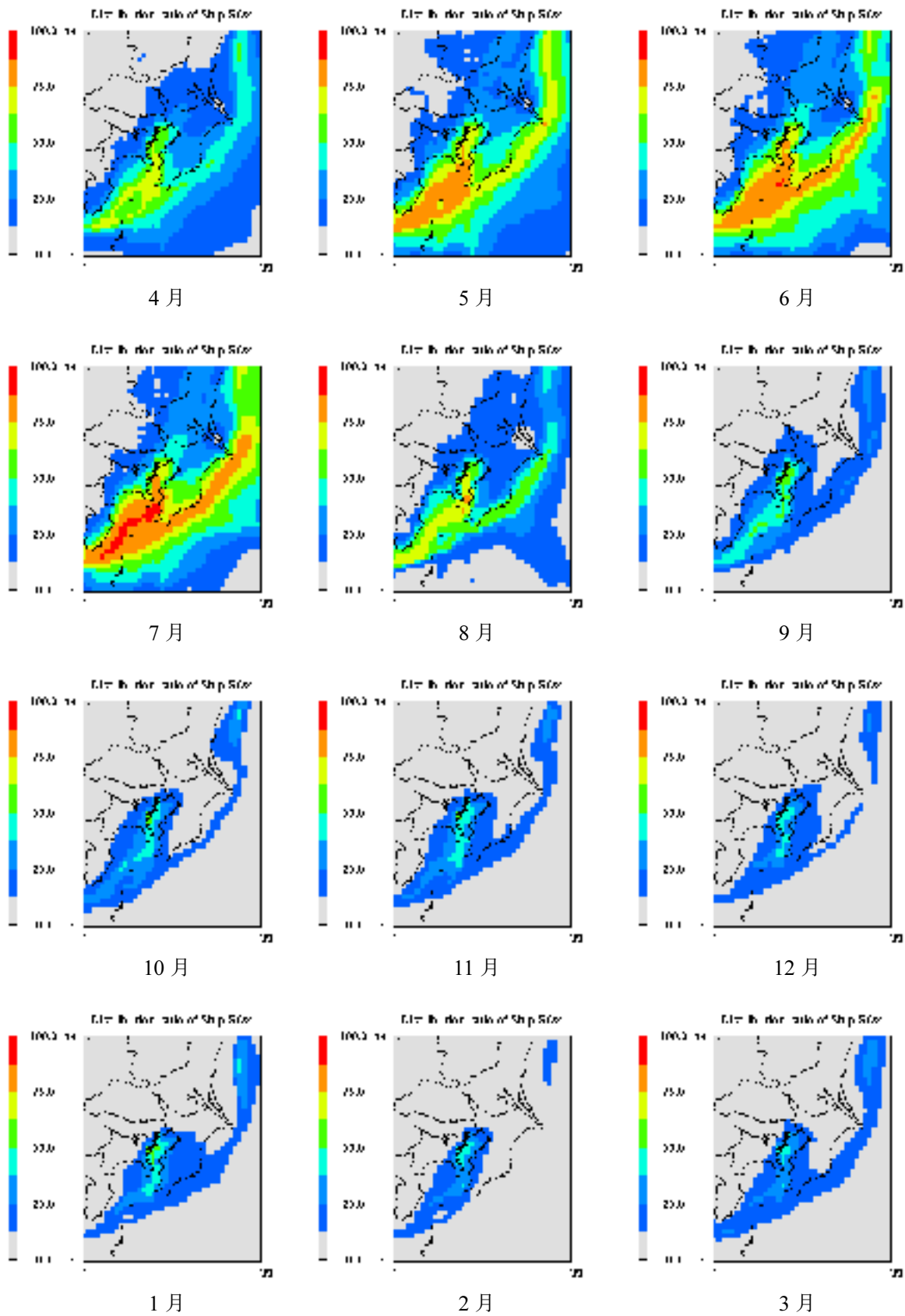




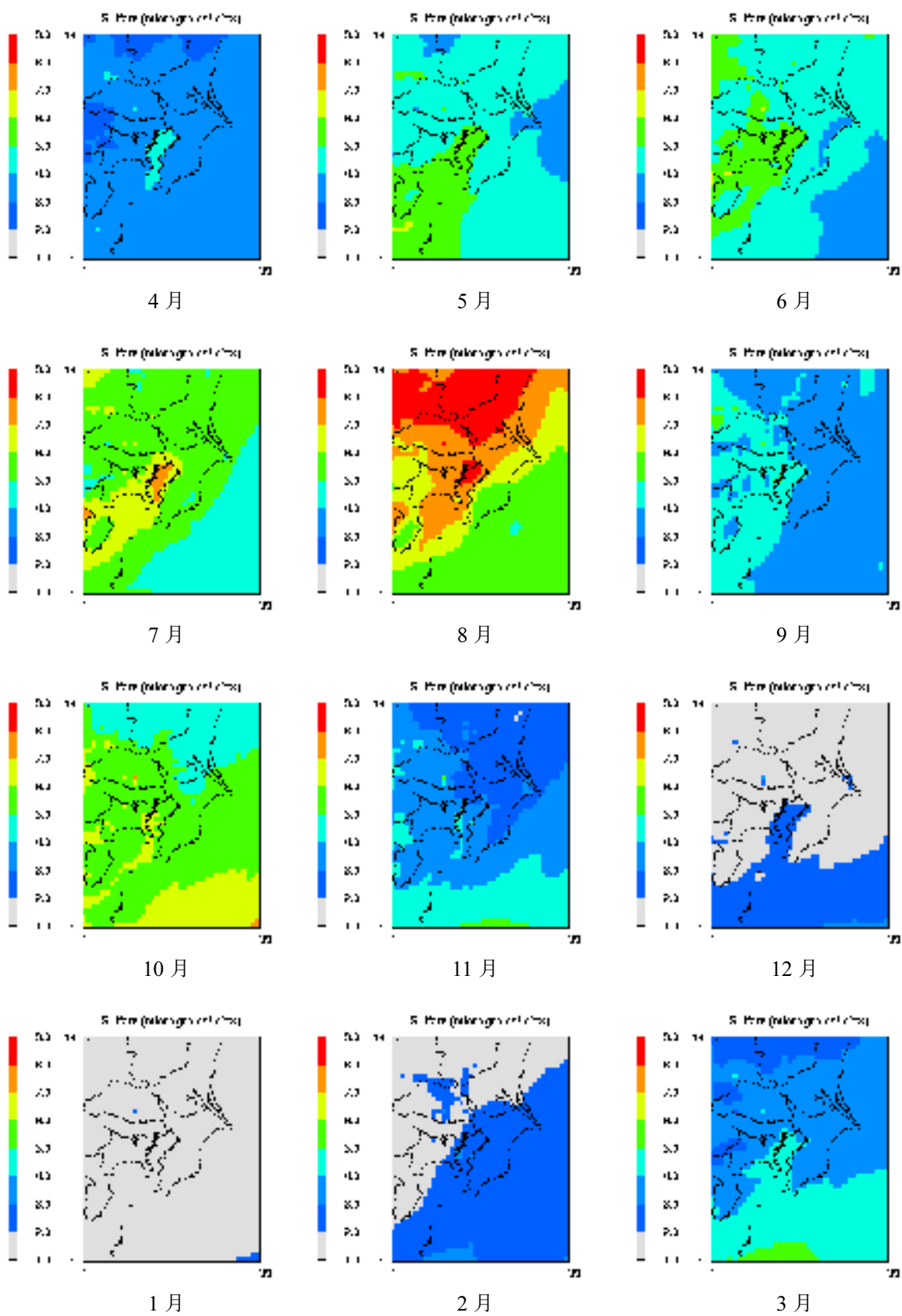
資料図 1-1 (1) SO<sub>2</sub> の月平均濃度分布 (現況)



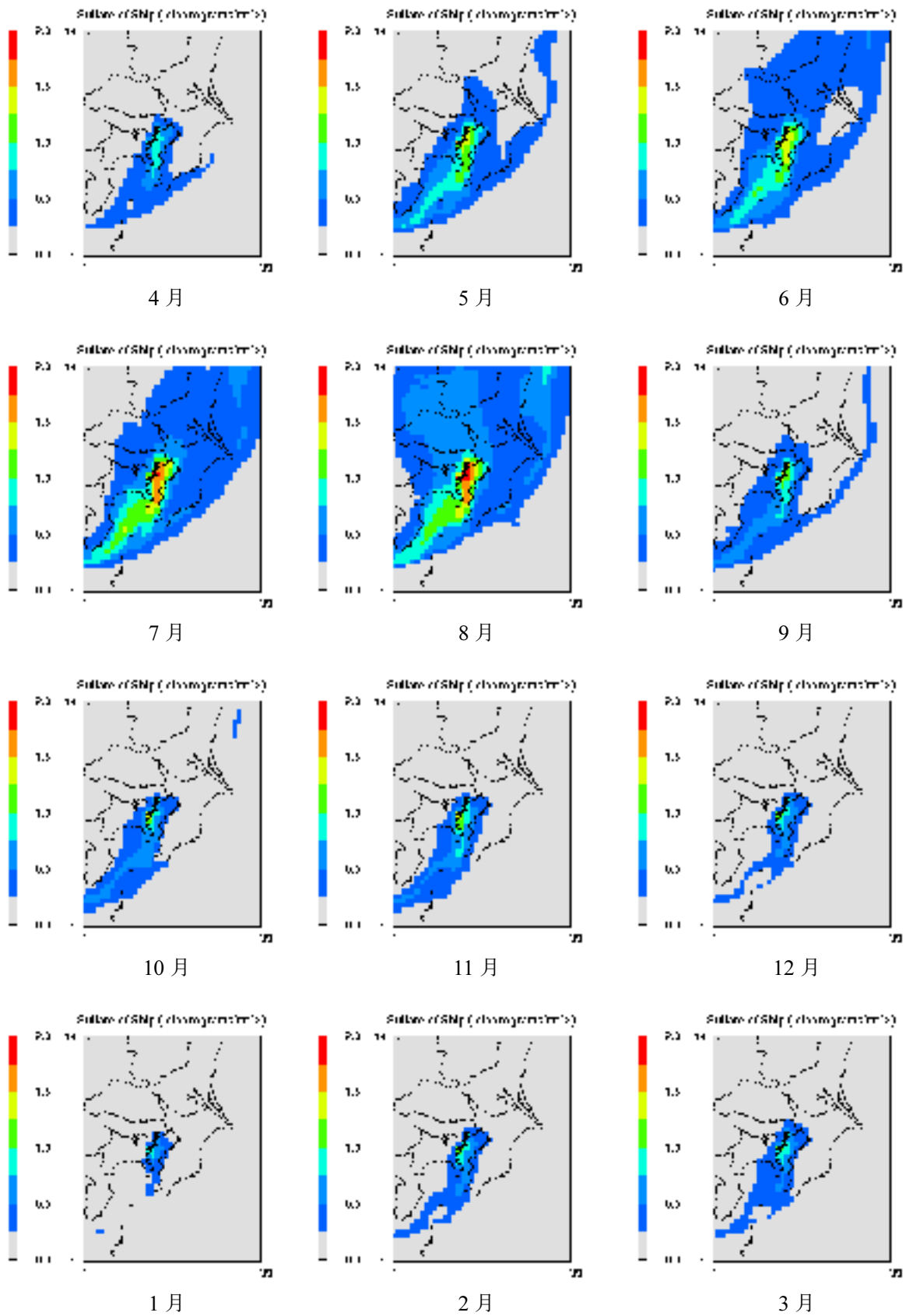
資料図 1-1 (2) SO<sub>2</sub>の月平均濃度分布 (船舶寄与)



資料図 1-1 (3) SO<sub>2</sub>の月平均濃度分布 (船舶寄与割合)

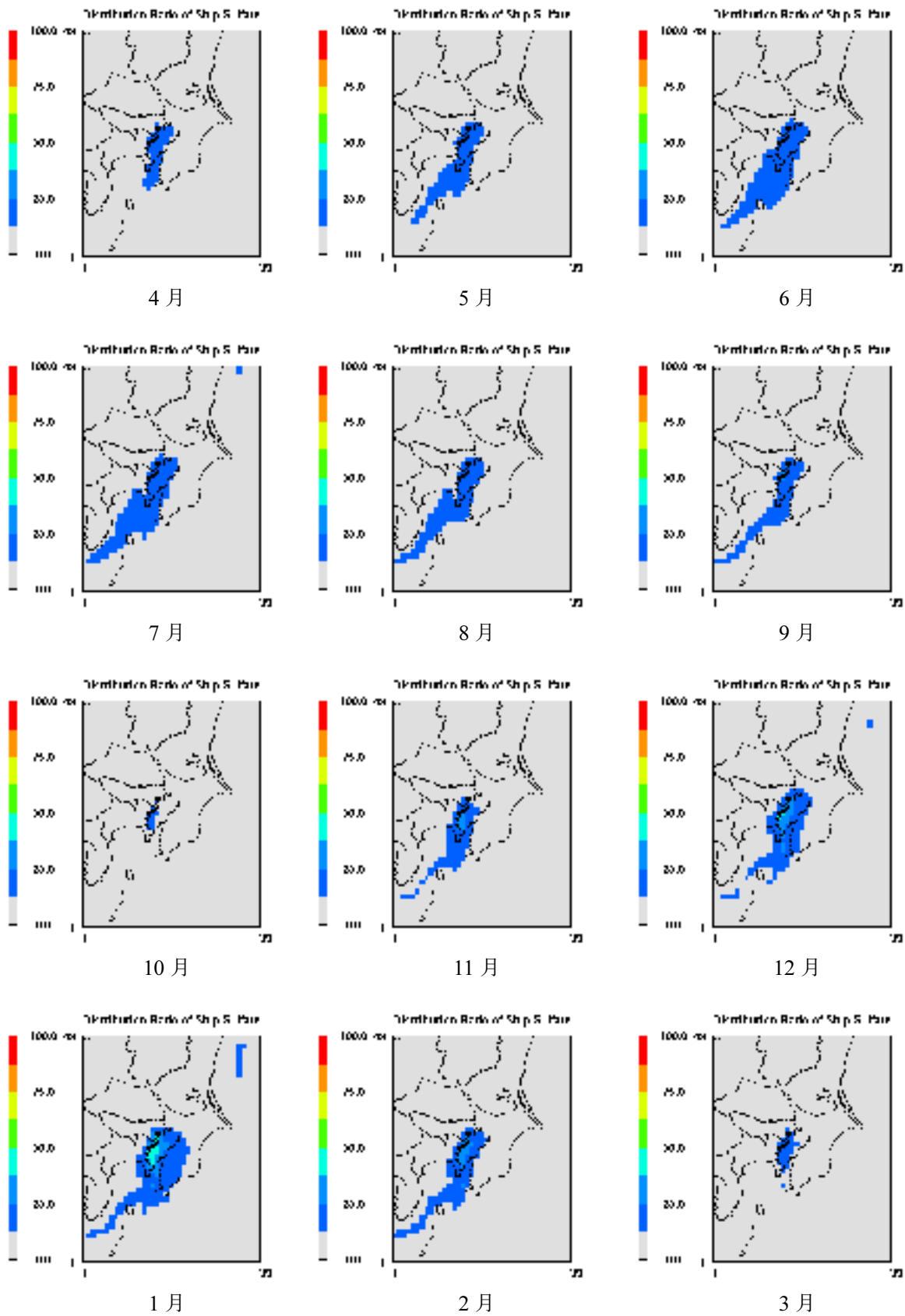


資料図 1-2 (1) SO<sub>4</sub>粒子の月平均濃度分布 (現況)

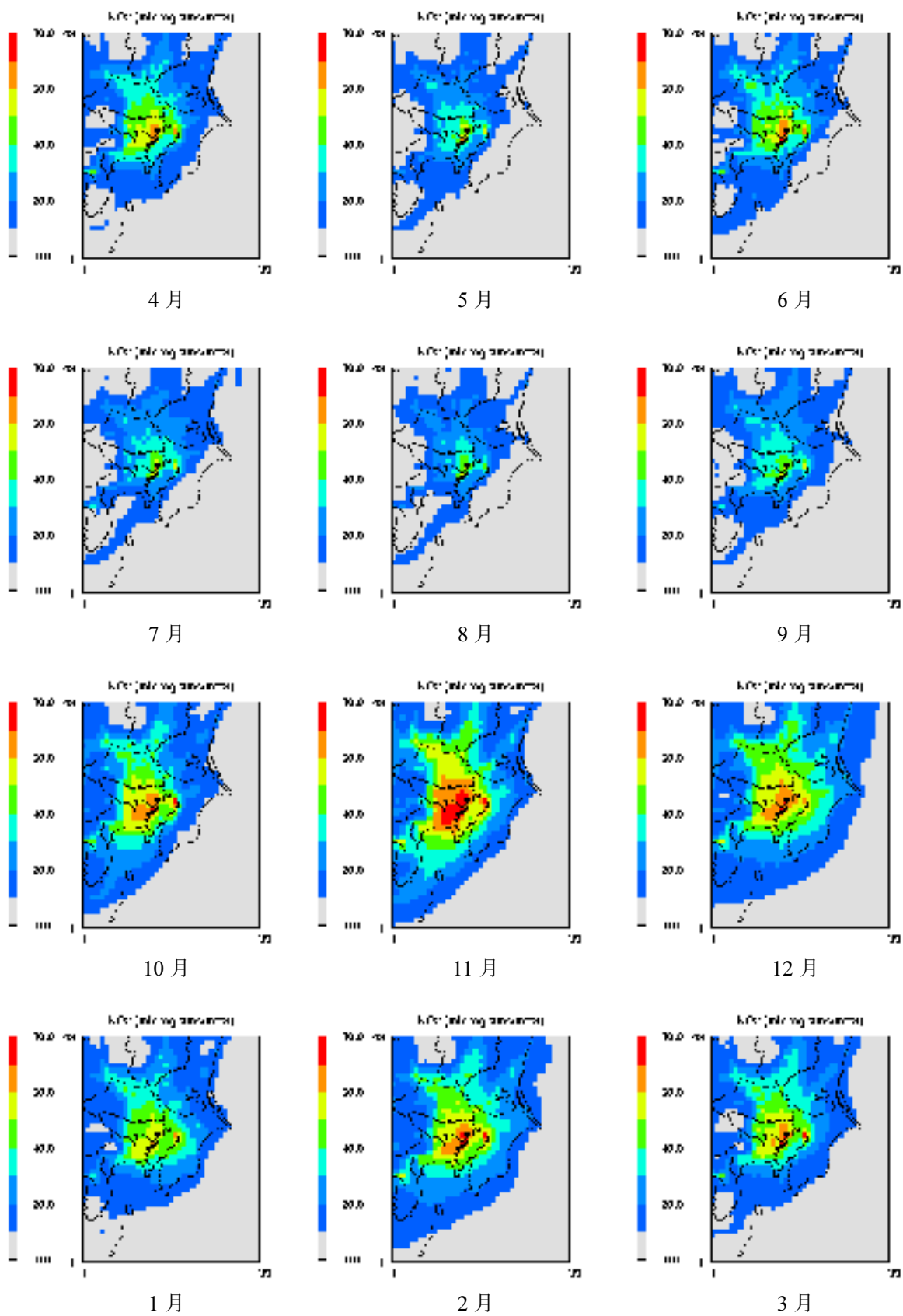


資料図 1-2 (2) SO<sub>4</sub>粒子の月平均濃度分布 (船舶寄与)

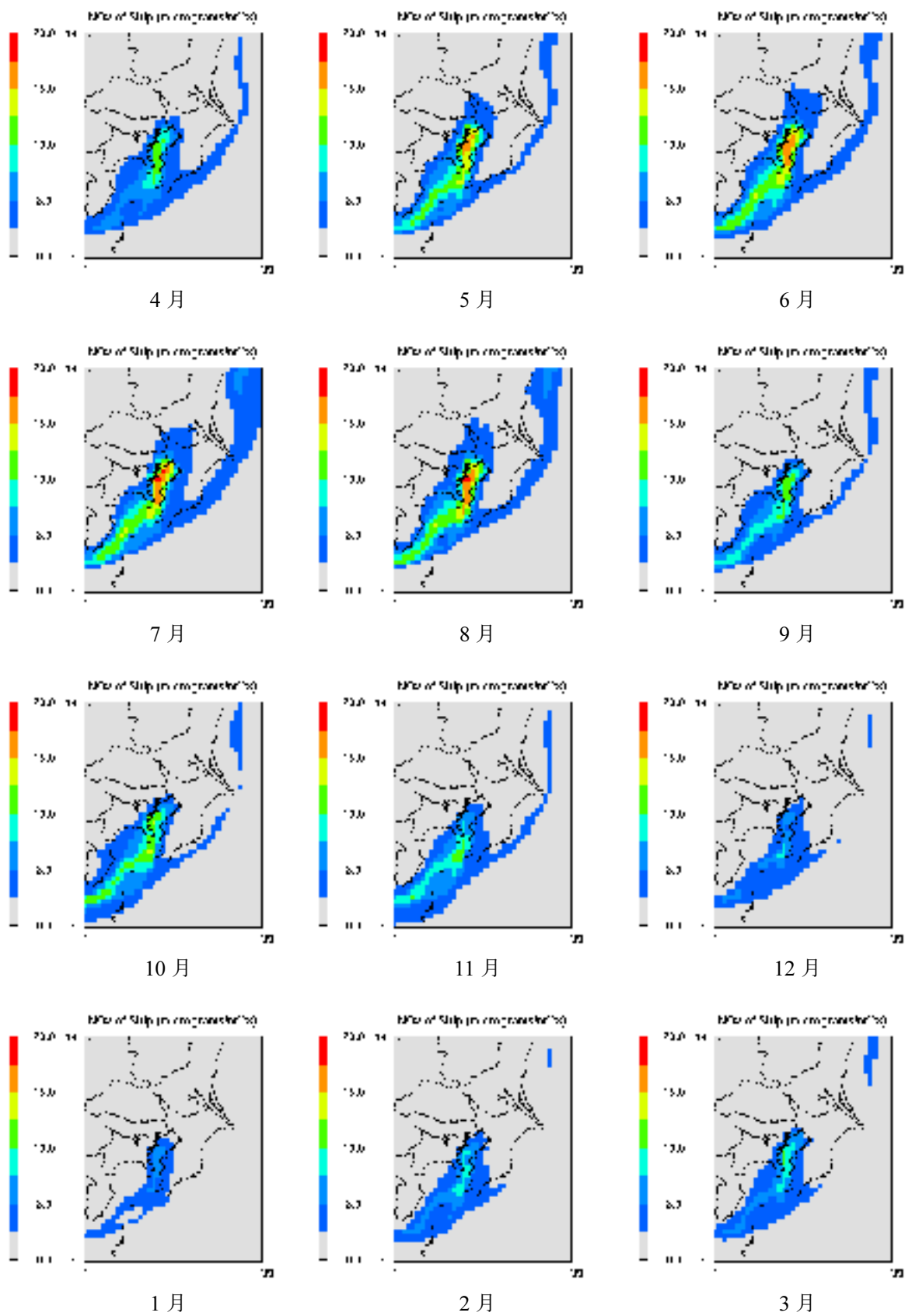




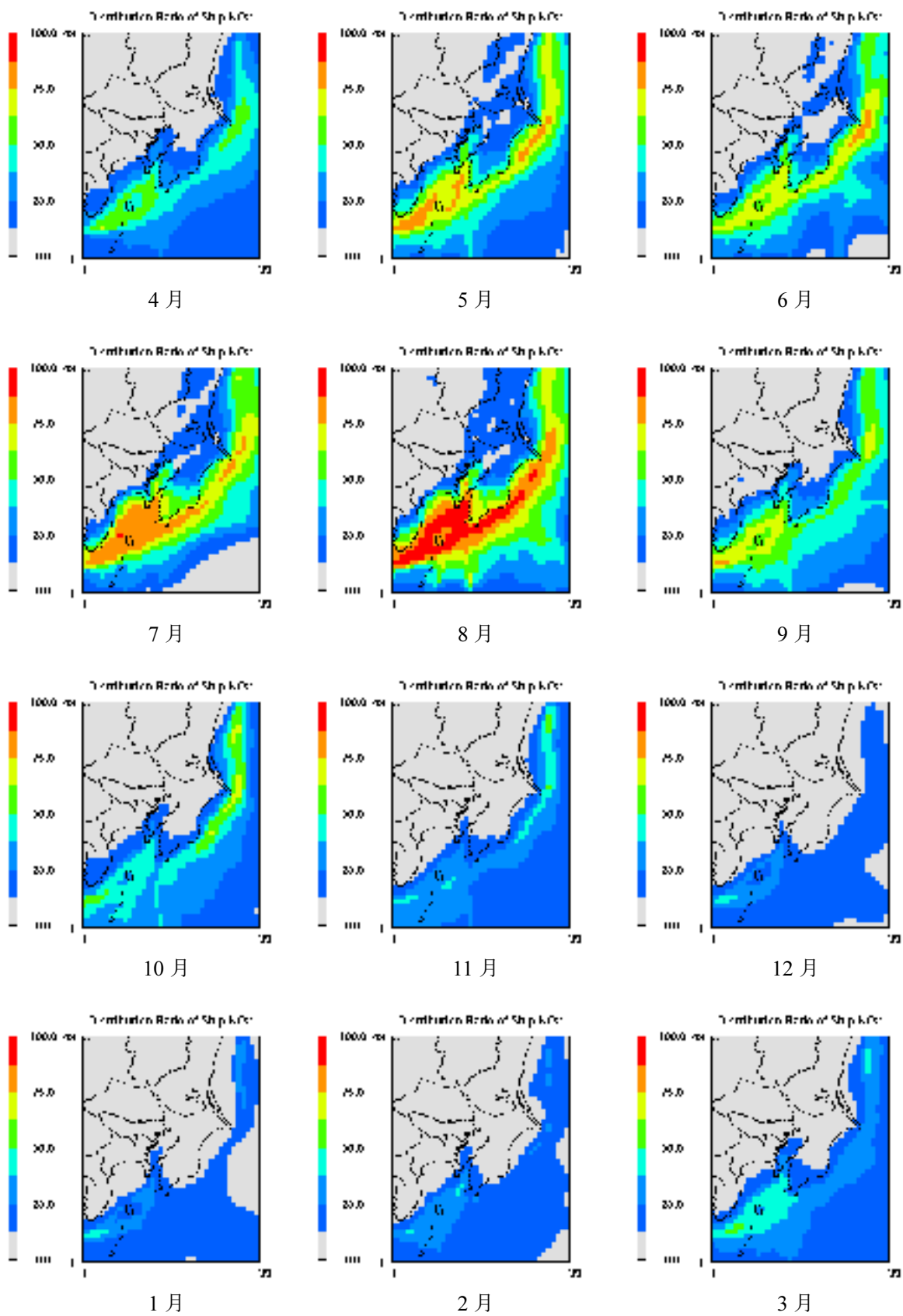
資料図 1-2 (3) SO<sub>4</sub>粒子の月平均濃度分布 (船舶寄与割合)



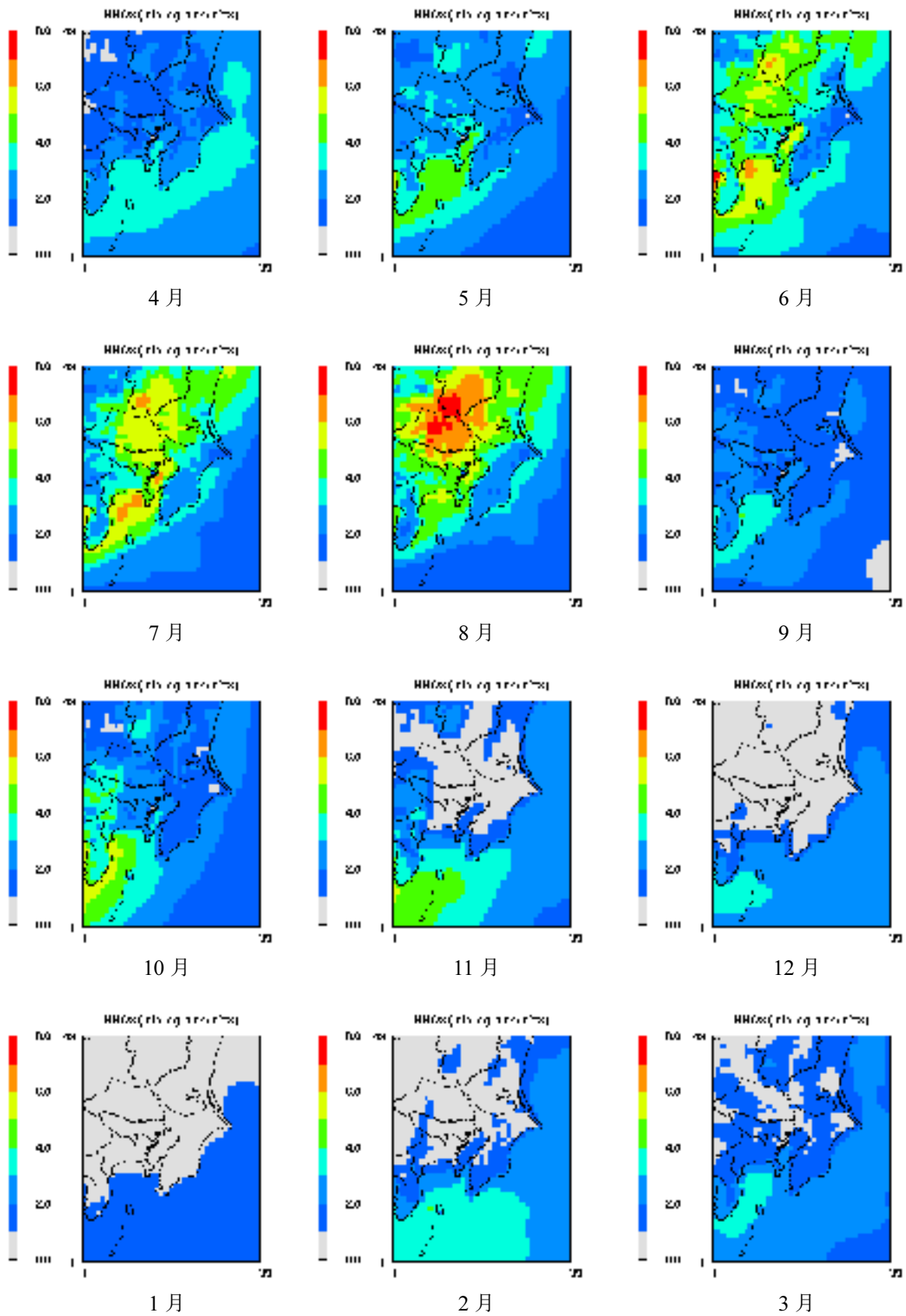
資料図 1-3 (1) NO<sub>2</sub> の月平均濃度分布 (現況)



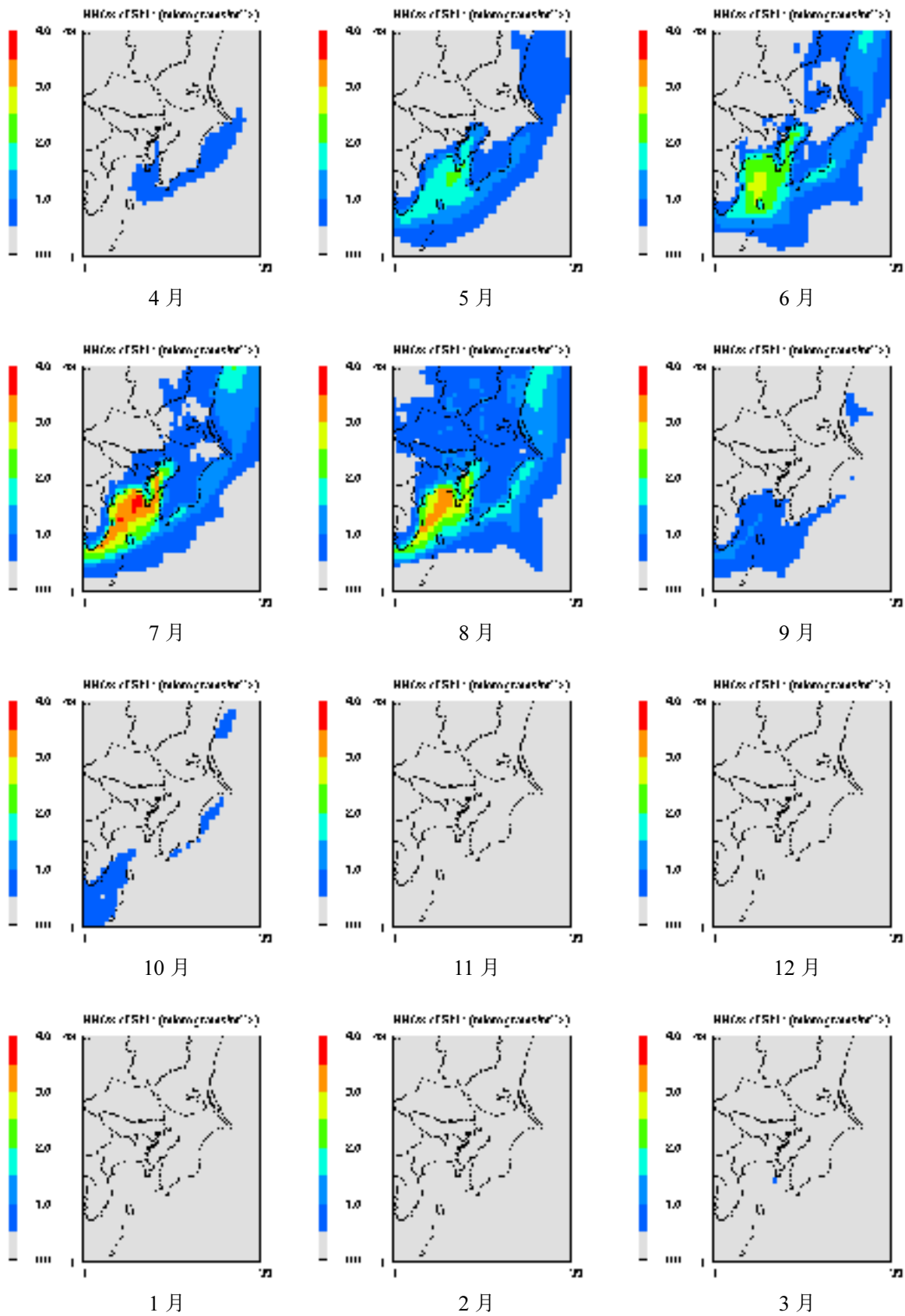
資料図 1-3 (2) NO<sub>2</sub> の月平均濃度分布 (船舶寄与)



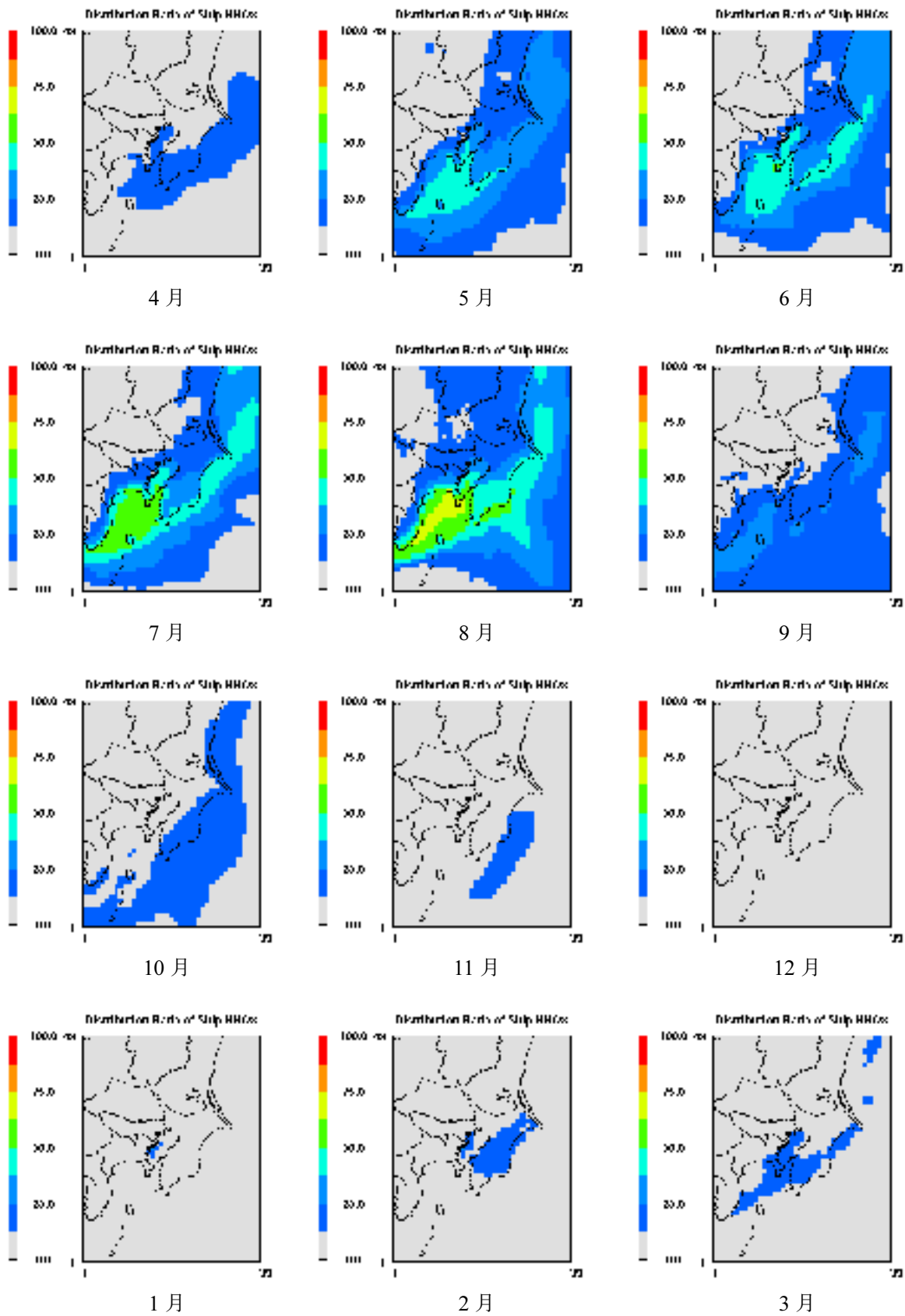
資料図 1-3 (3) NO<sub>2</sub> の月平均濃度分布 (船舶寄与割合)



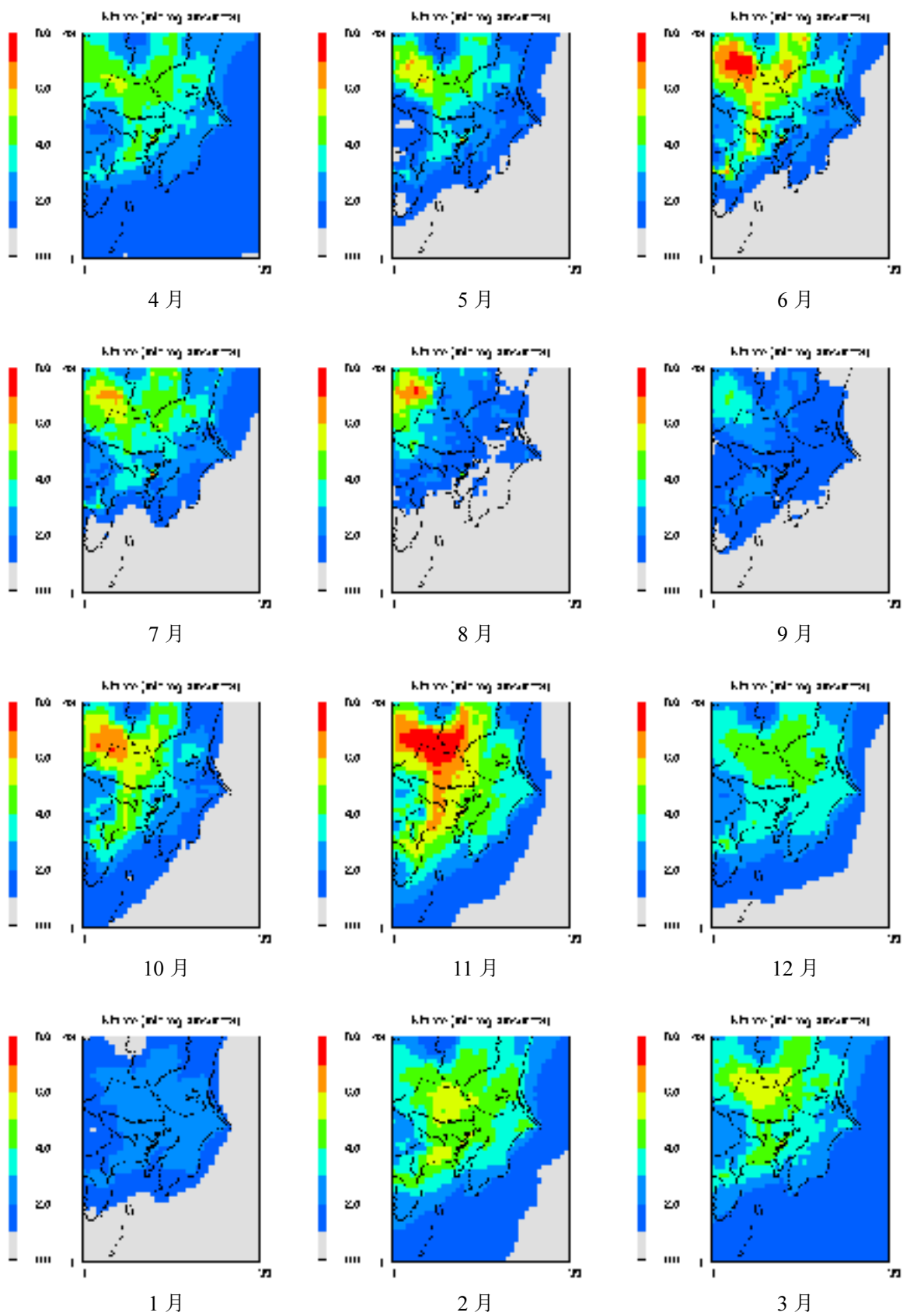
資料図 1-4 (1)  $\text{HNO}_3$  の月平均濃度分布 (現況)



資料図 1-4 (2) HNO<sub>3</sub> の月平均濃度分布 (船舶寄与)

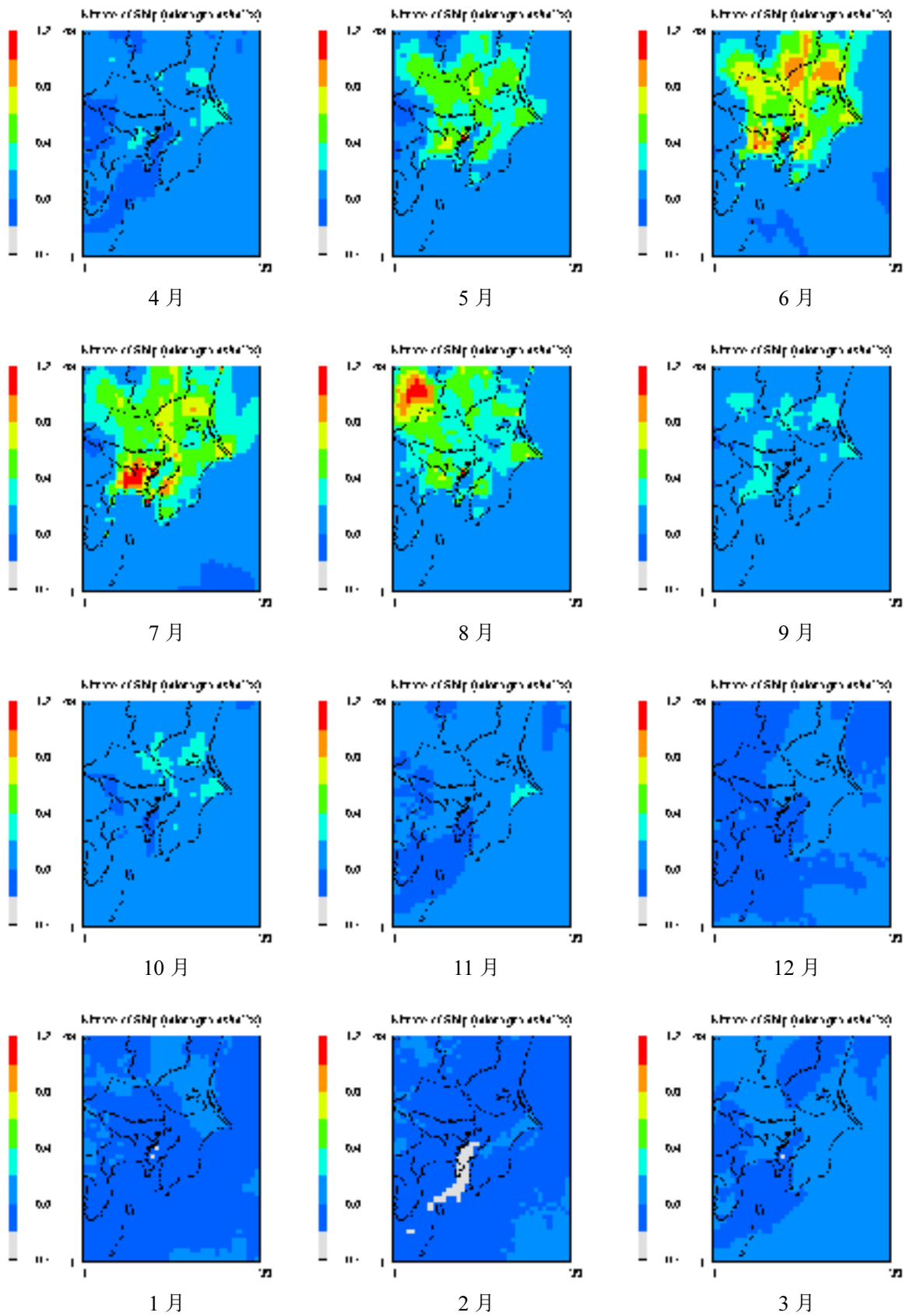


資料図 1-4 (3) HNO<sub>3</sub> の月平均濃度分布 (船舶寄与割合)

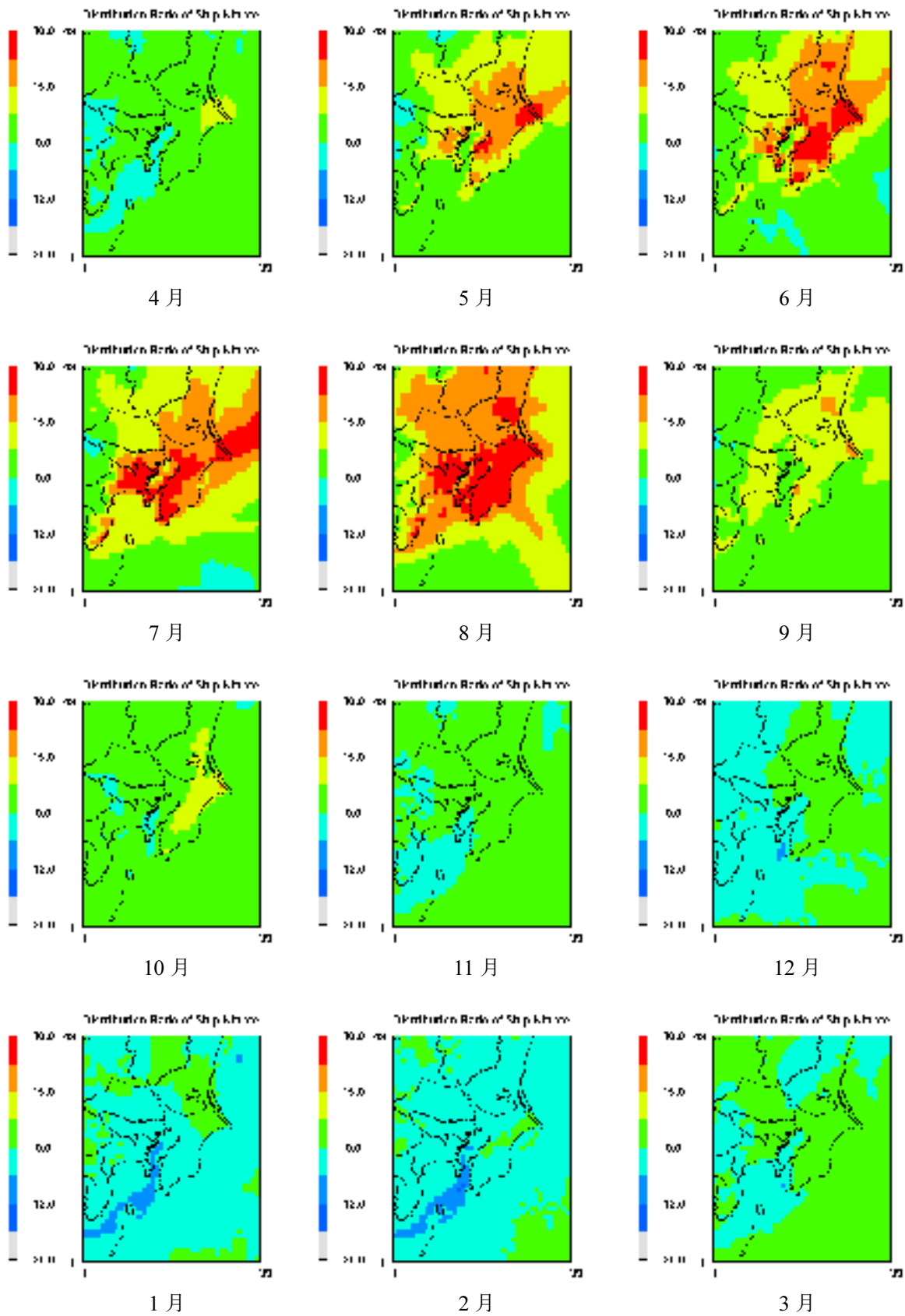


資料図 1-5 (1)  $\text{NO}_3$  粒子の月平均濃度分布 (現況)

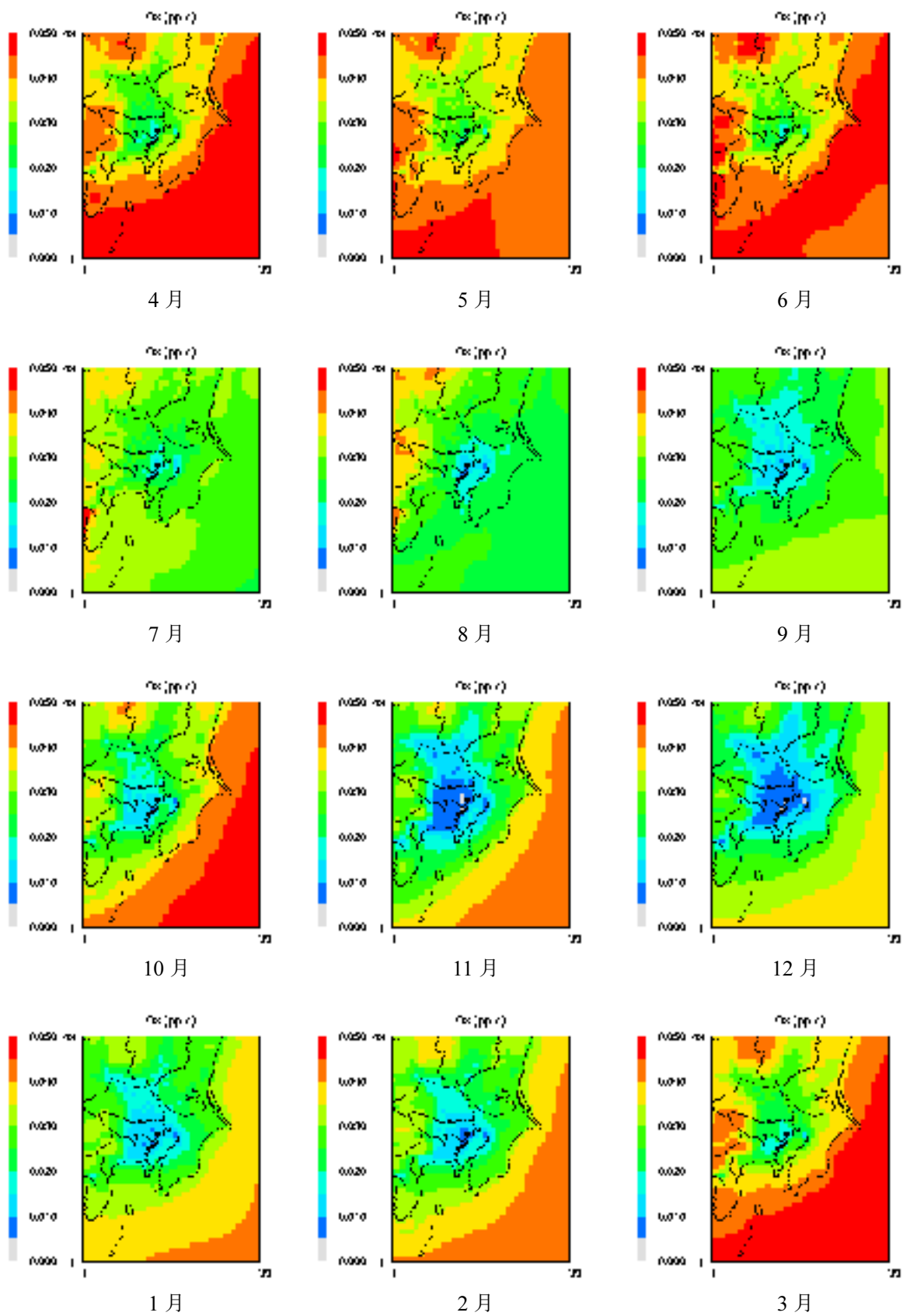




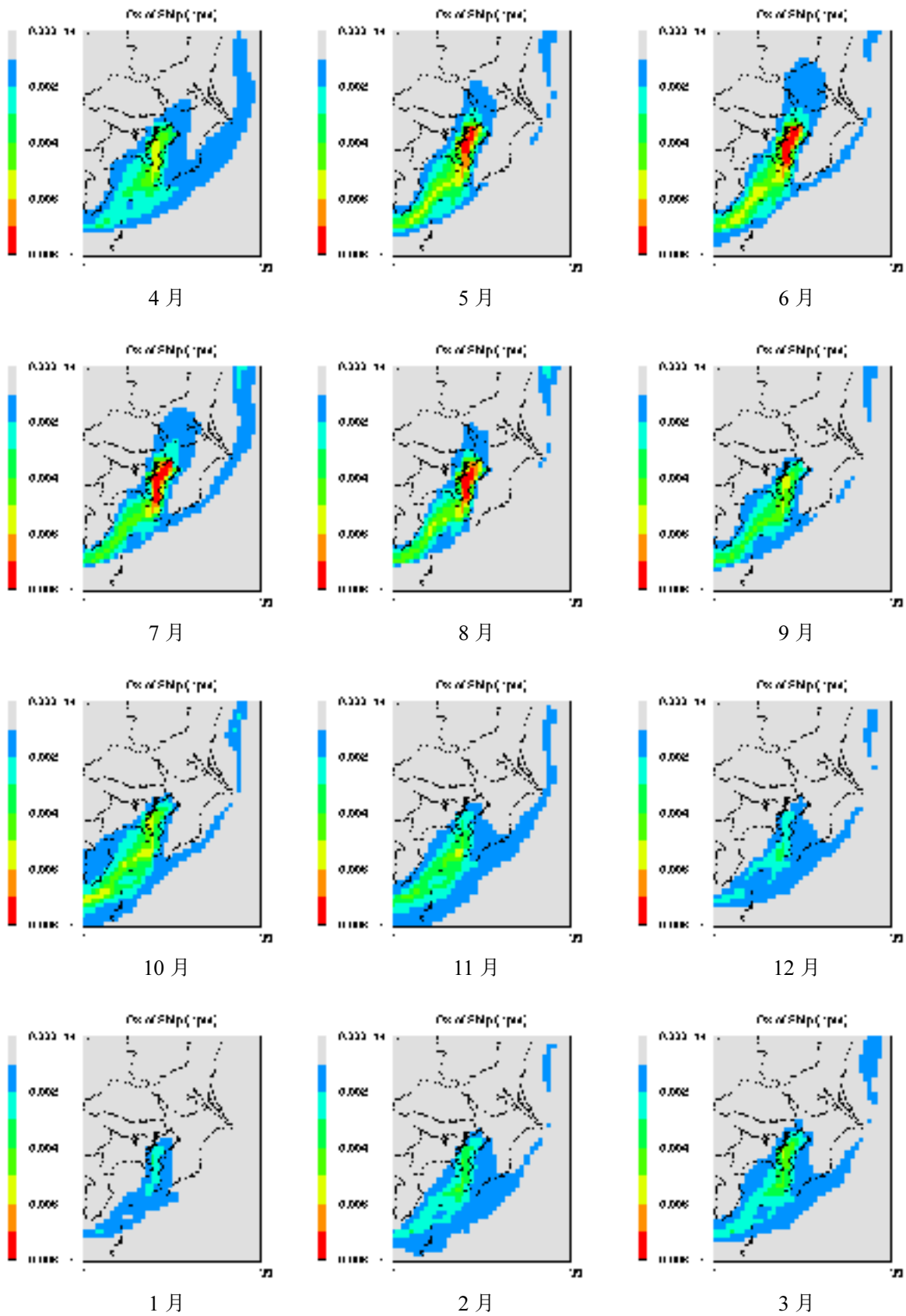
資料図 1-5 (2)  $\text{NO}_3$  粒子の月平均濃度分布 (船舶寄与)



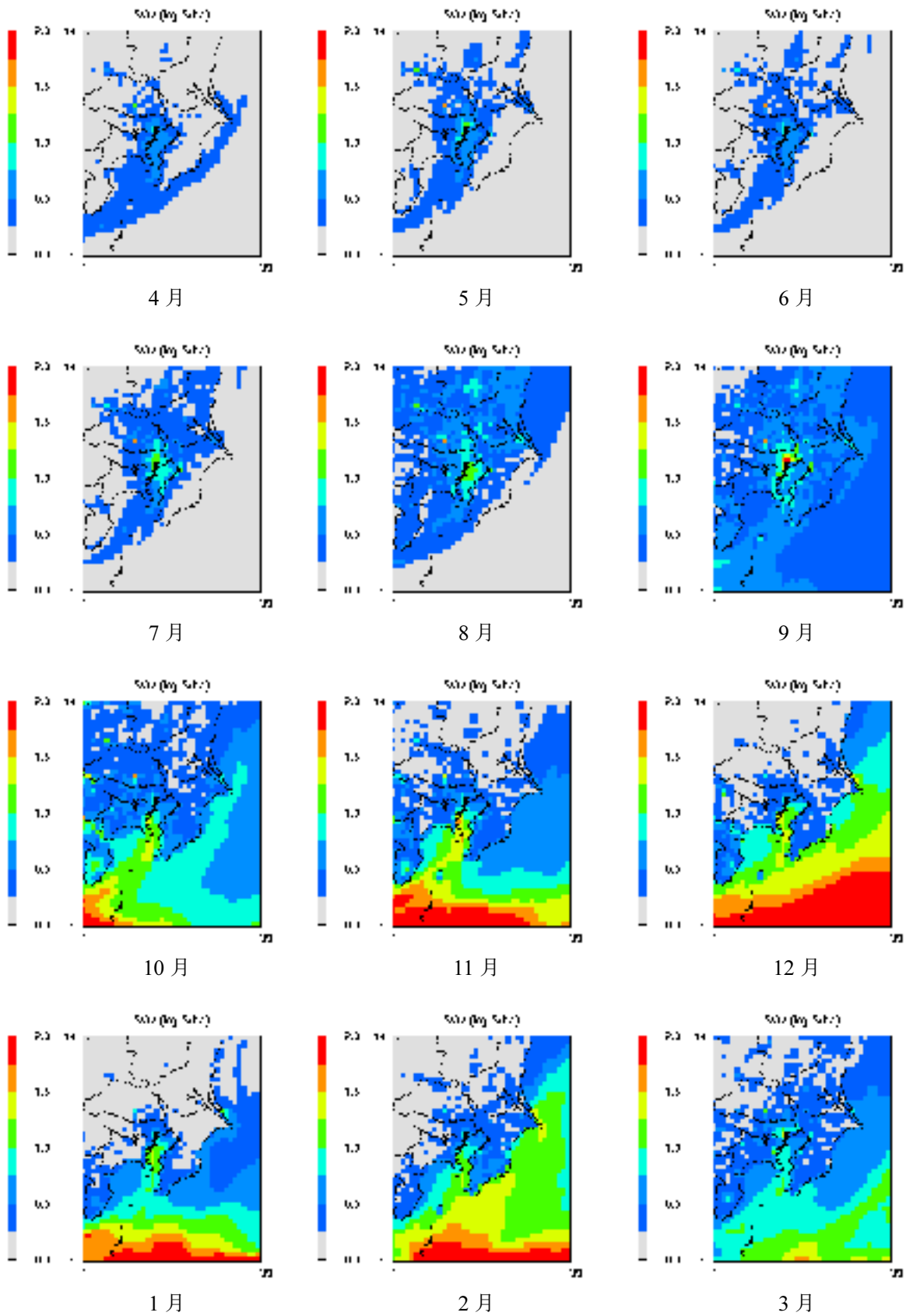
資料図 1-5 (3) NO<sub>3</sub> 粒子の月平均濃度分布 (船舶寄与割合)



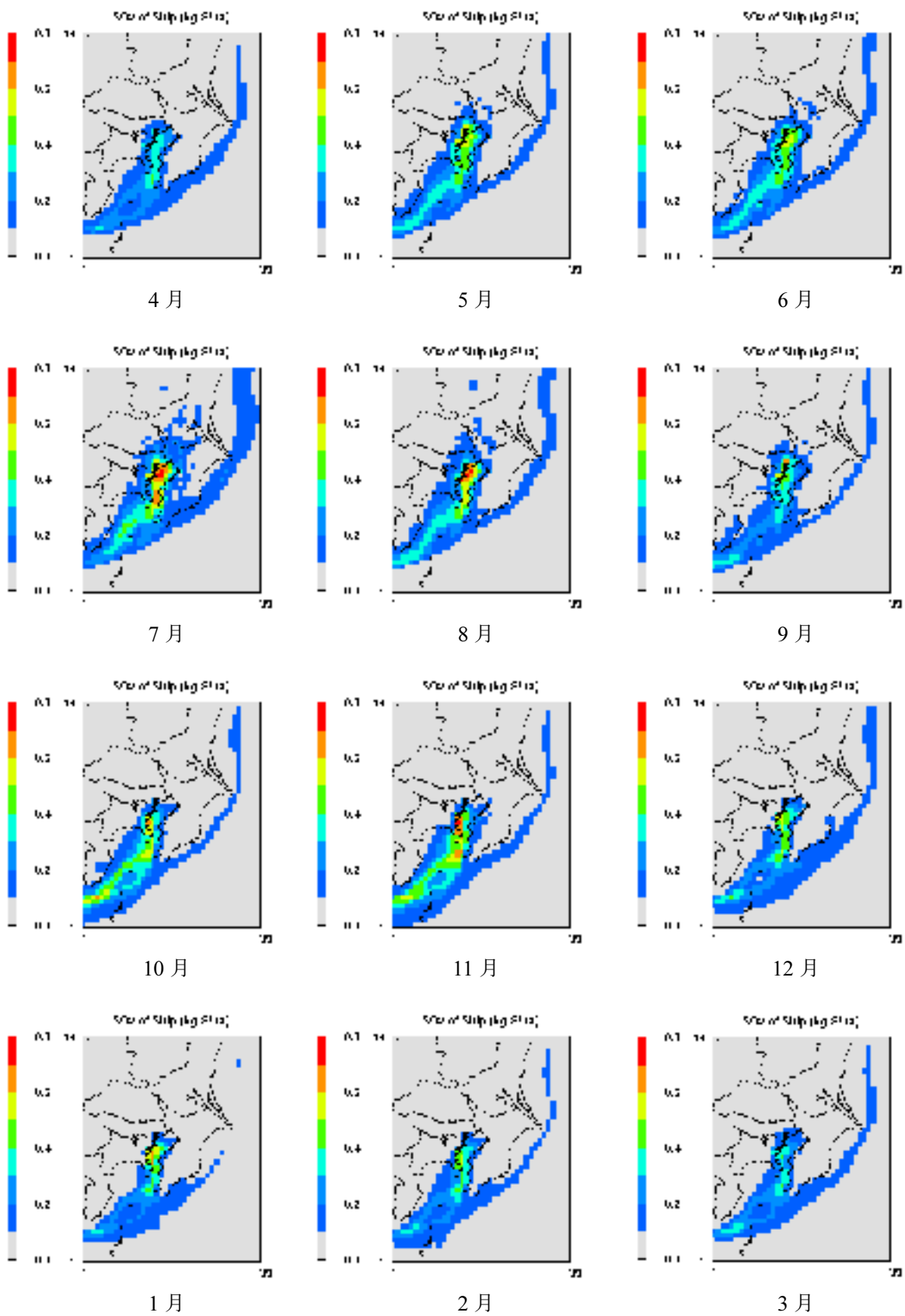
資料図 1-6 (1) O<sub>3</sub>の月平均濃度分布 (現況)



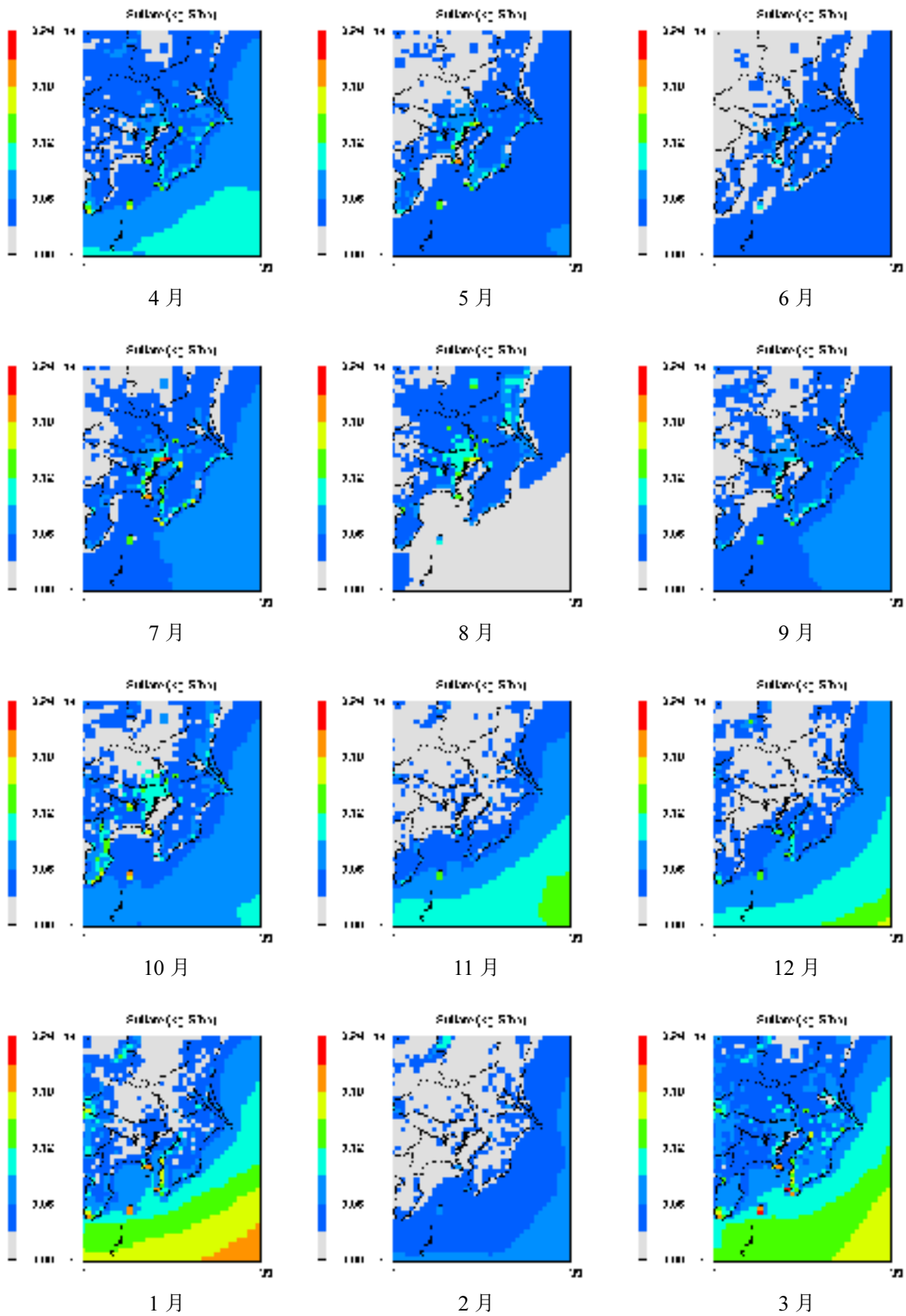
資料図 1-6 (2) O<sub>3</sub>の月平均濃度分布 (船舶寄与)



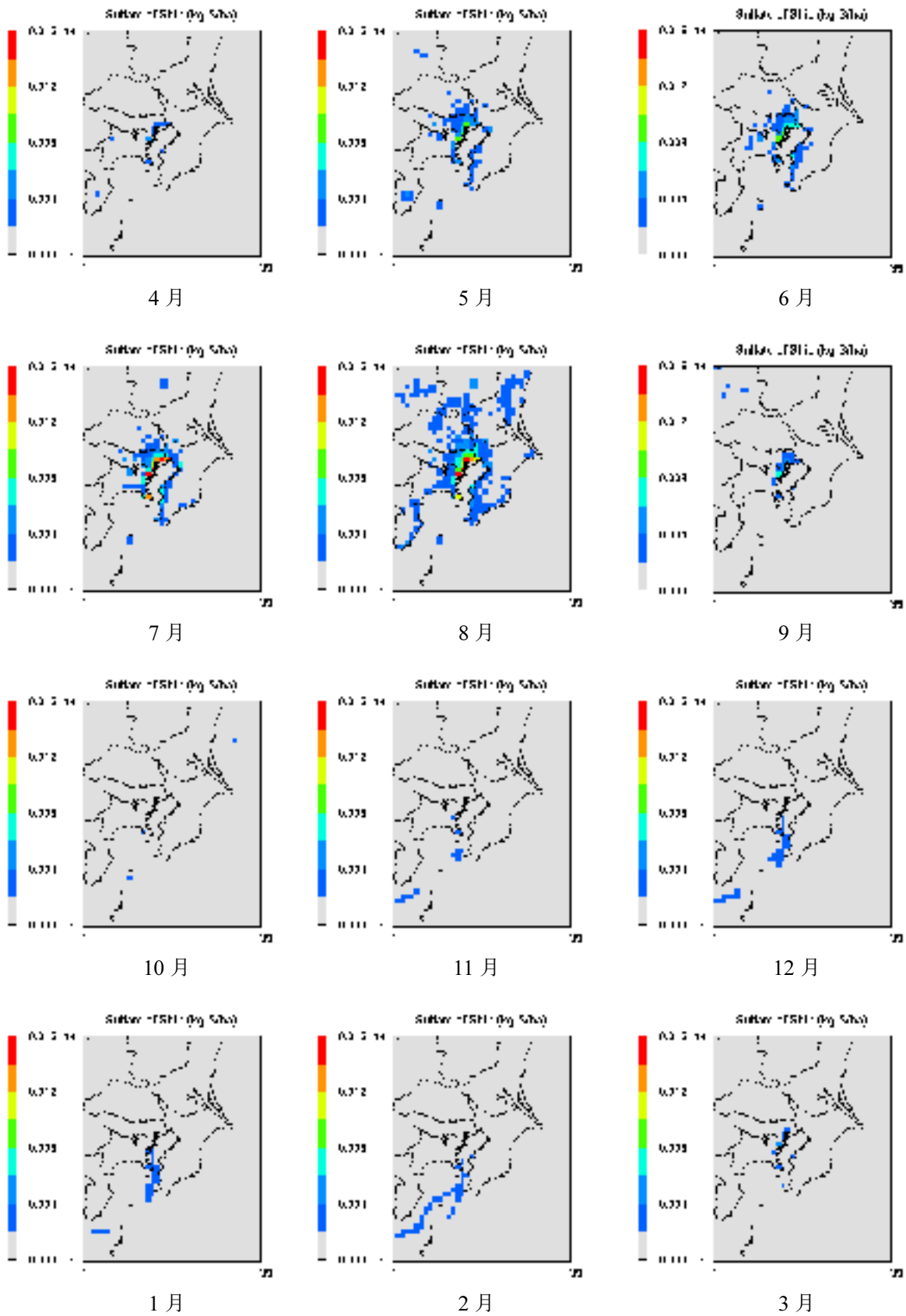
資料図 1-7 (1) SO<sub>2</sub>の月別乾性沈着量分布 (現況)



資料図 1-7 (2) SO<sub>2</sub>の月別乾性沈着量分布 (船舶寄与)

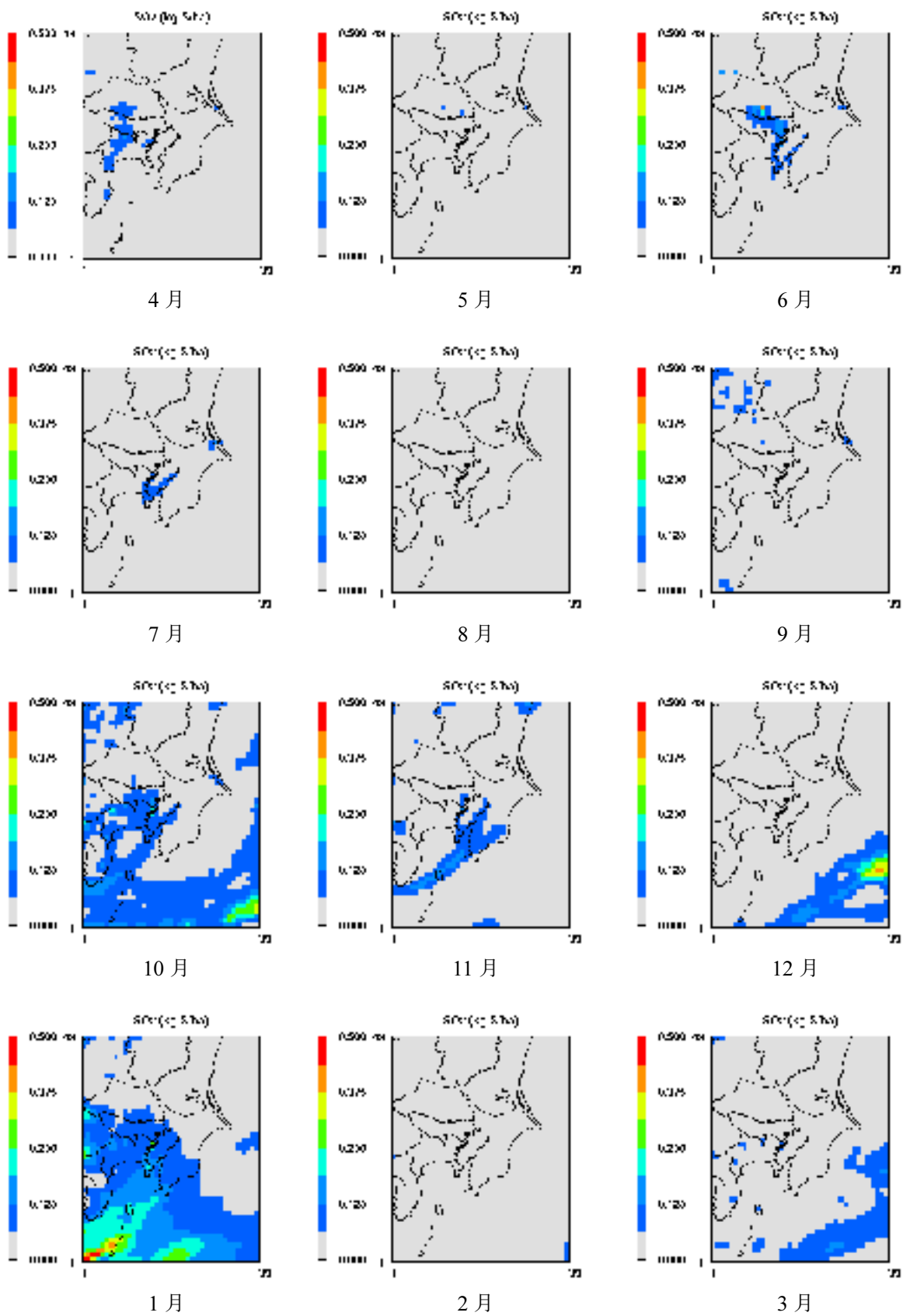


資料図 1-8 (1) SO<sub>4</sub> 粒子の月別乾性沈着量分布 (現況)

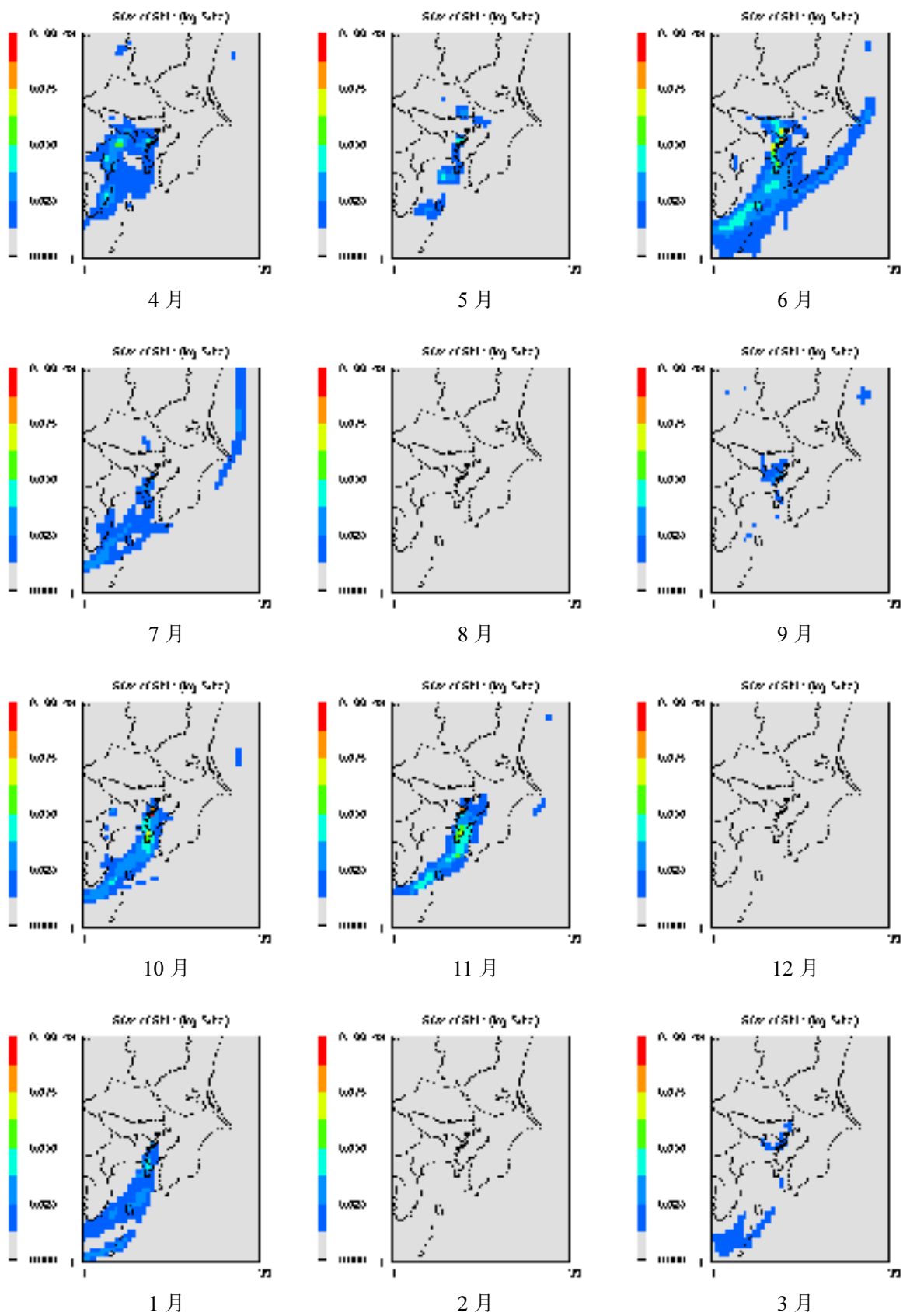


資料図 1-8 (2)  $SO_4$  粒子の月別乾性沈着量分布 (船舶寄与)

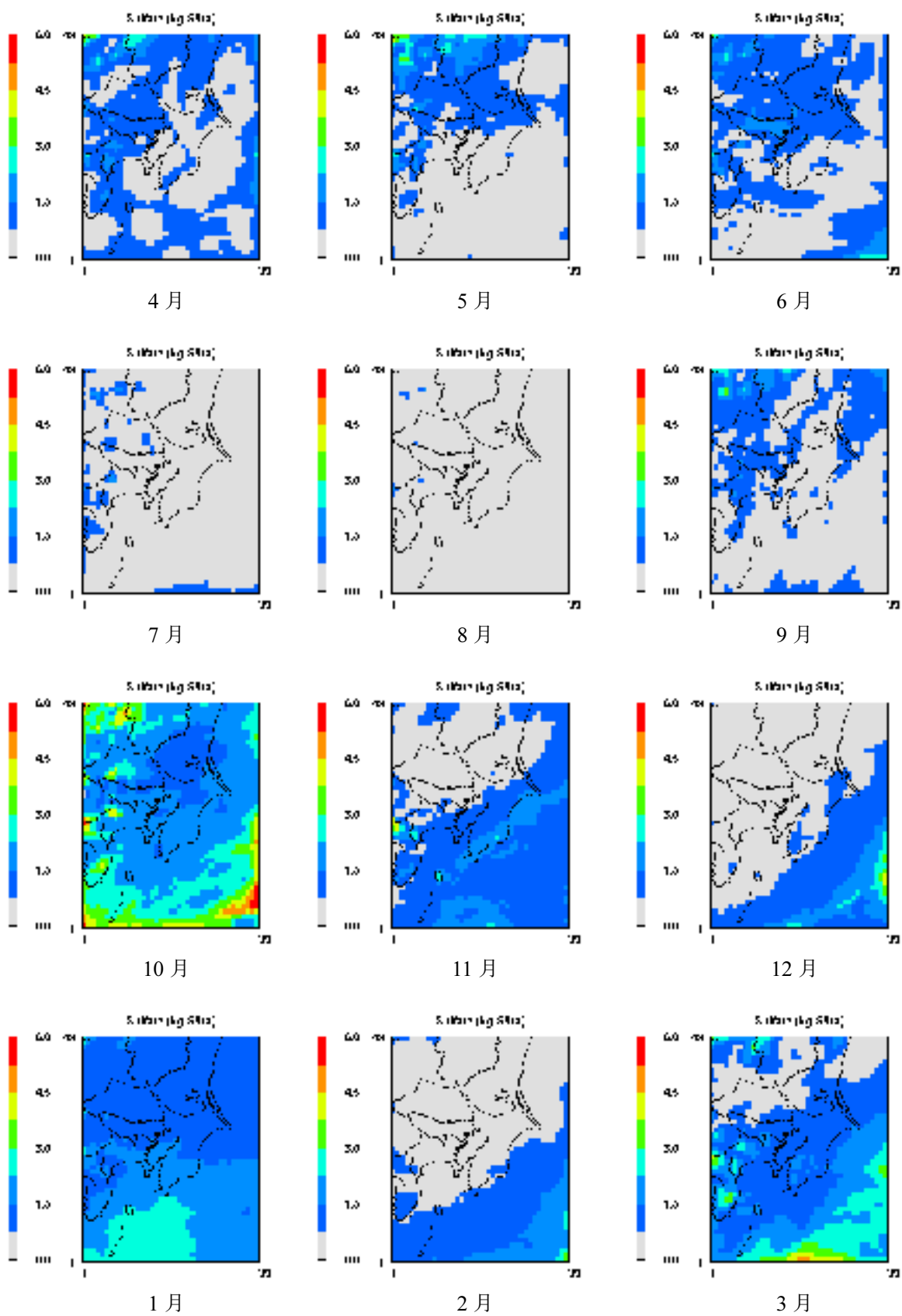




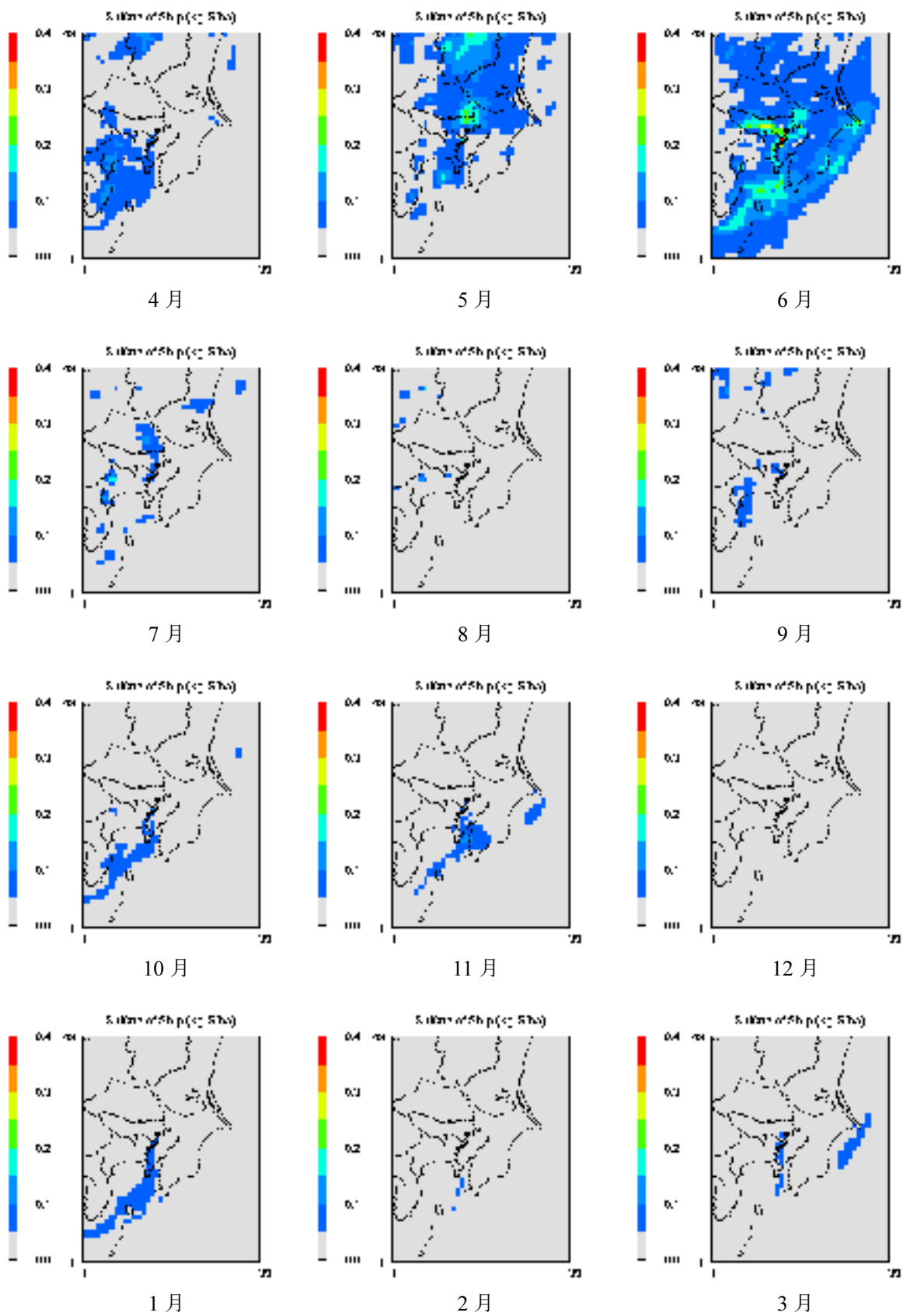
資料図 1-9 (1) SO<sub>2</sub> の月別湿性沈着量分布 (現況)



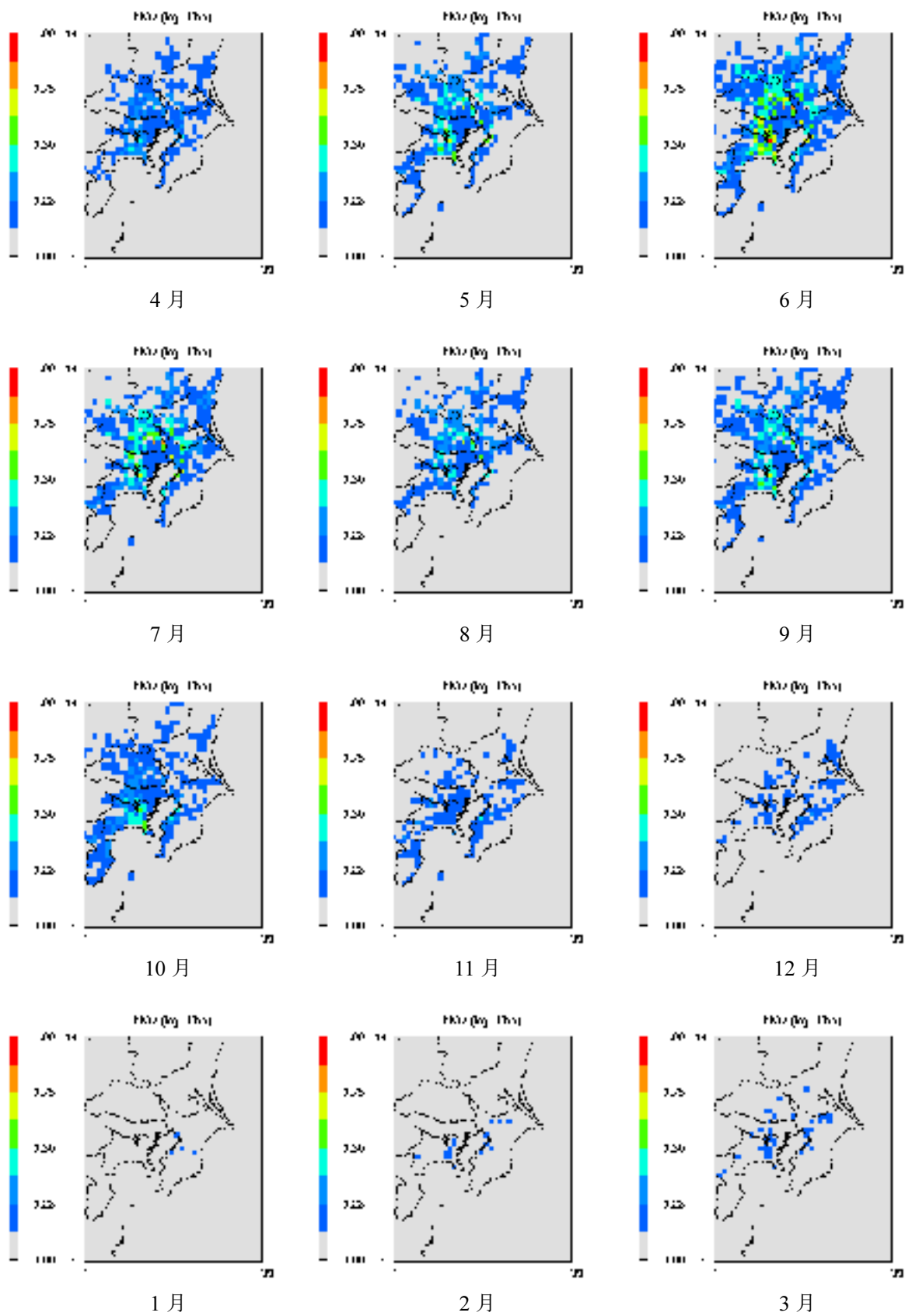
資料図 1-9 (2) SO<sub>2</sub>の月別湿性沈着量分布 (船舶寄与)



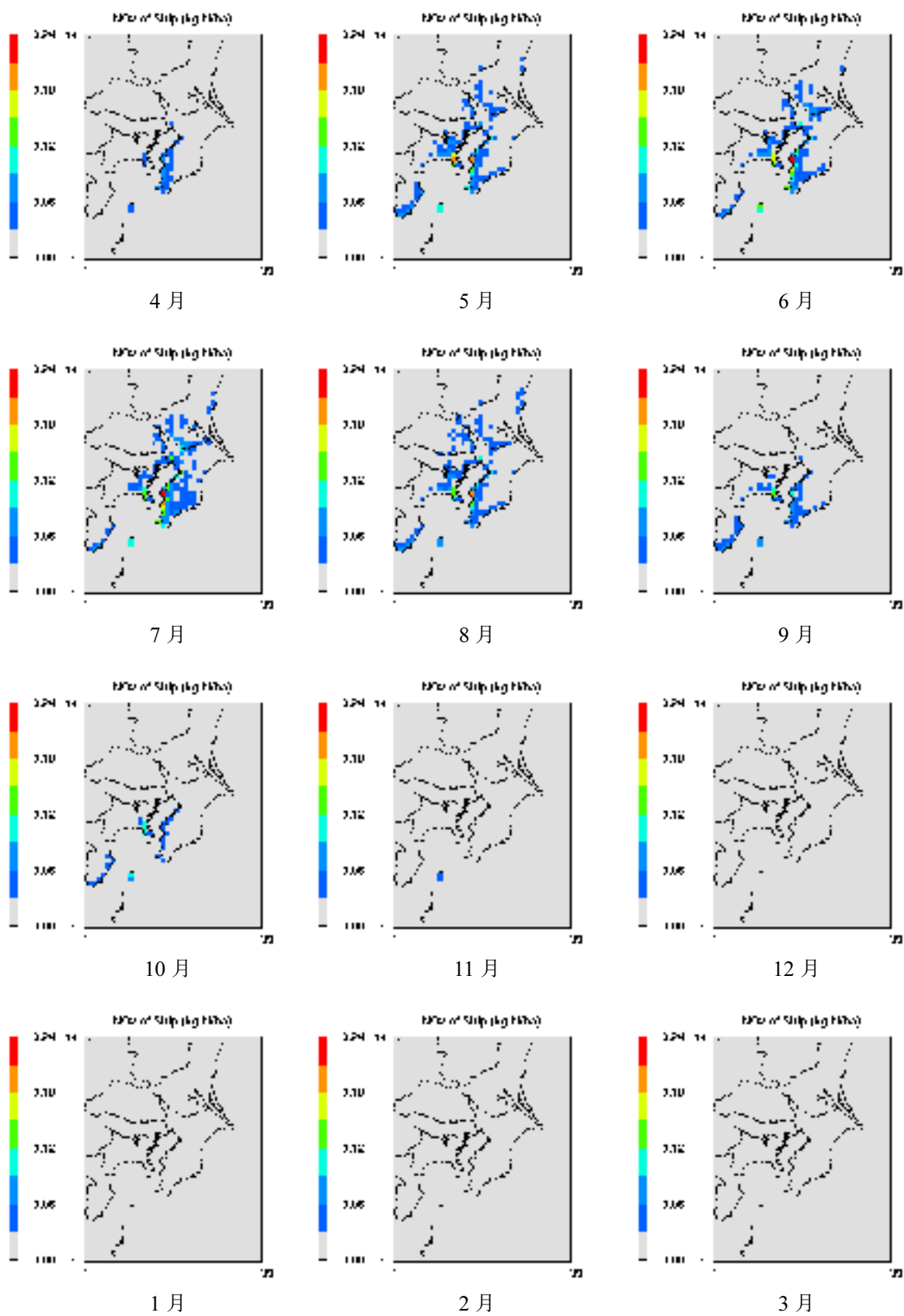
資料図 1-10 (1) SO<sub>4</sub>粒子の月別湿性沈着量分布 (現況)



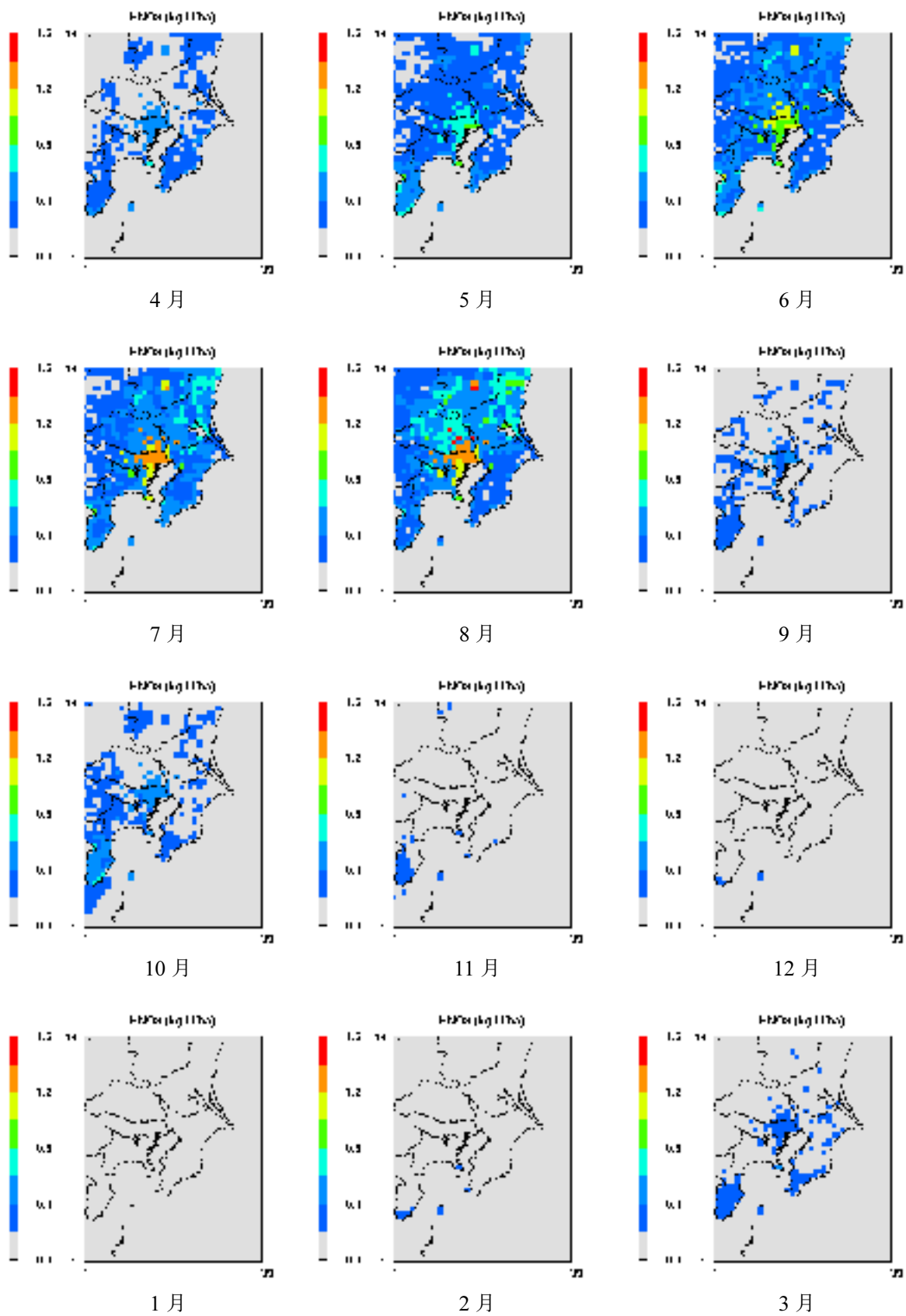
資料図 1-10 (2) SO<sub>4</sub>粒子の月別湿性沈着量分布 (船舶寄与)



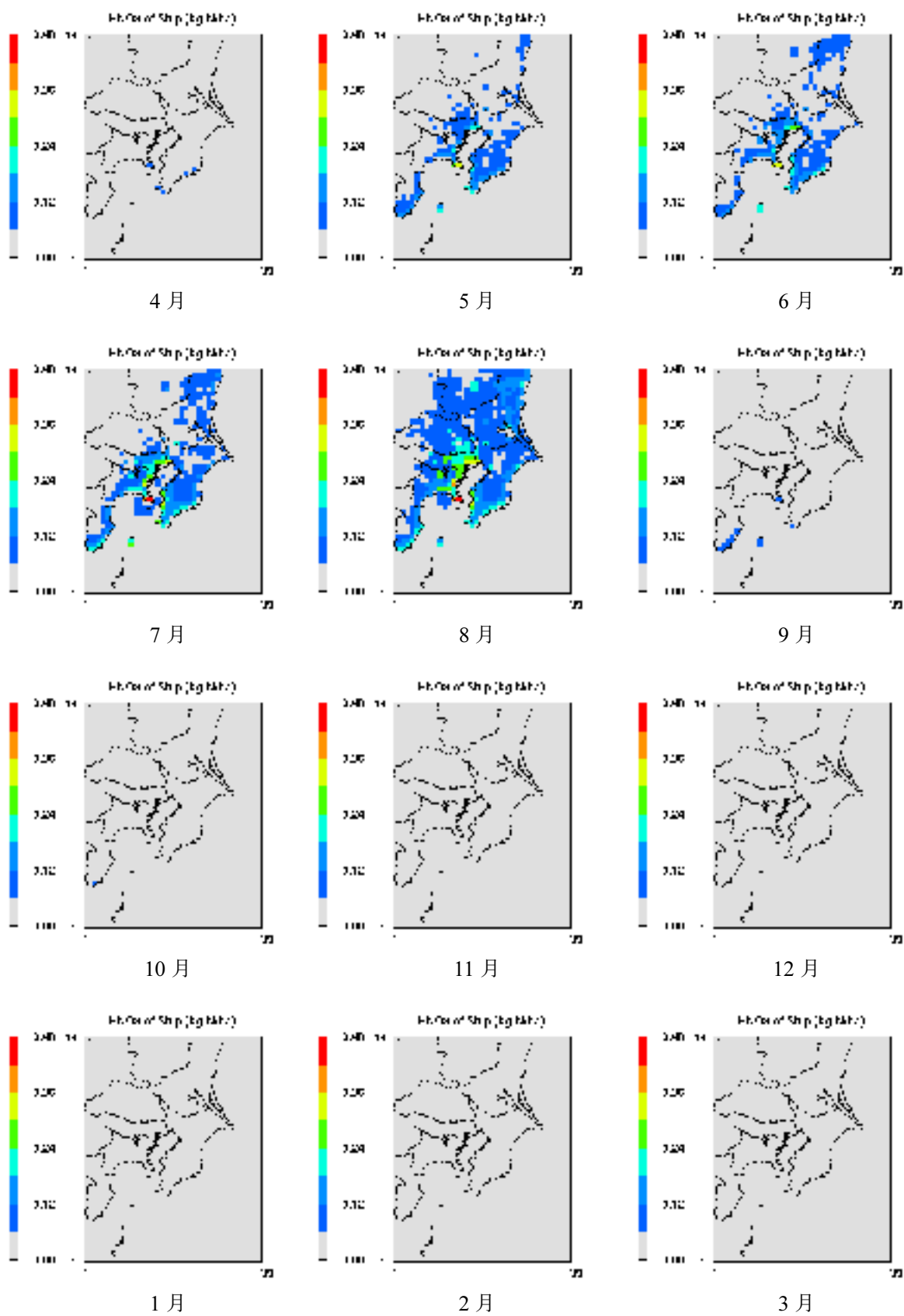
資料図 1-11 (1) NO<sub>2</sub> の月別乾性沈着量分布 (現況)



資料図 1-11 (2) NO<sub>2</sub>の月別乾性沈着量分布 (船舶寄与)

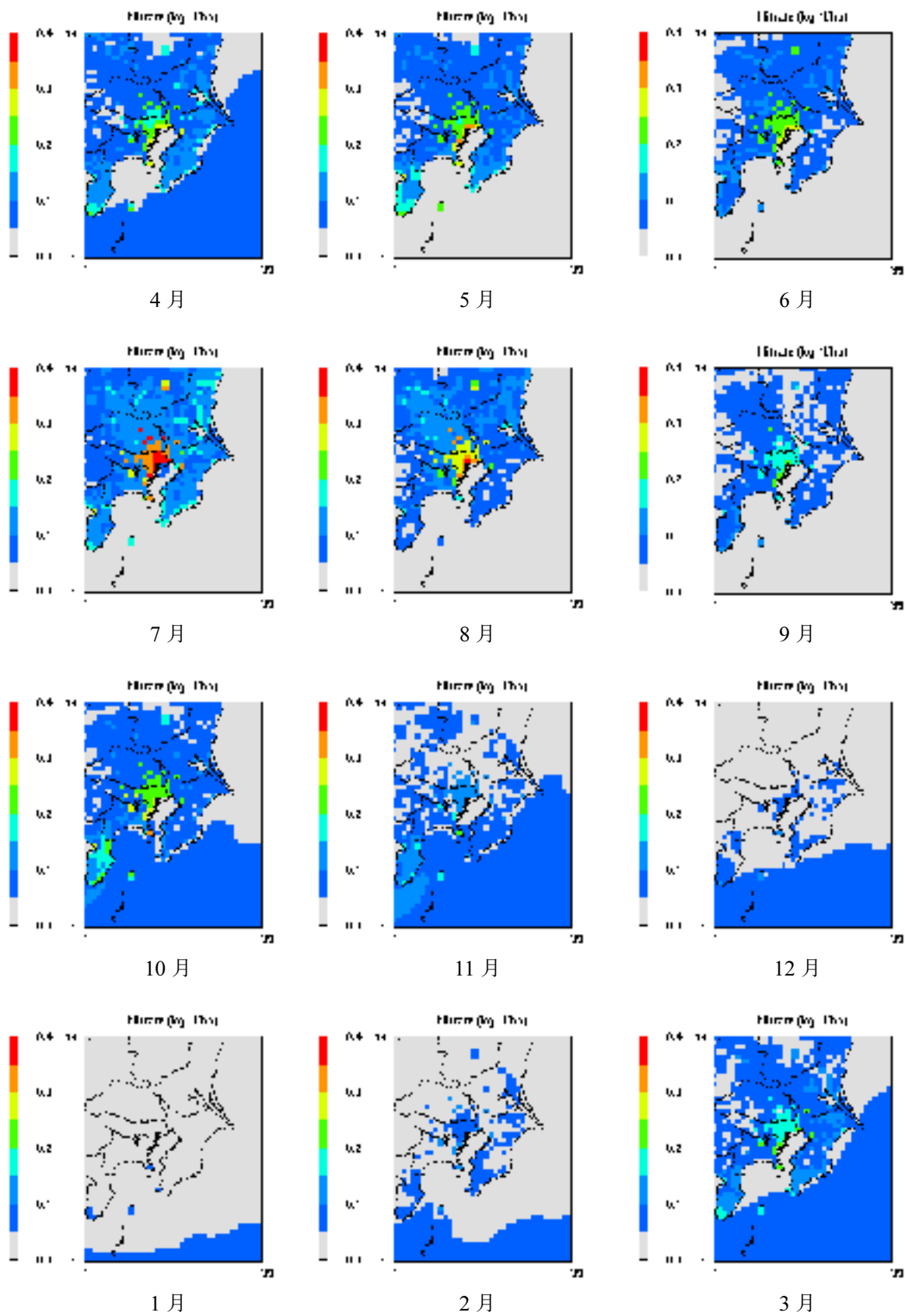


資料図 1-12 (1) HNO<sub>3</sub> の月別乾性沈着量分布 (現況)

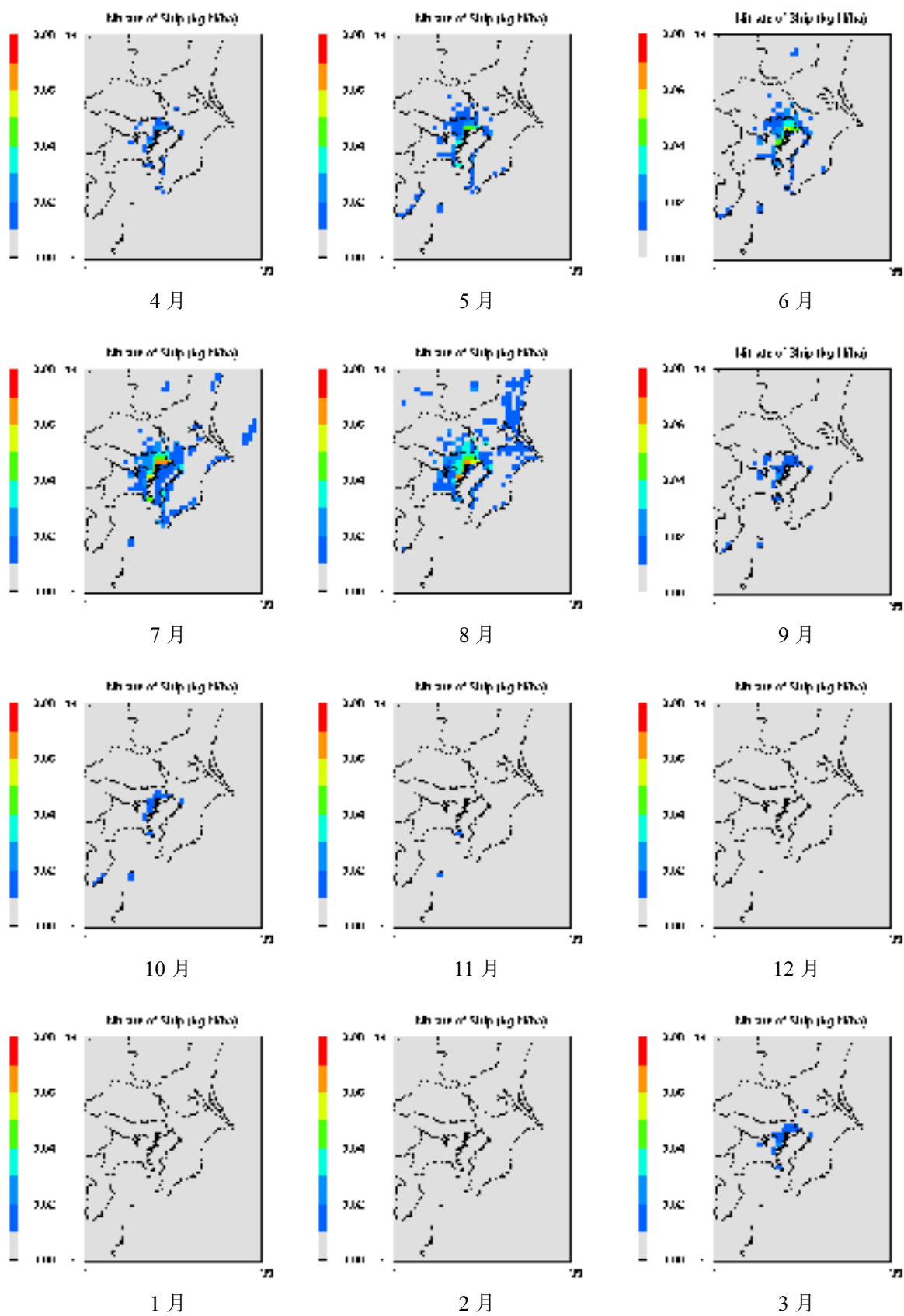


資料図 1-12 (2) HNO<sub>3</sub> の月別乾性沈着量分布 (船舶寄与)

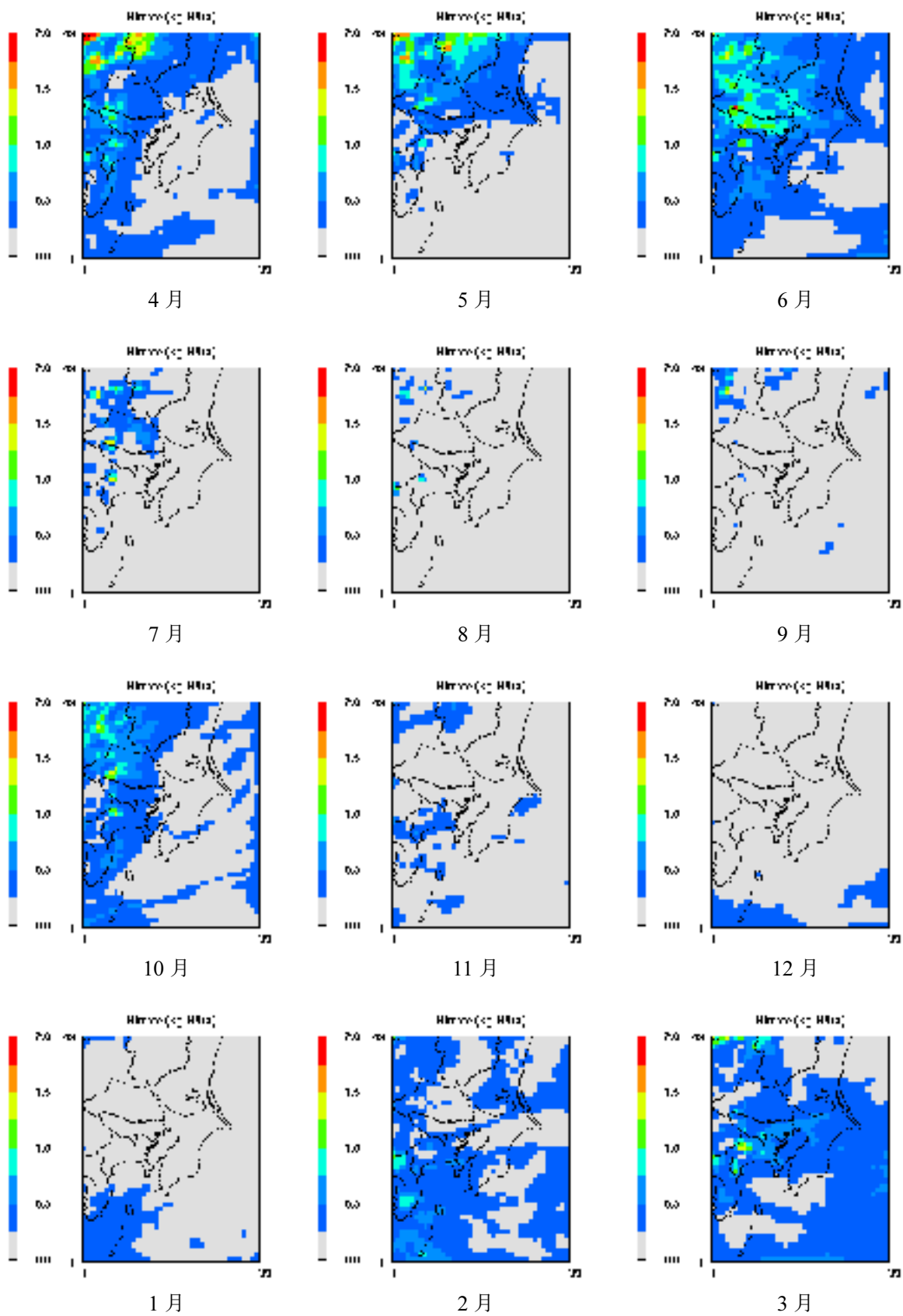




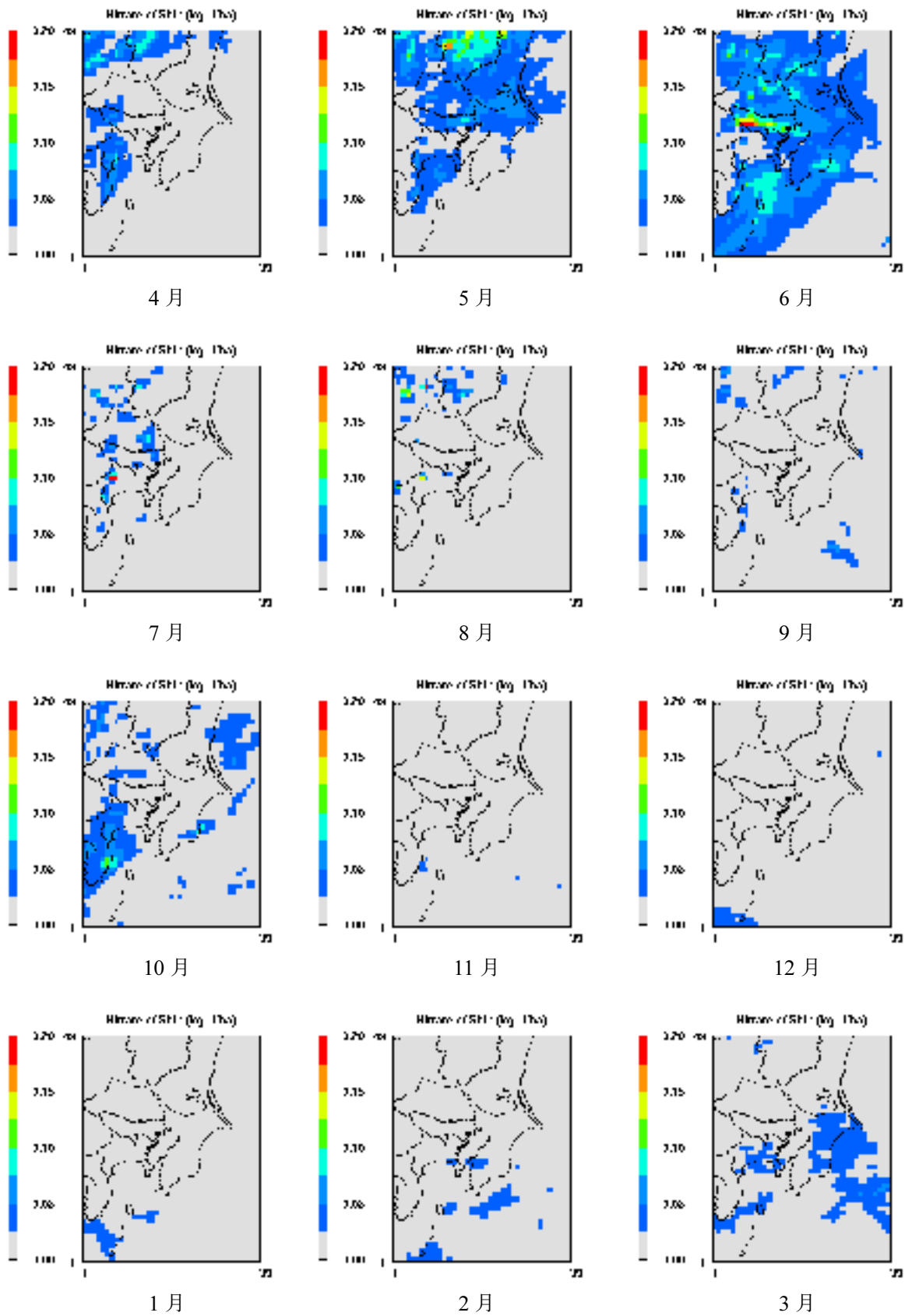
資料図 1-13 (1) NO<sub>3</sub>粒子の月別乾性沈着量分布 (現況)



資料図 1-13 (2)  $\text{NO}_3$  粒子の月別乾性沈着量分布 (船舶寄与)



資料図 1-14 (1)  $\text{NO}_3$  粒子の月別湿性沈着量分布 (現況)



資料図 1-14 (2)  $\text{NO}_3$  粒子の月別湿性沈着量分布 (船舶寄与)



## 資料編

### 2. 東京湾地域における船舶からの大気汚染物質 排出量算定結果

- ・ 港湾別船舶隻数
- ・ 係留時間・排出量算定結果
- ・ 項目間の相関(大気中 PM 測定)



資料表-1(1) 港湾別外内航別船種別船舶の隻数、総トン数および係留時間

全船舶：延	外内	トン階級	隻数・総トン数			延べ係留時間			平均係留時間		
			隻数	総トン数	平均トン数	係留時間	荷役	非荷役	係留時間	荷役	非荷役
			隻/年	千トン	トン/隻	時間/年	時間/年	時間/年	時間/隻	時間/隻	時間/隻
東京港	外航	コンテナ船	4,071	99,842	24,525	50,122	44,137	5,984	12.3	10.8	1.5
		一般貨物船	1,371	10,230	7,462	44,007	24,389	19,618	32.1	17.8	14.3
		タンカー	5	16	3,249	52	0	52	10.4	0.0	10.4
		貨客船	60	332	5,526	1,335	919	417	22.3	15.3	6.9
		フェリー	0	0		0	0	0	0.0	0.0	0.0
		RoRo船	19	268	14,110	313	268	46	16.5	14.1	2.4
		客船	29	646	22,275	750	0	750	25.9	0.0	25.9
	その他	85	549	6,461	2,423	1,056	1,367	28.5	12.4	16.1	
	内航	コンテナ船	511	2,245	4,393	8,606	7,259	1,347	16.8	14.2	2.6
		一般貨物船	9,186	12,904	1,405	162,160	116,135	46,025	17.7	12.6	5.0
		タンカー	5,921	2,394	404	122,283	469	121,814	20.7	0.1	20.6
		貨客船	1,300	6,135	4,720	11,755	10,335	1,420	9.0	8.0	1.1
		フェリー	0	0		0	0	0	0.0	0.0	0.0
		RoRo船	1,524	9,485	6,224	14,974	14,468	507	9.8	9.5	0.3
客船		946	6,153	6,504	15,786	0	15,786	16.7	0.0	16.7	
その他	18,774	7,973	425	98,020	31,649	66,372	5.2	1.7	3.5		
川崎港	外航	コンテナ船	206	2,422	11,755	1,654	1,443	211	8.0	7.0	1.0
		一般貨物船	1,329	23,575	17,739	33,975	22,968	11,007	25.6	17.3	8.3
		タンカー	1,155	36,225	31,364	24,202	17,398	6,803	21.0	15.1	5.9
		貨客船	0	0		0	0	0	0.0	0.0	0.0
		フェリー	0	0		0	0	0	0.0	0.0	0.0
		RoRo船	9	145	16,130	279	194	86	31.0	21.5	9.5
		客船	0	0		0	0	0	0.0	0.0	0.0
	その他	8	36	4,476	338	192	146	42.3	24.0	18.3	
	内航	コンテナ船	0	0		0	0	0	0.0	0.0	0.0
		一般貨物船	9,845	9,383	953	62,925	57,487	5,438	6.4	5.8	0.6
		タンカー	27,697	15,029	543	397,843	110,177	287,666	14.4	4.0	10.4
		貨客船	0	0		0	0	0	0.0	0.0	0.0
		フェリー	328	3,798	11,580	1,439	0	1,439	4.4	0.0	4.4
		RoRo船	233	1,317	5,652	2,552	2,552	0	11.0	11.0	0.0
客船		0	0		0	0	0	0.0	0.0	0.0	
その他	281	400	1,425	4,559	3,444	1,116	16.2	12.3	4.0		
横浜港	外航	コンテナ船	7,069	137,651	19,472	102,169	44,356	57,813	14.5	6.3	8.2
		一般貨物船	6,174	75,479	12,225	160,207	74,258	85,948	25.9	12.0	13.9
		タンカー	1,236	28,304	22,900	32,234	14,445	17,789	26.1	11.7	14.4
		貨客船	0	0		0	0	0	0.0	0.0	0.0
		フェリー	0	0		0	0	0	0.0	0.0	0.0
		RoRo船	784	6,051	7,718	19,883	9,720	10,163	25.4	12.4	13.0
		客船	4	84	20,968	84	0	84	21.1	0.0	21.1
	その他	34	100	2,931	1,242	641	601	36.5	18.9	17.7	
	内航	コンテナ船	558	675	1,209	4,311	3,432	878	7.7	6.2	1.6
		一般貨物船	18,896	17,931	949	178,916	158,585	20,330	9.5	8.4	1.1
		タンカー	18,548	16,426	886	242,125	61,839	180,287	13.1	3.3	9.7
		貨客船	0	0		0	0	0	0.0	0.0	0.0
		フェリー	0	0		0	0	0	0.0	0.0	0.0
		RoRo船	2	14	6,750	25	21	5	12.5	10.3	2.3
客船		1,450	3,417	2,357	6,611	0	6,611	4.6	0.0	4.6	
その他	52	170	3,265	2,270	990	1,279	43.6	19.0	24.6		



資料表-1(2) 港湾別外内航別船種別船舶の隻数、総トン数および係留時間

全船舶：延	外内	トン階級	隻数・総トン数			延べ係留時間			平均係留時間		
			隻数	総トン数	平均トン数	係留時間	荷役	非荷役	係留時間	荷役	非荷役
			隻/年	千トン	トン/隻	時間/年	時間/年	時間/年	時間/隻	時間/隻	時間/隻
千葉港	外航	コンテナ船	378	3,767	9,965	2,025	1,815	211	5.4	4.8	0.6
		一般貨物船	2,968	29,799	10,040	117,032	65,839	51,193	39.4	22.2	17.2
		タンカー	1,768	51,221	28,971	38,719	27,442	11,277	21.9	15.5	6.4
		貨客船	0	0		0	0	0	0.0	0.0	0.0
		フェリー	0	0		0	0	0	0.0	0.0	0.0
		RoRo船	6	145	24,114	98	69	29	16.4	11.6	4.8
		客船	1	22	21,884	16	0	16	15.6	0.0	15.6
	その他	1	0	230	22	17	5	21.7	16.8	4.8	
	内航	コンテナ船	338	467	1,382	2,759	2,604	155	8.2	7.7	0.5
		一般貨物船	27,985	22,879	818	317,384	310,377	7,007	11.3	11.1	0.3
		タンカー	44,792	29,920	668	630,196	211,832	418,364	14.1	4.7	9.3
		貨客船	0	0		0	0	0	0.0	0.0	0.0
		フェリー	0	0		0	0	0	0.0	0.0	0.0
		RoRo船	661	2,953	4,467	9,580	8,756	824	14.5	13.2	1.2
客船		653	126	192	6,014	0	6,014	9.2	0.0	9.2	
その他	5,692	860	151	41,607	40,941	666	7.3	7.2	0.1		
木更津港	外航	コンテナ船	1	36	35,890	13	12	0	12.9	12.5	0.5
		一般貨物船	1,204	23,126	19,207	54,038	28,692	25,346	44.9	23.8	21.1
		タンカー	89	8,551	96,078	2,128	1,598	530	23.9	18.0	6.0
		貨客船	0	0		0	0	0	0.0	0.0	0.0
		フェリー	0	0		0	0	0	0.0	0.0	0.0
		RoRo船	0	0		0	0	0	0.0	0.0	0.0
		客船	0	0		0	0	0	0.0	0.0	0.0
	その他	1	1	950	48	24	24	48.0	24.0	24.0	
	内航	コンテナ船	0	0		0	0	0	0.0	0.0	0.0
		一般貨物船	18,497	9,949	538	238,032	223,354	14,678	12.9	12.1	0.8
		タンカー	724	409	565	10,091	3,645	6,447	13.9	5.0	8.9
		貨客船	0	0		0	0	0	0.0	0.0	0.0
		フェリー	0	0		0	0	0	0.0	0.0	0.0
		RoRo船	0	0		0	0	0	0.0	0.0	0.0
客船		0	0		0	0	0	0.0	0.0	0.0	
その他	5,611	952	170	39,190	39,101	89	7.0	7.0	0.0		
横須賀港	外航	コンテナ船	0	0		0	0	0	0.0	0.0	0.0
		一般貨物船	412	6,749	16,393	6,036	4,596	1,440	14.7	11.2	3.5
		タンカー	0	0		0	0	0	0.0	0.0	0.0
		貨客船	0	0		0	0	0	0.0	0.0	0.0
		フェリー	0	0		0	0	0	0.0	0.0	0.0
		RoRo船	0	0		0	0	0	0.0	0.0	0.0
		客船	0	0		0	0	0	0.0	0.0	0.0
	その他	0	0		0	0	0	0.0	0.0	0.0	
	内航	コンテナ船	0	0		0	0	0	0.0	0.0	0.0
		一般貨物船	14,748	8,237	559	167,164	67,093	100,071	11.3	4.5	6.8
		タンカー	312	227	728	813	813	0	2.6	2.6	0.0
		貨客船	0	0		0	0	0	0.0	0.0	0.0
		フェリー	7,106	19,366	2,725	2,345	0	2,345	0.3	0.0	0.3
		RoRo船	0	0		0	0	0	0.0	0.0	0.0
客船		0	0		0	0	0	0.0	0.0	0.0	
その他	728	2,061	2,831	16,162	0	16,162	22.2	0.0	22.2		

資料表-2(1) 港湾別外内航別トン階級別船舶の隻数、総トン数および係留時間

全船舶：延	外内	トン階級	隻数・総トン数			延べ係留時間			平均係留時間		
			隻数	総トン数	平均トン数	係留時間	荷役	非荷役	係留時間	荷役	非荷役
			隻/年	千トン	トン/隻	時間/年	時間/年	時間/年	時間/隻	時間/隻	時間/隻
東京港	外航	500G/T未満	21	7	349	491	107	384	23.4	5.1	18.3
		500～1,000G/T未満	75	59	781	2,441	1,473	968	32.5	19.6	12.9
		1,000～3,000G/T未満	459	949	2,067	14,495	9,178	5,317	31.6	20.0	11.6
		3,000～6,000G/T未満	1,123	4,864	4,332	22,214	11,539	10,675	19.8	10.3	9.5
		6,000～10,000G/T未満	984	8,121	8,253	12,576	9,965	2,610	12.8	10.1	2.7
		10,000～30,000G/T未満	1,523	25,917	17,017	24,397	19,215	5,182	16.0	12.6	3.4
		30,000～60,000G/T未満	1,133	49,855	44,003	16,692	14,510	2,181	14.7	12.8	1.9
		60,000～100,000G/T未満	322	22,111	68,667	5,696	4,780	916	17.7	14.8	2.8
		100,000G/T以上	0	0		0	0	0	0.0	0.0	0.0
	内航	500G/T未満	28,763	5,037	175	345,514	125,964	219,550	12.0	4.4	7.6
		500～1,000G/T未満	918	649	707	8,471	6,813	1,658	9.2	7.4	1.8
		1,000～3,000G/T未満	3,958	8,230	2,079	33,235	9,801	23,434	8.4	2.5	5.9
		3,000～6,000G/T未満	2,362	10,440	4,420	24,246	22,205	2,041	10.3	9.4	0.9
		6,000～10,000G/T未満	1,164	9,685	8,321	9,239	8,041	1,197	7.9	6.9	1.0
		10,000～30,000G/T未満	997	13,249	13,289	12,881	7,490	5,390	12.9	7.5	5.4
30,000～60,000G/T未満		0	0		0	0	0	0.0	0.0	0.0	
60,000～100,000G/T未満		0	0		0	0	0	0.0	0.0	0.0	
100,000G/T以上		0	0		0	0	0	0.0	0.0	0.0	
川崎港	外航	500G/T未満	63	27	427	706	639	67	11.2	10.2	1.1
		500～1,000G/T未満	193	160	831	2,840	2,045	795	14.7	10.6	4.1
		1,000～3,000G/T未満	493	932	1,890	9,587	6,890	2,698	19.4	14.0	5.5
		3,000～6,000G/T未満	483	2,106	4,360	8,808	6,481	2,326	18.2	13.4	4.8
		6,000～10,000G/T未満	300	2,379	7,928	5,490	4,139	1,351	18.3	13.8	4.5
		10,000～30,000G/T未満	603	11,354	18,829	13,858	9,572	4,286	23.0	15.9	7.1
		30,000～60,000G/T未満	238	9,793	41,147	7,101	4,723	2,379	29.8	19.8	10.0
		60,000～100,000G/T未満	128	10,770	84,143	4,692	2,810	1,882	36.7	22.0	14.7
		100,000G/T以上	206	24,882	120,785	7,366	4,896	2,470	35.8	23.8	12.0
	内航	500G/T未満	27,802	7,995	288	363,871	108,252	255,619	13.1	3.9	9.2
		500～1,000G/T未満	6,273	4,578	730	61,034	32,394	28,640	9.7	5.2	4.6
		1,000～3,000G/T未満	2,553	6,005	2,352	26,760	19,474	7,286	10.5	7.6	2.9
		3,000～6,000G/T未満	1,094	4,688	4,285	12,206	9,991	2,215	11.2	9.1	2.0
		6,000～10,000G/T未満	315	2,415	7,666	3,810	3,380	431	12.1	10.7	1.4
		10,000～30,000G/T未満	346	4,179	12,078	1,616	153	1,463	4.7	0.4	4.2
30,000～60,000G/T未満		0	0		0	0	0	0.0	0.0	0.0	
60,000～100,000G/T未満		1	68	67,524	21	17	5	21.1	16.5	4.5	
100,000G/T以上		0	0		0	0	0	0.0	0.0	0.0	
横浜港	外航	500G/T未満	131	57	436	3,382	2,012	1,370	25.8	15.4	10.5
		500～1,000G/T未満	354	292	824	6,773	3,744	3,029	19.1	10.6	8.6
		1,000～3,000G/T未満	1,592	3,201	2,011	40,445	18,603	21,843	25.4	11.7	13.7
		3,000～6,000G/T未満	3,158	13,550	4,291	67,831	28,155	39,676	21.5	8.9	12.6
		6,000～10,000G/T未満	3,079	24,779	8,048	57,309	25,522	31,787	18.6	8.3	10.3
		10,000～30,000G/T未満	4,284	75,999	17,740	88,630	38,399	50,230	20.7	9.0	11.7
		30,000～60,000G/T未満	2,237	92,109	41,175	40,224	18,659	21,565	18.0	8.3	9.6
		60,000～100,000G/T未満	401	28,548	71,191	8,040	6,327	1,713	20.1	15.8	4.3
		100,000G/T以上	65	9,134	140,518	3,184	1,999	1,186	49.0	30.7	18.2
	内航	500G/T未満	25,541	8,043	315	293,544	143,534	150,010	11.5	5.6	5.9
		500～1,000G/T未満	8,315	6,024	724	84,371	48,899	35,473	10.1	5.9	4.3
		1,000～3,000G/T未満	2,685	6,138	2,286	27,437	13,476	13,961	10.2	5.0	5.2
		3,000～6,000G/T未満	2,619	10,235	3,908	24,317	16,286	8,031	9.3	6.2	3.1
		6,000～10,000G/T未満	166	1,216	7,323	2,086	1,513	573	12.6	9.1	3.5
		10,000～30,000G/T未満	98	2,114	21,573	1,158	234	924	11.8	2.4	9.4
30,000～60,000G/T未満		30	1,486	49,546	479	332	147	16.0	11.1	4.9	
60,000～100,000G/T未満		52	3,377	64,939	864	593	271	16.6	11.4	5.2	
100,000G/T以上		0	0		0	0	0	0.0	0.0	0.0	

資料表-2(2) 港湾別外内航別トン階級別船舶の隻数、総トン数および係留時間

全船舶：延	外内	トン階級	隻数・総トン数			延べ係留時間			平均係留時間		
			隻数	総トン数	平均トン数	係留時間	荷役	非荷役	係留時間	荷役	非荷役
			隻/年	千トン	トン/隻	時間/年	時間/年	時間/年	時間/隻	時間/隻	時間/隻
千葉港	外航	500G/T未満	42	21	491	564	235	329	13.4	5.6	7.8
		500～1,000G/T未満	369	290	787	8,201	5,414	2,787	22.2	14.7	7.6
		1,000～3,000G/T未満	1,596	3,214	2,014	47,145	29,565	17,581	29.5	18.5	11.0
		3,000～6,000G/T未満	948	3,932	4,148	26,290	15,670	10,620	27.7	16.5	11.2
		6,000～10,000G/T未満	315	2,306	7,322	8,883	5,111	3,771	28.2	16.2	12.0
		10,000～30,000G/T未満	1,135	22,090	19,462	41,236	23,244	17,992	36.3	20.5	15.9
		30,000～60,000G/T未満	406	18,576	45,753	12,813	8,218	4,596	31.6	20.2	11.3
		60,000～100,000G/T未満	158	12,962	82,038	5,897	3,365	2,532	37.3	21.3	16.0
		100,000G/T以上	153	21,563	140,933	6,883	4,359	2,523	45.0	28.5	16.5
	内航	500G/T未満	58,310	18,287	314	730,348	381,869	348,479	12.5	6.5	6.0
		500～1,000G/T未満	12,895	9,407	729	162,353	99,322	63,031	12.6	7.7	4.9
		1,000～3,000G/T未満	6,126	13,888	2,267	79,219	62,367	16,852	12.9	10.2	2.8
		3,000～6,000G/T未満	2,301	9,345	4,061	29,222	25,154	4,068	12.7	10.9	1.8
		6,000～10,000G/T未満	192	1,389	7,234	2,092	1,900	191	10.9	9.9	1.0
		10,000～30,000G/T未満	296	4,822	16,290	4,283	3,880	403	14.5	13.1	1.4
		30,000～60,000G/T未満	0	0		0	0	0	0.0	0.0	0.0
		60,000～100,000G/T未満	1	68	67,524	24	18	6	24.4	18.2	6.2
100,000G/T以上		0	0		0	0	0	0.0	0.0	0.0	
木更津港	外航	500G/T未満	10	5	492	247	176	71	24.7	17.6	7.1
		500～1,000G/T未満	62	54	870	2,028	1,271	757	32.7	20.5	12.2
		1,000～3,000G/T未満	525	924	1,761	22,993	12,541	10,452	43.8	23.9	19.9
		3,000～6,000G/T未満	178	772	4,335	8,355	4,231	4,124	46.9	23.8	23.2
		6,000～10,000G/T未満	53	409	7,722	2,371	1,203	1,168	44.7	22.7	22.0
		10,000～30,000G/T未満	160	2,728	17,048	7,581	3,835	3,746	47.4	24.0	23.4
		30,000～60,000G/T未満	35	1,394	39,827	1,486	791	695	42.5	22.6	19.9
		60,000～100,000G/T未満	186	15,651	84,144	8,082	4,233	3,849	43.5	22.8	20.7
		100,000G/T以上	86	9,777	113,687	3,083	2,046	1,038	35.8	23.8	12.1
	内航	500G/T未満	22,459	7,515	335	256,005	239,534	16,472	11.4	10.7	0.7
		500～1,000G/T未満	1,879	1,283	683	22,170	19,060	3,109	11.8	10.1	1.7
		1,000～3,000G/T未満	226	364	1,609	3,589	3,128	461	15.9	13.8	2.0
		3,000～6,000G/T未満	105	442	4,209	2,003	1,628	375	19.1	15.5	3.6
		6,000～10,000G/T未満	11	72	6,581	175	153	23	15.9	13.9	2.0
		10,000～30,000G/T未満	152	1,633	10,744	3,370	2,597	773	22.2	17.1	5.1
		30,000～60,000G/T未満	0	0		0	0	0	0.0	0.0	0.0
		60,000～100,000G/T未満	0	0		0	0	0	0.0	0.0	0.0
100,000G/T以上		0	0		0	0	0	0.0	0.0	0.0	
横須賀港	外航	500G/T未満	4	2	379	116	74	42	29.1	18.5	10.6
		500～1,000G/T未満	15	10	655	602	324	277	39.0	21.0	18.0
		1,000～3,000G/T未満	11	32	2,937	329	208	122	29.9	18.9	11.0
		3,000～6,000G/T未満	0	0		0	0	0	0.0	0.0	0.0
		6,000～10,000G/T未満	102	735	7,169	1,795	1,366	429	17.5	13.3	4.2
		10,000～30,000G/T未満	279	5,970	21,416	3,193	2,624	570	11.5	9.4	2.0
		30,000～60,000G/T未満	0	0		0	0	0	0.0	0.0	0.0
		60,000～100,000G/T未満	0	0		0	0	0	0.0	0.0	0.0
		100,000G/T以上	0	0		0	0	0	0.0	0.0	0.0
	内航	500G/T未満	13,157	3,552	270	138,149	55,259	82,889	10.5	4.2	6.3
		500～1,000G/T未満	1,049	762	727	16,572	5,213	11,359	15.8	5.0	10.8
		1,000～3,000G/T未満	8,085	22,049	2,727	25,331	2,057	23,274	3.1	0.3	2.9
		3,000～6,000G/T未満	44	143	3,239	2,112	1,056	1,056	48.0	24.0	24.0
		6,000～10,000G/T未満	559	3,386	6,057	4,320	4,320	0	7.7	7.7	0.0
		10,000～30,000G/T未満	0	0		0	0	0	0.0	0.0	0.0
		30,000～60,000G/T未満	0	0		0	0	0	0.0	0.0	0.0
		60,000～100,000G/T未満	0	0		0	0	0	0.0	0.0	0.0
100,000G/T以上		0	0		0	0	0	0.0	0.0	0.0	

資料表-3 港湾別・外内航別排出量（東京湾内、タグボート除く）

現況

港湾	外内	係留時							
		燃料 千t/y	SO <sub>2</sub> 千t/y	NO <sub>x</sub> 千t/y	全PM 千t/y	SOOT等 千t/y	SO <sub>4</sub> 千t/y	CO 千t/y	NMVOC 千t/y
東京港	外航	33.7	1.4	1.9	0.18	0.04	0.13	0.25	0.08
	内航	17.9	0.4	0.7	0.05	0.02	0.03	0.13	0.04
	計	51.7	1.8	2.6	0.22	0.06	0.16	0.38	0.12
川崎港	外航	18.6	0.8	1.0	0.10	0.02	0.07	0.14	0.04
	内航	19.8	0.3	0.7	0.04	0.02	0.02	0.15	0.05
	計	38.4	1.1	1.7	0.14	0.04	0.09	0.28	0.09
横浜港	外航	75.3	2.9	4.0	0.36	0.09	0.26	0.56	0.18
	内航	16.4	0.3	0.6	0.03	0.02	0.02	0.12	0.04
	計	91.7	3.2	4.6	0.39	0.11	0.28	0.68	0.22
千葉港	外航	31.4	1.2	1.6	0.15	0.04	0.11	0.23	0.08
	内航	40.4	0.6	1.5	0.08	0.04	0.03	0.30	0.10
	計	71.9	1.9	3.1	0.22	0.08	0.14	0.53	0.17
木更津港	外航	15.5	0.7	0.9	0.09	0.02	0.07	0.11	0.04
	内航	5.4	0.1	0.2	0.01	0.01	0.00	0.04	0.01
	計	20.9	0.8	1.1	0.10	0.03	0.07	0.15	0.05
横須賀港	外航	1.3	0.0	0.1	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00
	内航	4.5	0.1	0.1	0.01	0.01	0.00	0.03	0.01
	計	5.9	0.1	0.2	0.01	0.01	0.01	0.04	0.01
合計	外航	175.8	7.1	9.4	0.87	0.22	0.65	1.30	0.42
	内航	104.6	1.8	3.9	0.21	0.11	0.10	0.77	0.25
	計	280.4	9.0	13.3	1.08	0.33	0.75	2.08	0.67

港湾	外内	航行時							
		燃料 千t/y	SO <sub>2</sub> 千t/y	NO <sub>x</sub> 千t/y	全PM 千t/y	SOOT等 千t/y	SO <sub>4</sub> 千t/y	CO 千t/y	NMVOC 千t/y
東京港	外航	48.4	2.3	3.8	0.29	0.06	0.23	0.36	0.12
	内航	39.2	1.2	2.6	0.16	0.04	0.12	0.29	0.09
	計	87.7	3.5	6.4	0.45	0.10	0.35	0.65	0.21
川崎港	外航	10.9	0.5	0.8	0.06	0.01	0.05	0.08	0.03
	内航	25.8	0.6	1.5	0.08	0.02	0.06	0.19	0.06
	計	36.7	1.1	2.3	0.14	0.04	0.11	0.27	0.09
横浜港	外航	86.9	3.9	6.4	0.50	0.11	0.39	0.64	0.21
	内航	19.3	0.5	1.1	0.06	0.02	0.04	0.14	0.05
	計	106.3	4.4	7.4	0.56	0.13	0.43	0.79	0.26
千葉港	外航	19.7	0.9	1.4	0.11	0.03	0.09	0.15	0.05
	内航	57.9	1.3	3.2	0.18	0.05	0.12	0.43	0.14
	計	77.6	2.3	4.7	0.29	0.08	0.21	0.57	0.19
木更津港	外航	5.9	0.3	0.5	0.04	0.01	0.03	0.04	0.01
	内航	9.4	0.2	0.5	0.02	0.01	0.02	0.07	0.02
	計	15.3	0.5	1.0	0.06	0.02	0.04	0.11	0.04
横須賀港	外航	1.1	0.1	0.1	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00
	内航	10.3	0.3	0.7	0.04	0.01	0.03	0.08	0.02
	計	11.5	0.4	0.8	0.05	0.01	0.04	0.09	0.03
合計	外航	173.0	8.0	12.9	1.01	0.22	0.79	1.28	0.42
	内航	162.0	4.2	9.5	0.54	0.15	0.39	1.20	0.39
	計	335.0	12.2	22.4	1.55	0.37	1.17	2.48	0.80

港湾	外内	係留時+航行時							
		燃料 千t/y	SO <sub>2</sub> 千t/y	NO <sub>x</sub> 千t/y	全PM 千t/y	SOOT等 千t/y	SO <sub>4</sub> 千t/y	CO 千t/y	NMVOC 千t/y
東京港	外航	82.2	3.7	5.7	0.47	0.10	0.36	0.61	0.20
	内航	57.2	1.6	3.4	0.20	0.06	0.14	0.42	0.14
	計	139.3	5.3	9.0	0.67	0.16	0.51	1.03	0.33
川崎港	外航	29.5	1.3	1.8	0.16	0.04	0.12	0.22	0.07
	内航	45.5	0.9	2.2	0.12	0.04	0.07	0.34	0.11
	計	75.0	2.3	4.0	0.28	0.08	0.20	0.56	0.18
横浜港	外航	162.2	6.9	10.3	0.85	0.20	0.65	1.20	0.39
	内航	35.8	0.8	1.7	0.10	0.04	0.06	0.26	0.09
	計	198.0	7.7	12.0	0.95	0.24	0.71	1.47	0.48
千葉港	外航	51.1	2.1	3.0	0.26	0.06	0.20	0.38	0.12
	内航	98.4	2.0	4.7	0.25	0.09	0.16	0.73	0.24
	計	149.5	4.1	7.7	0.51	0.16	0.35	1.11	0.36
木更津港	外航	21.4	1.0	1.4	0.12	0.03	0.09	0.16	0.05
	内航	14.8	0.3	0.7	0.04	0.01	0.02	0.11	0.04
	計	36.2	1.3	2.1	0.16	0.04	0.11	0.27	0.09
横須賀港	外航	2.5	0.1	0.2	0.01	0.00	0.01	0.02	0.01
	内航	14.9	0.4	0.8	0.05	0.02	0.03	0.11	0.04
	計	17.4	0.5	1.0	0.06	0.02	0.04	0.13	0.04
合計	外航	348.9	15.2	22.4	1.88	0.44	1.44	2.58	0.84
	内航	266.6	6.0	13.4	0.75	0.26	0.49	1.97	0.64
	計	615.4	21.1	35.8	2.63	0.70	1.93	4.55	1.48

資料表-4 港湾別・外内航別排出量（東京湾内、タグボート除く） 硫黄分0.5%規制

港湾	外内	係留時							
		燃料 千t/y	SO <sub>2</sub> 千t/y	NO <sub>x</sub> 千t/y	全PM 千t/y	SOOT等 千t/y	SO <sub>4</sub> 千t/y	CO 千t/y	NMVC 千t/y
東京港	外航	33.7	0.3	1.9	0.05	0.02	0.03	0.25	0.08
	内航	17.9	0.2	0.7	0.03	0.02	0.01	0.13	0.04
	計	51.7	0.5	2.6	0.08	0.04	0.04	0.38	0.12
川崎港	外航	18.6	0.2	1.0	0.03	0.01	0.02	0.14	0.04
	内航	19.8	0.2	0.7	0.03	0.02	0.01	0.15	0.05
	計	38.4	0.4	1.7	0.06	0.03	0.03	0.28	0.09
横浜港	外航	75.3	0.7	4.0	0.11	0.05	0.06	0.56	0.18
	内航	16.4	0.2	0.6	0.03	0.02	0.01	0.12	0.04
	計	91.7	0.9	4.6	0.14	0.06	0.07	0.68	0.22
千葉港	外航	31.4	0.3	1.6	0.05	0.02	0.03	0.23	0.08
	内航	40.4	0.4	1.5	0.06	0.04	0.03	0.30	0.10
	計	71.9	0.7	3.1	0.11	0.06	0.05	0.53	0.17
木更津港	外航	15.5	0.1	0.9	0.02	0.01	0.01	0.11	0.04
	内航	5.4	0.1	0.2	0.01	0.01	0.00	0.04	0.01
	計	20.9	0.2	1.1	0.03	0.02	0.02	0.15	0.05
横須賀港	外航	1.3	0.0	0.1	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
	内航	4.5	0.0	0.1	0.01	0.00	0.00	0.03	0.01
	計	5.9	0.1	0.2	0.01	0.01	0.00	0.04	0.01
合計	外航	175.8	1.6	9.4	0.26	0.11	0.15	1.30	0.42
	内航	104.6	1.0	3.9	0.17	0.10	0.07	0.77	0.25
	計	280.4	2.6	13.3	0.43	0.21	0.22	2.08	0.67

港湾	外内	航行時							
		燃料 千t/y	SO <sub>2</sub> 千t/y	NO <sub>x</sub> 千t/y	全PM 千t/y	SOOT等 千t/y	SO <sub>4</sub> 千t/y	CO 千t/y	NMVC 千t/y
東京港	外航	48.4	0.5	3.8	0.07	0.03	0.04	0.36	0.12
	内航	39.2	0.4	2.6	0.06	0.02	0.03	0.29	0.09
	計	87.7	0.8	6.4	0.13	0.05	0.08	0.65	0.21
川崎港	外航	10.9	0.1	0.8	0.02	0.01	0.01	0.08	0.03
	内航	25.8	0.2	1.5	0.04	0.02	0.02	0.19	0.06
	計	36.7	0.3	2.3	0.05	0.02	0.03	0.27	0.09
横浜港	外航	86.9	0.8	6.4	0.13	0.05	0.08	0.64	0.21
	内航	19.3	0.2	1.1	0.03	0.01	0.02	0.14	0.05
	計	106.3	1.0	7.4	0.16	0.06	0.09	0.79	0.26
千葉港	外航	19.7	0.2	1.4	0.03	0.01	0.02	0.15	0.05
	内航	57.9	0.5	3.2	0.09	0.04	0.05	0.43	0.14
	計	77.6	0.7	4.7	0.11	0.05	0.07	0.57	0.19
木更津港	外航	5.9	0.1	0.5	0.01	0.00	0.01	0.04	0.01
	内航	9.4	0.1	0.5	0.01	0.01	0.01	0.07	0.02
	計	15.3	0.1	1.0	0.02	0.01	0.01	0.11	0.04
横須賀港	外航	1.1	0.0	0.1	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
	内航	10.3	0.1	0.7	0.02	0.01	0.01	0.08	0.02
	計	11.5	0.1	0.8	0.02	0.01	0.01	0.09	0.03
合計	外航	173.0	1.6	12.9	0.25	0.10	0.15	1.28	0.42
	内航	162.0	1.5	9.5	0.24	0.10	0.14	1.20	0.39
	計	335.0	3.1	22.4	0.49	0.20	0.29	2.48	0.80

港湾	外内	係留時+航行時							
		燃料 千t/y	SO <sub>2</sub> 千t/y	NO <sub>x</sub> 千t/y	全PM 千t/y	SOOT等 千t/y	SO <sub>4</sub> 千t/y	CO 千t/y	NMVC 千t/y
東京港	外航	82.2	0.8	5.7	0.12	0.05	0.07	0.61	0.20
	内航	57.2	0.5	3.4	0.09	0.04	0.05	0.42	0.14
	計	139.3	1.3	9.0	0.21	0.09	0.12	1.03	0.33
川崎港	外航	29.5	0.3	1.8	0.04	0.02	0.02	0.22	0.07
	内航	45.5	0.4	2.2	0.07	0.04	0.03	0.34	0.11
	計	75.0	0.7	4.0	0.11	0.05	0.06	0.56	0.18
横浜港	外航	162.2	1.5	10.3	0.24	0.10	0.14	1.20	0.39
	内航	35.8	0.3	1.7	0.06	0.03	0.03	0.26	0.09
	計	198.0	1.9	12.0	0.29	0.13	0.17	1.47	0.48
千葉港	外航	51.1	0.5	3.0	0.08	0.03	0.04	0.38	0.12
	内航	98.4	0.9	4.7	0.15	0.07	0.08	0.73	0.24
	計	149.5	1.4	7.7	0.23	0.11	0.12	1.11	0.36
木更津港	外航	21.4	0.2	1.4	0.03	0.01	0.02	0.16	0.05
	内航	14.8	0.1	0.7	0.02	0.01	0.01	0.11	0.04
	計	36.2	0.3	2.1	0.05	0.02	0.03	0.27	0.09
横須賀港	外航	2.5	0.0	0.2	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01
	内航	14.9	0.1	0.8	0.02	0.01	0.01	0.11	0.04
	計	17.4	0.2	1.0	0.03	0.01	0.01	0.13	0.04
合計	外航	348.9	3.3	22.4	0.51	0.21	0.30	2.58	0.84
	内航	266.6	2.5	13.4	0.41	0.20	0.21	1.97	0.64
	計	615.4	5.8	35.8	0.92	0.41	0.50	4.55	1.48

資料表-5 港湾別・外内航別排出量（東京湾内、タグボート除く） 硫黄分0.1%規制

港湾	外内	係留時							
		燃料 千t/y	SO <sub>2</sub> 千t/y	NO <sub>x</sub> 千t/y	全PM 千t/y	SOOT等 千t/y	SO <sub>4</sub> 千t/y	CO 千t/y	NMVC 千t/y
東京港	外航	33.7	0.1	1.9	0.02	0.02	0.00	0.25	0.08
	内航	17.9	0.0	0.7	0.01	0.01	0.00	0.13	0.04
	計	51.7	0.1	2.6	0.03	0.03	0.01	0.38	0.12
川崎港	外航	18.6	0.0	1.0	0.01	0.01	0.00	0.14	0.04
	内航	19.8	0.0	0.7	0.02	0.02	0.00	0.15	0.05
	計	38.4	0.1	1.7	0.03	0.03	0.00	0.28	0.09
横浜港	外航	75.3	0.1	4.0	0.05	0.04	0.01	0.56	0.18
	内航	16.4	0.0	0.6	0.01	0.01	0.00	0.12	0.04
	計	91.7	0.2	4.6	0.06	0.05	0.01	0.68	0.22
千葉港	外航	31.4	0.1	1.6	0.02	0.02	0.00	0.23	0.08
	内航	40.4	0.1	1.5	0.04	0.03	0.00	0.30	0.10
	計	71.9	0.1	3.1	0.06	0.05	0.01	0.53	0.17
木更津港	外航	15.5	0.0	0.9	0.01	0.01	0.00	0.11	0.04
	内航	5.4	0.0	0.2	0.01	0.00	0.00	0.04	0.01
	計	20.9	0.0	1.1	0.01	0.01	0.00	0.15	0.05
横須賀港	外航	1.3	0.0	0.1	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
	内航	4.5	0.0	0.1	0.00	0.00	0.00	0.03	0.01
	計	5.9	0.0	0.2	0.01	0.01	0.00	0.04	0.01
合計	外航	175.8	0.3	9.4	0.11	0.09	0.02	1.30	0.42
	内航	104.6	0.2	3.9	0.09	0.08	0.01	0.77	0.25
	計	280.4	0.5	13.3	0.20	0.17	0.03	2.08	0.67

港湾	外内	航行時							
		燃料 千t/y	SO <sub>2</sub> 千t/y	NO <sub>x</sub> 千t/y	全PM 千t/y	SOOT等 千t/y	SO <sub>4</sub> 千t/y	CO 千t/y	NMVC 千t/y
東京港	外航	48.4	0.1	3.8	0.03	0.02	0.01	0.36	0.12
	内航	39.2	0.1	2.6	0.02	0.02	0.01	0.29	0.09
	計	87.7	0.2	6.4	0.05	0.04	0.01	0.65	0.21
川崎港	外航	10.9	0.0	0.8	0.01	0.00	0.00	0.08	0.03
	内航	25.8	0.0	1.5	0.02	0.01	0.00	0.19	0.06
	計	36.7	0.1	2.3	0.02	0.02	0.00	0.27	0.09
横浜港	外航	86.9	0.2	6.4	0.05	0.04	0.01	0.64	0.21
	内航	19.3	0.0	1.1	0.01	0.01	0.00	0.14	0.05
	計	106.3	0.2	7.4	0.06	0.05	0.01	0.79	0.26
千葉港	外航	19.7	0.0	1.4	0.01	0.01	0.00	0.15	0.05
	内航	57.9	0.1	3.2	0.04	0.03	0.01	0.43	0.14
	計	77.6	0.1	4.7	0.05	0.04	0.01	0.57	0.19
木更津港	外航	5.9	0.0	0.5	0.00	0.00	0.00	0.04	0.01
	内航	9.4	0.0	0.5	0.01	0.00	0.00	0.07	0.02
	計	15.3	0.0	1.0	0.01	0.01	0.00	0.11	0.04
横須賀港	外航	1.1	0.0	0.1	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
	内航	10.3	0.0	0.7	0.01	0.00	0.00	0.08	0.02
	計	11.5	0.0	0.8	0.01	0.01	0.00	0.09	0.03
合計	外航	173.0	0.3	12.9	0.10	0.08	0.02	1.28	0.42
	内航	162.0	0.3	9.5	0.10	0.08	0.02	1.20	0.39
	計	335.0	0.6	22.4	0.20	0.16	0.04	2.48	0.80

港湾	外内	係留時+航行時							
		燃料 千t/y	SO <sub>2</sub> 千t/y	NO <sub>x</sub> 千t/y	全PM 千t/y	SOOT等 千t/y	SO <sub>4</sub> 千t/y	CO 千t/y	NMVC 千t/y
東京港	外航	82.2	0.2	5.7	0.05	0.04	0.01	0.61	0.20
	内航	57.2	0.1	3.4	0.04	0.03	0.01	0.42	0.14
	計	139.3	0.3	9.0	0.08	0.07	0.02	1.03	0.33
川崎港	外航	29.5	0.1	1.8	0.02	0.01	0.00	0.22	0.07
	内航	45.5	0.1	2.2	0.03	0.03	0.01	0.34	0.11
	計	75.0	0.1	4.0	0.05	0.04	0.01	0.56	0.18
横浜港	外航	162.2	0.3	10.3	0.10	0.08	0.02	1.20	0.39
	内航	35.8	0.1	1.7	0.03	0.02	0.00	0.26	0.09
	計	198.0	0.4	12.0	0.12	0.10	0.02	1.47	0.48
千葉港	外航	51.1	0.1	3.0	0.03	0.03	0.01	0.38	0.12
	内航	98.4	0.2	4.7	0.07	0.06	0.01	0.73	0.24
	計	149.5	0.3	7.7	0.10	0.09	0.02	1.11	0.36
木更津港	外航	21.4	0.0	1.4	0.01	0.01	0.00	0.16	0.05
	内航	14.8	0.0	0.7	0.01	0.01	0.00	0.11	0.04
	計	36.2	0.1	2.1	0.02	0.02	0.00	0.27	0.09
横須賀港	外航	2.5	0.0	0.2	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01
	内航	14.9	0.0	0.8	0.01	0.01	0.00	0.11	0.04
	計	17.4	0.0	1.0	0.01	0.01	0.00	0.13	0.04
合計	外航	348.9	0.7	22.4	0.21	0.17	0.04	2.58	0.84
	内航	266.6	0.5	13.4	0.19	0.16	0.03	1.97	0.64
	計	615.4	1.1	35.8	0.40	0.33	0.08	4.55	1.48

資料表-6 NOx 規制ケース別排出量の比較（東京湾内、タグボート除く NOx 規制

港湾	外内	係留時					
		現況 千t/y	Tier1 千t/y	Tier2 千t/y	Tier3 千t/y	2020年混在 千t/y	2025年混在 千t/y
東京港	外航	1.9	1.5	1.2	0.31	1.38	1.12
	内航	0.7	0.6	0.5	0.14	0.55	0.45
	計	2.6	2.0	1.6	0.45	1.93	1.56
川崎港	外航	1.0	0.8	0.6	0.17	0.75	0.60
	内航	0.7	0.6	0.4	0.15	0.53	0.43
	計	1.7	1.4	1.1	0.32	1.28	1.04
横浜港	外航	4.0	3.1	2.4	0.65	2.89	2.33
	内航	0.6	0.5	0.4	0.12	0.45	0.37
	計	4.6	3.5	2.8	0.78	3.34	2.70
千葉港	外航	1.6	1.2	1.0	0.27	1.16	0.94
	内航	1.5	1.2	0.9	0.30	1.09	0.89
	計	3.1	2.4	1.9	0.57	2.26	1.83
木更津港	外航	0.9	0.7	0.6	0.15	0.67	0.54
	内航	0.2	0.1	0.1	0.04	0.14	0.11
	計	1.1	0.9	0.7	0.19	0.81	0.65
横須賀港	外航	0.1	0.1	0.0	0.01	0.05	0.04
	内航	0.1	0.1	0.1	0.03	0.11	0.09
	計	0.2	0.2	0.1	0.05	0.16	0.13
合計	外航	9.4	7.3	5.8	1.56	6.90	5.57
	内航	3.9	3.1	2.4	0.80	2.87	2.34
	計	13.3	10.3	8.2	2.35	9.77	7.92

港湾	外内	航行時					
		現況 千t/y	Tier1 千t/y	Tier2 千t/y	Tier3 千t/y	2020 千t/y	2025 千t/y
東京港	外航	3.8	2.9	2.4	0.59	2.76	2.24
	内航	2.6	2.0	1.6	0.41	1.91	1.54
	計	6.4	4.9	4.1	1.00	4.67	3.78
川崎港	外航	0.8	0.6	0.5	0.13	0.59	0.48
	内航	1.5	1.1	0.9	0.24	1.06	0.85
	計	2.3	1.7	1.4	0.36	1.65	1.33
横浜港	外航	6.4	4.9	4.1	1.00	4.68	3.79
	内航	1.1	0.8	0.7	0.18	0.78	0.63
	計	7.4	5.7	4.7	1.18	5.46	4.42
千葉港	外航	1.4	1.1	0.9	0.23	1.05	0.85
	内航	3.2	2.5	1.9	0.53	2.34	1.89
	計	4.7	3.6	2.9	0.75	3.39	2.74
木更津港	外航	0.5	0.3	0.3	0.07	0.33	0.27
	内航	0.5	0.4	0.3	0.08	0.37	0.30
	計	1.0	0.7	0.6	0.15	0.70	0.57
横須賀港	外航	0.1	0.1	0.1	0.01	0.06	0.05
	内航	0.7	0.5	0.4	0.11	0.50	0.40
	計	0.8	0.6	0.5	0.12	0.56	0.45
合計	外航	12.9	10.0	8.3	2.03	9.48	7.69
	内航	9.5	7.3	5.8	1.55	6.95	5.61
	計	22.4	17.3	14.1	3.58	16.42	13.29

港湾	外内	係留時+航行時					
		現況 千t/y	Tier1 千t/y	Tier2 千t/y	Tier3 千t/y	2020 千t/y	2025 千t/y
東京港	外航	5.7	4.4	3.6	0.89	4.15	3.36
	内航	3.4	2.6	2.1	0.56	2.46	1.99
	計	9.0	7.0	5.7	1.45	6.60	5.35
川崎港	外航	1.8	1.4	1.1	0.29	1.34	1.08
	内航	2.2	1.7	1.3	0.39	1.59	1.29
	計	4.0	3.1	2.5	0.68	2.92	2.37
横浜港	外航	10.3	8.0	6.5	1.66	7.57	6.13
	内航	1.7	1.3	1.0	0.30	1.23	1.00
	計	12.0	9.3	7.5	1.96	8.80	7.12
千葉港	外航	3.0	2.3	1.9	0.50	2.22	1.79
	内航	4.7	3.6	2.8	0.83	3.44	2.78
	計	7.7	6.0	4.7	1.33	5.65	4.57
木更津港	外航	1.4	1.1	0.9	0.22	1.00	0.81
	内航	0.7	0.5	0.4	0.12	0.51	0.41
	計	2.1	1.6	1.3	0.34	1.50	1.22
横須賀港	外航	0.2	0.1	0.1	0.02	0.11	0.09
	内航	0.8	0.6	0.5	0.14	0.60	0.49
	計	1.0	0.8	0.6	0.17	0.71	0.58
合計	外航	22.4	17.2	14.1	3.58	16.37	13.26
	内航	13.4	10.4	8.2	2.34	9.82	7.95
	計	35.8	27.6	22.3	5.93	26.20	21.21

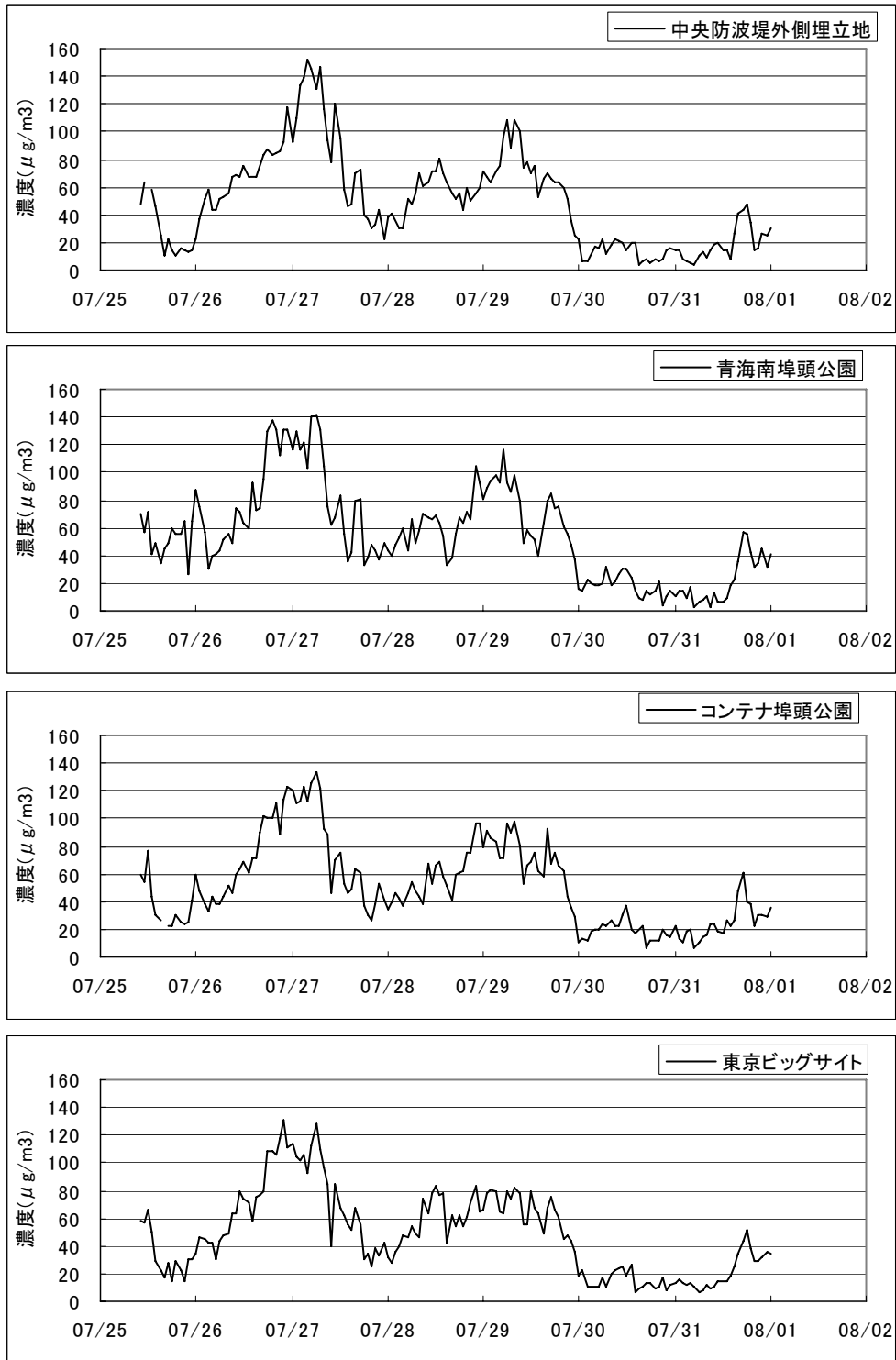
## 資料編

### 3. 港湾域における PM の調査解析

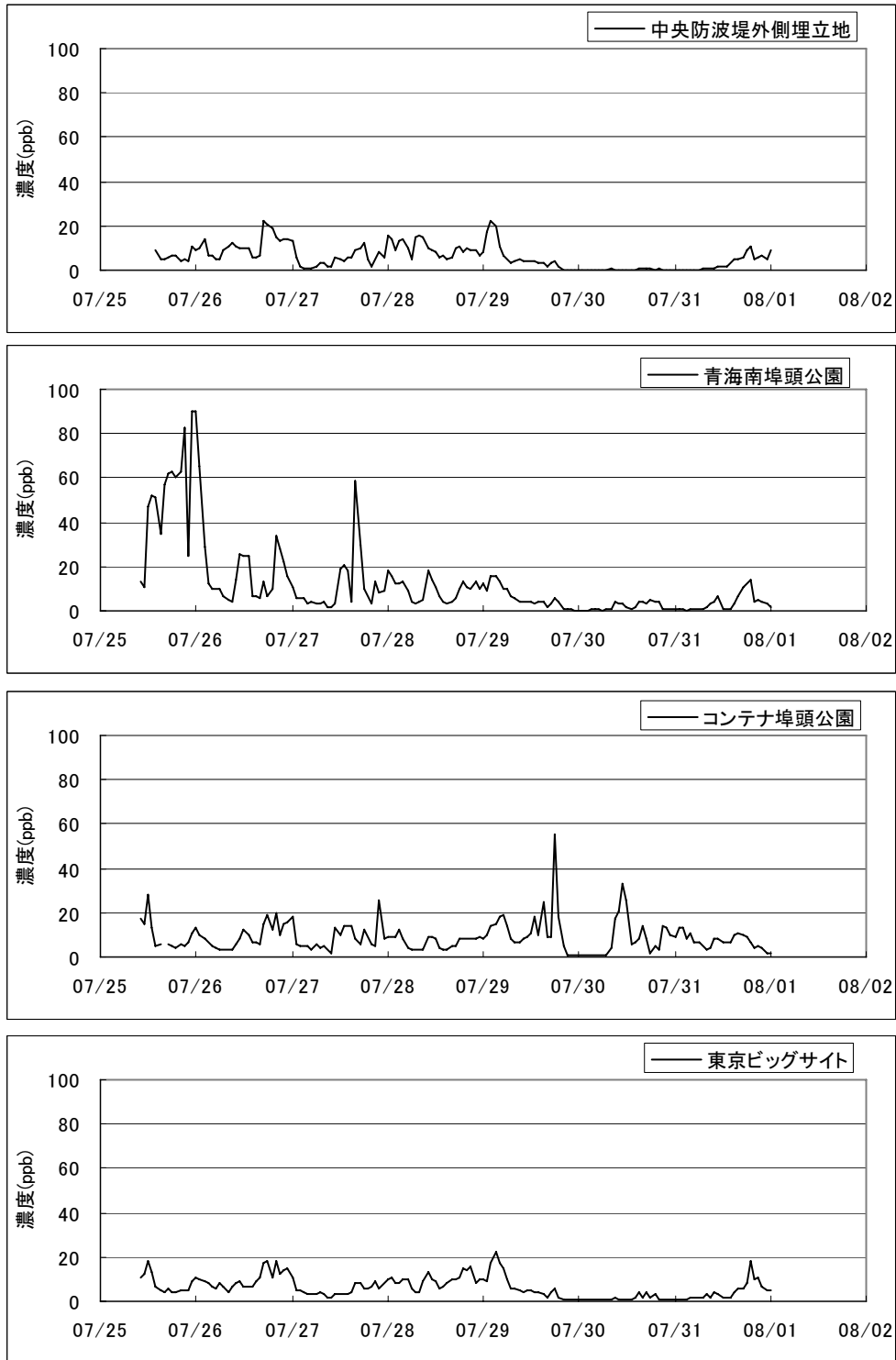
- ・ 東京都臨時測定地点測定結果（東京都資料）
- ・ 周辺の大気汚染常時監視測定局における測定結果
- ・ 項目間の相関(大気中 PM 測定)



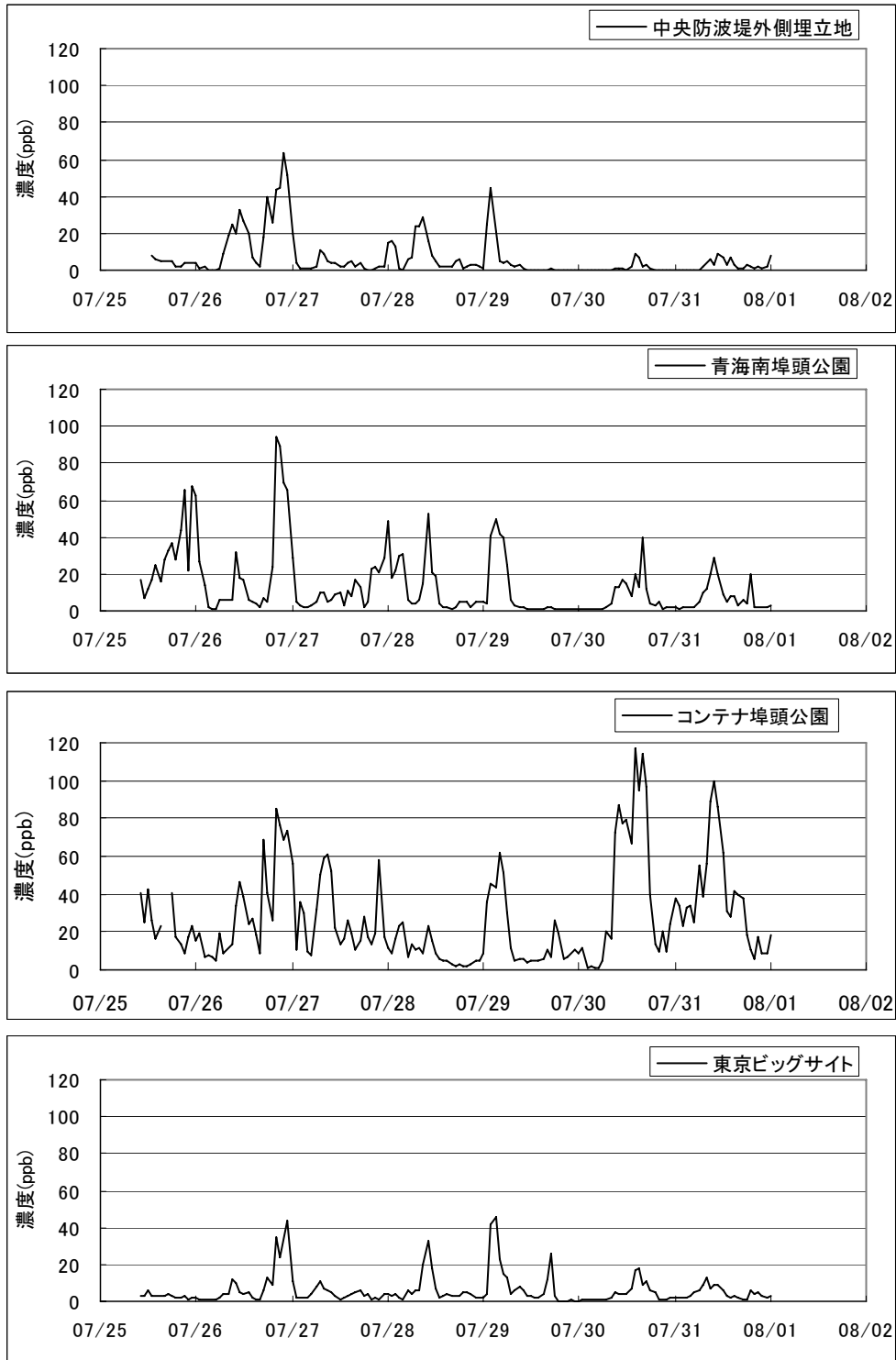




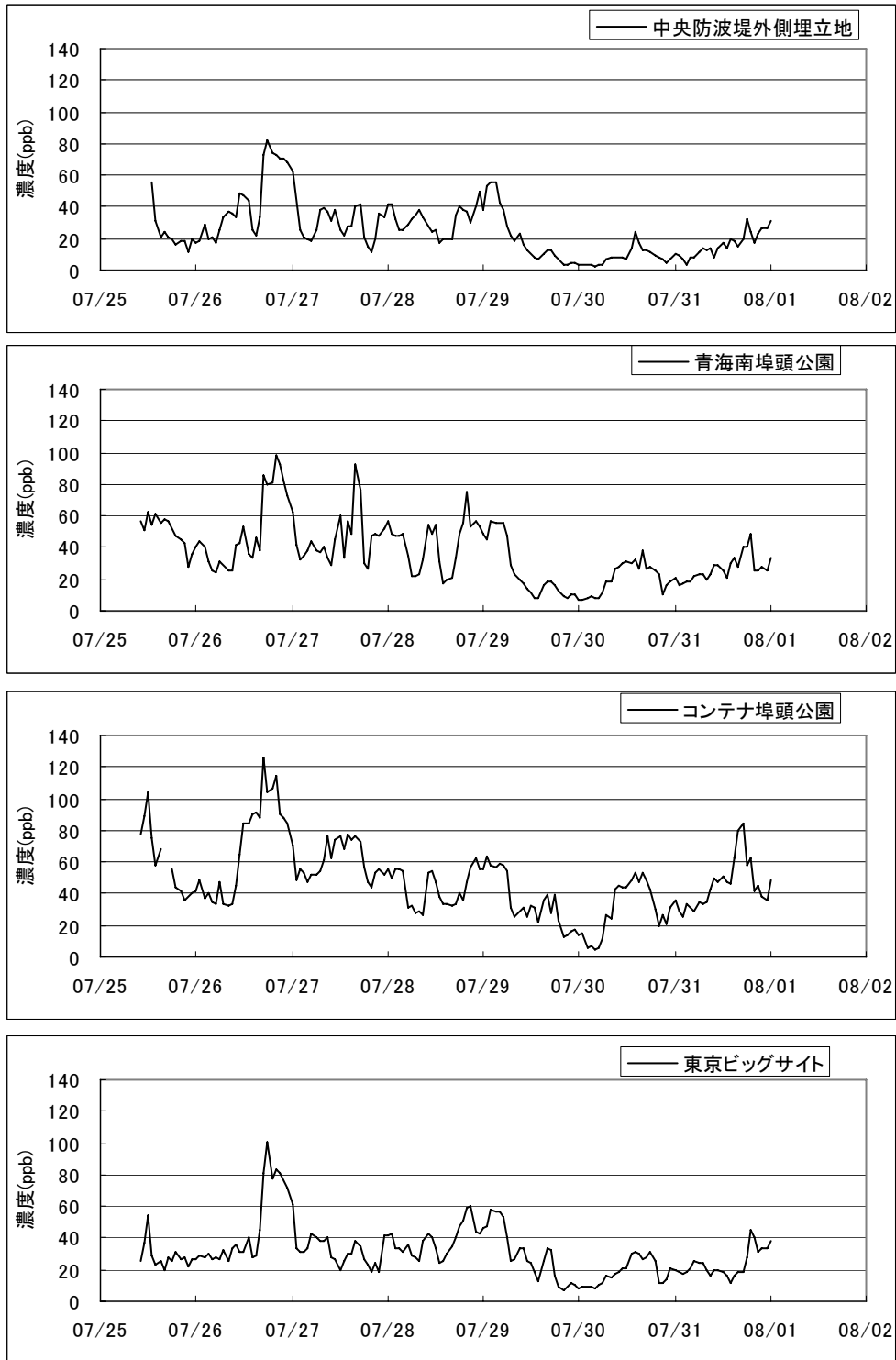
資料図 3-1 (1) 東京都臨時測定地点における測定結果(SPM)



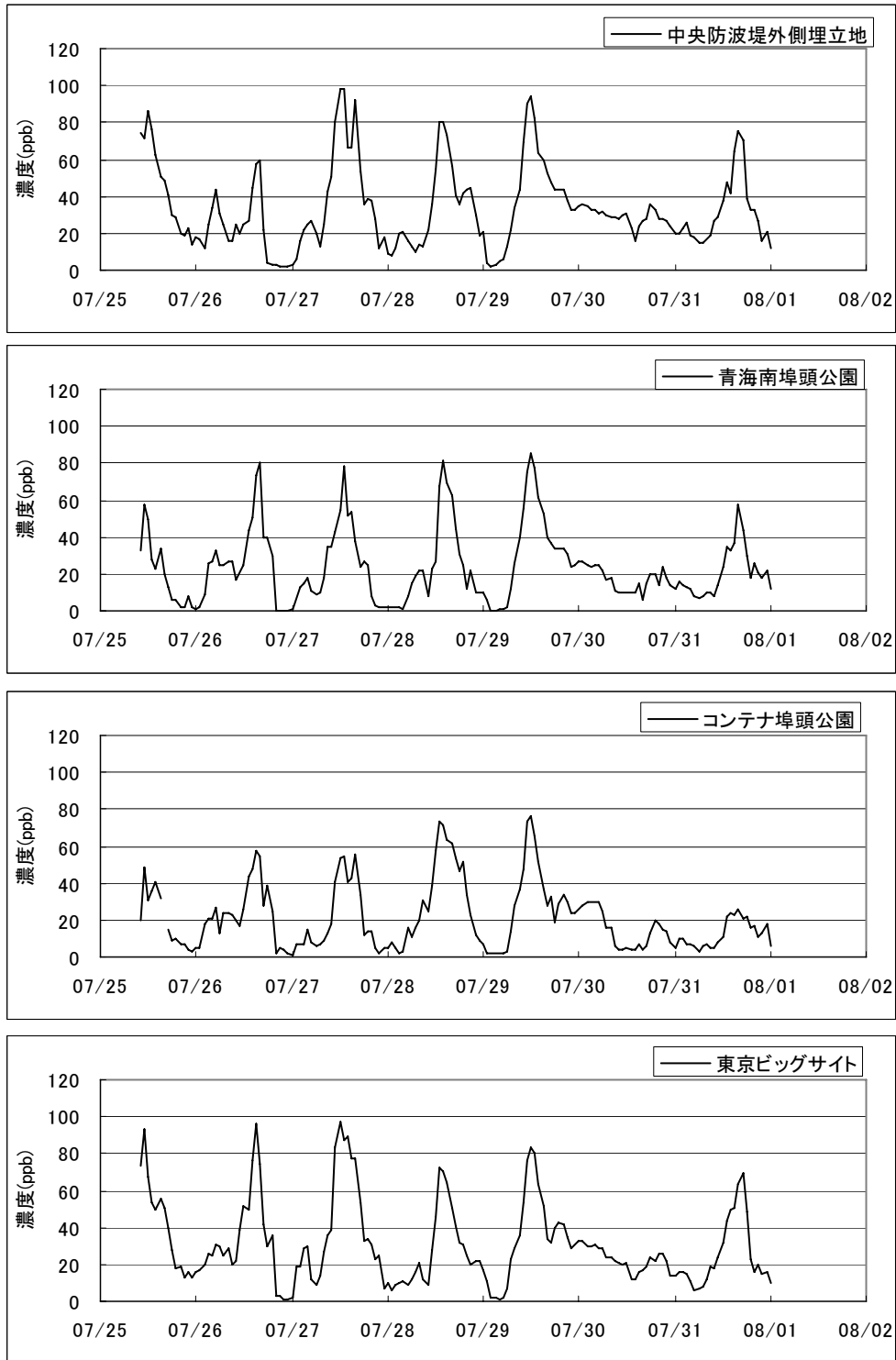
資料図 3-1 (2) 東京都臨時測定地点における測定結果(SO<sub>2</sub>)



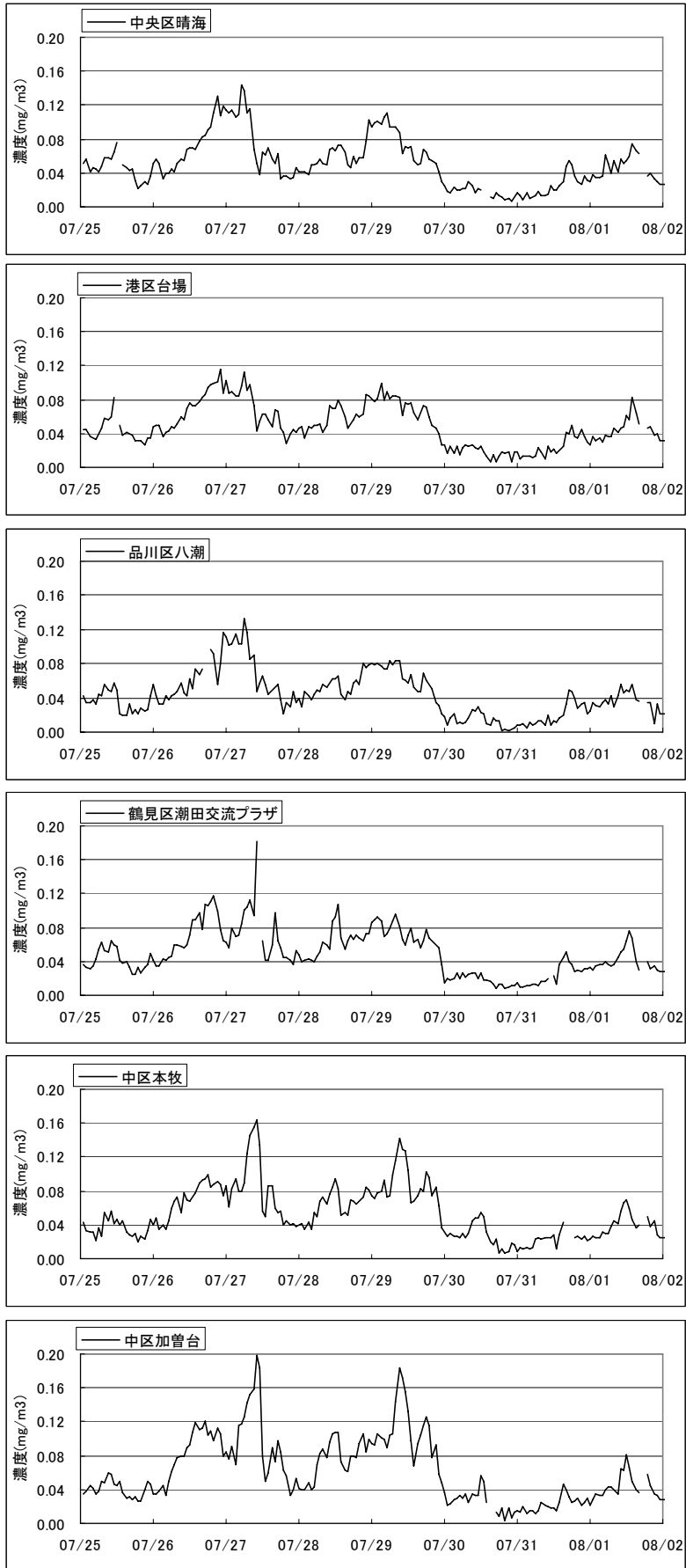
資料図 3-1 (3) 東京都臨時測定地点における測定結果(NO)



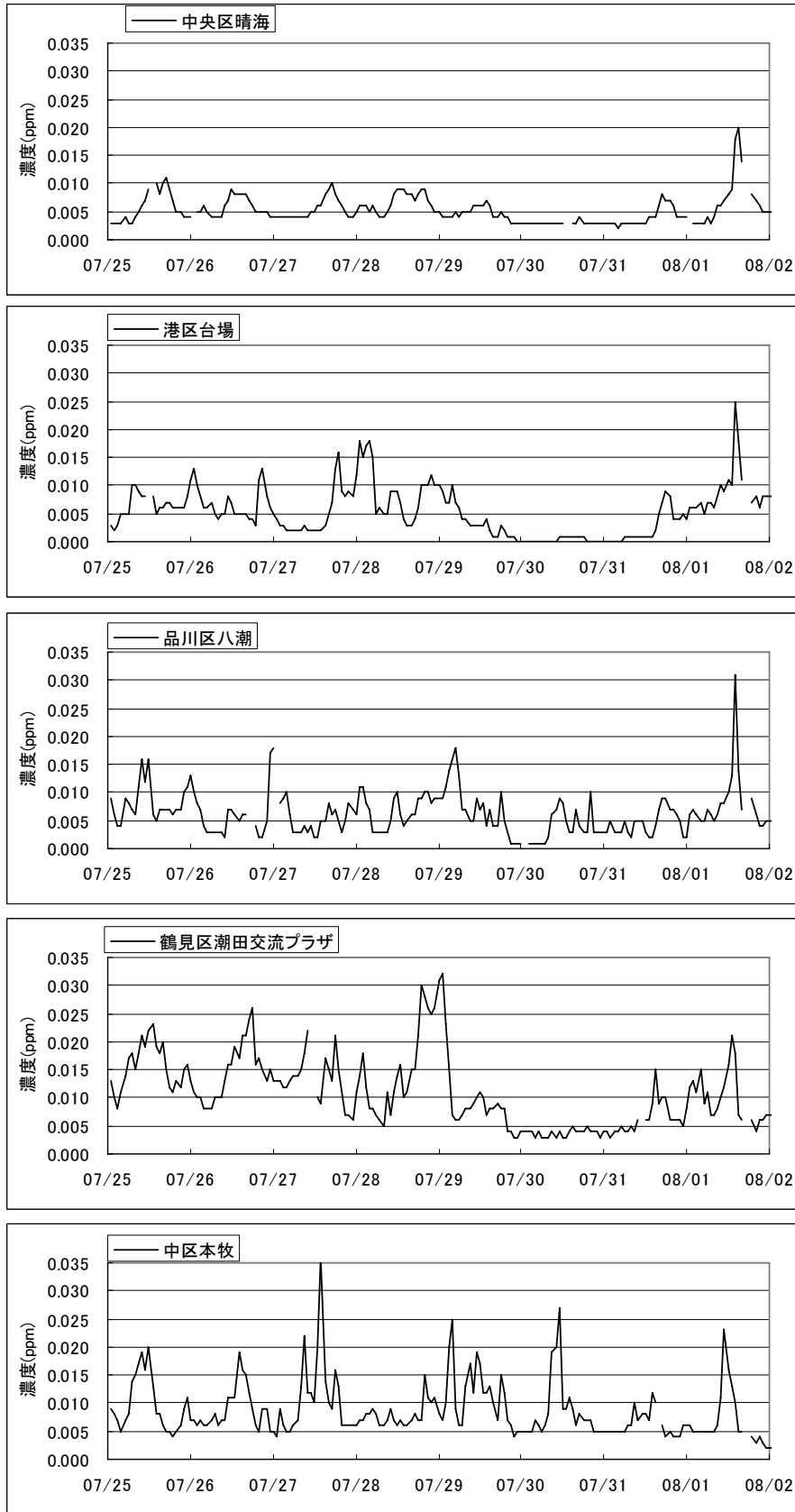
資料図 3-1 (4) 東京都臨時測定地点における測定結果(NO<sub>2</sub>)



資料図 3-1 (5) 東京都臨時測定地点における測定結果(O<sub>3</sub>)

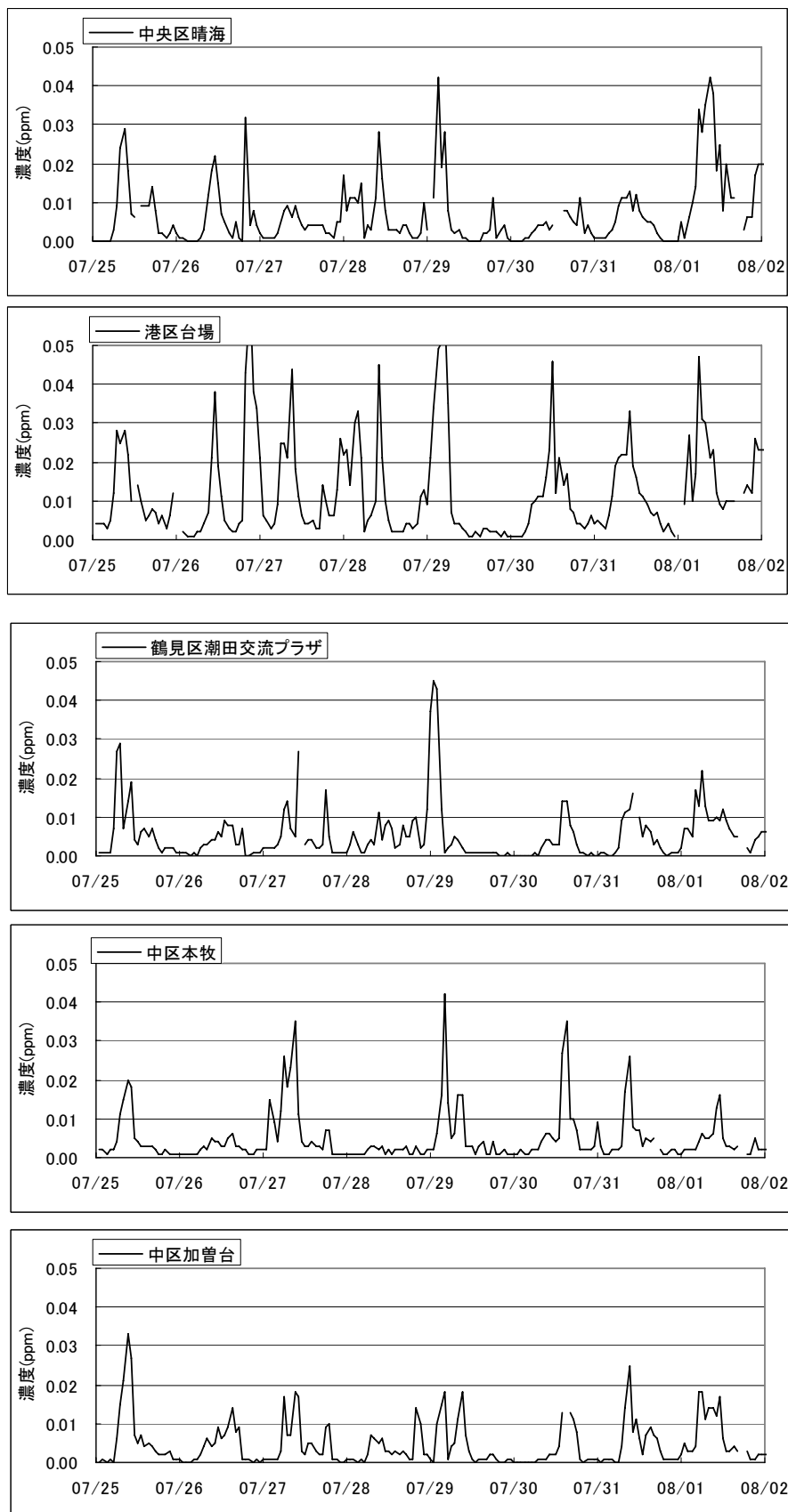


資料図 3-2 (1) 周辺の大気汚染常時監視測定局における測定結果(SPM)

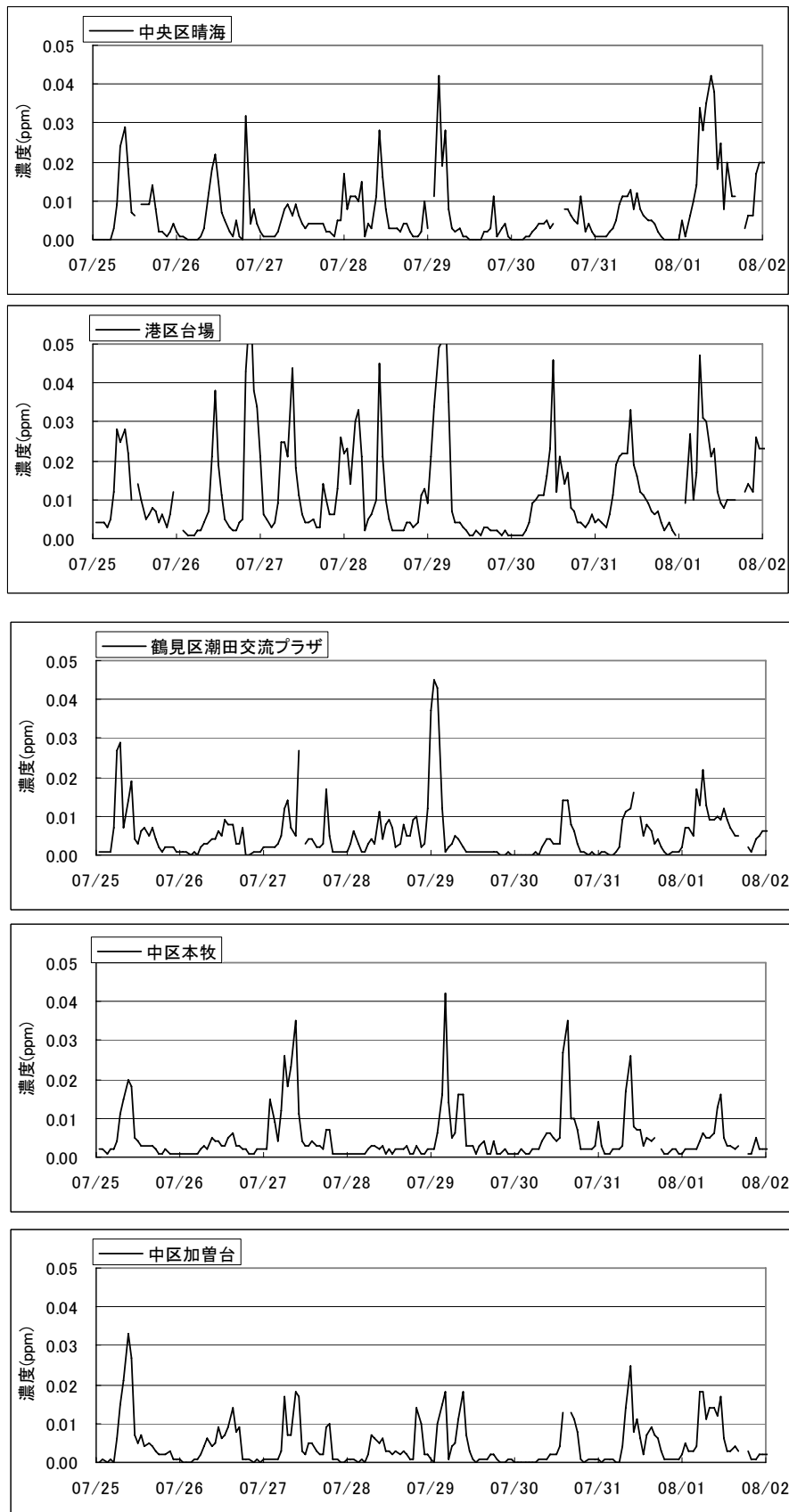


資料図 3-2 (2) 周辺の大気汚染常時監視測定局における測定結果(SO<sub>2</sub>)

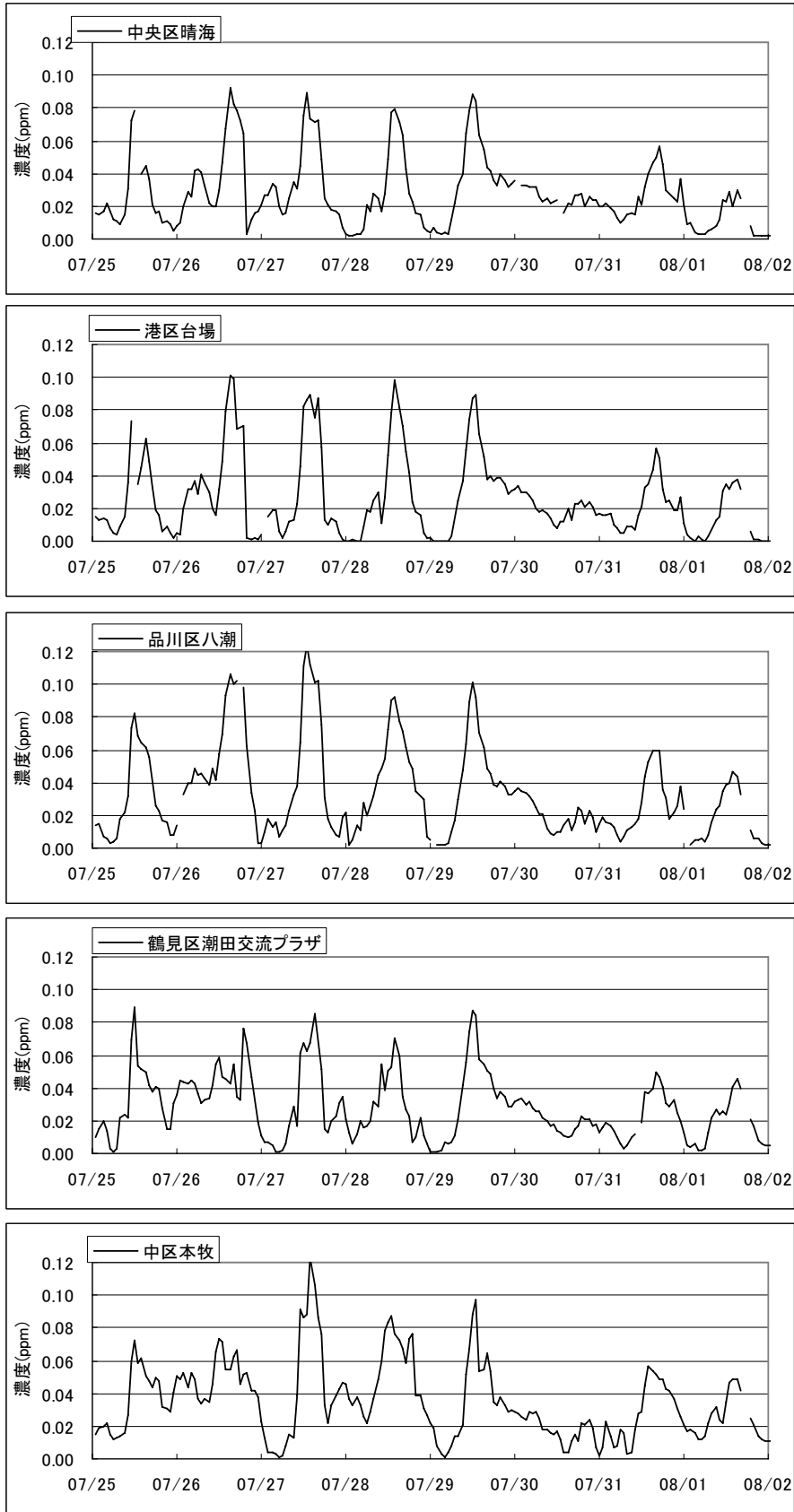




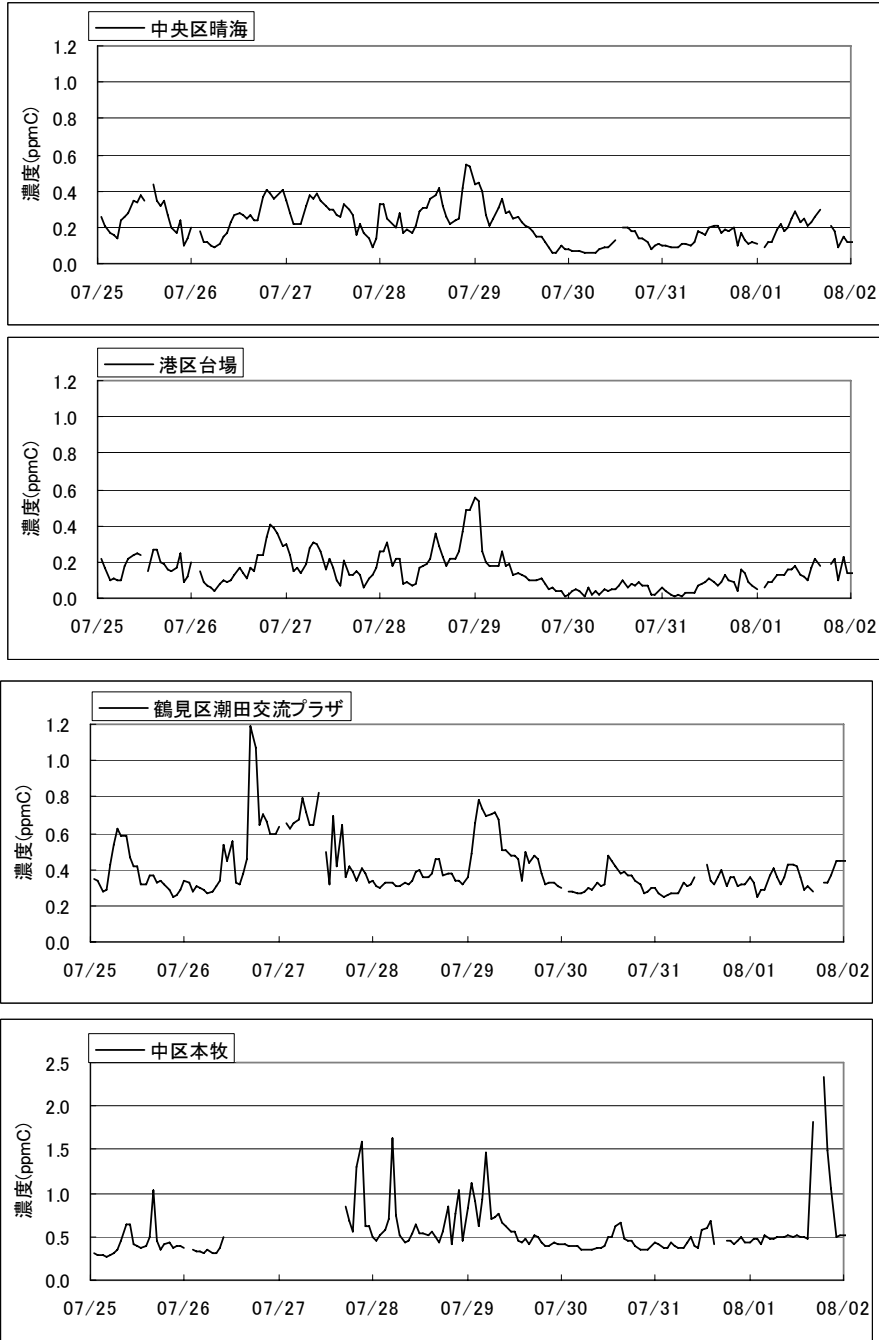
資料図 3-2 (3) 周辺の大気汚染常時監視測定局における測定結果(NO)



資料図 3-2 (4) 周辺の大気汚染常時監視測定局における測定結果(NO<sub>2</sub>)



資料図 3-2 (5) 周辺の大気汚染常時監視測定局における測定結果(O<sub>3</sub>)



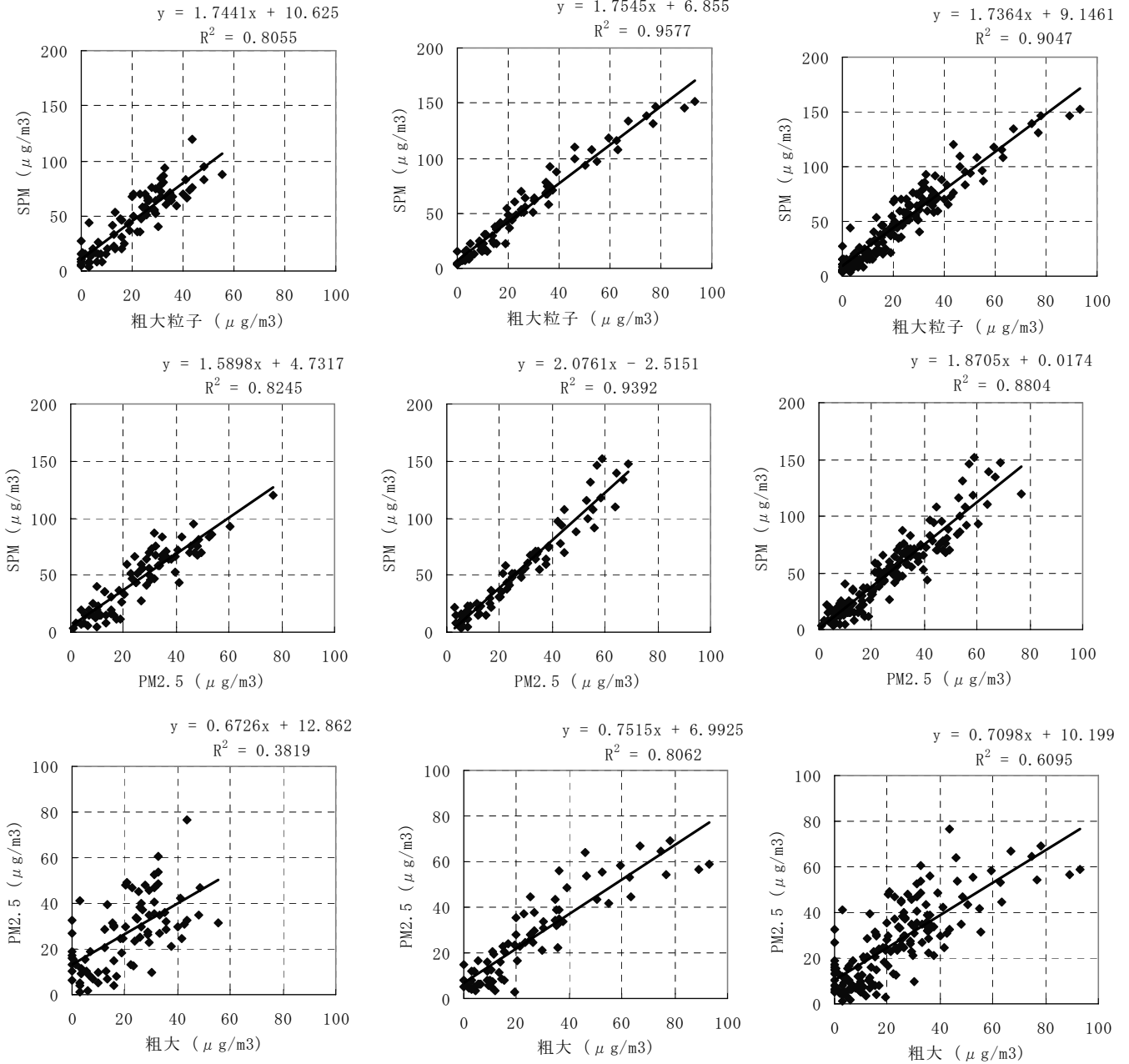
資料図 3-2 (6) 周辺の大気汚染常時監視測定局における測定結果(NMHC)

# 中央防波堤外側埋立地

昼間

夜間

全日



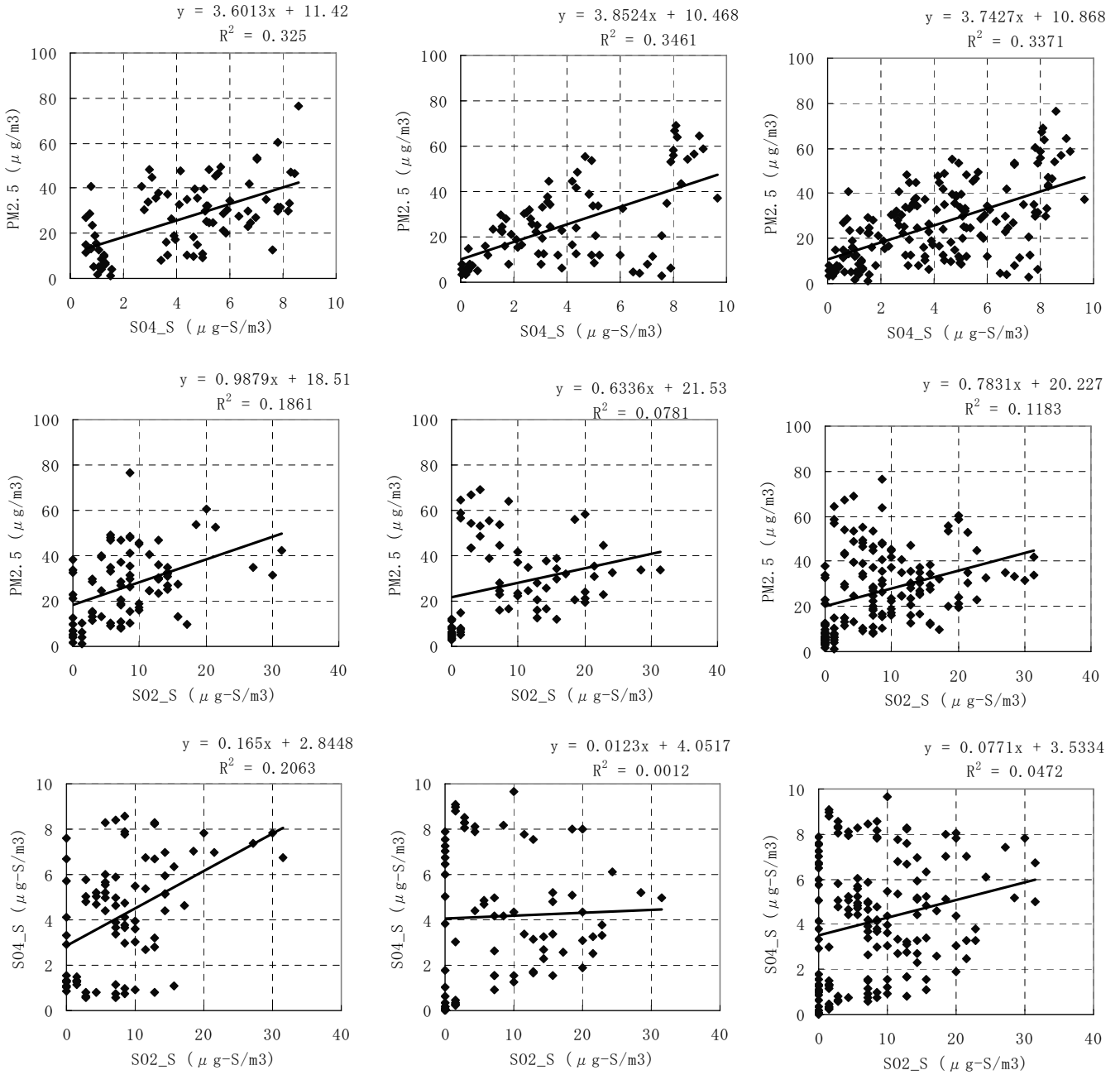
資料図 3-3(1) 項目間の相関 (昼夜別)

# 中央防波堤外側埋立地

昼 間

夜 間

全 日



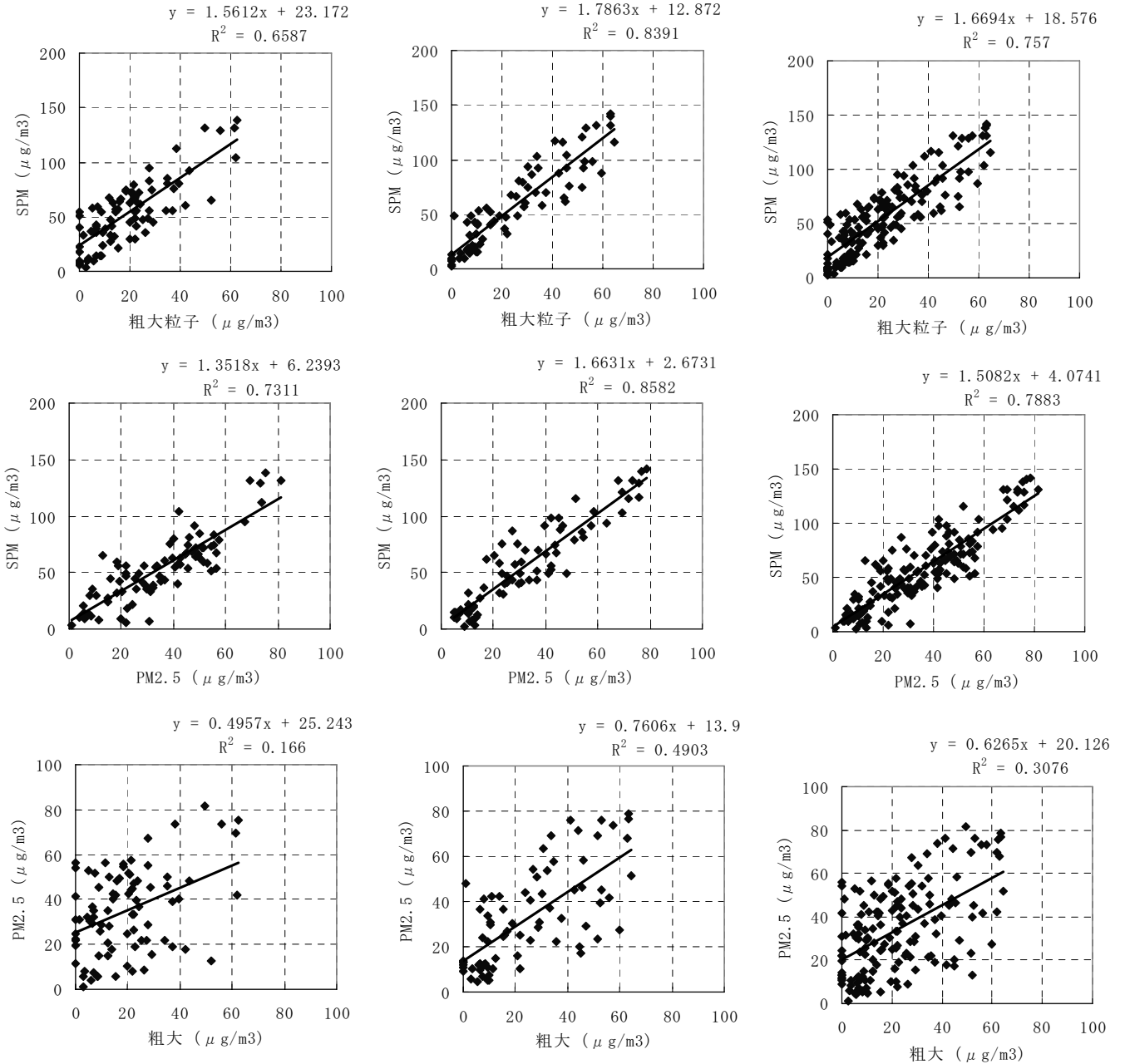
資料図 3-3 (2) 項目間の相関 (昼夜別)

# 船の科学館

昼 間

夜 間

全 日



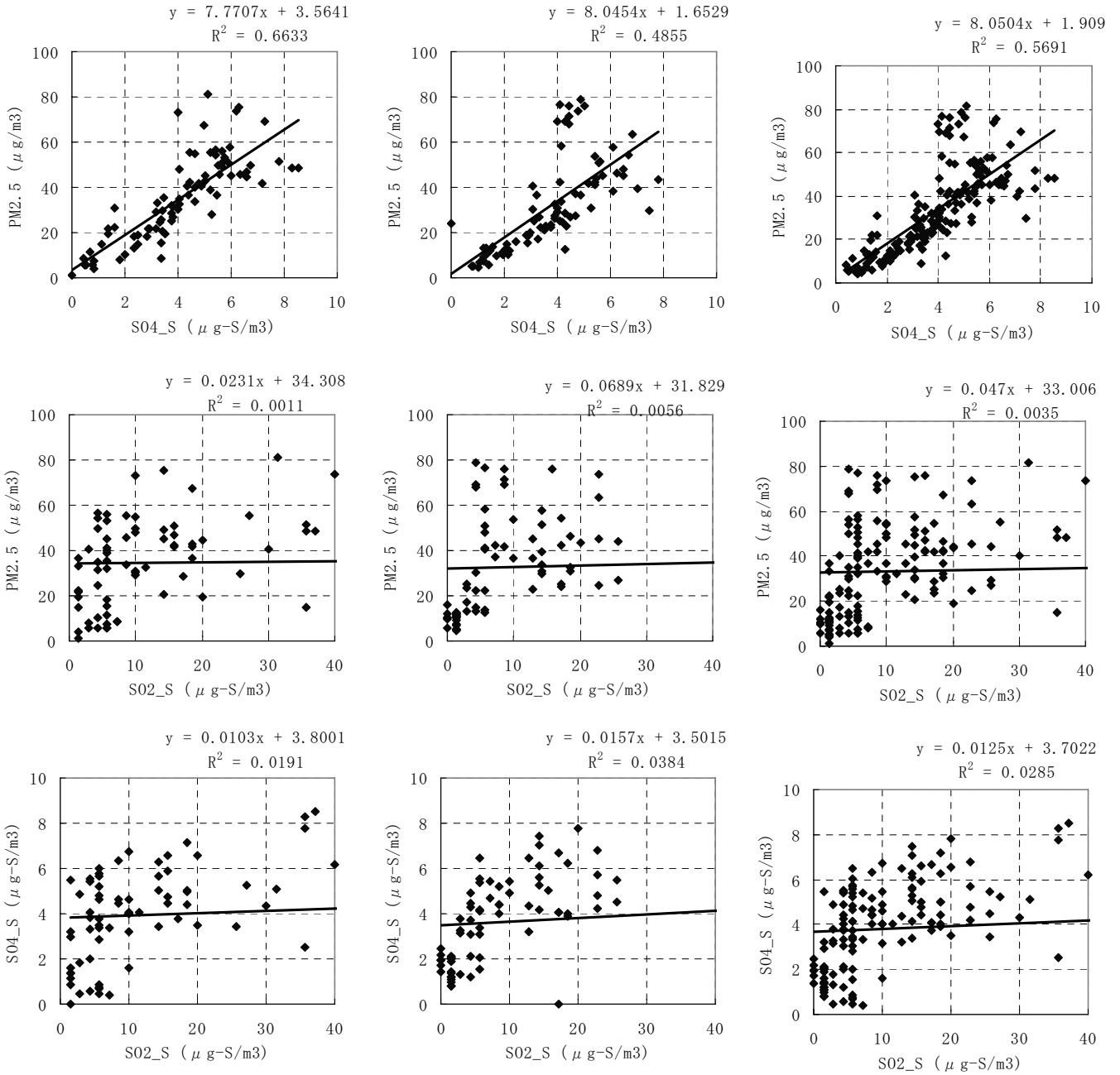
資料図 3-3 (3) 項目間の相関 (昼夜別)

# 船の科学館

昼間

夜間

全日



資料図 3-3 (4) 項目間の相関 (昼夜別)





## 用語・略語集

用語	説明
BLG	Bulk Liquids and Gases の略であり、ばら積み液体と気体物質に関する小委員会のこと。MARPOL 条約等に規定されているタンカー、ケミカルタンカー、ガスキャリアに関する安全要件・海洋汚染防止要件等に関する事項を審議する。
CMAQ	CMAQ(Community Multiscale Air Quality model)は、アメリカ環境保護庁(EPA)が 1998 年に発表した大気シミュレーションモデルで、大気中の様々な大気汚染物質を、汚染物質相互の影響も含めて同時に取扱うことが可能である。モデル内では、物質の輸送・拡散過程に加えて、ガス状物質同士の相互反応や光による反応を取り扱う気相反応過程、ガス状物質から二次粒子へ生成過程を取り扱うエアロゾル過程、雲中の雨滴内や雨滴とガス状物質との反応を取り扱う液相反応過程などの化学反応過程と、ガスや粒子が大気から地上へと沈着する乾性沈着過程や降水によってガスや粒子が大気から地上へと沈着する湿性沈着過程などの物理過程を含めて取り扱っている。広域での大気汚染シミュレーションが可能なモデルである。なお、今回用いたバージョンの CMAQ では、SOx・NOx と海塩粒子の反応は取り扱っていない。
CMB 法	「リセプターモデル」参照
EMEP	EMEP(Co-operative Programme for Monitoring and Evaluation of the Long-Range Transmission of Air Pollutants in Europe : 欧州モニタリング評価プログラム)は、1977 年に国連欧州経済委員会(UNECE)の賛助、世界気象機関(WMO)および国連環境計画(UNEP)の協力により発足し、1983 年には長距離越境大気汚染条約(LRTAP : Convention on Long Range Transboundary Air Pollution)に貢献する計画となった。 EMEP の主目的は、大気汚染物質の沈着と濃度に関する情報、国境を越えて長距離を移動する大気汚染物質の量などに関する情報を参加国に提供することである。この目的の達成のために EMEP は次の 3 つの活動を中心的に行っている。
EMPC	Marine Environment Protection Committee の略であり、海洋環境保護委員会のこと。IMO の下部組織であり、船舶に起因する海洋汚染の防止に関する国際条約の採択、改正及び各国への通報、条約の実施を促進する措置の検討等を行う。
IMO	International Maritime Organization の略であり、国際海事機関のこと。IMO は船舶の安全及び船舶からの海洋汚染の防止等、海事問題に関する国際協力促進のための国連の専門機関として、1958 年に設立された。国際貿易に従事する海運に影響のあるすべての種類の技術的事項に関する政府の規則及び慣行について、政府間の協力のための機構となり、政府による差別的措置及び不必要な制限の除去を奨励し、海上の安全、能率的な船舶の運航、海洋汚染の防止に関し最も有効な措置の勧告等を行うことを目的としている。
MM5	MM5(5th generation Mesoscale Model)は、米ペンシルバニア州立大学、米国大気研究センター(NCAR)で開発された 3 次元局地気象モデルであり、温度、水蒸気、風速・風向、降水、降雪、雲などの気象成分の時間変化をシミュレートできるモデルである。
NMHC	Non-Methane hydrocarbons : 非メタン炭化水素。メタンを除くガス状の炭化水素類のことである。大気中で光化学反応することで、PM、光化学オキシダントの生成原因となる。
PAHs	多環芳香族炭化水素 (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAH)のこと。分子量が増えるにつれ PAH の発がん性は増大し、急性毒性は減少する。PAH の 1 つであるベンゾピレンは最初に発見された発がん性化合物である。
PM	Particulate Matter の略であり、粒子状物質のこと。大気中に固体または液体の形で浮遊する微小な粒子をいう。
PM <sub>10</sub> 、SPM	大気環境中に浮遊する PM のうち、おおむね粒径 10 mm 以下の粒子のこと。日本では SPM (Suspended Particulate Matter : 浮遊粒子状物質)として環境基準が設定されている。
PM <sub>2.5</sub>	大気環境中に浮遊する PM のうち、おおむね粒径 2.5 mm 以下の粒子のこと。米国、カナダ、オーストラリアなどの基準値となっており、WHO から指針値が示されている。
RAMS	RAMS(Regional Atmospheric Modeling System)は、コロラド州立大学で開発された 3 次元局地気象モデルであり、温度、水蒸気、風速・風向、降水、降雪、雲などの気象成分の時間変化をシミュレートできるモデルである。
RFO	Residual Fuel Oil の略であり、残渣燃料油のこと。JIS 規格で C 重油に相当。
RoRo 船	Roll-on/roll-off ship のこと。フェリーのようにランプを備え、トレーラーなどの車両を収納する車両甲板を持ち、自走で搭載/揚陸できる構造の貨物船である。対義語は LO-LO 船 (Lift-on/lift-off ship)。

用語	説明
SCR	Selective Catalytic Reduction の略であり、日本語では「選択(的)触媒還元」を意味する。排出ガス浄化技術の一つで、窒素酸化物(NOx)を浄化する技術である。
SECA	SOx Emission Control Area(SOx 排出規制海域)の略。一般海域より厳しい SOx 排出規制(船上で使用する全ての燃料油の硫黄分が 1.5%以下であること)が課せられるエリアであり、2008 年 5 月時点で、バルト海海域、北海海域が指定されている。
TSP	大気環境中に浮遊する全 PM(Total Suspended Particulates)のこと
VOC	Volatile Organic Compounds の略であり、揮発性有機化合物のこと。常温常圧で空气中に容易に揮発する物質の総称で、主に人工合成されたものを指す。大気中に放出され、光化学反応によってオキシダントや SPM(浮遊粒子状物質)の発生に関与していると考えられている。炭化水素(系物質)を主とするが、C、H 以外の元素が入っているものも含むため、炭化水素類(HC)より概念的には広い。
WHO	World Health Organization の略であり、世界保健機関のこと。健康を基本的人権のひとつととらえ、その達成を目的として 1948 年に設立された国連の専門機関。主な活動内容は、人の健康に関する情報の提供やガイドライン値の設定、多国間協力の推進、災害時緊急対策、感染症対策などである。
一次粒子	粒子状物質は、生成機構の違いから一次粒子と二次粒子に区分できる。一次粒子は、発生源から大気中に粒子として直接排出される粒子であり、ディーゼルエンジンから排出される粒子や、自然起源の海塩粒子、土壌粒子などがこれに含まれる。
環境基準	環境基本法(1993)の第 16 条に基づいて、政府が定める環境保全行政上の目標。人の健康を保護し、及び、生活環境を保全する上で維持されることが望ましい基準。大気汚染に係る環境基準が定められている項目としては、二酸化硫黄、二酸化窒素、浮遊粒子状物質(SPM)、一酸化炭素、光化学オキシダントのほか、有害大気汚染物質としてベンゼン等がある。
乾性沈着	重力による沈降や拡散、地表面への衝突などにより、大気中から大気汚染物質が除去される過程のこと。一定時間内に乾性沈着により大気から除去される量を乾性沈着速度という。
気相反応	「CMAQ」参照
凝縮性粒子	燃焼生成物が煙突から排出された直後に冷却され生成する粒子のこと。
クラスター分析	クラスター分析は、対象となるデータ群を数学的に類似しているサンプル同士で順次グループリングする方法の総称である。クラスター分析の結果は、データ群の類似性を視覚的に示すデンドログラム(樹形図)として表現される。
湿性沈着	酸性雨のように、大気汚染物質が降水に取り込まれたのちに地表に降下すること。
自動車 NOx・PM 法	正式名称は「自動車から排出される窒素酸化物および粒子状物質の特定地域における総量の削減等に関する特別措置法」。平成 4 年に NOx のみを対象(いわゆる「自動車 NOx 法」)として制定されたが、平成 13 年に PM を追加し自動車 NOx・PM 法として制定された。
粗大粒子	大気中を浮遊する粒子状物質のうち、おおむね粒径 2~10 μm の粒子をいう。主として機械的な力により飛散した土壌粒子や海塩粒子などの自然起源の一次粒子からなる。
短期的評価	環境基準が 1 時間値や 1 日平均値で定められている項目について、測定を行った日または時間について評価を行うこと。
超微小粒子	おおむね 0.1 μm 以下の粒子。ナノ粒子あるいは PM <sub>0.1</sub> とも呼ばれ、近年になって、健康影響の面から注目されている。
ナノ粒子	「超微小粒子」参照
二次粒子	粒子状物質は、生成機構の違いから一次粒子と二次粒子に区分できる。二次粒子は、発生源から大気中にガス状物質として排出された SOx、NOx、VOC(揮発性有機化合物)から光化学反応などにより生成される。
バックグラウンド濃度	一般にバックグラウンド濃度は、注目している発生源以外の影響によって決定される濃度や自然界にバックグラウンドとして存在している濃度という意味で使用されることが多い。本調査では、船舶排出源の影響に注目しているため、船舶以外の人為起源の発生源と自然起源の発生源からの影響をバックグラウンド濃度と定義した。
微小粒子	大気中を浮遊する粒子状物質のうち、おおむね粒径 2 μm 以下の粒子をいう。0.1 μm 以下を超微小粒子として、区別する場合もある。主として燃焼過程による人為起源の一次粒子や、大気中でガスが粒子化してできる人為起源・自然起源の二次粒子からなる。

用語	説明
ユークリッド距離	データ群の類似性の判定基準はいくつかあるが、取扱が容易なユークリッド距離が良く用いられる。異なるデータ群間で要素の差の2乗和を、その異なるデータ間の距離の指標とするもので、それが近いほど2つのデータ群は類似している指標となる。
リセプターモデル	統計的手法によりPMの発生源寄与を解析する方法であり、リセプターモデルの代表的な手法として、CMB法(Chemical Mass Balance Method;化学質量収支法)がある。CMB法とは、環境中のある地点でPMを採取した場合、採取されたPMが様々な発生源から排出されたPMの合計であることと、発生源が特徴的な成分組成を持つことを利用し、発生源の成分組成と環境中で採取されたPMの成分組成から統計的に発生源別の寄与を推定する方法



この報告書は、競艇交付金による日本財団の助成金を受けて作成しました。

平成19年度

船舶起源の粒子状物質(PM)の環境影響に関する調査研究報告書

平成20年6月発行

発行 海洋政策研究財団 (財団法人 シップ・アンド・オーシャン財団)

〒105-0001 東京都港区虎ノ門1-15-16 海洋船舶ビル

TEL 03-3502-1828 FAX 03-3502-2033

<http://www.sof.or.jp>

本書の無断転載、複写、複製を禁じます。

ISBN 978-4-88404-213-4