

平成25年度

北極海航路における船舶からの黒煙
(ブラックカーボン)に関する調査研究事業
報 告 書

平成26年7月

海 洋 政 策 研 究 財 団
(一般財団法人 シップ・アンド・オーシャン財団)

はじめに

本報告書は、ポートルースの交付金による日本財団の平成 25 年度助成事業「北極海航路における船舶からの黒煙(ブラックカーボン)に関する調査研究」の成果をとりまとめたものです。

北極域の局地的な気候変動を一層加速させる原因物質として、地球温暖化の大きな原因物質である CO₂ の排出以外に、黒煙(ブラックカーボン)が重要とされていることについては、まだ多くの人々に理解されていないようです。

一般に、燃料の不完全燃焼によって大気中に排出されるブラックカーボンは、太陽光を効率良く吸収する性質を持っており、大気中にある際には大気を加熱し、雪氷面に沈着した際には雪氷の融解を促進して、特に雪表面が夏季にも存在する北極域などにおいて気候変動の促進につながる重要な影響を持つ物質と認識されています。今後、北極海の海氷が減少していくことで、さらに北極海航路を航行する船舶の増加が予測されますが、これはブラックカーボンの排出増加にもつながり、同航路周辺において局所的に急激な気候変動の起こる可能性が示唆されております。

すでに、国際海事機関 (IMO; International Maritime Organization)では、2011 年 7 月に開催された第 62 回海洋環境保護委員会 (MEPC62; 62nd session of Marine Environment Protection Committee)で、国際海運から排出されるブラックカーボンが北極圏に及ぼす影響について調査を行い、規制の必要性について検討すべきであることが合意されており、ブラックカーボンの定義、計測方法及び制御方法等について技術的検討を進めております。

このような状況に鑑み、当財団では、昨年度から船舶からのブラックカーボンの排出実態やシミュレーションなどを実施し、将来における北極域でのブラックカーボンに関する規制の必要性及び実用的対策の調査研究を行うことにより、地球環境問題の解決に寄与することを目的として本事業を実施いたしました。

本年度は 2 年計画の最終年度として、低質燃料を用いた船舶主機からのブラックカーボンの粒径や光学的特性について更にデータを収集するとともに、ブラックカーボンの定義についても国内外の議論を整理してまとめました。また、人工衛星が受信した AIS (自動船舶識別装置)データを基にした北極海におけるブラックカーボンの排出量分布図を作成するとともに、陸上の人工発生源からの排出量との比較を行いました。その結果、ロシアおよびカナダ沿岸などの北極海航路の利用は特に夏季において認められるものの、総排出量はスカンジナビア半島、アイスランド周辺海域に偏って存在することが判りました。また、解析結果を基に、大気中のブラックカーボン濃度などから大気の加熱状況の変化を解析し、沈着量などから雪表面の融解に繋がる反射率の変化についても検討しました。さらに、人体影響および生態系影響に対する変化についても解析を行いました。いずれの結果も、現時点では直ちに影響を及ぼす大きなものではありませんが、特に活動量の大きい海域および増加が見込まれる海域において、局地的な濃度変化および沈着量変化を引き続きモニターする必要性を示唆するものとなりました。仮に、将来においてブラックカーボンに対して排出対策を実施する場合は、想定される海域を利用する船舶がアイスクラス船などに限定されることから、燃焼改善や燃料転換よりも、湿式スクラバーやディーゼル粒子フィルタなどの後処理技術が適していると考えられます。今後、世界的に見ても先進的なこれらのデータが国内外の検討の場において利用されることを望みます。

本事業を進めるにあたりましては、高崎講二九州大学大学院総合理工学研究院教授を委員長とする「北極海航路における船舶からのブラックカーボンに関する調査研究委員会」各委員の方々による熱心なるご審議とご指導を賜りました。また、国土交通省海事局の皆様をはじめとするオブザーバの方々には委員会において有益なご発言を賜るとともに、特に実船試験においては船社から多大なるご協力を賜りました。これらの皆様に、心から厚くお礼を申し上げます。

平成 26 年 7 月
海洋政策研究財団
理事長 今 義男

北極海航路における船舶からのブラックカーボンに関する調査研究委員会委員名簿

(順不同、敬称略)

委員長	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
委員	前田 和幸	独立行政法人水産大学校 海洋機械工学科 教授
	櫻井 達也	明星大学 理工学部総合理工学科 助教
	青木 輝夫	気象庁気象研究所 気候研究部 第六研究室 室長
	大島 長	気象庁気象研究所 環境・応用気象研究部 第一研究室 研究官
	兼保 直樹	独立行政法人産業技術総合研究所 環境管理技術研究部門 大気環境評価研究グループ 主任研究員
	速水 洋	一般財団法人電力中央研究所 環境科学研究所 大気・海洋環境領域 上席研究員
	佐瀬 裕之	一般財団法人日本環境衛生センター アジア大気汚染研究センター 生態影響研究部 研究部長
	津野 良治	一般社団法人日本船主協会 海務部 課長代理
	華山 伸一	海洋政策研究財団 海技グループ 主任研究員

オブザーバ

	北林 邦彦	国土交通省 総合政策局 海洋政策課 海洋政策渉外官
	松本 友宏	国土交通省 海事局 海洋・環境政策課 環境政策推進官
	小林 正和	株式会社商船三井 海上安全部 安全グループ兼グループ事業部 安全担当グループマネージャー
	堀内 主計	日本郵船株式会社 技術グループ 造船技術チーム チーム長
	井上 清次	川崎汽船株式会社 環境推進室
	山口 健太郎	第一中央汽船株式会社 船舶部技術課
	能代 俊亮	日本ガイシ株式会社 産業プロセス事業部 営業部 東京営業所

関係者

	原 大地	株式会社日本海洋科学コンサルタントグループ 部長
	真壁 稔	株式会社日本海洋科学コンサルタントグループ 事業部長
	西田 浩之	株式会社日本海洋科学海外事業グループ 事業部長
	青山 憲之	株式会社日本海洋科学コンサルタントグループ 主任コンサルタント

仲野 淳一 株式会社日本海洋科学コンサルタントグループ コンサルタント

事務局

岡崎 修平 海洋政策研究財団 常務理事

市川 吉郎 海洋政策研究財団 海技グループ グループ長

三木 憲次郎 海洋政策研究財団 海技グループ グループ長

森 勝美 海洋政策研究財団 海技グループ グループ長代理

南島 るりこ 海洋政策研究財団 海技グループ 海技広報チーム チーム長

市川 慎一 海洋政策研究財団 海技グループ 海事チーム チーム主任

目 次

第 I 編 調査の概要	I
1 調査の目的	I
2 委員会開催日	I
3 調査の結果	I
3.1 船舶から排出される黒煙の排出実態の解明	I
3.2 黒煙による極地気象に対する影響に関するシミュレーション	III
3.3 黒煙による健康被害及び生態系への影響に関するシミュレーション	IV
3.4 船舶から排出される黒煙の人工排出源に対する寄与率の推定	VI
3.5 排出実態にあった削減技術の抽出と規制の枠組みの検討	VI
第 II 編 調査の内容	1
主要用語説明	1
主要略語集	2
1 北極海航路における船舶からのブラックカーボン排出の影響の考え方	5
1.1 船舶から排出されるブラックカーボンの定義	6
1.2 北極海航路を対象としたブラックカーボンの影響に係る国際的議論の状況	9
1.2.1 IMOにおけるブラックカーボンに対する規制の議論	9
1.2.2 ブラックカーボンによる気候変動に対する評価	10
1.3 北極海航路における船舶からのブラックカーボンの環境影響評価項目	12
1.3.1 北極圏における総人工排出源に対する船舶からの排出量の影響	12
1.3.2 北極圏に対する局地的な気候変動への影響	12
1.3.3 生態系影響の整理	14
1.3.4 人体健康影響の整理	15
2 船舶から排出されるダストの排出実態の解明	16
2.1 ダスト計測の目的	17
2.2 ダスト計測の概要	18
2.3 計測対象船舶	19
2.4 ダスト分析方法	20

2.4.1	粒径別ダスト重量・濃度把握のための分粒方法	20
2.4.2	排ガス中ダストに含まれる無機炭素/有機炭素比(EC/OC比)の分析方法	20
2.4.3	Soot-Blow時に採取されたダストの粒子画像解析方法	21
2.5	通常航行時におけるダストの分析結果	22
2.5.1	排ガス採取量	22
2.5.2	粒径別ダスト重量・濃度分析結果	23
(1)	A社製4.9万kWエンジンφ96におけるダスト粒径別重量割合と濃度(アンダーセンスタックサンプラ)	25
(2)	B社製1.9万kWエンジンφ70とC社製1.3万kWエンジンφ50におけるダストの粒径別重量・炭素分析(MCIサンプラ)	26
2.5.3	無機炭素/有機炭素比(EC/OC比)・濃度分析結果	27
2.6	Soot-Blow時に捕集したダスト分析結果	30
2.6.1	排ガス採取量	30
2.6.2	粒径別ダスト重量分析結果	31
(1)	A社製4.9万kWエンジンφ96のダスト画像解析による粒径分布	31
(2)	C社製1.3万kWエンジンφ50	32
2.6.3	Soot-Blow時における捕集粒子の無機炭素/有機炭素比濃度分析結果	33
(1)	A社製4.9万kWエンジンφ96	33
(2)	C社製1.3万kWエンジンφ50	34
2.7	考察	35
2.7.1	燃料消費率の検証	35
2.7.2	排出ガス流速とサンプリング速度	35
2.7.3	通常航行時のPM排出係数の試算	36
2.8	LAC排出係数の設定	37
3	北極海航路を対象とした船舶活動量及びブラックカーボン排出量データの作成方法	39
3.1	船舶活動量及びブラックカーボン排出量データの作成方法の概略	40
3.2	使用データの詳細	42
3.2.1	exactAISデータの詳細	42
3.2.2	対象海域の定義	47
3.2.3	空間・時間解像度	49
3.2.4	その他の設定	50
3.3	北極圏における船舶の活動量とLAC排出量の算出方法	51
3.3.1	速度及び存在時間の設定方法	51
3.3.2	活動量(時間当たり燃料消費量)の算出方法	51
3.3.3	LAC排出量の算出方法	51

4	北極圏における船舶活動量及びブラックカーボン排出量データの解析	52
4.1	北極圏における船舶の活動量の解析	53
4.1.1	個船数でみた船舶活動量の解析	53
(1)	不明船の取り扱い	54
4.1.2	燃料消費量で見た船舶活動量の解析	57
(1)	月ごとの活動量の解析	57
(2)	緯度区分別・月別・ICE クラス別活動量	59
(3)	船舶活動量の地理的分布	61
4.1.3	船舶活動量の解析	65
(1)	平均航行速力に対する実航行速度との比較	65
(2)	船種別運航時間及び航行距離でみた活動量の解析	68
(3)	既存の活動データとの比較	70
4.2	北極圏における船舶からの LAC 排出量の解析	73
4.2.1	LAC 排出量	73
4.2.2	月別でみた LAC 排出量の解析	74
4.2.3	船種別でみた LAC 排出量の解析	75
4.2.4	船籍別でみた LAC 排出量の解析	76
4.2.5	地理的分布でみた LAC 排出量の解析	77
5	北極圏における船舶からのブラックカーボンの環境影響評価シミュレーション	83
5.1	ブラックカーボンの環境影響評価のためのモデルの考え方	83
5.1.1	領域化学輸送モデル:WRF-Chem について	84
5.1.2	大気放射モデル : Rstar-Mstrn について	84
5.2	計算シナリオの設定	85
5.2.1	北極圏における船舶からの寄与を算定するためのシナリオの設定	85
5.2.2	対策の効果を算定するためのシナリオの設定	86
5.3	計算条件及び計算手順	89
5.3.1	領域化学輸送モデルと大気放射モデルの計算設定条件	89
5.3.2	計算領域設定	91
5.3.3	初期・境界条件設定	92
5.3.4	北極海を航行する船舶以外の排出量の設定	93
(1)	陸域人為起源排出量の設定	93
(2)	バイオマスバーニング起源排出量の設定	94
(3)	北緯 66° 以南の船舶起源排出量の設定	95
5.3.5	計算実行フローと実測値との再現性の確認	97
5.4	シミュレーション結果と解析	99
5.4.1	船舶の寄与を算定するためのシミュレーション結果と解析	99

(1)	最下層 EC 濃度分布図.....	99
(2)	気柱 EC 総量分布図.....	110
(3)	気柱 EC 総量/排出量分布図.....	120
(4)	放射強制力分布図.....	130
6	北極圏における船舶のブラックカーボン排出に対する対策の必要性の検討.....	140
6.1	排出量寄与の観点からの対策の必要性の検討.....	141
6.1.1	陸上排出源からの LAC 排出量との比較.....	141
6.1.2	排出量寄与からの対策の必要性の検討.....	144
6.2	北極圏に対する局地的な気候変動への影響の観点からの対策の必要性の検討.....	146
6.2.1	EC 濃度および放射強制力に対する影響の観点からの対策の必要性.....	146
6.2.2	雪表面の反射率に対する影響の観点からの対策の必要性.....	146
6.3	北極圏で懸念される生態系影響の観点からの対策の必要性の検討.....	151
6.4	北極圏で懸念される人体健康影響の観点からの対策の必要性の検討.....	152
6.4.1	疫学研究に基づく粒子状物質の健康影響評価.....	152
6.4.2	健康影響の定量評価モデル.....	153
6.4.3	北極圏近傍における健康影響評価.....	154
(1)	PM _{2.5} 濃度と環境基準の比較を用いた評価.....	154
(2)	損失人口の計算に基づく評価.....	155
6.5	北極圏における船舶のブラックカーボン排出に対する対策の必要性のまとめ.....	158
7	ブラックカーボン排出対策が必要とされる場合の技術的な検討.....	161
7.1	船舶から排出されるブラックカーボン排出の低減に適用可能な技術.....	162
7.1.1	ディーゼル粒子フィルタ (DPF).....	162
7.1.2	湿式スクラバー (WET scrubber).....	164
7.1.3	A 重油への燃料転換 (Fuel Switch).....	166
7.2	ブラックカーボン排出対策のコスト評価.....	167
7.3	ブラックカーボン排出対策の枠組み.....	170
8	まとめ.....	171
8.1	船舶からのブラックカーボンの排出実態の特徴.....	172
8.2	北極圏における船舶からのブラックカーボン (LAC) の人工排出源に対する寄与.....	172
8.3	シミュレーションによる船舶から排出されるブラックカーボンの影響評価.....	173
8.4	ブラックカーボン排出対策の枠組み.....	173
8.5	ブラックカーボン削減技術のまとめ.....	173

第 I 編 調査の概要

1 調査の目的

極域を航行する船舶から排出される黒煙（ブラックカーボン）は、雪氷面に沈着した際には、雪氷表面における可視光の反射率を変化させ、雪氷の融解を早めて気候変動を引き起こすと言われている。この気候変動は CO₂ などによる地球温暖化より急激かつ局所的であり、脆弱な生態系や我が国の気象に与える影響も大きいと言われている。

船舶から排出される黒煙の寄与率は、将来の北極圏での商業航路の発展等によって、大きく増加する恐れがある。このため国際海事機関（IMO）においては、2014 年までに北極域における船舶からの黒煙の規制の必要性について検討作業を進めることになった。

本事業では、船舶からの黒煙の排出実態やシミュレーションによる環境影響評価及び実用的対策を踏まえて、将来における北極域での黒煙に関する規制のあり方について調査研究を行うことにより、地球環境問題の解決に寄与することを目的とする。

2 委員会開催日

本調査の実施にあたって、以下のとおり委員会を開催し、調査方針及び調査検討結果についてご審議いただいた。

第 1 回：2013 年 7 月 23 日

第 2 回：2013 年 11 月 25 日

第 3 回：2014 年 3 月 20 日

第 4 回：2014 年 6 月 30 日

3 調査の結果

3.1 船舶から排出される黒煙の排出実態の解明

3.1.1 船舶の排ガス中に含まれるダストの採集と分析

本事業では、外航商船で一般的な C 重油焚き 2 ストロークディーゼル機関（定格出力 1 万 kW 以上）の船舶について、通常航行時及び Soot-Blow 実施時に排出される排ガス中に含まれるダストの排出実態を把握するため、昨年度実施した A 社製 4.9 万 kW エンジン φ 96、（5 万総トン級外航コンテナ船）に加え、B 社製 1.9 万 kW エンジン φ 70（3 万総トン級外航コンテナ船）と C 社製 1.3 万 kW エンジン φ 50（1 万総トン級内航 RORO 船）を対象として排ガス中のダストを採集・分析した。

なお、A 社製 4.9 万 kW エンジン φ 96 と B 社製 1.9 万 kW エンジン φ 70 は動粘度 445～515 cSt、C 社製 1.3 万 kW エンジン φ 50 は動粘度 158 cSt の C 重油が使用されていた。

今年度実施の B 社製 1.9 万 kW エンジン φ 70 と C 社製 1.3 万 kW エンジン φ 50 について通常航行中の排ガスに含まれるダストを MCI サンプラにより分粒・採取して分析した結果、いずれも粒径が最も小さい 2.5 μm カット以下における捕集割合が高く、重量ベースでは全体の 94～95% を占めた。一方、昨年度実施の A 社製 4.9 万 kW エンジン φ 96 では 2.5 μm 以

下の重量割合は約 36%であったが、バックアップフィルタを使用していないことを考慮すると今年度実施の MCI サンプラを使用した計測結果と大きな乖離はないと考える。

通常航行時における EC/OC 比について、今年度実施の B 社製 1.9 万 kW エンジン $\phi 70$ 及び C 社製 1.3 万 kW エンジン $\phi 50$ においては、いずれも OC の割合が高くなった。希釈によって排ガス温度を下げないダスト採取方法による分析にもかかわらず、OM の比率が大きいことは、自動車ディーゼル粒子との大きな差違といえる。このことは、フィルタ上に採取された粒子の色が完全な黒色でないことから裏付けられる。

以上の結果から、通常航行時の船舶ダストについては、粒径 $2.5 \mu\text{m}$ 以下の粒子として空気力学上取り扱うことで構わないと考え、また、第 5 章で行うシミュレーション内の設定では、安全側の評価として LAC のうち OM についても自動車ディーゼル粒子と同様の光学的特性を持つものと仮定した。

3.1.2 北極海航路を対象とした船舶活動量及び LAC 排出量データ

昨年度の事業では、AMSA2009 (Arctic Marine Shipping Assessment 2009) による北極圏沿岸国の航行データベース等を活用して北極海航路を対象とした船舶活動量データを作成した。本年度はカナダの exactEarth Ltd が提供する衛星 AIS データを解析して最新の船舶活動量及び排出量データを整理した。

解析の対象は 2012 年 11 月～2013 年 10 月までとし、北緯 66° 以北を航行した船舶とした。AIS データには、船名や MMSI といった識別符号等の静的情報の他、各船の位置情報 (緯度・経度) や速力 (SOG)、針路 (COG) 等の動的情報が含まれているが、主機関の負荷率に応じて変化する燃料消費量を算出するためには、個船毎に機関定格出力や航海速力等の情報が必要となることから、IHS Fairplay (以下、IHSF) の船舶データベースを参照することにより、これら必要情報を補完して北極海における船舶の活動量及び LAC 排出量データを整備した。なお、ここで LAC とはブラックカーボンの定義の一つであり、狭義の EC に加えて OM と Ash を加えたものとして定義する。

北極海における船舶の活動量及び LAC 排出量データを整備するにあたっては、北緯 66° 以北の海域のうち、ノルウェーの内航船や漁船などの活動が多いとみられる海域と北極海航路を分けるため、本事業では、西経 25° ～東経 45° 、かつ、北緯 66° ～ 80° の海域を“Non Arctic”とし、それ以外の北緯 66° 以北の海域を“Arctic”と定義した。

活動量 (燃料消費量) の算定にあたっては、燃料消費率を EEDI 策定のための仮定条件として使用される 190 g/kWh とし、航海速力航行時の負荷率 85%として AIS で実測された速度に応じて負荷率を 3 乗則に従って設定した。また、LAC 排出量の算定については、活動量 (燃料消費量) \times 排出係数として算出し、排出係数は EC、OM、Ash を加えた 0.335 g/kWh とした。

(2) 北極圏における船舶活動量及び LAC 排出量データの解析

2012 年 11 月～2013 年 10 月までの 1 年間の衛星 AIS データを解析したところ、北緯

66° 以北を航行した船舶ユニーク数は 9,324 隻であり、そのうち約半数の 4,964 隻は個船情報を特定することができた。残り半数弱のうち 2,646 隻はクラス A を搭載し、1,714 隻はクラス B と呼ばれる簡易型の AIS 装置を任意に搭載している小型漁船等であったと推定される。

AIS データに基づく北緯 66° 以北海域の航行船舶活動量 (燃料消費量) は 7 月が最も多く、2 月が最も少なく 7 月の半分程度となった。クラス A の活動量が大部分を占め、多くが小型船であるクラス B の活動量は相対的に小さく全体の 5% 以下であった。

航行船舶の活動量 (燃料消費量) 及び LAC の地理的分布によるとスカンジナビア半島沖に活動量及び排出量が集中しており、北緯 66° 以北における LAC 年間総排出量 2,161 Mg/year のうち、約 82% の 1,770 Mg/year が本事業で定義する“Non Arctic”域内で発生し、北極海航路 (NSR) やカナダ側の“Arctic”域内では約 18% の 391 Mg/year であった。単位面積あたりの排出強度でみた場合も“Non Arctic”域内で最大 11.29 kg/year/km² であるのに対し、“Arctic”域内は 1.55 kg/year/km² で約 7 倍の開きがある。また、過年度の調査検討結果から、我が国領海 (12 NM 以内) の平均が 17 kg/year/km²、東京湾内で 244 kg/year/km² と比較してもはるかに少ない値といえる。

3.2 黒煙による局地気象に対する影響に関するシミュレーション

3.2.1 黒煙の移流・拡散シミュレーション

北極域における黒煙の大気中濃度及び、沈着量を導出するために、領域化学輸送モデルを構築した。

領域化学輸送モデルには、アメリカ大気研究センター (NCAR: The National Center for Atmospheric Research) 及びアメリカ大気海洋庁 (NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration) が開発を主導する WRF-Chem (The Weather Research and Forecasting model coupled with Chemistry) を利用した。

本事業における黒煙輸送シミュレーションの対象領域は、少なくとも北緯 70° 以北の地域が全て含まれる北極域と設定した。

3.2.2 光吸収シミュレーションモデル(大気放射モデル)の構築

黒煙の光学的性質による局地気象への影響をシミュレートする光吸収シミュレーションモデル (大気放射モデル) を構築した。ここで、光吸収シミュレーションモデル (大気放射モデル) とは、太陽放射エネルギー、地球・大気からの赤外エネルギーの大気中での伝播をシミュレートし、放射強制力として出力するモデルである。

昨年度に引き続き、3次元化学輸送モデル WRF-Chem 及び大気放射モデル Rstar-Mstrn を利用して、ブラックカーボンの輸送シミュレーションモデル・大気放射シミュレーションモデルの構築を行った。

3.2.3 黒煙による局地気象に対する影響に関するシミュレーション結果

極地気象に関して、ブラックカーボンが大気中に存在している際の影響を評価するパラメータとして放射強制力の変化を、ブラックカーボンが雪表面に沈着した後に融解を早める現象の評価のためのパラメータとして反射率の変化について計算検討を行った。

大気圏最下層におけるブラックカーボン濃度に対する船舶からの寄与は全般としては、“Non Arctic area”で10%内外、“Arctic area”では更に少なくなることが予想された。また、最も影響が懸念される7月の北極海上空において放射強制力についても、その増加分は最大1%程度に留まっている。他方、雪表面の反射率の変化については、沈着量が多い地域は夏季において既に海氷が消失していることなどから、現時点で沈着が海氷の消失に大きな影響を与えている可能性は小さい。また、夏季1ヶ月分の沈着が新雪に落ちた場合の反射率の変化の範囲は、通常雪氷が夏季における降雨でザラメ化するなどの自然変化の範囲に比較して小さいと評価できた。

3.3 黒煙による健康被害及び生態系への影響に関するシミュレーション

3.3.1 健康被害

本年度に実施した船上観測より、船舶排ガス中に含まれるブラックカーボンは、概ね空気粒子径が $2.5\mu\text{m}$ 以下の微小粒子($\text{PM}_{2.5}$)として存在していることが確認された。

$\text{PM}_{2.5}$ のような粒子状物質は、多種多様な化学物質で構成されている。例えば、わが国都市部における2004~2008年度の $\text{PM}_{2.5}$ 重量濃度の平均値は $22.6\mu\text{g}/\text{m}^3$ であり、そのうちBCに該当する元素状炭素成分(EC)は11%、硫酸塩(SO_4^{2-})は25%、硝酸塩(NO_3^-)は13%を占める。このうち、硫酸塩と硝酸塩は、今回の事業においてLACとして定義されるBCではない。他方、疫学研究においては、これら成分はいずれも有害な健康影響の原因になり得るとの考えから、個々の成分に対してではなく、粒子状物質の重量濃度を対象として追跡調査がなされている。

欧米では、様々な基準値の組み合わせにより、公衆衛生上のインパクトがどの程度低減できるかについても定量的な評価を行っている。具体的には、環境基準達成時に得られる社会的インパクトの減少(死亡人数や入院患者の減少)について定量的な解析結果が求められている。

例えば米国では、人体健康便益評価モデルのBenMAP (Benefits Mapping and Analysis Program)を行政ツールとして開発し、健康影響の定量評価を実施している。同モデルでは、対数線形型の濃度・応答関数が採用されている。本式では損失人工($\Delta\text{Mortality}$)の変化量は、濃度変化分(ΔC)及び曝露人口の大きさに依存する。また、ベースライン(現状)における $\text{PM}_{2.5}$ 濃度(C)が十分に低い場合、特にWHOが定めた指針値以下の場合には、同関係式の適用に不確実性があり、そもそも ΔC の算出を行う必要がないものと考えられた。

北極圏周辺における $\text{PM}_{2.5}$ 濃度を評価するに当たり、ここでは、(i) BenMAPでは $\text{PM}_{2.5}$ に対して長期曝露影響のみを解析対象としていること、(ii) 欧州では日平均を対象とした環境基準が設定されていないこと、(iii) 短期影響評価を行うための高時間解像度のデータが困難であったことなどから、年平均値を対象にその濃度レベルを評価した。

今回、北緯 66° 以北の北極圏における測定結果を示すことはできなかったが、アラスカ州、アイルランド、英国北部、スカンジナビア半島といった北極圏に近い地域では PM_{2.5} 実測年平均濃度が WHO の指針値である年平均値 10 µg/m³ よりも十分に低いことが確認できた。これらの実測が行われいない高緯度帯では PM_{2.5} の年平均値は更に低くなっていることが期待できる。

なお、先述のとおり、わが国都市部における 2004～2008 年度の PM_{2.5} 重量濃度の平均値は 22.6 µg/m³ であり対象年は異なるものの、北極圏に近い地域よりも PM_{2.5} 濃度は高い状況にあることがわかった。

さて、BenMAP においては $\Delta Mortality$ (大気汚染に起因する死者数の変化) は、対象となる *population* (曝露人口) が多いほど大きく計算される。関東地域と北極圏周辺地域を比較した場合、健康影響評価の対象となる曝露人口には大きな差がある事が見て取れる。前項で示した PM_{2.5} 濃度も併せて考えた場合、北極圏及びその周辺地域における健康リスクは、現状においてわが国におけるものよりも相対的に小さいものと考えられることができる。

既に述べた船舶の排出寄与あるいは、シミュレーションから推定される EC 濃度への寄与を考えると、人体健康影響リスクの低減を目的とした場合、まず PM のうち太宗を占める硫酸塩とその付随水の低減を燃料中硫黄分の規制によって削減するべきで、これらを含まない LAC 排出量を低減する優先根拠は小さいと言える。

3.3.2 生態系への影響

生態系影響を評価するエンドポイントとして地衣類を選択し評価を行った。地衣類は植物とは異なり、根のような栄養素や水を吸収する器官がなく、降水から直接栄養分を得ている。また、葉面を守るクチクラ層やガス交換のための気孔がないため、地衣体と呼ばれる本体が大気に直接暴露されている。そのため、大気汚染物質の影響により種組成や被覆率が変化することが知られており、様々な汚染物質の環境指標生物として多くの活用事例が報告されている。エストニアのオイルシェール発電所付近では、同発電所から排出されていると推定されるカルシウムを多く含む粒子状物質の沈着により、全く地衣類の生息が確認できない地衣砂漠とも言われるような地域が形成される等、大気汚染物質の沈着による地衣類の生態系に対する明らかな影響が顕在化している。

粒子状物質だけでなく窒素沈着でも地衣類は生態系内の種組成や被覆率が大きく変化することが報告されており、この変化量を活用した臨界負荷量の設定の議論も進んでいる。既報によると、地衣類を考慮した窒素の臨界負荷量は、5 kg N ha⁻¹ yr⁻¹ 未満 (例えば 2 - 4 kg N ha⁻¹ yr⁻¹) に設定するのが妥当であり、北極域にも適用は可能と考えられる。ツンドラのような樹冠による遮りがない状況においては、林外の湿性沈着として 1 - 3 kg N ha⁻¹ yr⁻¹ が目安となる。ただし、今回推定している LAC には定義上窒素は多く含まれていないため、LAC 沈着が直接窒素沈着量に大きく影響を及ぼす可能性が少ないと考えられる。

ブラックカーボンによる地衣類への直接的な影響を示す科学的な報告事例は少ないが、その光吸収特性から、「日陰効果」や「葉温上昇効果」等により、植物の光合成低下や

蒸散促進を引き起こす可能性が示唆されている。地衣類に適用すべきブラックカーボン沈着量の閾値としては、我が国の代表的な樹種において日陰効果により 10%程度の光合成阻害を引き起こす、葉面積当たり 3-40 mg C/m² の BC 付着量が一つの目安となる。今回の LAC 沈着量と地衣類の被覆率から考えると、同臨界負荷量に達する可能性は低い。なお、局所的な影響を更に精密に評価するためにも、地衣類を指標生物として BC を含めた大気汚染物質の沈着量に対する影響を引き続きモニターする必要があると考えられる。

3.4 船舶から排出される黒煙の人工排出源に対する寄与率の推定

今年度整備した衛星 AIS データに基づく北緯 66° 以北での船舶からのブラックカーボン排出量データと昨年度の事業で既に整備している陸域でのブラックカーボン排出量及び北緯 66° 以南の船舶からのブラックカーボン排出量データから、北極圏を対象にブラックカーボンの人為起源排出量に占める船舶由来分の寄与率を推定した。

地理的にみると、北緯 66° 以北の北極海で排出されるブラックカーボン全体の約 8 割はスカンジナビア半島やアイスランド付近の Non Arctic area で排出され、残りの 2 割が NSR やカナダ側航路等で排出されていることがわかった。この結果、森林火災起因を含む人工排出源からのブラックカーボン排出総量に占める寄与は、スカンジナビア半島やアイスランド付近の海域で Non Arctic area で 29%に達するのに対して、Arctic area では 2%に過ぎない。

3.5 排出実態にあった削減技術の抽出と規制の枠組みの検討

船舶から排出されるブラックカーボンの削減技術として、ディーゼル粒子フィルタ (DPF) もしくは湿式スクラバーなどの後処理装置を装着した場合と、主機関の使用燃料を C 重油から A 重油に転換することなどが考えられる。これらブラックカーボンの排出量削減技術について、その削減効果を文献調査より推定し、ブラックカーボンの削減に必要なコストを船舶寿命全体として計算する MAC (Marginal Abatement Cost) によって比較評価した結果、ディーゼル粒子フィルタ (DPF) と湿式スクラバーはいずれも燃料転換よりも MAC が低く、なかでもスクラバー水の排水処理を行わず、一度利用した海水をただちに排水するオープンループ方式を用いたスクラバーの MAC が最も小さく計算された。

船舶からのブラックカーボン排出量の削減対策の枠組みとしては、まず ICE クラスの船舶を対象にディーゼル粒子フィルタ (DPF) や湿式スクラバーの装着を中心とした対策を既存船、新造船ともに設定することが望ましいと考えられ、使用燃料の C 重油から A 重油への転換はブラックカーボン排出量の削減技術としてはコストパフォーマンスが悪い。

他方、ボランタリーな対策において人体健康影響リスクの低減を重視する場合には、硫酸塩及びその付随水の低減はブラックカーボン低減 MAC より小さく計算されることから、ECA-S の追加設定など既存の規制の枠組みを利用することも考えられる。

第Ⅱ編 調査の内容

主要用語説明

本報告書で使用した用語のうち、特に説明が必要と思われる主要な用語について以下に示す。その他の用語については、本文中の解説を参照されたい。

排ガスエコノマイザ	ディーゼルエンジンから発生する排気ガスの熱を回収して蒸気を造る装置。
Soot-Blow	排管内の煤を蒸気や空気などで飛ばして除去すること。
アンダーセンスタックサンプラ	煙道中の粒度分布を測定する機器で、インパクター方式を採用したエアロゾルの粒度分布測定ができる装置。
MCI (マルチノズル・カスケード・インパクト) サンプラ	米国連邦規格 (Federal Reference Method : FRM) を満たす PM _{2.5} と同等の分級性能を持つインパクター。
RORO 船	Roll-on Roll-off (ロールオン・ロールオフ) とは、自走でトレーラーを積み上げる荷役方式の船舶で、定期航路に就航する内航船が多い。
北極海 (Arctic Ocean)	ユーラシア大陸、グリーンランド、北アメリカ大陸等によって囲まれた北極点を含む大洋。ロシア、カナダ、アメリカ、デンマーク、ノルウェーの 5 か国の沿岸に接している。高緯度のため、通年氷に覆われているが、シベリア沖の北極海航路 (NSR : Northern Sea Route) は、近年の気候変動により北極海が温暖化したことで航行可能な期間が長くなり、商用利用に着目されつつある。なお、北極圏とは北緯 66° 33′ 以北の海域・地域をいう。
Arctic area	スカンジナビア半島やグリーンランド東岸、スバルバル諸島付近での船舶の活動実態を踏まえ、本事業では IMO の定義とは別に「西経 25°～東経 45°かつ北緯 66°～80°を除く、北緯 66°以北のエリア」を「Arctic area」と定義する (図 3.2-10 参照)。
Non Arctic area	本事業では、「西経 25°～東経 45°かつ北緯 66°～80°のエリア」を「Non Arctic area」とする(図 3.2-10 参照)。

主 要 略 語 集

本報告書で使用した略語のうち、特に説明が必要と思われる主要な略語について以下に示す。その他の略語については、本文中の解説を参照されたい。

AIS	Automatic Identification System。船舶自動識別装置。SOLAS 条約で、2002 年から全世界レベルで船舶に導入されたシステムであり、我が国も 500 総トン以上の国際航路の船舶及び 300 総トン以上の国際航路の客船に設置が義務付けられている。AIS では、船舶情報 (自船の識別符号・位置・針路・速度) を含む 22 種類のメッセージが用意され、これらを自動的に送信すると共に他の船舶が送信した情報を受信・解析する装置である。AIS 信号を低軌道周回衛星で受信する衛星 AIS によって陸上局では受信できなかった沖合の船舶の動静も把握することができる。
ARCTAS	Arctic Research of the Composition of the Troposphere from Aircraft and Satellites は、NASA (米国航空宇宙局) が 2008 年 4 月と 6~7 月にアラスカ及びカナダ西部において実施した航空機と衛星を用いた北極の対流圏組成調査である。
BC	Black Carbon。黒色の炭素。
BrC	Brown Carbon。茶色の炭素。
CAPEX	Capital Expenditure。対策技術の初期導入費用。
DPF	Diesel Particulate Filter (排気ガス脱塵装置)。ディーゼルエンジンの排気ガス中に含まれる粒子状物質を漉し取って軽減させるフィルタ。
EC	Elemental Carbon。元素炭素。
IMO	International Maritime Organization。国際海事機関。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を促進するための国連の専門機関。
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change。気候変動に関する政府間パネル。
LAC	Light Absorbing Carbons。光を吸収する特性のある炭素の総称。
MEPC	Marine Environment Protection Committee。海洋環境保護委員会。IMO を構成

する委員会の一つで、海洋環境を対象としている。

MMSI	Maritime Mobile Service Identity (海上移動業務識別コード) は、DSC (Digital Selective Calling : デジタル選択呼出し) 通信装置を搭載した船舶・地上局に認識番号として交付される番号。9桁の数字から構成され、最初の3桁は国籍を示す。
NCAR	National Center for Atmospheric Research。米国大気研究センター。
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration。米国海洋大気局。
NOx	Nitrogen Oxides。窒素酸化物。
OC	Organic Carbon。有機性炭素。
OM	Organic Material。有機物。
OPEX	Operating expense。対策技術の運用費用。
PM	Particulate Matter。粒子状物質。
PPR	IMO 汚染防止・対応小委員会。Sub-Committee on Pollution Prevention and Response。
SO ₂	Sulfur Dioxide。二酸化硫黄。
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change。気候変動に関する国際連合枠組条約。
US-EPA	US Environmental Protection Agency。米国の環境保護庁。
WHO	World Health Organization。世界保健機関。
WRF	Weather Research and Forecasting model。WRF モデルは、実用的な天気予報とそれに関連する研究のために開発された、次世代の3次元メソスケール気候予測数値モデルであり、最先端気象モデルの一つに位置づけられている。その開発には米国大気研究センター (NCAR) /米国環境予測センター (NCEP) /米国海洋大気庁予報システム研究所 (NOAA/FSL) が携わっており、現在も定

期的にバージョンアップが行われている。多数の力学に関するコード、3次元変動データ同化システム (3DVAR)、並列計算用のソフトウェア構造など。WRF は、数キロメートルから数千キロメートルといった幅の広い領域にも対応できるモデルである。

WRF-Chem

Weather Research and Forecasting-Chemistry。大気反応シミュレーションモデルのうち、NCAR 及び NOAA が開発した第3世代化学物質輸送モデルのひとつである。このモデルは、気象モデル (WRF) と直接的に結合しているオンライン型モデルであり、そのため、大気化学種の気象・気候へのフィードバックをシミュレートすることが可能なモデルであって、気候変動の分野においてもその発展性が期待されている。

1 北極海航路における船舶からのブラックカーボン排出の影響の考え方

化石燃料やバイオマスの不完全燃焼によって大気中に排出されるブラックカーボンは、太陽光を効率良く吸収する性質を持ち、大気中に滞留している際、大気を加熱することで温暖化に影響すると言われている。また雪氷面に沈着した際には、周囲の雪氷を加熱することにより、雪氷の融解を促進する。この雪氷融解効果は、太陽光の雪氷による反射効果を著しく減少させるため、温暖化の促進につながる重要な影響と認識されている。今後、北極圏の氷床融解がもたらす北極圏航路の開設は更なるブラックカーボンの排出増加につながり、その沈着によって雪氷の被覆率が高い北極圏においては局所的に急激な温暖化が引き起こされる可能性が示唆される。

本事業では昨年度に引き続き、船舶からのブラックカーボン排出実態を解明するための観測を行うとともに、北極海における船舶の活動量及び排出量の算定、並びにそれに基づく環境影響評価のためのシミュレーションを実施することにより、船舶から排出されるブラックカーボンが環境や人体健康、生態系に及ぼす影響を評価するとともに削減技術の評価、対策が必要とされる場合の枠組みについて検討したものである。

ブラックカーボンについては国際的な枠組みにおいても十分な共通認識ができているものではなく、PM との混同も多くみられるが、光を強く吸収する物質として認識されており、粒子状物質として生態系や人体健康影響との関連性も指摘されている。本事業においては、粒子性物質に含まれる成分のうち、EC、OM (Organic Material) 、Ash の合計値を LAC とみなして排出インベントリ及び輸送シミュレーションモデルの整備を行うものとした。

1.1 船舶から排出されるブラックカーボンの定義

ブラックカーボンは、大気中に排出される粒子状物質の一部であると理解されている。他方、大気中に排出される粒子状物質については、以下に示すように、多くの専門用語が用いられている。他方、ブラックカーボンについては定義が十分に確定していない。

本事業におけるブラックカーボンの定義について以下に整理する。

表 1.1-1 粒子状物質に関連して用いられる主な専門用語

用語	定義
PM _{2.5}	粒径 2.5 μm 以下の粒子状物質全てを指す。大気環境中濃度の定義として用いられることが多い。下記の PM など一次粒子以外に大気中の化学反応や凝縮によって生成する二次粒子を含む。
PM ₁₀	粒径 10 μm 以下の粒子状物質全てを指す。大気環境中濃度の定義として用いられることが多い。PM _{2.5} 以外に、土壌粒子や海塩粒子など自然起源の粒子も含む。
PM	内燃機関から排出される粒子状物質の定義の一つ。希釈法によって排ガス温度を 50℃程度にまで冷却後に採取された粒子状物質の総質量。下記の Soot 以外に排ガス温度低下によって生じる硫酸塩とその付随水が含まれる。また、Soot においてはフィルタで捕集されない EC のナノ粒子及び高沸点の OM についても冷却中に凝集によって粒径が成長し捕集されると考えられている。粒径については測定法上規定はないが、自動車の PM は全て PM _{2.5} として扱われることが多い。
ダスト	内燃機関から排出される粒子状物質の定義の一つ。希釈を行わず排ガス温度が高いままで捕集を行う。さらに乾燥行程によって付着水分は秤量されない。硫酸塩とその付随水などは捕集されない。粒径については測定法上規定がない。スート (Soot) と呼ばれることもある。
EC	PM あるいはダストに含まれる粒子を化学的組成で区分したもの。主に純粋な炭素粒子で構成される。狭義のブラックカーボンを意味する単語として使用される場合もある。
OM	PM あるいはダストに含まれる粒子を化学的組成で区分したもの。主に燃料や潤滑油の不完全燃焼によって生じた有機化合物で構成される。

表 1.1-2 に示すとおり、ブラックカーボンの定義については、国際的な議論の場あるいは科学的にも十分な共通認識ができていたとはいえない。例えば IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change: 気候変動に関する政府間パネル) による第 4 次評価報告書¹(AR4)では、ブラックカーボンは「不完全燃焼過程で大気中に直接放出される 1 次エアロゾルであり、太陽放射を強く吸収する。親水性と疎水性があり、様々な成分 (硫酸塩や OC) と混合体をつくる (外部混合、内部混合)」と説明されている。その一方で、IPCC による第 5 次評価報告書においては、「分析手法上、エアロゾルの一種であり、光学的吸収特性、化学反応性及び熱的安定性によって定義される。時には Soot と同義である」となっており、AR4 の定義が環境中の挙動に重点を置いているのに対して測定法上の定義に変更されている。

CLRTAP (Convention on Long-range Transboundary Air Pollution: Convention on Long-range Transboundary Air Pollution) のグーテンバーグ議定書の改正案²では、ブラックカーボンについて「光を吸収する炭素性の Particulate matter (PM) を意味する」と説明されており、さらに PM については「大気中の浮遊粒子から成る汚染物質であり、様々な物理特性 (サイズや形状) や化学組成を持つ。ここでは、特に記述がない限り、PM は空気動力学径が 10 μm 以下のもの (PM₁₀) を指す。その中には、2.5 μm 以下のもの (PM_{2.5}) も含まれる」と説明されている。

上記議定書の改正作業に先んじて、CLRTAP の諮問に対して”Ad Hoc Expert Group on Black Carbon” が提出したレポート³では、ブラックカーボンは「燃料の不完全燃焼で生じる炭素質の 1 次エアロゾルであり、光を強く吸収する。様々な汚染物質と混合体をつくる。また、Elemental carbon と同義である」と説明されている。

このように、ブラックカーボンの定義については、陸上の排出源を対象にした場合であっても十分な共通認識ができていたとはいえず、硫酸塩とその付随水を含む PM との混同も多く見られる。何れにおいても、ブラックカーボンは光を強く吸収する物質としている点は、どの国際的な枠組みにおいても重視している。

後述するように、IMO における議論では BC の定義として LAC (Light Absorbing carbons) と eBC の二つに集約されている。そこで、本事業では、粒子状物質に含まれる成分のうち、EC+OM (Organic material) + Ash の合計値を LAC とみなして排出インベントリ及び輸送シミュレーションモデルの整備を行うこととした。詳細は 1.2 を参照されたい。なお、LAC に含まれるブラウンカーボン (BrC) である OM と Ash については、EC と同様の光学的設定を行うことは少ないが、本計算においては、これらの LAC として定義される EC 以外の全ての成分についても、自動車から排出された EC と同様の光学的特性、すなわちほぼ黒色としてシミュレーション上は扱うこととした。これは、BC の影響としては大きめの評価すなわち安全側の評価となる。

灰分の一部として検出される重金属類については、生態系への直接的影響が考えられるが、そのリスク評価は定性的に行うものとする。

¹ IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007
(http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/syr/en/contents.html)

² The 1999 Gothenburg Protocol to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone
(http://www.unece.org/env/lrtap/multi_h1.html)

³ Report of the Expert Group on Black Carbon (ECE/EB.AIR/2010/7:
<http://www.unece.org/fileadmin/DAM/env/lrtap/ExecutiveBody/welcome.28.html>)

表 1.1-2 国際的な枠組みでのブラックカーボンに対する考え方

国際的な枠組み	ブラックカーボンに関する記述
IPCC Fourth Assessment Report	不完全燃焼過程で大気中に直接放出される 1 次エアロゾルであり、太陽放射を強く吸収する。親水性と疎水性があり、様々な成分 (硫酸塩や OC) と混合体をつくる (外部・内部混合)
IPCC Fifth Assessment Report	分析手法上、エアロゾルの一種であり、光学的吸収特性、化学反応性及び熱的安定性によって定義される。時には Soot と同義である。
The 1999 Gothenburg Protocol to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone	光を吸収する炭素性の Particulate matter (PM)。PM は、大気中の浮遊粒子から成る汚染物質であり、様々な物理特性 (サイズや形状) や化学組成を持つ。ここでは、特に記述がない限りは空気動力学径が 10 μm 以下のもの (PM ₁₀) を指す。その中には、2.5 μm 以下のもの (PM _{2.5}) も含まれる
Report of the Expert Group on Black Carbon	燃料の不完全燃焼で生じる炭素質の 1 次エアロゾルであり、光を強く吸収する。様々な汚染物質と混合体をつくる。また、Elemental carbon と同義。

1.2 北極海航路を対象としたブラックカーボンの影響に係る国際的議論の状況

1.2.1 IMOにおけるブラックカーボンに対する規制の議論

2011年7月に開催された国際海事機関 (IMO; International Maritime Organization) 第62回海洋環境保護委員会 (MEPC62; 62nd session of Marine Environment Protection Committee) では、国際海運から排出されるブラックカーボンが北極圏に及ぼす影響について調査を行い、規制の必要性について検討すべきことが合意された。その合意により、MEPCは、ばら積み液体・気体小委員会 (BLG; Sub-Committee on Bulk Liquids and Gases) に対して、ブラックカーボンの定義、計測方法及び制御方法等について技術的検討を実施し、MEPC65 (2013年) においてその結果を報告するよう指示している。

これを受け、2012年に開催されたBLG16及び2013年に開催されたBLG17では、ブラックカーボンの定義・測定方法・削減方法についてコレスポンデンスグループ (通信部会) からの報告を基に議論が行われたものの、結論に至らず作業は2014年のPPR1 (第1回汚染防止・対応小委員会: Sub-Committee on Pollution Prevention and Response) まで延長された。例えば、BLG17では、ブラックカーボンの政策的定義として「国際海運からのBCとは、炭化水素燃料の不完全燃焼により形成され、集塊して最も効果的に太陽エネルギーを吸収するPM構成物質」であるといった政治的な定義 (political definition) に概ね支持は得られた。他方、技術的定義については、測定方法としてFSN法 (Filter Smoke Number) や希釈法などが提案されたものの、ブラックカーボンと定義すべく共通の測定法を採択するには至らなかった。

さらに、2014年2月に開催されたPPR1においては、表1.2-1に示すように、コレスポンデンスグループでまとめられたEC、eBC、rBCに併せてNorway提案のLACの4つの定義を一つの定義に最終化することを目標としてWGにおいて議論が行われたが、技術的な観点から定義されたeBC (defined as equivalent Black Carbon (eBC) derived from optical absorption methods, that utilizes a suitable mass-specific absorption coefficient) と、気候変動の影響の観点から定義されたLAC (defined as light absorbing carbonaceous compounds (LAC), resulting from the incomplete combustion of fuel oil.) の二つの定義に集約化されたのみであった。議論の中では、LACについてはFSN法が測定法上適したものとされているなど、技術的にみても引き続き混乱が見られる。国際海運からのブラックカーボン排出に係る技術的定義の策定には多くの作業が残されていることが明らかである。

今後、MEPC 67あるいはPPR2において議論が継続されるが、対策の必要性を検討するためには、気候変動の影響の観点から定義されたLACに基づく整理が必要となるのに対して、対策の枠組みや将来の規制値の検討のためには技術的な観点から定義されたeBCが必要となる。少なくとも今後の対策の必要性の総合的な議論には、単なる択一化をはかるのではなく、両者の定量的な相関関係を実測に基づき整理するなど、両者を総合的に検討することが必要になると考える。

本事業においては、環境影響の観点を重視することから、後者の定義であるLACをBCとして採用するものとする。

表 1.2-1 PPR1 で議論された BC の定義

名称	定義	測定方法	中間合意
EC as elemental carbon	a method was selected that is specific to the carbon content of carbonaceous matter, about selecting a definition of Black Carbon	TOA	
eBC as equivalent Black Carbon	defined as equivalent Black Carbon (eBC) derived from optical absorption methods, that utilizes a suitable mass-specific absorption coefficient	FSN MAAP PAS LII	○
rBC	a method was selected that provides measurements derived from incandescence methods that mainly address the thermal stability (retaining physical shape and chemical identity under high temperatures) of the carbonaceous matter and require light-absorbing efficiency, i.e. some "blackness" of the analyzed particulate matter,	LII	
LAC	defined as light absorbing carbonaceous compounds (LAC) , resulting from the incomplete combustion of fuel oil	FSN	○

TOA Thermal-Optical Analysis (Reflectance or Transmittance)
 FSN Filter Smoke Number
 LI Laser Incandescence
 MAAP Multi-Angle Absorption Photometry,

1.2.2 ブラックカーボンによる気候変動に対する評価

IMO においては、船舶からのブラックカーボン排出に対する規制の必要性について最終的な結論は出ていないが、その根拠はどのように説明されるのであろうか？

ブラックカーボンの規制の必要性に対する当初提案国のノルウェーは、IMO においてその必要性を主張する際、下記の事項を強調している (MEPC 60/4/24 及び MEPC62/4/3 より引用)。

- 1) 北極圏の平均気温は過去 100 年間で世界平均の上昇率 (0.7 °C/100 年) の 2 倍以上の速さで上昇した。
- 2) 春季における北極点での氷床の融解は 20 世紀半ばに比べて 7 日間も早まっている。
- 3) 北極海の氷床は年々減少傾向にあり、1979 年以降、その減少率は 11.7%/10 年となっている。さらには、2007 年以降、その減少率は急激に高まっている。
- 4) グリーンランドにおける氷河流出が加速的に早まっており、これにより海面上昇が危惧される。
- 5) 北極圏における気温上昇は永久凍土の融解を引き起こすことにつながり、これにより、永久凍土中に大量に蓄積されているメタンが放出されることで温暖化を更に加速させることになる。

また、現状において、全球に占めるブラックカーボンの2%は船舶から排出されており、その排出量の85%が北半球に集中していることを報告している (Green, E., Winebrake, J. and Corbett, J. (2007)⁴)。今後、北極圏の氷床融解がもたらす北極圏航路の開設は更なるブラックカーボンの排出増加につながるとしており、それによる北極圏の気温上昇の加速化や粒子状物質による健康影響の増加を指摘している。

なお、全球規模では、前述のとおりブラックカーボンの排出は陸域由来が大部分であり、陸上発生源からのブラックカーボンの排出規制は、その削減目的が地球温暖化にある場合、国連気候変動枠組条約 (UNFCCC: United Nations Framework Convention on Climate Change) において議論されるべき内容となる。実際に、UNFCCC に対して科学的助言を行う「気候変動に関する政府間パネル (IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change)」においてはブラックカーボンの地球温暖化などに対する評価レポートが作成されており、UNFCCC においても京都議定書に定められた6ガスに加えて、ブラックカーボンなどを規制対象として考慮するかの科学的検討は行われている。なお、最新のAR5においては、全球における人工排出源からのブラックカーボンによる放射強制力は $+0.4 (+0.05 \text{ to } +0.8) \text{ W m}^{-2}$ 、他方バイオマス燃焼による放射強制力は $+0.0 (-0.2 \text{ to } +0.2) \text{ W m}^{-2}$ と評価されている。人口排出源からのブラックカーボンの総量は $4.8 \pm 1.2 \text{ Tg} \cdot \text{yr}^{-1}$ のうち国際航行船舶は $0.1 \pm 0.1 \text{ Tg} \cdot \text{yr}^{-1}$ と評価されており、排出寄与割合は0.3%とされている。

他方、北極圏や南極圏における雪氷表面へのBCの沈着による反射率の変化については、IPCCのAR5においては、AR4以降に実測やモデリングが行われ、その評価は全球の放射強制力として $+0.01 \text{ to } +0.08 \text{ W m}^{-2}$ (幅は異なったBCインベントリによるものと説明されている)と報告している。

しかしながら、現状においては、全球レベルにおいて人工排出源から排出されるブラックカーボンを地球温暖化6ガスに追加するかについての正式な議論は開始されていない状況である。これは、ブラックカーボンの全球に対する放射強制力の寄与が、他のCO₂を太宗とする6ガスに比較して小さく、CO₂削減をブラックカーボンの削減に優先していること以外に、これまで述べてきたようにブラックカーボンの定義が人工排出源の間で統一できないため、各国内の総排出量を算定しにくいこと、またそれに基づく排出枠を設定しにくいためと考えられる。

⁴Green, E.H., Skerlos, S.J., and Winebrake, J.J., "Increasing electric vehicle policy efficiency and effectiveness by reducing mainstream market bias," Energy Policy, Volume 65, 2014, pp.562-566.

1.3 北極海航路における船舶からのブラックカーボンの環境影響評価項目

ここでは(i) 北極圏における総人工排出源に対する船舶からの排出量の影響、(ii) 北極圏に対する局地的な気候変動への影響、(iii) 北極圏で懸念されるブラックカーボンの生態系影響、(iv) 北極圏で懸念されるブラックカーボンの人体健康影響、といった4つの視点より、北極海航路においてブラックカーボンの環境影響を考察し、本事業において評価対象とすべき項目を整理する。

1.3.1 北極圏における総人工排出源に対する船舶からの排出量の影響

ここで、北極圏における主な人工排出源について整理したい。ブラックカーボンの排出由来として石油などの燃料燃焼だけでなく、森林火災などによって大気中に排出されるブラックカーボンの影響が大きいことが IPCC の AR4 などで指摘されている。また、北極圏においては高緯度になるに従い、陸地/海域面積比が小さくなると共に、陸上における人間の活動量密度も小さくなるため、船舶からの排出寄与が必然的に低緯度地域よりも大きくなる。これは、船舶と陸上排出源からの排出量寄与を算定・解析する場合に必ず考慮すべき事項であり、対象地域と対象海域の取り方でその比率は大きく影響されてしまう。また、CO₂ のように長寿命の地球温暖化物質と異なり、ブラックカーボンのように局地的な影響を及ぼす物質については、同じ排出量当たりの影響度合(1.3.2 以降に述べるエンドポイントに対して同じ排出質量当たりの影響度合い)が、海上発生源と陸上発生源とで異なる可能性がある。

その一方で、対策の必要性、特に対策を施すべき排出源の優先順位を検討する際には、一つの判断指標として考慮すべきと考え、森林火災起因を含む陸上発生源からの排出と、北極圏を航行する船舶からの排出について、幾つかの地理的区分で整理を行うこととした。

1.3.2 北極圏に対する局地的な気候変動への影響

始めに CO₂ 等地球温暖化物質による全球に及ぶ地球温暖化と局地的な気候変動の違いについて整理する。

地球温暖化とは、地球表面の大気や海洋の平均気温が長期的に上昇する現象であり、北極圏における氷床・氷河の融解をもたらす。地球温暖化の要因としては、人為的な温室効果ガスの放出、なかでも二酸化炭素やメタンの影響が大きいとされている。

地球温暖化の要因には、温室効果ガスに加えて SLCPs (Short-Lived Climate pollutant) としてのブラックカーボンの影響も指摘されている。

一般的に、大気汚染物質の対流圏内での寿命は数か月以内、温室効果ガスの同寿命は数年以上であるため、相対的に大気汚染物質は温室効果ガスに比較して「短寿命」といえる。大気汚染物質でも、例えばブラックカーボンや対流圏オゾンは、それぞれ可視光や赤外線に対する吸収能を持っている。このような極地気象変化や地球温暖化を促進する

大気汚染物質は「短寿命気候汚染物質 (SLCPs)」と呼ばれ、京都議定書において削減対象となっている長寿命温室効果ガス (LLGHG: Long-Lived Green House Gas) に対応する名称となっている。これまで、大気汚染と気候変動は研究の分野でも、規制の枠組みなど政策の分野においても別々に扱われてきた傾向にあるが、この SLCPs の削減は大気汚染だけでなく気候変動の抑制にも同時寄与するという視点を加えていることになる。

ただし、上述のとおり、ノルウェーは全球規模の総排出量に占める船舶起源の割合は 2% 程度であると主張していることから、船舶から排出されるブラックカーボンが全球規模の温暖化に大きく関与しているとは考えにくい。そのため、地球温暖化に対する船舶起源のブラックカーボンの影響は本事業では扱わない。

これに対し、北緯 66° 以北 (バルト海を含まない範囲) に限定すれば、船舶起源の割合は数 10% にまで上昇する可能性があり、局所的に気候変動を加速している可能性は否定できない。つまり、北極圏及びその周辺海域では、(i) 船舶から排出されるブラックカーボンが全体の人工排出源からの排出に占める割合が相対的に高くなり、(ii) それによって局所的な放射強制力の変化がもたらされている可能性があり、また、(iii) ブラックカーボンの沈着によって雪氷面が黒色化し、それによって雪氷面の反射率が低下していることも示唆される。

以上より、本事業では北極圏を対象とした排出インベントリを整備し、北緯 66° 以北の人工排出源からのブラックカーボン総排出量に占める同海域を航行する船舶からの排出寄与をまず評価する (6.1 章)。

さらに、気温上昇に代表される北極海の局地的気候変動に対する船舶起源のブラックカーボンの関与を放射強制力の変化から解析・評価した (6.2 章)。

1.3.3 生態系影響の整理

ブラックカーボンによる生態系影響は、ブラックカーボンの沈着に起因する「直接的影響」と、ブラックカーボンがもたらす気候変化に起因する「間接的影響」の2つに区分される。

船舶のディーゼル機関から排出されるブラックカーボンには、植生にブラックカーボンが付着することによって光合成が阻害されることより、気温が低い北極圏において植生の生長に相対的に大きな悪影響を与えることが懸念される。また、微量ながら発がん性や変異原性を示す多環芳香族炭化水素 (Polycyclic aromatic hydrocarbons; PAHs) が含まれる。また、安藤ら (2011)⁵の測定結果にも示されるように金属成分も含まれる。

他方、間接的影響の要因となる気候変化は、北極海航路において排出されるブラックカーボンだけによって引き起こされるものではなく、そのブラックカーボンの寄与のみを取り出して評価を行うことは事実上困難である。また、気候変動は北極圏以外における生態系に対しても大きな影響を与えており、かつ IPCC の第4次評価報告書においても、北極圏の生態系が他の生態系に比較して極端に脆弱であるとの認識は示されていない。

以上より、本事業の目的が北極海航路に限定したブラックカーボンの環境影響を調査することであるため、「間接的影響」は解析項目として扱わないこととし、「直接的影響」をもって生態系影響を解析する。解析内容及び結果は本報告書の6.3章を参照されたい。

⁵安藤ら「船用ディーゼルエンジンの排ガス中に含まれる有害物質に関する分析」、海上技術安全研究所報告, 11(2), 2011.

1.3.4 人体健康影響の整理

ブラックカーボンは気候変動と大気汚染の同時抑制、いわゆる Co-benefit の観点でも着目されている。2011年3月に米国 EPA が公表した「Report to Congress on Black Carbon⁶」、並びに長距離越境大気汚染条約グーテンバーグ議定書の改定⁷においても、ブラックカーボンや有機炭素を含む粒子状物質の成分全てが健康への悪影響の原因であるとの議論がなされている。

上述のとおり、ブラックカーボンの排出規制は気候変動と大気汚染の同時抑制 (Co-benefit) に資することに疑いはない。しかしながら、ブラックカーボンによる人体健康影響を他の粒子成分による影響から区別して評価することは困難であり、通常は PM_{2.5} のような粒子状物質を対象として人体健康影響の評価を行う。IMO においても、下記に示すとおり、ブラックカーボンを含めた粒子状成分 (PM) 全体の削減が人体健康影響に寄与するものと認識されている (BLG 15/INF. 8 Page2) ;

Controlling emissions of BC will result in health benefits and climate benefits, especially in sensitive regions such as the Arctic. There is a general consensus that mitigation of BC will lead to positive regional impacts by reducing BC deposition in snow- and ice-covered regions, and that reducing primary PM (including BC) will benefit public health;

ブラックカーボンのみを船舶排ガス中から削減することは技術的に困難であるため、ブラックカーボンの排出規制は事実上、粒子状物質に対する排出規制と等しくなる。粒子状物質 (PM: Particulate Matter) の排出規制は、海洋汚染防止条約 (MARPOL 73/78 条約) 付属書 VI の 2010 年 7 月に発効した改正において既に扱われている。同付属書では PM の人体健康影響も評価項目として扱っているが、同じ PM 曝露量に対する人体健康影響リスクが、北極圏では際立って脆弱であるという科学的根拠は確認されていないため、北極圏における PM の人体健康影響評価も同付属書の枠組みで行うべきものとする。

以上より、本事業の目的が北極海航路に限定したブラックカーボンの環境影響を調査することであるため、人体健康影響評価は定量的な解析項目として扱わないこととする。定性的な解析結果については、6.4 章を参照されたい。

⁶ U.S EPA (2011) , Report to Congress on Black Carbon,
<http://www.epa.gov/blackcarbon/2012report/fullreport.pdf>

⁷ Economic Commission for Europe (2012) , Options for revising the 1999 Gothenburg Protocol to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone, ECE/EB.AIR/2012/1

2 船舶から排出されるダストの排出実態の解明

昨年度事業に引き続き、本年度も主に外航商船で一般的に使用される C 重油焚き 2 ストロークディーゼル機関（定格出力 1 万 kW 以上）について、通常航行時及び Soot-Blow 実施時に排ガス中に含まれるダストを採取、これを分析して船舶から排出されるダストの排出実態を把握した。

本年度は B 社製 1.9 万 kW エンジン ϕ 70 (3 万総トン級外航コンテナ船) と C 社製 1.3 万 kW エンジン ϕ 50 (1 万総トン級内航 RORO 船) を対象に実施し、昨年度実施の A 社製 4.9 万 kW エンジン ϕ 96 (5 万総トン級外航コンテナ船) での実船計測結果と合わせて 3 隻のデータを整理した。

排ガス中のダスト採取にあたって、本年度事業では、バックアップフィルタを備えた MCI (マルチノズルカスケードインパクター) を用いて粒径約 0.3 μm 以下のダストについても捕捉するようにした。

ダスト採取及び解析の結果、

- (1) A 社製 4.9 万 kW エンジン ϕ 96 と B 社製 1.9 万 kW エンジン ϕ 70 は動粘度 445~515 cSt、C 社製 1.3 万 kW エンジン ϕ 50 は動粘度 158 cSt の C 重油が使用されていた。
- (2) 今年度実施の B 社製 1.9 万 kW エンジン ϕ 70 と C 社製 1.3 万 kW エンジン ϕ 50 について通常航行中の排ガスに含まれるダストを MCI サンプラにより分粒・採取して分析した結果、いずれも粒径が最も小さい 2.5 μm カット以下における捕集割合が高く、重量ベースでは全体の 94~95% を占めた。一方、昨年度実施の A 社製 4.9 万 kW エンジン ϕ 96 では 2.5 μm 以下の重量割合は約 36%であったが、バックアップフィルタを使用していないことを考慮すると今年度実施の MCI サンプラを使用した計測結果と大きな乖離はないと考える。
- (3) 通常航行時における EC/OC 比について、今年度実施の B 社製 1.9 万 kW エンジン ϕ 70 及び C 社製 1.3 万 kW エンジン ϕ 50 においては、いずれも OC の割合が高くなった。希釈によって排ガス温度を下げないダスト採取方法による分析にもかかわらず、OM の比率が大きいことは、自動車ディーゼル粒子との大きな差違といえる。このことは、フィルタ上に採取された粒子の色が完全な黒色でないことから裏付けられる。第 1 章で定義した LAC に OM などを含めることには妥当性がある。
- (4) 以上の結果から、船舶ダストについては、粒径 2.5 μm 以下の粒子として空気力学上取り扱うことで構わないと考え、また、第 5 章で行うシミュレーション内の設定では、安全側の評価として自動車ディーゼル粒子と同様の光学的特性を持つものと仮定した。

2.1 ダスト計測の目的

NO_x 及び SO_x・PM の規制が盛り込まれた、2010 年 7 月に発行した海洋汚染防止条約 (MARPOL 73/78) 付属書VIの改正の検討段階において、2006 年 4 月に開催された IMO 第 10 回ばら積み液体・気体小委員会 (BLG; Sub-Committee on Bulk Liquids and Gases) では Correspondence Group A が設置され、船舶ディーゼルエンジンからの PM 排出量を、粒径分布・組成・削減方法を加味しつつ調査することが TOR (付託事項) の 1 つとされた (BLG10/WP.3)。

PM 粒径分布については、2006 年 10 月に開催された BLG-WGWP (BLG Working Group on Air Pollution) において、Lyrranen et al. (1999) を引用し「both the existing evidence and the physics of combustion suggest that marine diesels produce particulates that are primarily in the fine (2.5 µm or less) range」と言及しているが、IMO としての詳細な解析はなされていないといえる (BLG-WGWP 1/2/11)。この背景には、当時 PM の太宗を占めるのは SO₂ 経由の硫酸塩であるとの基本認識があり、この凝縮性ダストあるいは二次粒子は PM_{2.5} であるという暗黙の認識があったこと、このためいわゆる一次粒子である DP の粒径分布については動粘度など燃料特性により大きく影響されるため、工場出荷時の粒径分布情報は、大気環境中へ放出される分布と一致しない可能性があることから、基本情報としてピックアップされなかったことによる。

このような現状より、本事業では粒径分布を定量・設定することを目的とし、外航コンテナ船と内航 RORO 船を対象とした排ガス中のダストを実測した。実測は、通常航行時及び Soot-Blow 時の 2 種類のオペレーション時における排ガスを対象として実施した。なお、本章においては、JIS Z8808 に基づく測定によって捕集された粒子状物質を扱っており、PM ではなく定義上ダストであることに留意されたい。また、1 章においては、PM に含まれる有機炭素を OM として取り扱ったが、本章内では IMPROVE 法における定義に基づき OC と標記する。ディーゼル機関からの排出ガスにおいては、ほぼ同一と考えられる。

これに対して、自動車排ガス中の PM 測定には排気ガスを空気で 50℃程度以下まで冷却することで粒径の成長を促し、一部の凝縮性ダストも捕集できる希釈法の適用が望ましいとされている。しかしながら、オンボードでの実際の航行では動圧の変動が大きく、かつ高硫黄含有燃料の使用条件下ではその適用が難しいことから、精度良く測定することは難しい。そのため、排出係数は本事業内における実測の結果に基づく結果を用いず、2.8 で紹介する既存の文献値から設定する。他方、ダストの粒径分布は実測の結果より把握し、これを PM に適用する。

2.2 ダスト計測の概要

図 2.2-1 に、実施した実測の概略図を示す。同図に示すとおり、本測定では 3 つの測定を以下に示す目的のもと実施した。

測定系 1：使用燃料の一般性状の測定

測定系 2：通常航行時の排ガス中に含まれるダストの捕集

測定系 3：Soot-Blow 時に排出される洗浄空気に含まれるダストの捕集

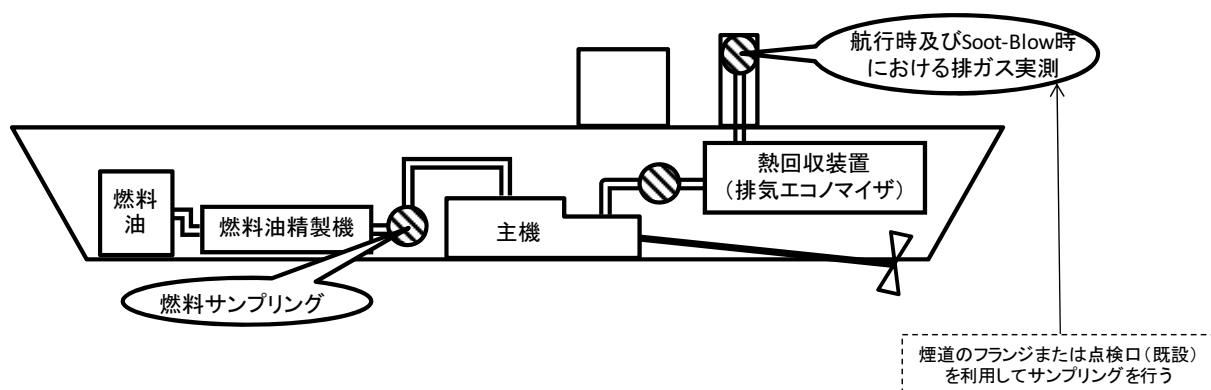


図 2.2-1 実施した実測の概略図

Soot-Blow とは、排管内の煤を蒸気や空気などで飛ばして除去することであり、船舶の場合、排ガスエコノマイザ (ディーゼルエンジンから発生する排気ガスの熱を利用して蒸気を造る装置) による蒸気を利用して Soot-Blow を行う。そのため、Soot-Blow 時を対象とした計測は排ガスエコノマイザの下流において行った。

通常航行時を対象とした計測は、排ガスエコノマイザの上流と下流で行った。平成 24 年度は、排ガスエコノマイザの下流では排ガス温度が低く、粒子状物質に粘性が生じていると想定され、排ガスの吸引ノズルに詰まりが生じるおそれがあると考えたため排ガスエコノマイザ上流で実施したが、実際にはその影響は低いことが分かったことから、平成 25 年度は排ガスエコノマイザ下流で実施した。

2.3 計測対象船舶

計測対象船舶は、①機関定格出力1万kW以上、②C重油焚き、③2ストロークの条件を満たす船舶とし、これら条件を全て満たす測定候補船を選定した結果、表2.3-1に示す3船舶を対象に実施した。

A社製4.9万kWエンジンφ96及びB社製1.9万kWエンジンφ70は動粘度445～515cSt、C社製1.3万kWエンジンφ50は動粘度158cStのC重油を使用している。

なお、A社製4.9万kWエンジンφ96は、平成24年度の事業で実施したものであり、排ガス中のダスト分粒にはアンダーセンスタックサンプラを使用した。B社製1.9万kWエンジンφ70及びC社製1.3万kWエンジンφ50は平成25年度の事業で実施し、排ガス中のダスト分粒にはバックアップフィルタを備えたMCIサンプラを使用した。

表 2.3-1 排ガス測定対象船舶と使用燃料及び計測項目

対象船舶	5万総トン級 外航コンテナ船	3万総トン級 外航コンテナ船	1万総トン級 内航RORO船
機関出力	49,410 kW	18,504 kW	13,280 kW
主機関	SULZER 9RTA 96C	MAN-B&W 7S70MC-C	MAN-B&W 8S50MC-C
ボア径	96 cm	70 cm	50 cm
航海速力	24 kns	23 kns	21.5 kns
総トン	53,822 GT	27,051 GT	10,185 GT
載貨重量トン	63,096 DWT	34,558 DWT	6,890 DWT
計測時の実負荷率	55%	65%	70%
使用サンプラ	アンダーセン スタックサンプラ	MCI サンプラ	MCI サンプラ
使用燃料	C重油	C重油	C重油
密度[g/cm ³]	0.9953	1.0088	0.9792
動粘度[cSt]	445.1	513.9	158.0
水分[% (mm)]	0.20	0.14	0.04
灰分[% (mm)]		0.041	0.08
硫黄分[% (mm)]	2.85	3.27	2.34
アスファルテン[% (mm)]		11.23	4.25
元素分析 炭素分[% (mm)]		86.1	86.9
元素分析 水素分[% (mm)]		8.0	13.1
計測項目			
通常時	○	○	○
Soot-Blow時	○	×	○

2.4 ダスト分析方法

2.4.1 粒径別ダスト重量・濃度把握のための分粒方法

平成 24 年度は 8 段式のアンダーセンスタックサンプラ（バックアップフィルタなし）、平成 25 年度は 3 段式の MCI インパクター（バックアップフィルタあり）によって、排ガス中に含まれるダストを粒径別に採取した。

なお、排ガス吸引速度及び吸引ノズル径は事前にエンジン諸元等から計算した。

2.4.2 排ガス中ダストに含まれる無機炭素/有機炭素比(EC/OC 比)の分析方法

採取したサンプルについては、サーマルオプテカル・リフレクタンス法に基づき炭素成分濃度を分析した。

サーマルオプテカル・リフレクタンス法は、米国で IMPROVE (Interagency Monitoring of Protected Visual Environments) や STN (Speciation Trend Network) などの、環境大気試料の炭素成分分析に広く適用されている熱分離熱分解補正法のひとつである。

《測定原理》

一般に熱分離法では、炭素成分を異なる温度と酸化雰囲気中で粒子状物質試料から遊離させることによって OC と EC を分別して測定する。これは He 雰囲気中に置かれた試料からの有機物を低温度で揮発分離でき、EC は同時に酸化も分解もされないという仮定に基づいている。実際には加熱分離の過程で有機物が熱分解酸化されるので、測定中の熱分解量を補正する必要がある。ここで示す方法では、OC と EC を異なる温度と分析雰囲気（表 1.2-1）で選択的に酸化して、それぞれの反応量を定量化するとともに、レーザー光の反射率あるいは透過率の変化をモニターすることによって熱分解量を補正する。

熱分解の挙動を補正するために、分析器の光学部分（He-Ne レーザーと光検出器）では、レーザー光を試料に照射し、試料からの反射及び試料を透過するレーザー光強度を連続してモニターする。反射または透過するレーザー光強度は、主に試料上の EC 量によって定化する。OC の熱分解が起これば EC が増加し始めると、レーザー光の散乱が増加し、反射光も透過光も減少する。逆に EC が遊離し始めると、反射光も透過光も増加し始める。測定開始時の反射または透過するレーザー光強度（初期値）から、熱分解によってレーザー光強度が減少した後、分析雰囲気に酸素が加えられると、EC の遊離に伴って増加し始め、再び初期値に戻る時点（分別時間）がえられる。この分別時間までの EC の発生分を OC の熱分解量と同等と見なし、EC から差し引くとともに OC に加えて補正する。

《熱分離条件》

炭素フラクション	測定条件	
	設定温度	分析雰囲気
OC1	120°C	He
OC2	240°C	He
OC3	450°C	He
OC4	550°C	He
EC1	550°C	98%He+2%O ₂
EC2	700°C	98%He+2%O ₂
EC3	800°C	98%He+2%O ₂

出典) 環境省公式 Web サイト (<http://www.env.go.jp/>)

2.4.3 Soot-Blow 時に採取されたダストの粒子画像解析方法

A 社製 4.9 万 kW エンジン $\phi 96$ については、排ガス速度及び Soot-Blow 実施継続時間が不明であったことから、全粒径を捕集し、画像解析によって粒径分布を把握した。

粒子画像の解析にあたっては、まずフィルタに捕集されたダストに蒸着処理を施した後、走査電子顕微鏡を用いて低真空モードで付着粒子の表面撮影を行った。

次に、画像解析は解析ソフト (Media Cybernetics : Image-Pro Plus) を用いて、長径を基準とした粒子径の測定を行い、粒径別の出現頻度を把握した。

なお、解析にあたっては、電子顕微鏡像 (反射電子像) から輪郭が確実に読み取れる最前面の粒子のみを対象とし、陰部で粒子の存在が確認できないエリアや、凝集粒子、重なり合う粒子は解析対象から除いた。

2.5 通常航行時におけるダストの分析結果

2.5.1 排ガス採取量

各船舶・検体における排ガス採取量と、その際の採取時間、吸引流量および吸引速度は、表 2.5-1 に示すとおりである。

なお、A 社製 4.9 万 kW エンジン φ96 についてはアンダーセンスタックサンプラを使用してダストの採取及び分粒を行い、B 社製 1.9 万 kW エンジン φ70 及び C 社製 1.3 万 kW エンジン φ50 については、MCI サンプラを使用してダストの採取及び分粒を行った。

表 2.5-1 各検体における排ガス採取量と吸引流量

対象船舶	検体 No.	排ガス採取量 (L-dry)	採取時間 (min)	吸引流量 (L-dry/min)	吸引速度 (m/sec)
A 社製 4.9 万 kW エンジン φ96	1	643 (32.9°C)	25	25.7	8.5
	2	480 (32.8°C)	25	19.2	6.4
B 社製 1.9 万 kW エンジン φ70	1	189 (28.1°C)	10	18.9	6.3
	2	199 (28.7°C)	10	19.9	6.6
	3	197 (29.3°C)	10	19.7	6.5
	4	197 (29.7°C)	10	19.7	6.5
	5	196 (29.8°C)	10	19.6	6.5
C 社製 1.3 万 kW エンジン φ50	1	200 (34.0°C)	10	20.0	11.8
	2	201 (33.4°C)	10	20.1	11.8
	3	200 (34.0°C)	10	20.0	11.8
	4	200 (34.4°C)	10	20.0	11.8
	5	200 (34.4°C)	10	20.0	11.8

排ガス採取量はガスメータで測定した値。カッコ内はガス量を測定したガスメータにおける平均排ガス温度。

吸引速度は吸引流量とノズル径から求めた値。

2.5.2 粒径別ダスト重量・濃度分析結果

各船舶・検体における粒径別のダスト重量は表 2.5-2 と表 2.5-3 のとおりである。

表 2.5-3 に示す MCI サンプラによる分粒の閾値については、アンダーセンスタックサン
プラと同様に流速及び排ガス温度に影響されるが、流速による補正を行っていない。

表 2.5-2 通常航行時における排ガス中の粒径別ダスト重量 (アンダーセンスタックサンプラ)

対象船舶	検体 No.	捕集板 No.	分級粒子径* (μm)	ダスト重量 (mg)	吸引ガス量 ($\text{m}^3\text{-dry}$)
A 社製 4.9 万 kW エンジン $\phi 96$	1	1	12.5	3.319	0.643
		2	7.8	2.153	
		3	5.3	1.744	
		4	3.5	1.416	
		5	2.3	1.439	
		6	1.2	1.541	
		7	0.70	1.545	
		8	0.48	1.913	
	2	1	14.0	1.488	0.480
		2	9.0	0.826	
		3	6.0	0.942	
		4	4.3	0.932	
		5	2.8	1.056	
		6	1.4	1.219	
		7	0.81	1.069	
		8	0.55	1.237	

*アンダーセンスタックサンプラにおいては、分球粒子径は測定時のガス速度に影響されるため、測定毎に異なる。

表 2.5-3 通常航行時における排ガス中の粒径別ダスト重量 (MCI サンプラ)

対象船舶	検体 No.	インパクター部	ダスト重量 (mg)	吸引ガス量 (m ³ -dry)
B 社製 1.9 万 kW エンジン φ 70	1	10μm カット	0.750	0.189
		2.5μm カット	1.444	
		2.5μm カット以下	35.122	
	2	10μm カット	0.743	0.199
		2.5μm カット	1.453	
		2.5μm カット以下	35.735	
	3	10μm カット	0.833	0.197
		2.5μm カット	1.424	
		2.5μm カット以下	34.415	
	4	10μm カット	0.825	0.197
		2.5μm カット	1.370	
		2.5μm カット以下	33.231	
	5	10μm カット	0.771	0.196
		2.5μm カット	1.270	
		2.5μm カット以下	32.695	
C 社製 1.3 万 kW エンジン φ 50	1	10μm カット	0.436	0.200
		2.5μm カット	0.505	
		2.5μm カット以下	15.245	
	2	10μm カット	0.356	0.201
		2.5μm カット	0.497	
		2.5μm カット以下	15.859	
	3	10μm カット	0.407	0.200
		2.5μm カット	0.494	
		2.5μm カット以下	14.619	
	4	10μm カット	0.433	0.200
		2.5μm カット	0.431	
		2.5μm カット以下	14.775	
	5	10μm カット	0.331	0.200
		2.5μm カット	0.473	
		2.5μm カット以下	15.230	

(1) A社製 4.9 万 kW エンジン $\phi 96$ におけるダスト粒径別重量割合と濃度 (アンダーセンスタックサンプラ)

各検体における粒径別ダスト重量割合は図 2.5-1 のとおりである。2.5 μm を粒径の大小の区分とした場合、2.5 μm 以下の微小粒子は重量ベースで約 36%であり、バックアップフィルタを使用していないことを考慮すると、(2)で示す MCI サンプラを用いた結果を大きな乖離はないと考える。

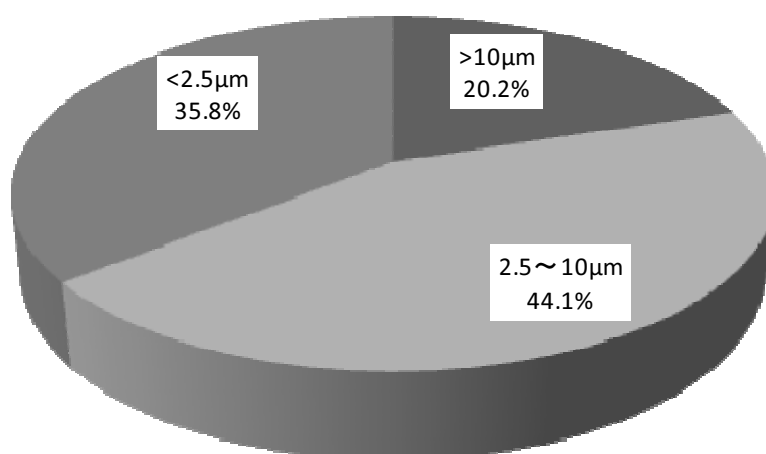


図 2.5-1 通常航行時における排ガス中のダストの粒径別重量割合 (A社製 4.9 万 kW エンジン $\phi 96$: アンダーセンスタックサンプラ)

(2) B社製 1.9 万 kW エンジン ϕ 70 と C 社製 1.3 万 kW エンジン ϕ 50 におけるダストの粒径別重量・炭素分析 (MCI サンプラ)

MCI サンプラを使用してダスト補修した結果、B 社製 1.9 万 kW エンジン ϕ 70 及び C 社製 1.3 万 kW エンジン ϕ 50 における粒径別ダスト重量割合はそれぞれ図 2.5-2 及び図 2.5-3 に示すとおりである。これらの値は、表 2.5-2 と表 2.5-3 に示す、それぞれ 5 回の計測値の平均値での割合を示したものである。

いずれの検体においても、粒径が最も小さい 2.5 μ m カット以下における捕集重量が大きく、捕集比率は 94~95%であった。また、10 μ m カットと 2.5 μ m カットインパクト部では、それぞれ平均して 2~3%程度となった。

以上のことから、船舶ダストは、シミュレーション内での空気力学上な特性や人体健康影響を考察する際には、粒径 2.5 μ m 以下の粒子として取り扱うことで構わないと考えられる。

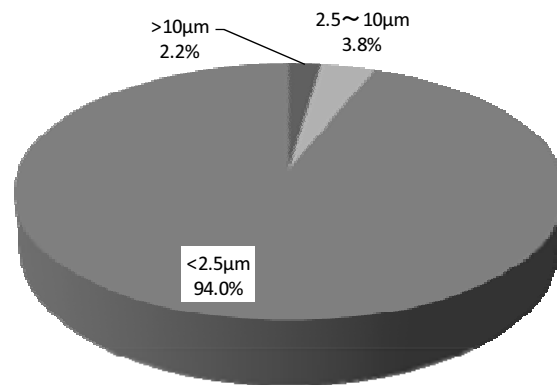


図 2.5-2 通常航行時における排ガス中のダストの粒径別重量割合 (B 社製 1.9 万 kW エンジン ϕ 70 : MCI サンプラ)

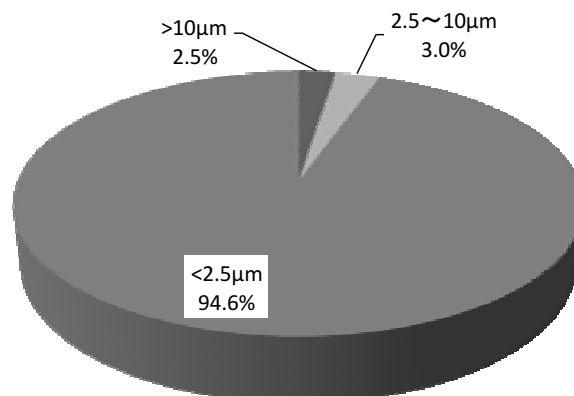


図 2.5-3 通常航行時における排ガス中のダストの粒径別重量割合 (C 社製 1.3 万 kW エンジン ϕ 50 : MCI サンプラ)

2.5.3 無機炭素/有機炭素比 (EC/OC 比) ・濃度分析結果

表 2.5-3 に示す通常航行時の粒径別ダスト重量及び表 2.5-4 に示す通常航行時の炭素濃度分析結果より、B 社製 1.9 万 kW エンジン $\phi 70$ と C 社製 1.3 万 kW エンジン $\phi 50$ のそれぞれにおける粒径別炭素フラクション別重量割合を図 2.5-4 と図 2.5-5 に示す。これらの値はサンプリング 5 回の平均値であり、Other はサンプリングされた粒径別ダストの総重量から EC と OC の合計重量を引いた値である。

B 社製 1.9 万 kW エンジン $\phi 70$ では、 $10 \mu\text{m}$ カット以上と $2.5 \mu\text{m}$ カット以下では、Other の割合が高く 57~59%となった。なお、 $2.5 \sim 10 \mu\text{m}$ カットではダスト重量が EC と OC の合計重量とほぼ同じとなったため Other をゼロとした。EC に対する OC の重量比は、 $10 \mu\text{m}$ カット以上と $2.5 \sim 10 \mu\text{m}$ で約 1.9、 $2.5 \mu\text{m}$ カット以下で約 2.8 となり、いずれのインパクター部においても OC の割合が EC と比べて高くなった。

C 社製 1.3 万 kW エンジン $\phi 50$ では、 $10 \mu\text{m}$ カット以上で Other の割合が高く 57%となり、 $2.5 \mu\text{m}$ カット以下と $2.5 \sim 10 \mu\text{m}$ カットではそれぞれ 17%と 9%となった。EC に対する OC の重量比は $2.5 \mu\text{m}$ カット以下で約 4.7、 $2.5 \sim 10 \mu\text{m}$ カットで 3.9、 $10 \mu\text{m}$ カット以上で 2.7 となり、いずれのインパクター部においても OC の割合が EC と比べて高くなった。

なお、昨年度実施した A 社製 4.9 万 kW エンジン $\phi 96$ においては、ステンレスフィルタ上にダストを捕集するアンダーセンスタックサンプラを用いており、昇温灰化を行うことができないため、Improve-A 法を用いた炭素分析は行わなかった。

希釈によって排ガス温度を下げないダスト採取方法による分析にもかかわらず、EC に対して OC の比率が大きいことは、自動車ディーゼル粒子との大きな差違といえる。このことは、フィルタ上に採取された粒子の色が完全な黒色でないことから裏付けられる。第 1 章で定義した LAC に OM などを含めることには妥当性がある。

ただし、第 5 章で行うシミュレーション内の設定では、安全側の評価として自動車ディーゼル粒子と同様に黒色の光学的特性を持つものと仮定した。

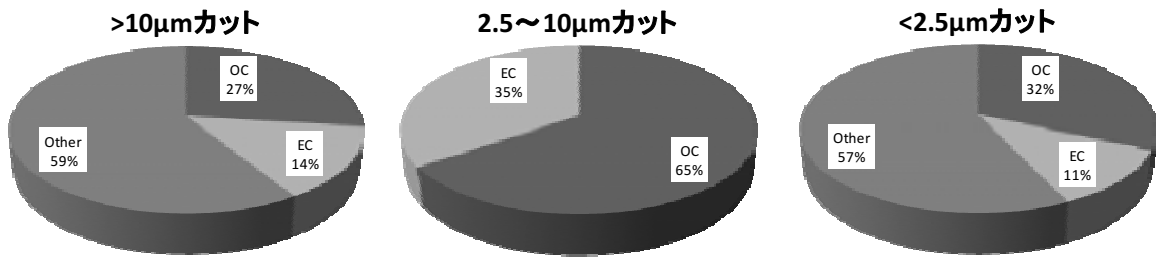


図 2.5-4 通常航行時における排ガス中の粒径別 EC/OC 比
(B 社製 1.9 万 kW エンジン φ 70)

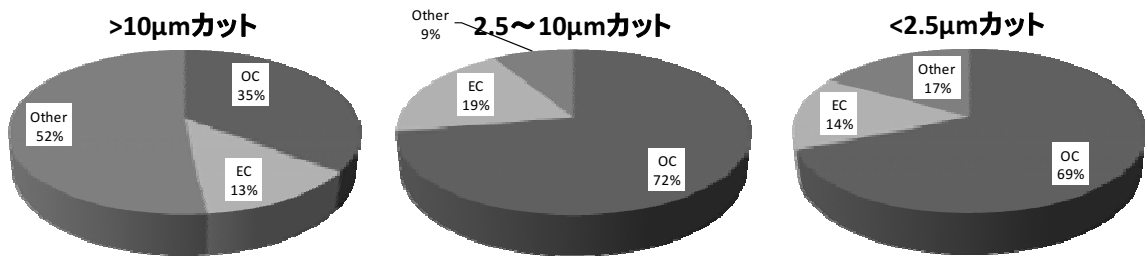


図 2.5-5 通常航行時における排ガス中の粒径別 EC/OC 比
(C 社製 1.3 万 kW エンジン φ 70)

表 2.5-4 通常航行時における無機炭素/有機炭素(EC/OC)濃度分析結果

主機関	吸引 ガス量 (m ³ -dry)	インパクト一部	炭素濃度 (μgC/m ³ -dry)										
			OC1	OC2	OC3	OC4	OCPyro	EC1	EC2	EC3	OC	EC	TC
B 社製 1.9 万 kW エンジン φ 70	0.196	10μm カット	15 未満	36	26	28	124	160	72	15 未満	214	111	320
		2.5μm カット	15 未満	71	146	111	590	914	166	15 未満	924	490	1400
		2.5μm カット以下	63.8	1520	1420	806	7200	10160	882	32	10800	3860	14800
C 社製 1.3 万 kW エンジン φ 50	0.200	10μm カット	15 未満	44	27	23	43	55	39	15 未満	138	51	190
		2.5μm カット	15 未満	76	73	50	147	194	44	15 未満	348	90	438
		2.5μm カット以下	49.6	2340	4280	634	3060	4720	542	15 未満	10400	2200	12600

*1：検出下限値以上かつ定量下限値未満の数値については、参考値として赤色斜体文字にて表示

*2：OC=OC1+OC2+OC3+OC4+OCPyro, EC=EC1+EC2+EC3+OCPyro, TC=OC+EC, OCPyro：炭化補正分

*3：いずれの主機関も 5 検体の平均値を示す。

2.6 Soot-Blow 時に捕集したダスト分析結果

Soot-Blow 時において洗浄に用いられた空気が排出される際に含まれるダスト採取は、A 社製 4.9 万 kW エンジン φ96 と C 社製 1.3 万 kW エンジン φ50 において実施した。

2.6.1 排ガス採取量

各船舶・検体における排ガスの採取量は以下のとおりである。

表 2.6-1 各検体における排ガス採取量

主機関	検体 No.	排ガス採取量 (L-dry)	採取時間 (sec)	吸引流量 (L-dry/min)
A 社製 4.9 万 kW エンジン φ96	1	12 (31.6°C)	37.3	19.3
	2	9 (31.6°C)	28.0	19.3
C 社製 1.3 万 kW エンジン φ50	1	40 (33.5°C)	120.0	20.0

排ガス採取量はガスメータで測定した値。カッコ内はガスメータでの平均排ガス温度。

2.6.2 粒径別ダスト重量分析結果

(1) A社製 4.9万 kW エンジン ϕ 96 のダスト画像解析による粒径分布

A社製 4.9万 kW エンジン ϕ 96 の Soot-Blow 時におけるダストの粒径分布を把握するため、画像解析を行った。

画像解析は、各検体で 2 視野ずつ行った。各画像におけるダストの平均粒子径は表 2.6-2 のとおりである。いずれの検体においても 0.51~0.60 μm という、サブミクロン領域の粒子が多数を占めていた。

表 2.6-2 Soot-Blow 時における捕集粒子の最頻値粒子径
(A社製 4.9万 kW エンジン ϕ 96)

	画像解析による 最頻値粒子径 (μm)
フィルタ No.1 視野 1	0.60
フィルタ No.1 視野 2	0.56
フィルタ No.2 視野 1	0.51
フィルタ No.2 視野 2	0.57

また、各検体の反射電子像及び解析対象とした粒子、並びに解析対象とした粒子の粒径別度数分布を以下に示す。最前面に捕集されたダストは、いずれの検体においても 0.4~0.5 μm の粒子の出現頻度がピークとなり、右側に裾野が広がる分布を示している。なお、本調査で観察された最大の粒子径は 1.32 μm であった。

ただし、処理上、クラスタ状の粒子であっても、画像で一番上に表示された粒子によって粒子径が決定される。このため、このようなクラスタ状の粒子の粒子径は過小評価している可能性がある。

さらに、粒子の個数をカウントしており、重量ベースでは、粒径の 3 乗に重み付けされることから、Soot-Blow 時に排出されるダストは、粒径 2.5 μm 以上の粒子として近似することが可能であると考えられる。

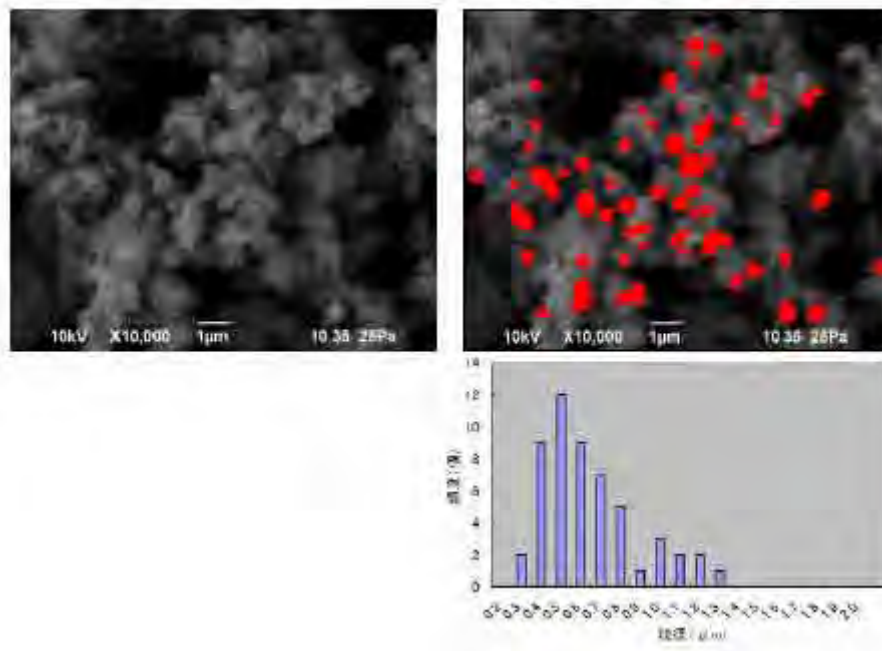


図 2.6-1 Soot-Blow 時における捕集粒子の画像及び粒径分布例
(A 社製 4.9 万 kW エンジン φ96)

(2) C 社製 1.3 万 kW エンジン φ50

C 社製 1.3 万 kW エンジン φ50 での粒径別ダスト重量割合は、図 2.6-2 に示すとおりである。

粒径が最も小さい 2.5 μm カット以下における捕集重量が多く測定されたが、2.5 μm 以上の粒子がノズル内に付着している可能性が大きく、データの信頼性は低いと考える。

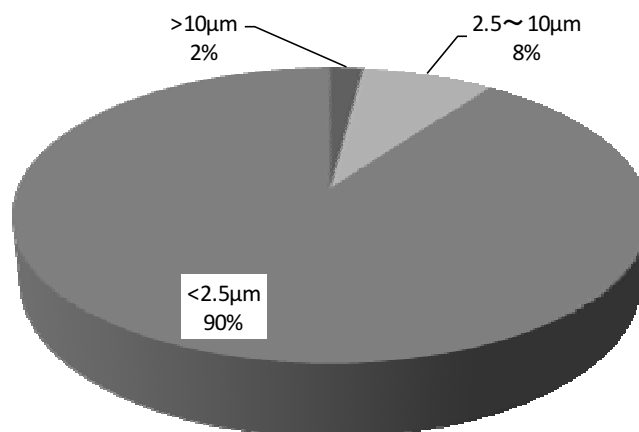


図 2.6-2 Soot-Blow 時における捕集粒子の粒径別重量割合
(C 社製 1.3 万 kW エンジン φ50)

2.6.3 Soot-Blow 時における捕集粒子の無機炭素/有機炭素比濃度分析結果

(1) A 社製 4.9 万 kW エンジン ϕ 96

A 社製 4.9 万 kW エンジン ϕ 96 における Soot-Blow 時のダストの炭素重量の分析結果は、図 2.6-3 のとおりである。

OC よりも EC の割合が多く、全体の約 86%が EC、約 14%が OC となった。通常時の排ガス中ダスト (図 2.5-4、図 2.5-5 参照) に比較して EC が多くなったのは排ガスエコノマイザの表面に付着したダストには (通常航行時の図表) に示すとおり OC 成分が多いが Soot-Blow によって剥離するまでに酸化したことによるものと考える。

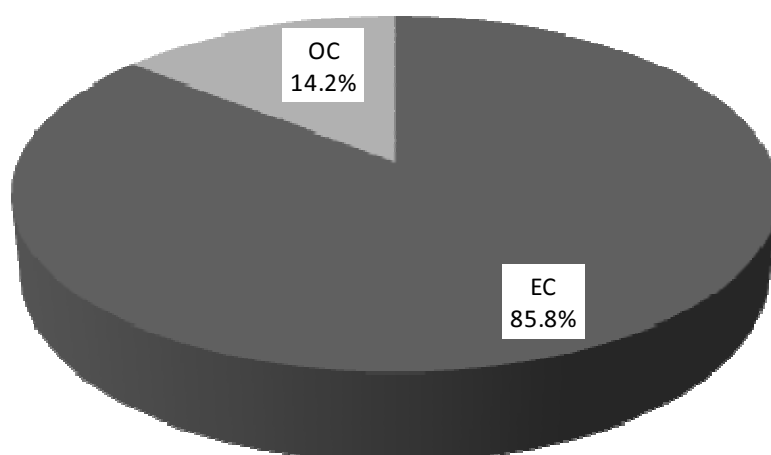


図 2.6-3 Soot-Blow 時における捕集粒子の EC/OC 比
(A 社製 4.9 万 kW エンジン ϕ 96)

(2) C社製 1.3万kW エンジンφ50

MCI インパクターによる C 社製 1.3 万 kW エンジンφ50 における Soot-Blow 時のダストの炭素重量の分析結果は、図 2.6-4 に示すとおりである。

いずれのインパクター部においても OC の割合が 75~85%と高く、2.5 μm カット以下では OC が 83%、EC が 17%となり、前述の A 社製 4.9 万 kW エンジンφ96 と比べて OC/EC 比が大きく異なっている。

A 社製 4.9 万 kW エンジンφ96 と C 社製 1.3 万 kW エンジンφ50 の主機関はそれぞれ外航船と内航船であり、これらの船舶ではスートブローの頻度や排ガスエコノマイザを通過したときの平均的な排ガス温度の差によって表面上に付着したダストの酸化の度合いが異なることが影響していると考えられる。

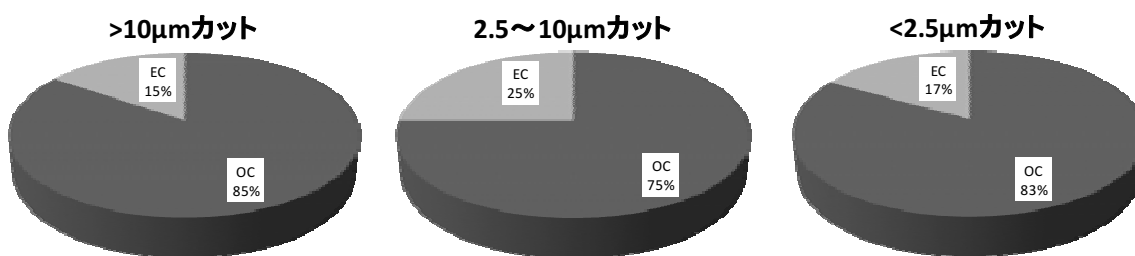


図 2.6-4 Soot-Blow 時における捕集粒子の粒径別 EC/OC 比
(C 社製 1.3 万 kW エンジンφ50)

2.7 考察

2.7.1 燃料消費率の検証

カタログ上の燃料消費率及びサンプリング時の実燃料消費量と機関出力を表 2.7-1 に示す。この表に示すとおり、カタログ上の燃料消費率とサンプリング時の実燃料消費率との間には大きな乖離はみられない。

表 2.7-1 カタログ上の燃料消費率とサンプリング時の実燃料消費率

	A 社製 4.9 万 kW エンジンφ96	B 社製 1.9 万 kW エンジンφ70	C 社製 1.3 万 kW エンジンφ50
カタログ上の SFC@E3 モード [g-Fuel/kWh]	167.9	177.9	168.5
燃料消費量 [kg-Fuel/h]	4552.121	2408.333	1538.654
機関出力 [kW]	26,944	14,105	9,269
燃料消費率 [g-Fuel/kWh]	168.9	170.7	166.0

注)燃料消費量及び機関出力は、サンプリング期間中の平均値を示す。

2.7.2 排出ガス流速とサンプリング速度

排ガス中のダスト捕集においては、等速吸引が望ましいが、A 社製 4.9 万 kW エンジンφ96 では排ガス速度 19.2 m/sec に対してサンプリング速度 6.4 m/sec、B 社製 1.9 万 kW エンジンφ70 では排ガス速度 9.6 m/sec に対してサンプリング速度 6.5 m/sec、C 社製 1.3 万 kW エンジンφ50 では実排ガス速度 8.9 m/sec に対してサンプリング速度 11.8 m/sec であった。

これは事前に推定した機関出力とサンプリング時の実出力との差違が主に起因している。

2.7.3 通常航行時の PM 排出係数の試算

前項で述べたように、測定時の制限から排ガス中のダスト濃度は算定できないが、参考までに各船舶の通常航行時における PM の排出係数を、排出ガス量と重量濃度分析結果から試算すると表 2.7-2 に示すとおり、0.26～2.6 の範囲となった。バックアップフィルタを備えた MCI サンプラを用いた計測時には高い排出係数が計算された。

ただし、後述の 2.8 に示すとおり、硫黄分が 2.70% の場合の各粒子成分の排出係数から比べると試算した PM 排出係数は過大評価となっており、排出係数は実測の結果ではなく、2.8 で紹介する既存の文献値から設定する。

表 2.7-2 PM 排出係数試算結果

	A 社製 4.9 万 kW エンジン φ 96	B 社製 1.9 万 kW エンジン φ 70	C 社製 1.3 万 kW エンジン φ 50	硫黄分 2.70% の場合における LAC 排出係数 (表 2.8-1 参照)
PM 排出係数 [g/kWh]	0.26	2.55	1.13	0.335

2.8 LAC 排出係数の設定

既に述べたように、粒子状物質に含まれる成分のうち、EC+OM (organic Material) +Ash の合計値を LAC (Light-Absorbing Carbon) とみなして排出インベントリ及び輸送シミュレーションモデルの整備を行うこととした。Ash 及び EC は黒色炭素 (いわゆるブラックカーボン) に、OM は同様に正の放射強制力を持つブラウンカーボン (BrC) が一部含まれたものに相当する。また、排出の経路としては、EC は主に燃料の未燃分、OM はそれ以外に一部潤滑油からの未燃分が含まれていると考えられる。

図 2.8-1 に示すデータは、Second IMO GHG Study 2009 において Germanischer Lloyd より提供されている。特にサルフェートとその付随水を含めた観測データとしては、最も信頼できる数値と言える。たとえば、IMO の GHG updating study の draft (MEPC 67/INF.3) においても、図 2.8-1 に示した関係式は、図 2.8-2 に示すように近年実施された船舶の排ガスを実船上で希釈法を用いて観測した他の調査報告とよく合致することが報告されている。なお、MEPC67 に提出された Third IMO GHG Study 2014 は draft 版であり、MEPC の承認を得る前のものであること留意する必要がある。図 2.8-1 に示した関係式より、算定される LAC の値は、表 2.8-1 に示すように 0.335 g/kWh と計算される。

なお、北緯 66° 以北とした場合、ECA-S が設定されている北海及びバルト海は今回の対象海域外となるため、今回対象となる全海域において表 2.8-1 に示すように、燃料中硫黄分を 2.7% と仮定している。

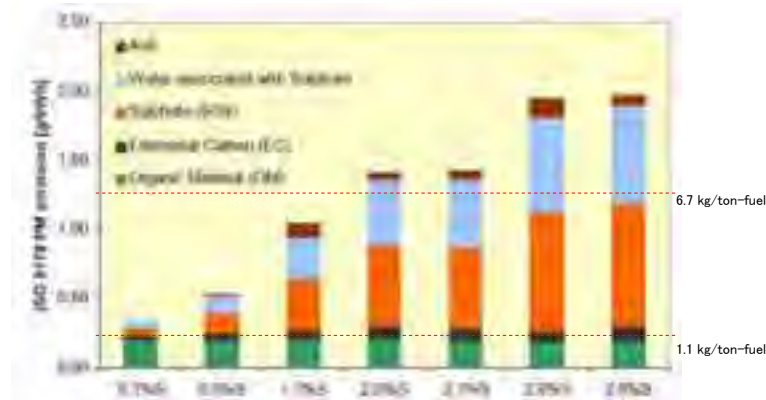


図 2.8-1 燃料中の硫黄分 (%) に対する希釈法で定量された PM 排出係数 (g/kWh)
(Presentation by Germanischer Lloyd at IMO BLG-WGAP 2, Berlin, 2007)

表 2.8-1 図 2.8-1 において硫黄分が 2.7% における各粒子成分の排出係数

Particle composition	Emission Factor [g/kWh]
OM	0.189
EC	0.040
Sulfate	0.712
Water associated with Sulphate	0.653
Ash	0.105
LAC as defined (OM+EC+Ash)	0.335

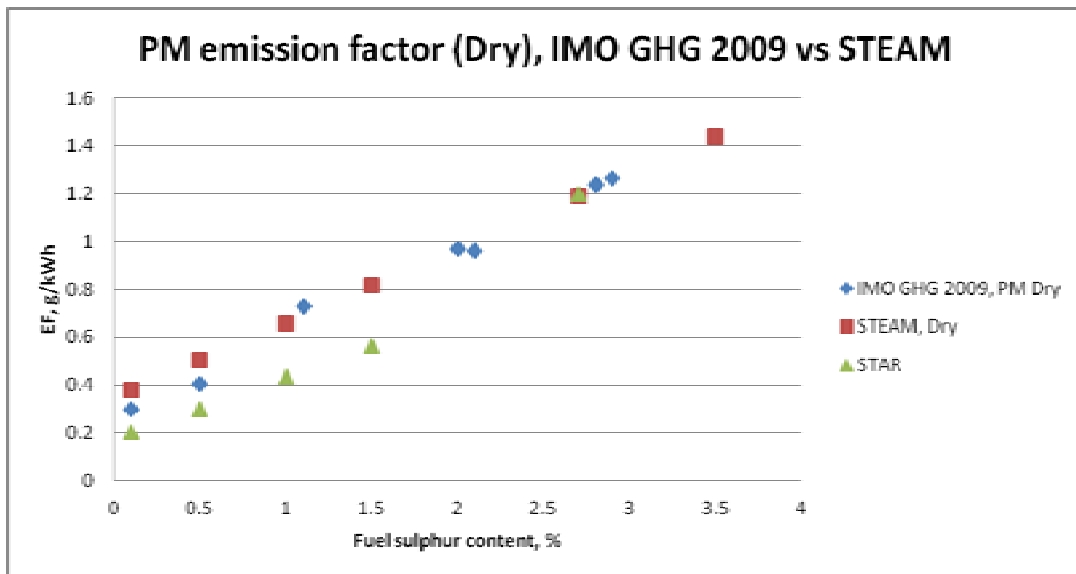


図 2.8-2 燃料中の硫黄分 (%) と、希釈法で定量された PM 排出係数 (g/kWh) の関係
Third IMO GHG Study 2014 – Final Report (MEPC 67/INF.3)

IMO GHG study 2009 (Figure 7.7, based on data from Germanischer Lloyd),と近年の測定結果 values of Jalkanen et al (2012) 及び Starcrest (2013)との比較を示す。

なお、MEPC67 に提出された Third IMO GHG Study 2014 は draft 版であり、MEPC の承認を得る前のものであること留意する必要がある。

3 北極海航路を対象とした船舶活動量及びブラックカーボン排出量データの作成方法

昨年度の事業では、AMSA2009 (Arctic Marine Shipping Assessment 2009) による北極圏沿岸国の航行データベース等を活用して北極海航路を対象とした船舶活動量データを作成した。これは、OD表 (Origin Destination) 別活動量に基づいて航路毎の排出量を算定し、同定される航行ルート上に排出量を等配分したものである。この船舶活動量データは、隻数のみが表示されていること、対象年が2004年であること、カナダについては通年でのデータが整備されていないこと、特に高緯度付近の航路の地理的存在や使用頻度の増加が考慮されていないことなどの不確実性が高く、さらに燃料消費量を算定する際にも、通常船舶の日当たりの平均燃料消費量を用いており、ICE クラスの有無を考慮していないなどから、本年度はカナダの exactEarth Ltd が提供する衛星 AIS データを活用して船舶活動量及び排出量データを刷新するものとした。

解析の対象は2012年11月から2013年10月までとし、北緯66°以北を航行した船舶とした。AIS データには、船名やMMSIといった識別符号等の静的情報の他、各船の位置情報(緯度・経度)や速力(SOG)、針路(COG)等の動的情報が含まれているが、主機関の負荷率に応じて変化する燃料消費量を算出するためには、個船毎に機関定格出力や航海速力等の情報が必要となることから、IHSFの船舶データベースを参照することにより、これら必要情報を補完して北極海における船舶の活動量及びLAC排出量データを整備するものとした。

北極海における船舶の活動量及びLAC排出量データを整備するにあたっては、北緯66°以北の海域のうち、ノルウェーの内航船や漁船などの活動が多いとみられる海域と北極海航路を分けるため、本事業では、西経25°～東経45°、かつ、北緯66～80°の海域を“Non Arctic area”とし、それ以外の北緯66°以北の海域を“Arctic area”と定義した。

活動量(燃料消費量)の算定にあたっては、燃料消費率をEEDI策定のための仮定条件として使用される190 g/kWhとし、航海速力航行時を負荷率85%とした。また、LAC排出量の算定については、活動量(燃料消費量)×排出係数として算出し、排出係数はOM、EC、Ashを加えた0.335 g/kWhとした。

3.1 船舶活動量及びブラックカーボン排出量データの作成方法の概略

昨年度の平成 24 年度事業においては、AMSA2009 (Arctic Marine Shipping Assessment 2009) による北極圏沿岸国の航行データベース等を活用して北極海航路を対象とした船舶活動量データを作成した。OD 表 (Origin Destination) 別活動量に基づいて、航路毎の排出量を算定し、また同定される航行ルート上に排出量を等配分した。

昨年度事業で作成した船舶活動量データは、隻数のみが表示されていること、対象年が 2004 年であること、カナダについては通年でのデータが整備・報告されていないこと、特に高緯度付近の航路の地理的存在や使用頻度の増加が考慮されていないことなど、不確実性が高い。さらに、燃料消費量を算定する際にも、通常船舶の日当たりの平均燃料消費量を用いており、ICE クラスを考慮していないなどの問題もある。以上のことから、全データの刷新を行った。

北極圏 (基本的には北緯 66° 以北) における最新の船舶の月別活動量データ及びそれを基にしたブラックカーボン排出量データを作成のために、カナダの exactEarth Ltd が提供する衛星 AIS データを活用した。

図 3.1-1 は、衛星 AIS データを用いた船舶活動量及びブラックカーボン等排出量データの作成手順を示したものである。AIS データは、船名や識別符号、喫水情報等が含まれる“静的情報”と船の位置 (緯度・経度)、速力 (SOG)、針路 (COG) 等の運動状態が示された“動的情報”から構成される。船舶の活動量を推定するためには、静的情報と動的情報の両方が必要となる。

この図に示すとおり、まず、exactAIS データを“静的情報”と“動的情報”に分け、“静的情報”に含まれる MMSI⁸、IMO 番号⁹、Call Sign¹⁰等の識別符号や船名から、IHSF を参照して、個別の船毎に“機関定格出力”、“航海速力”といった、燃料消費量の算定に必要な情報を付加する。

次に“動的情報”は、前記の個別情報を MMSI でリンクして付加し、動的情報に含まれる位置 (緯度・経度) から活動量を地理的に配分するためのグリッド情報を求め、航行速力 (AIS データによる実速力) と航海速力 (定常航行時の速力) から機関負荷率を算出し、燃料消費率 SFC [g-Fuel/kWh] と負荷率と機関定格出力から燃料消費量を算出する。

⁸ MMSI : 海上移動業務識別コード (Maritime Mobile Service Identity)。DSC 通信装置を搭載した船舶・地上局に認識番号として交付される番号。9 桁の数字から構成され、最初の 3 桁は国籍を示す。

⁹ IMO 船舶識別番号 (IMO Ship identification number)。海事上の安全、汚染防止及び海事上の詐欺行為の防止を促進させるため、個々の船にその船の識別のため恒久的な番号を指定したもの。船舶の国籍が変わっても、廃船になるまでこの番号は変わらない。

¹⁰ 符号 (文字、数字) の羅列であり、個々の無線局に割り当てられた識別信号。冒頭符字列で国籍を意味する。

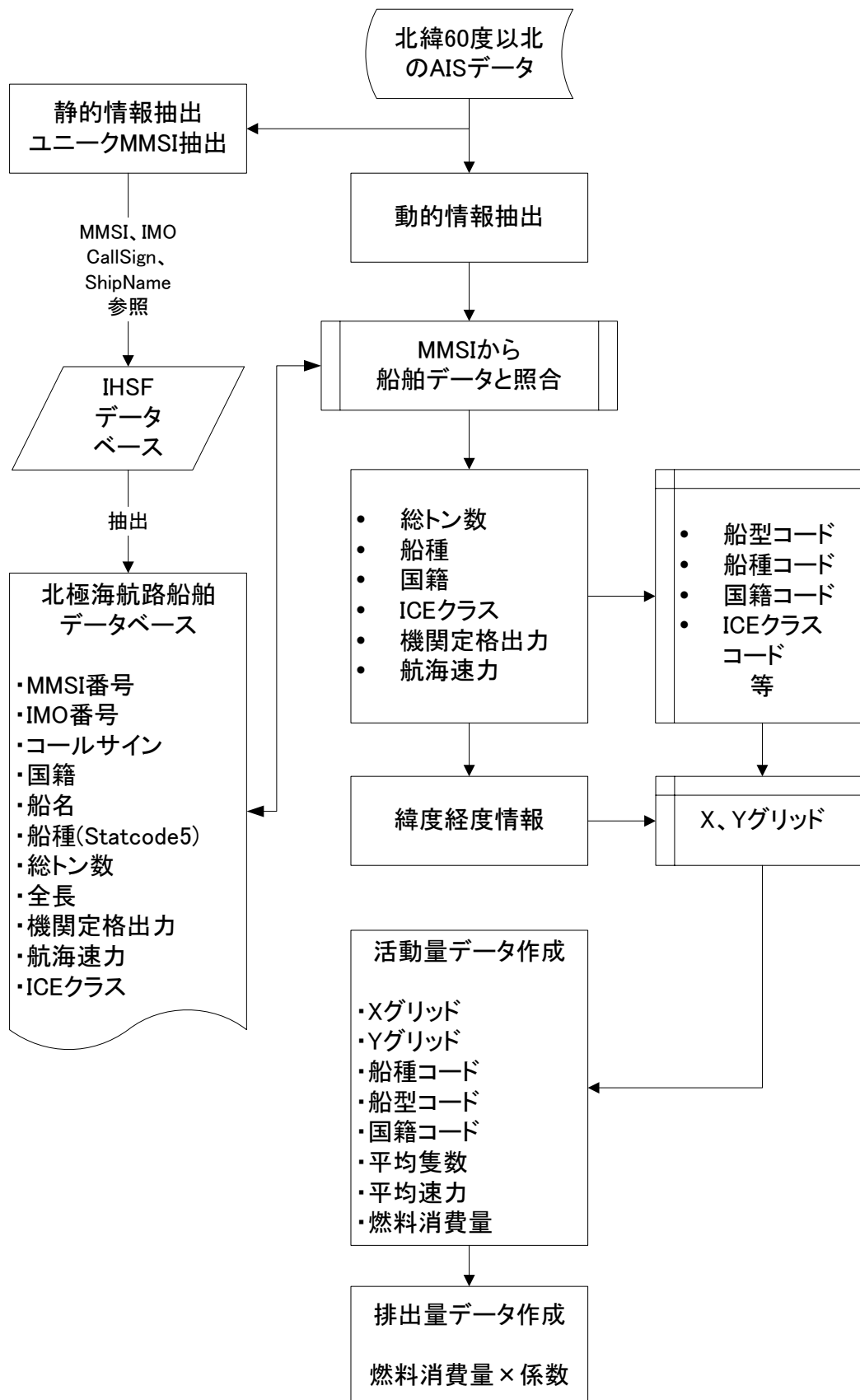


図 3.1-1 北極海における船舶の活動量 (燃料消費量) 及び排出量データ作成手順

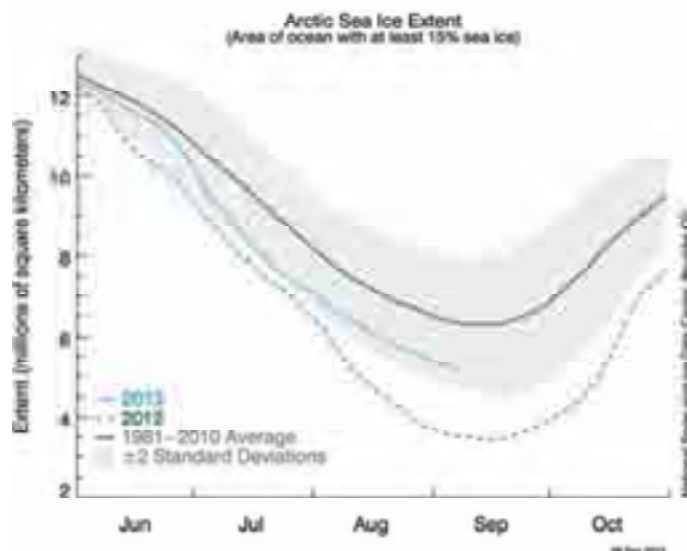
3.2 使用データの詳細

3.2.1 exactAIS データの詳細

シミュレーションの計算対象年については 2004 年を考えているが、exactEarth 社からのデータについては最新のものを購入・解析した方が、活動量あるいは地理的範囲として最も大きくかつ広くなる可能性がある。

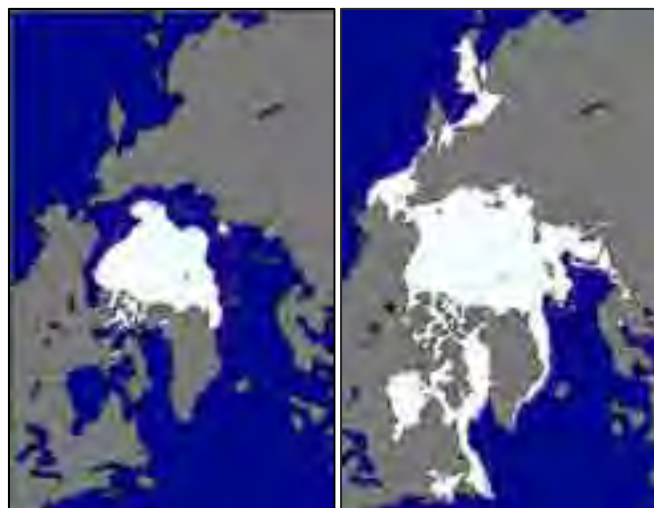
他方、2013 年夏季と 2012 年夏季の選択については検討の必要がある。図 3.2-1 に示すように、1970 年代夏季において $10 \times 10^6 \text{ km}^2$ 以上あり、81 年から 2010 年平均でも $7 \times 10^6 \text{ km}^2$ 程度存在していたが、2012 年 9 月において $3.41 \times 10^6 \text{ km}^2$ と、同年の海氷が史上最小を観測し、対 2011 年比で船舶交通量は史上最多を記録したと言われる (図 3.2-3)。他方、図 3.2-1 に示しているように、2013 年の夏場の海氷の減少は 2012 年夏季に比較して小さく、この結果、2013 年の夏季における航行量が 2012 年に比較して少なくなっていることも予測された。そこで、exactEarth Ltd. に 2012 年夏季と 2013 年夏季の差異を判断できる資料の提供を依頼した。

exactEarth Ltd. から提供された図 3.2-4～図 3.2-7 によると、海氷は 8 月においてもある程度残っているにもかかわらず、カナダ、グリーンランド及びロシア沿岸域の交通量の変化は観測されていないことがわかる。さらに、図 3.2-8 に示すようにスカンジナビア半島からロシア航路を除く海域において認識された MMSI の数 (一つの MMSI は一つの個船と考えられる) も前年比の伸び率は少なくなるものの、2013 年夏季についても前年比で増加していることが判る。このため、2012 年 11 月～2013 年 10 月の 1 年間 exactAIS データを購入し、解析に付した。



出典) NSIDC (National Snow & Ice Data Center)

図 3.2-1 北極海氷面積の変化



出典) NSIDC (National Snow & Ice Data Center)

図 3.2-2 Arctic Ice coverage in September 2013 (left) and March 2014 (right) .



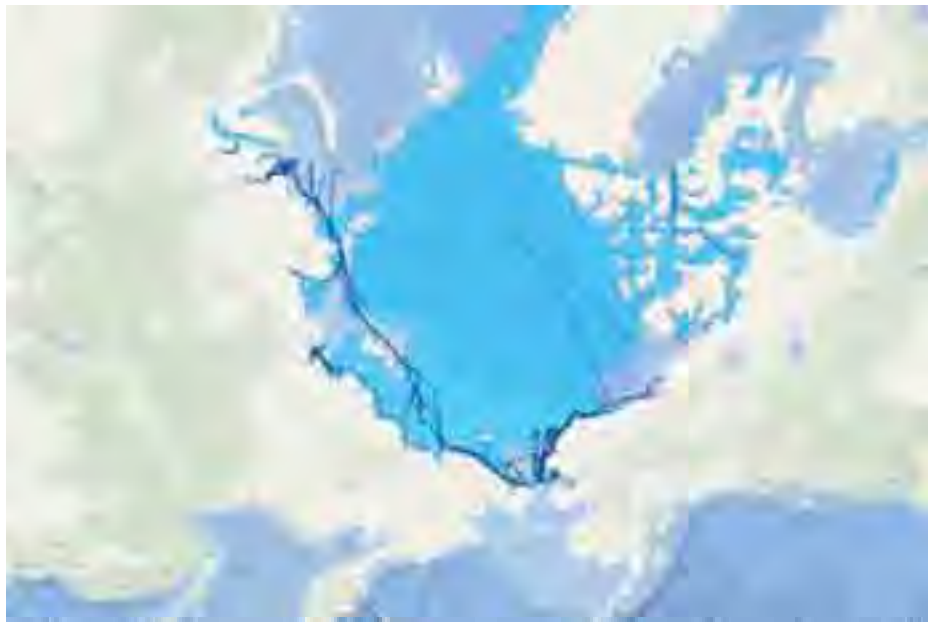
(2011年8月)



(2012年8月)

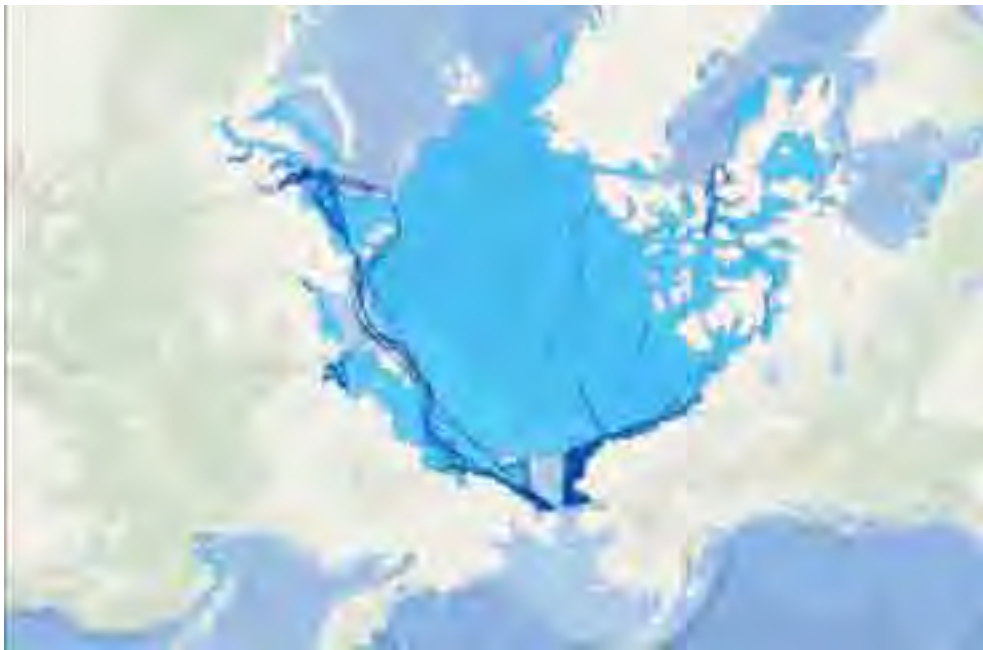
exactEarth Ltd 提供

図 3.2-3 2011年8月(上図)及び2012年8月(下図)における海氷と船舶交通量
(時間軸で間引いており、全データを表示していない)



exactEarth Ltd 提供

図 3.2-4 2012 年 7 月における海氷と航行トラック
(薄い青は海氷面積が 5%以下の海域を示す)



exactEarth Ltd 提供

図 3.2-5 2013 年 7 月における海氷と航行トラック
(薄い青は海氷面積が 5%以下の海域を示す)



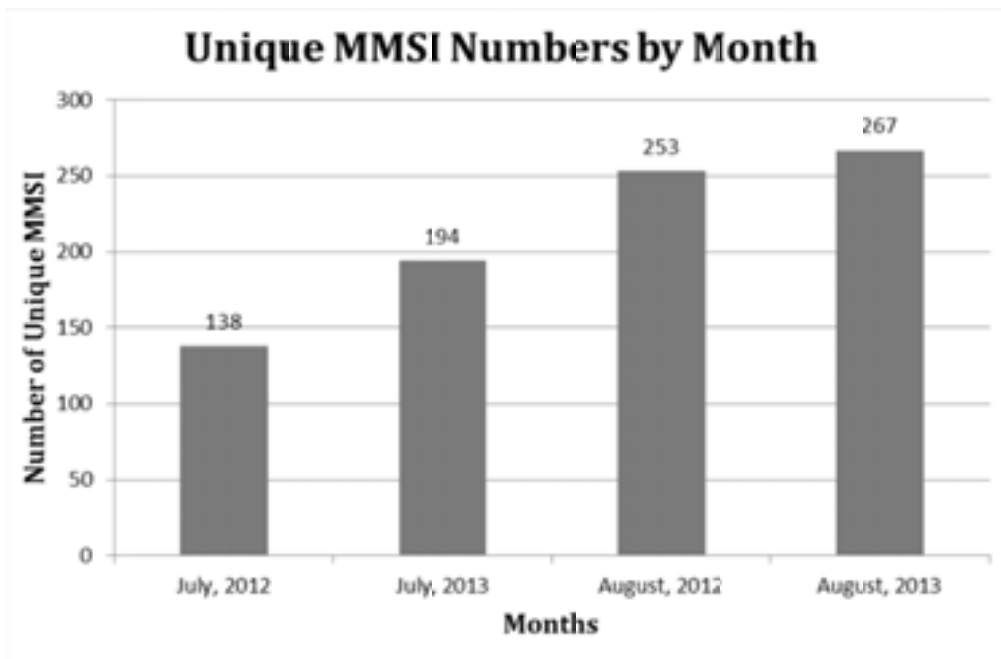
exactEarth Ltd 提供

図 3.2-6 2012 年 8 月における海氷と航行トラック
(薄い青は海氷面積が 5%以下の海域を示す)



exactEarth Ltd 提供

図 3.2-7 2013 年 8 月における海氷と航行トラック
(薄い青は海氷面積が 5%以下の海域を示す)



exactEarth Ltd 提供

注 ClassA 船舶のみに限定していること、データを間引いていること、また地域的にロシア沿岸航路からグリーンランド周辺までの海域を除外しているため、認識された船舶数 (MMSI 数) は他のデータと一致しない

図 3.2-8 2012 年および 2013 年夏季におけるロシア沿岸及びスカンジナビア半島周辺海域を除く海域における船舶認識隻数の比較

3.2.2 対象海域の定義

本事業のシミュレーションの対象海域は、バルト海等の内海を除外するため、北緯 66° 以北とした。他方、図 3.2-9 に示すとおり、IMO において Polar code が適用される北極海 (Arctic waters) の定義では、基本的には北緯 60° 以北の海域を用いることもある。ただし、スカンジナビア半島付近は対象外となっている。このため、北緯 66° 以北を対象期間中に一度でも航行した船舶を対象とし、排出データも同様とした。ただし、それらの船舶が北緯 60° から 66° の海域を航行した際の活動量や排出量も既存データとの比較においては用いることとする。また、スカンジナビア半島、スピッツベルゲン諸島、アイスランド北岸は、IMO が定義した Arctic waters の範囲外であること、さらに後述するように同海域内での航行船舶は他の海域と質量共に異なることから、本事業では図 3.2-10 に示すように北緯 66° 以北の海域を Arctic area と Non Arctic area の二つに分けた。

なお、今回は港湾統計など exactAIS を補足するデータは用いていない。このため、港湾内における補機の活動量は算定できない。他方、exactAIS は航行速度がゼロの時間も含めて積算しており、燃料消費量は計算上ゼロであるものの、港湾内にも船舶は存在している。



G3.3 Arctic waters means those waters which are located north of a line extending from latitude 58°00'.0 N, longitude 042°00'.0 W to latitude 64°37'.0 N, longitude 035°27'.0 W and thence by a rhumb line to latitude 67°03'.9 N, longitude 026°33'.4 W and thence by a rhumb line to Sørkapp, Jan Mayen and by the southern shore of Jan Mayen to the Island of Bjørnøya and thence by a great circle line from the Island of Bjørnøya to Cap Kanin Nos and thence by the northern shore of the Asian continent eastward to the Bering Strait and thence from the Bering Strait westward to latitude 60° N as far as Il'pyrskiy and following the 60th North parallel eastward as far as and including Etolin Strait and thence by the northern shore of the North American continent as far south as latitude 60° N and thence eastward along parallel of latitude 60° N, to longitude 56°37'.1 W and thence to the latitude 58°00'.0 N, longitude 042°00'.0 W

図 3.2-9 IMO が定義する北極海の範囲

(原図にもノルウェー領スバルバル諸島は表示されていない。)

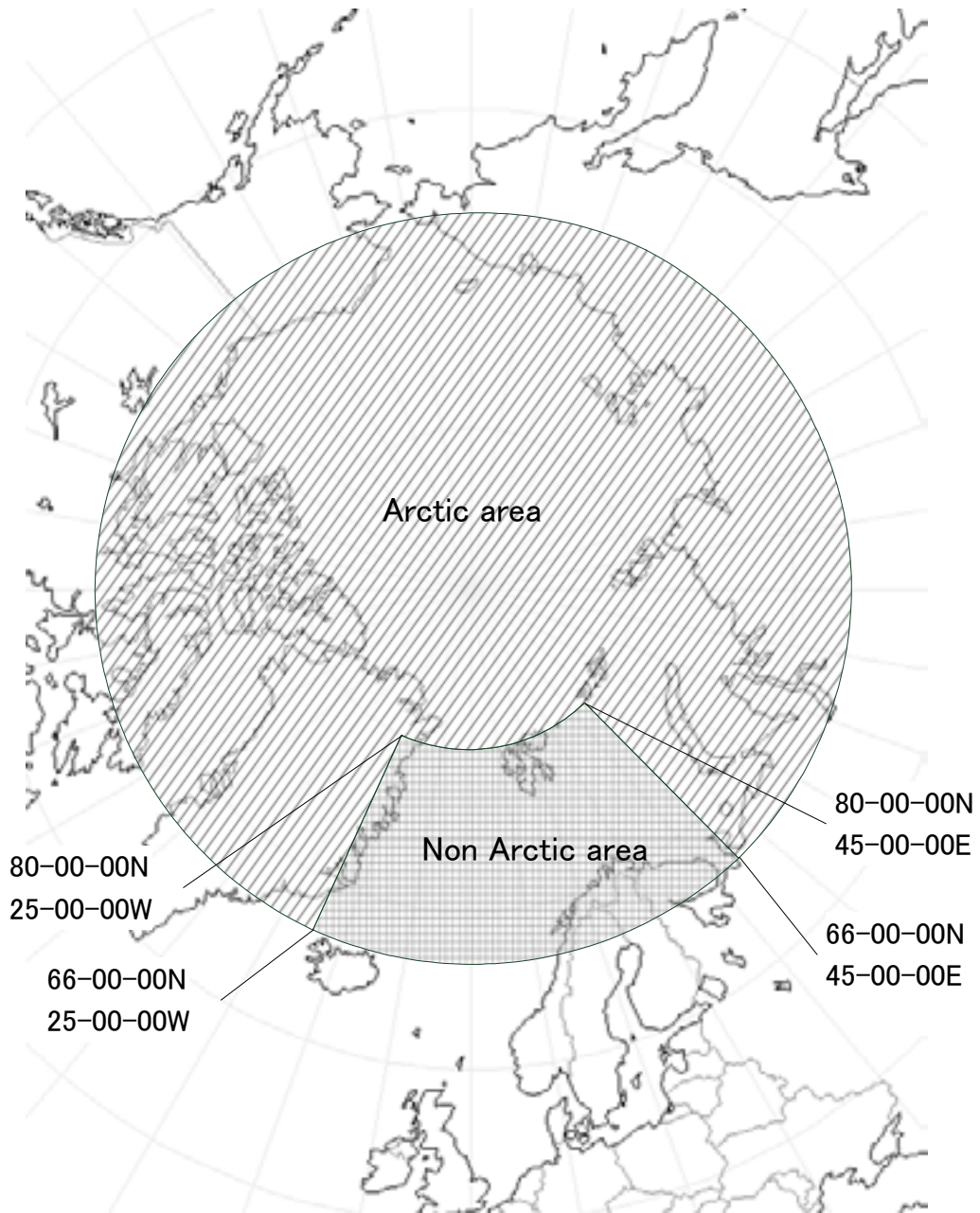
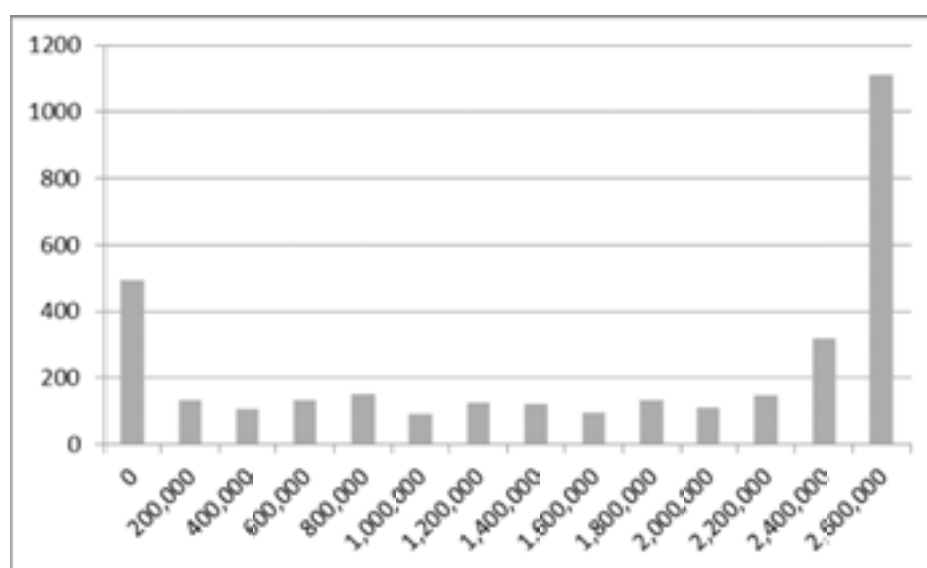


図 3.2-10 本事業で定義する北極圏の範囲

3.2.3 空間・時間解像度

AIS 解析の際の空間・時間解像度はシミュレーションに併せて、それぞれ 60 km、1 ヶ月 ×12 ヶ月とした。AIS データそのものの空間・時間解像度は、これらの設定よりも遥かに高い。

実際に 2013 年の 7 月中に受信された exactAIS のデータを船舶毎に集計し、北緯 60° 以北での存在時間数の頻度分布を図 3.2-11 に示す。半数程度の MMSI、つまり船舶は、1 ヶ月 (=2,678,400 秒) にわたってほぼ本海域で AIS 信号を発信している一方で、残りの半数の船舶は同海域内では発信は行われず、他の海域にて航行しているか停泊していないことがわかる。このような状況を考慮すると、1 ヶ月の平滑化は必要であると考えられる。



exactEarth Ltd 提供データより作成

図 3.2-11 2013 年 7 月における北緯 66° 以北で受信された MMSI 信号の北緯 60° 以北での合計存在時間 (x 軸は存在秒数、y 軸は MMSI 数)

3.2.4 その他の設定

その他、船種・船型の区分、表 3.2-1 に示すとおりである。

表 3.2-1 衛星 AIS データによる活動量の解像度等

使用データ	exactAIS データ exactEarth 社提供
対象期間	2012 年 11 月～2013 年 10 月
対象海域	北緯 60°以北の海域
対象船舶	北緯 66°以北の北極圏を航行した船舶
時間解像度	1 ヶ月×12
空間解像度	60 km
船種区分	貨物船、タンカー、液化ガス、コンテナ船、客船、漁船、作業船、 砕氷船、その他、不明
船型区分	0-500GT、500-1,000GT、1,000-3,000GT、3,000-6,000GT、 6,000-10,000GT、10,000-30,000GT、30,000-60,000GT、 60,000-100,000GT、100,000GT-
その他	国籍、Ice Class の有無、AIS ClassA/B

3.3 北極圏における船舶の活動量と LAC 排出量の算出方法

3.3.1 速度及び存在時間の設定方法

各船舶の速度は、対地速度 (SOG) が次に同じ船舶の動的データが観測されるまで、保たれていると仮定した。今回、対地速度から対水速度への補正は行っていない。また、異常値を除去するため、①観測データの間隔が異常に長い場合は、最大で継続時間を 1 時間と設定し、また ②IHSF に記載された理論上の航海速度よりも速い対地速度が観測された場合は、速度の補正は行わないが主機負荷率を増加させず最大 0.85 に設定するなどの仮定をおいた。

3.3.2 活動量 (時間当たり燃料消費量) の算出方法

燃料消費量は、以下の式で算出する。IHSF に記載されている航海速力を得るために、主機の定格馬力の 0.85 が必要であると仮定した。なお、この値は、EEDI reference line 策定のための仮定条件 (0.75) よりも大きく、安全側の設定である。ICE クラスの船舶は、必要となる

また、燃料消費率については、EEDI reference line 策定のための仮定条件である 190 g/kWh とした。

$$Fuel\ Consumption = N \times SFC \times P_m \times PR \times H \quad \text{数式 3.3-1}$$

ここで N : 隻数
 SFC : 燃料消費率=190 [g-Fuel/kWh]
 P_m : 機関定格馬力 [kWh]
 PR : 機関負荷率=0.85×航行速力³÷航海速力³
 H : 航行時間 [hour]

3.3.3 LAC 排出量の算出方法

ブラックカーボン等の大気汚染物質の排出量は、以下の算定式のとおり、活動量 (燃料消費量) ×排出係数で算出する。

$$E_s = A \times F_s \quad \text{数式 3.3-2}$$

ここで E_s : 対象物質 s の時間あたりの排出量 [kg/h]
 A : 時間あたりの活動量、[ton-fuel/h]
 F_s : 対象物質 s の排出係数、[kg/ton-fuel]

活動量 (A) は時間あたりの燃料消費量 [ton-fuel/h] あるいは平均出力 [kW] で表現される。一方、排出係数 (Fs) は、大気汚染物質ごとに [kg/ton-fuel] 及び [kg/kWh] で表現される。対象物質の時間あたりの排出量は、両者の積として表される。

4 北極圏における船舶活動量及びブラックカーボン排出量データの解析

2012年11月～2013年10月までの1年間の衛星AISデータを解析したところ、北緯66°以北を航行した船舶ユニーク数は9,324隻であり、そのうち約半数の4,964隻はIHSFの船舶データベースから個船情報を特定することができた。残り半数弱の4,360隻はAISに含まれるMMSIから船舶データベースにヒットしなかったもので、このうち2,646隻はクラスAを搭載し、1,714隻はクラスBと呼ばれる簡易型のAIS装置を任意に搭載している小型漁船等であった。

AISデータに基づく北緯66°以北海域の航行船舶活動量（燃料消費量）は7月が最も多く、2月が最も少なく7月の半分程度となった。クラスAの活動量が大部分を占め、多くが小型船であるクラスBの活動量は相対的に小さく全体の5%以下であった。

緯度で活動量の分布をみると、北緯70°以南が北緯66°以北全体の約50%を占め、北緯75°以南では全体の92%となっている。また、北緯75°以北は夏季及び秋季に活動量が集中している。

ICEクラスは海氷中を航行できる船体強度等の要件を満たした船舶に与えられる認証であり、北緯75°以北の海域では、ほとんどがICEクラスを持った船舶が活動している。

航行船舶の活動量（燃料消費量）及びLACの地理的分布によると、スカンジナビア半島沖に活動量及び排出量が集中しており、北緯66°以北におけるLAC年間総排出量2,161 Mg/yearのうち、約82%の1,770 Mg/yearが本事業で定義する“Non Arctic area”内で発生し、北極海航路（NSR）やカナダ側の“Arctic area”内では約18%の391 Mg/yearであった。単位面積あたりの排出強度でみた場合も“Non Arctic area”内で最大11.29 kg/year/km²であるのに対し、“Arctic area”内は1.55 kg/year/km²で約7倍の開きがある。また、過年度の調査検討結果から、我が国領海（12NM以内）の平均が17 kg/year/km²、東京湾内で244 kg/year/km²と比較してもはるかに少ない値といえる。

4.1 北極圏における船舶の活動量の解析

4.1.1 個船数でみた船舶活動量の解析

2012年11月から2013年10月までの1年間のexactAISデータにおいて、北緯66°以北を航行した船舶の個船数は、表4.1-1に示すとおりである。ここでは、船種及び総トン数に関する情報はexactAISデータには含まれないため、前述のとおり、動的情報のMMSI番号等より、IHSFデータベースを参照して個船毎に総トン数と船種を特定した。

2012年11月から1年間に北緯66°以北を航行したAIS搭載船舶のうち、識別できた船舶は合計4,964隻となり、貨物船が最も多く1,868隻、次いで漁船の1,190隻、作業船の813隻、タンカーの532隻となっている。また、1,000-3,000GTの船型が1,060隻と最も多くなっている。これは、我が国において内航船入港隻数が499総トン以下に偏っていることと比較して、北極圏内では大型の船舶が多いことを示している。

さらに、表4.1-1に示した船舶について、ICEクラスの登録の有無を、表4.1-2に船種船型別の内訳を含めて示した。不明船を除くとICEクラス船が2,043隻、非ICEクラス船が2,921隻確認されている。北緯66°以北であっても、図3.2-9に示されたArctic waters外、つまりスカンジナビア半島からアイスランド付近を含む海域では非ICEクラス船の航行が認められている。

表 4.1-1 北緯66°以北を航行した船舶の船種別・総トン区分別個船数

(単位：隻)

船種区分 総トン区分	貨物船	タンカー	液化ガス	コンテナ船	客船	漁船	作業船	砕氷船	その他	計	不明
0-500GT	42	11	0	0	57	471	308	0	15	904	
500-1000GT	66	10	2	0	19	264	134	0	5	500	
1000-3000GT	460	56	3	1	13	353	171	2	1	1060	
3000-6000GT	247	79	3	6	8	77	106	8	4	538	
6000-10000GT	150	32	4	28	8	21	61	12	2	318	
10000-30000GT	364	161	8	48	27	3	24	9	10	654	
30000-60000GT	400	79	5	76	20	1	6	0	9	596	
60000-100000GT	133	83	8	88	21	0	2	0	0	335	
100000GT-	6	16	18	7	11	0	1	0	0	59	
計	1868	527	51	254	184	1190	813	31	46	4964	4360

exactEarth Ltd 提供データより作成

(1) 不明船の取り扱い

表 4.1-3 に示すとおり MMSI など IHSF とマッチングしない船舶が 4,360 隻存在した。その存在理由と排出量算定する際の計算上の取り扱いについてここで述べる。

存在理由として、①300 総トン数未満の小型船であることからクラス B AIS を搭載し、かつ IHSF に登録されていないこと、②300 総トン数以上であっても内航船登録されている場合 IHSF に登録されていないこと、の二つが考えられる。

300 総トン未満の小型船については、AIS の搭載のルールが異なる。300 総トン以上の船舶については SOLAS 条約によって、クラス A の AIS の搭載が義務化される一方、クラス B とは搭載義務が課されない船舶（漁船やプレジャーボート）が搭載する安価な簡易型の AIS 装置である。つまり、クラス B の AIS を搭載している船舶は小型船が多くかつ、不明船が多くなる可能性がある。

そこで、AIS の MessageID からクラス A (ID=1,2,3) 、クラス B (ID=18,19) の隻数を見ると、それぞれ 2,646 隻と 1,714 隻である。前者の不明船は、ロシアやカナダなどの内航船である可能性が高い。他方、後者の不明船は、小型の漁船やプレジャーボート船であり、内航船である可能性が高い。船名などをキーとして手動で MarineTraffic.com 等等を用いて手動検索を行ったところ、一部のクラス A、クラス B の不明船は、ロシア海域あるいはノルウェー海域を航行する小型漁船あるいはバージ船であることが確認されている。これらについて総トン数が把握できる場合はその総トン数とその総トン数クラスの平均的な運航速度および搭載主機馬力を適用した。

手動の検索でもヒットしない場合、クラス A 搭載の不明船舶については、3,300 総トンクラス、クラス B 搭載の不明船舶については 300 総トンクラスであると仮定して、搭載主機関の定格馬力と航海速力と実速力の 3 乗比から主機の負荷率の算定を行うこととした。なお、不明船であっても、実速力及び航海時間は個別に exactAIS データの値を用いている。

表 4.1-2 北緯 66° 以北を航行した船舶の ICE クラス別・船種別・総トン区分別個船数

(単位：隻)

ICE Class	船種区分 総トン区分	貨物船	タンカー	液化ガス	コンテナ	客船	漁船	作業船	砕氷船	その他	合計	不明
有	0-500GT	6	4	0	0	5	56	50	0	0	121	
	500-1000GT	25	2	0	0	0	156	50	0	1	234	
	1000-3000GT	322	39	0	1	11	264	64	2	0	703	
	3000-6000GT	161	55	1	6	7	57	57	7	0	351	
	6000-10000GT	116	14	3	21	8	15	35	12	1	225	
	10000-30000GT	136	81	4	22	14	1	8	9	3	278	
	30000-60000GT	27	28	0	20	4	0	0	0	0	79	
	60000-100000GT	4	29	1	12	1	0	0	0	0	47	
	100000GT-	0	0	5	0	0	0	0	0	0	5	
	小計		797	252	14	82	50	549	264	30	5	2043
無	0-500GT	36	7	0	0	52	415	258	0	15	783	
	500-1000GT	41	8	2	0	19	108	84	0	4	266	
	1000-3000GT	138	17	3	0	2	89	107	0	1	357	
	3000-6000GT	86	24	2	0	1	20	49	1	4	187	
	6000-10000GT	34	18	1	7	0	6	26	0	1	93	
	10000-30000GT	228	80	4	26	13	2	16	0	7	376	
	30000-60000GT	373	51	5	56	16	1	6	0	9	517	
	60000-100000GT	129	54	7	76	20	0	2	0	0	288	
	100000GT-	6	16	13	7	11	0	1	0	0	54	
	小計		1071	275	37	172	134	641	549	1	41	2921
合計		1868	527	51	254	184	1190	813	31	46	4964	4360

exactEarth Ltd 提供データより作成

表 4.1-3 北緯 66° 以北を航行した船舶のクラス A/クラス B 別・船種別・総トン数別個船数及び不明船の割り振り

AIS Class	船種区分		(単位：隻)										合計
	総トン区分	不明	貨物船	タンカー	液化ガス	コンテナ	客船	漁船	作業船	砕氷船	その他	不明	
A	0-500GT		37	11	0	0	55	434	303	0	13	169	1022
	500-1000GT		66	10	2	0	18	259	134	0	5	2	496
	1000-3000GT		460	56	3	1	13	352	171	2	1	9	1068
	3000-6000GT		247	79	3	6	8	77	106	8	4	2463	3001
	6000-10000GT		150	32	4	28	8	21	61	12	2	0	318
	10000-30000GT		364	161	8	48	27	3	24	9	10	3	657
	30000-60000GT		399	79	5	76	20	1	6	0	9	0	595
	60000-100000GT		133	83	8	88	21	0	2	0	0	0	335
	100000GT-		6	16	18	7	11	0	1	0	0	0	59
	小計		1862	527	51	254	181	1147	808	31	44	2646	7551
B	0-500GT		5	0	0	0	2	37	5	0	2	1713	1764
	500-1000GT		0	0	0	0	1	5	0	0	0	1	7
	1000-3000GT		0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
	3000-6000GT		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6000-10000GT		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	10000-30000GT		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	30000-60000GT		1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	60000-100000GT		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	100000GT-		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	小計		6	0	0	0	3	43	5	0	2	1714	1773
合計		1868	527	51	254	184	1190	813	31	46	4360	9324	

exactEarth Ltd 提供データより作成

4.1.2 燃料消費量で見た船舶活動量の解析

(1) 月ごとの活動量の解析

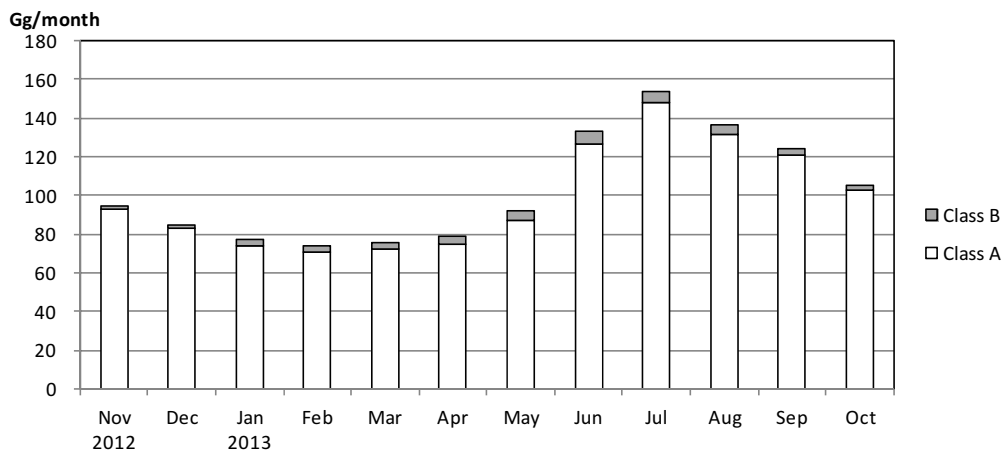
本事業においては、対象海域における LAC の排出係数を船型・船種に係わらず一定とされているため、燃料消費量の比率は、そのまま LAC に反映される。

北緯 66° 以北における船舶の月別・AIS クラス別燃料消費量を図 4.1-1 に示す。ここでは、不明船を含めて ClassA と ClassB の船舶の内訳を示した。活動量は、雪氷が減少しきった 6 月頃から増え始め、7 月でピークとなり、以降次の冬季シーズンにより雪氷が増加するにつれて徐々に減少している。

次に AIS クラスの比率をみる。AIS のうちクラス A は、SOLAS 条約によって「AIS の搭載が義務化された船舶」が搭載すべき AIS 装置であり、クラス B は搭載義務のない船舶が任意に搭載する簡易型 AIS 装置である。クラス B は、4.1.1 で述べたようにプレジャーボートや小型漁船、タグボート等の作業船等が搭載しているケースが多く、比較的小型の船舶であるため、クラス A 搭載船と比べて燃料消費量は全体の 5%以下と少ない。

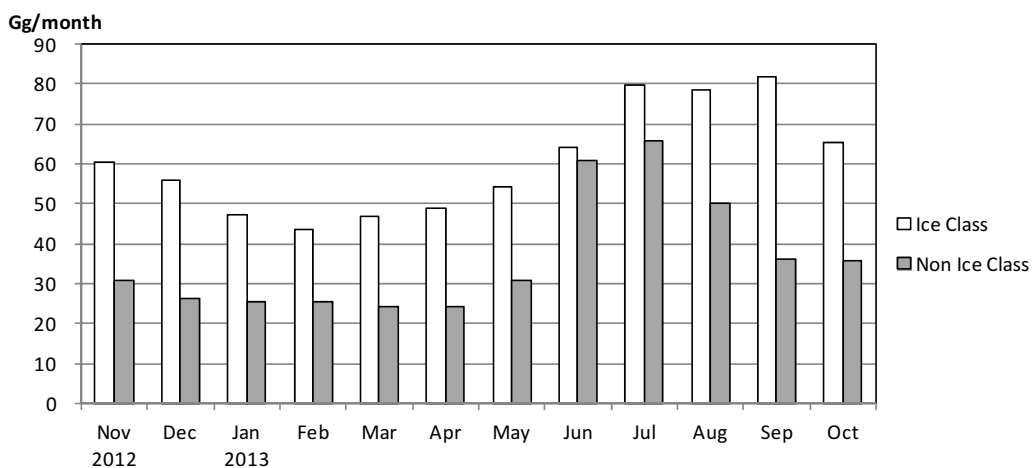
次に、ICE クラスありの船舶と ICE クラスなしの船舶の活動量の季節変化を図 4.1-2 で考察する。不明船については ICE クラスの判断がつかないので本集計では除いている。全体的に ICE クラスありの船舶が ICE クラスなしの船舶の活動量を上回っているが、6 月と 7 月の夏季については、ICE クラスありとなしの活動量はほぼ同等である。この点については、この後の (2) で更に考察する。

最後に、北緯 66° 以北における船舶の月別・緯度区分別燃料消費量を図 4.1-3 に示した。不明船については、位置と速度は明確になっているが、船舶の総トン数と主機の大きさが把握できないため、ここでは集計に含めていない。船舶の活動量は北緯 70° 以下が北緯 66° 以北の活動量全体の約 50%を占め、北緯 75° 以下では全体の約 92%となっている。また、北緯 75° 以北は夏季及び秋季に活動量が集中している。地域的な分布については、(3) で更に検討を行う。



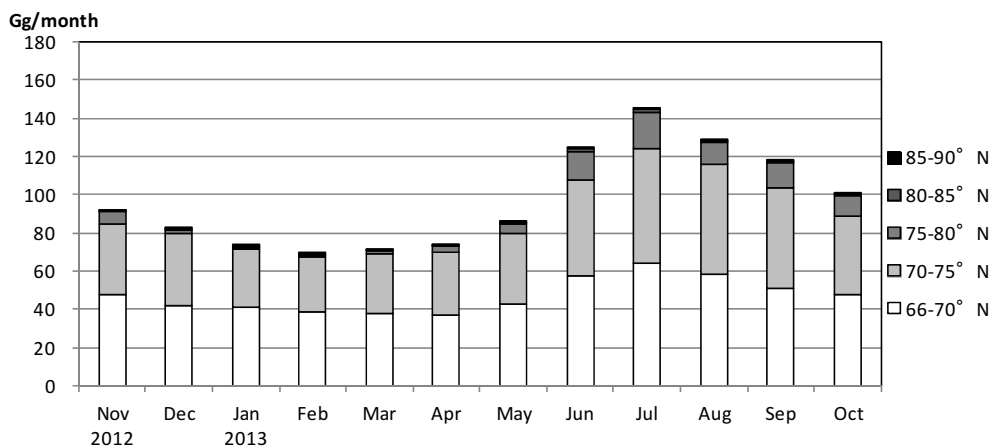
exactEarth Ltd 提供データより作成

図 4.1-1 北緯 66° 以北における船舶の月別・AIS クラス別燃料消費量 (不明船を含む)



exactEarth Ltd 提供データより作成

図 4.1-2 北緯 66° 以北における船舶の月別・ICE クラス別燃料消費量 (不明船を含まない)



exactEarth Ltd 提供データより作成

図 4.1-3 北緯 66° 以北における船舶の月別・緯度区分別燃料消費量 (不明船を含まない)

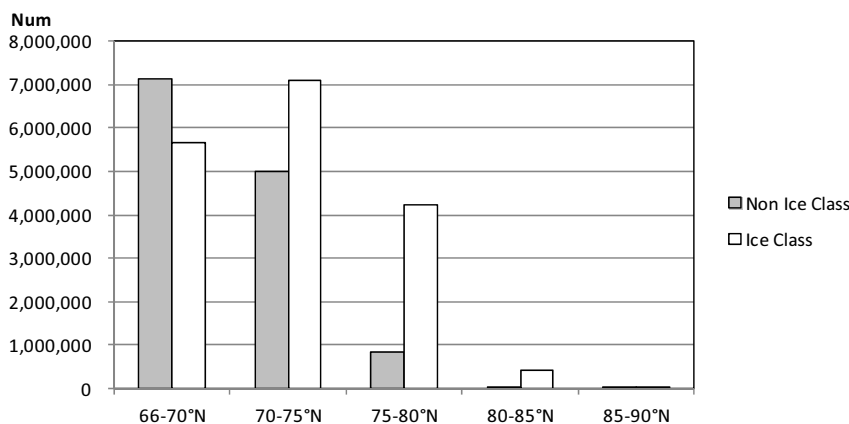
(2) 緯度区分別・月別・ICE クラス別活動量

緯度区分別・ICE クラス別グリッド内合計存在隻数を図 4.1-4 に示す。以下本項に示す図においては、(1)の図 4.1-3 と同様に不明船を含まない。

グリッド内合計存在隻数で見ると、ICE クラスは北緯 70-75° 帯でピークを持つのに対して、非 ICE クラス船では、70° 以南でピークをもっている。

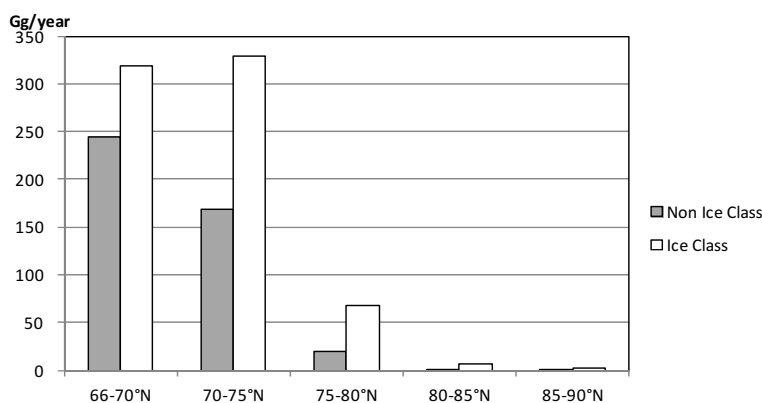
緯度区分別・ICE クラス別燃料消費量を図 4.1-5 に示す。北緯 75° 以北で活動する船舶の約 76%は ICE クラスを有している船舶である。また、65-70° 帯など、非 ICE クラス船の燃料消費量が存在隻数に対して小さくなっている。これは 1 隻あたりの平均的な存在時間が非 ICE クラス船で 1,511 時間/隻に対して、ICE クラス船で 2,545 時間であり、非 ICE クラス船は北緯 60°以南で活動する時間が多いのに対して、ICE クラス船は北緯 60°以北でのみ活動している実態が明らかである。

最後に船種別・ICE クラス別燃料消費量を図 4.1-6 に示す。タンカーについては ICE クラス登録船が多くなっている。



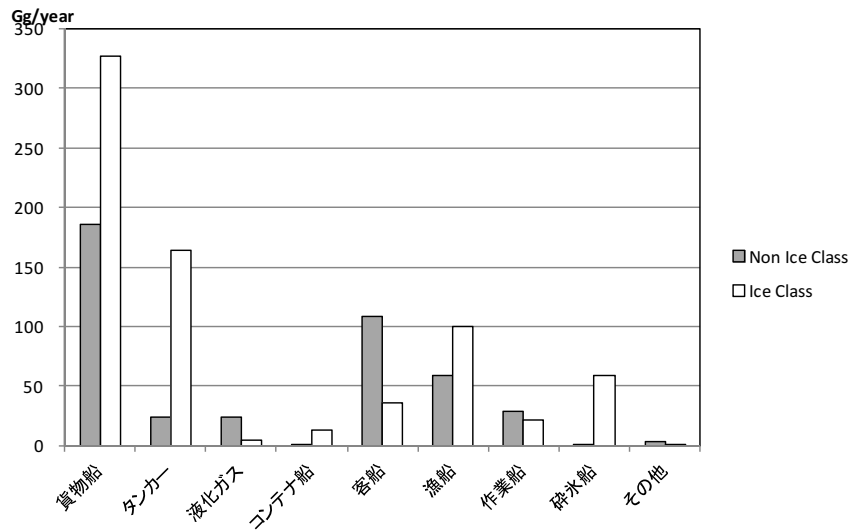
exactEarth Ltd 提供データより作成

図 4.1-4 北緯 66° 以北における船舶の緯度区分別・ICE クラス別隻数 (不明船を含まない)



exactEarth Ltd 提供データより作成

図 4.1-5 北緯 66° 以北における船舶の緯度区分別・ICE クラス別燃料消費量 (不明船を含まない)



exactEarth Ltd 提供データより作成

図 4.1-6 北緯 66° 以北における船舶の船種別・ICE クラス別燃料消費量 (不明船を含まない)

(3) 船舶活動量の地理的分布

2013年11月～2014年10月における北緯66°以北海域の船舶活動量(燃料消費量)の月別水平分布図を図4.1-7と図4.1-8に示し、季節別及び年間の月平均水平分布図を図4.1-9に示す。

地理的分布を見た場合、図3.2-10で示す本事業で定義する”Non Arctic area”と”Arctic area”との間で大きな差異があることが明らかである。すなわち、アイスランド、スカンジナビア半島、及びBjørnøya島を結ぶ海域内においては、年間を通じて大量の船舶活動量が観測されている。北緯66°以北でArctic waters外における活動量はおよそ75%に及ぶ。他方、Arctic Areaにおいては、海氷が発達している冬季においては、沿岸航路においても殆ど活動量が観測されず、海氷が減退し始める5月頃から、海氷が発達する12月までは、スカンジナビア半島からロシア沿岸付近を経てベーリング海峡を経て東アジアに達する北東航路(North East Passage)や、グリーンランド西岸からカナダボフォート湾からベーリング海峡にいたる北西航路(North West Passage)の利用が確認できる。このように、大きな差異がある現状を踏まえると、対策の必要性を検討する際には、二つの海域を個別に解析することが必要になると考えられる。

他方、北極点や無人の離島への航路が比較的高い活動量として確認できるが、これは主として調査船舶によるもので低い速度で航行するため船舶の存在時間が多くなることを反映しているものとする。

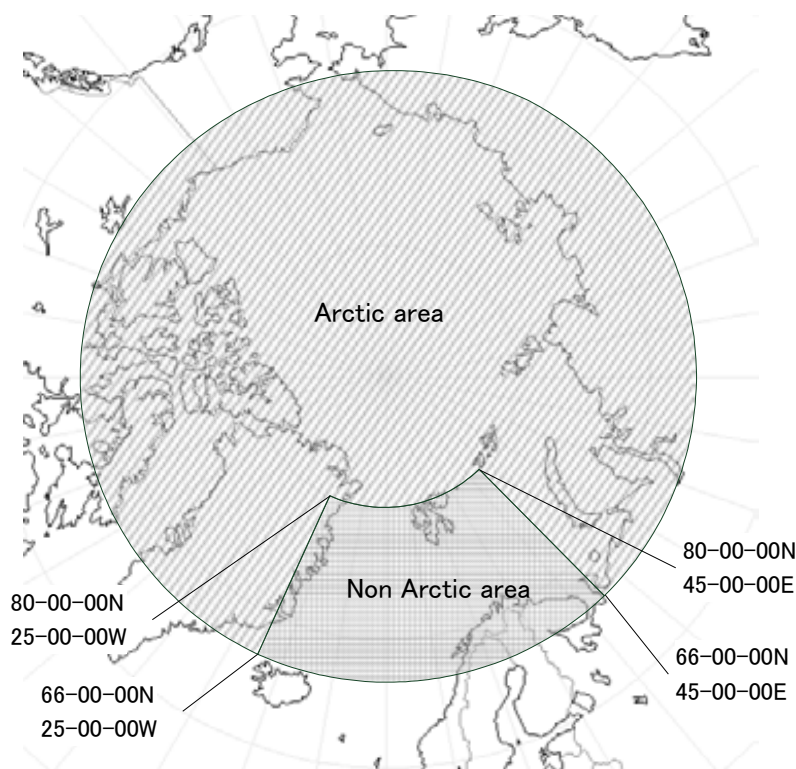
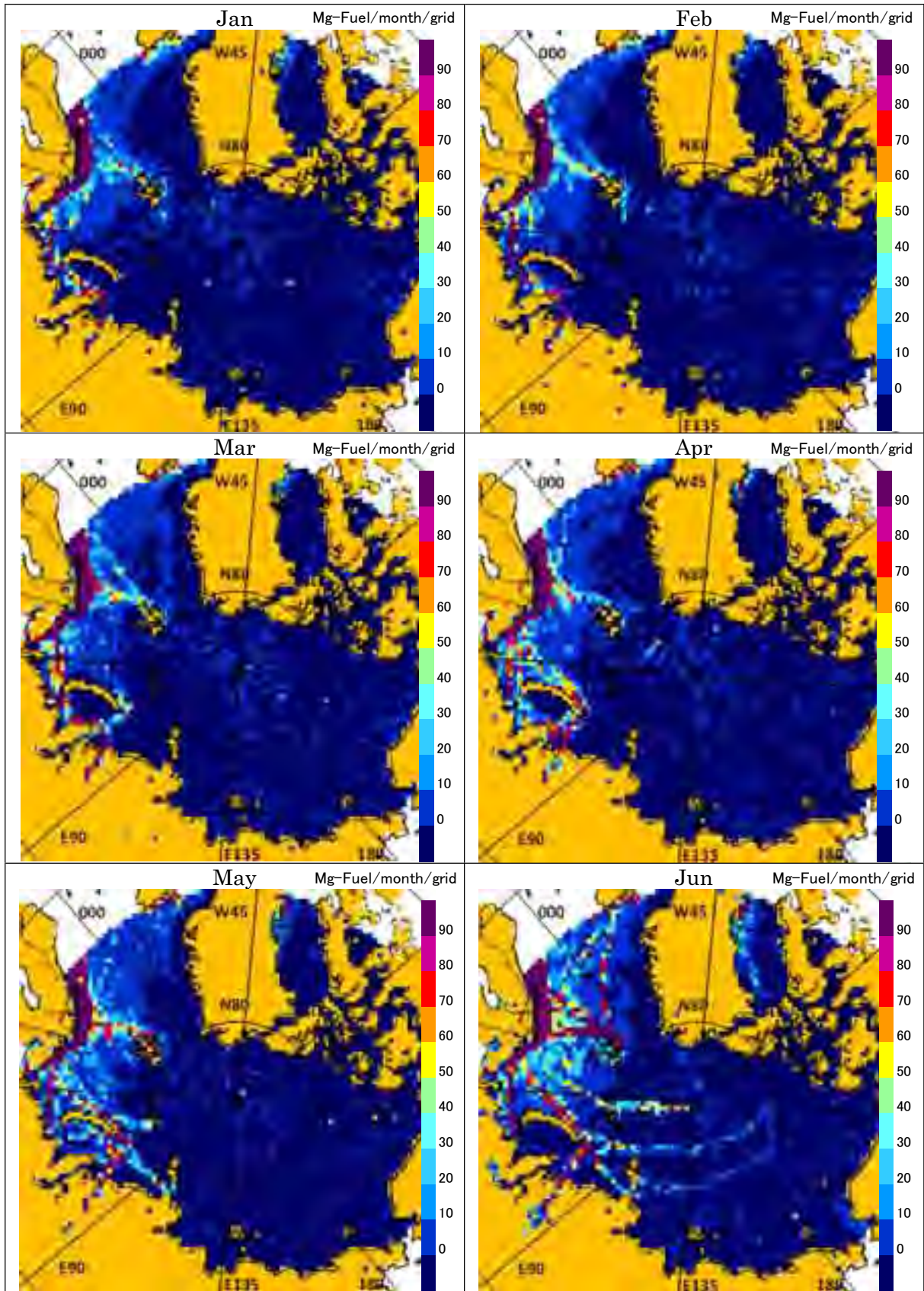


図 3.2-10 本事業で定義する Arctic area 及び Non Arctic area

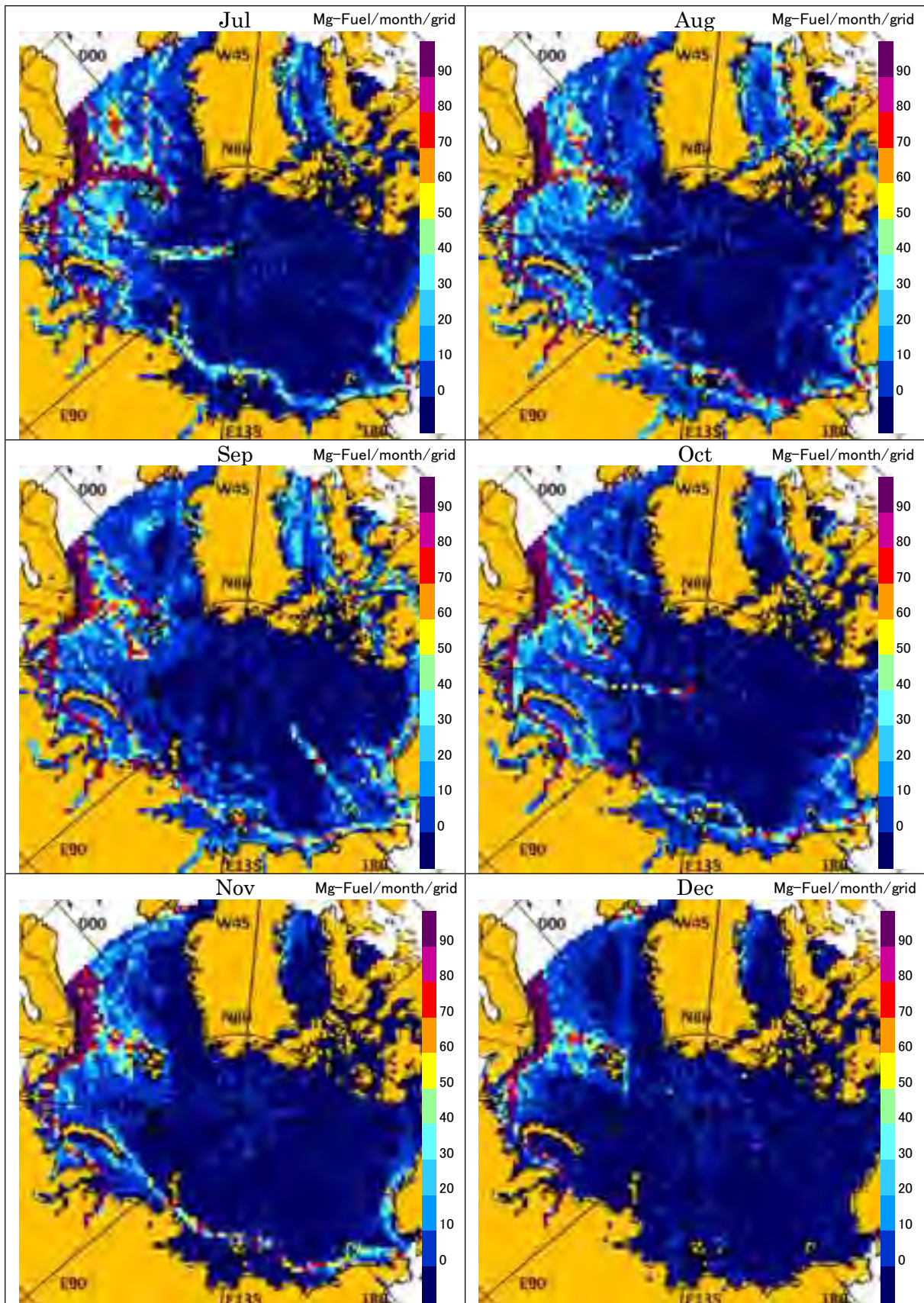
(図 3.2-10 の再掲)



ベージュは陸域、白色は推定対象外の海域を示す。

exactEarth Ltd 提供データより作成

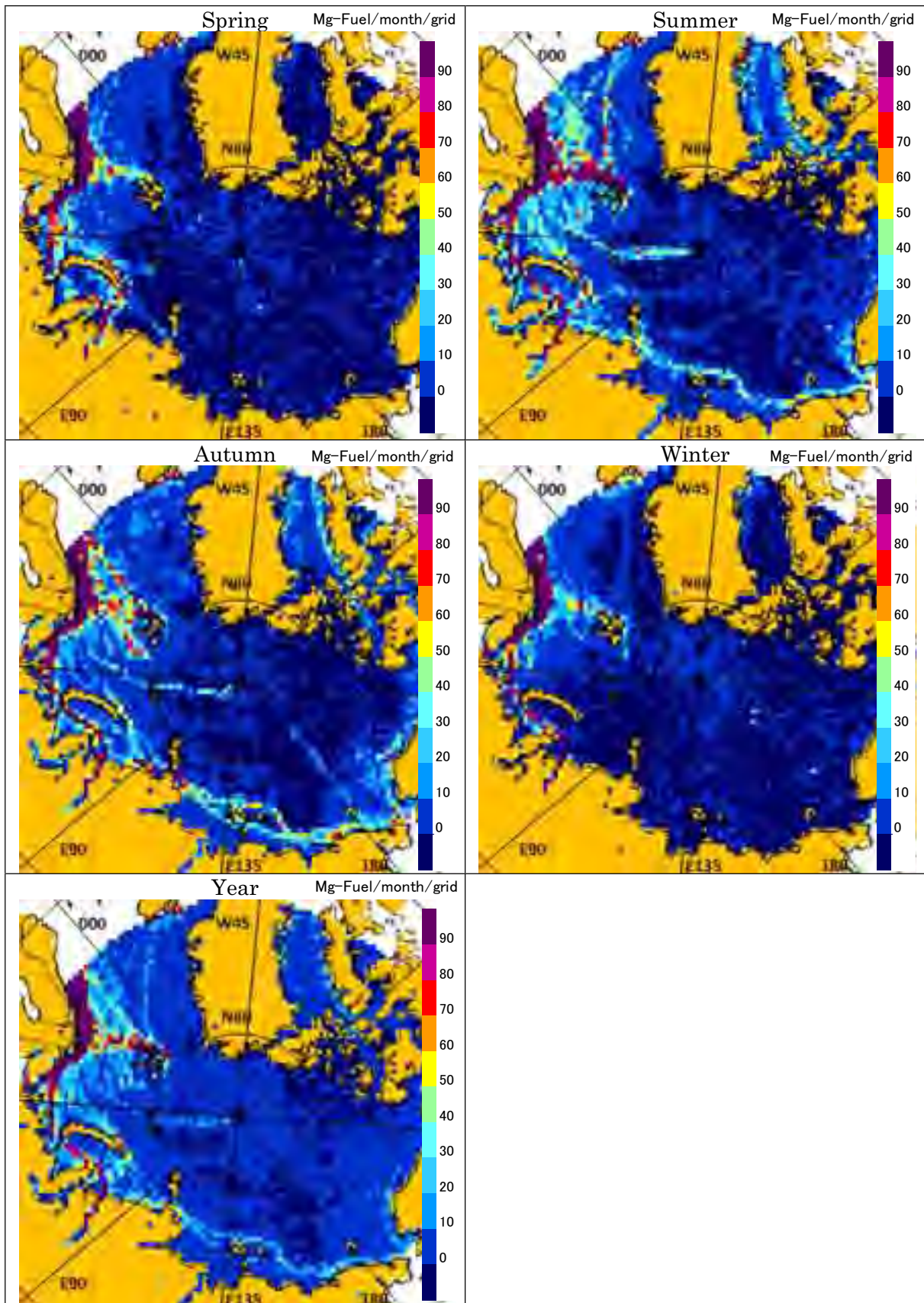
図 4.1-7 北緯 66° 以上における船舶活動量 (月燃料消費量) の月別水平分布図 (1~6 月)



ページは陸域、白色は推定対象外の海域を示す。

exactEarth Ltd 提供データより作成

図 4.1-8 北緯 66° 以上における船舶活動量 (月燃料消費量) の月別水平分布図 (7~12 月)



ページは陸域、白色は推定対象外の海域を示す。

exactEarth Ltd 提供データより作成

図 4.1-9 北緯 66° 以上における船舶活動量(月燃料消費量)の季節別平均及び年平均水平分布図

4.1.3 船舶活動量の解析

(1) 平均航行速力に対する実航行速度との比較

IHSFに記載された運航速度を船種・船型毎に平均した値(以下、平均航行速力)を表4.1-4に示し、他方、今回の衛星AISデータの解析による平均実対地速度(以下、実航行速度)を算出し、比較する。全ての船種を対象とした総トン区分別平均航行速力を図4.1-10に、活動量の比較的多い貨物船、客船、漁船の平均航行速力を図4.1-11～図4.1-14に示す。

大型の船型ほど航行速力が大きく、客船については0～500総トン及び500～1,000総トンの船型の航行速力も比較的大きい。後者については、比較的高速で運航されるフェリーやクルーズ客船の運航状況を反映しているものと考えられる。

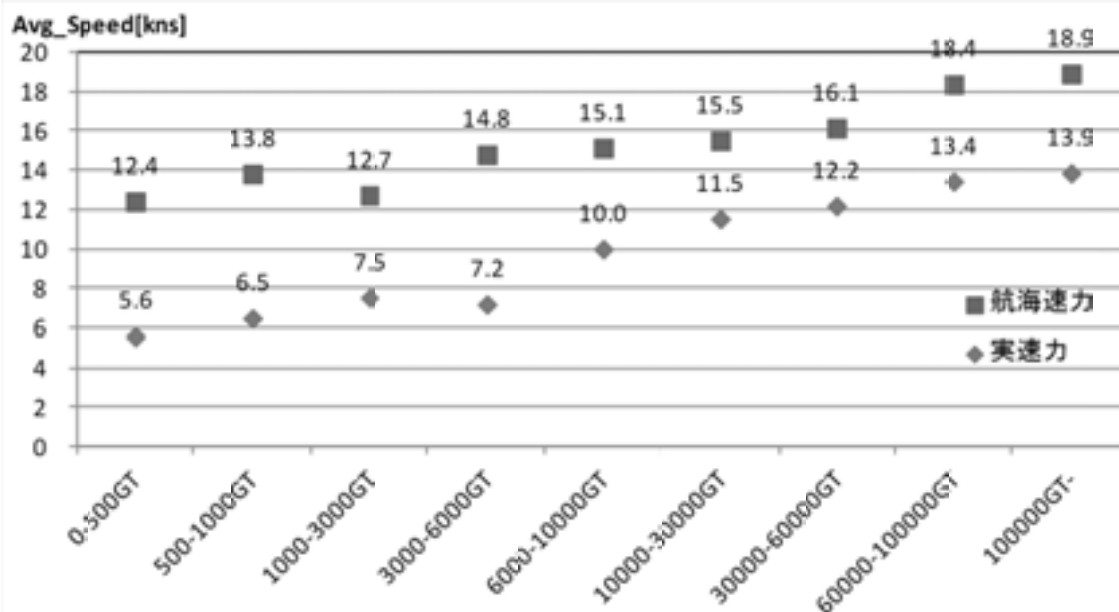
さらに、図4.1-11～図4.1-14中に示した航海速力と実平均速力の比率をみると、漁船を除きほぼ0.76から0.8の範囲で収まっており、特定の船型・船種で減速航行を行っている明確な傾向は見られなかった。

表 4.1-4 船種別・総トン区分別平均航行速力

(単位：kns)

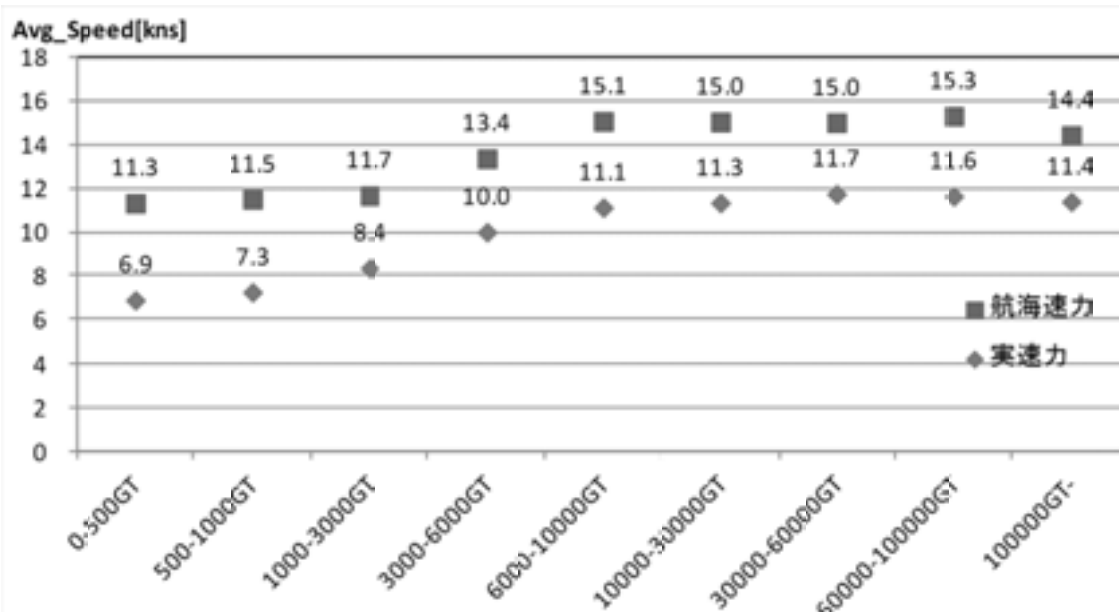
総トン区分 船種	0-500 GT	500- 1000 GT	1000- 3000 GT	3000- 6000 GT	6000- 10000 GT	10000- 30000 GT	30000- 60000 GT	60000- 100000 GT	100000 GT
貨物船	6.9	7.3	8.4	10.0	11.1	11.3	11.7	11.6	11.4
タンカー	4.7	6.6	7.3	9.3	9.3	11.9	11.2	10.7	12.5
液化ガス		6.3	10.7	13.0	13.1	13.7	14.3	13.3	12.2
コンテナ船			14.5	10.7	12.7	13.8	16.6	18.2	20.1
客船	15.0	15.8	8.7	10.4	11.3	14.2	15.5	16.9	17.1
漁船	5.6	5.9	7.2	6.8	7.2	8.8			
作業船	5.3	5.9	6.0	7.2	7.2	7.1	3.7	1.9	
砕氷船			7.2	8.5	9.5	10.3			
その他	8.2	5.6	11.9	1.8	5.5	6.0	1.7		
不明	5.3	5.1	4.2	6.8		10.2			
全船種	5.6	6.5	7.5	7.2	10.0	11.5	12.2	13.4	13.9

exactEarth Ltd 提供データより作成



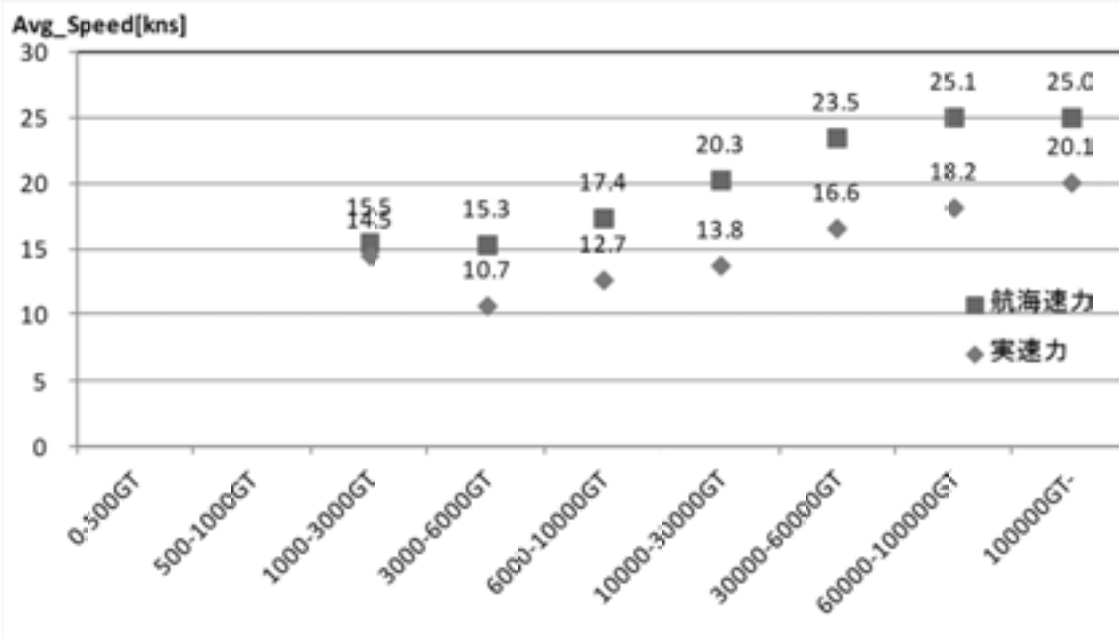
exactEarth Ltd 提供データより作成

図 4.1-10 全船種を対象とした IHSF における航海速度と衛星 AIS の平均速度の総トン区分別比較



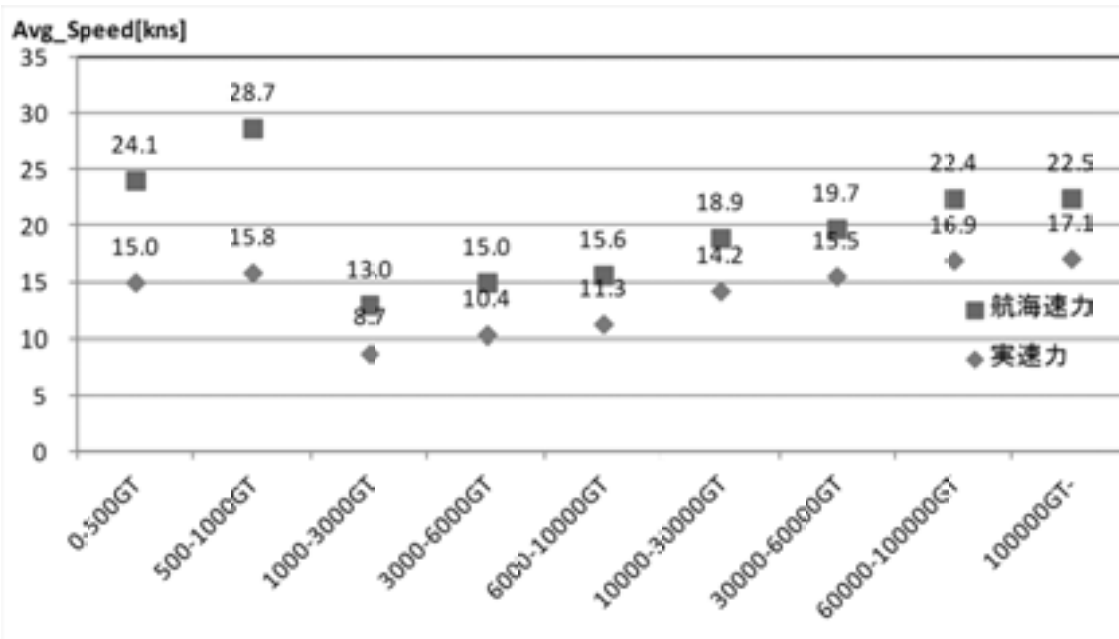
exactEarth Ltd 提供データより作成

図 4.1-11 貨物船を対象とした IHSF における航海速度と衛星 AIS の平均速度の総トン区分別比較



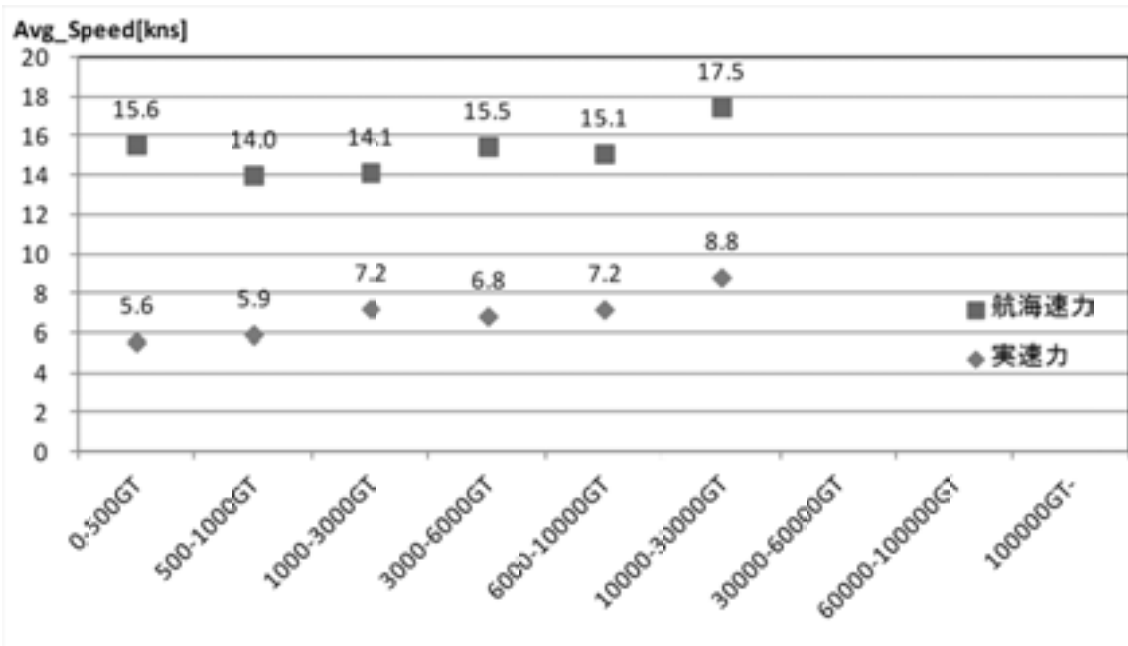
exactEarth Ltd 提供データより作成

図 4.1-12 コンテナ船を対象とした IHSF における航海速度と衛星 AIS の平均速度の総トン区分別比較



exactEarth Ltd 提供データより作成

図 4.1-13 客船を対象とした IHSF における航海速度と衛星 AIS の平均速度の総トン区分別比較



exactEarth Ltd 提供データより作成

図 4.1-14 漁船を対象とした IHSF における航海速度と衛星 AIS の平均速度の総トン区分別比較

(2) 船種別運航時間及び航行距離でみた活動量の解析

船種別運航時間及び航行距離を表 4.1-5 に示す。

延べ運航時間及び延べ航行距離の合計は、隻数が多いことから、漁船が最も大きく、次いで貨物船となった。

1 隻あたりの平均運航時間は、客船、漁船、作業船、砕氷船が長く、貨物船など一般商船は短くなっている。これは、前者の船種群が、北緯 66° 以北の狭い海域に留まるのに対して、後者の船種群は、北緯 66° 以南の海域を航行することを反映しているものと考えられる。

他方、平均航行距離は客船が最も大きくなった。その結果、平均航行速度も全船種の中で最も高くなっている。

参考として、昨年度に算出した AMSA2009 で整備された 2004 年における航行データベースの航行距離の船種別集計結果を表 4.1-6 に示す。平均航行距離は、漁船も含めていずれの船種も 10 倍近くに増加している。AMSA2009 で整備されたデータについて、隻数に関してはサンプリング数の少なさなどから過小評価の可能性のあるものの、O-D 間の航行距離については大きな誤差要因はないと考えられる。

このため、平均航行距離の増加量は、2004 年に比較して 2012-2013 年では、いずれの船舶も北緯 66° 以北の海域に存在すると共に、同海域内で長い航路で運用されている可能性を示唆する。

表 4.1-5 船種別運航時間及び航行距離

船種	延べ運航時間 [hour]	延べ航行距離 [km/year]	隻数	平均運航時間 [hour/ship]	平均航行距離 [km/ship/year]
貨物船	2,608,596	45,427,947 (23.5%)	1,873	1,393	24,254
タンカー	553,925	9,821,775 (5.1%)	532	1,041	18,462
液化ガス	33,777	767,514 (0.4%)	51	662	15,049
コンテナ船	79,662	1,806,165 (0.9%)	254	314	7,111
客船	496,130	12,213,666 (6.3%)	198	2,506	61,685
漁船	5,860,258	64,324,894 (33.3%)	1,631	3,593	39,439
作業船	1,255,590	14,881,882 (7.7%)	572	2,195	26,017
砕氷船	75,641	1,268,756 (0.7%)	31	2,440	40,928
その他	87,035	538,109 (0.3%)	50	1,741	10,762
不明	4,373,839	42,362,987 (21.9%)	4,132	1,059	10,252
全船	15,424,452	193,413,695	9,324	1,654	20,744

exactEarth Ltd 提供データより作成

北緯 66° 以北を航行した船舶を対象に、北緯 60° 以北で集計

表 4.1-6 AMSA2009¹¹で整備された 2004 年における航行データベースの
航行距離の船種別集計結果

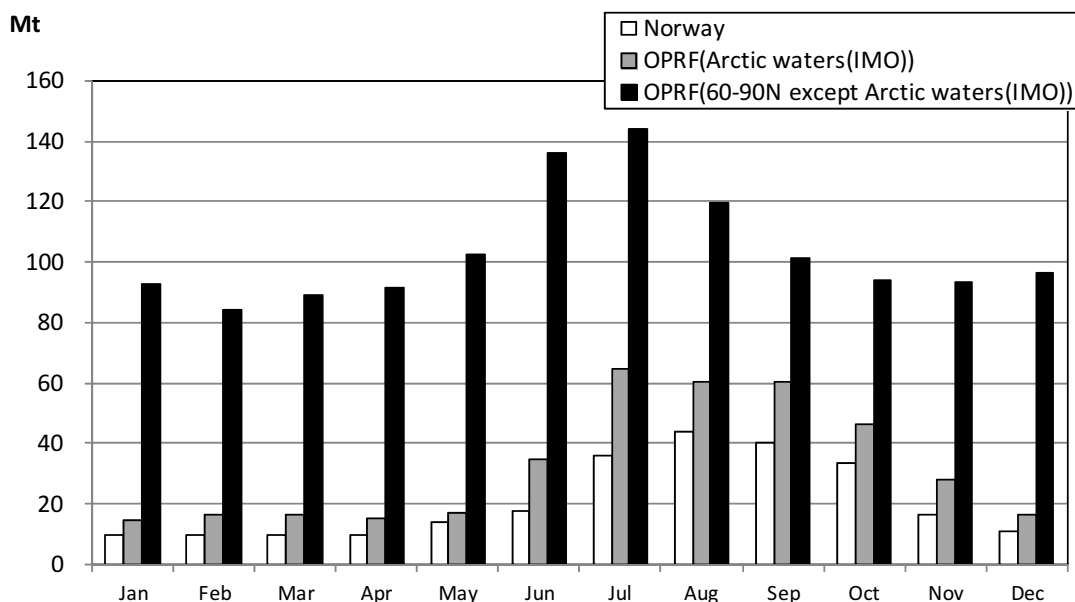
Ship Type	Total sailed distance [km/year]	No. of ships [ships/year]	average distance [km/ship/year]
General Cargo	1,304,198 (26.2%)	651	2,003
Passenger	786,053 (15.8%)	412	1,908
Bulk Carrier	709,736 (14.2%)	429	1,654
Tanker	596,479 (12.0%)	430	1,387
Government	456,125 (9.2%)	183	2,492
Container	445,887 (8.9%)	143	3,118
Fishing	432,289 (8.7%)	253	1,709
Unknown	136,301 (2.7%)	87	1,567
Tug Barge	65,800 (1.3%)	42	1,567
OSV	49,136 (1.0%)	58	847
Pleasure Craft	2,451 (0.0%)	2	1,226
Total	4,984,455	2,690	-

¹¹ AMSA2009 (Arctic Marine Shipping Assessment 2009) : 2004 年を対象として北極海に国土を持つ国を対象とした航行データベース。ただし、カナダについては 7 月から 12 月のみとなっている。

(3) 既存の活動データとの比較

ノルウェーが公表した 2011 年の AIS データに基づく、北極海における船舶からのブラックカーボン排出量算定結果より、船舶の燃料消費量に換算して本年度事業で作成した各月の船舶活動量と比較すると図 4.1-15 に示すとおりとなる。図 4.1-16 は、ノルウェーが MEPC において発表した各月の北極海におけるブラックカーボン排出量を示したものであり、図 4.1-15 は図 4.1-16 からブラックカーボンの排出係数 0.18 kg/ton fuel により逆算したものである。ノルウェーが公表したデータは、図 4.1-16 のとおり IMO で定義する北極海 (Arctic waters) での値であることから、本事業で算定した値と比較するため、60° 以北全ての船舶燃料消費量と IMO で定義する北極海 (ただし北緯 60° 以北のみであり、北緯 66° 以北を航行した船舶のみ対象) における船舶燃料消費量をそれぞれ図 4.1-17 と図 4.1-18 に示す。

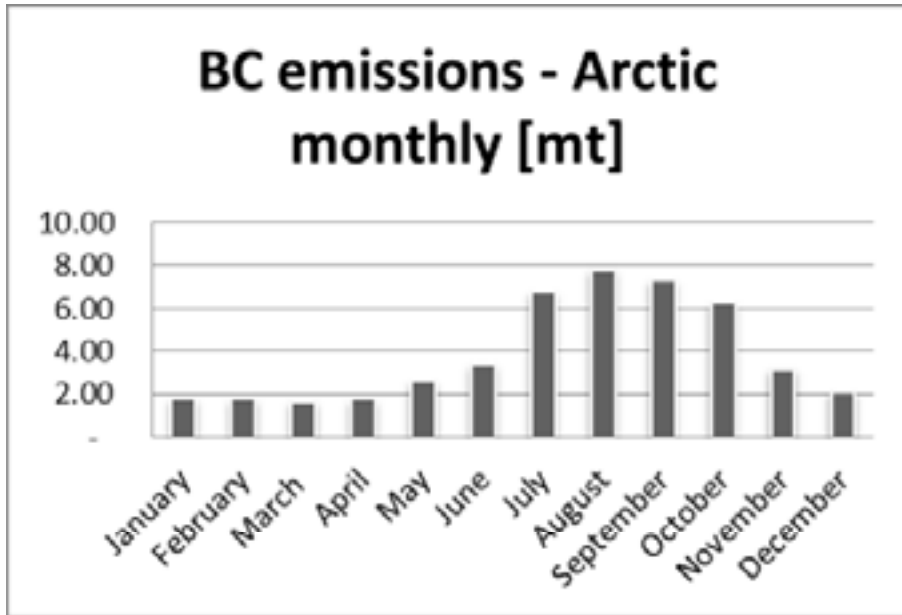
いずれも北緯 60° 以北を対象 (ただし、OPRF 事業においては北緯 66° 以北を航行した船舶のみ計算対象) としており、本事業で推定した北極海における船舶の活動量 (燃料消費量) は、ノルウェーの推定値の 1.2~1.9 倍となった。ノルウェーの調査対象年は 2011 年であり、exactAIS は 2012 年 11 月~2013 年 10 月が対象であることを考慮すると、Arctic water 内の燃料消費量は、1 年後の伸びを示している可能性もある。他方、夏季における両者の差異は冬季における差異に比較して大きくなっている、これは、Norway の衛星 AIS が一つの衛星で収集されているのに対して、exactAIS は現在 6 つの衛星で運航されていることから、両者の衛星 AIS の把握頻度に差があることによって生じた可能性もある。



exactEarth Ltd 提供データより作成

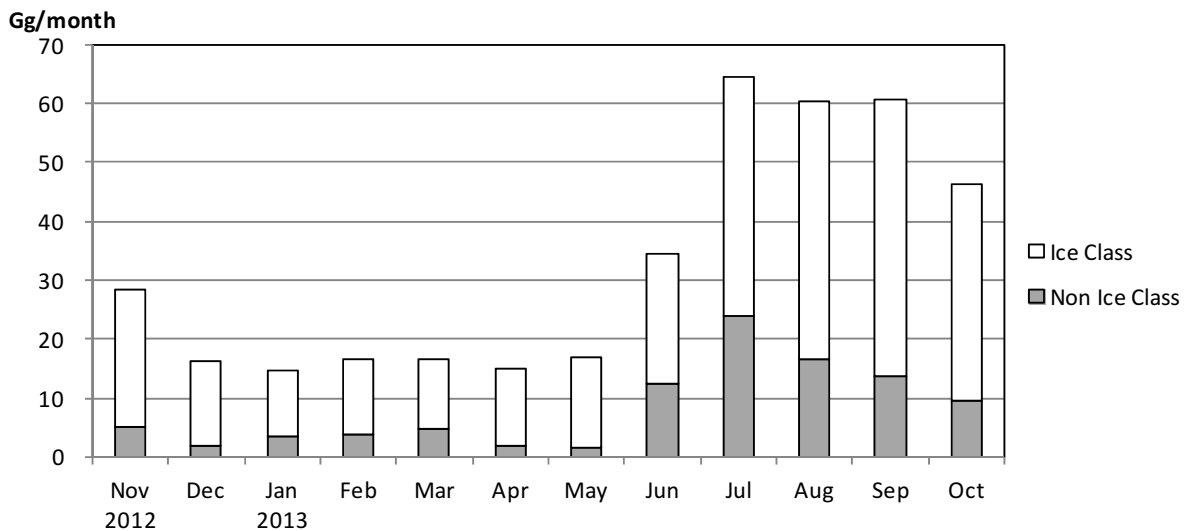
Norway : ノルウェー公表の BC 排出量から燃料消費量を推計
(BC の排出係数=0.18 kg/ton fuel として計算)

図 4.1-15 北極海における月別燃料消費量の比較



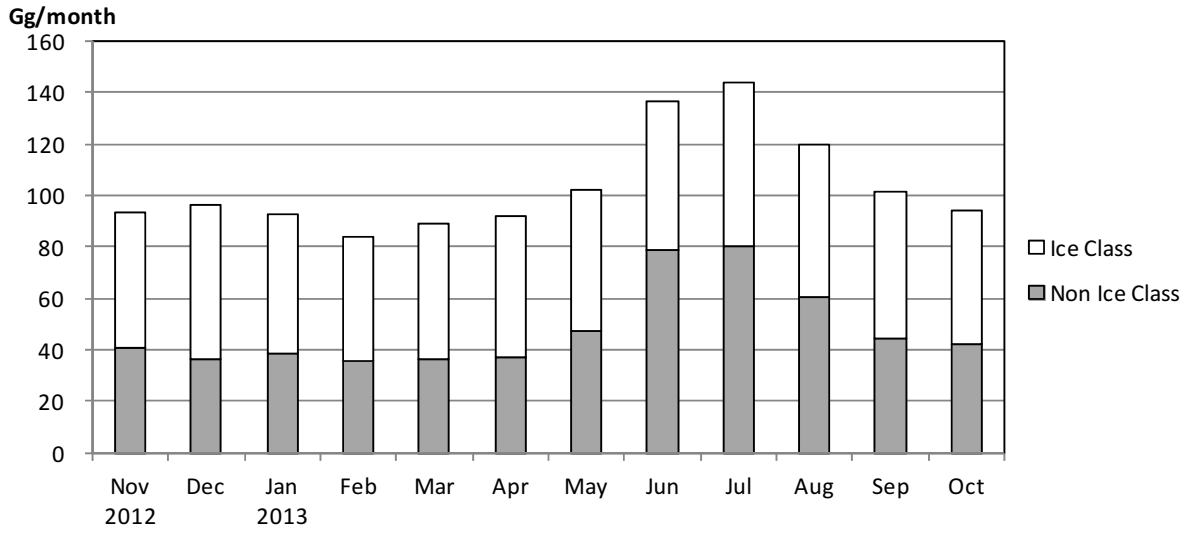
出典：MEPC65/4/22 AIR POLLUTION AND ENERGY EFFICIENCY
Emissions of Black Carbon from shipping inside and outside the Arctic Submitted by Norway

図 4.1-16 ノルウェーが公表した北極海における 2011 年を対象とした船舶からの BC の月別排出量 (BC の定義及びその対象範囲は本事業と大幅に異なる)



exactEarth Ltd 提供データより作成

図 4.1-17 北緯 60° 以北の Arctic waters における月別燃料消費量 (グリーンランド南端の北緯 60° 以南の海域は含まない)



exactEarth Ltd 提供データより作成

図 4.1-18 北緯 60° 以北の Arctic waters 以外の海域における月別燃料消費量

4.2 北極圏における船舶からの LAC 排出量の解析

4.2.1 LAC 排出量

本事業で定義する Arctic area (25° W-45° E かつ 66° N-80° N を除く 66° N 以北) と Non Arctic area (25° W-45° E かつ 66° N-80° N) のそれぞれにおいて、船舶から排出される LAC の排出総量算出結果は表 4.2-1 に示すとおりである。

1 年間で 2,161 Mg/year の LAC が排出され、そのうち 82% の 1,770 Mg/year はスカンジナビア半島及びアイスランド付近の Non Arctic area から排出されており、Arctic area 海域から排出される LAC は全体の 17% に相当する 391 Mg/year である。

表 4.2-1 北緯 66° 以北の船舶からの LAC 排出量 (2012 年 11 月～2013 年 10 月)

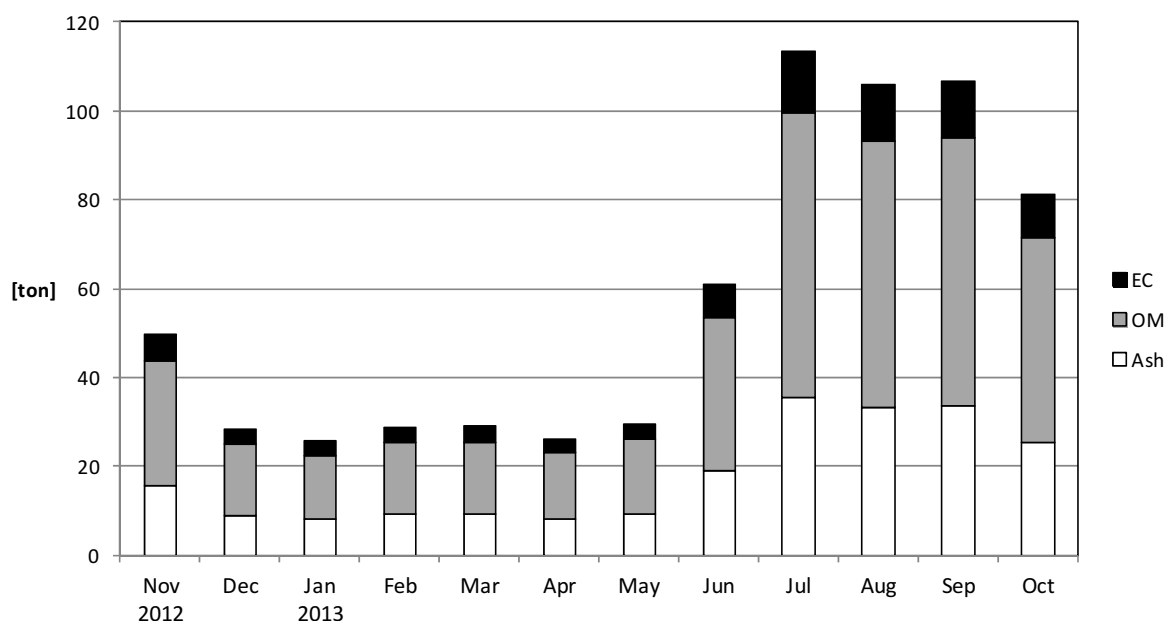
LAC 排出量	(単位 : Mg/year)			
	90°N -80°N (about 1100 km from north pole)	90°N -75°N (about 1650 km from north pole)	90°N -70°N (about 2200 km from north pole)	90°N -66°N (about 2290 km from north pole)
Arctic area	18	88	268	391
Non Arctic area	-	90	815	1,770
合計	18	178	1,083	2,161

4.2.2 月別でみた LAC 排出量の解析

図 4.2-1 に北緯 66° 以北における船舶からの LAC (EC+OM+Ash) の排出量を月別に示す。

LAC の排出量は、氷床が融解する夏季と秋季に船舶活動量が多くなるため、6 月から多くなり始め、7 月が最も多く 113 ton/month (17%) となり、8 月は 106 ton/month (16%) 9 月は 107 ton/month (16%) と排出量が多くなった。10 月から排出量は徐々に減少し、12 月から翌年の 5 月までは船舶活動量が少なく、25~30 ton/month で推移した。

6~8 月を夏季、9~11 月を秋季とすると、それぞれ 280 ton (41%) と 238 ton (35%) となり、春季の 3~6 月は 85 ton (12%)、冬季の 12 月~翌年 2 月は 83 ton (12%) となった。



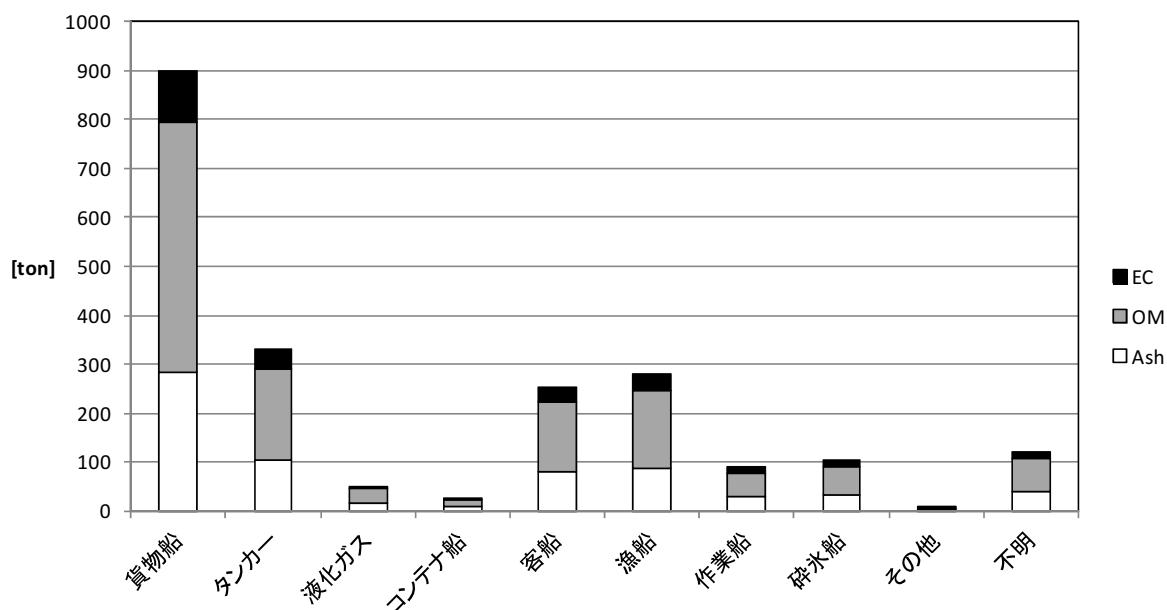
exactEarth Ltd 提供データより作成

図 4.2-1 北極海における船舶からの成分別 LAC 排出量(ton/month)
(月別・成分別、北緯 66° 以北)

4.2.3 船種別でみた LAC 排出量の解析

図 4.2-2 に北緯 66° 以北における船舶からの LAC (EC+OM+Ash) の排出量を船種別に示す。

LAC の年間総排出量 2,161 ton/year のうち、貨物船が最も多く 901 ton/year で全体の約 42% を占め、次いでタンカーの 330 ton/year (約 15%)、漁船の 279 ton/year (約 13%)、客船の 254 ton/year (約 12%) の順で多くなった。



exactEarth Ltd 提供データより作成

図 4.2-2 北極海における船舶からの船種別 LAC 排出量(ton/month)
(月別・船種別、北緯 66° 以北)

4.2.4 船籍別でみた LAC 排出量の解析

図 4.2-3 に北緯 60° 以北における船籍別の LAC (EC+OM+Ash) 排出量を、北極圏沿岸国 (ノルウェー、ロシア、グリーンランド(デンマーク船籍として取り扱った)、アメリカ、カナダ、アイスランド) とそれ以外の国籍別に示す。本図の集計に限り、北緯 60° 以北で取り扱っていることに留意されたい。

LAC 年間総排出量 2,874 ton/year (北緯 60° 以北) のうち、約 51% の 1,481 ton/year が北極圏沿岸国 (図中 □ で囲んだ国) の船籍の船舶から排出され、残りの約 49% の 1,393 ton/year はその他の船籍の船舶から排出された。ノルウェーとロシアの船籍の船舶からの排出は他の船籍からの排出を大きく上回っており、便宜置籍船国以外では、デンマークとアイスランドが続く。年間を通じた Non Arctic area 内 あるいは夏季におけるロシアとの航行量が多いことを反映している。

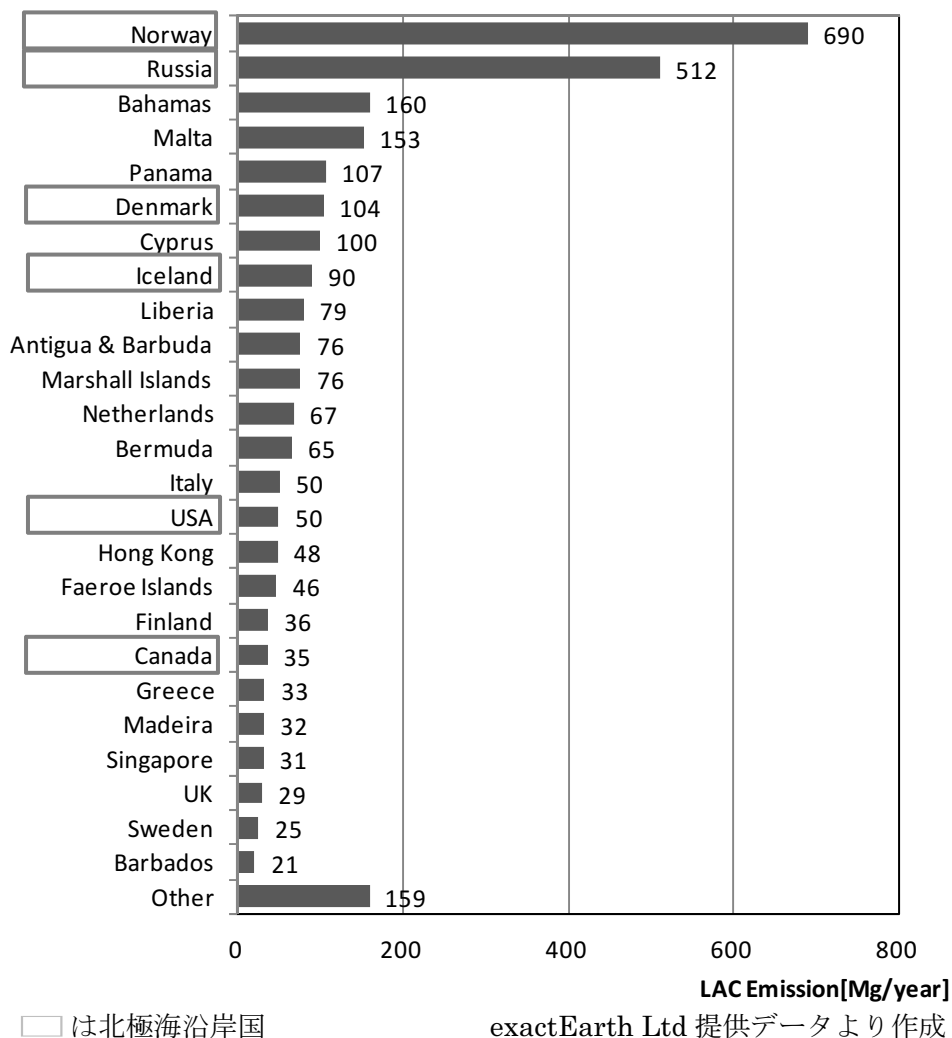
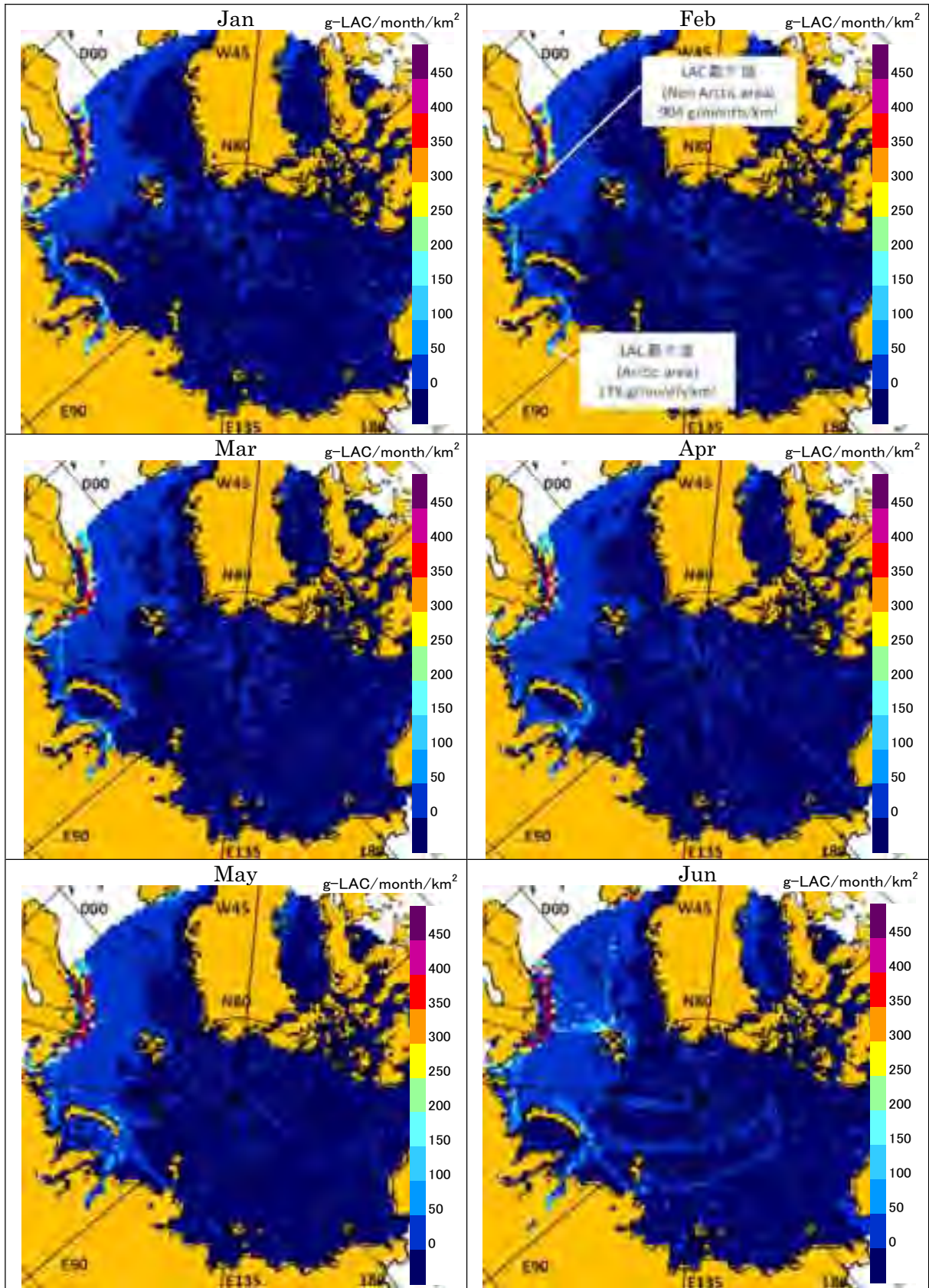


図 4.2-3 北極海における船舶からの LAC 排出量 (国籍別、北緯 60° 以北)

4.2.5 地理的分布でみた LAC 排出量の解析

2013 年 11 月～2014 年 10 月における北緯 66° 以北海域の LAC 排出量の月別水平分布図を図 4.2-4 と図 4.2-5 に示し、季節別及び年間の月平均水平分布図を図 4.2-6 に示す。総排出量が最も小さくなる 2 月と最も大きくなる 7 月および月平均値の年平均については、図中に Arctic area 及び Non Arctic area のそれぞれで最も排出強度が大きくなるグリッドの位置とその値を図中に示した。2 月の最大値ではそれぞれが 178 g/month/km² と 904 g/month/km²、7 月の最大値ではそれぞれが 219 g/month/km² と 1378 g/month/km² と 5 倍以上の開きとなっている。

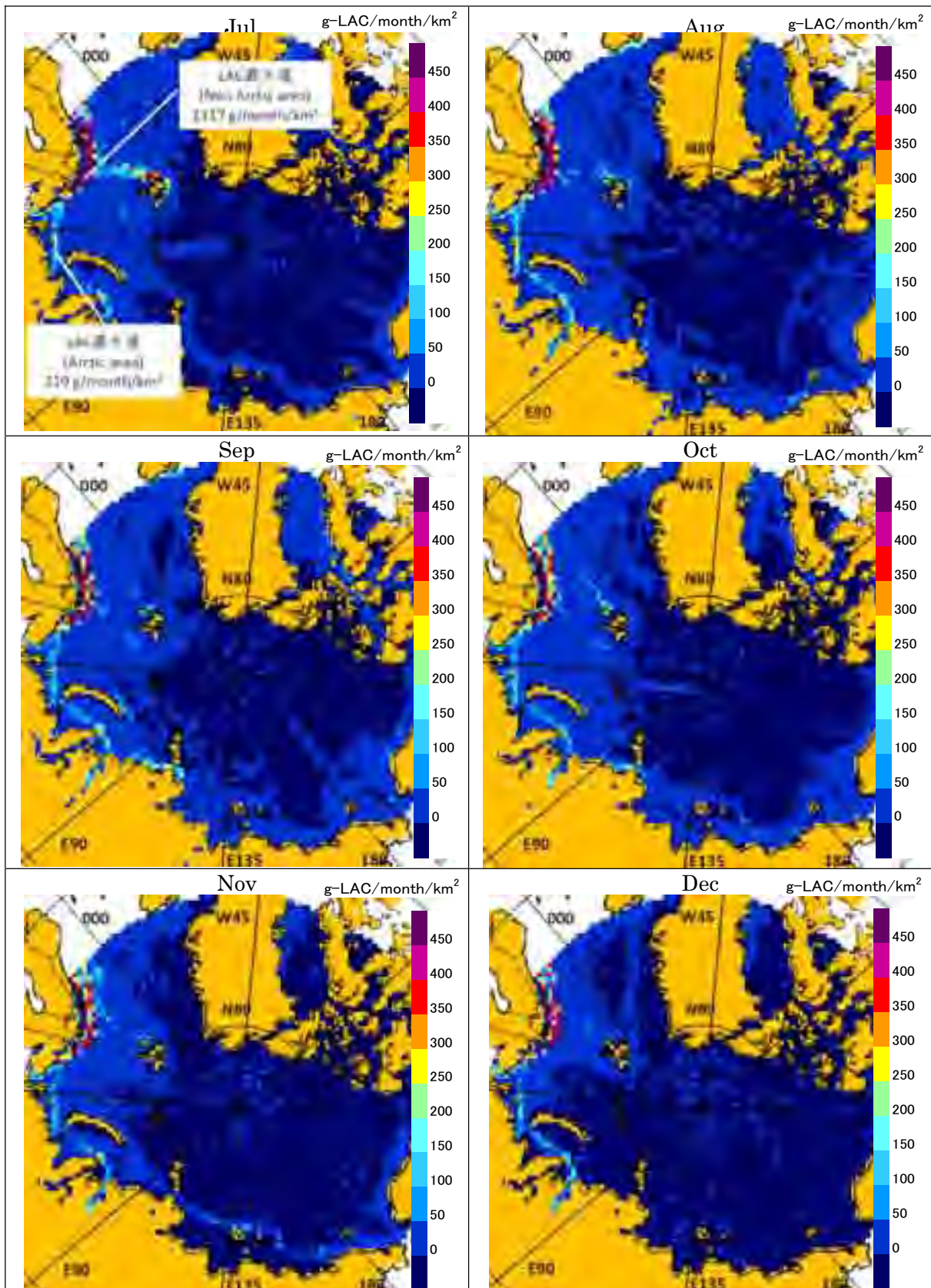
さらに、総排出量が最も小さくなる 2 月と最も大きくなる 7 月については、Arctic area と Non Arctic area のそれぞれについて、グリッド別単位面積[km²]あたりの LAC 排出量ヒストグラムを図 4.2-7～図 4.2-8 に示した。これらの図は横軸に月当たり 1 km² 当たりの LAC 排出量を、縦軸はグリッドの数を示しており、1 グリッドの面積 (60 km×60 km) を乗じることによって総面積で示される。



ベージュは陸域、白色は計算対象外を示す。

exactEarth Ltd 提供データより作成

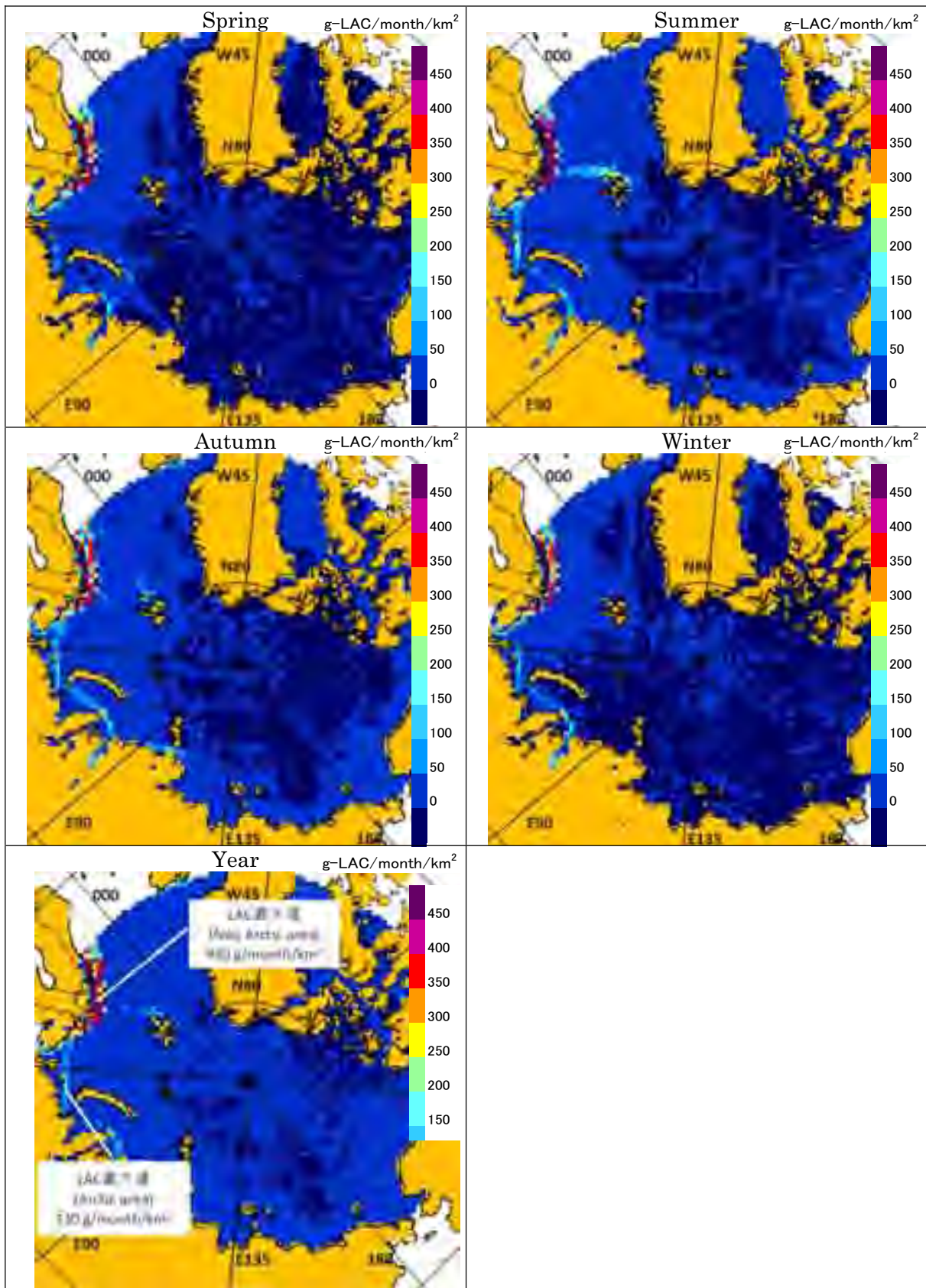
図 4.2-4 北緯 66° 以北における LAC 月排出量の月別水平分布図 (1~6 月)



ベージュは陸域、白色は計算対象外を示す。

exactEarth Ltd 提供データより作成

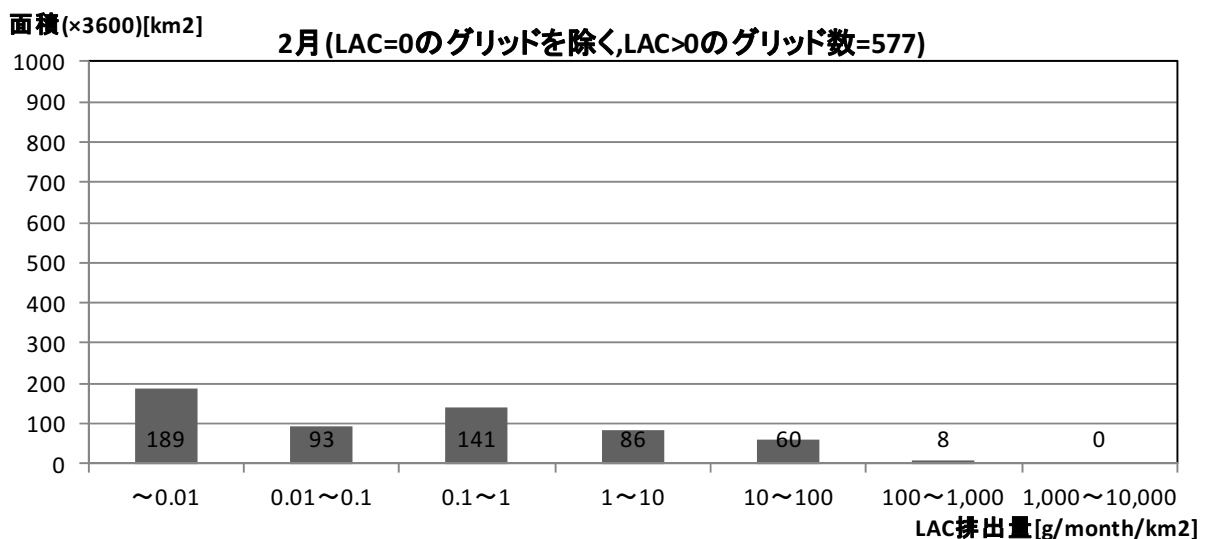
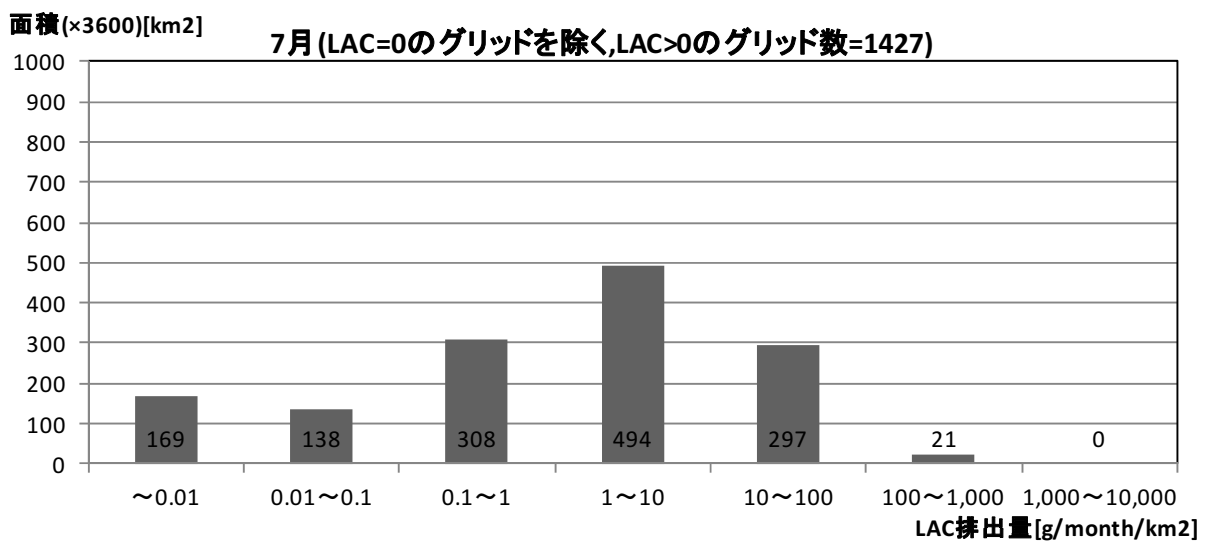
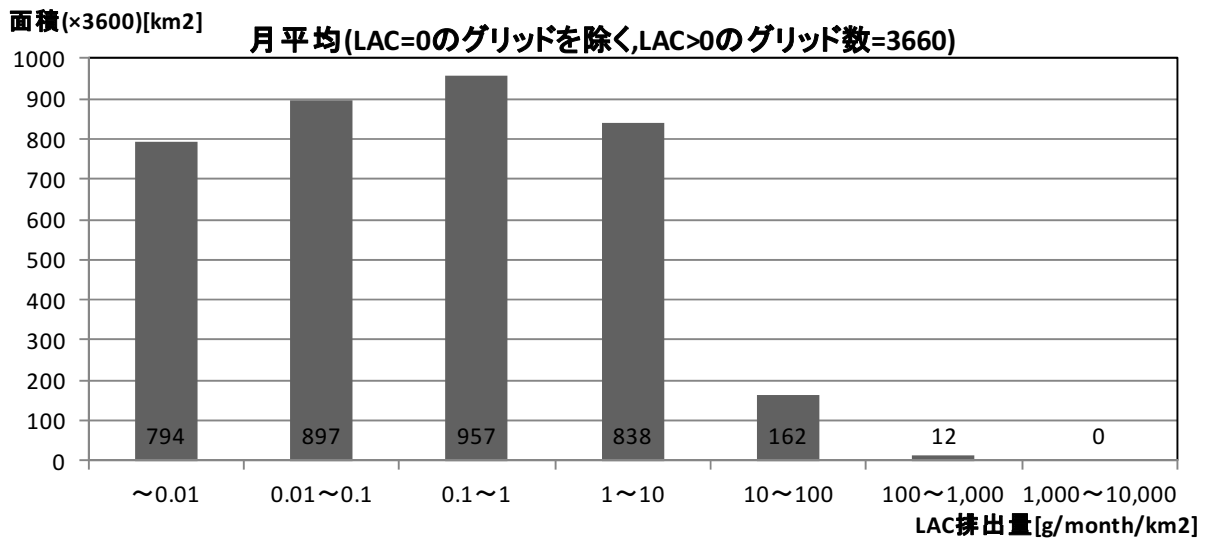
図 4.2-5 北緯 66° 以北における LAC 月排出量の月別水平分布図 (7~12 月)



ベージュは陸域、白色は計算対象外を示す。

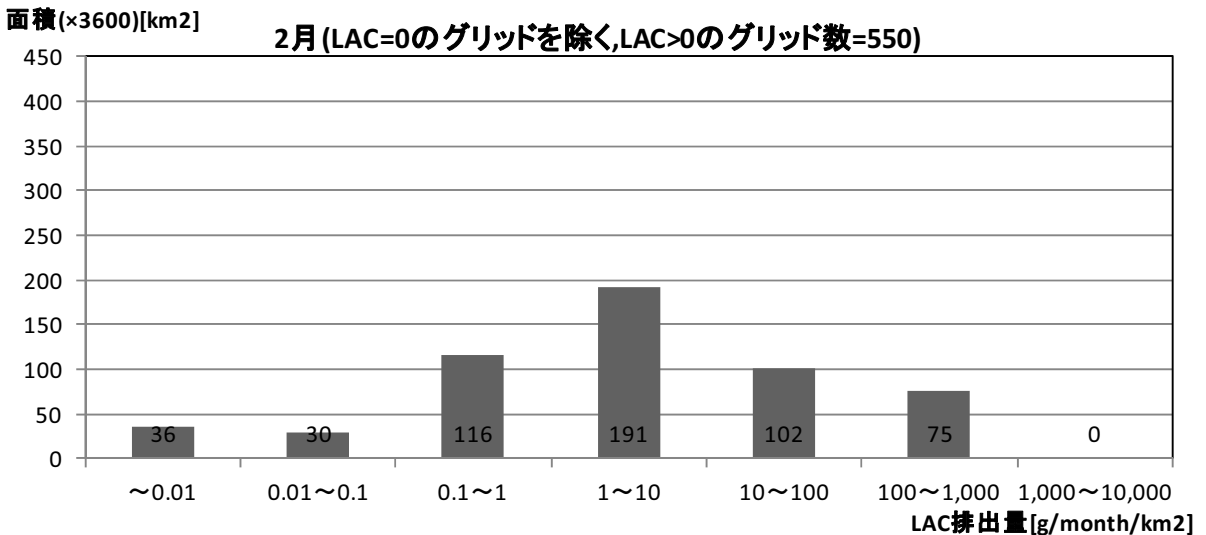
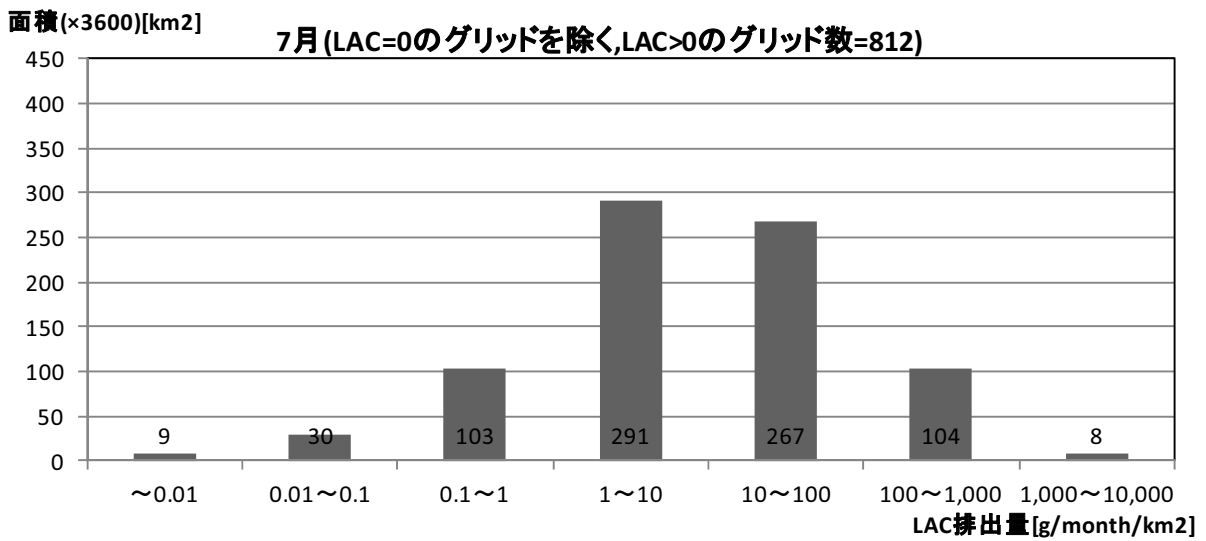
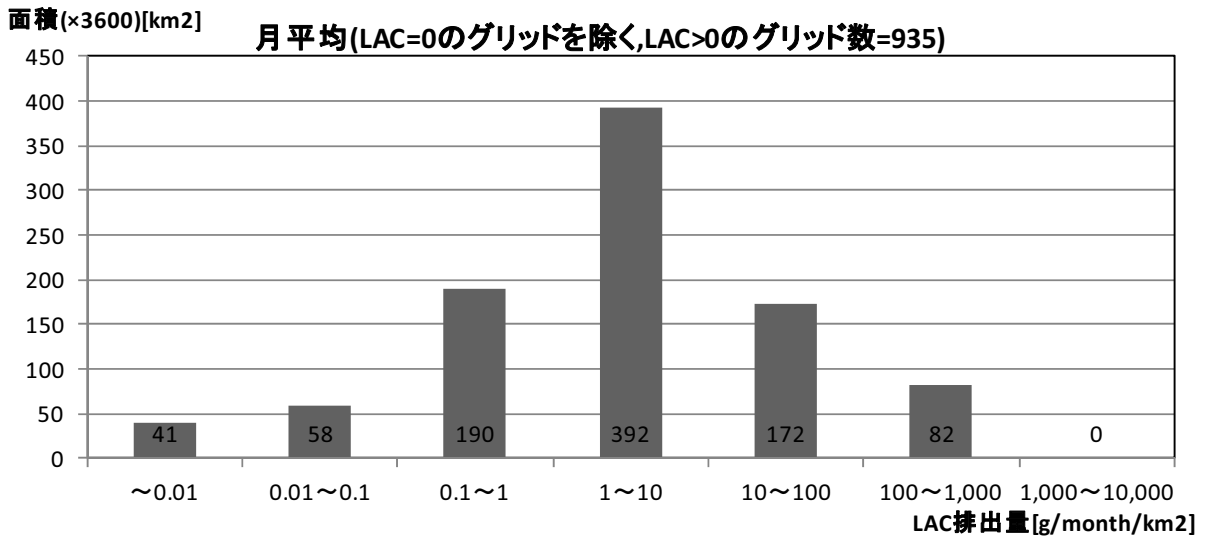
exactEarth Ltd 提供データより作成

図 4.2-6 北緯 66° 以北における LAC 月排出量の季節別平均及び年平均水平分布図



Arctic area の総グリッド数 5065 のうち、LAC=0(船舶活動量がない)グリッドはカウントから除外しているため、各期間に示された排出量の総グリッド数は一致しない。

図 4.2-7 Arctic area における単位面積当たりの LAC 排出量ヒストグラム
(2月、7月および年平均)



Non Arctic area の総グリッド数 942 のうち、LAC=0(船舶活動量がない)グリッドはカウントから除外しているため、各期間に示された排出量の総グリッド数は一致しない。

図 4.2-8 Non Arctic area における単位面積当たりの LAC 排出量ヒストグラム
(2月、7月および年平均)