

平成22年度

「海の健康診断」を活用した
三河湾の極小海域における環境評価手法の調査研究

報 告 書

海の健康診断 三河湾モデル

平成23年3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)
愛知県水産試験場

ごあいさつ

本報告書は、ボートレースの交付金による日本財団の平成22年度助成事業「海の健康診断」を活用した海域環境評価に関する調査研究の一環として実施した「海の健康診断」を活用した三河湾の極小海域における環境評価手法の調査研究の成果をとりまとめたものです。

我が国は、経済的な豊かさと引き替えに多くの海洋の自然を失い、そこから生産される多くの恵みを失いました。高度経済成長期に公害問題が表面化して以降、「公害対策基本法」や「水質汚濁防止法」等の法令が整備され、沿岸海域への排水を量的、質的に規制し、水質を「きれい」に維持するための基準を設けるとともに、関係自治体による「公共用水域水質測定」や「浅海定線調査」等の水質モニタリングが開始されました。これにより水質悪化を食い止め、一部の湾では改善が見られるなど一定の効果は見られましたが、今日でも豊かな海を取り戻すまでには至っていません。

その原因の一つには、環境評価や改善のポイントが公害の防止や監視などによる水質改善にあり、沿岸域の海の恵みを生み出している海の営みを総合的に評価するという視点が欠落していたことがあげられると思います。昨今、第3次生物多様性国家戦略や海洋基本計画などで生物多様性の確保の必要性が唱われていますが、生物の多様性が確保されるためには、対象海域の生態系や物質循環が健全であること、すなわち海の営みが健全であることが不可欠です。

海洋政策研究財団では、この海の営みを検査し、定量的に評価する「海の健康診断」の手法研究を平成12年より全国に先駆けて実施して参りました。これまでに「海の健康診断マスタープラン・ガイドライン」をまとめたのはじめ、平成16年度、18年度、20年度には全国の閉鎖性海湾を対象にして「海の健康診断」一次検査・診断を実施し、個々の閉鎖性海域の環境の現状を診断カルテとしてとりまとめ、日本の沿岸海域で起きている環境変化の傾向や課題を社会に周知するとともに、豊かな海を取り戻すために必要な沿岸域の環境管理について、「海の健康診断」の活用を視野に入れた提言書を関係大臣に提出いたしました。

このたび、海湾全体を検査診断の対象としている「海の健康診断」手法を、海湾全体では環境悪化が顕在化していないものの、湾内の極小海域において環境悪化が進行しているようなケースにおいても適用可能なものとするなど、個々の診断スケールに応じて適用するための研究を2ヶ年計画で愛知県水産試験場殿と共同で実施することといたしました。本書の内容は、2年間の研究成果をとりまとめたものです。

本報告書が三河湾の環境保全、改善に日夜尽力されている愛知県や同海域に関心を持つ方々などの活動にお役に立てば幸いです。

最後に、本事業の実施及び本報告書の取りまとめにあたりましては、東海大学中田喜三郎教授を委員長とする「海の健康診断」を活用した三河湾の環境評価に関する調査研究委員会の委員の皆様のご熱心なご審議、ご指導、また関係者のご協力に対しまして衷心より厚くお礼申し上げます。

平成23年3月

海洋政策研究財団
会長 秋山昌廣

「海の健康診断」を活用した三河湾の環境評価に関する調査研究委員会 委員名簿

(順不同、敬称略)

委員長 東海大学海洋学部 教授 中田喜三郎
委員 長崎大学水産学部 教授 中田英昭
委員 豊橋技術科学大学建設・都市システム学系長／教授 青木伸一
委員 名城大学大学院総合学術研究科 特任教授 鈴木輝明
委員 広島大学大学院生物圏科学研究所 准教授 小路淳*

※平成21年度委員

研究担当者

海洋政策研究財団

常務理事 寺島紘士
企画グループ グループ長代理 大川 光
海技研究グループ 国際チーム員 島田 絵美
政策研究グループ 研究員 眞岩 一幸*

愛知県水産試験場

場長 船越茂雄
場長 鈴木輝明*
副場長 石田基雄
漁場環境研究部 部長 岩田靖宏
漁場環境研究部 主任研究員 蒲原聡
漁場環境研究部 主任研究員 本田是人
漁場環境研究部 主任研究員 山田智
漁場環境研究部 主任研究員 向井良吉*
漁場環境研究部 主任 和久光靖
漁場環境研究部 技師 柘植朝太郎

※平成21年度担当

目 次

ごあいさつ

委員名簿

1. はじめに	1
2. 健康な海とは	2
3. 三河湾の健康を診断する	3
3.1 健康診断の流れ	3
3.2 一次検査による診断結果	5
3.3 二次検査	9
1) 再検査	9
2) 精密検査	19
4. 処方箋	26
4.1 処方箋の選定	26
4.2 処方箋による定量的な効果の試算	28
4.3 まとめ	33
5. 今後の課題と展望	35
5.1 大規模泊地の治療の難しさ	35
5.2 順応的な管理による処方箋の実施	35
5.3 三河湾の今後の健康診断	35

資料編

- ・ シミュレーションモデル計算による精密検査及び処方箋の効果試算結果
- ・ 底生動物群集予測計算結果

1. はじめに

海は生きています。海の元気さを診断する手法として考え出されたのが「海健康診断」です。

海は生きています。海は、流れや潮汐が川や外海から流れこんだ栄養を輸送し、生物がそれを取り入れ成長し増えていく、生きている場所です。また、海は私達に様々な恵みをもたらしてくれる場所です。食卓にのる魚、海藻、アサリなどの貝類、エビやタコなどは海が生み出してくれた貴重な食料資源です。しかし、私達人間の活動などによって、海の状態は変わってしまいました。「昔に比べて魚が獲れなくなった」と嘆いている漁業者の姿を全国津々浦々でよくみます。海が不健康な状態である証拠なのではないでしょうか。

私達、人間の体の健康は定期的な健康診断や医者の治療によって支えられていますが、海はどうかでしょうか。これまで海健康をみるために行われてきた水質検査は、人の検査で言えば血液検査にあたりますが、本当にそれだけで海健康が診断できるでしょうか？

海健康を診断する手法が「海健康診断」です。「海健康診断」は、海健康を「生態系の安定性」「物質循環の円滑さ」という2つの視点から診断し、「予防」と「不健康の原因究明」に取り組むために考え出されました。

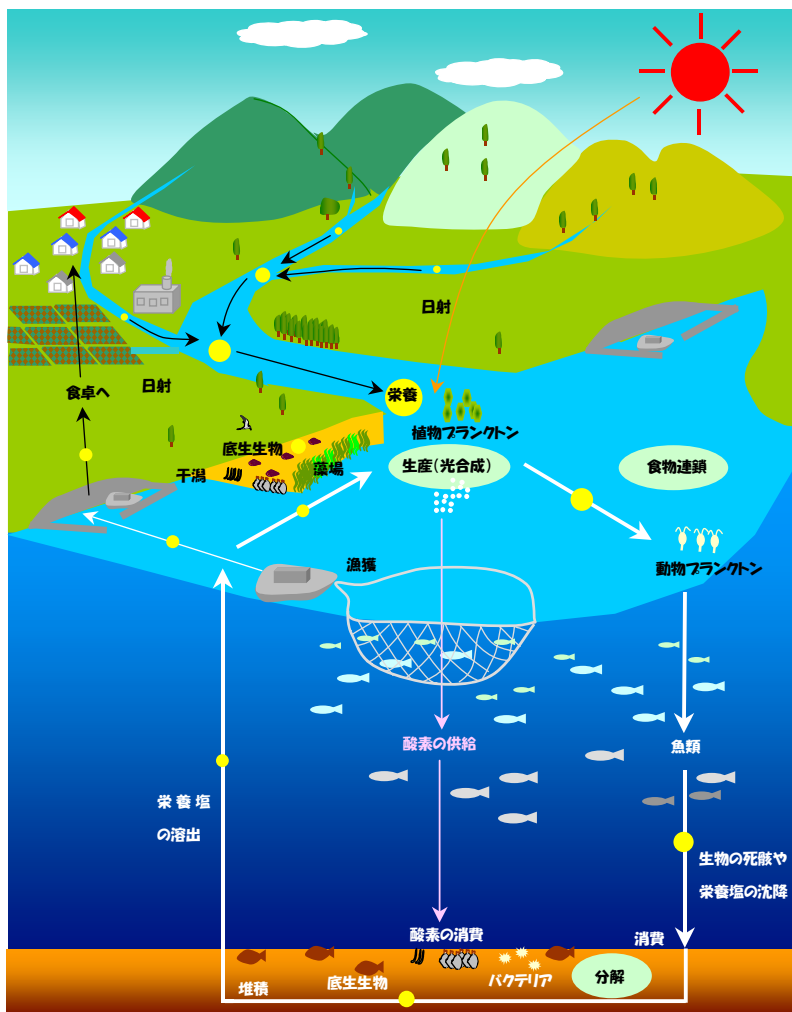


図 1.1 海における栄養の流れのイメージ

2. 健康な海とは

健康な海とは「多様で豊富な生物が生息していることによって、栄養が太く滑らかに循環する海」です。

沿岸の海は、干潟や藻場などの多様な地形があり、豊かな栄養から生物が生まれる貴重な場所です。水産を代表とする産業や交通・文化の拠点としても重要な場となっており、近年、人々の暮らしと密接に関わるその姿は「里海」とも呼ばれています。

沿岸の海で生まれる豊かな生物は海の生物資源の大部分を支えており、生物の食物連鎖によって、栄養は太く滑らかに海を循環します。沿岸の健康を大きく左右する要素として生物の存在は重要であり、「海の健康診断」では「生物が多様で多く生息している海」を健康な海と考えています。

これまで日本の海では、生物が減少する原因が富栄養化にあると考え、栄養を減らして水をきれいにすることに主眼をおいてきました。近年、陸域における排水処理によって、流入する栄養を減らす対策が進んでいますが、それで健康な海が戻ってきたでしょうか？海の特長や履歴がそれぞれ異なるように、その原因も違うはずです。

健康な海を取り戻すためにどうすればよいのか。栄養を制限する対策だけでなく、海の営みを総合的な視野でとらえたバランスの良い対策が必要です。

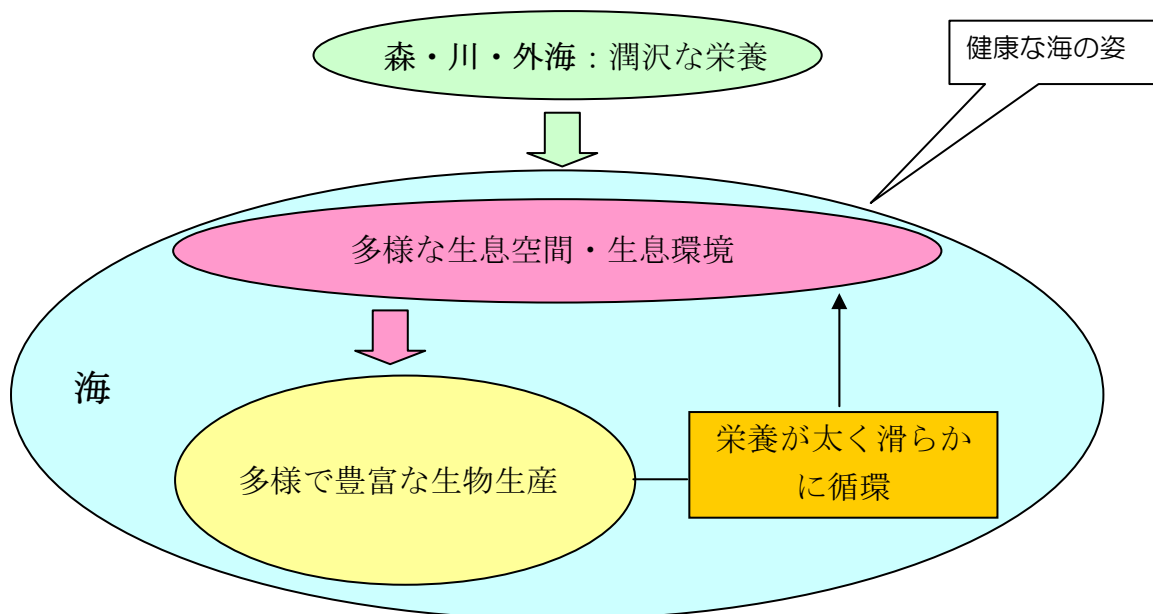


図 2.1 健康な海のイメージ

3. 三河湾の健康を診断する

3.1 健康診断の流れ

「海の健康診断」は、私達が職場等で受けている定期健康診断と同じように、「一次検査」と、一次検査で不健康の疑いがある場合に実施する精密検査にあたる「二次検査」から構成されています（図 3.1）。

「一次検査」は公共性の高い誰でもが入手可能な情報を用いて、簡便に評価できる手法を採用しています。一次検査において不健康の疑いがある海湾は二次検査に進みます。「二次検査」は、地元のデータを用いて海の環境に精通している人が実施できる“専門性が求められる検査”です。二次検査は、一次診断の結果を検証する「再検査」と不健康の原因を究明する「精密検査」の二段階から構成されています。これらの検査結果から「二次診断」として不健康の程度（病状）とその原因を特定します。

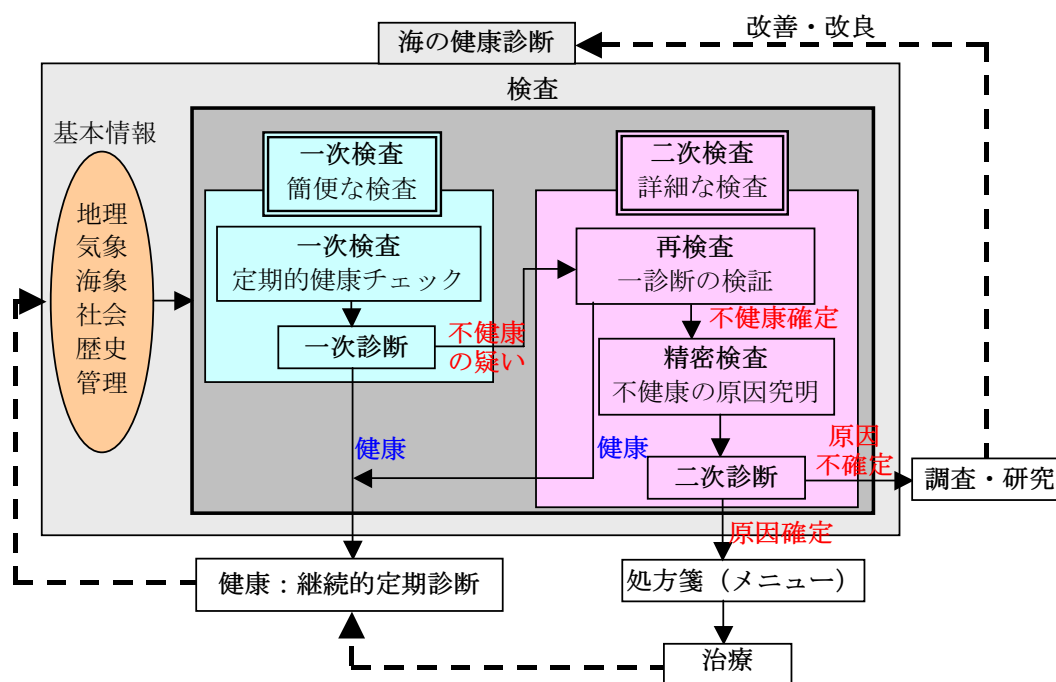


図 3.1 海の健康診断の構成

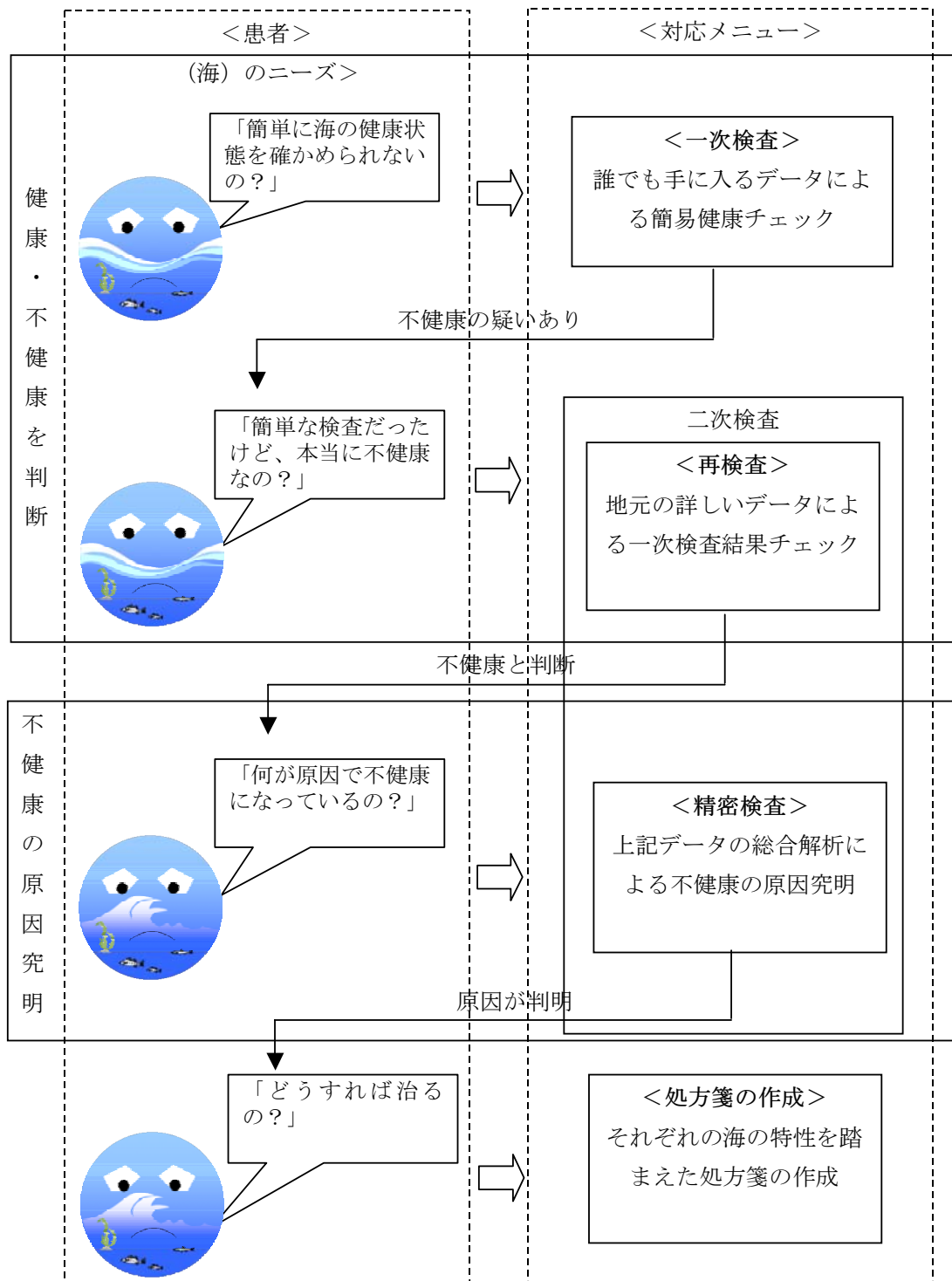


図 3.2 海の健康診断の検査の流れ

3.2 一次検査による診断結果

一次検査では、簡便な手法を用いて、健康・不健康を診断します。

検査項目は「生態系の安定性」の指標となる項目と「物質循環の円滑さ」の指標となる項目で構成されています。

具体的には、「生態系の安定性」の指標となる「生物組成」「生息空間」「生息環境」に関する6つの検査、「物質循環の円滑さ」の指標となる「基礎生産」「負荷・海水交換」「堆積・分解」「除去（漁獲）」に関する7つの検査を行います。

一次検査の検査方法と検査基準を表 3.1 に示します。

表 3.1(1) 一次検査の検査方法と検査基準（生態系の安定性）

視点	検査項目	必要な資料 及び 調査	検査内容			検査基準			
			前処理	スタンダード値	検査値	結果	良好(A)	要注意(B)	要精査(C)
生態系 の安定 性	生物組 成	農林水産統 計年報によ る魚種別漁 獲量	最近20年間の 最多漁獲量の分 類群を抽出し、 検査対象とす る。	20年間の漁獲 割合の平均を FRs、漁獲量の平 均をFCsと する。	最近3年間の漁獲 割合の平均を FRt、漁獲量の平 均をFCtとす る。	FR、FCを求め る。 FR=FRt/FRs FC=FCt/FCs	0.8≤FR≤1.2 かつ FC<0.7または 1.3<FC	FR<0.8または 1.2<FR	
	海岸生物の 出現状況	海岸におけ る生物出現 確認調査	—	各海湾の代表生 物種類数をLCs とする。	代表生物のうち出 現が確認された種 類数をLCtとす る。	LCを求め る。 LC=LCt/LCs	LC=1	LC<0.8	
生態環 境	干潟・藻場 面積の変化	日本の干 潟、藻場、 サンゴ礁の 現況（環境 庁）	—	—	1970年代以前と最新の干潟・藻場面 積を比較する。	—	干潟・藻場面積 のいずれかが減少 している	干潟・藻場面積が ともに減少してい る	
	人工海岸の 割合	環境省自然 環境保全基 礎調査	—	—	最新の人工海岸の割合をAC(%)とす る。	—	AC≤20	20<AC<50	50≤AC
生態環 境	有害物質の 測定値	公共用水域 水質調査 （健康項目 データ）	最近20年間の すべての健康項 目測定値を検査 対象とする。	各健康項目の環 境基準値をPSS とする。	各健康項目の測定 値をPStとす る。	PSを求め る。 PS=PSt/PSS	すべての健康項 目で PS<0.8	1つの健康項目 でも 0.8≤PS<1	1つの健康項目で も 1≤PS
	貧酸素水の 確認頻度	底層の溶存 酸素量デー タ（公共用 水域水質調 査など）	—	最新の底層の溶 存酸素量の調査 地点数をCWS とする。	貧酸素水 （4.3mg/L未 満）が確認された 調査地点数を CWtとする。	CWを求め る。 CW=CWt/ CWS	CW<0.1	0.1≤CW<0.5	0.5≤CW

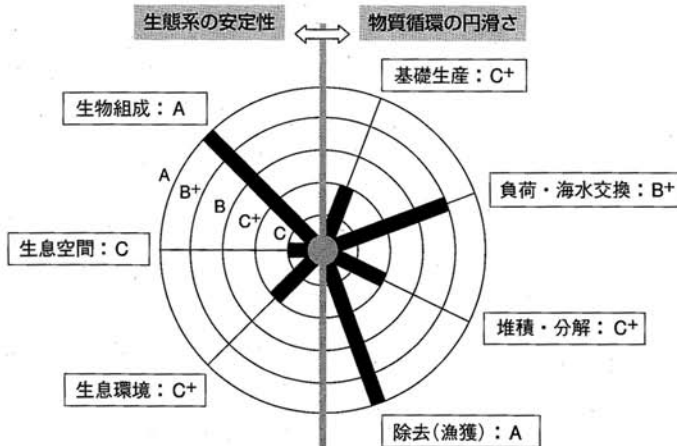
表 3.1(2) 一次検査の検査方法と検査基準（物質循環の円滑さ）

視点	検査項目	必要な資料及び調査	検査内容			検査基準			
			前処理	スタンダード値	検査値	結果	良好(A)	要注意(B)	要精検(C)
物質循環の円滑さ	基礎生産	公共用水域水質調査	最近20年間の透明度の平均値を検査対象とする。	20年間の平均をTPs(cm)とする。	最近3年間の平均をTPt(cm)とする。	TP,TDを求める。 TP=TPt/TPs TD= TPt-TPs	0.8≤TP≤1.2 かつ TD≤20	0.8≤TP≤1.2 かつ 20≤TD	TP<0.8 または 1.2<TP
	赤潮の発生頻度	各地方自治体調査等による毎年の赤潮発生状況	—	—	最近20年間の赤潮の発生の有無をみる。	赤潮が発生していない	毎年ではないが赤潮が発生している	毎年赤潮が発生している	
負荷・海水交換	負荷と滞留のバランス	負荷量、容積（海の基本図、海図、測量原図）、河川流量（流量年表、各県資料）、塩分（公共用水域水質調査、JODCデータ）	淡水滞留時間τ(day)を求める。 $\tau = (S_0 - S_1) / S_0 Q$ S ₀ : 湾外基準塩分 S ₁ : 湾内平均塩分 Q: 河川流量 (m ³ /day) 単位体積当たり負荷量 Hx(mg/day/m ³)を求める。 Hx=Px/V Px: 負荷量(mg/day) V: COD、T-N、T-Pの海灣の体積(m ³)	水質項目(x)ごとに以下のとおりとする。 COD 0.2mg/L T-N 0.2mg/L T-P 0.02mg/L	水質項目(x)ごとに負荷滞留濃度(LR)を求める。 LR(x)=τHx	COD、T-N、T-PともにLRx<スタンダード値の場合	COD、T-N、T-Pのいずれかがスタンダード値≤LRxの場合	COD、T-N、T-Pともにスタンダード値≤LRxの場合	
	潮位振幅の変化	実測潮位データ	最近30年間の期望平均満潮位と期望平均干潮位の差を求め、その総形回帰より傾きを求める。	0.05(m)	30年間の変化量AT(m)を求める。 AT=30(年)×傾き	—	AT<0.05かつ最近3年間減少傾向にない	AT<0.05かつ最近3年間減少傾向	0.05≤AT
堆積・分解	底質環境	各地方自治体調査等による底質調査結果	—	—	最新の硫化物量の最大値をSD(mg/g)とする。	SD<0.2	0.2≤SD<1	1≤SD	
	無酸素水の出現状況	底層の溶存酸素量データ（公共用水域水質調査結果など）	—	—	最新の溶存酸素量の最低値をAW(mg/L)とする。	2.9≤AW	0.5≤AW<2.9	AW<0.5	
除去（漁獲）	底生魚介類の漁獲量	農林水産統計年報による魚種別漁獲量	最近20年間の底生魚介類（底魚及び底生動物）の漁獲量を検査対象とする。	20年間の漁獲量平均をFBsとする。	最近3年間の漁獲量平均をFBtとする。	FBを求める。 FB=FBt/FBs	0.7FBかつ最近3年間増加もしくは横ばい傾向	0.7FBかつ最近3年間減少傾向	FB≤0.7

三河湾は、一次検査では生息空間、生息環境、基礎生産、堆積・分解の4項目でC判定（要再検査）と判定され、再検査が必要となりました。

29 三河湾 愛知県

● 一次診断チャート



● 所見

生息空間、生息環境、基礎生産、堆積・分解がC判定であり、底層に問題が多い。引き続き健康状態を見守る必要がある。

● 一次診断カルテ

視点	検査項目	良好 (A)	検査基準 要注意 (B)	要精検 (C)	検査結果	診断
生態系の安定性を示す項目	生物組成	漁獲生物の分類群別組成の変化(最近3年間の平均/20年間の平均:最優占分類群の漁獲割合(FR)、漁獲量(FC)) $0.8 \leq FR \leq 1.2$ かつ $0.7 \leq FC \leq 1.3$	$0.8 \leq FR \leq 1.2$ かつ $FC < 0.7$ または $1.3 < FC$	$FR < 0.8$ または $1.2 < FR$	FR=(0.8) FC=(0.7)	A B C
	海岸生物の出現状況(代表種の確認割合:LC)	LC=1	$0.8 \leq LC < 1$	LC<0.8	LC=(1.0)	A B C
生息空間	干潟・藻場面積の変化	干潟・藻場面積は減少していない	干潟・藻場面積のいずれかが減少している	干潟・藻場面積がともに減少している	干潟・藻場面積がともに減少	A B C
	人工海岸の割合(AC)	AC≤20	20<AC<50	50≤AC	AC=(82)	A B C
生息環境	有害物質の測定値(測定値/環境基準値:PS)	すべての健康項目でPS<0.8	1つの健康項目でも $0.8 \leq PS < 1$	1つの健康項目でも 1≤PS	PS=(6.0)	A B C
	資酸素水の確認頻度(資酸素水確認調査点の割合:CW)	CW<0.1	$0.1 \leq CW < 0.5$	$0.5 \leq CW$	CW=(0.3)	A B C
基礎生産	透明度の変化(最近3年間の平均/20年間の平均:透明度の割合(TP)、最近3年間の平均・20年間の平均(TD))	$0.8 \leq TP \leq 1.2$ かつ TD<20	$0.8 \leq TP \leq 1.2$ かつ 20≤TD	TP<0.8または 1.2<TP	TP=(1.1) TD=(49)	A B C
	赤潮の発生頻度	赤潮は発生していない	毎年ではないが赤潮は発生している	毎年赤潮は発生している	毎年赤潮は発生している	A B C
負荷・海水交換	負荷と滞留のバランス(負荷滞留濃度:LR)	COD、T-N、T-PともにLR<スタンダード値の場合	COD、T-N、T-Pのいずれかでスタンダード値≤LRxの場合	COD、T-N、T-Pともにスタンダード値≤LRxの場合	LR(COD)=(0.22) LR(T-N)=(0.11) LR(T-P)=(0.006)	A B C
	潮位振幅の変化(AT)	AT<0.05かつ最近3年間減少傾向にない	AT<0.05かつ最近3年間減少傾向	$0.05 \leq AT$	AT=(0.04) 最近は(増加)傾向	A B C
堆積・分解	底質環境(全硫化物量の最大値:SD)	SD<0.2	$0.2 \leq SD < 1$	1≤SD	SD=(1.4)	A B C
	無酸素水の出現状況(最低溶解酸素濃度:AW)	$2.9 \leq AW$	$0.5 \leq AW < 2.9$	AW<0.5	AW=(1.9)	A B C
除去(漁獲)	底生魚介類の漁獲量(最近3年間の平均/20年間の平均:FB)	$0.7 < FB$ かつ最近3年間増加もしくは横ばい傾向	$0.7 < FB$ かつ最近3年間減少傾向	FB≤0.7	FB=(0.8) 最近は(横ばい)傾向	A B C

注)「-」印は一部またはすべてのデータがないため、診断できない部分を示す。

図 3.3 全国海の健康診断 一次検査結果 (H20) (三河湾)

3.3 二次検査

1) 再検査

一次検査は、できる限り簡便な方法で「不健康の疑い」を見つけ出す検査です。厳しく設定した検査基準によって、少しでも不健康の疑いのある場合は詳細な検査（二次検査）を受診してもらう仕組みにしています。そのため、一次検査の判定結果では不健康を確定させることはできません。

そこで、地元にあるより詳しいデータを用いて、不健康を検証するのが「再検査」です。再検査は、一次検査でC判定となった項目について行います。

三河湾の一次検査では、生息空間、生息環境、基礎生産、堆積・分解においてC判定が出ていますので、それらの項目について再検査を行いました。

ア) 生息空間

三河湾の全体的な水深は過去 20 年程度大きな変化はありません（図 3.4）が、徐々に自然海岸が減少し、人工海岸が増加する傾向にあります（表 3.2）。

過去 50 年程度の三河湾の水深別面積や埋立面積をみると、生産性の高い干潟等の浅海域が著しく減少しており（図 3.5）、浅海域の減少は沿岸の埋立面積の変化と対応しています（図 3.6）。干潟やその周辺の浅場を水深 0～5m 程度と定義すると、近年 50 年程度の間はその約 17%が失われています。三河湾の沿岸に存在する自然の生息空間が大きく変化している状況がわかります。

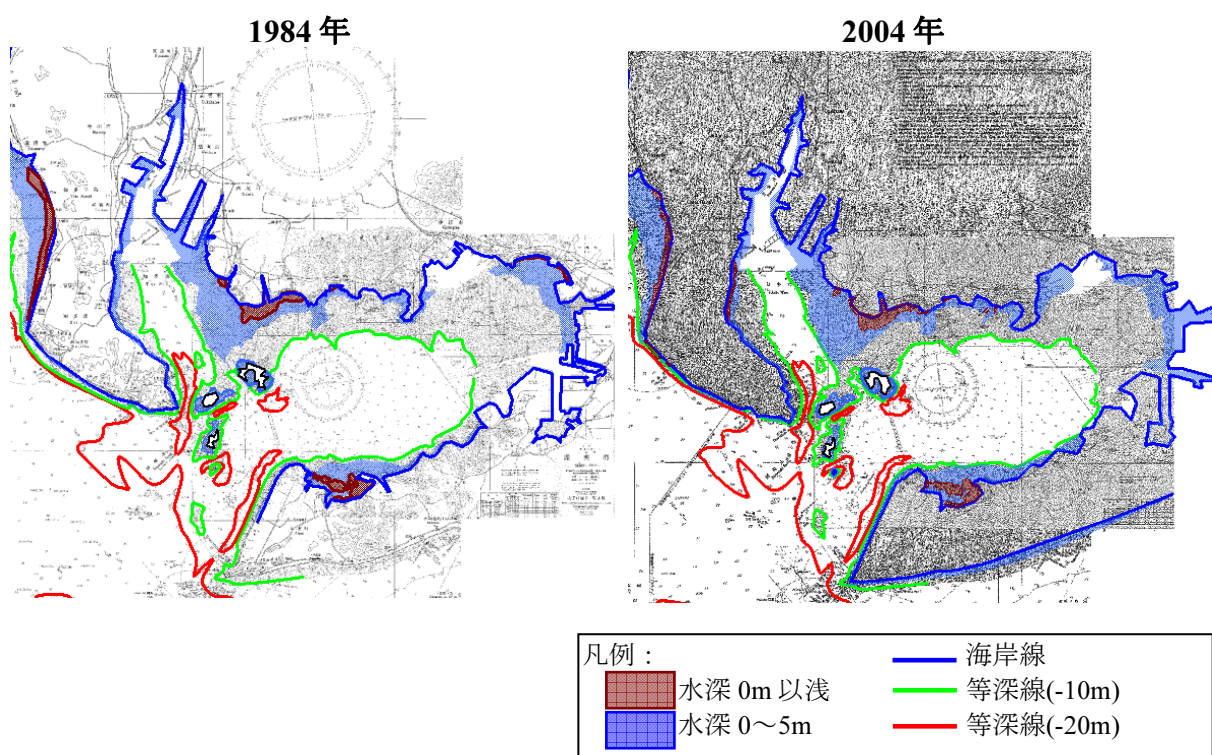
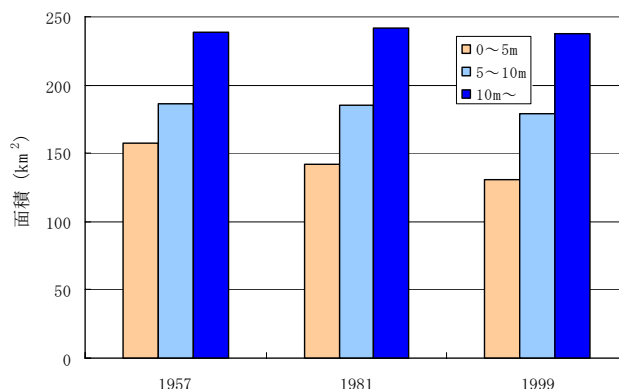


図 3.4 1984 年と 2004 年の海図の比較

表 3.2 海岸線の種類の変遷（単位：km）

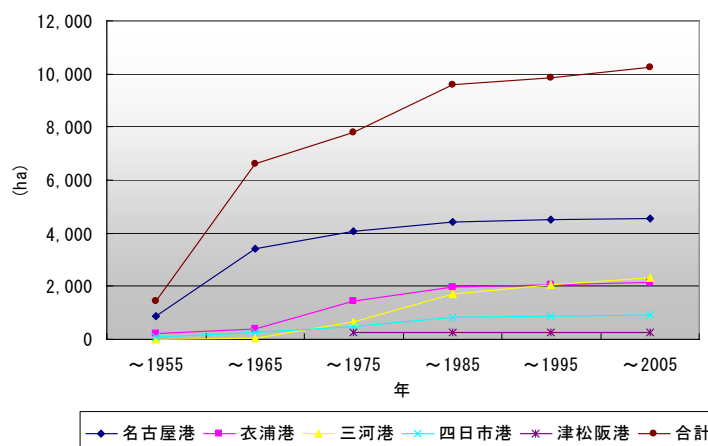
		1978 年度(%)	1985 年度(%)	1994 年度(%)
三河湾	自然海岸	34.8 (10.4)	32.5 (9.2)	29.9 (8.3)
	半自然海岸	60.4 (18.1)	61.6 (17.6)	63.6 (17.7)
	人工海岸	231.7 (69.6)	249.6 (71.4)	258.6 (72.2)
	河口部	5.8 (1.7)	5.8 (1.6)	5.8 (1.6)
	合計	332.6 (100.0)	349.5 (100.0)	357.9 (100.0)

資料) 環境省 自然環境保全基礎調査のデータをもとに作成



出典) 国土交通省中部地方整備局三河港湾工事事務所「取り戻そう豊かな海」

図 3.5 三河湾の水深別面積の変遷



出典) 伊勢湾データコーナーHP (<http://www.pref.mie.jp/kouiki/hp/isewan/home/data/index.htm>)

図 3.6 各港湾における埋立面積の変遷

このように、三河湾の沿岸域においては、埋め立て等による生物の生息域の消失が顕著であることをみてきました。このため、三河湾では失われた干潟・浅場等、生物の生息空間を創出するために、大規模な干潟・浅場造成が行われています。

一方、埋立地周辺の水域に目を向けると、窪地、水路、入江、泊地等、人為的に改変された水域において、局所的な環境悪化が顕在化しています。このような水域においては、物質循環の停滞、周辺浅場の生物への悪影響、稚魚の育成機能の喪失などが懸念され、湾全体の不健康の原因となっている恐れがあります。しかし、このような水域の実態についてはほとんど把握されていないことから、三河湾の沿岸域における環境悪化水域の分布調査を行いました。

まず、三河湾沿岸域の47水域において、底生動物の生息数調査を行いました。その結果、35水域においては、底生動物の出現種数が5種以下でした。これらの水域では、底生動物が生息していても、ゴカイ類(スピオ類)や二枚貝のヒメシラトリガイといった汚濁指標生物がわずかに生息するのみで、健康とは言えない状態であることがわかりました。

観測結果を整理したところ、底生動物の生息数が少ない水域の特徴として、地形の閉鎖性が高いこと、水深が深いこと、潮汐流が小さいことが挙げられました。これらの特徴はいずれも海水の停滞性に影響する要素と考えられ、海水の停滞により、貧酸素化の進行や生物加入の阻害が引き起こされ、底生動物の生息数が低下するという流れが考えられます。以上から、底生動物の生息に影響する原因を見いだすため、以下に示す物理的環境要因を海水の停滞性を表す指標として指数化し、現地調査で得られた底生動物の出現種数との間で重回帰分析（関係を見出すための分析）を行いました。

-地形の開放度-

対象となる水域の開口部を結ぶ線と、海岸線により囲まれる面積が 10,000m²以上 10,000,000m²以下である場合、以下に示す開放度指数 OI (OpenIndex) を以下の①式により計算し、その測点における地形の開放度を表す指標としました。なお、海岸線の形状は、海図（2004～2008 海上保安庁発行）を参照しました。

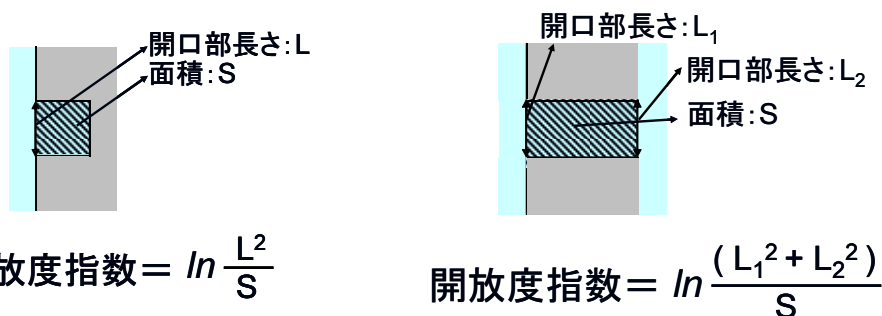


図 3.7 開放度指数 OI の計算例（左：式①の場合、右：式②の場合）

OI=LN (L²/S) ①

L：開放部の長さ，S：水域面積

なお、海岸線の形状が入り組んでおり、一次湾・二次湾と分かれる場合は、水域面積が 10,000m²未満とならないように分割し、奥の水域の OI に手前の水域の OI を乗じ、OI としました。

開放部が 2 つある水路状の水域については、以下の②式により OI を算出しました。

OI = LN ((L₁²+L₂²)/S) ②

L1：開放部 1 の長さ，L2：開放部 2 の長さ

-潮汐流の強さ-

(財)日本水路協会 海洋情報提供部の潮流メッシュ推算データを利用し、各測点に最も近い推算点における 2008 年 8 月 1 日（大潮）と 8 月 9 日（小潮）の干潮→満潮→干潮の 1 潮汐間の 1 時間ごとの表層流速の絶対値を平均し、潮汐流の強さを表す指数としました。

-水深-

海上保安庁海洋情報部水深データ（50m、150mメッシュデータ）と海図（2004～2008 海上保安庁発行）から求めた各測点の水深を指数としました。

以上の各要素の重回帰分析で得られた重回帰式（関係式）を以下に示します（式③）。なお、重回帰分析は、変数増加法により行いました。

$$Y=47.93X_1-0.9995X_2+2.071X_3+8.719 \quad \dots\dots \textcircled{3}$$

Y：底生動物の種類数， X_1 ：流速， X_2 ：水深， X_3 ：開放度指数（OI）

三河湾沿岸を対象に、先述の開放度指数OIが0以下になる水域及び水深勾配が1/10以上で1m以上深くなっており面積が10,000m²以上である水域、合計206水域を拾い出し、上記関係式を適用して、生息する底生動物の種類数を予測しました。その結果、73水域においては底生動物が5種類未満であると推測されました（図3.8）。前述のとおり、底生動物が5種類未満である水域は健康とは言えない状態であると考えられることから、本検討では、底生動物が5種類未満である水域を「デッドゾーン」と呼びます。デッドゾーンはその分布規模の大きさから、上記で扱ってきた干潟・浅場の減少といった問題に加えて、三河湾の健康を左右する重要な事項であると考えられます。

これらの結果から、一次検査のC判定は妥当と考えられます。

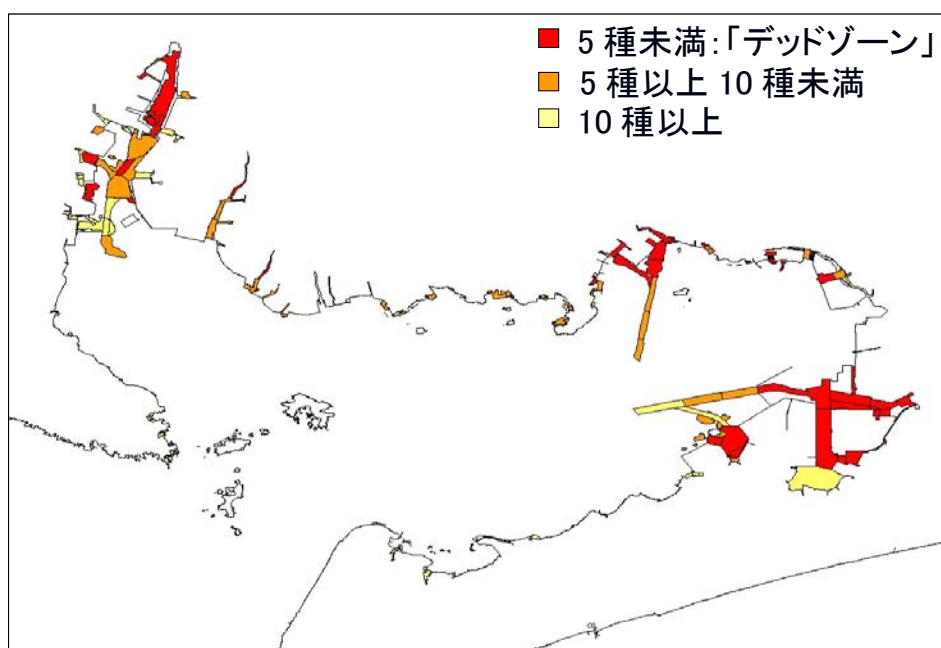
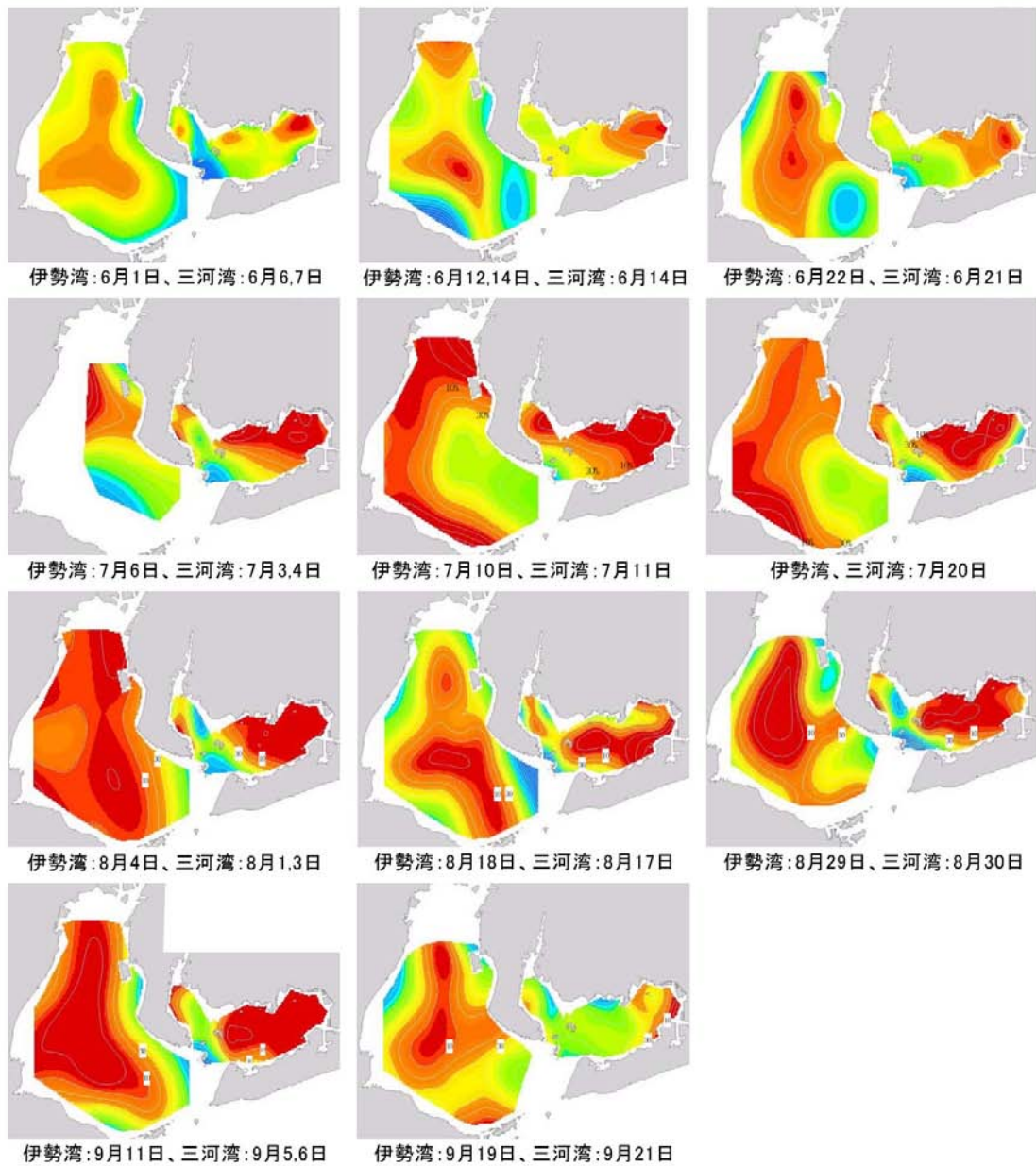


図 3.8 局所的に三河湾の健康に影響を及ぼす恐れがある水域の想定

イ) 生息環境

三河湾における夏季（6月から9月）における底層の貧酸素水塊の状況（図3.9）をみると、溶存酸素飽和度10%未満（約0.8mg/L）の範囲は、三河湾では湾奥部から湾中央部全体に広がっており、このような現象が毎年のように起きています。

このように三河湾における夏季の酸欠現象は、継続的に全体でみられることから、一次検査結果のC判定は妥当と考えられます。



凡例：溶存酸素飽和度（％）

120-200	66- 70	31- 35
111-120	61- 65	26- 30
101-110	56- 60	21- 25
91-100	51- 55	16- 20
81- 90	46- 50	11- 15
76- 80	41- 45	6- 10
71- 75	36- 40	0- 5

溶存酸素飽和度	溶存酸素濃度	魚介類への影響
50%	約4ng/l	魚類・甲殻類に悪影響
30%	約2ng/l	貝類・底生魚類の生存困難
10%	約0.8ng/l	全ての底生生物の生存困難

※愛知県水産試験場では、溶存酸素飽和度 50%以下を低酸素、30%以下を貧酸素としている

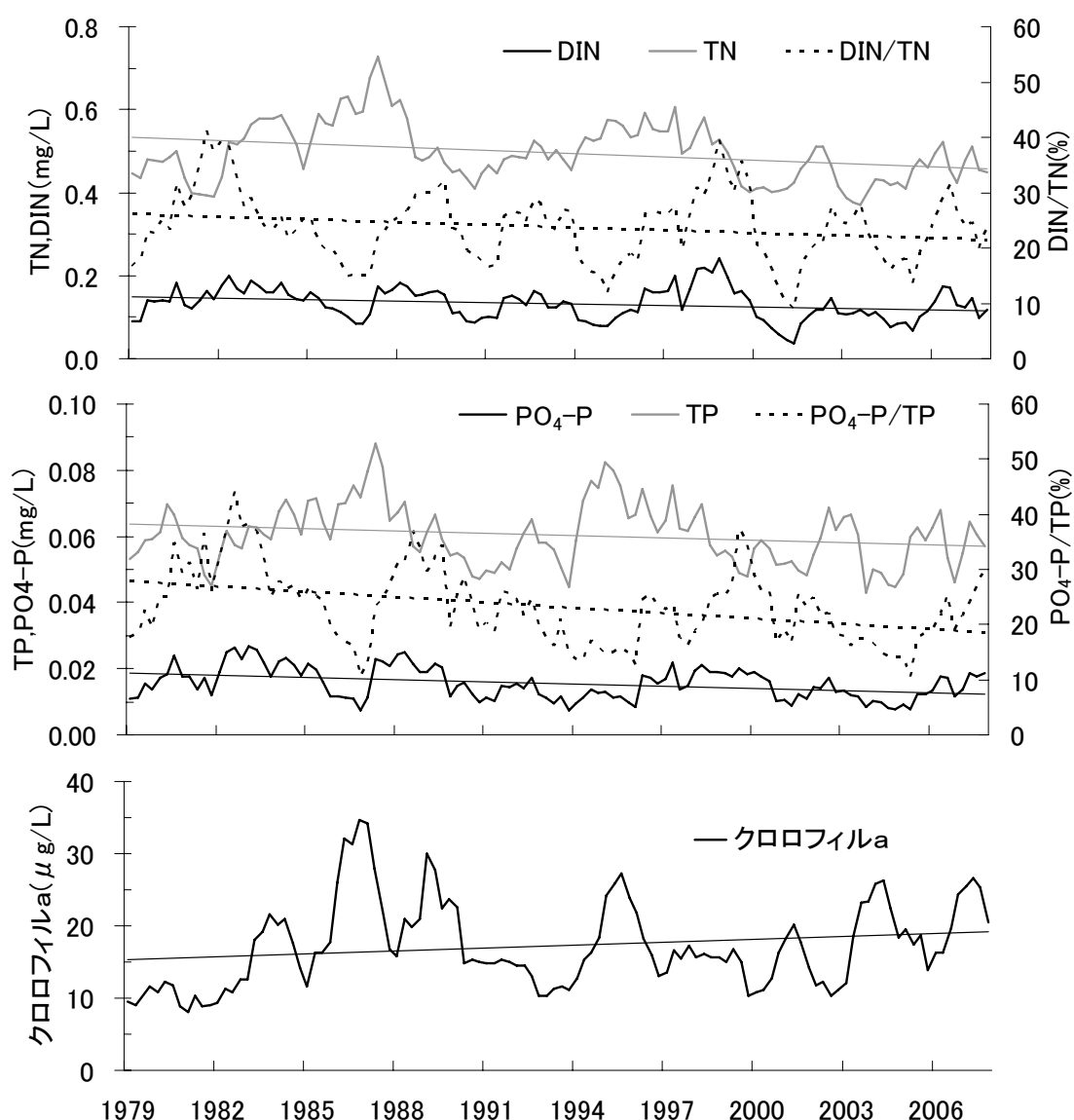
出典) 愛知県水産試験場：伊勢・三河湾貧酸素情報，H18-1号～12号，2006.

図 3.9 貧酸素水塊の分布（2006年）

ウ) 基礎生産

三河湾における栄養塩類の近年 30 年程度の経年的な変化をみると、TN（全窒素）は減少していますが、その減少の大部分は DIN（無機態窒素）が占めています。また、TP（全リン）及び $PO_4\text{-P}$ （リン酸態リン）はともに減少しており、TP に占める $PO_4\text{-P}$ の比率（ $PO_4\text{-P}/TP$ ）は低下しています。その一方で、植物プランクトンの指標であるクロロフィル a は増加しています。

このように、基礎生産の重要な要素である栄養塩類の量や質、基礎生産の状態そのものを示すクロロフィル a に経年的な変化がみられていることから、一次検査における C 判定は妥当であると考えられます。



出典) 「伊勢湾地域の底層における貧酸素水塊問題の現状と対策の動向」(石田基雄・鈴木輝明) (2009年、資源環境対策 45 (9))

図 3.10 三河湾における窒素、リン、クロロフィル a の経年的推移

エ) 堆積・分解

三河湾の平面的な底質 COD の変化を図 3.11 に示します。

1985 年から 2001 年には、各種対策により海底の有機物の分解がやや進み、有機物量が減少する傾向はみられていますが、イ) 生息環境において示したように、未だ三河湾の海底では無酸素水が発生しており、海底の堆積・分解に問題が生じています。

一次検査の C 判定は妥当であると考えられます。

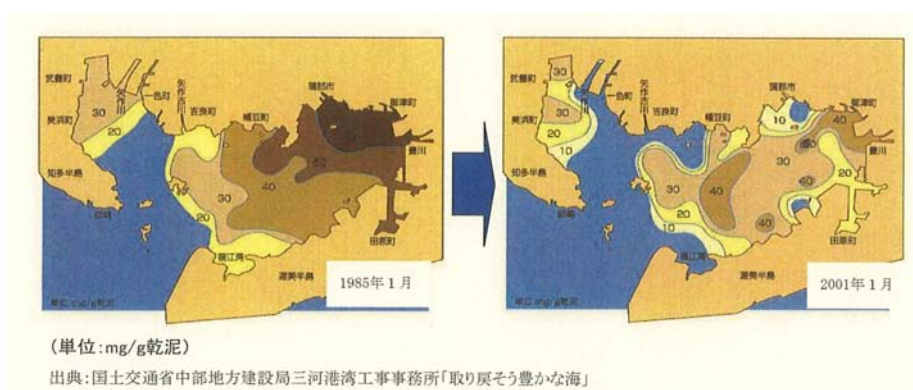


図 3.11 三河湾の底質 COD の変化

オ) 再検査における所見

再検査の結果、一次検査において不健康が疑われた生息空間、生息環境、基礎生産、堆積・分解の各視点でC判定と診断されました。

再検査までの結果から、三河湾の不健康の流れとして、次のようなことが推測されます。三河湾では、干潟・浅場といった良好な「生息空間」が変化することによって、陸域からの栄養が十分に沿岸で涵養されずに沖合へ流れ込み、植物プランクトンの過剰発生という「基礎生産」の変化をもたらしたと考えられます。さらに、過剰に発生した植物プランクトンは他の生物が利用しきれずに海底に沈み、「堆積・分解」の変化をもたらし、その結果、貧酸素水の助長のような「生息環境」の変化を招いたと考えられます。このような流れを示したものが図 3.12 ですが、再検査において、これらの視点ですべてC判定となった結果から、三河湾における不健康の原因の発端は、主に「生息空間」の変化であると考えられました。三河湾におけるこれまでの他の検討においても、三河湾における不健康の主要な原因は「生息空間」にあたる干潟・浅場の減少と考えられ（鈴木ら（2003）¹など）、「干潟・浅場の再生」などの生息空間を再生する処方箋が実施されてきました。

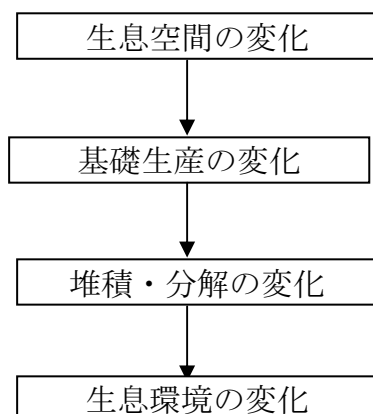


図 3.12 再検査結果から想定される三河湾の不健康の流れ

一方、生息空間の再検査結果として示したように、沿岸の人工的に改変した環境（埋立地周辺の水路、入江、泊地や小規模な深掘跡等）については、デッドゾーン化しており、湾全体の健康を損ねる原因となる恐れがありながら、これまで具体的に診断がされてこなかった部分です。本来、このような沿岸部は自然が健康であれば栄養を涵養したり、貧酸素水の影響を軽減する機能を持っていますが、現状では、三河湾へ過剰な栄養を負荷したり、貧酸素水の発生を促進する、不健康を助長する場になっている疑いがあります。

そこで、以降の精密検査では、これまで議論されてきた主要な原因である干潟・浅場の喪失といった生息空間の変化に加えて、沿岸の人工的に改変した環

¹ 鈴木輝明・武田和也・本田是人・石田基雄(2003)三河湾における環境修復事業の現状と課題,海洋と生物 146(vol.25 no.3),187-199

境の変化が、三河湾の健康をどのように、またどの程度損ねているのかを検査することとしました。

2) 精密検査

ア) 検査内容

再検査において、デッドゾーンと判定された 73 水域を、地形の形状と、利用形態により、以下の 4 つに分類しました。

- ① 窪地
- ② 大規模泊地（大規模港湾）
- ③ 小規模泊地（漁港等）
- ④ 入江

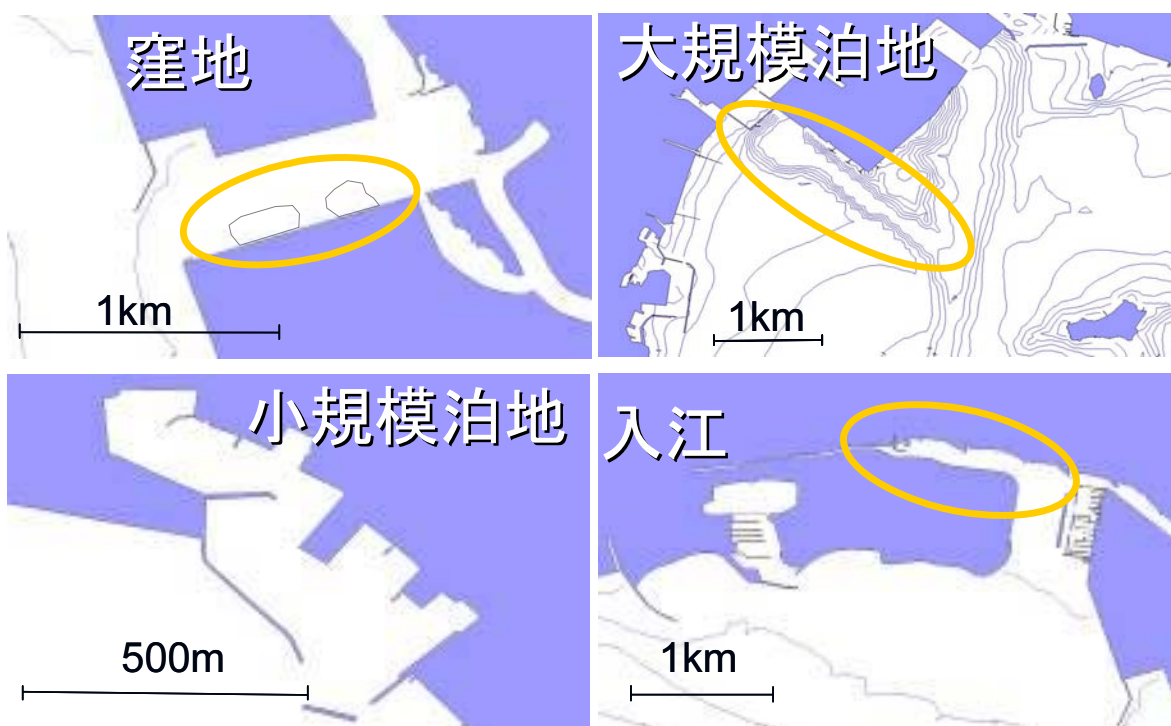


図 3.13 4 つに分類されたデッドゾーン

4 つに分類されたデッドゾーンから、それぞれ 1 水域ずつ代表水域を選定し（図 3.13）、どのような不健康な事象が発生しているのか、また、その不健康な事象が、三河湾全体の健康に対してどの程度影響しているのかを検査することとしました。

以上の検査にあたっては、より定量的に検討するために、数値シミュレーションというツールを用いました。水温や溶存酸素量などを予めモデル計算し、その条件に適応できる底生動物の出現程度を予測し、さらに、その底生動物予

測結果を水質計算モデルにフィードバックすることによって、生物の生息による効果を精度良く再現するように工夫しました（詳細については、資料編参照）。なお、次章の処方箋の効果想定についても、この計算方法を用いています。

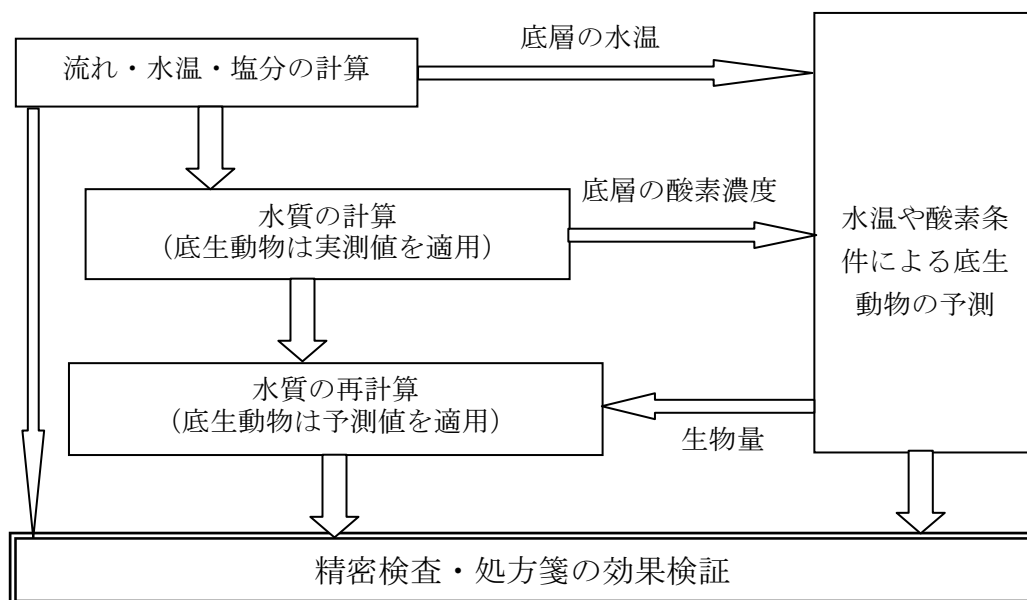
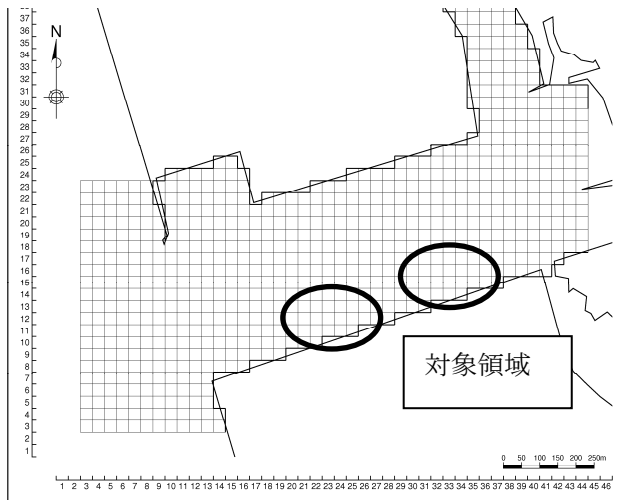


図 3.14 数値シミュレーションによる検討の流れ

イ) 検査結果

三河湾の健康への影響評価にあたっては、①窪地、②大規模泊地については含有水の ODU（酸素を消費する物質の総量、硫化水素の比率は約 1/2）、③小規模泊地、④入江については、有機物（懸濁態有機物（窒素））を指標としました。

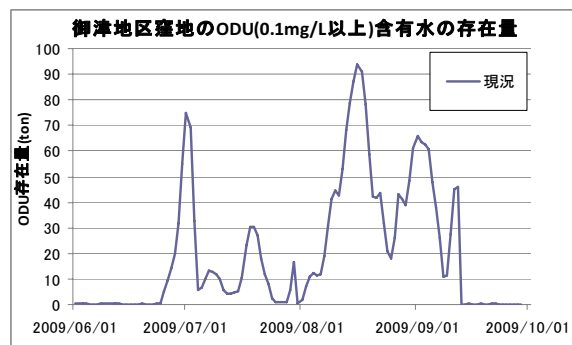
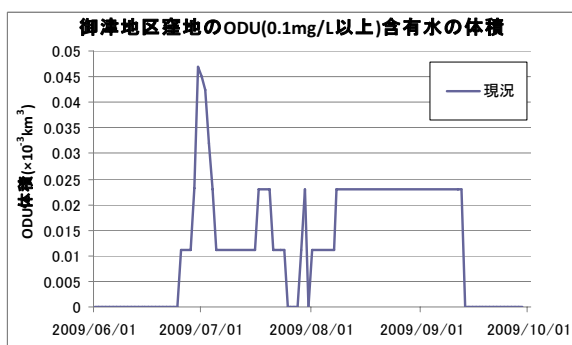
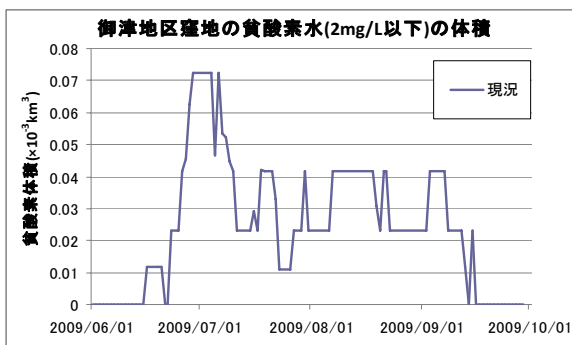
①窪地（御津地区）



症状

- ・ 夏季に窪地内が貧酸素化するとともに底生動物現存量がゼロになる
- ・ 夏季に窪地内に硫化水素が蓄積され、周辺海域に対して脅威となる

精密検査結果（貧酸素の体積および酸素消費物質（ODU）の体積と存在量）

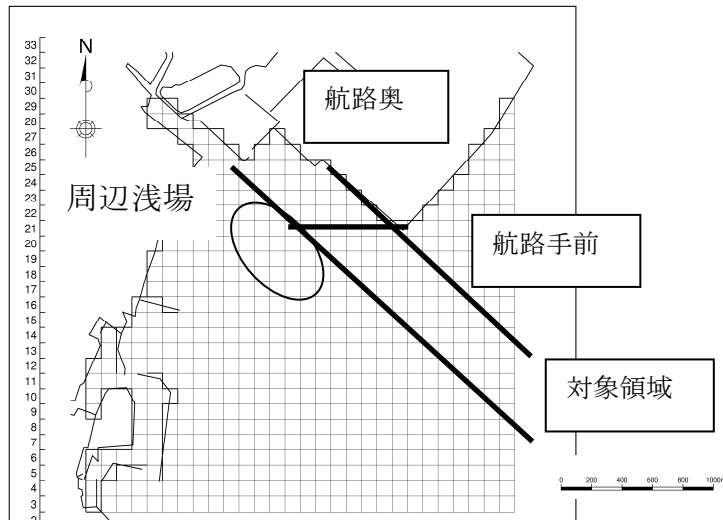


- ・ 最大で 72,000m³ の貧酸素水塊、47,000m³ の ODU0.1mg/L 以上含有水が窪地内に蓄積されている。
- ・ 6月下旬から9月中旬までほぼ間断なく貧酸素水と ODU が窪地内に存在している。

診断結果

- ・ 成層が強まり鉛直循環流が弱まる夏季に窪地内の海水交換は低下し、その結果、貧酸素化し、硫化水素を含む酸素消費物質（ODU）が蓄積されるようになる。

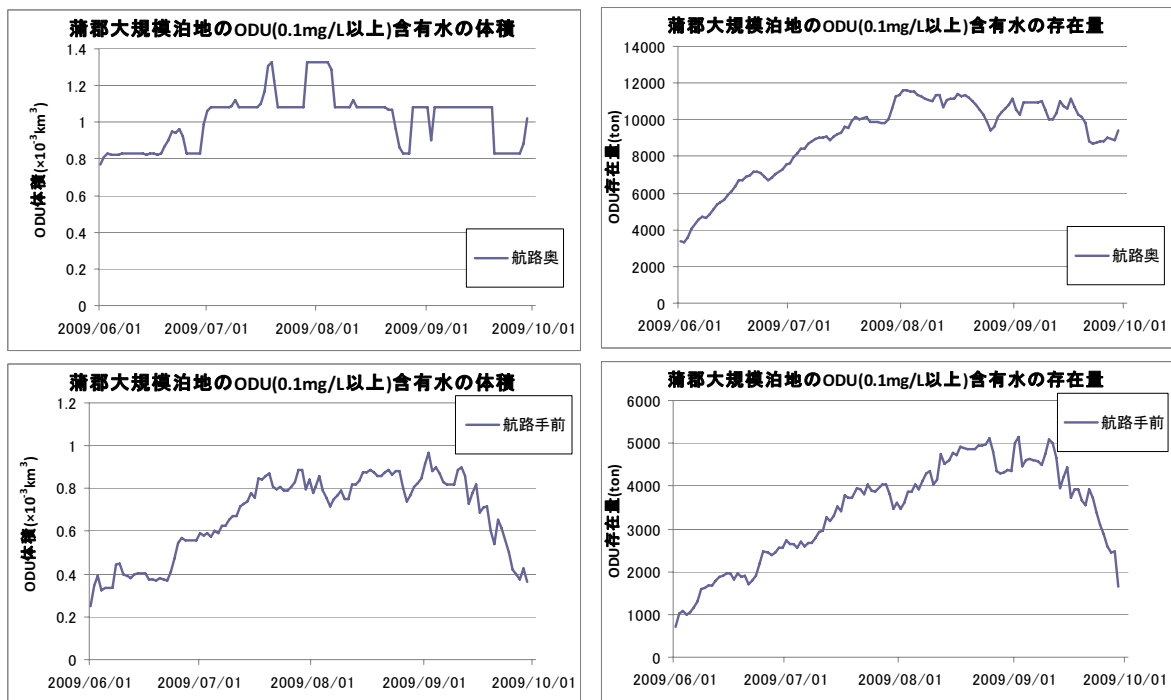
②大規模泊地（蒲郡港）



症状

- ・ 夏季に航路内が貧酸素化するとともに底生動物現存量がゼロになる
- ・ 夏季に航路内に硫化水素が発生し、それが周辺海域にあふれ出すことにより、周辺浅場の底生動物も死滅させる

精密検査結果（酸素消費物質（ODU）の体積と存在量）

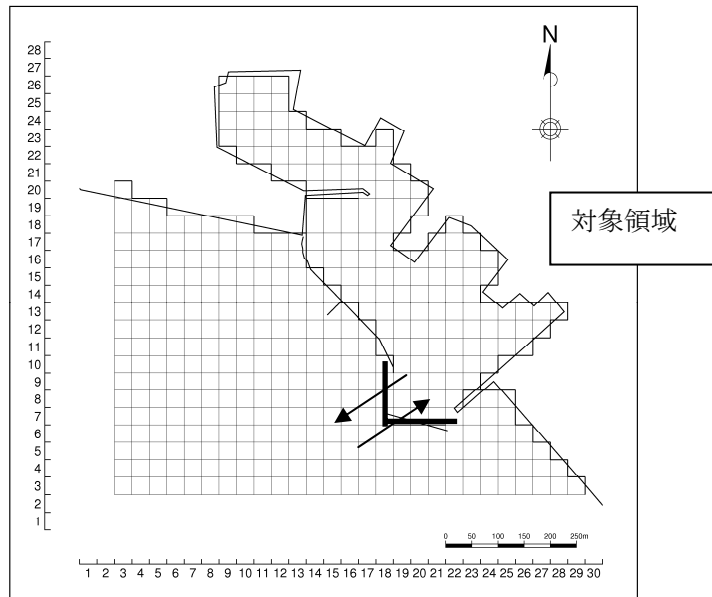


- ・ 最大で 2,300,000m³ の ODU0.1mg/L 以上含有水が窪地内に蓄積されている。
- ・ 6～9月に周辺浅場に流出する ODU の合計は 1,081kg であった。

診断結果

・ 航路奥で恒常的に ODU が存在し、6月から8月にかけて存在量が増加して（濃度が高くなって）いる。また航路奥から周辺浅場へ ODU があふれだしていた。

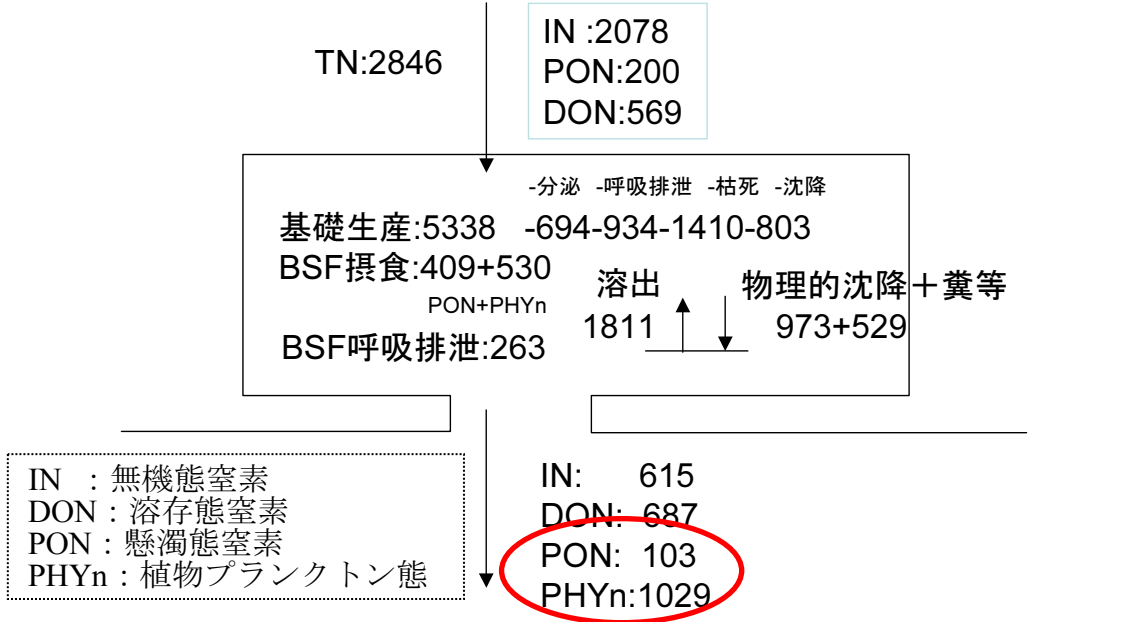
③小規模泊地（三谷漁港）



症状

- ・夏季に底層が貧酸素化するとともに底生動物現存量が減少

精密検査結果（6～9月の窒素収支、単位：kgN）

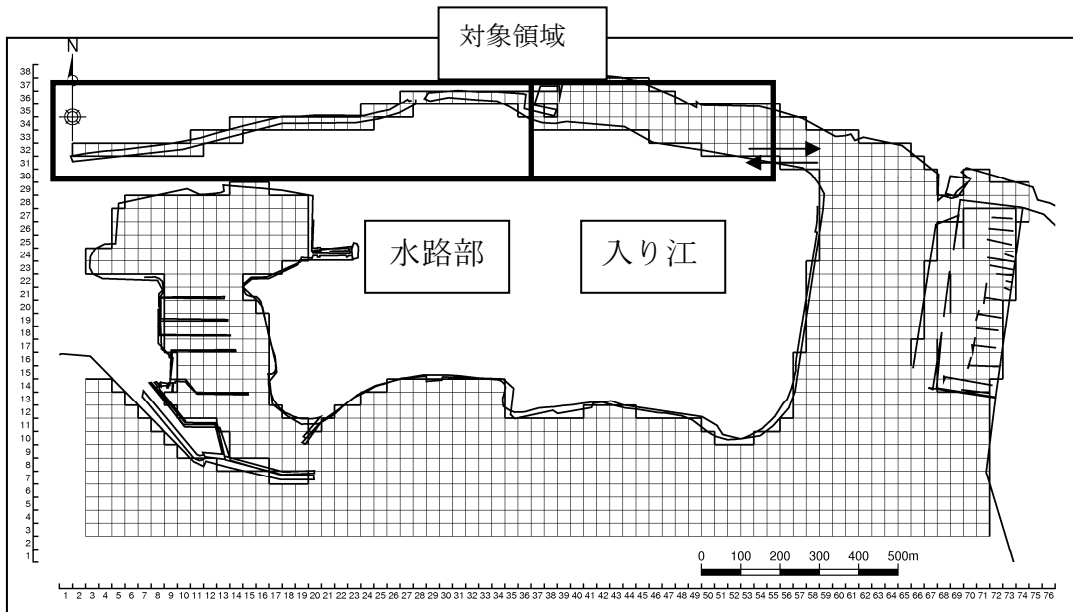


- ・夏季に 1,132KgN(103+1,029)の懸濁態有機窒素負荷を周辺海域に与えている。

診断結果

- ・流れが遅く水が停滞しやすいため植物プランクトン濃度が高くなり、それらが沈降・分解することにより底層水が貧酸素化しやすい。
- ・夏季は底質が悪化しやすい。

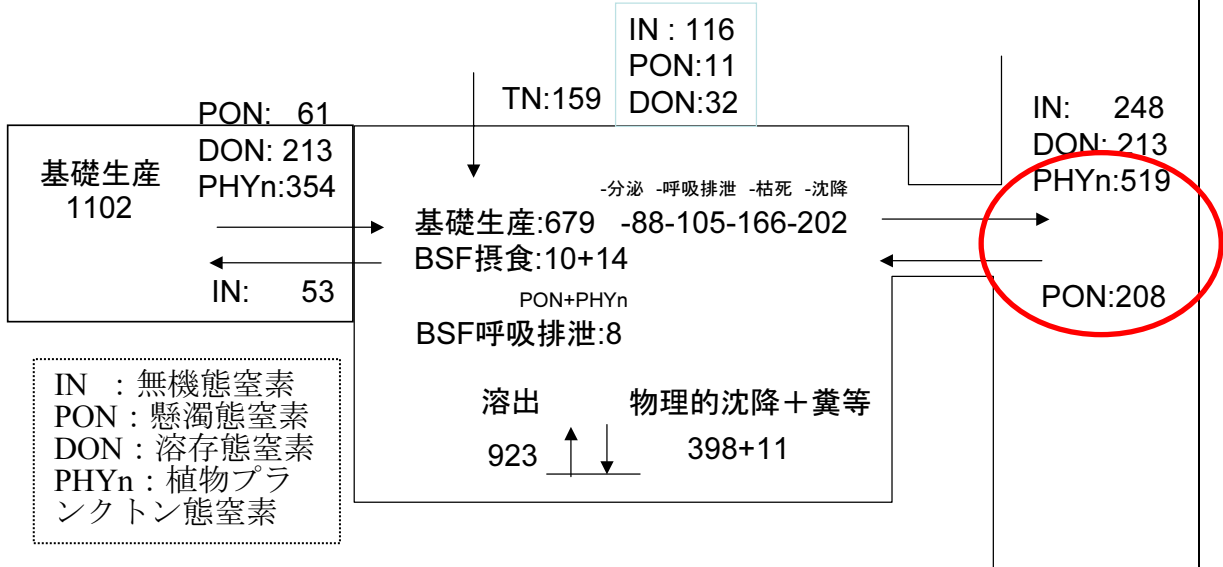
④入江（ラグーナ）



症状

- ・ 夏季に底層が貧酸素化するとともに底生動物現存量が減少
- ・ 貧酸素化解消後も底生動物の加入が少ない

精密検査結果（6～9月の窒素収支、単位：kgN）



- ・ 夏季に 311kgN(519-208)の懸濁態有機窒素負荷を周辺海域に与えている。

診断結果

- ・ 流れが遅く水が停滞しやすいため植物プランクトン濃度が高くなり、それらが沈降・分解することにより底層水が貧酸素化しやすい。
- ・ 水路部から高い濃度の植物プランクトンと貧酸素水が入江に流入する。

ウ) 精密検査のまとめ

精密検査のまとめとして、三河湾全体に対する各デッドゾーンにおける症状の影響の程度を想定してみました。

窪地、大規模泊地に分類されたデッドゾーンに蓄積される ODU が 0.1mg/L 以上である海水の体積の最大値を合計すると、約 66,530,000m³ でした。この体積は、三河湾においてすでに埋戻し修復が進められた、御津沖及び大塚沖浚渫窪地の容量の 21 倍に相当しており、生物が多い周辺の浅場へ苦潮として漏れ出した場合、三河湾の生物にとって脅威的な規模であると診断されました。

入江、小規模泊地に分類されたデッドゾーンから 6 月から 9 月の間に負荷される有機物（懸濁態有機窒素）の総量は、8.7tonN と推算されました。本来であれば水質浄化を担っている場が、逆に湾全体への過剰な栄養供給を助長していることが明らかとなりました。鈴木ら（1997）²では、三河湾に存在する自然干潟（一色干潟）において、夏季に干潟外から供給される有機物（懸濁態有機窒素）が 156mgN/m²/日の速度で除去されていると報告しており、この速度が一定と仮定すると 6 月から 9 月の間に 190kgN/ha が干潟によって除去される量と推算されます。これらから、入江、小規模泊地に分類されたデッドゾーンから負荷される有機物（懸濁態有機窒素）を除去するには、干潟 46ha が必要であると試算され、負荷される有機物は、三河湾の不健康を助長する量であると診断されました。

以上より、各デッドゾーンにおいて地形や海水交換などの条件に応じた不健康な状態が実際にみられ、さらにそれらは三河湾全体に影響している可能性が高いと診断しました。特に、デッドゾーンに蓄積される ODU やデッドゾーンから過剰に供給される有機物（懸濁態有機物）により、苦潮や貧酸素水塊の発生が助長され、沿岸の生物の生息が阻害されることは、陸域からの栄養を一旦貯留する機能を弱めることにつながり、三河湾の不健康を助長する深刻な原因と考えられます。

² 鈴木輝明・青山裕晃・畑 恭子(1997)干潟生態系モデルによる窒素循環の定量化—三河湾一色干潟における事例—. 海洋理工学会誌, 2,63-80.

4. 処方箋

精密検査の結果から、三河湾を不健康にしている原因の1つとして、デッドゾーンは無視できない存在であることがわかりました。そこで、デッドゾーンを解消するための処方箋とその効果について推定しました。

4.1 処方箋の選定

精密検査で対象とした4分類されたデッドゾーンの代表水域（①窪地、②大規模泊地（大規模港湾）、③小規模泊地（漁港等）、④入江）についてそれぞれ処方箋を選定しました。

処方箋については、その場の様々な制約条件等を考慮して、できる限り現実的に実施できる見込みがあり、効果が見込めそうな処方箋を選定しました（図4.1）。なお、各処方箋の選定理由については、表4.1に示したとおりです。

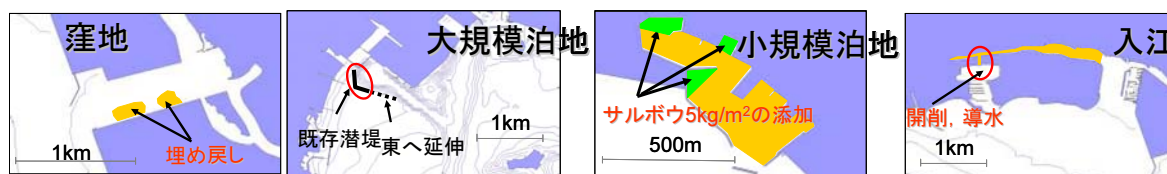


図 4.1 想定される具体的な処方箋

表 4.1 処方箋の選定理由

タイプ	処方箋	処方箋の選定理由
①窪地	埋戻し	対象となっている窪地では、処方箋を制限する大きな条件は少なく、周辺の浅場において生物が多いことが確認できていることから、すでに三河湾において実績があり効果も確認されている、窪地全体を埋め戻す方法を選択した。
②大規模泊地（大規模港湾）	周辺浅場への貧酸素水流出防止	大規模泊地では、人為的な利用を確保するために埋戻しができず、泊地内に酸素を送るなどの手法も費用対効果の面から難があることから、対症療法として、西側に存在する生物が多い浅場への貧酸素水の流出を防止する処方箋を選定した。対象水域の西側に造成干潟の土留めを目的にした潜堤（高さ約 1m）が存在していることから、これを活用して、この潜堤を南東方向へ延伸することによって、西側へ泊地から貧酸素水が漏れ出ることを防ぐこととした。
③小規模泊地（漁港等）	泊地内浅場への生物（二枚貝）添加	小規模泊地では、海水の停滞に伴って貧酸素水が発生し、さらに、生物の幼生の加入が阻害されることによって、水質浄化能力が低下していると考えられる。水域の静穏性を維持しつつ、海水交換を促進することは技術上非常に難しいことから、同じ小規模泊地の中でも水深の浅い場所では溶存酸素量が高く部分的に生物の生息環境が保持されていることを活用して、泊地内の水深が浅い所へ生物（二枚貝）を投入して、水質浄化能力を高める処方箋を選定した。
④入江	開削・導水（水深の嵩上げ、生物（二枚貝）添加）	入江では、行き詰まりの地形が海水交換を阻害して、夏季に貧酸素化が進行し生物の生息が困難になっている。この課題を解決するために種々の処方箋が考えられるが、単独の効果的な処方箋を選定することが難しいことから、入江奥部の開削・導水、入江の水深の嵩上げに加えて生物（二枚貝）を導入するという総合的な処方箋を選定した。

4.2 処方箋による定量的な効果の試算

4.1 において示した処方箋の定量的な効果について、シミュレーションモデルを用いて推定しました。

なお、ここまでの診断結果及び具体的な処方箋は表 4.2 に示すとおりです。

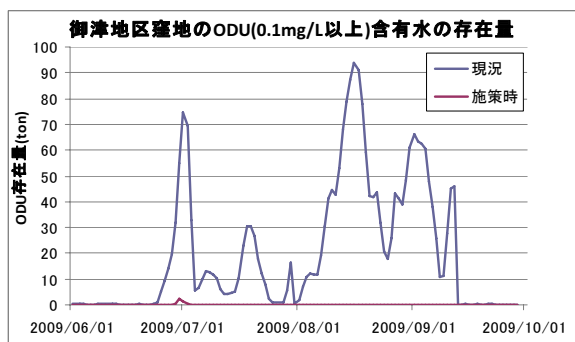
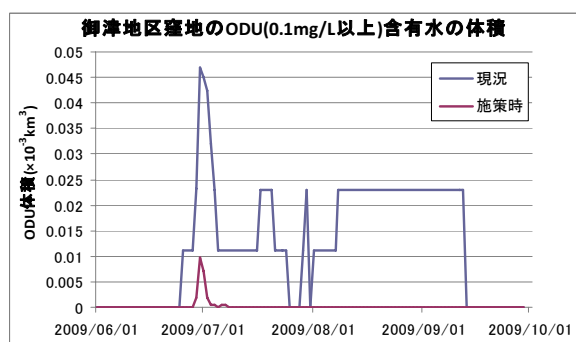
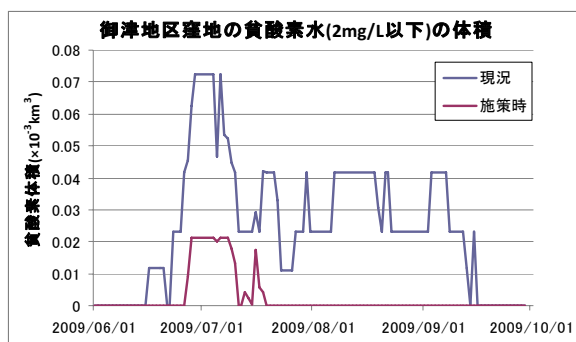
表 4.2 診断結果及び具体的な処方箋

	窪地	大規模泊地	小規模泊地	入江
	御津地区	蒲郡港	三谷漁港	ラグーナ蒲郡
悪化メカニズム	海水交換の低下に伴う貧酸素水および酸素消費物質(ODU)の蓄積	貧酸素水および酸素消費物質(ODU)の蓄積と周辺浅場へのODUの流出	海水交換の低下に伴う高い基礎生産とその沈降・分解に伴う貧酸素化	海水交換の低下に伴う高い基礎生産とその沈降・分解に伴う貧酸素化
精密検査結果	最大で 47,000m ³ の ODU が窪地内に蓄積されている	最大で 2.3 × 10 ⁻³ km ³ の ODU が窪地内に蓄積されている。周辺浅場に流出する ODU は 1,081kg。	夏季に 1,132kgN の懸濁態有機窒素を周辺海域に負荷	夏季に 311kgN の懸濁態有機窒素を周辺海域に負荷
具体的な処方箋	窪地の埋戻し(周辺地盤高まで)	周辺浅場への貧酸素水流出防止を目的とした潜堤の設置(海面下 5m 以深)	懸濁態有機物の固定を目的とした泊地内浅場への二枚貝 5kg/m ² の添加	後背地の流動性の確保を目的とした開削(33.3m × 100m) 1m のかさ上げと二枚貝 1kg/m ² の添加

窪地（御津地区）

精密検査時および処方箋適用時

（貧酸素水の体積および含有水の酸素消費物質（ODU）の体積と存在量）



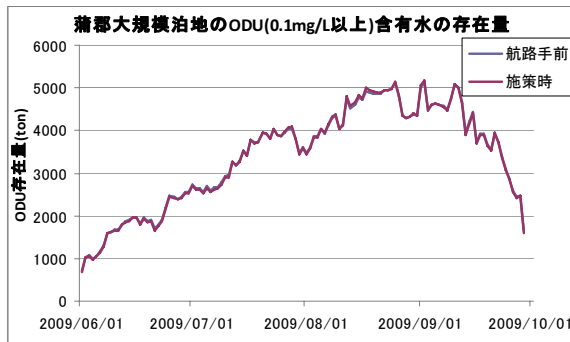
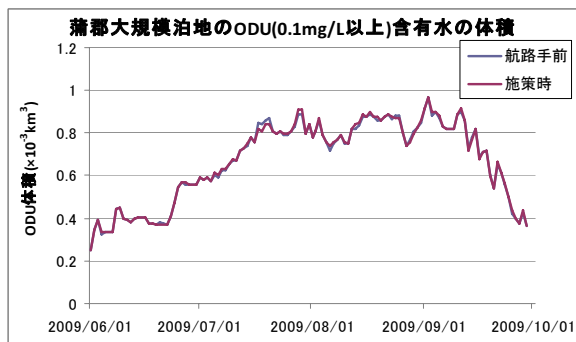
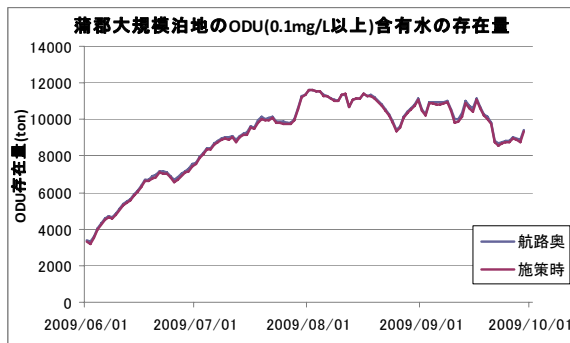
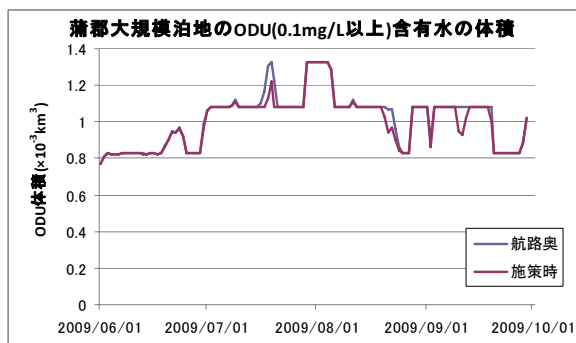
処方箋の効果（推定）

- 最大で $72,000\text{m}^3$ の貧酸素水塊、 $47,000\text{m}^3$ の ODU 0.1mg/L 以上含有水が窪地内に蓄積されていたが、処方箋の適用により、最大値は貧酸素水塊が $21,000\text{m}^3$ 、ODU 0.1mg/L 以上含有水が $10,000\text{m}^3$ に低減する。
- 処方箋の適用により、周辺海域と同様に底生動物が生息した場合、底生動物によって6～9月に 423kgN の懸濁態有機窒素の摂取があると推測された。

大規模泊地（蒲郡港）

精密検査時および処方箋適用時

（貧酸素水および含有水の酸素消費物質（ODU）の体積と存在量）

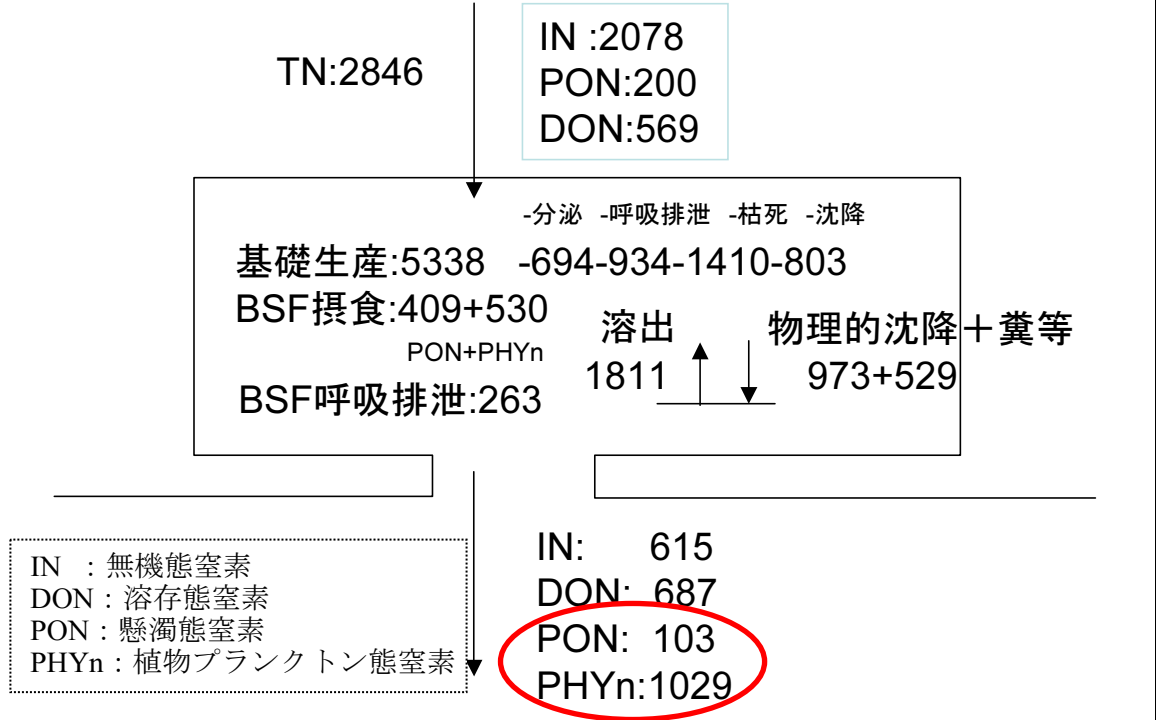


処方箋の効果（推定）

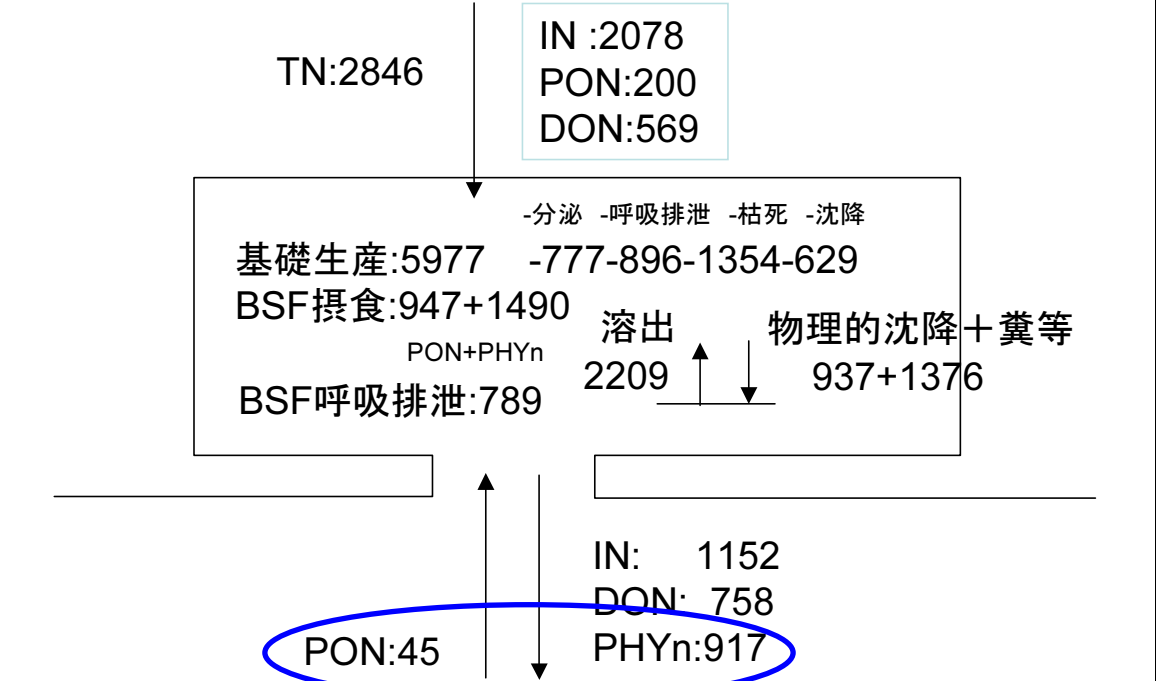
- ・ 窪地内に蓄積される ODU の体積・量には大きな変化は見られない。
- ・ 6～9月に周辺浅場に流出する ODU の合計は 1,081kg であったが、処方箋の適用により流出する ODU は 773kg に低減する。
- ・ 処方箋の適用により、周辺浅場における底生生物体としての窒素ストック量は、9.4kgN から 11kgN に増加する。

小規模泊地（三谷漁港）

精密検査時（6～9月の窒素収支、単位：kgN）



処方箋適用時（6～9月の窒素収支、単位：kgN）

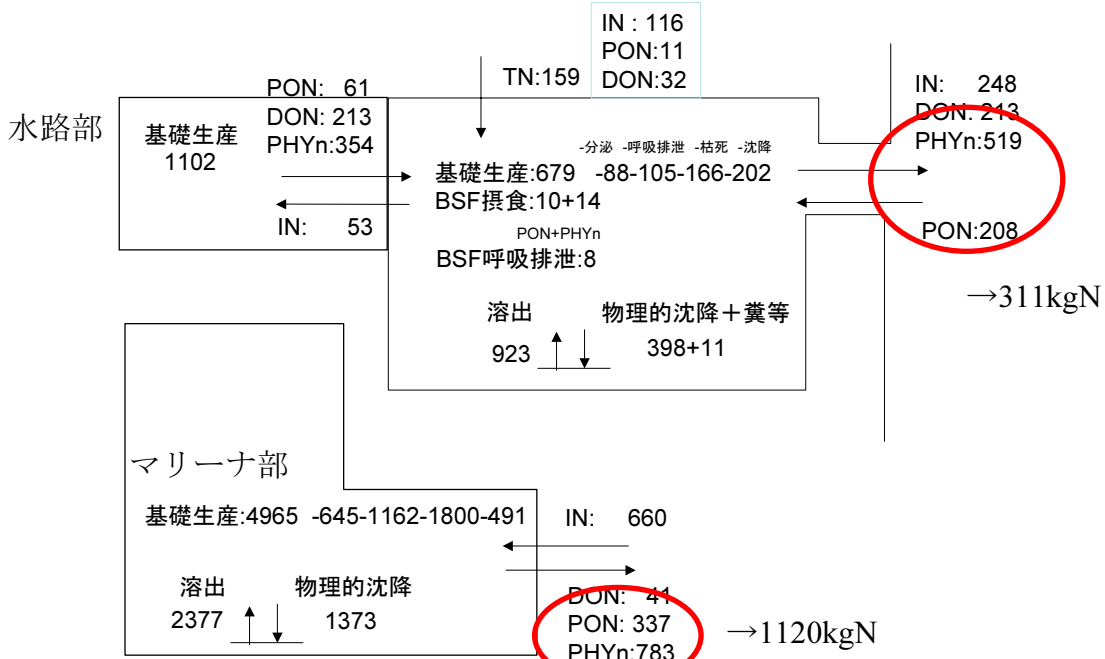


処方箋の効果（推定）

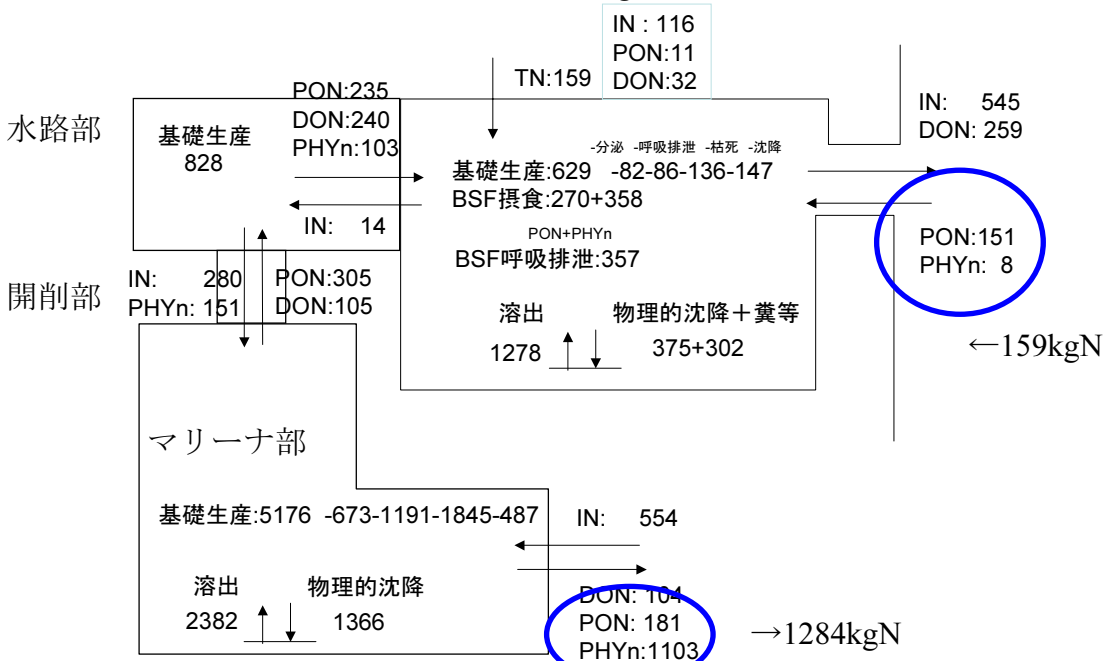
- ・夏季に 1,132kgN（103+1,029）の懸濁態有機窒素負荷を周辺海域に与えていたが、処方箋の適用により周辺に与える負荷は 872kgN（917-45）に低減する。
- ・底生生物体としての窒素ストック量は、74kgNから 297kgNに増加する。

入江（ラグーナ）

精密検査時（6～9月の窒素収支、単位：kgN）



処方箋適用時（6～9月の窒素収支、単位：kgN）



処方箋の効果（推定）

- ・夏季に入江から 311kgN、マリーナ部から 1,120kgN の懸濁態有機窒素負荷を周辺海域に与えていたが、処方箋の適用により入江ではソースから 159kgN のシンクになり、マリーナ部から流出する増加分 164kgN（1284-1120）との差し引きで、このエリア全体として 5kgN に低減する。
- ・底生生物体としての窒素ストック量は、3.6kgN から 231kgN に増加する。

4.3 まとめ

想定した処方箋による各デッドゾーンにおける効果と、さらにその効果が三河湾全体に及ぼす全体的な効果は以下のとおり想定されます。

- ・ 窪地に対して埋戻すという処方箋を実施した場合、蓄積される ODU が 0.1mg/L 以上である海水体積は埋め戻し前の 21%に激減することに加え、埋め戻した部分で生物が増加するなどの確実な効果がみられました。ただし、大規模泊地のデッドゾーンは埋め戻すことができないため、そこには依然として大量の ODU が残ります。このため、窪地、大規模泊地のデッドゾーン全体に蓄積される ODU が 0.1mg/L 以上である海水体積の最大値の合計約 66,530,000m³は、窪地の埋め戻しにより約 65,403,000m³に減少するものの、削減率は1.7%にとどまります。
- ・ 大規模泊地に対して、周辺浅場への貧酸素水流出防止を目的とした潜堤の設置といった処方箋を適用すると、6～9月に周辺浅場に流出する ODU の合計 1,081kg は 773kg に減少すると見積もられました。
- ・ 以上の2つの検討から、窪地を埋戻すという処方箋を実施することは有効である一方、三河湾では窪地よりも大規模泊地の容積が大きいため、大規模泊地に対してさらに効果的な処方箋を検討していく必要があると考えられました。
- ・ 入江、小規模泊地に対して、二枚貝類の添加、開削・導水（地盤の嵩上げと二枚貝類の添加も併用）という処方箋をそれぞれ実施した場合の三河湾全体への効果を検討しました。有機物（懸濁態有機窒素）供給量の各削減効果を三河湾全体の入江及び小規模泊地の面積と掛けあわせて試算すると、6月から9月の間に供給される有機物（懸濁態有機窒素）の総量 8.7tonN は、52%低減し 4.2tonN となると推算されました。このように、入江、小規模泊地のデッドゾーンについては、処方箋を実施することによって、過剰に負荷されている有機物を生物が貯留できるようになり、デッドゾーンから三河湾へ負荷される過度の有機物を減らすことが可能であることが示されました。

以上の結果をまとめると、窪地のような人工的に生み出され、利用上の目的がない場所は、元の水深に復元することが急務であることが示されました。

入江のような行き詰まりの地形については、開削・導水によって海水交換率を高め、貧酸素化を防ぐと同時に、生物の加入を促進することが有効であると示されました。生物の生息を確保するためには、貧酸素水が発生しにくい水深に嵩上げすることも重要です。

小規模な泊地では、生物の生息可能場所に底生動物を投入し、それらのもつ浄化機能を利用することが有効であることが示唆されました。

また、これらの処方箋の適用により、底生動物の生物量が夏季に増加することが確認されました。このことは、生体としてストックされる有機物が増加し、無効に沈降して貧酸素化を引き起こす有機物が低減することを意味します。さ

らに、増加した生物を漁獲することで有機物の低減効果が増します。これらの効果に加え、底生動物の増加は、年間を通じた有機物の無機化速度を高め、無機態として回帰する栄養を増やします。これらの栄養は、例えば冬季のノリ等、水産物として重要な植物へ供給される栄養の増加をもたらします。

また、近隣に生物の幼生を大量に供給してくれる場を造成することも重要です。干潟については、複数の場がそれぞれに底生動物の幼生の供給源になって（幼生供給ネットワーク）、生態系を強くしています。遊泳する魚介類も含めた生物ネットワークの強化、すなわち近隣での干潟、アマモ場造成も処方箋として有効です。

5. 今後の課題と展望

5.1 大規模泊地の治療の難しさ

「4. 処方箋」では、代表的なデッドゾーンのタイプのうち、3つのタイプについては、一定の効果を示す有効な処方箋を示すことができましたが、大規模泊地のタイプに対する処方箋には、効果の面から課題が残っています。

今回得られた結果は、大規模泊地については、今後さらに効果的な処方箋の検討が必要であることと同時に、治療が難しいこのような場の安易な創出は慎むべきであり、施設の整備にあたっては、周囲に与える影響を十分吟味する必要があることを示しています。

5.2 順応的な管理による処方箋の実施

今回提示した処方箋を実施することによって、確実に三河湾の健康を取り戻す方向に進むことが想定されますが、効果の程度はあくまで数値シミュレーションを用いて予測した結果であるため、実際に適用する場合には副作用が局所的にみられるなどのリスクを伴っています。そのため、処方箋の実施にあたっては、段階的に実施して効果や副作用を確認しつつ進める、順応的な管理の考え方が必要となります。

特に、入江を対象とした開削・導水の処方箋については、実際に処方箋を実施する場所にあわせて効果の再検証を十分に行った上で、順応的な管理による処方箋の実施が必要になるものと考えられます。

5.3 三河湾の今後の健康診断

三河湾の健康については、ここまでの診断結果をもとに、より適切な手法によって継続的にチェックしていくことが必要です。

まず、処方箋を実施することによる局所的な効果については、特に不健康に陥る夏季を対象とした以下のような調査の実施が望まれます。

<処方箋実施による局所的な効果確認調査>

- ・ 処方箋実施水域における貧酸素水の動態を確認できる溶存酸素の連続的な調査
- ・ 処方箋実施水域における堆積・分解の改善状況を把握するための水深別の底質（硫化物）・底生動物調査
- ・ 湾全体の貧酸素の変化を捉えることができる自動観測ブイによる観測

さらに、処方箋の実施による三河湾全体の健康の改善状況のチェック手法としては、これまでの海の健康診断の一次検査内容を基本にした、表 5.1 に示す内容が考えられます。なお、ここに示す検査手法や診断基準等については、今後、三河湾の状況にあわせてより精緻なものにしていくことが望まれます。こ

ここに示す検査案が、地元の診断医による三河湾の特性を踏まえて、より精緻な内容になり、三河湾に定着した検査となるよう期待します。

表 5.1 (1) 三河湾の状況にあわせた海健康診断検査 (生態系の安定性)

視点	検査項目	必要な資料 及び調査	検査内容				検査基準			
			前処理	スタンダード値	検査値	結果	良好 (A)	要注意 (B)	要精検 (C)	
生態系の安定性	生物組成	漁獲生物の分類群別組成の変化	農林水産統計年報による魚種別漁獲量	最近 20 年間の最多漁獲量の分類群を抽出し、検査対象とする。	20 年間の漁獲割合の平均を FRs、漁獲量の平均を FCs とする。	最近 3 年間の漁獲量割合の平均を FRt、漁獲量の平均を FCt とする。	FR、FC を求める。 FR=FRt/FRs FC=FCt/FCs	0.8 ≤ FR ≤ 1.2 かつ 0.7 ≤ FC ≤ 1.3	0.8 ≤ FR ≤ 1.2 かつ FC < 0.7 または 1.3 < FC	FR < 0.8 または 1.2 < FR
		海岸生物の出現状況	海岸における生物出現確認調査	—	各海湾の代表生物種類数を LCs とする。	代表生物のうち出現が確認された種類数を LCt とする。	LC を求める。 LC=LCt/LCs	LC=1	0.8 ≤ LC < 1	LC < 0.8
	生息空間	干潟・藻場面積の変化	日本の干潟、藻場、サンゴ礁の現況 (環境庁)	—	—	1970 年代以前と最新の干潟・藻場面積を比較する。	—	干潟・藻場面積は減少していない	干潟・藻場面積のいずれかが減少している	干潟・藻場面積がともに減少している
		人工海岸の割合	環境省自然環境保全基礎調査	—	—	最新の人工海岸の割合を AC (%) とする。	—	AC ≤ 20	20 < AC < 50	50 ≤ AC
	生息環境	有害物質の測定値	公共用水域水質調査 (健康項目データ)	最近 20 年間のすべての健康項目測定値を検査対象とする。	各健康項目の環境基準値を PSs とする。	各健康項目の測定値を PSt とする。	PS を求める。 PS=PSt/PSs	すべての健康項目で PS < 0.8	1 つの健康項目でも 0.8 ≤ PS < 1	1 つの健康項目でも 1 ≤ PS
		貧酸素水の確認頻度	底層の溶存酸素量データ (公共用水域水質調査、 貧酸素水塊状況調査)	—	最新の底層の溶存酸素量の調査地点数を CWs とする。	貧酸素水 (4.3mg/L 未満) が確認された調査地点数を CWt とする。	CW を求める。 CW=CWt/CWs	CW < 0.1	0.1 ≤ CW < 0.5	0.5 ≤ CW
		苦潮発生件数	苦潮発生調査	最近 20 年間の苦潮発生件数を検査対象とする。	20 年間の平均を NTs とする。	最近 3 年間の平均を NTt とする。	NT を求める。 NT=NTt/NTs	NT < 0.5※	0.5 ≤ NT < 1.0	1.0 ≤ NT

注) 赤字はデータの追加、青字は新規検査項目として追加

表 5.1(2) 三河湾の状況にあわせた海健康診断検査（物質循環の円滑さ）

視点	検査項目	必要な資料及び調査	検査内容				検査基準			
			前処理	スタンダード値	検査値	結果	良好(A)	要注意(B)	要精検(C)	
物質循環の円滑さ	基礎生産	透明度の変化	公共用水域水質調査、赤潮調査、貧酸素水塊状況調査	最近 20 年間の透明度の平均値を検査対象とする。	20 年間の平均を TP _s (cm) とする。	最近 3 年間の平均を TP _t (cm) とする。	TP, TD を求める。 TP=TP _t /TP _s TD= TP _t -TP _s	0.8 ≤ TP ≤ 1.2 かつ TD < 20	0.8 ≤ TP ≤ 1.2 かつ 20 ≤ TD	TP < 0.8 または 1.2 < TP
		赤潮の発生日数	赤潮発生延べ日数	最近 20 年間の赤潮発生延べ日数を検査対象とする。	20 年間の平均を RT _s (日) とする。	最近 3 年間の平均を RT _t (日) とする。	RT を求める。 RT=RT _t /RT _s	0.8 ≤ RT ≤ 1.2 最近 3 年間は減少傾向	0.8 ≤ RT ≤ 1.2 最近 3 年間は増加もしくは横ばい傾向	RT < 0.8 または 1.2 < RT
		クロロフィル a の変化	公共用水域水質調査、赤潮調査	最近 20 年間のクロロフィル a 濃度の平均値を検査対象とする。	20 年間の平均を CH _s (cm) とする。	最近 3 年間の平均を CH _t (cm) とする。	CH を求める。 TP=CH _t /CH _s	0.8 ≤ CH ≤ 1.2 最近 3 年間は減少傾向	0.8 ≤ CH ≤ 1.2 最近 3 年間は増加もしくは横ばい傾向	CH < 0.8 または 1.2 < CH
負荷・海水交換	負荷と滞留のバランス	負荷量、容積（海の基本図、海図、測量原図）、河川流量（流量年表、各県資料）、塩分（公共用水域水質調査、JODC データ）	淡水滞留時間 τ (day) を求める。 τ = (S ₀ -S ₁) / S ₀ Q S ₀ : 湾外基準塩分 S ₁ : 湾内平均塩分 Q: 河川流量 (m ³ /day) 単位体積当たり負荷量 H _x (mg/day/m ³) を求める。 H _x =P _x /V P _x : 負荷量 (mg/day) (x: COD, T-N, T-P) V: 海湾の体積 (m ³)	水質項目 (x) ごとに以下のとおりとする。 COD 0.2mg/L T-N 0.2mg/L T-P 0.02mg/L	水質項目 (x) ごとに負荷滞留濃度 (LR) を求める。 LR(x) = τ H _x	COD, T-N, T-P ともに LR _x < スタンダード値 の場合	COD, T-N, T-P のいずれかが スタンダード値 ≤ LR _x の場合	COD, T-N, T-P ともに スタンダード値 ≤ LR _x の場合		
		河川流量	流量年報（一級河川）	最近 30 年間の河川流量の線形回帰により傾き (RF) を求める。			0 ≤ RF かつ 最近 3 年間は減少傾向 にない	0 ≤ RF かつ 最近 3 年間は減少傾向	RF < 0	
堆積・分解	底質環境	各地方自治体調査等による底質調査結果	—	—	最新の硫化物量の最大値を SD (mg/g) とする。	SD < 0.2	0.2 ≤ SD < 1	1 ≤ SD		
	無酸素水の出現状況	底層の溶存酸素量データ（公共用水域水質調査結果、貧酸素水塊状況調査、自動観測ブイデータ）	—	—	最新の溶存酸素量の最低値を AW (mg/L) とする。	2.9 ≤ AW	0.5 ≤ AW < 2.9	AW < 0.5		
除去（漁獲）	底生魚介類・ノリの漁獲量	農林水産統計年報による魚種別漁獲量	最近 20 年間の底生魚介類（底魚及び底生動物、ノリ生産量については湿重量に換算）の漁獲量を検査対象とする。	20 年間の漁獲量平均を FB _s とする。	最近 3 年間の漁獲量平均を FB _t とする。	FB を求める。 FB=FB _t /FB _s	0.7 < FB かつ 最近 3 年間は増加もしくは横ばい傾向	0.7 < FB かつ 最近 3 年間は減少傾向	FB ≤ 0.7	

注) 赤字はデータの追加、青字は新規検査項目として追加

資料編

シミュレーションモデル計算による 精密検査及び処方箋の効果試算結果

目 次

1. 精密検査	1
1.1 データ収集	1
1.2 デッドゾーンにおける悪化メカニズムの検討	2
1.2.1 流動モデル	3
(1) モデルの概要	3
(2) 計算条件の概要	13
(3) 再現性の検討	45
1.2.2 水質モデル	94
(1) 概 要	94
(2) 基本方程式	95
(3) 計算条件	97
(4) 現状解析	102
2. 処方箋の効果試算	115
2.1 対象とした処方箋	115
2.2 処方箋による効果の推定検証	116
2.2.1 予測条件	116
(1) 大規模泊地（蒲郡港）	116
(2) 窪地（御津地区）	117
(3) 小規模泊地（三谷漁港）	117
(4) 入江（ラグーナ蒲郡）	117
2.2.2 流動変化予測	118
(1) 大規模泊地（蒲郡港）	118
(2) 窪地（御津地区）	119
(3) 入江（ラグーナ蒲郡）	120
2.2.3 水質変化予測	124

1. 精密検査

三河湾内における海の健康診断の精密検査に資するため、貧酸素水塊の動態や海水交換が検討できるシミュレーションモデルを構築し、三河湾のデッドゾーンにおける悪化メカニズムを解明し、それらが三河湾全体にどの程度の影響を及ぼすかを検討・評価を行った。

1.1 データ収集

モデルを構築する際に用いる外力条件やモデル検証のための各種の計測された現況データを収集した。

収集データの出典等を表 1.1.1 に示す。なお、収集結果については、次項の各モデルの概要の中でその結果を示した。

表 1.1.1(1) 収集データの出典【外力および入力条件に関わるデータ】

項目	内容・出典	
水深・地形条件	<ul style="list-style-type: none"> 海図(海上保安庁) 干潟地形図 (愛知県水産試験場) 	
淡水流入条件	河川流量 (一級河川)	<ul style="list-style-type: none"> 国土交通省中部地方整備局豊橋河川事務所
	河川負荷量 (一級河川)	<ul style="list-style-type: none"> 公共用水域水質測定結果
	水温	<ul style="list-style-type: none"> 公共用水域水質測定結果
気象条件	<ul style="list-style-type: none"> 気象庁の気象観測所 (名古屋、伊良湖、蒲郡、南知多) 愛知県水産試験場 自動観測ブイデータ 	
潮位条件	<ul style="list-style-type: none"> 日本沿岸潮汐調和定数表 (海上保安庁水路部発行, 書誌 742 号, 平成 4 年 2 月発刊) 	
水質条件 (水温・塩分等)	<ul style="list-style-type: none"> 公共用水域水質測定結果 愛知県水産試験場 渥美外海観測結果 愛知県水産試験場 自動観測ブイデータ 	

表 1.1.1(2) 収集データの出典【モデル検証用のデータ】

項目	内容・出典
潮流観測結果	<ul style="list-style-type: none"> 伊勢湾水理模型実験場報告, No.13, Mar.1978, 三河湾流況調査(運輸省第五港湾建設局設計室) 伊勢湾水理模型実験場報告, No.15, Mar.1979, 三河湾流況調査(運輸省第五港湾建設局設計室) 国土交通省中部地方整備局三河港湾事務所 水質定点観測結果 (中山水道)
水質観測結果	<ul style="list-style-type: none"> 公共用水域水質測定結果 愛知県水産試験場 渥美外海観測結果 愛知県水産試験場 自動観測ブイデータ 国土交通省中部地方整備局三河港湾事務所 水質定点観測結果 (中山水道)

1.2 デッドゾーンにおける悪化メカニズムの検討

愛知県水産試験場から提供されるデッドゾーンにおける環境データを既存のシミュレーションモデルに適用して水質計算を行い、デッドゾーンが存在している場合（現況）の三河湾の流動や水質環境を再現計算した。その結果から代表的なデッドゾーン4類型の流動や生産性、水質浄化機能を検討し、それぞれの場が本来有しているはずの機能がどれくらい低下しているか、もしくは負の機能を働いているか、類型ごとの悪化メカニズムを検討した。

三河湾におけるデッドゾーン判定水域は図 1.2.1 に示す 60 水域であり、デッドゾーン4 類型の代表水域は図 1.2.2 に示す水域とした。

- 代表水域
- 大規模泊地（大規模港湾）：蒲郡港(100m 格子)
 - 窪地：御津地区(100m, 33.3m 格子)
 - 小規模泊地（漁港）：三谷漁港(100m, 33.3m 格子)
 - 入江：ラグーナ蒲郡(100m, 33.3m 格子)

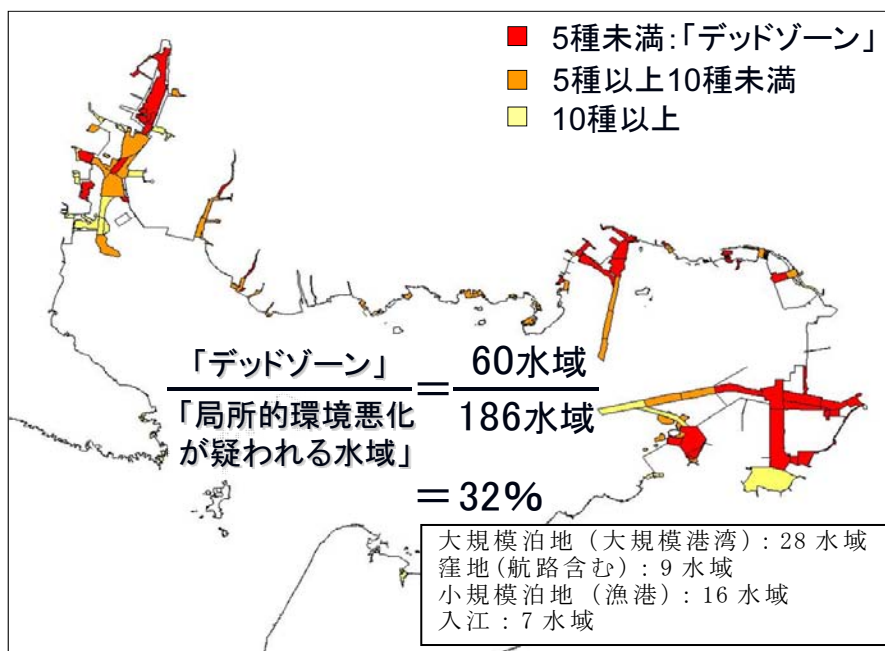


図 1.2.1 底生生物の生息種数予測結果とデッドゾーン判定水域

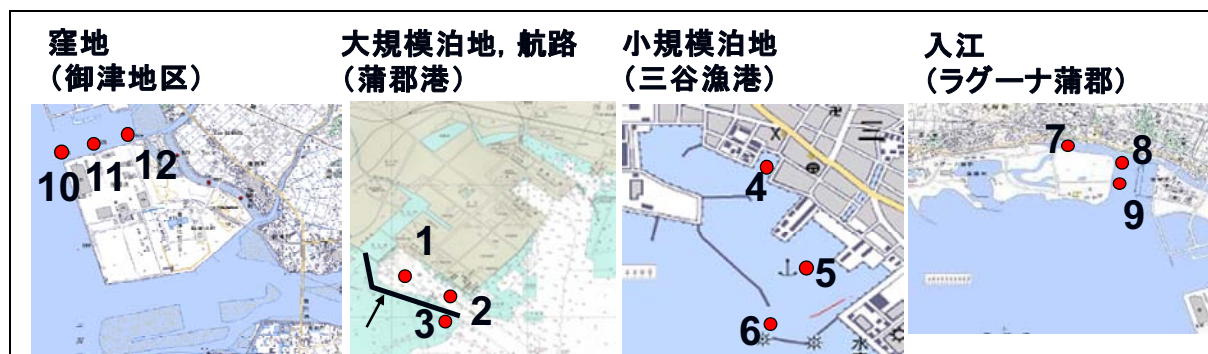


図 1.2.2 デッドゾーン4 類型の代表水域

1.2.1 流動モデル

(1) モデルの概要

流動モデルは流体力学の基礎方程式（運動方程式、連続の式および水温・塩分の保存式）を差分化することにより解く数値モデルである。本研究では、鉛直方向を多層に分割した多層レベルモデルを用いることを基本としたものの、入江（ラグーナ蒲郡）の検討については、入江の奥部における水深が浅く、多層レベルモデルによる表層（第1層）の表現上の限界により、現況再現に課題がある。

この課題に対処するためのモデルとして、一般鉛直座標系を導入した σ 座標モデル（GCS：Global Coordinate System）を採用した。 σ 座標モデルは、水面が上昇・下降しても計算層数が変わらないので、入江（ラグーナ蒲郡）の検討に適していると判断した。

したがって、デッドゾーン4類型に適用するモデルは、以下のように設定した。

大規模泊地(大規模港湾):蒲郡港(100m 格子)	:レベルモデル	} ネステッド グリッド*
窪地:御津地区(100m, 33.3m 格子)	:レベルモデル	
小規模泊地(漁港):三谷漁港(100m, 33.3m 格子)	:レベルモデル	
入江:ラグーナ蒲郡(33.3m 格子)	:GCS モデル	単独領域

※ネステッドグリッド：異なる計算格子の領域を接続し、領域間の流れや物質のやりとりを双方向に伝達して計算を行うモデルである。着目したい領域を詳細格子で表現し、段階的に計算格子を粗くすることで、計算時間の短縮を実現するモデルである。

レベルモデル、 σ 座標モデル、GCSモデルの各モデルの鉛直層分割のイメージを図1.2.3に示す。

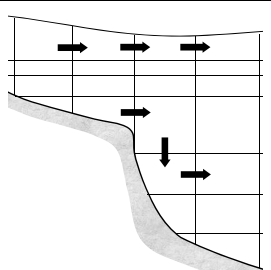
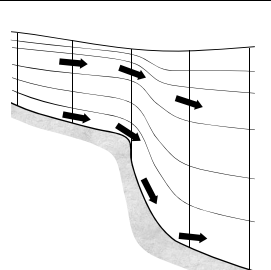
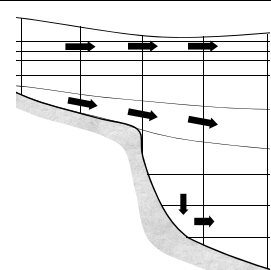
レベルモデル	σ 座標モデル	GCSモデル
		
<ul style="list-style-type: none"> ・ 表層厚の制限により河川水の挙動の表現低下 ・ 海底地形に沿う流れの表現低下 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 海底地形に沿う流れの表現向上 ・ 航路等の地形急変部で座標の歪みによる計算誤差が生じる ・ 水深の深い場所では上層が厚くなり表層近くの成層の表現低下 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 自由度に富んだ鉛直格子の設定が可能 ・ 表層厚を薄くし、河川水の挙動の表現向上 ・ 層区分の工夫により地形急変部の表現向上

図 1.2.3 各モデルの鉛直層分割のイメージ

1) レベルモデル

(a) 概 要

流動モデルは流体力学の基礎方程式（運動方程式、連続の式および水温・塩分の保存式）を差分化することにより解く数値モデルで、鉛直方向を多層に分割した多層レベルモデルを用いた。多層レベルモデルの概念図および各変数（流速・水位）の定義点位置を図 1.2.4 に示す。

基本式は、回転系の非圧縮流体を仮定した運動方程式、連続の式および水温・塩分の保存式であり、ブシネスク近似および静水圧近似が施されている。ブシネスク近似とは、密度の分布が流動に影響するのは密度の空間分布を通して圧力に影響することを通してのみであるとする考え方であり、他に密度が関係するところでは基準密度を用いる。一方、静水圧近似とは鉛直方向の運動方程式における力の釣り合いにおいて、重力と圧力が常に釣り合っていると考えるもので、鉛直方向の加速度は生じないとするものである。どちらの近似も鉛直方向の運動に比べて水平方向の運動が卓越する海域および河川下流部においてよく成立している。

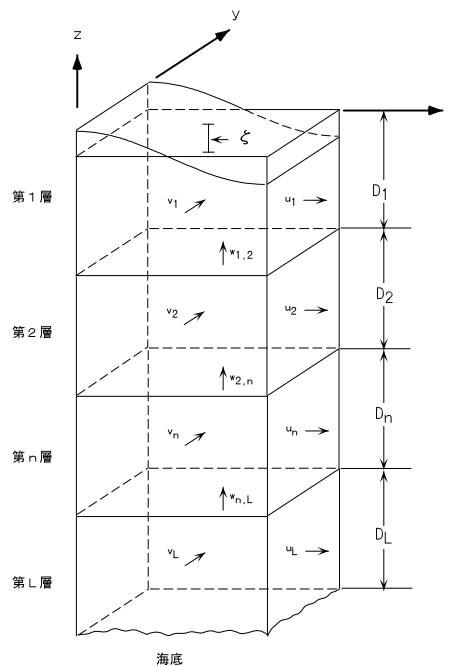


図 1.2.4 多層レベルモデルの概念図と各変数の定義点

(b) 基本方程式

流動モデルの基本方程式は、以下のような連続の式、運動方程式、水温・塩分の拡散方程式からなる。

<連続の式>

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

< 運動方程式 >

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - fv = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_M \frac{\partial u}{\partial z} \right) + F_x$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} + fu = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_M \frac{\partial v}{\partial z} \right) + F_y$$

$$\rho g = -\frac{\partial p}{\partial z}$$

< 水温・塩分の保存式 >

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} + w \frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_H \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + F_\theta$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} + v \frac{\partial S}{\partial y} + w \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_H \frac{\partial S}{\partial z} \right) + F_S$$

右辺の F は平均的な流れと別に短時間の流れの強弱、方向の変化によって海水が混合され、運動、水温、塩分が一様化される効果で、以下の式で表される。

$$F_x = \frac{\partial}{\partial x} \left[A_M \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[A_M \frac{\partial u}{\partial y} \right]$$

$$F_y = \frac{\partial}{\partial y} \left[A_M \frac{\partial v}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[A_M \frac{\partial v}{\partial x} \right]$$

$$F_{\theta,S} = \frac{\partial}{\partial x} \left[A_H \frac{\partial(\theta,S)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[A_H \frac{\partial(\theta,S)}{\partial y} \right]$$

ここで、

x, y, z	: 右手系の直交座標系、上向きを正
u, v, w	: x, y, z 方向の流速成分
p	: 圧力
θ	: 水温
S	: 塩分
f	: コリオリ係数
ρ_0	: 代表密度
ρ	: 密度
K_M	: 鉛直渦動粘性係数
K_H	: 鉛直渦動拡散係数
A_M	: 水平渦動粘性係数
A_H	: 水平渦動拡散係数
G	: 重力加速度
T	: 時間

である。

a) 境界条件

(ア) 海底面

海底摩擦は海底近傍での流速分布をカルマン定数と粗度高さを用いた対数分布則を仮定する。カルマン定数は流体の性質によって決まる定数であり、ここでは 0.4 とした。粗度高さは、底面の土質や、起伏形状などに依存する。以下に式を示す。

$$\rho_0 K_M \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) = (\tau_{bx}, \tau_{by}), \quad \rho_0 K_H \left(\frac{\partial \theta}{\partial z}, \frac{\partial \mathcal{S}}{\partial z} \right) = (0, 0)$$

$$w_b = -u_b \frac{\partial h}{\partial x} - v_b \frac{\partial h}{\partial y}$$

ここで、

$$\bar{\tau}_b = (\tau_{bx}, \tau_{by}) = \rho_0 C_D |\bar{\mathbf{V}}_b| \bar{\mathbf{V}}_b$$

$$\bar{\mathbf{V}}_b = (u_b, v_b), \quad |\bar{\mathbf{V}}_b| = \sqrt{u_b^2 + v_b^2}$$

$\bar{\mathbf{V}}_b$: 海底での水平流速ベクトル
 $\bar{\tau}_b$: 底面応力

である。

添え字 **b** は底面に接する格子の値であることを意味している。底面の摩擦係 (C_D) は、境界層内の流速に関して対数分布則を仮定し、以下の式から求められる。

$$C_D = \left[\frac{1}{\kappa} \ln \frac{h + z_b}{z_0} \right]^{-2}$$

h : 水深
 z_b : 底面に接する格子点 (流速定義点) の鉛直座標値
 z_0 : 粗度高さ (= 1.0 cm)
 κ : カルマン定数 ($\kappa = 0.4$)

(イ) 海表面

海表面における境界条件は次式で定義される。

$$\rho_0 K_M \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) = (\tau_{sx}, \tau_{sy}), \quad \rho_0 K_H \left(\frac{\partial \theta}{\partial z}, \frac{\partial \mathcal{S}}{\partial z} \right) = (Q_{surf} / C_v, 0)$$

$$w = \frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} + v \frac{\partial \eta}{\partial y}$$

ここで、

Q_{surf} : 海表面を通じての熱量
 C_v : 比熱
 W : 鉛直流速
 η : 水位

である。

海面摩擦は、海面における風と海水との摩擦によって風の持つ運動量が海水に移動する効果を表し、風速の 2 乗に比例する形で表現される。以下に式を示す。

$$\vec{\tau}_s = (\tau_{sx}, \tau_{sy}) = \rho_a C_a \vec{W} |\vec{W}|$$

$$\vec{W} = (W_x, W_y), |\vec{W}| = \sqrt{W_x^2 + W_y^2}$$

C_a : 海面摩擦係数

ρ_a : 大気密度

W : 風速ベクトル

τ : 風応力

である。

2) GCS モデル

(a) 概 要

本モデルは、前述のレベルモデルと同様に、流体力学の基礎方程式(運動方程式、連続の式および水温・塩分の保存式)を差分化したシミュレーションモデルで、計算項目は、流向・流速、水温、塩分、水位となっている。

σ 座標モデルは、水面が上昇・下降しても計算層数が変わらないので、成層構造を表現するのに十分な解像度を保つことができ、従来の σ 座標モデルで生じていた水深変化に伴う座標系の傾きによる誤差は、鉛直層区分を工夫することによって軽減することが可能となっている。



図 1.2.5 従来の σ 座標(左)と一般鉛直座標(右)による鉛直層分割の例

(b) 基本方程式

モデルの基本方程式は、連続の式、静水圧近似およびブシネスク近似が施された運動方程式、水温・塩分の保存式、乱流統計量の保存式となる。また鉛直方向について図 1.2.5 に示すような海面と海底で規格化された σ 座標を導入するために、基礎方程式は z 座標から座標変換が施される。 σ 座標と z 座標の定義式は次式となる。

$$\sigma = \frac{z - \eta}{H + \eta}$$

ここで、 σ : σ 座標、 z : z 座標、 η : 静水面から上向きを正にとった水位、 H : 静水面から下向きを正にとった水深である。 $z = \eta$ のとき $\sigma = 0$ であり、 $z = -H$ のとき $\sigma = -1$ である。すなわち σ 座標は海面で $\sigma = 0$ であり、海底で $\sigma = -1$ である。 σ 座標のもとで海水流動の基本方程式は以下のように書かれる。

<連続の式>

$$\frac{\partial DU}{\partial x} + \frac{\partial DV}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} + \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0$$

<運動方程式>

$$\begin{aligned} \text{x 方向} \quad & \frac{\partial DU}{\partial t} + \frac{\partial U^2 D}{\partial x} + \frac{\partial UVD}{\partial y} + \frac{\partial U\omega}{\partial \sigma} - fVD + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} \\ & + \frac{gD^2}{\rho_0} \int_{\sigma}^{\sigma'} \left[\frac{\partial \rho'}{\partial x} - \frac{\sigma'}{D} \frac{\partial D}{\partial x} \frac{\partial \rho'}{\partial \sigma'} \right] d\sigma' = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{K_M}{D} \frac{\partial U}{\partial \sigma} \right] + F_x \end{aligned}$$

$$y \text{ 方向} \quad \frac{\partial DV}{\partial t} + \frac{\partial UVD}{\partial x} + \frac{\partial V^2 D}{\partial y} + \frac{\partial V\omega}{\partial \sigma} + fUD + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} \\ + \frac{gD^2}{\rho_0} \int_{\sigma}^{\rho} \left[\frac{\partial \rho'}{\partial y} - \frac{\sigma'}{D} \frac{\partial D}{\partial y} \frac{\partial \rho'}{\partial \sigma'} \right] d\sigma' = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{K_M}{D} \frac{\partial V}{\partial \sigma} \right] + F_y$$

< 水温・塩分の保存式 >

$$\frac{\partial DT}{\partial t} + \frac{\partial TUD}{\partial x} + \frac{\partial TVD}{\partial y} + \frac{\partial T\omega}{\partial \sigma} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{K_H}{D} \frac{\partial T}{\partial \sigma} \right] + F_T - \frac{\partial R}{\partial z} \\ \frac{\partial DS}{\partial t} + \frac{\partial SUD}{\partial x} + \frac{\partial SVD}{\partial y} + \frac{\partial S\omega}{\partial \sigma} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{K_H}{D} \frac{\partial S}{\partial \sigma} \right] + F_S$$

< 状態方程式, UNESCO(1981) >

$$\rho(S, T) = \rho_w + (b_0 + b_1 T + b_2 T^2 + b_3 T^3 + b_4 T^4) S + (c_0 + c_1 T + c_2 T^2) S^{3/2} + d_0 S^2$$

< 乱流統計量の保存式 >

$$\frac{\partial Dq^2}{\partial t} + \frac{\partial q^2 UD}{\partial x} + \frac{\partial q^2 VD}{\partial y} + \frac{\partial q^2 \omega}{\partial \sigma} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{K_q}{D} \frac{\partial q^2}{\partial \sigma} \right] \\ + \frac{2K_M}{D} \left[\left(\frac{\partial U}{\partial \sigma} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial \sigma} \right)^2 \right] + \frac{2g}{\rho_0} K_H \frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial \sigma} - \frac{2Dq^3}{B_1 l} + F_q \\ \frac{\partial Dq^2 l}{\partial t} + \frac{\partial q^2 l UD}{\partial x} + \frac{\partial q^2 l VD}{\partial y} + \frac{\partial q^2 l \omega}{\partial \sigma} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{K_q}{D} \frac{\partial q^2 l}{\partial \sigma} \right] \\ + E_1 l \left(\frac{K_M}{D} \left[\left(\frac{\partial U}{\partial \sigma} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial \sigma} \right)^2 \right] + E_3 \frac{g}{\rho_0} K_H \frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial \sigma} \right) \tilde{W} - \frac{Dq^3}{B_1} \tilde{W} + F_l$$

ここで、

- D, H, η : 全水深(=H+ η)、水深、水位
 U, V : x, y 方向の 3 次元流速成分
 ω : シグマ座標系のもとでの鉛直流速成分
 f : コリオリ係数
 g : 重力加速度
 ρ, ρ_0 : 海水密度、基準海水密度(1025kg/m³)
 $\tilde{\rho}$: 各水深における水平平均密度
 ρ' : 海水密度 ρ から各水深における水平平均密度($\tilde{\rho}$)を引いた偏差
 K_M : 鉛直渦動粘性係数
 F_x, F_y : 流速 U 成分、 V 成分に係る水平粘性項
 T, S : 水温、塩分
 F_T, F_S : 水温(T), 塩分(S)に係る水平拡散項
 K_H : 水温、塩分に係る鉛直渦動拡散係数
 $\frac{\partial R}{\partial z}$: 水中における鉛直方向の短波放射収支

- q^2, l : 乱流運動エネルギー、乱流長さスケール
 K_q : 乱流運動エネルギーに係る鉛直渦動拡散係数
 F_q, F_l : 乱流運動エネルギー(q), 乱流長さスケール(l)に係る水平拡散項
 $B_1, E_1, E_3,$: 乱流モデルに係る経験定数

である。

状態方程式中の係数は以下のとおりである、

$$\begin{array}{ll}
 b_0 & : 8.24493 \times 10^{-1} & b_1 & : -4.0899 \times 10^{-3} \\
 b_2 & : 7.6438 \times 10^{-5} & b_3 & : -8.2467 \times 10^{-7} \\
 b_4 & : 5.3875 \times 10^{-9} & c_0 & : -5.72466 \times 10^{-3} \\
 c_1 & : 1.0227 \times 10^{-4} & c_2 & : -1.6546 \times 10^{-6} \\
 d_0 & : 4.8314 \times 10^{-4} & &
 \end{array}$$

なお、 σ 座標における鉛直流速と z 座標における鉛直流速の関係は以下のとおりであり、 W は z 座標における鉛直流速である。

$$W = \omega + U \left(\sigma \frac{\partial D}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) + V \left(\sigma \frac{\partial D}{\partial y} + \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) + \sigma \frac{\partial D}{\partial t} + \frac{\partial \eta}{\partial t}$$

\tilde{W} は近接関数であり、以下のように定義される；

$$\tilde{W} = 1 + E_2 (l / kL)$$

ここで

$$L^{-1} = (\eta - z)^{-1} + (H - z)^{-1}$$

E_2 : 乱流モデルに係る経験定数

k : カルマン定数

また、 $\partial \tilde{p} / \partial \sigma = \partial p / \partial \sigma - c_s^{-2} \partial p / \partial \sigma$ であり、 c_s は水中における音速、 p は静水圧である。

水平粘性項や水平拡散項は以下のように定義される。

$$F_x = \frac{\partial H \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial H \tau_{xy}}{\partial y}, \quad F_y = \frac{\partial H \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial H \tau_{yy}}{\partial y}$$

ここで、

$$\tau_{xx} = 2A_M \frac{\partial U}{\partial x}, \tau_{xy} = A_M \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right), \tau_{yy} = 2A_M \frac{\partial V}{\partial y}$$

また、

$$F_\phi = \frac{\partial H q_x}{\partial x} + \frac{\partial H q_y}{\partial y}$$

ここで、

$$q_x = A_H \frac{\partial \phi}{\partial x}, q_y = A_H \frac{\partial \phi}{\partial y}$$

であり、 ϕ は $T, S, q^2, q^2 l$ を表す。 A_M は水平渦動粘性係数、 A_H は水平渦動拡散係数である。

上式においては、水平粘性等に関する式で σ 座標変換に伴う補正項を含んでいないが、このモデル化に関する検証 Mellor and Blumberg(1985)¹に示されている。

POM(Princeton Ocean Model)と同様に本検討に用いるモデルの特徴の一つとして、その解法にモード分割の手法を取り入れている。モード分割とは表面水位を計算する部分と流速や水温、塩分等の3次元構造を計算する部分を分けることである。表面水位はいわゆる重力波の速度 \sqrt{gH} で伝播し、その速度は流速などに比べ速い。

基本方程式を時間積分する際の時間刻み幅(タイムステップ)はその基本方程式によって記述される物理現象のうち、最も伝播速度の速い現象によって支配されている。静水圧近似に基づく海洋流動現象の場合、普通最も速い現象は上述した表面波の伝播であり、タイムステップ DT は、格子間隔を DS とするとき、 $DT < DS/\sqrt{gH}$ で規定される。流速、水温、塩分等の3次元構造を含めてこのタイムステップで計算すると、相当小さいタイムステップとなり、計算機演算時間が多くかかるようになる。そこで表面水位の計算には2次元単層モデルを用いることにより、あまり演算時間がかからないようにしている。このように表面水位の計算を2次元単層モデルで行う部分を外部モードの計算と呼んでいる。一方、流速や水温、塩分等の3次元構造を計算する部分を内部モードの計算と呼んでいる。内部モード計算のタイムステップは外部モードのその5~30倍(整数倍)の値が用いられる。すなわち、1回の内部モードの計算が行われると次は5~30ステップの外部モード計算が繰り返され、次に1回の内部モード計算が行われるといった計算シーケンスとなる。

外部モード計算に用いられる単層モデルの基本式は以下に示すとおりであり、内部モードとの相互作用が考慮されている。

<連続の式>

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \bar{U}D}{\partial x} + \frac{\partial \bar{V}D}{\partial y} = 0$$

<運動方程式>

$$\begin{aligned} X \text{ 方向} \quad & \frac{\partial \bar{U}D}{\partial t} + \frac{\partial \bar{U}^2 D}{\partial x} + \frac{\partial \bar{U}\bar{V}D}{\partial y} - \tilde{F}_x - f\bar{V}D + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} = -\langle wu(0) \rangle + \langle wu(-1) \rangle \\ & + G_x - \frac{gD}{\rho_0} \int_{-1}^0 \int_{\sigma}^{\sigma'} \left[D \frac{\partial \rho'}{\partial x} - \sigma' \frac{\partial D}{\partial x} \frac{\partial \rho'}{\partial \sigma'} \right] d\sigma' d\sigma \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} Y \text{ 方向} \quad & \frac{\partial \bar{V}D}{\partial t} + \frac{\partial \bar{U}\bar{V}D}{\partial x} + \frac{\partial \bar{V}^2 D}{\partial y} - \tilde{F}_y + f\bar{U}D + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} = -\langle wv(0) \rangle + \langle wv(-1) \rangle \\ & + G_y - \frac{gD}{\rho_0} \int_{-1}^0 \int_{\sigma}^{\sigma'} \left[D \frac{\partial \rho'}{\partial y} - \sigma' \frac{\partial D}{\partial y} \frac{\partial \rho'}{\partial \sigma'} \right] d\sigma' d\sigma \end{aligned} \quad (2)$$

¹ Mellor, G. L. and A. F. Blumberg (1985) : Modeling vertical and horizontal diffusivities with the sigma coordinate system, Mon. Wea. Rev. 113, pp1380-1383.

ここで鉛直平均流速は以下のように定義される。

$$\bar{U} = \int_{-1}^0 U d\sigma$$

風応力成分は $-\langle wu(0) \rangle$ と $-\langle wv(0) \rangle$ であり、一方、海底摩擦成分は $-\langle wu(-1) \rangle$ と $-\langle wv(-1) \rangle$ である。 F_x と F_y は以下のように定義される。

$$F_x = \frac{\partial}{\partial x} \left[H2\bar{A}_M \frac{\partial \bar{U}}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[H\bar{A}_M \left(\frac{\partial \bar{U}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{V}}{\partial x} \right) \right]$$

$$F_y = \frac{\partial}{\partial y} \left[H2\bar{A}_M \frac{\partial \bar{V}}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[H\bar{A}_M \left(\frac{\partial \bar{U}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{V}}{\partial x} \right) \right]$$

いわゆる分散項は以下のように定義される。

$$G_x = \frac{\partial \bar{U}^2 D}{\partial x} + \frac{\partial \bar{U} \bar{V} D}{\partial y} - \tilde{F}_x - \frac{\partial \bar{U}^2 D}{\partial x} - \frac{\partial \bar{U} \bar{V} D}{\partial y} + \bar{F}_x \quad (3)$$

$$G_y = \frac{\partial \bar{U} \bar{V} D}{\partial x} + \frac{\partial \bar{V}^2 D}{\partial y} - \tilde{F}_y - \frac{\partial \bar{U} \bar{V} D}{\partial x} - \frac{\partial \bar{V}^2 D}{\partial y} + \bar{F}_y \quad (4)$$

式(3)~(4)において、右辺 1~3 項は鉛直平均流速をもとに構成される量であり、4~6 項は 3 次元流速から構成したものを鉛直平均したものである。式(1)~(2)の右辺は内部モードのタイムステップ毎に更新され、外部モード計算中において右辺は一定値に保たれる。外部モードのステップ毎に毎回更新されるのは式(1)~(2)の左辺のみである。

(2) 計算条件の概要

各モデルで用いた計算条件の概要を表 1.2.1 にまとめた。

表 1.2.1 計算条件の概要

項目	計算条件の設定内容	
	大規模泊地(大規模港湾):蒲郡港 窪地:御津地区 小規模泊地(漁港):三谷漁港	入江(ラグーナ蒲郡)
モデル	レベルモデル	GCSモデル
水平格子	ネステッドグリッドモデルを採用 図 1.2.6(1)～(5)の全8領域	単独領域 図 1.2.6(5)の33.3m格子の領域
水深	図 1.2.7(1)～(5)の全8領域	図 1.2.7(5)の33.3m格子の領域
層分割	13層(第1層を0～2m、第2層～第11層までを1m間隔、第12層を12～15m、第13層を15m～海底まで)	12層(3段階の多重シグマ座標を定義し、0～2mまでを4層、2～4mまでを4層、4～8mまでを4層とした)
計算期間	2009年3月2日～2009年10月1日	2009年6月6日～2009年10月1日 ※境界条件の水温・塩分の観測期間に合わせた。
気象条件	伊勢湾・三河湾周辺の気象観測データから空間分布を設定	計算領域の近傍のアメダス観測点の蒲郡より設定
計算境界の潮位	赤羽根検潮所(気象庁)の10分潮の調和定数を基に水位変動を設定した。なお、各分潮の振幅については、湾内の潮位の再現性を考慮して修正した。	愛知県水産試験場から提供された御津の推算潮位を用いた。
計算境界の水温・塩分	公共用水域水質調査(愛知県・三重県)、渥美外海観測結果(愛知県水産試験場)のデータを基に、伊勢湾湾口の境界に該当する格子に各月の値を設定した。	愛知県水産試験場から提供された水質調査結果(図 1.2.2 に示す地点 9)を用いた。
タイムステップ	モデルの安定性を考慮して設定 900m格子:16秒、300m格子:8秒 100m格子:4秒、33.3m格子:2秒	モデルの安定性を考慮して設定 外部モード:0.2秒 内部モード:2.0秒
海面摩擦係数	本多・光易(1980) ² を適用	左記と同じ
海底摩擦係数	海底近傍での流速分布をカルマン定数と粗度高さをを用いた対数分布則を仮定することにより得られる値を設定した。	左記と同じ
水平渦動粘性係数 水平渦動拡散係数	Smagorinsky(1963) ³ を適用	左記と同じ
鉛直渦動粘性係数 鉛直渦動拡散係数	Munk and Anderson(1948) ⁴ を適用	Mellor and Yamada(1982) ⁵ による2方程式乱流クロージャーモデル
コリオリパラメータ	$f = 2\omega \sin\phi$ (緯度 $\phi = 34.33^\circ$)	$f = 2\omega \sin\phi$ (緯度 $\phi = 34.8^\circ$)
バルク係数	永尾ら(2007) ⁶ を適用	左記と同じ

² 本多忠夫・光易 恒(1980):水面に及ぼす風の作用に関する実験的研究,第27回海岸工学講演会論文集,90-93.

³ Smagorinsky, J.(1963): General Circulation Experiments with the Primitive Equations I. The Basic Experiment, Monthly Weather Review, 91, 99-164.

⁴ Munk, W.h. and E.R. Anderson (1948): Notes on a theory of the thermocline, J.Mar.Res., 7, 276-295.

⁵ Mellor, G. L., and T. Yamada (1982): Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems, Rev. Geophys. Space Phys., 20, 851-875

⁶ 永尾謙太郎・滝川清・森本剣太郎・田淵幹修・芳川忍(2007):干潟域における熱収支過程のモデル化と現地適用性の検討,海岸工学論文集,第54巻,pp.1141-1145.

1) 計算領域および計算格子

計算領域は図 1.2.6 に示すように伊勢湾全域とし、異なる格子間隔を連続して同時に解く事が可能な、ネステッドグリッドモデルを用いて段階的に計算格子を小さくし、三河湾の領域を 300m、伊勢湾全域の計算領域を 900m とした。

以下に示すデッドゾーン 4 類型の検討対象領域については、100m および 33.3m 格子で分割した。

- 大規模泊地（大規模港湾）：蒲郡港(100m 格子)
- 窪地：御津地区(100m, 33.3m 格子)
- 小規模泊地（漁港）：三谷漁港(100m, 33.3m 格子)
- 入江：ラグーナ蒲郡(100m, 33.3m 格子)

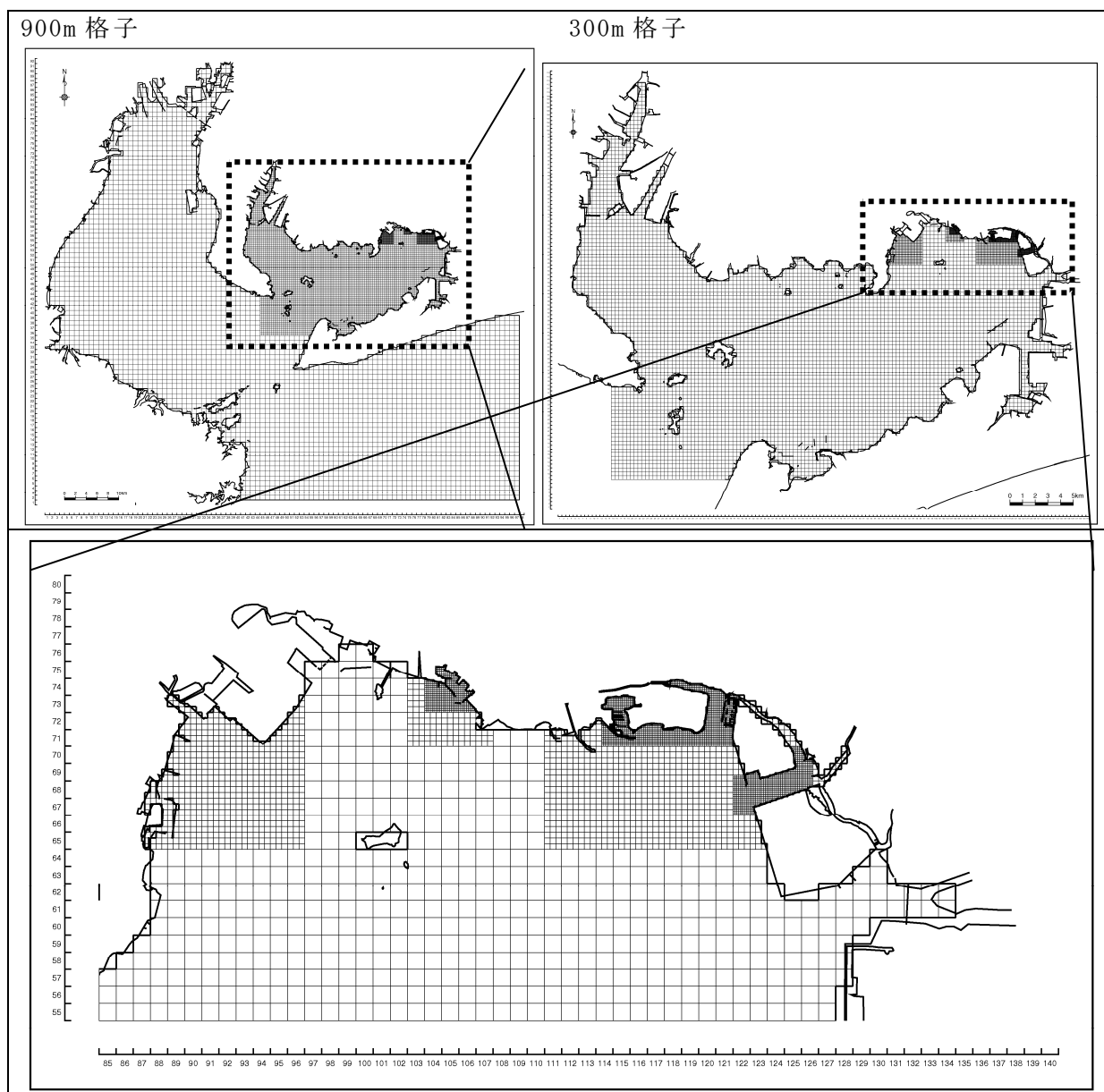


図 1.2.6(1) 計算領域および計算格子(伊勢湾および三河湾)

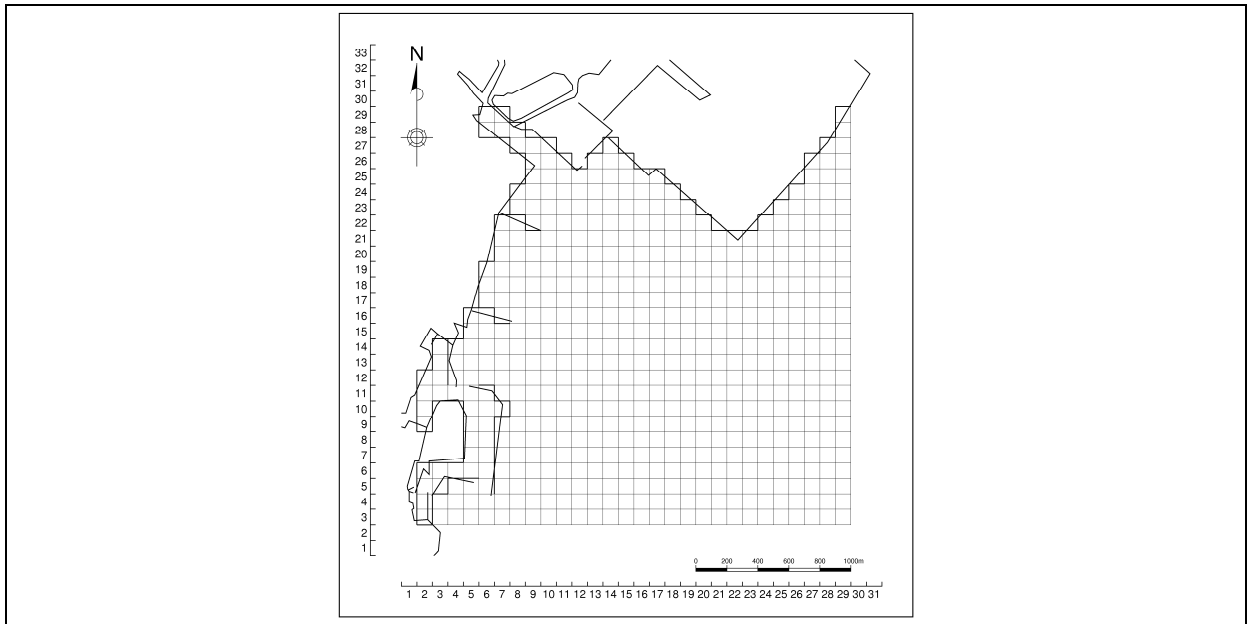


図 1.2.6(2) 計算領域および計算格子
大規模泊地（大規模港湾）：蒲郡港（100m 格子）

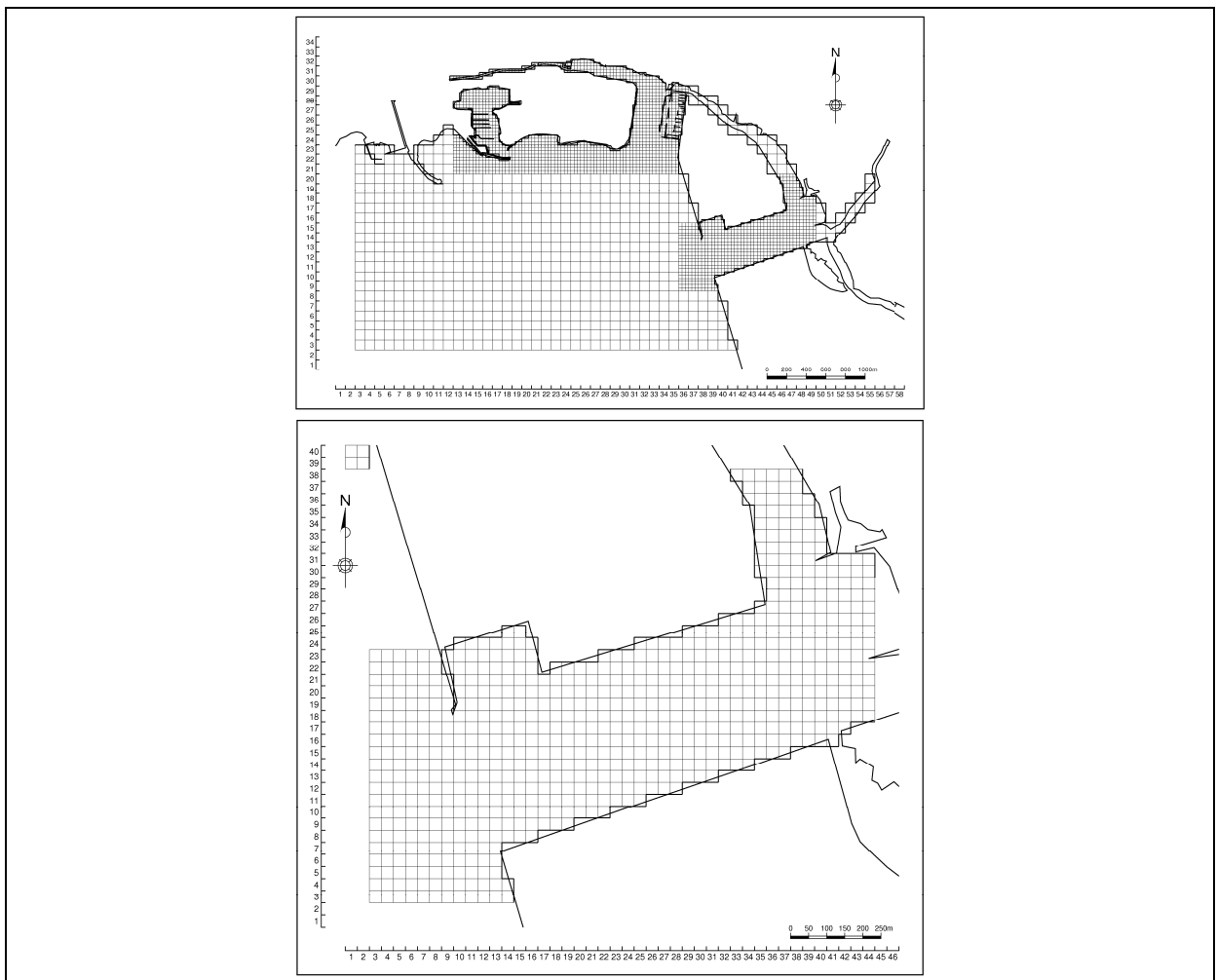


図 1.2.6(3) 計算領域および計算格子
窪地：御津地区（100m, 33.3m 格子）

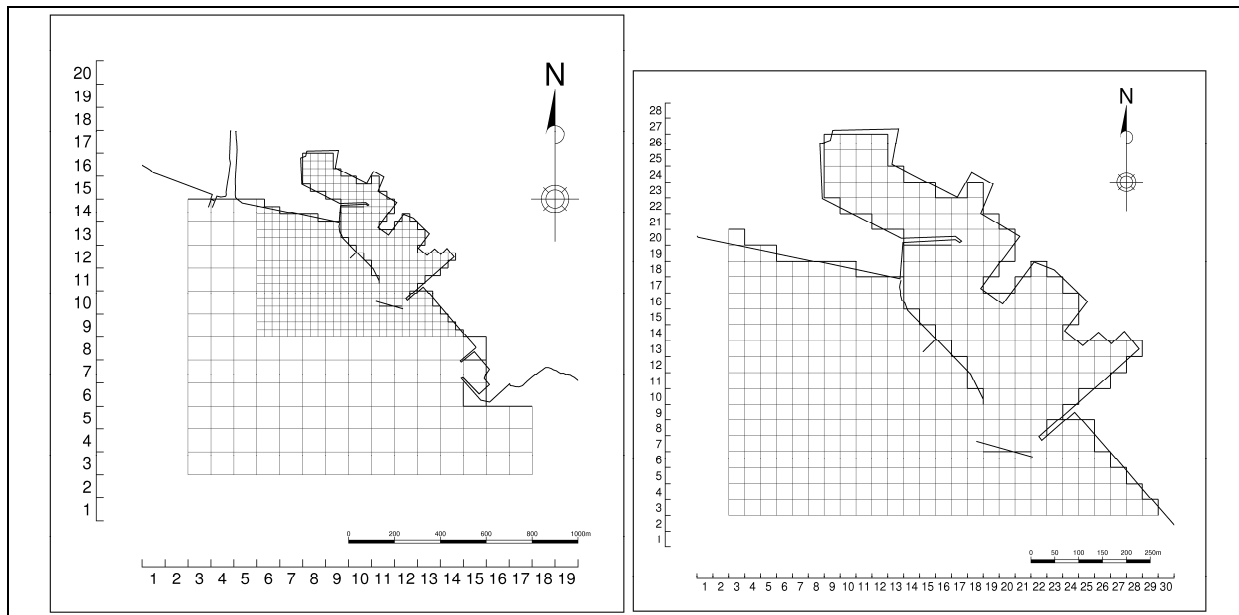


図 1.2.6(4) 計算領域および計算格子
 小規模泊地（漁港）：三谷漁港(100m, 33.3m 格子)

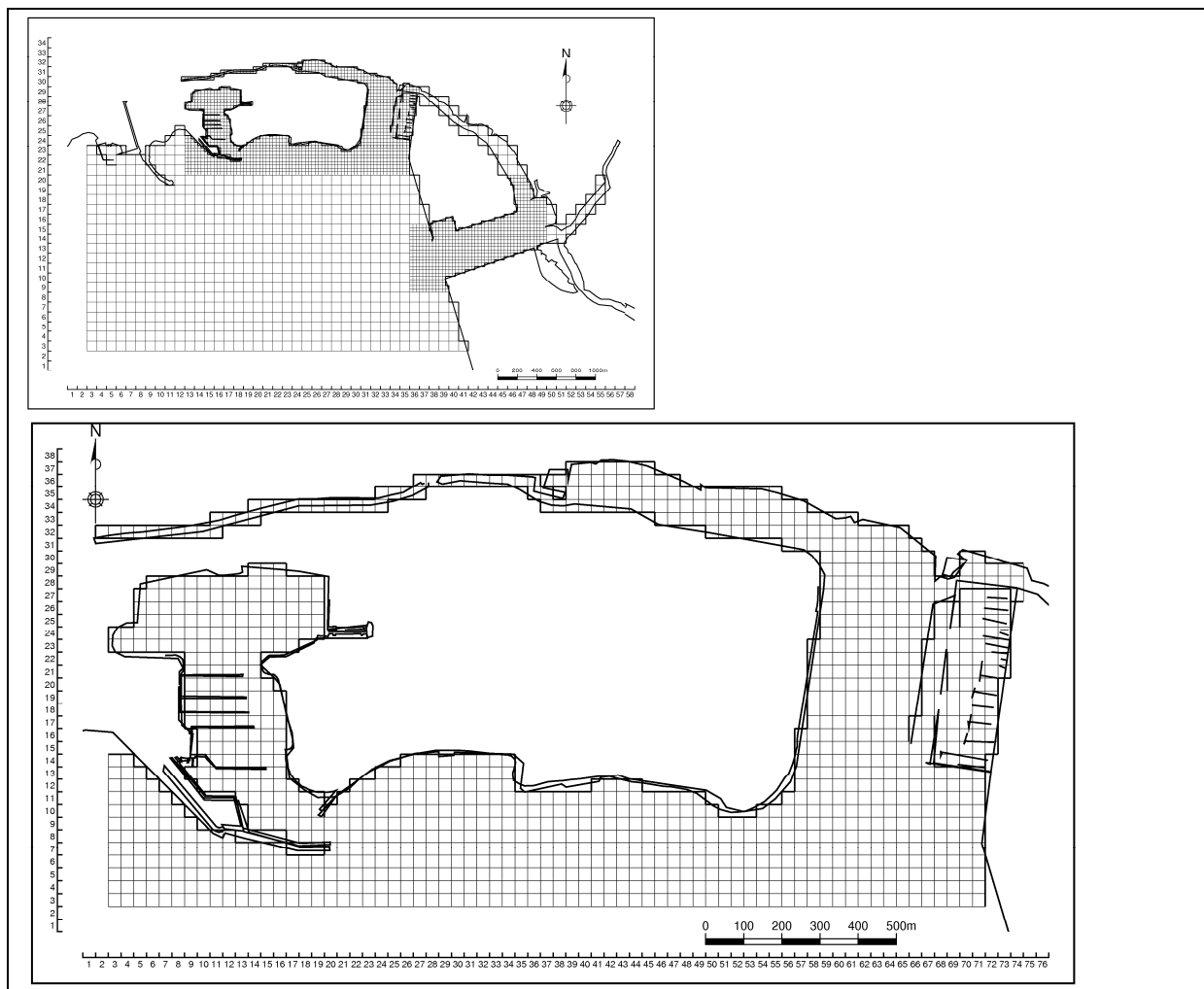


図 1.2.6(5) 計算領域および計算格子
 入江：ラゲーナ蒲郡(100m, 33.3m 格子)

2) 計算水深

計算に用いる水深分布図を図 1.2.7 に示す。各計算格子に設定した水深は海上保安庁水路部発行の海図を基に設定した。

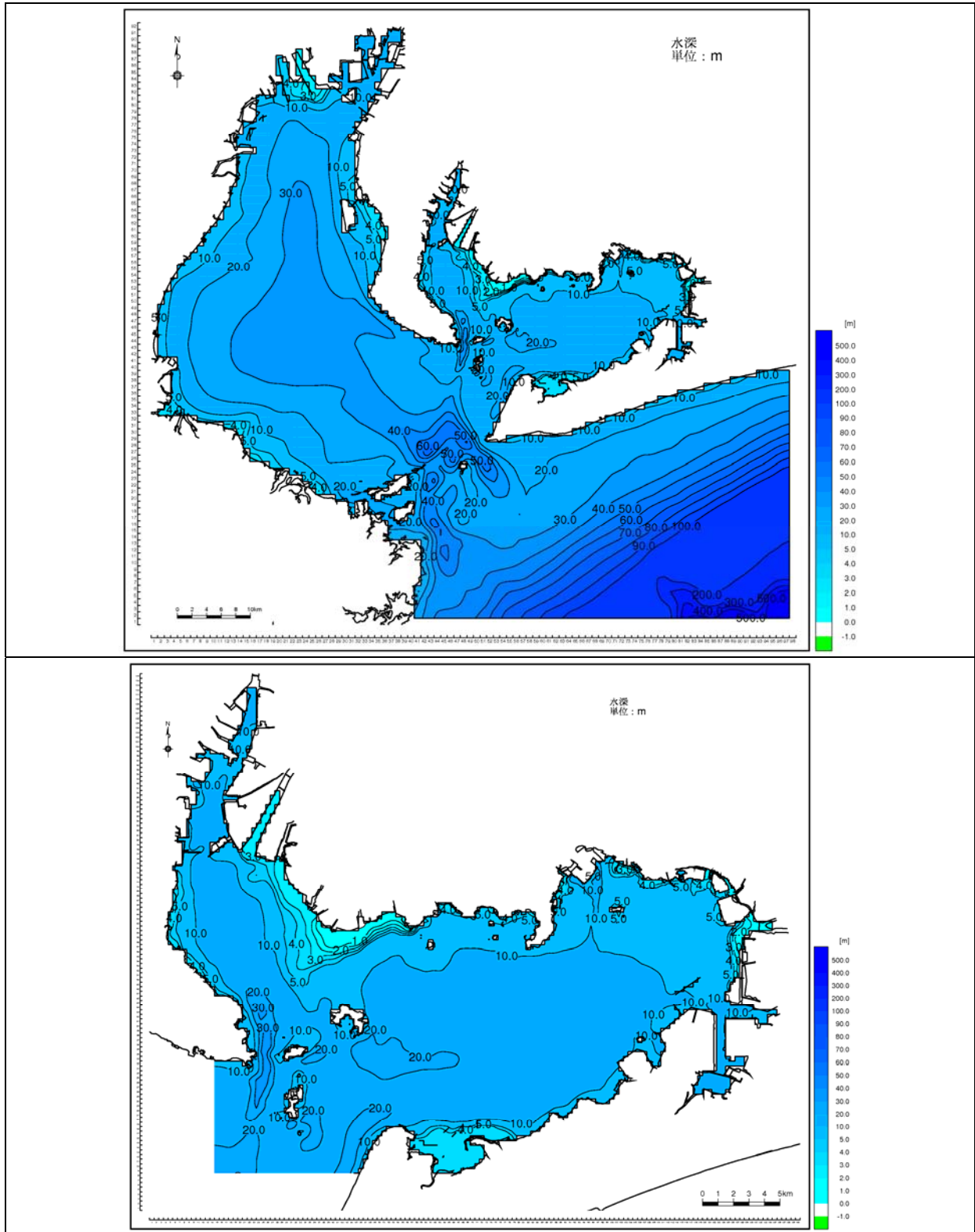


図 1.2.7(1) 水深図(伊勢湾および三河湾) 平均水面下

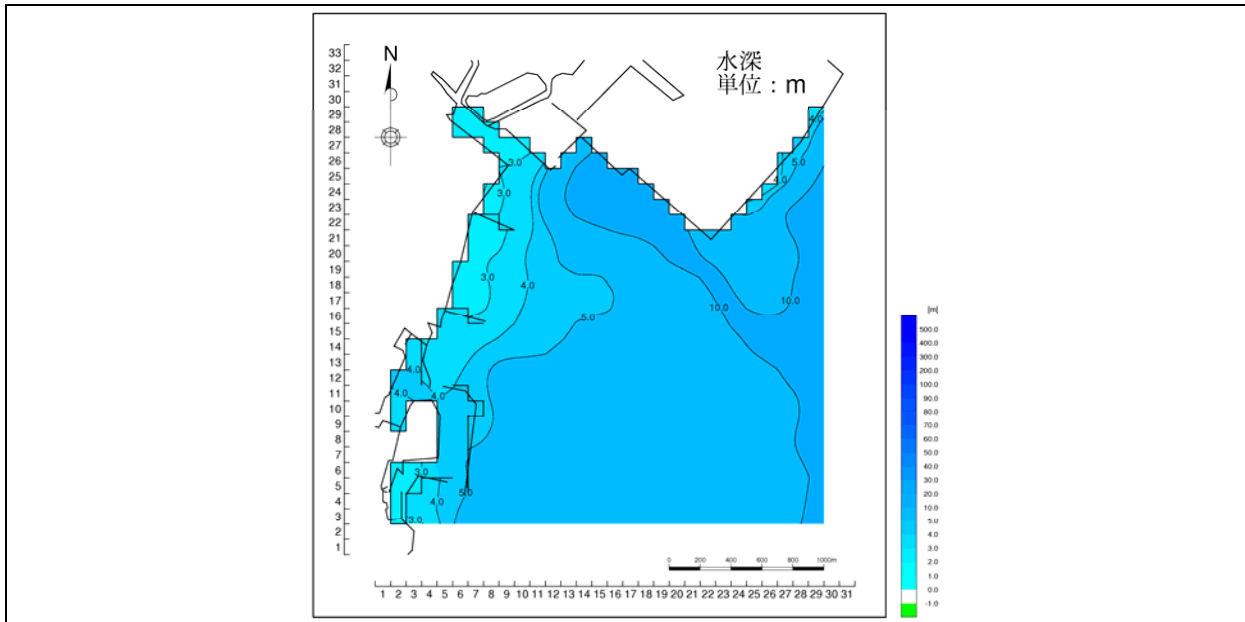


図 1.2.7(2) 水深図 平均水面下
大規模泊地（大規模港湾）：蒲郡港（100m 格子）

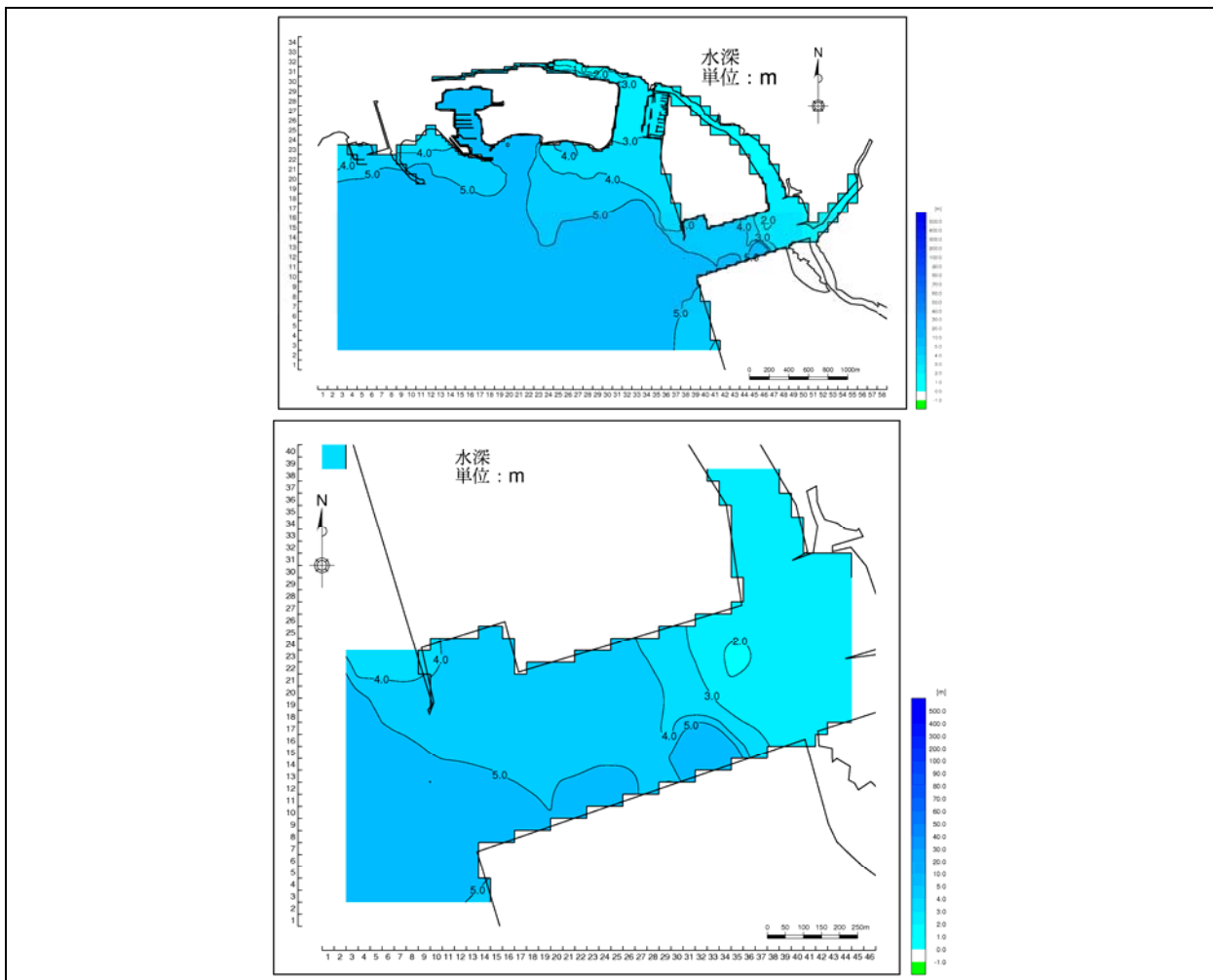


図 1.2.7(3) 計算領域および計算格子 平均水面下
窪地：御津地区（100m, 33.3m 格子）

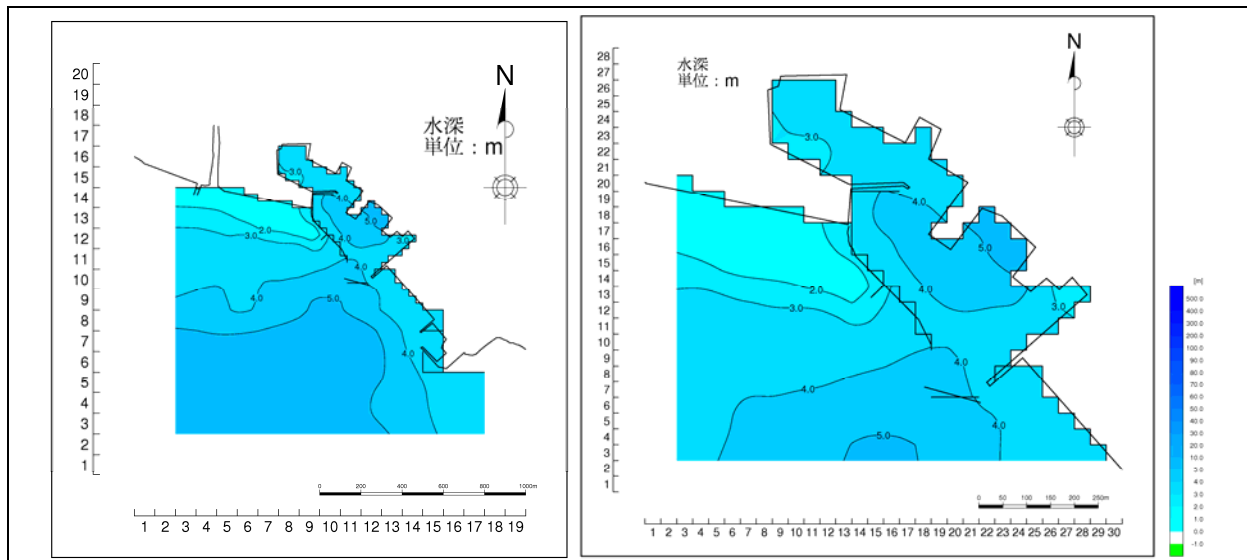


図 1.2.7(4) 計算領域および計算格子 平均水面下
小規模泊地（漁港）：三谷漁港 (100m, 33.3m 格子)

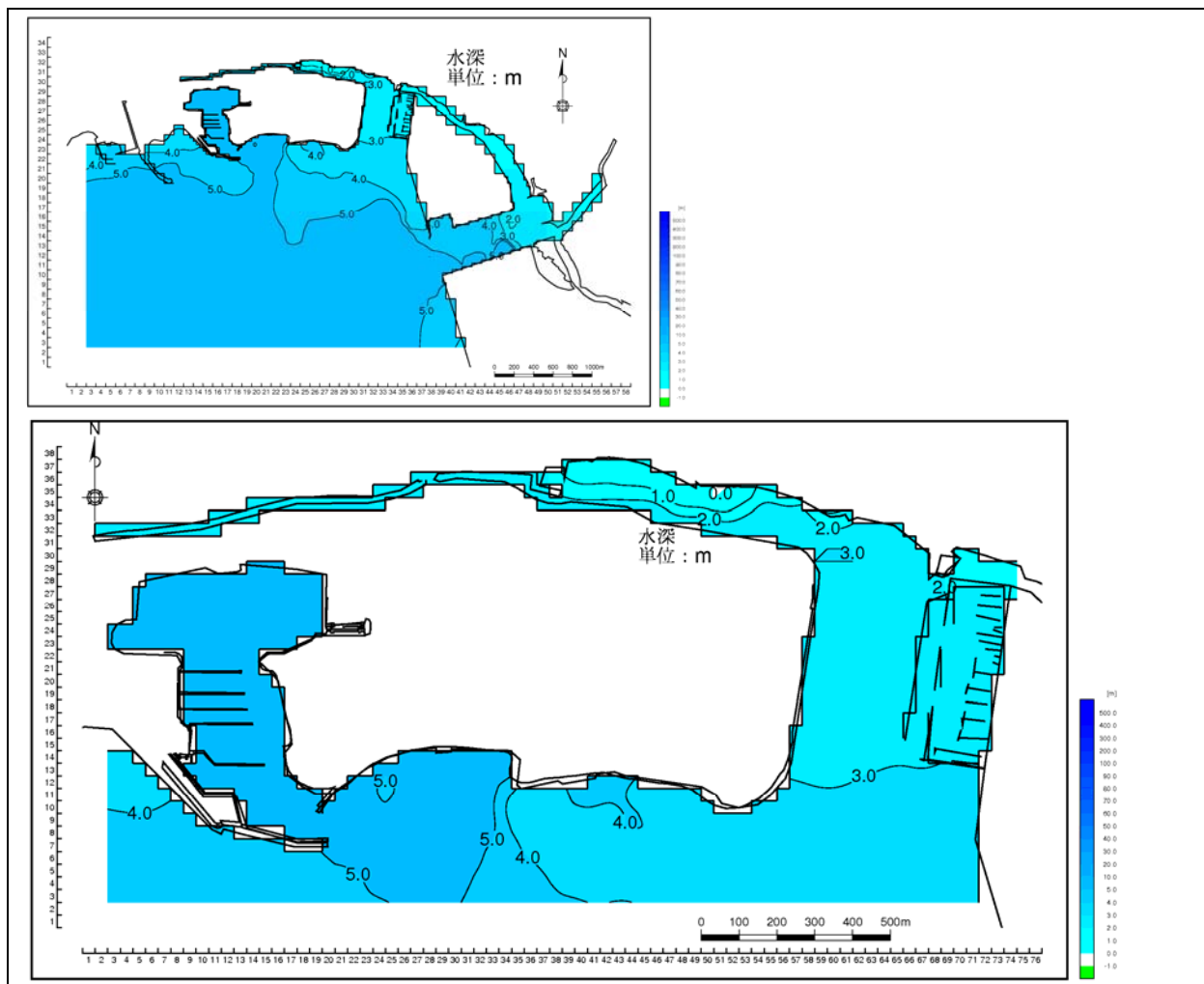


図 1.2.7(5) 計算領域および計算格子 平均水面下
入江：ラグーナ蒲郡 (100m, 33.3m 格子)

3) レベルモデルの計算条件

(a) 鉛直層分割

鉛直層分割は表 1.2.2 に示す 13 層とする。本モデルでは Partial Step (Adcroft et. al., 1997)⁷ を考慮しており、各格子の最下層の層厚は表 1.2.2 の層厚には規定されず、各格子の水深によって可変となっており、海底地形を滑らかに表現できる。

表 1.2.2 鉛直層分割（最下層の厚さは水深に応じて変化する）

層番号	鉛直層分割	層厚	層番号	鉛直層分割	層厚
1	海面～2.0m	2.0m	8	8.0m～9.0m	1.0m
2	2.0m～3.0m	1.0m	9	9.0m～10.0m	1.0m
3	3.0m～4.0m	1.0m	10	10.0m～11.0m	1.0m
4	4.0m～5.0m	1.0m	11	11.0m～12.0m	1.0m
5	5.0m～6.0m	1.0m	12	12.0m～15.0m	3.0m
6	6.0m～7.0m	1.0m	13	15.0m～(50.0m)	～35.0m
7	7.0m～8.0m	1.0m			

(b) 気象条件

a) 観測データ

気象条件としては、吹送流の駆動力となる海面での風応力をはじめ、密度流の駆動力となる海面での熱収支を設定するための日射量・気温・相対湿度・雲量は、計算期間の観測値を基に設定した。

設定に用いた観測値は、伊勢湾近傍および三河湾の周辺の気象観測所から表 1.2.3 に示すデータを使用した。風向・風速については、表 1.2.3 に示す全 13 地点を用いて、計算領域の各格子の値を空間補間して設定した。2009 年 3 月から 2009 年 12 月までの気象各項目の経時変化を図 1.2.8 に示す。なお、風データについては代表として伊良湖および中山水道を図示した。

表 1.2.3 気象データの取得先

気象項目	場 所	出 典
気温,相対湿度	伊良湖	気象庁
全雲量,全日射量	名古屋	気象庁
風向・風速	桑名、四日市、津、小俣、鳥羽、名古屋、東海、蒲郡、南知多、豊橋、伊良湖、セントレア、浜松	気象庁
	中山水道	国土交通省中部地方整備局 三河港湾事務所

⁷ Adcroft, A., C. Hill, and J. Marshall, 1997 : Representation of topography by shaved cells in a height coordinate ocean model. Monthly Weather Review, 125, 2293-2315

b) 熱収支に関する定式およびパラメータ

海面における大気との間の熱のやりとりは、水温の拡散方程式で、海面と大気の間
の熱フラックスとして表現されている。この熱フラックスは、海水を暖める向きを正
としたとき以下のように表される。

$$Q_{suf} = Q_s - (Q_b + Q_c + Q_e) \quad (\text{cal/cm}^2/\text{s})$$

ここで、太陽からの短波放射 Q_s 、海洋からの長波放射 Q_b 、海水と大気の接触面
における対流や伝導による顕熱輸送 Q_c 、海水の蒸発による潜熱輸送 Q_e それぞれの熱
輸送を表すバルク公式は柳(1994)⁸を参照し、以下に整理した。

(ア) 太陽からの短波放射 (Q_s)

$$Q_s = (1 - \alpha) Q_{s0}$$

α : 海面のアルベード(反射率=0.09)

Q_{s0} : 全天日射量(cal/cm²/s)

海面のアルベードについては、飯田(1990)⁹によると、日本の緯度帯では 12 月に最
大で 10%前後、6 月に最小で 6%程度であると示されている。この値を参考に水温の
再現性を考慮して、海面のアルベードは 0.09 とした。

(イ) 海洋からの長波放射 (Q_b)

$$Q_b = s \sigma \theta_w^4 \left\{ 1 - a - b \sqrt{e(T_a)} \right\} (1 - cn^2) + 4s \sigma \theta_w^3 (T_w - T_a)$$

$$e(T_a) = f \cdot e_s(T_a)$$

$$e_s(T_a) = 6.11 \times 10^{7.5T_a / (237.3 + T_a)}$$

s : 黒体放射と太陽放射の比(=0.95)

σ : ステファンボルツマンの定数(=0.8218 × 10⁻¹⁰ cal/cm²/min・°C⁴)

θ_w : 海水の絶対温度(K)

a : 0.61

b : 0.058

c : 緯度による定数で、日本付近は 0.65

$e_s(T_a)$: 気温 T_a (°C)における水面上の飽和水蒸気圧(mb)

T_a : 接水大気の気温(°C)

f : 相対湿度(%)

n : 雲量(0~1)

T_w : 水温(°C)

⁸ 柳 哲雄(1994) : 7. 密度流, 7.2 熱収支と塩分収支, 53-56, 沿岸海洋学 -海の中でのものはどう動くか- 改訂版, 恒星社厚生閣

⁹ 飯田 隼人(1990) : 第3章 日本周辺海域の海上気象について, VII 日本近海における海面の熱収支, 89-100, 続・日本全国沿岸海洋誌, 日本海洋学会 沿岸海洋研究部会 編, 東海大学出版会

(ウ) 海水と大気との接触面における対流や伝導による顕熱輸送 (Q_c)

$$Q_c = \rho_a C_p C_H (T_w - T_a) W$$

$$= \alpha C_T (T_w - T_a) W$$

- C_p : 定圧比熱(cal/g/°C)
 C_H : 顕熱フラックス係数
 α : 2.88×10^{-4}
 T_a : 接水大気気温(°C)
 T_w : 水温(°C)
 W : 海面上の風速(m/s)

α の値については、飯田(1990)⁹が整理した結果を参照した。

(エ) 海水の蒸発による潜熱輸送 (Q_e)

$$Q_e = 0.622 \rho_a L C_E (e_s(T_w) - e(T_a)) W / P$$

$$= \beta C_E (0.98 e_s(T_w) - e(T_a)) W$$

- L : 蒸発の潜熱(cal/g)
 P : 大気圧(mb)
 C_E : 潜熱フラックス係数
 β : 4.37×10^{-4}
 T_a : 接水大気気温(°C)
 T_w : 水温(°C)
 $e_s(T_w)$: 水温 T_w (°C)における水面上の飽和水蒸気圧(mb)
 $e(T_a)$: 気温 T_a (°C)における大気水蒸気圧(mb)

β の値については、飯田(1990)⁹が整理した結果を参照した。

表 1.2.4 潜熱および顕熱フラックス係数（バルク係数）の設定値

出典	風速条件	潜熱・顕熱フラックス係数
永尾ら(2007)	$U < 5.0 \text{ m/s}$	$C_E = C_H = 1.7 \times 10^{-3}$
	$U \geq 5.0 \text{ m/s}$	$C_E = C_H = 1.8 \times 10^{-3}$
	$U < 2.0 \text{ m/s}$, 不安定($T_w > T_a$)	$C_E = C_H = 1.7 \times 10^{-3} \times (T_w - T_a)^{1/3}$

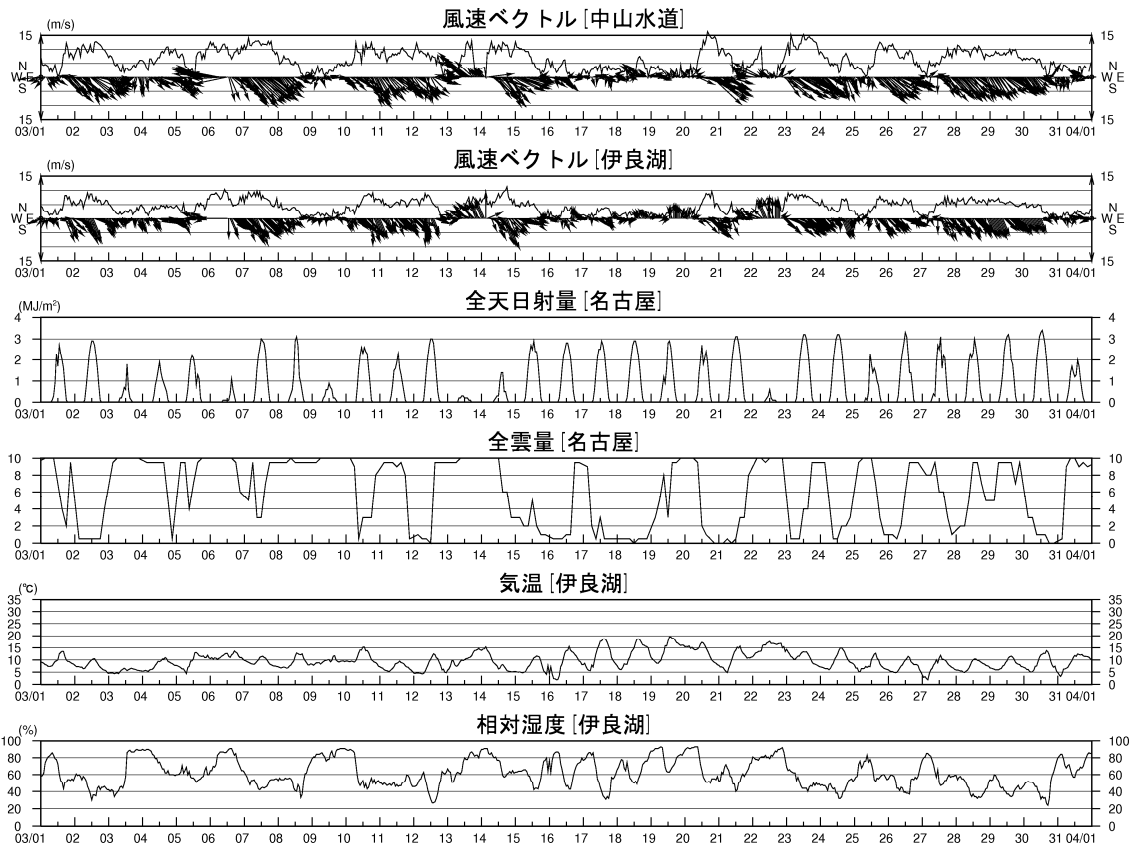


図 1.2.8(1) 気象条件の経時変化(2009年3月)

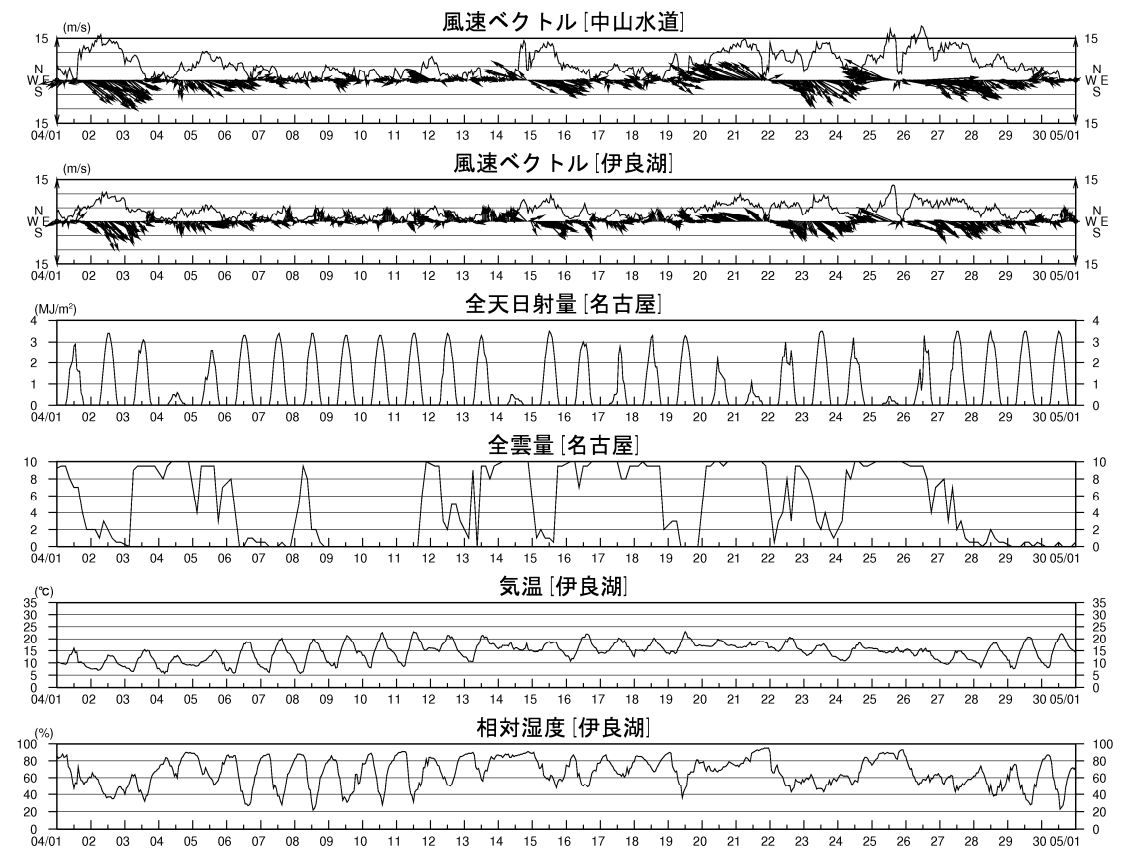


図 1.2.8(2) 気象条件の経時変化(2009年4月)

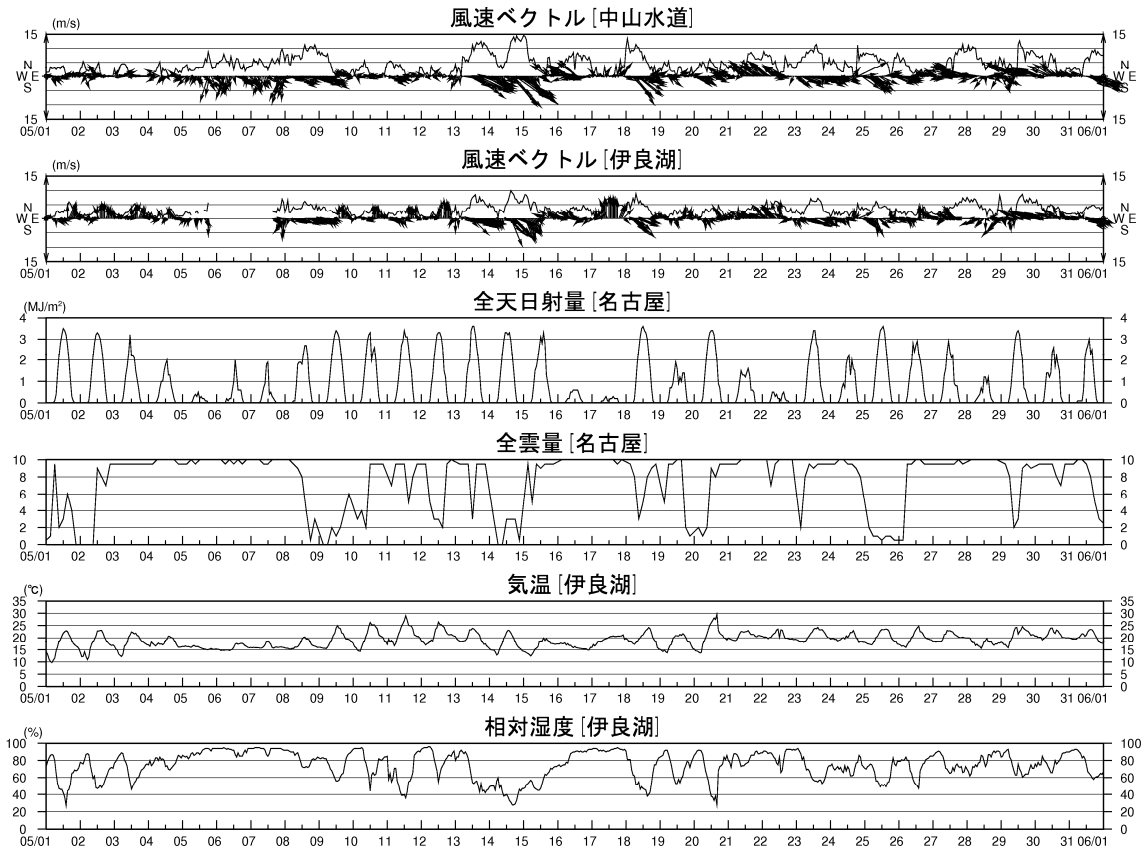


図 1.2.8(3) 気象条件の経時変化(2009年5月)

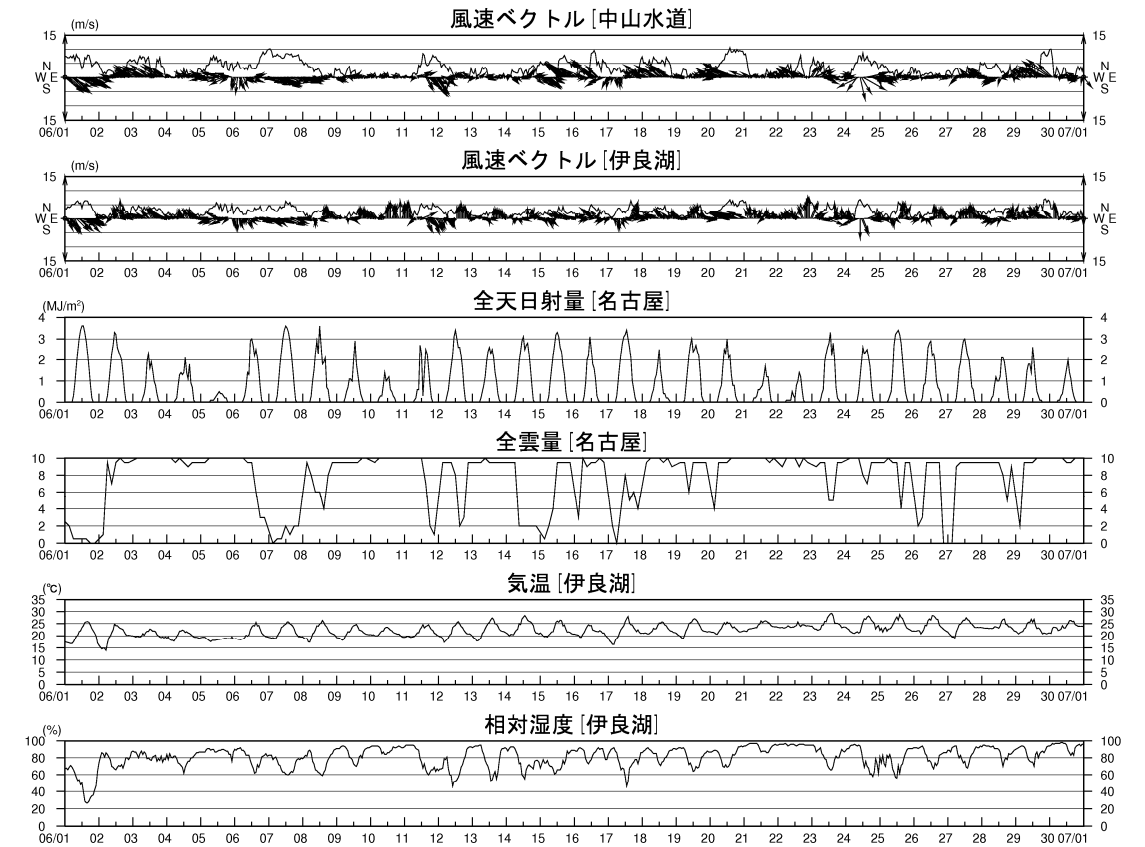


図 1.2.8(4) 気象条件の経時変化(2009年6月)

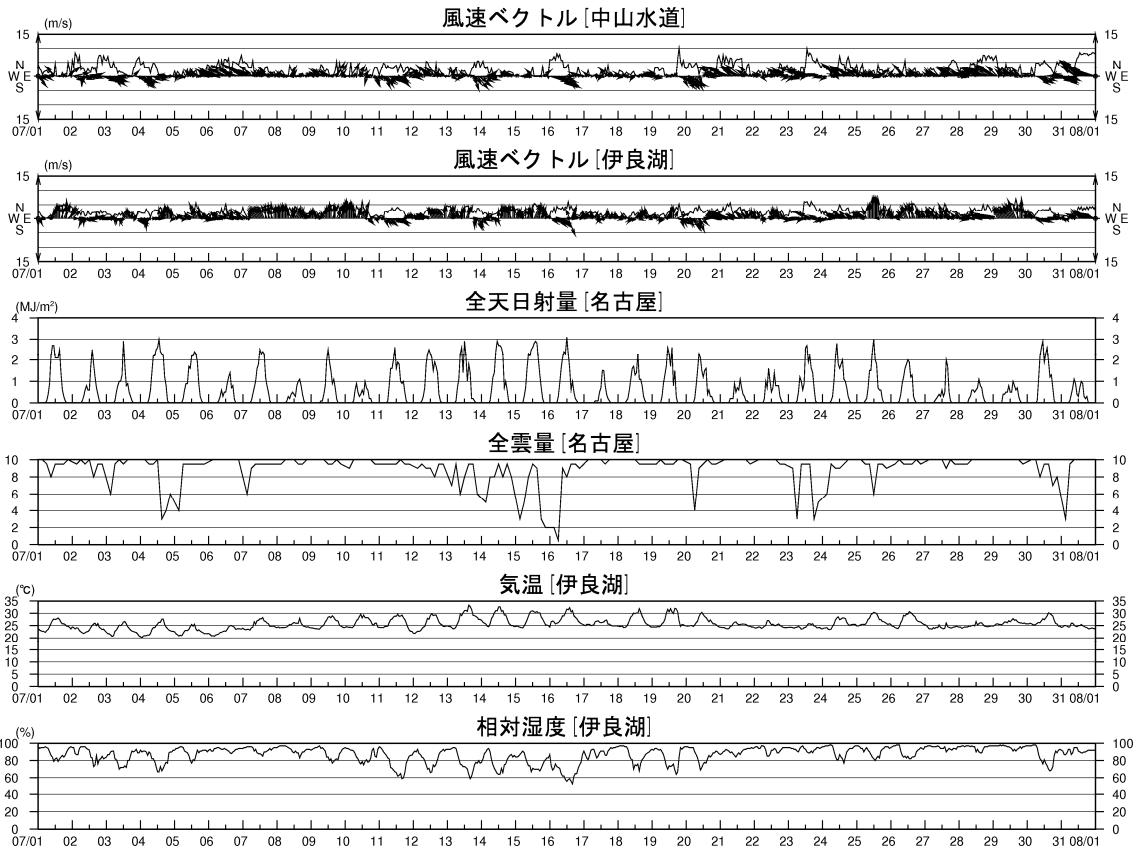


図 1.2.8(5) 気象条件の経時変化(2009年7月)

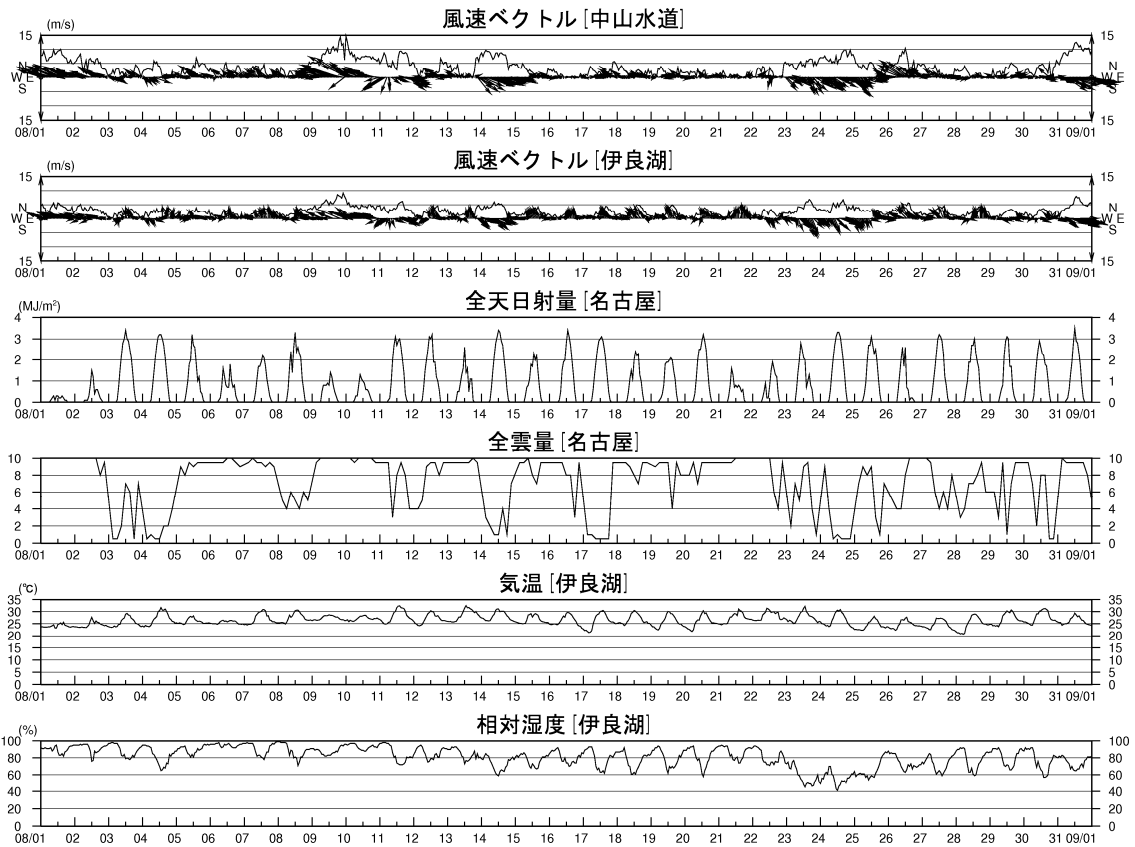


図 1.2.8(6) 気象条件の経時変化(2009年8月)

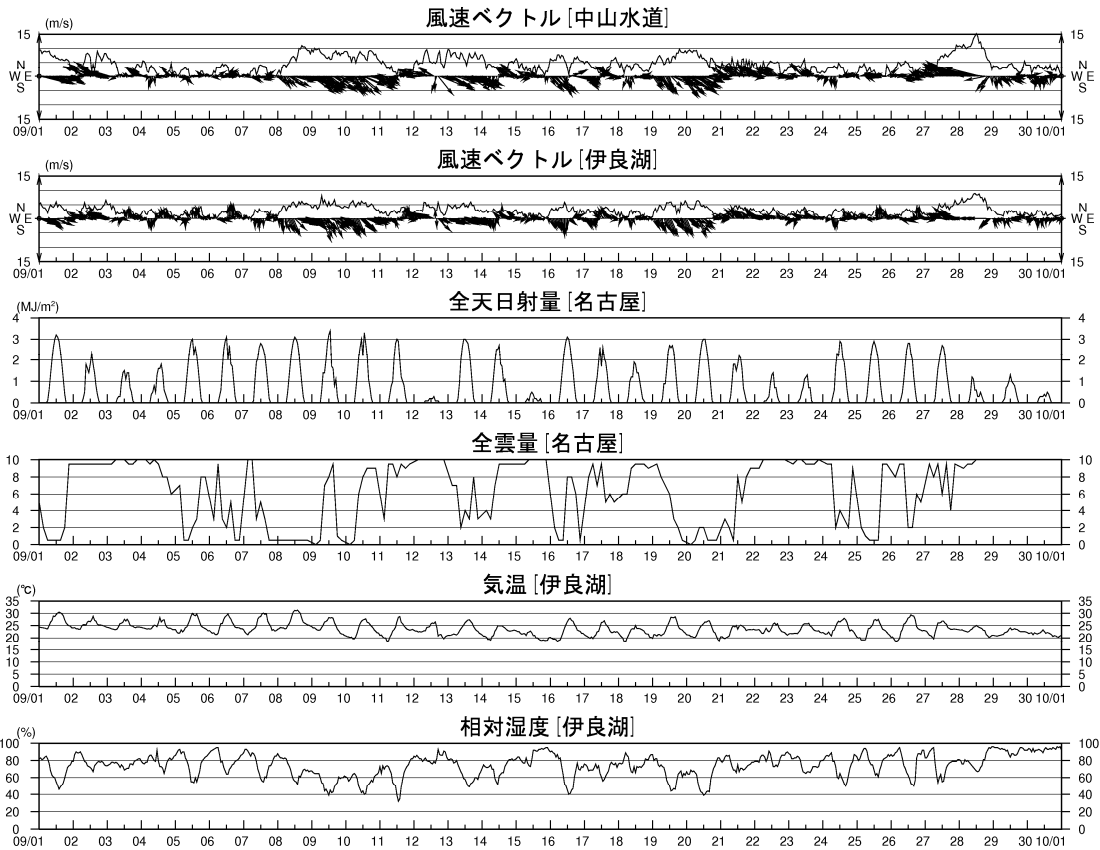


図 1.2.8(7) 気象条件の経時変化(2009年9月)

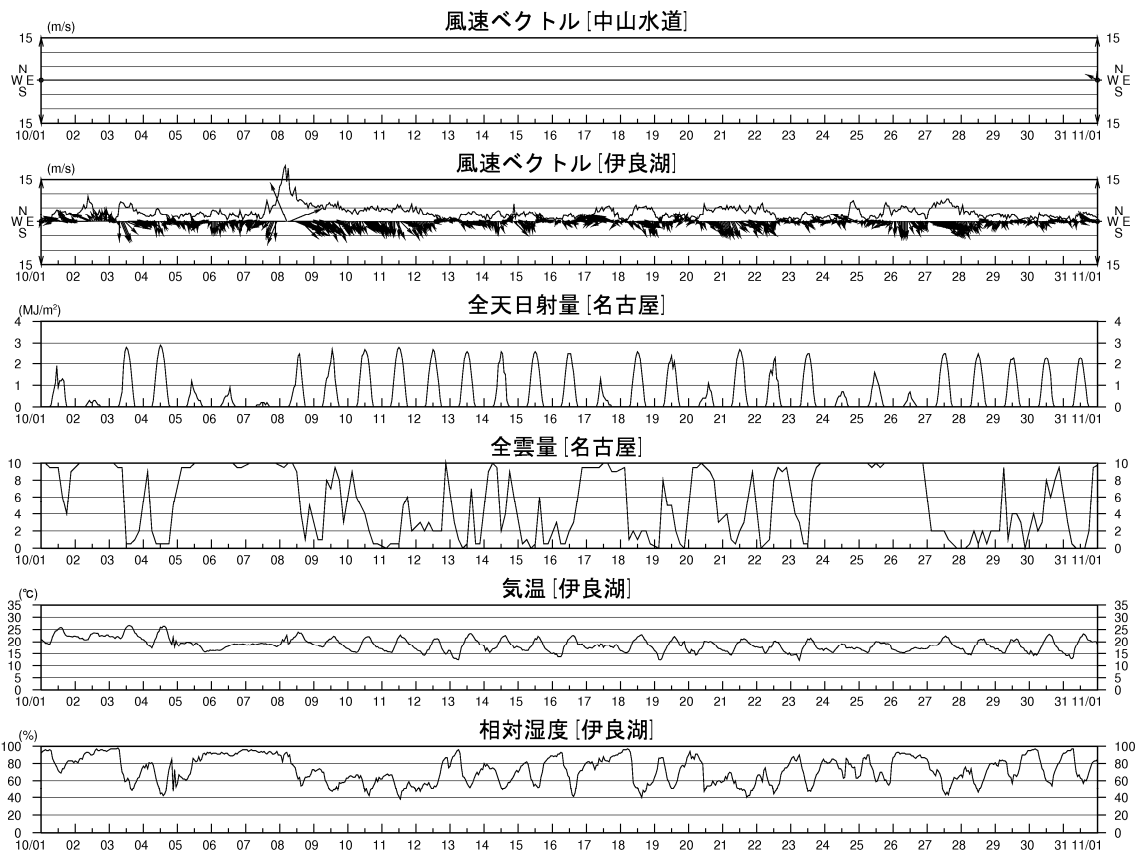


図 1.2.8(8) 気象条件の経時変化(2009年10月)

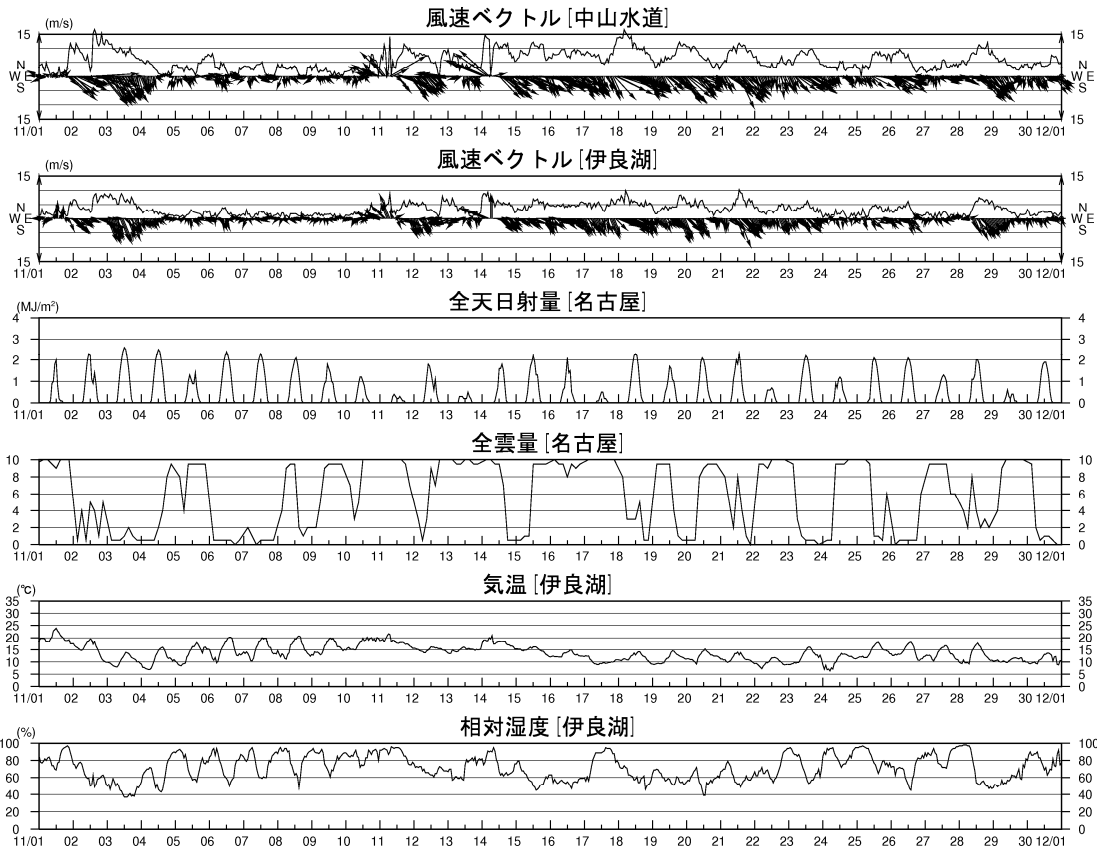


図 1.2.8(9) 気象条件の経時変化(2009年11月)

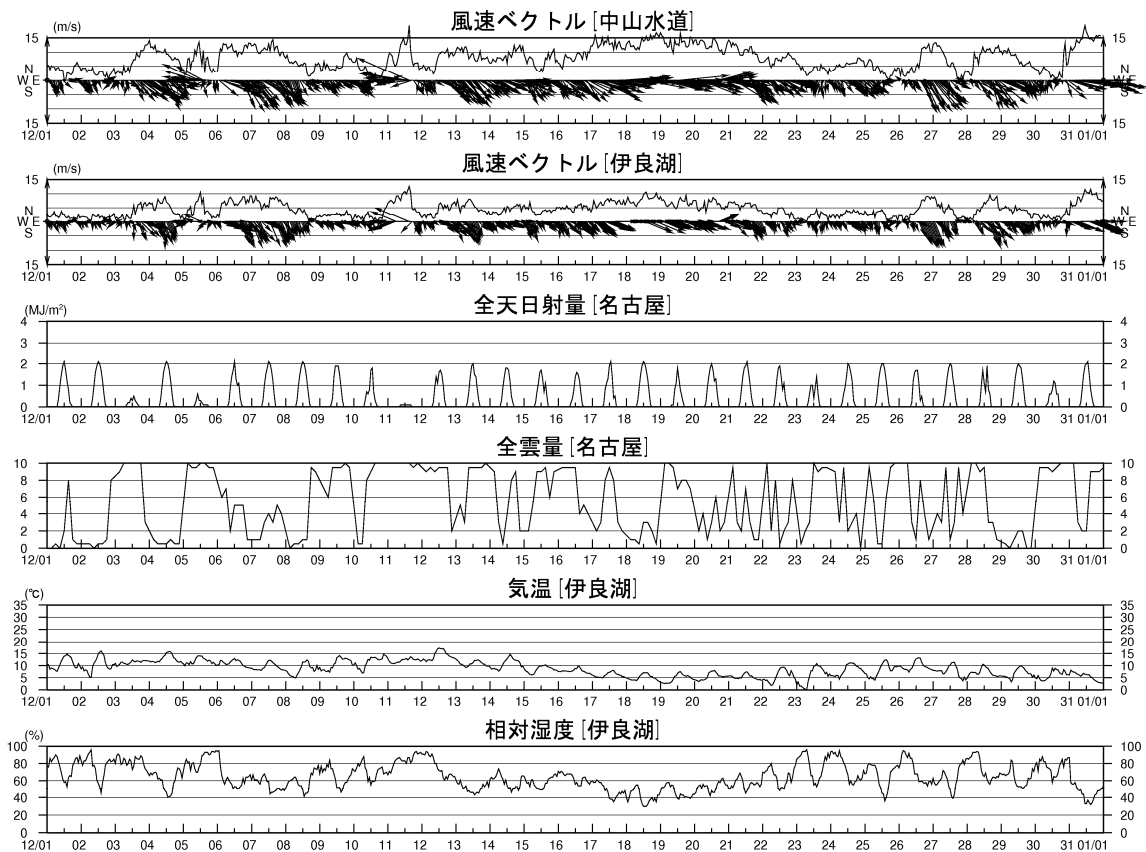


図 1.2.8(10) 気象条件の経時変化(2009年12月)

(c) 淡水流入条件

a) 一級河川

伊勢湾および三河湾に流入する一級河川は、図 1.2.9 に示す 10 河川である。一級河川の淡水流入量については、表 1.2.5 に示す方法で設定した。

流入水温については、図 1.2.10 に示す各河川の公共用水域水質調査結果による水温と気温との相関式を整理し、気温から流入水温を推定した。また、流入塩分は 0 とした。

淡水流入量および河川水温の経時変化を図 1.2.11 および図 1.2.12 に示す。

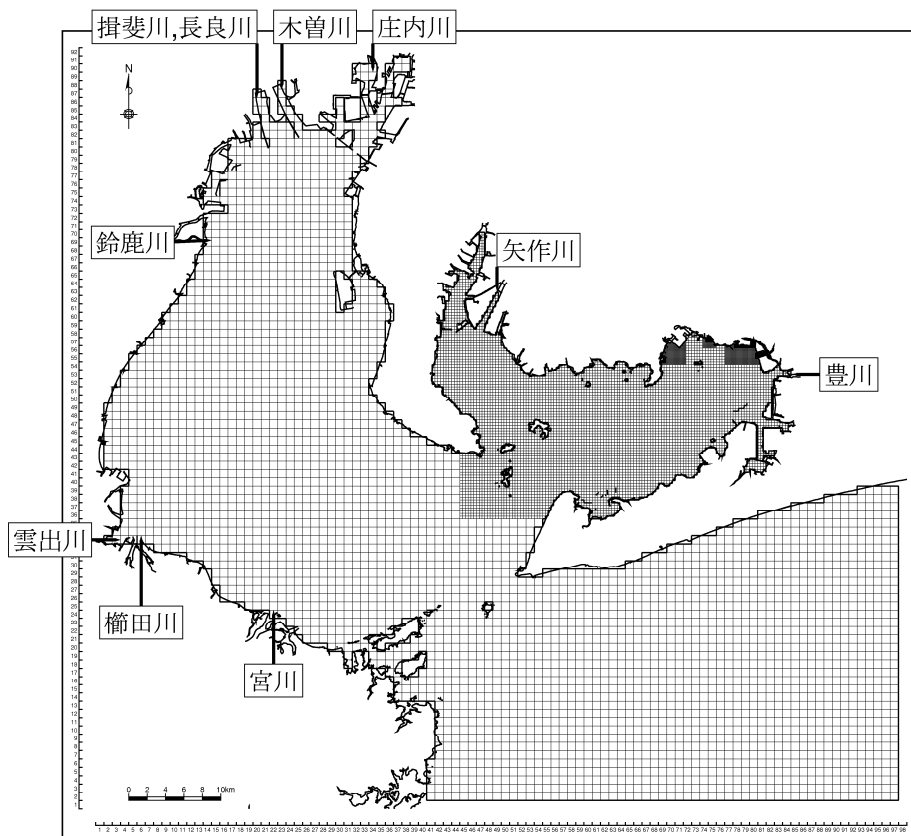
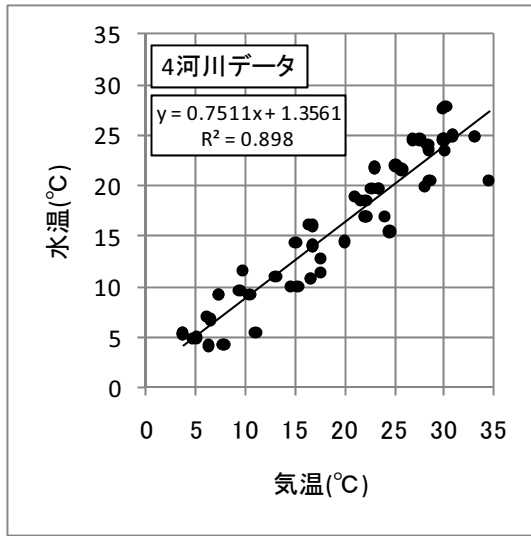


図 1.2.9 河川流入位置

表 1.2.5 淡水流入条件の設定方法

河川名	流域面積 (km ²)	設定方法
豊川	724	流量観測点当古の実測流量 (特別値、速報値)
矢作川	1,830	流量観測点高橋の実測流量 (特別値、速報値)
庄内川	1,010	矢作川の比流量より設定
木曾川	5,275	矢作川の比流量より設定
揖斐川	1,840	矢作川の比流量より設定
長良川	1,985	矢作川の比流量より設定
鈴鹿川	323	矢作川の比流量より設定
雲出川	550	矢作川の比流量より設定
榑田川	436	矢作川の比流量より設定
宮川	920	矢作川の比流量より設定



河川名	観測地点名
豊川	当古橋
矢作川	米津大橋
庄内川	琵琶島橋
木曾川	犬山橋

図 1.2.10 河川水温と気温の関係

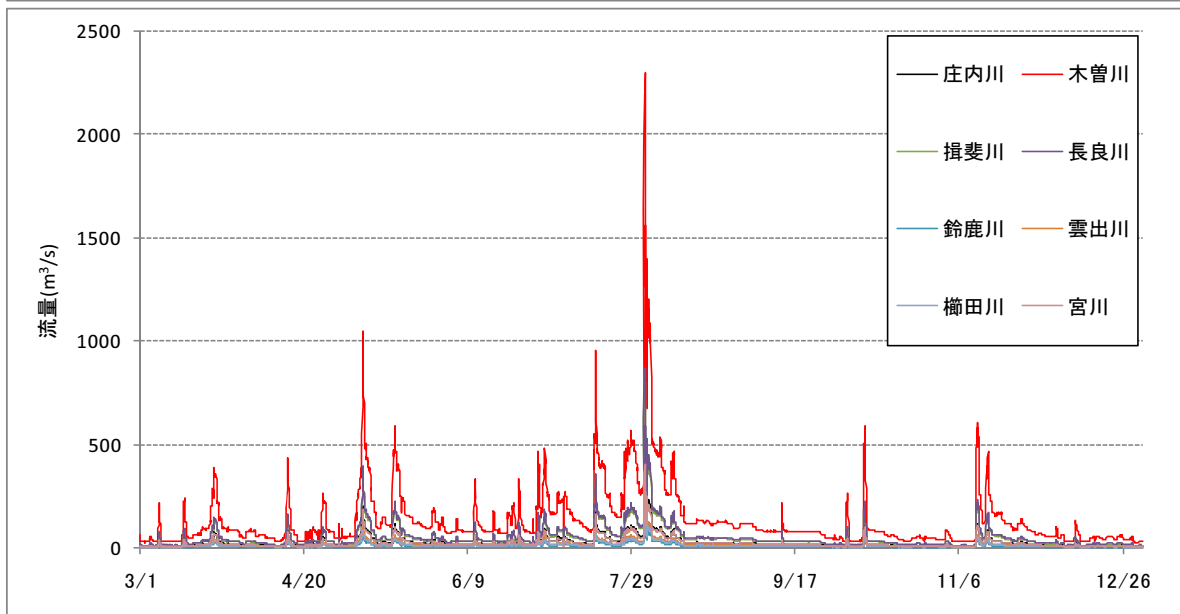
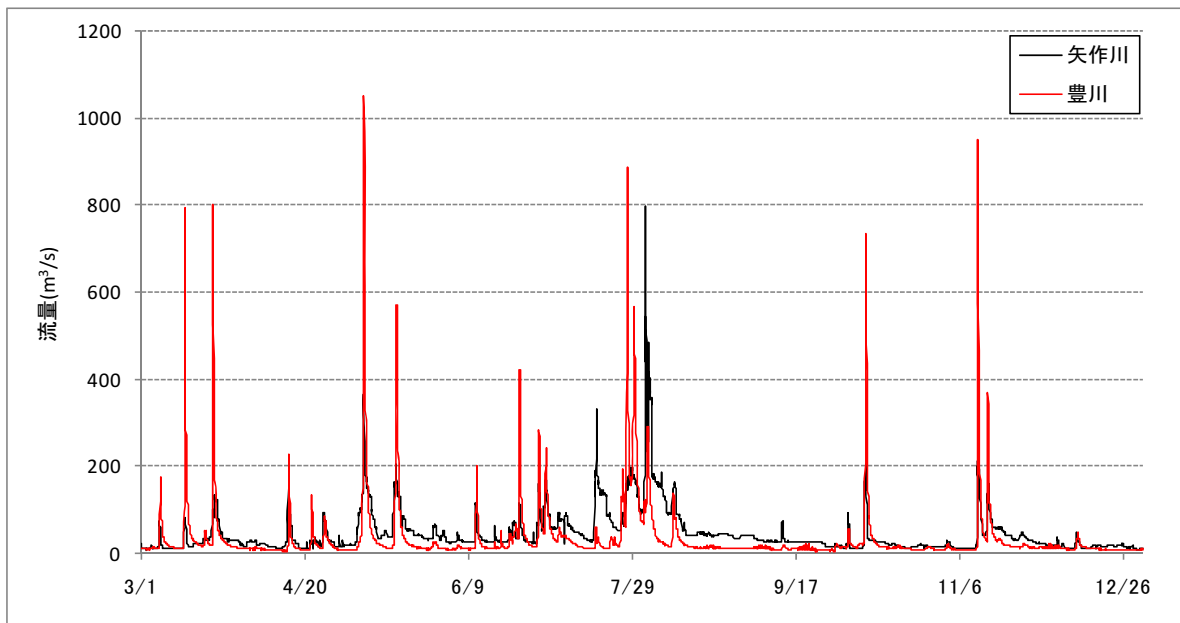


図 1.2.11 淡水流入量の経時変化

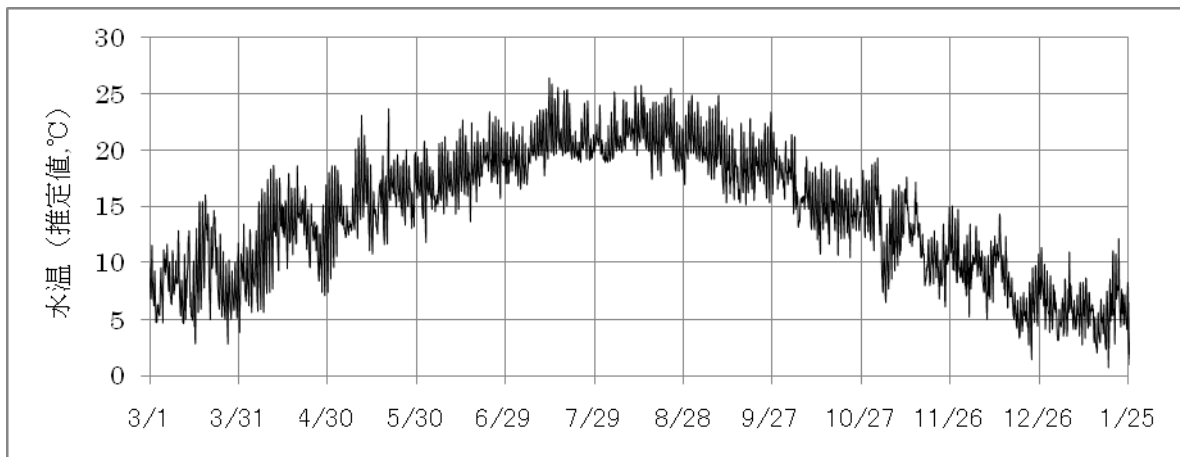


図 1.2.12 河川水温と経時変化（全河川で同一の値として設定）

b) 小河川

ラグーナ蒲郡および蒲郡港周辺の海域に流入する小河川、三谷漁港の雨水幹線から海域に流入する淡水量を考慮した。

小河川および雨水幹線からの淡水量については、気象庁のアメダス観測点の蒲郡における 2009 年の月降水量(図 1.2.13)をもとに、各小河川および雨水幹線の流域面積と流出係数から算定した。各小河川および雨水幹線の流域面積と流出係数を表 1.2.6 に、流入位置を図 1.2.14 に示す。

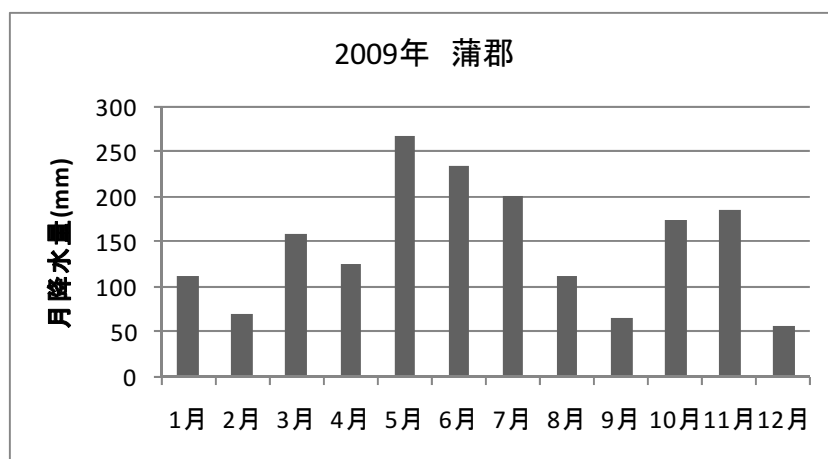


図 1.2.13 蒲郡における月降水量 (2009 年)

表 1.2.6 小河川および雨水幹線の流域面積と流出係数

デッドゾーン水域		河川名	流域面積 (km ²)	流出係数
ラグーナ周辺	小河川	勝川	1.15	0.67
		丸差川	0.46	0.65
		丹下川	1.40	0.66
		紫川	2.77	0.65
		御津川	8.90	0.66
蒲郡港		拾石川	11.32	0.71
		鹿島川	0.25	0.69
		中野川	1.53	0.70
		天神川	2.01	0.78
三谷漁港	雨水幹線	①	0.228	1.00
		②	0.2774	1.00
		③	0.102	1.00
		④	0.11	1.00
		⑤	0.0069	1.00
		⑥	0.477	1.00
		⑦	0.244	1.00
		⑧	0.606	1.00
		⑨	0.07	1.00

出典) 愛知県水産試験場提供資料を基に設定

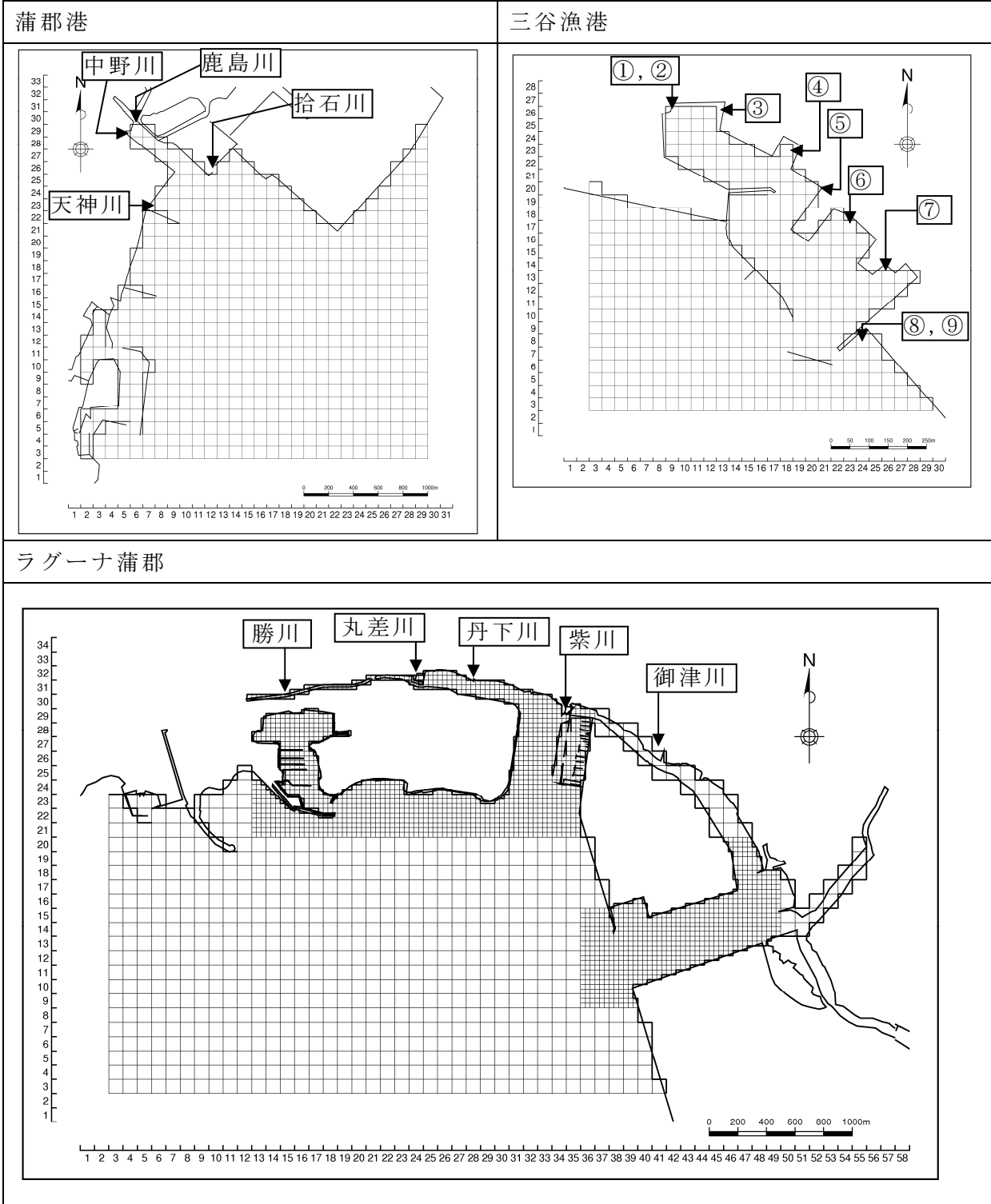


図 1.2.14 小河川および雨水幹線の流入位置

(d)境界条件

湾口境界における水位境界条件は、赤羽根検潮所（気象庁）の10分潮の調和定数（表 1.2.7）を基に水位変動を設定した。ただし各分潮の振幅に関しては、計算によって得られた8検潮所（赤羽根、武豊、師崎、鬼崎、名古屋、四日市、松坂、鳥羽）のM₂分潮の振幅の再現性を考慮して修正することとし、本計算では赤羽根の振幅に0.94を乗じた値を用いた（表 1.2.8）。

一方、湾口における水温・塩分の境界条件は公共用水域水質調査（愛知県・三重県）、沿岸定線調査（愛知県水産試験場）のデータを基に、伊勢湾湾口の境界に該当する格子に各月の値を設定した。代表として開境界の端点における境界条件の月変化を図 1.2.15 に示す。

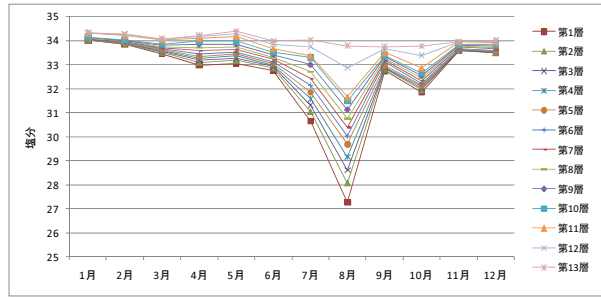
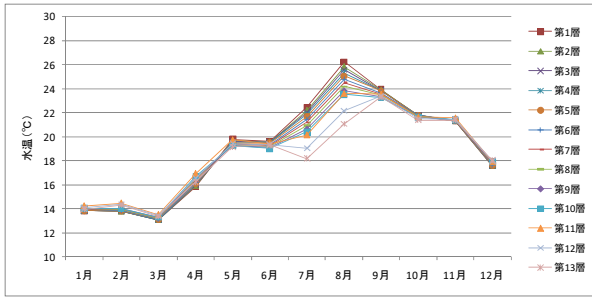
表 1.2.7 赤羽根検潮所における10分潮の調和定数

分潮	周期（時間）	振幅（cm）	遅角（°）
K ₁	23.93	22.3	185.1
O ₁	25.82	16.8	165.6
P ₁	24.07	7.3	181.9
Q ₁	26.87	3.3	155.8
M ₂	12.42	44.9	170.1
S ₂	12.00	20.4	194.6
N ₂	12.66	7.7	164.0
K ₂	11.97	5.6	190.3
M ₄	6.21	0.2	39.5
MS ₄	6.00	0.2	64.0

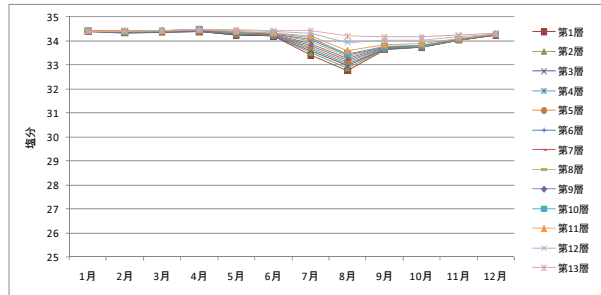
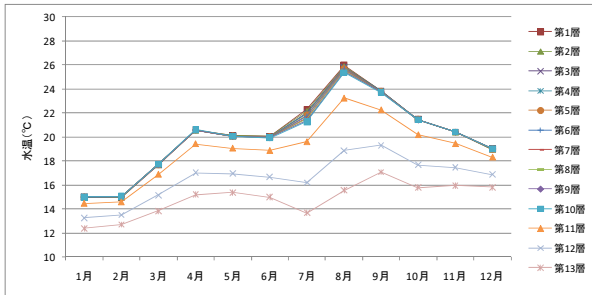
表 1.2.8 境界に設定した10分潮の調和定数

分潮	周期（時間）	振幅（cm）	遅角（°）
K ₁	23.93	21.0	185.1
O ₁	25.82	15.8	165.6
P ₁	24.07	6.9	181.9
Q ₁	26.87	3.1	155.8
M ₂	12.42	42.2	170.1
S ₂	12.00	19.2	194.6
N ₂	12.66	7.2	164.0
K ₂	11.97	5.3	190.3
M ₄	6.21	0.2	39.5
MS ₄	6.00	0.2	64.0

地点A



地点B



地点C

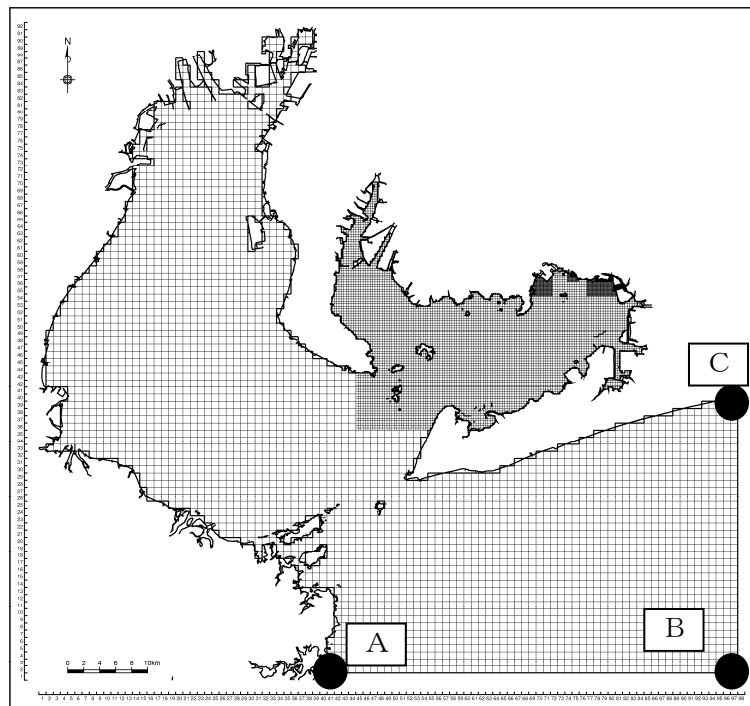
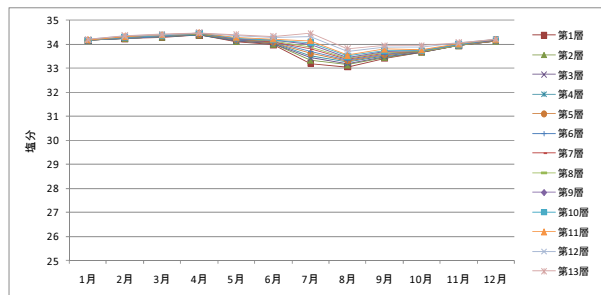
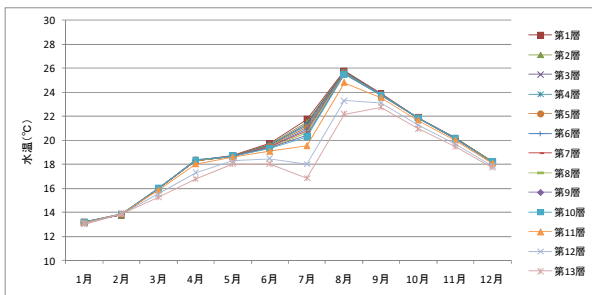


図 1.2.15 境界における水温・塩分の設定値

(e) 初期条件

海水の流れの初期条件は、静止状態とした。

水温・塩分の初期条件は、公共用水域水質測定結果および渥美外海調査結果等を用いて、計算領域の空間分布を作成した。水温・塩分の初期値分布を図 1.2.16 および図 1.2.17 に示す。

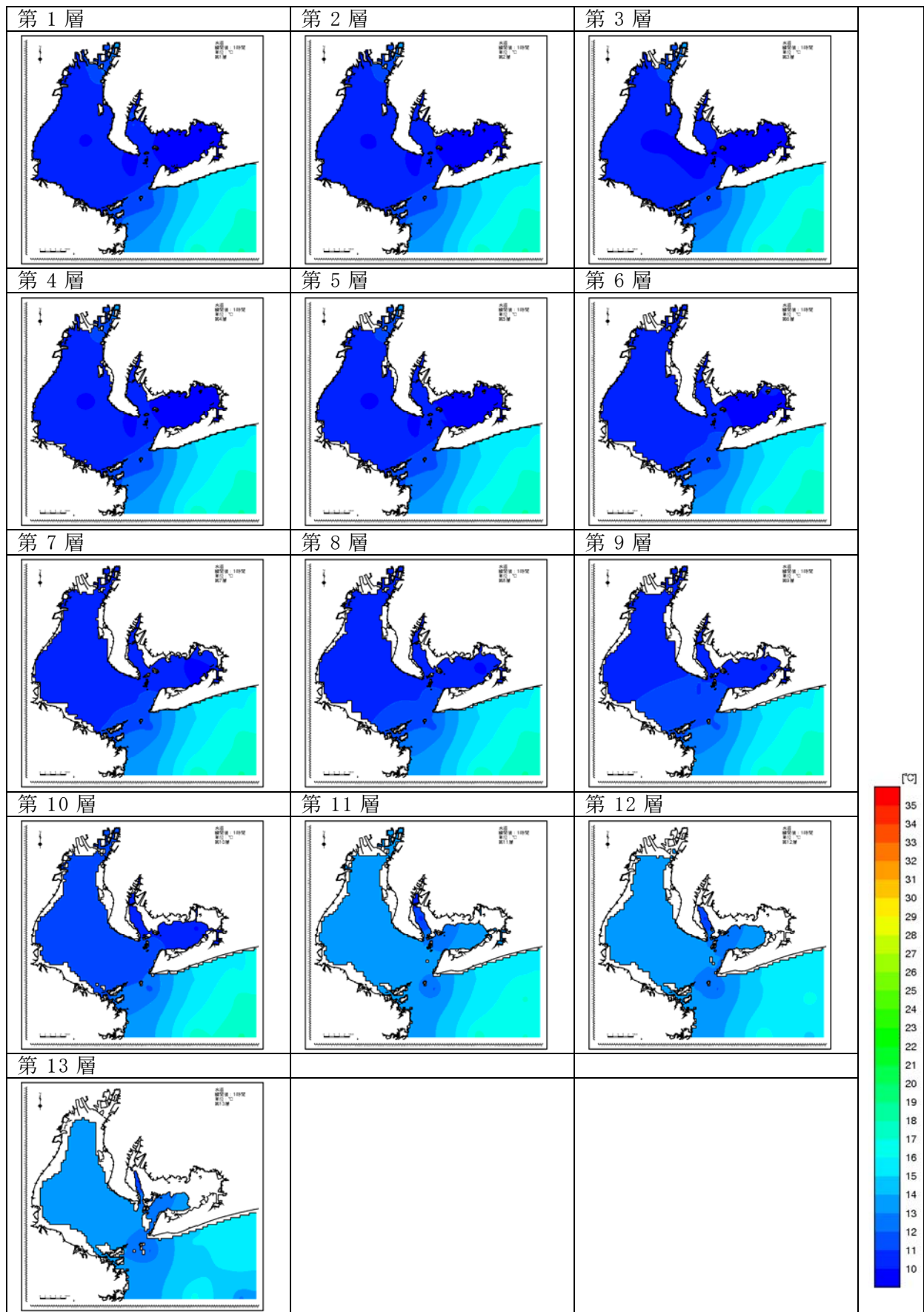


図 1.2.16 水温の初期値分布 (2009 年 3 月)

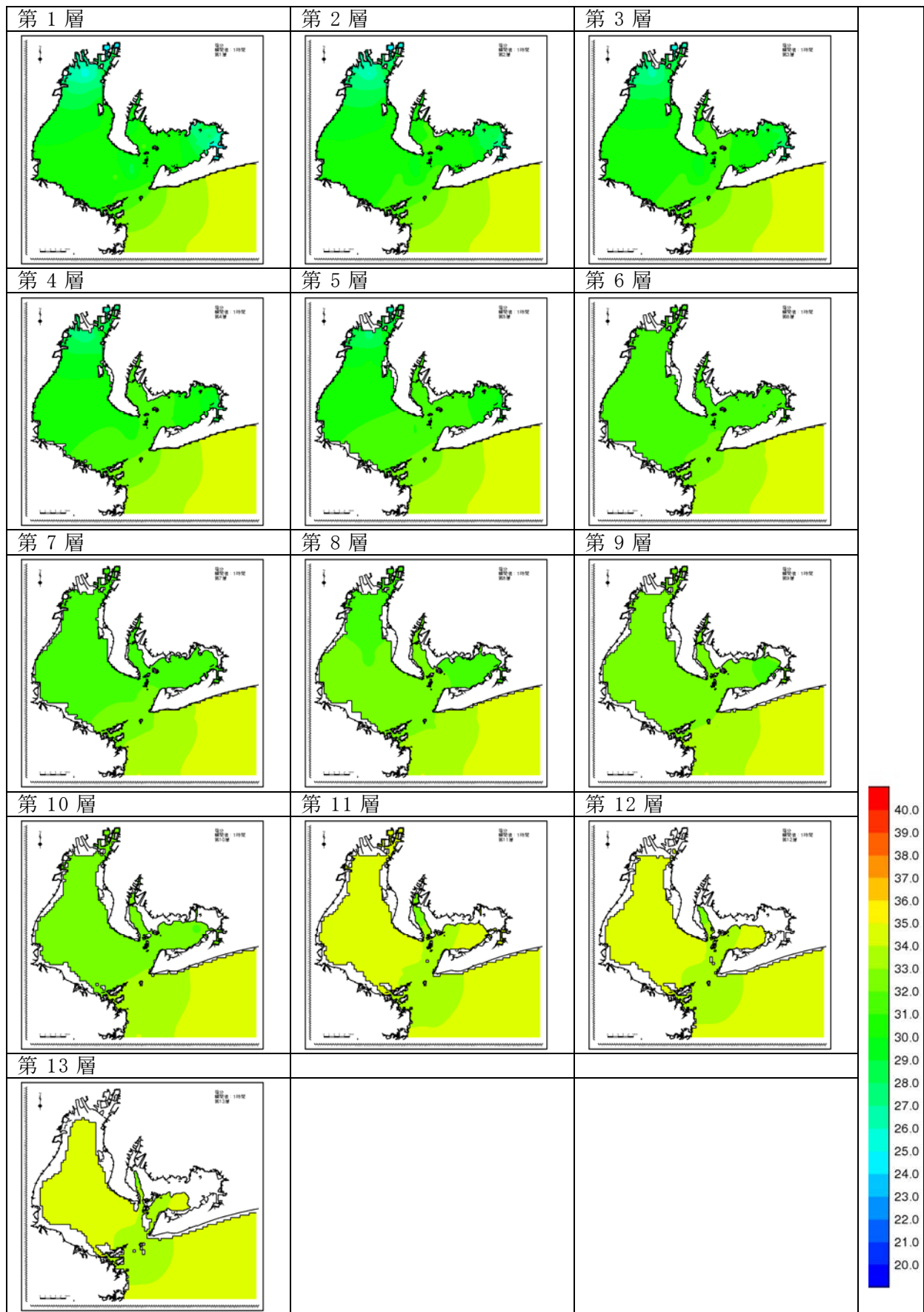


図 1.2.17 塩分の初期値分布 (2009 年 3 月)

(f) 諸係数 (パラメータ)

流動モデルに設定するパラメータは表 1.2.9 に示すとおりである。

表 1.2.9 流動モデルに使用するパラメータ等

項目	設定値及び設定方法
タイムステップ	モデルの安定性を考慮して設定した。
計算期間	2009年3月2日0時～2009年10月1日0時
海面摩擦係数	本多・光易(1980) ² による風速に応じた経験式を用いた。
海底摩擦係数	海底近傍での流速分布をカルマン定数と粗度高さをを用いた対数分布則により仮定することにより得られる値を設定した。
水平渦動粘性係数 水平渦動拡散係数	Smagorinsky(1963) ³ の方法により設定した。
鉛直渦動粘性係数 鉛直渦動拡散係数	Munk and Anderson(1948) ⁴ によるリチャードソン数に依存する成層化関数を用いた。
コリオリパラメータ	地球自転の影響によって運動する物体に働く見かけ力
海面での熱フラックスに係るパラメータ	海面のアルベード、黒体放射と太陽放射の比、顕熱フラックス係数、潜熱フラックス係数等を既往の文献値を参考に設定した

a) 計算時間

2009年3月から2009年9月の7ヶ月間とした。

b) タイムステップ

流動計算では陽解法を用いており、この計算安定条件は次式で与えられる。

$$\Delta t < \frac{\Delta s}{\sqrt{2 \cdot g \cdot h_{\max}}}$$

ここで、

Δs : 格子間隔 (cm)

g : 重力加速度 (cm/s²)

h_{\max} : 計算領域内の最大水深 (cm)

以上より、伊勢湾全域の 900m 格子は 16 秒、三河湾の 300m 格子は 8 秒、100m 格子は 4 秒、33.3m 格子は 2 秒とした。

c) 海面摩擦係数

海面摩擦は、海面における風と海水との摩擦によって風の持つ運動量が海水に移動する効果を表し、風速の 2 乗に比例する形で表現される。

$$\tau_a = C_d \cdot \rho_a \cdot W^2$$

τ_a : 海面摩擦項 (g/cm/s²)

C_d	: 海面摩擦係数
ρ_a	: 大気密度 (g/cm ³)
W	: 風速ベクトル (m/s)

海面摩擦係数については、本多・光易(1980)²の研究で以下のような実験式が求められている。

$$C_d = (1.29 - 0.024W) \times 10^{-3} \quad : W < 8 \text{ m/s}$$

$$C_d = (0.581 + 0.063W) \times 10^{-3} \quad : W \geq 8 \text{ m/s}$$

W : 風速 (m/s)

d) 水平渦動粘性係数、水平渦拡散係数

Smagorinsky(1963)³による経験式を適用し、水平渦動粘性係数(A_M)、水平渦拡散係数(A_H)は次式で表される。

$$A_{M,H} = C_{M,H} (\Delta x \times \Delta y) \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right]^{1/2}$$

C_M 、 C_H は経験的な定数で0.05~0.5程度の値を取るとされており、本検討では0.1とした。

e) 鉛直渦動粘性係数、鉛直渦拡散係数

鉛直渦動粘性係数(K_M)、鉛直渦拡散係数(K_H)については、Munk and Anderson(1948)⁴を適用した。この方法で、求まる係数の最大値を10.0とした。

鉛直渦動粘性係数(K_M)、鉛直渦拡散係数(K_H)は、以下の様に表される。

$$K_M = \psi_M l^2 \left| \frac{\partial U}{\partial z} \right| + K_{MB} \quad K_H = \psi_H l^2 \left| \frac{\partial U}{\partial z} \right| + K_{HB}$$

$$\psi_M = (1 + 10R_i)^{-1/2} \quad \psi_H = (1 + 3.33R_i)^{-3/2}$$

$$R_i = \frac{-g \left(\frac{\partial \rho}{\partial z} \right)}{\rho \left(\frac{\partial U}{\partial z} \right)^2} \quad l = \kappa H \left(1 - \frac{z}{H} \right) \left(\frac{z}{H} \right)^{1/2}$$

K_{MB} : バックグラウンドの鉛直渦動粘性係数 (=0.01 cm²/s)

K_{HB} : バックグラウンドの鉛直渦拡散係数 (=0.01 cm²/s)

κ : カルマン定数 (=0.4)

z : 基準面からの鉛直座標値

H : 水深 (cm)

U : 水平流速 (cm/s)

l : 混合距離 (cm)

f) コリオリパラメータ

コリオリ項は地球自転の影響によって運動する物体に働く見かけ力を表し、次式で表される。

$$C_x = f \cdot v \quad , \quad C_y = -f \cdot u$$

ここで、

C_x, C_y : コリオリ力の x, y 成分

f : コリオリ係数(1/s)

u, v : 流速の x, y 成分(cm/s)

コリオリ係数は、 $f = 2\omega \sin \phi$ と表され、

ω : 地球自転の角速度($\omega = 2\pi / 24 \times 3600$)

ϕ : 緯度

本計算での緯度 ϕ は、 34.33° とした。

4) GCS モデルの計算条件

GCS モデルに用いた計算条件については、前述のレベルモデルに用いた計算条件と異なる点について、以下にまとめた。

(a) 鉛直層分割

鉛直層分割は、鉛直方向に 3 段階の多重 σ 座標を定義し、0～2m までを 4 層、2～4m までを 4 層、4～8m までを 4 層とした。計算領域の南北方向の断面における計算層の分布は図 1.2.18 に示すような分割となっている。

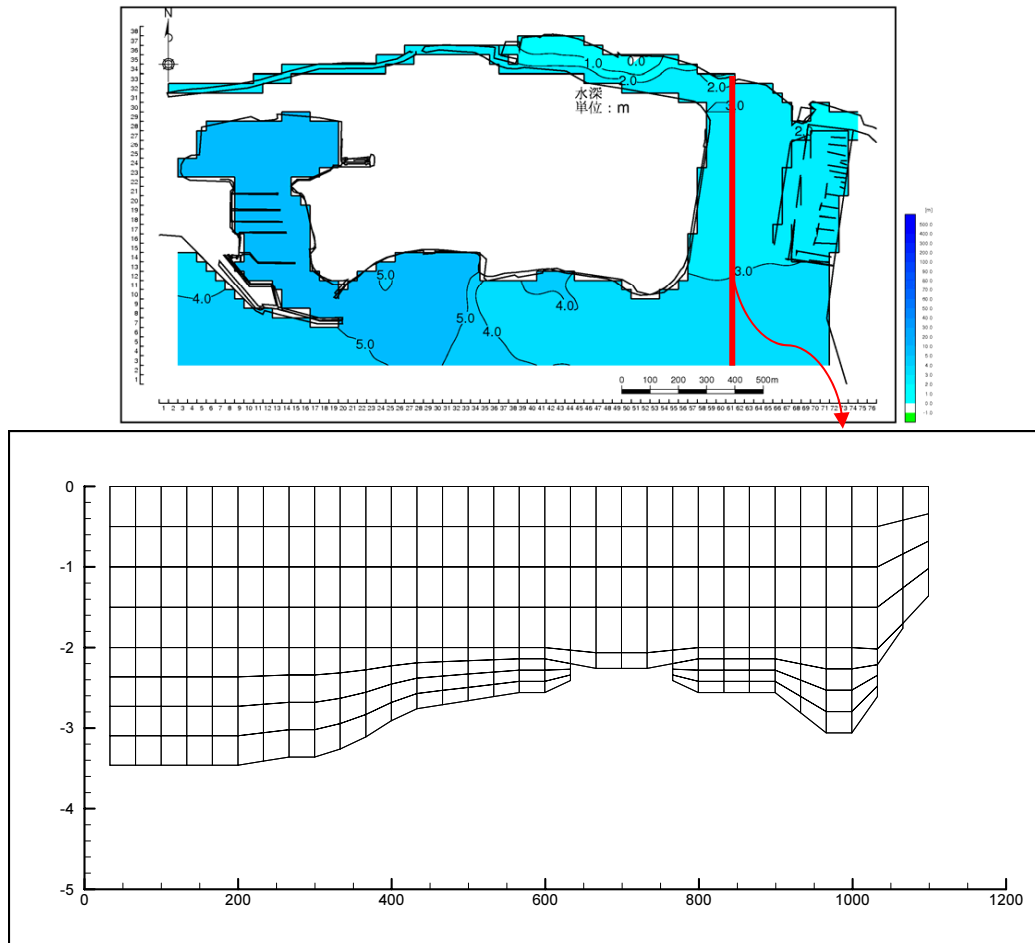


図 1.2.18 鉛直層分割のイメージ

(b) 気象条件

入江（ラグーナ蒲郡）に近接している観測値を用いることとし、気象庁のアメダス観測点の蒲郡のデータを用いることとした。

蒲郡で観測されていない項目については、伊良湖および名古屋のデータを用いた。計算期間(2009年6月～9月)の風速ベクトルの経時変化を図 1.2.19 に示す。

表 1.2.10 気象データの取得先

気象項目	場 所	出 典
気温、風向、風速	蒲郡	気象庁
相対湿度	伊良湖	気象庁
全雲量, 全天日射量	名古屋	気象庁

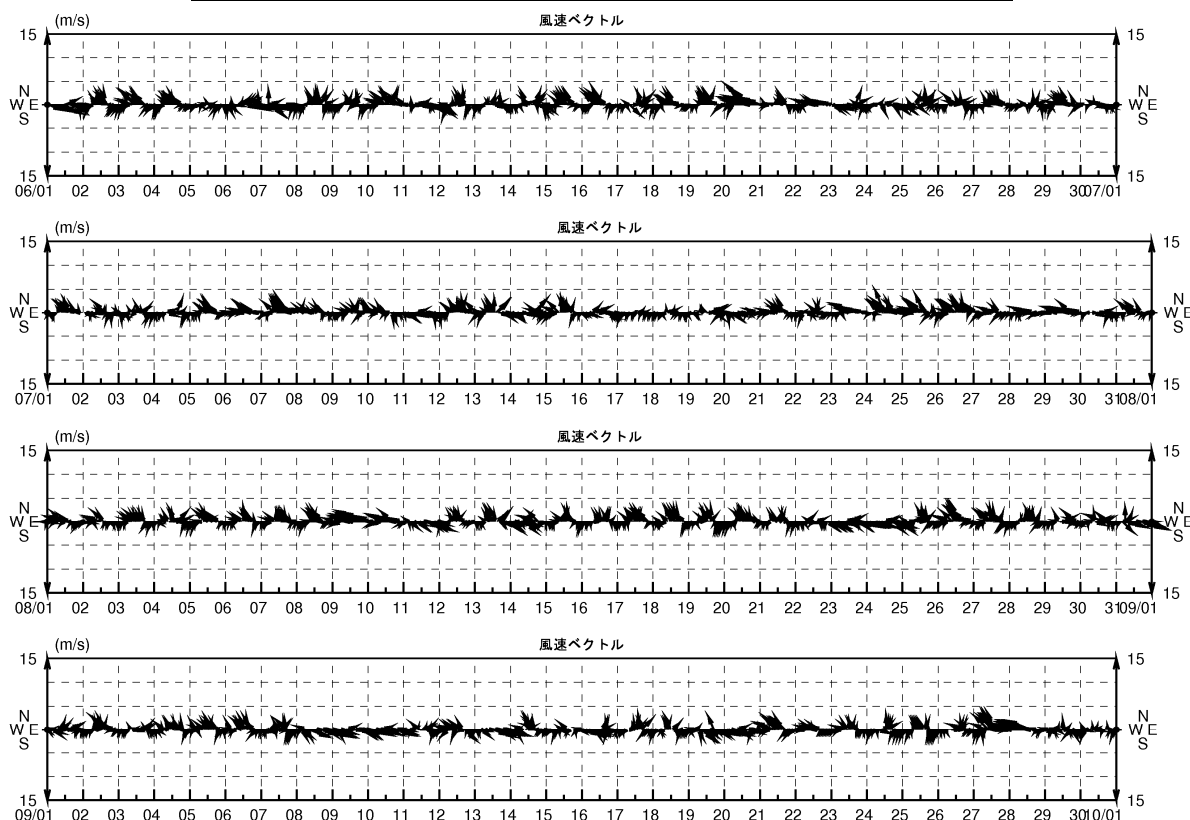


図 1.2.19 風速ベクトルの経時変化（2009年6月～9月、蒲郡）

(c) 境界条件

境界条件については、愛知県水産試験場が実施した水温・塩分の連続観測結果を用いた。水温と塩分の経時変化を図 1.2.20 に示す。

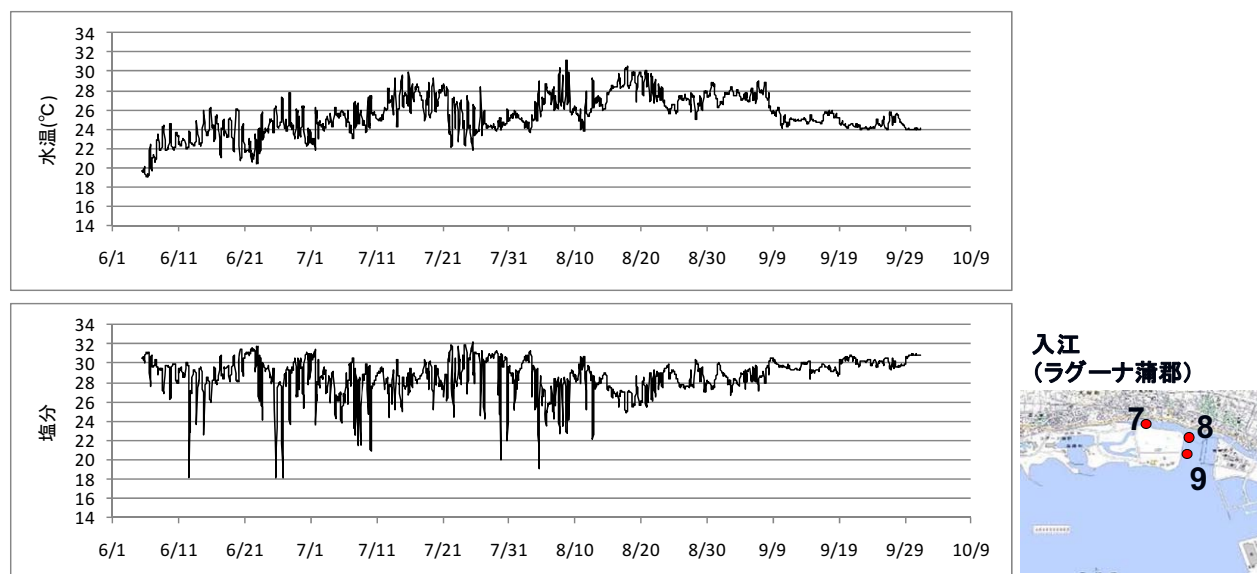


図 1.2.20 境界に設定した水温・塩分の経時変化（2009年6月～9月、地点9）

(d) 初期条件

計算開始日時である2009年6月2日0時の初期値は、図 1.2.20 に示した地点9における同時刻の水温、塩分値を初期値として、計算範囲に一樣に設定した。

(e) 諸係数(パラメータ)

a) 計算時間

愛知県水産試験場が図 1.2.20 に示した地点9等で観測を実施している期間として、2009年6月6日から2009年10月1日までとした。

b) タイムステップ

計算の安定性を考慮して、外部モード：0.2秒、内部モード：2.0秒とした。

c) 鉛直渦動粘性係数・鉛直渦動拡散係数

鉛直渦動粘性係数および鉛直渦動拡散係数は、水平方向と同様に、海水流動の乱れによって海水の持つ運動量や物質が鉛直方向に混合しあう効果を表している。

鉛直渦動粘性係数および鉛直渦動拡散係数は Mellor and Yamada(1982)⁵による2方程式乱流クロージャーモデルにより算定した。ただし、乱流モデルにより算定される粘性／拡散係数に対してバックグラウンドの値として $0.01(\text{cm}^2/\text{s})$ を設定した。

d) コリオリパラメータ

コリオリ項は地球自転の影響によって運動する物体に働く見かけ力を表し、次式で表される。

$$C_x = f \cdot v \quad , \quad C_y = -f \cdot u$$

ここで、

C_x, C_y : コリオリ力の x, y 成分

f : コリオリ係数(1/s)

u, v : 流速の x, y 成分(cm/s)

コリオリ係数は、 $f = 2\omega \sin \phi$ と表され、

ω : 地球自転の角速度($\omega = 2\pi / 24 \times 3600$)

ϕ : 緯度

本計算領域での緯度 ϕ は、 34.8° とした。