

早崎瀬戸の流動特性と物質輸送構造について

2013 年 3 月

九州大学高等研究院

田井明

目次

第1章	はじめに	1
第2章	現地観測による海洋構造の把握	3
2.1	観測の概要	3
2.2	観測結果	7
2.2.1	流速観測の結果	7
2.2.2	CTD 観測の結果	10
2.2.3	栄養塩の分布	14
第3章	数値シミュレーションによる解析	21
3.1	解析方法	21
3.2	解析結果	24
第4章	まとめ	27
	参考文献	29

第1章

はじめに

近年、有明海では、2000年冬季に発生した養殖ノリの大規模な色落ち被害に端を発した、いわゆる「有明異変」が社会問題化している。有明海では、漁獲量が経年的に減少傾向にあり、特に大きな干潟を有するために特産品であったアサリや、近年禁漁が続いているタイラギなどの二枚貝の減少が目立っている [日本海洋学会 (2005)]。

有明海では農林水産省が進める「諫早湾干拓事業」に伴い、1997年に有明海に枝湾として接続する諫早湾の奥部1/3が全長7kmにおよぶ締め切り堤防によって締め切られた。干拓で造成された農地の前面には、淡水を貯留する調整池が造られ、農業用水の安定供給が可能になっている。さらに、一級河川本名川が流れる背後地の諫早市の洪水の制御にも利用できるようになっている。しかしながら、この大規模公共事業による干拓地と調整池の建設は、諫早湾奥部に広がっていた広大な干潟を消失させ、加えて諫早湾の1/3(3,500ha)を消失させたため有明海の流動構造や生態系に大きな影響を与えたことが推測される。周辺4県(福岡・熊本・佐賀・長崎)における1997年以降の漁獲量は70年代の1/4程度に落ち込んでいる [日本海洋学会 (2005)]。

有明海問題を契機として、2002年11月に成立した「有明海及び八代海を再生するための特別措置に関する法律」に基づき、関係各省(環境省、農林水産省、水産庁、国土交通省など)や周辺自治体(福岡県、熊本県、佐賀県、長崎県など)は大規模な現地調査や数値シミュレーションによる公共事業などの影響評価を行ってきたが、現在に至っても有明海の疲弊の決定的な原因は明らかでないとなっている [環境省 (2006)]。

そこで本報告では、有明海の水環境や生態系の疲弊の原因として、有明海湾奥の物理環境の変化に伴う影響を評価することを目的に、データ解析、数値シミュレーションおよび現地観測による検討を試みた。本研究で対象とする有明海は、Fig. ??に示すように九州の西岸に位置し、平均幅が約18km、早崎瀬戸を湾口と見なした場合の奥行が約96km、平均水深が約20mである。長崎県、佐賀県、福岡県、熊本県の4県にまたがる海岸線で囲まれた総面積は1,700km²であり、東京湾や伊勢湾と同規模の空間スケールをもつ日本の代表的な閉鎖性内湾である。また、湾奥部において大潮期には最大6mの潮差が発生するなど日本最大の潮差をもち、それに起因して広大な干潟(面積:18,841ha)が発達し、その広さは日本全体の干潟面積の約4割を占める。多様な希少魚介類が生息するユニークな生態系を持っており、国内最大の養殖ノリ漁場ともなっている。

有明海の湾口である早崎瀬戸の流動構造は、潮汐振幅の変動や湾奥の干拓による入退潮量の変化や影響を強く受ける。本研究では、その流動構造や物質輸送特性を把握することで、湾奥の干拓が有

明海へ与えた影響の一端を解明する．早崎瀬戸において混合期に一潮汐間の現地観測を実施し，流動構造を明らかにする．具体的に超音波ドップラー流速計 ADCP による流速観測，多項目水質計による CTD 観測を実施する．さらに，採水サンプルより栄養塩の分析を行い，藤原ら (1997) が大阪湾で示したような外海からの内湾への栄養塩負荷について有明海での検討を実施する．また，数値モデルにより湾奥の干拓の影響による流動特性の変化を解析する．

第 2 章

現地観測による海洋構造の把握

2.1 観測の概要

現地観測は、2012 年 9 月 19 日に実施した。観測項目は流向・流速、CTD 観測、採水による栄養塩の測定である。

流向・流速の観測は RD-INstruments 社製 Workhorse ADCP300KHz を用いた。DGPS (Differential GPS) を連動させて位置や船速を精確に計測しながら行っている。CTD 観測は JFE アドバンテック社製高速応答 DO センサ搭載メモリ CTD RINKO-Profler を用いて行った。採水はバンドン式採水器を用いて行い、溶存態栄養塩測定用サンプルは採水後、直ちにろ過し、冷暗保存して研究室に持ち帰った。

観測スケジュールは、Table 2.1 に示すとおり一潮汐間のうち、上げ潮、下げ潮の最強時と満潮、干潮の憩流時に行った。当日の口之津験潮所の潮汐を Fig. 2.1 に示す。なお、観測当日は、大潮期と小潮期の中間にあたる時期であった。

観測地点を Fig. 2.2 に、その座標を Table 2.2 に示す。観測内容は以下に示すように、最強時と憩流時で異なる。採水水深のイメージを、Fig. 2.3 Fig. 2.4 に示す。

(最強時) 開始時間に ADCP を A → C 方向に実施する (約 30 分)
ADCP 観測終了後、C → B → A の順に CTD 観測と採水を実施する。
採水は、バンドン採水器を用いて行う。

(憩流時) ADCP 観測終了後、D → E → B → F → G の順に CTD 観測と採水を実施する。
採水は、バンドン採水器を用いて行う。

採水サンプル

- ・溶存態栄養塩用、シリカ用ろ過サンプル 2 本
- ・TN, TP 用のろ過なしサンプル 1 本

Table.2.1 観測スケジュール

時間	内容
5:30	集合
7:30	一回目開始（上げ潮最強）
10:30	二回目開始（満潮）
13:30	三回目開始（下げ潮最強）
16:30	四回目開始（干潮）
17:30 ごろ	観測終了
19:00 ごろ	帰港

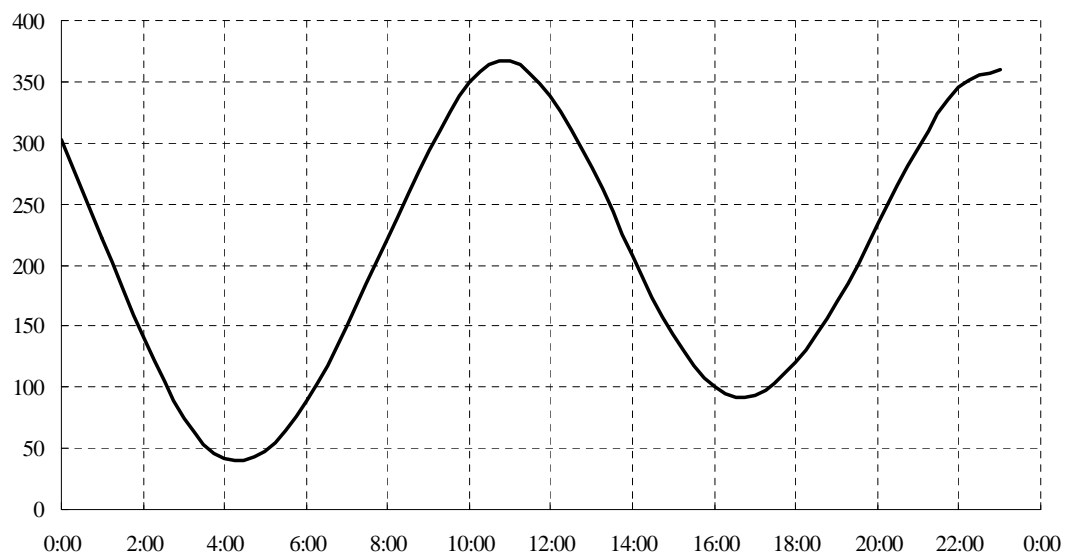


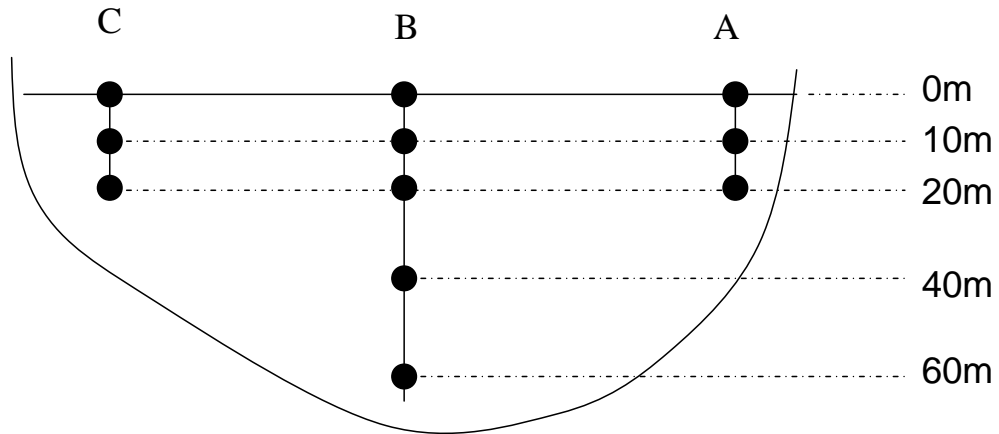
Fig.2.1 9月19日（口之津）



Fig.2.2 観測場所

Table.2.2 観測地点の緯度経度

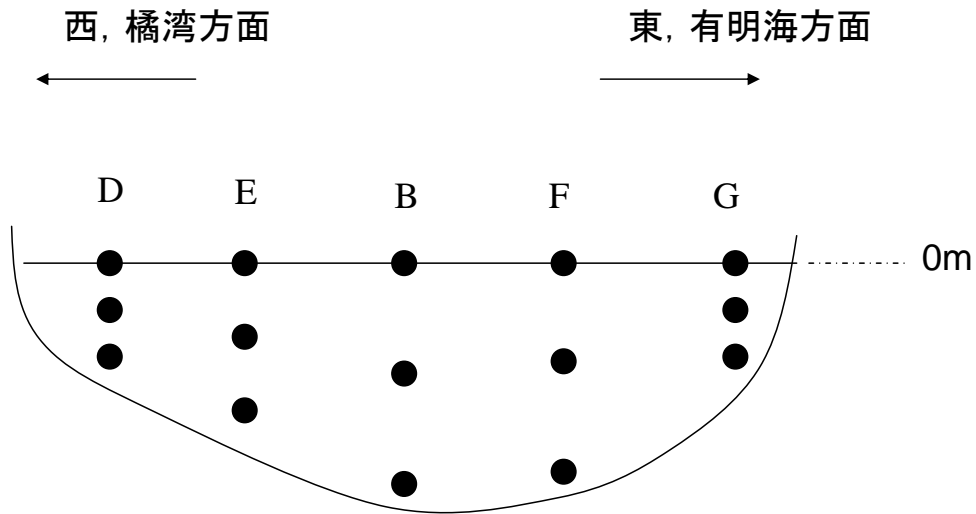
地点名	緯度	経度	水深 (m)
A	32 ° 35 15	130 ° 10 00	20
B	32 ° 34 22	130 ° 10 00	80
C	34 ° 33 28	130 ° 10 00	20
D	32 ° 34 22	130 ° 08 00	25
E	32 ° 34 22	130 ° 09 00	50
F	32 ° 34 22	130 ° 11 00	25
G	32 ° 34 22	130 ° 12 00	25



● 採水ポイント

採水はろ過(2サンプル), ろ過なし(1サンプル)

Fig.2.3 採水位置(上げ潮, 下げ潮)



● 採水ポイント

採水はろ過(2サンプル), ろ過なし(1サンプル)

水深は, 表層, 1/2水深, 底層(+2m程度)

Fig.2.4 採水位置(満潮, 干潮)

2.2 観測結果

2.2.1 流速観測の結果

RD-INstruments 社製 WorkhorseADCP300KHz によって測定された流動構造の結果について説明する。

最初に水深平均流速の水平分布について説明する。

Fig.2.5 に、上げ潮時の水深平均流速の平面分布を示す。観測ライン北部では有明海から流出する方向になっていた。観測中に目視したところ、この海域では多くの水平渦が発生しており、潮流の非線形作用が大きく生じていることが予想される。南部に向かうにつれて潮流流速が大きくなり、水深平均で 3m/s 近い非常に大きい潮流流速が生じていた。この潮流により観測船は当初予定したライン上を進むことが出来ず、結果的に得られた観測ラインは東に傾いている。また、強流域の流向は真東よりも南よりであった。

Fig.2.6 に、下げ潮時の水深平均流速の平面分布を示す。観測ラインの中央より北側で流速が大きくなっていることが分かる。この流速分布により潮流により観測船は当初予定したライン上を進むことが出来ず、結果的に得られた観測ラインは中央付近で西側に膨らんでいる。また、強流域の流向は真西よりも北よりであった。

次に断面直交流速について説明する。

Fig.2.7 に、上げ潮時の断面直交流速のイソプレットを示す。この図の横軸は北側を原点とした経度に沿った水平距離で、流速の東西方向成分のみを取り出して描いている。暖色系は有明海への流入を示している。Fig.2.5 の水深平均流速の平面分布に見られるように、南部で北部に比べて流速が大きくなっている。また、水深方向には一様な分布となっていることが分かる。

Fig.2.8 に、下げ潮時の断面直交流速のイソプレットを示す。寒色系は有明海への流入を示している。Fig.2.6 の水深平均流速の平面分布に見られるように、観測ラインの中央より北側で流速が大きくなっていることが分かる。また、同じく観測ラインの中央より北側において上下に僅かに分布を有しており、表層のほうが流速が大きいことが分かる。

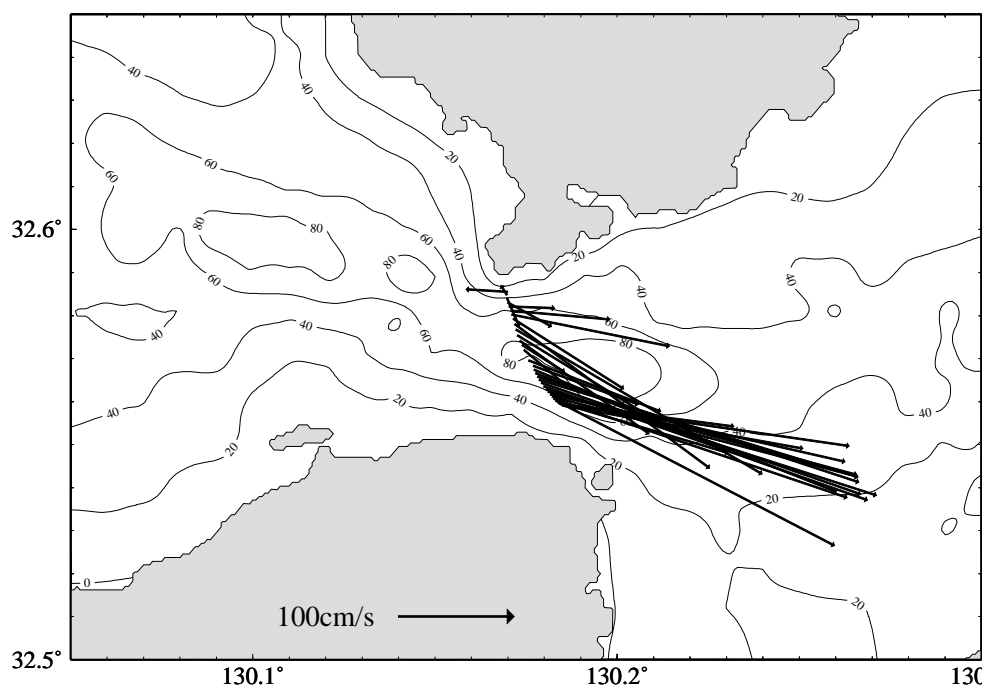


Fig.2.5 水深平均流速の平面分布 (上げ潮)

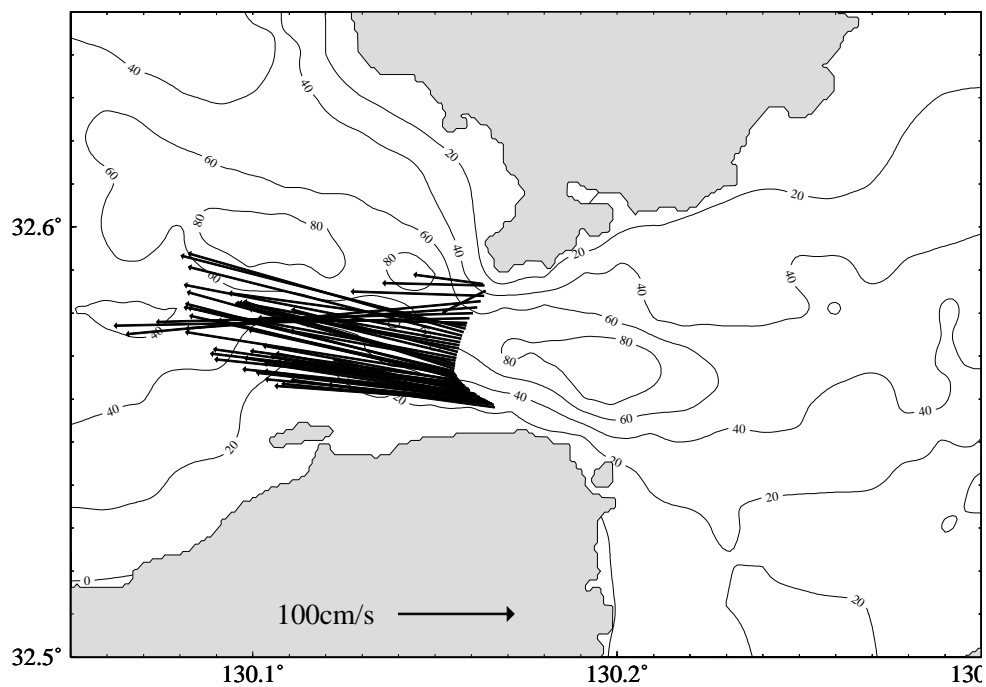


Fig.2.6 水深平均流速の平面分布 (下げ潮)

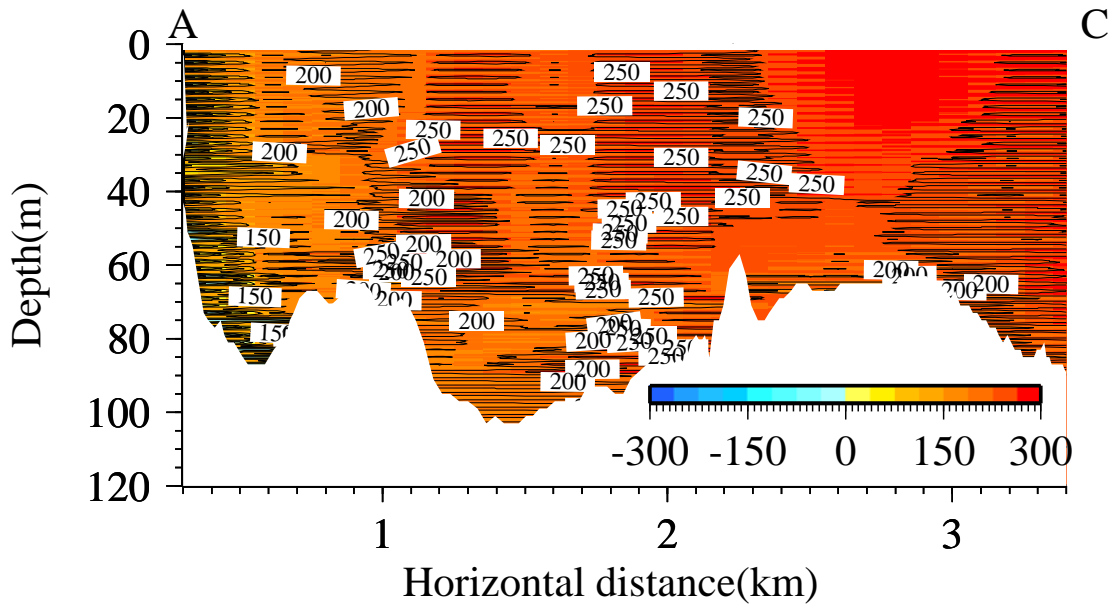


Fig.2.7 断面直交流速の分布 (上げ潮)

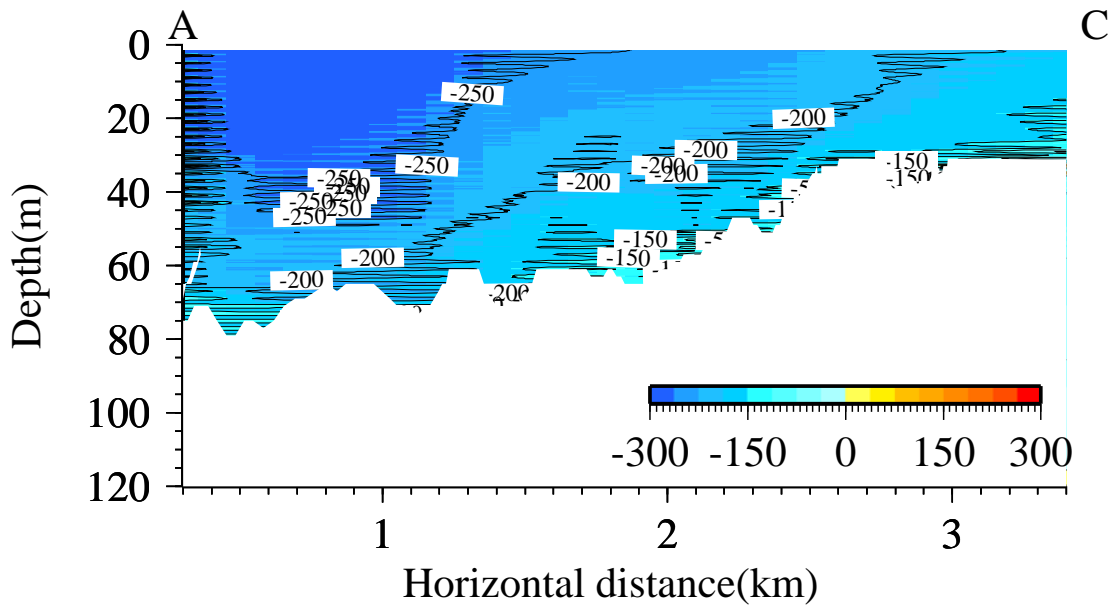


Fig.2.8 断面直交流速の分布 (下げ潮)

2.2.2 CTD 観測の結果

JFE アドバンテック社製高速応答 DO センサ搭載メモリ CTD RINKO-Profiler を用いて行った CTD 観測の結果を示す。

まず、水温の鉛直分布について述べる。Fig.2.9 に4回の潮時(上げ潮,満潮,下げ潮,干潮)別の鉛直分布を示す。上げ潮時は、3点(A,B,C)ともに鉛直方向には0.2以内の変化で鉛直方向に一樣であった。僅かな変化に注目すると、B,C点はともに15m付近に水温の躍層があるように見える。B点の水温が最も高かった。下げ潮時も、3点(A,B,C)ともにほとんど変化しておらず鉛直方向に一樣であった。日射の影響で、上げ潮時よりも全体的に水温は高い。C点の水温が最も高く、下げ潮時とは異なっていた。満潮時は、5点(D,E,B,F,G)の間の水温のばらつきが大きかった。有明海の外側であるD点で最も水温が高く、有明海内に向かうに連れて低くなっていく傾向となっていた。F点では10mまでに弱い水温逆成層が見られた。E点では、40mから50m付近に同じく弱い水温逆成層が生じていた。干潮時は、全地点で弱い水温成層が生じていた。また、全ての潮時のなかで水温が最も高くなっていた。

次に、塩分の鉛直分布について述べる。Fig.2.10 に4回の潮時(上げ潮,満潮,下げ潮,干潮)別の鉛直分布を示す。上げ潮時は、A点とC点は鉛直方向に一樣であった。B点は15m付近に水温の躍層があった15m付近に塩分躍層も存在している。C点の塩分が最も高かった。下げ潮時は、3点(A,B,C)ともにほとんど変化しておらず鉛直方向に一樣であった。満潮時は、湾外の2点(D,E)の塩分が高く、鉛直方向にも分布を有していた。干潮時は、全地点で弱い塩分成層が生じていた。また、全ての潮時のなかで塩分が最も低くなっていた。

次に、 σ_T の鉛直分布について述べる。Fig.2.11 に4回の潮時(上げ潮,満潮,下げ潮,干潮)別の鉛直分布を示す。上げ潮時は、A点とC点は鉛直方向に一樣であった。B点は15m付近に水温・塩分の躍層があった15m付近に密度躍層も存在している。C点の密度が最も高かった。下げ潮時は、3点(A,B,C)ともにほとんど変化しておらず鉛直方向に一樣であった。満潮時は、湾外の2点(D,E)の密度が高く、鉛直方向にも分布を有していた。干潮時は、全地点で弱い密度成層が生じていた。また、全ての潮時のなかで密度が最も低くなっていた。

以上のように、観測当日は密度成層はほとんどなく、混合状態での観測であったと考えられる。

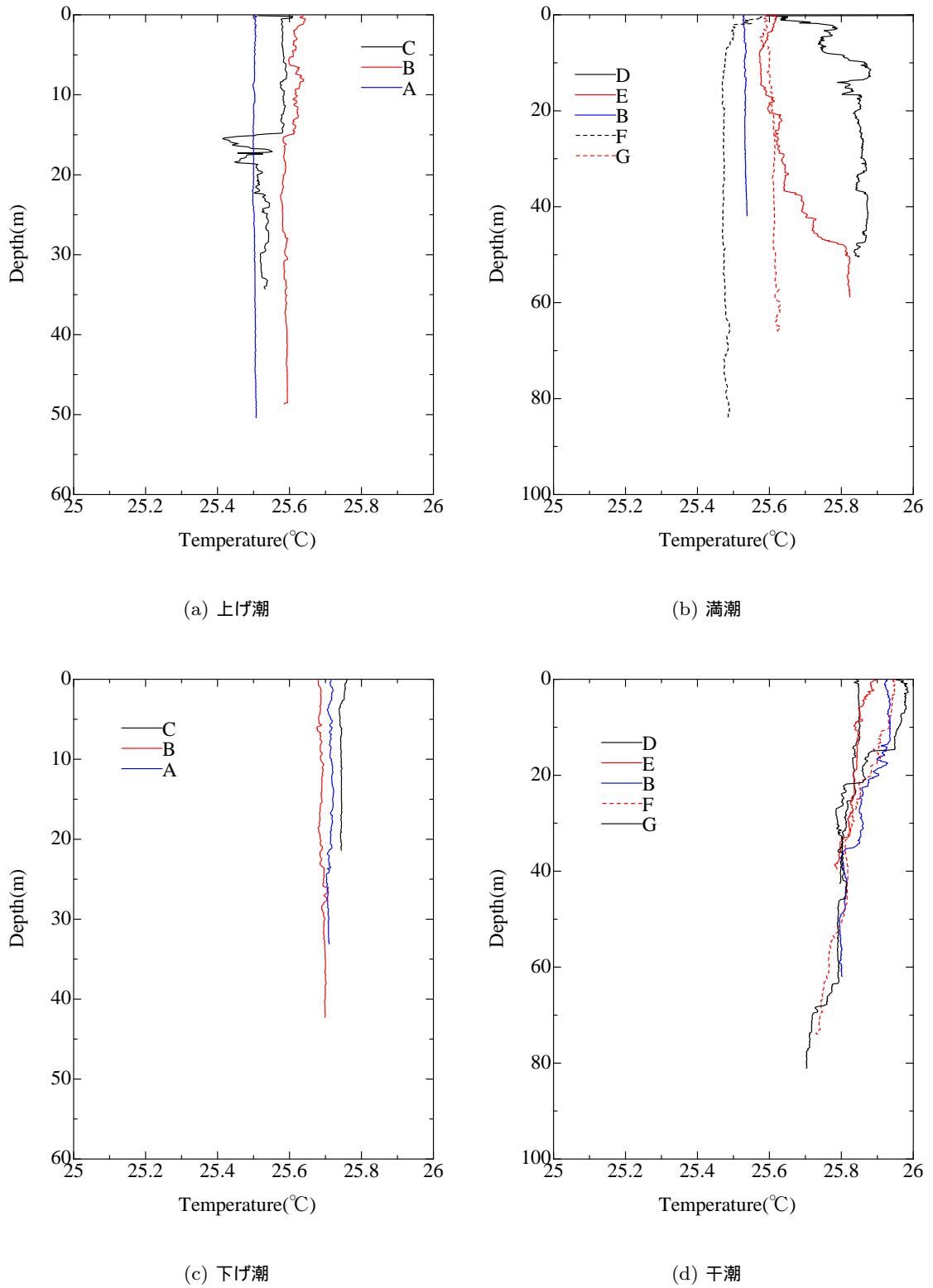
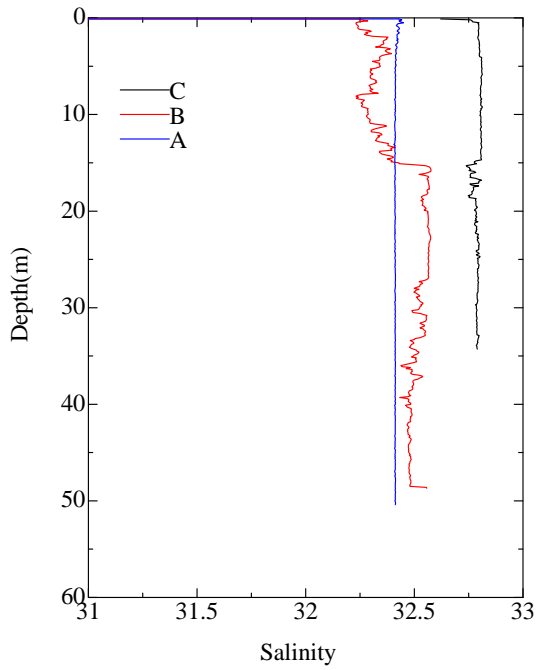
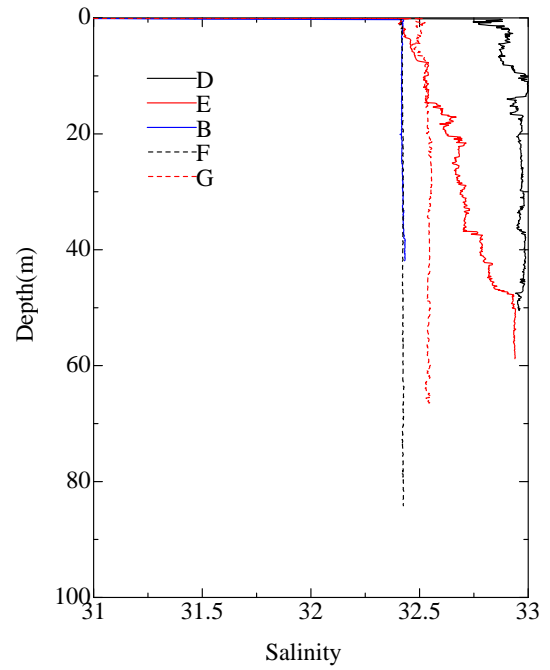


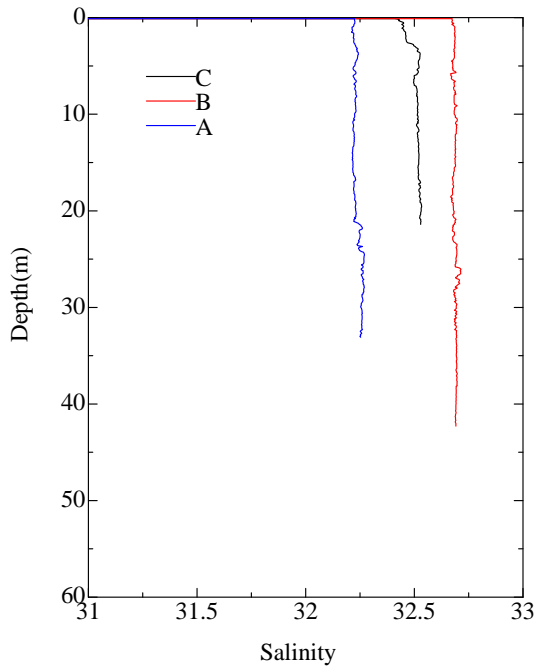
Fig.2.9 水温の鉛直分布



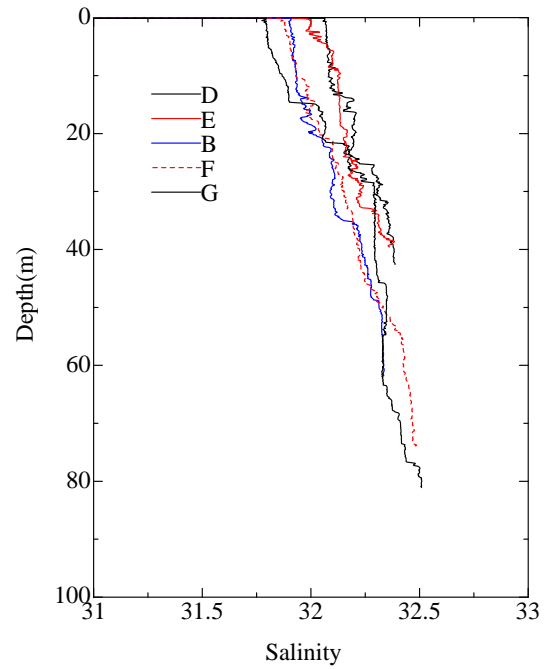
(a) 上げ潮



(b) 満潮



(c) 下げ潮



(d) 干潮

Fig.2.10 塩分の鉛直分布

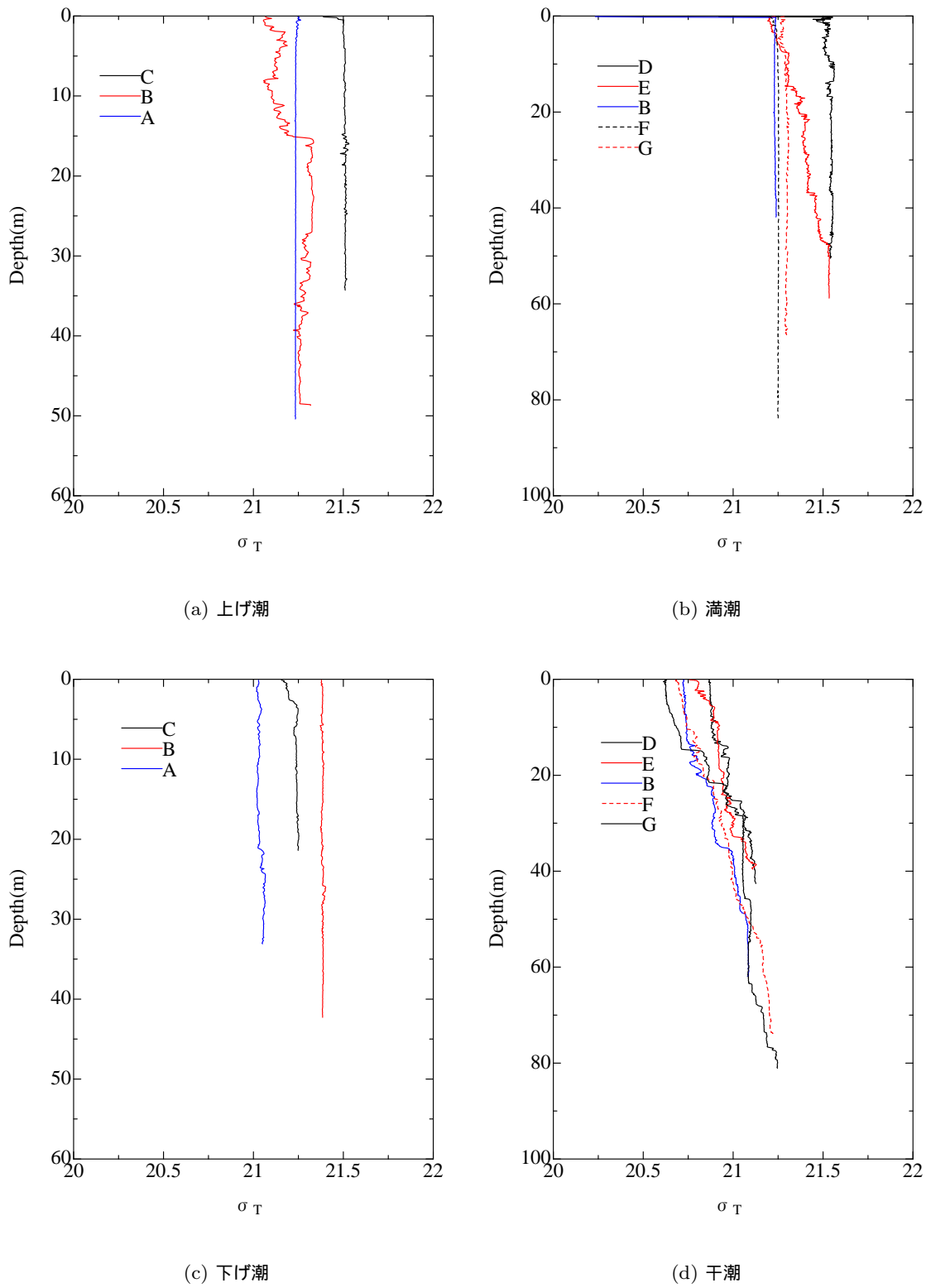


Fig.2.11 σ_T の鉛直分布

2.2.3 栄養塩の分布

栄養塩の分析はオートアナライザー (TRAACS2000) を用いて実施した。分析精度の確認は環境総合テクノスの栄養塩類参照物質を同時測定することで行われた。

Fig.2.12 に硝酸態窒素 $\text{NO}_3\text{-N}$ のイソプレットを示す。上げ潮時は、ライン南側の表層で高い値となっている。満潮時は有明海側の全層で高くなっている。下げ潮時ならびに干潮時は上げ潮時や満潮時に比べて値が低い。Fig.2.13 に亜硝酸態窒素 $\text{NO}_2\text{-N}$ のイソプレットを示す。上げ潮時は、全層で高い値となっている。満潮時は有明海側の全層で高くなっている。下げ潮時は表層付近で高くなっている。下げ潮時は局所的に高い層もあるが全体的に値が低い。Fig.2.14 にアンモニア態窒素 $\text{NH}_4\text{-N}$ のイソプレットを示す。上げ潮時は、表層で高い値となっている。満潮時は有明海側で高くなっている。下げ潮時と干潮時は局所的に高い層もあるが全体的に値が低い。

Fig.2.15 にリン酸態リン $\text{PO}_4\text{-P}$ のイソプレットを示す。上げ潮時と下げ潮時はほぼ一樣な分布となった。満潮時は有明海側が高い値となっている。干潮時は有明海側で低い。

Fig.2.16 に無機態窒素 DIN のイソプレットを示す。上げ潮時に表層で高い値となっている。満潮時は有明海側で高い値となっている。下げ潮時と干潮時は全体的に低い値となっている。

Fig.2.16 に N/P のイソプレットを示す。上げ潮時に表層で高い値となっている。満潮時は有明海側で高い値となっている。下げ潮時は、ライン南側で高い値となっている、干潮時は全体的に高い値となっている。

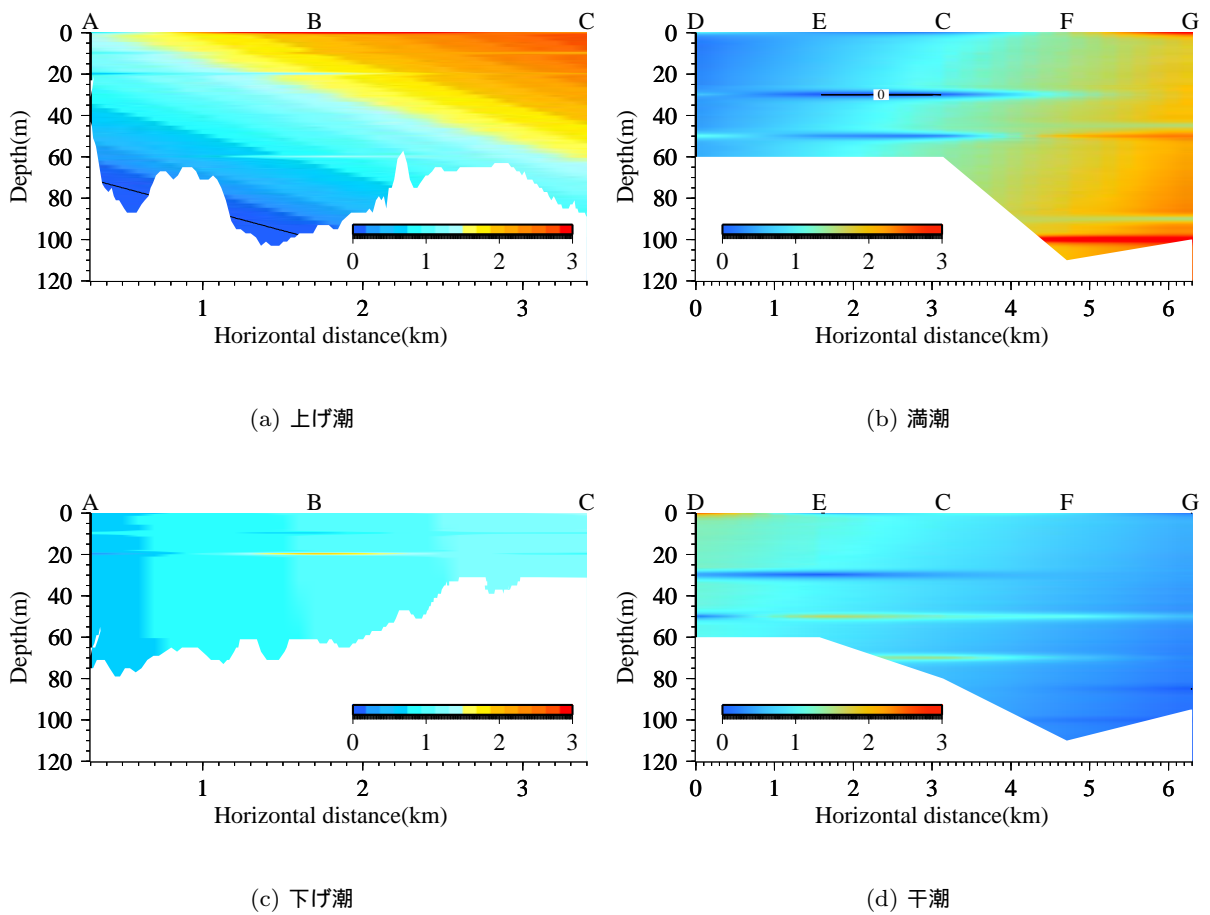


Fig.2.12 硝酸態窒素 $\text{NO}_3\text{-N}$ のイソプレット ($\mu\text{mol/l}$)

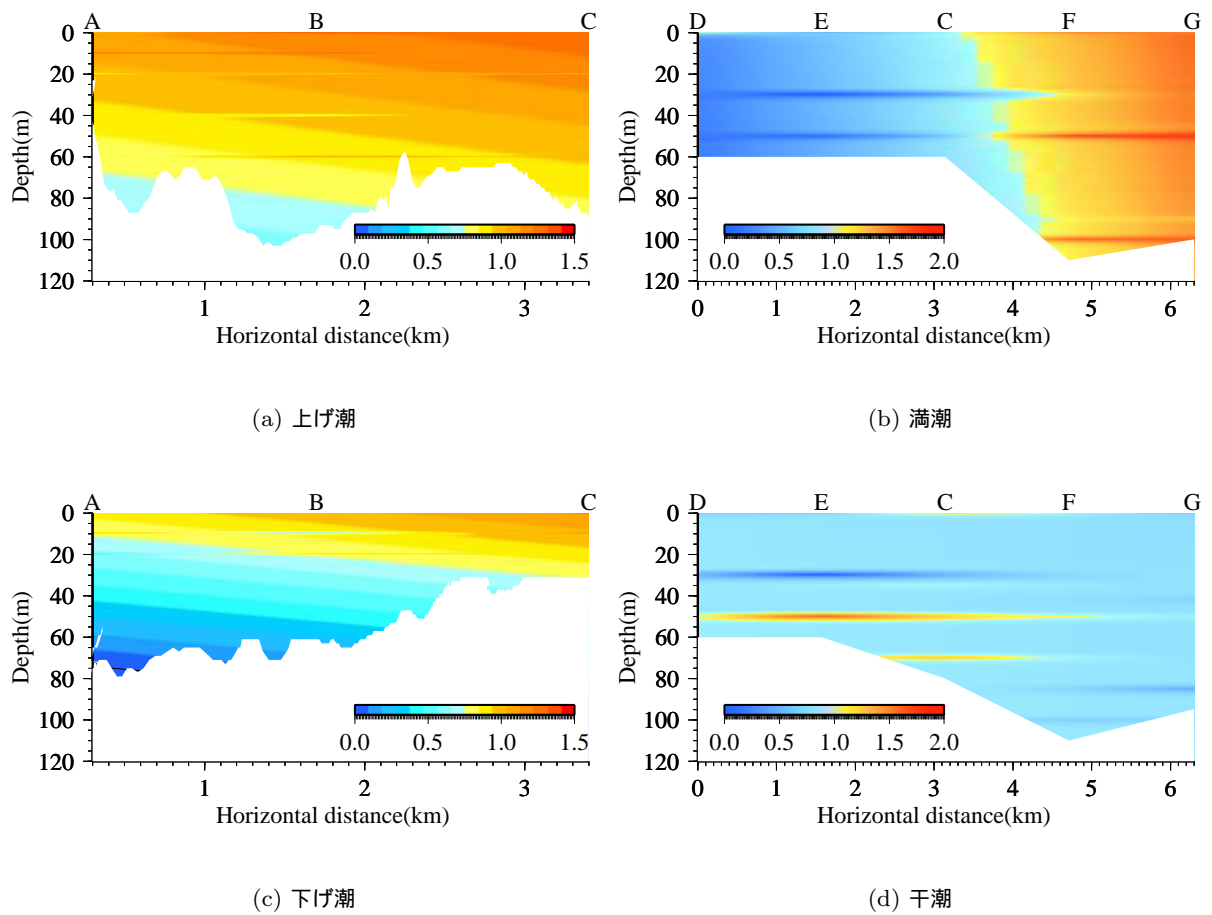


Fig.2.13 亜硝酸態窒素 $\text{NO}_2\text{-N}$ のイソプレット ($\mu\text{mol/l}$)

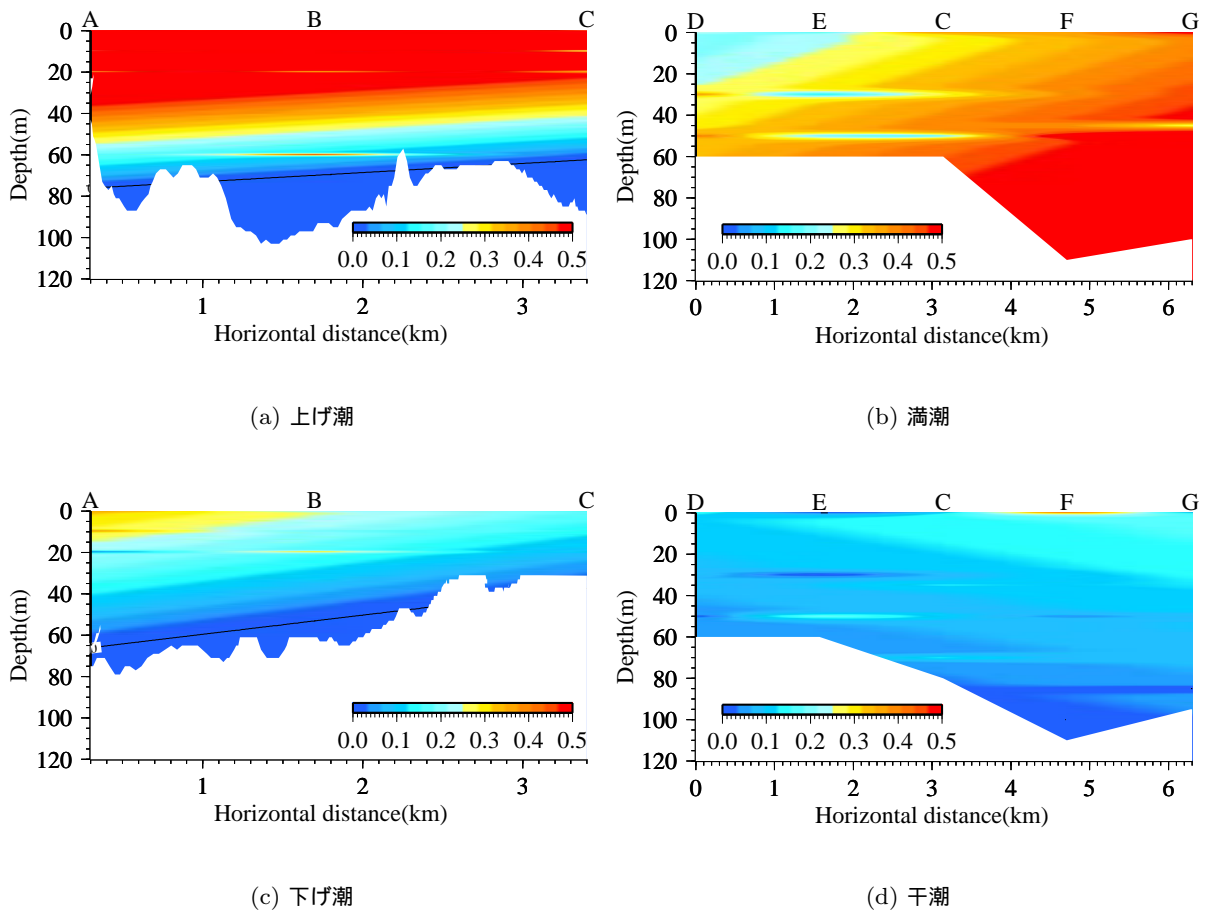


Fig.2.14 アンモニア態窒素 $\text{NH}_4\text{-N}$ のイソプレット ($\mu\text{mol/l}$)

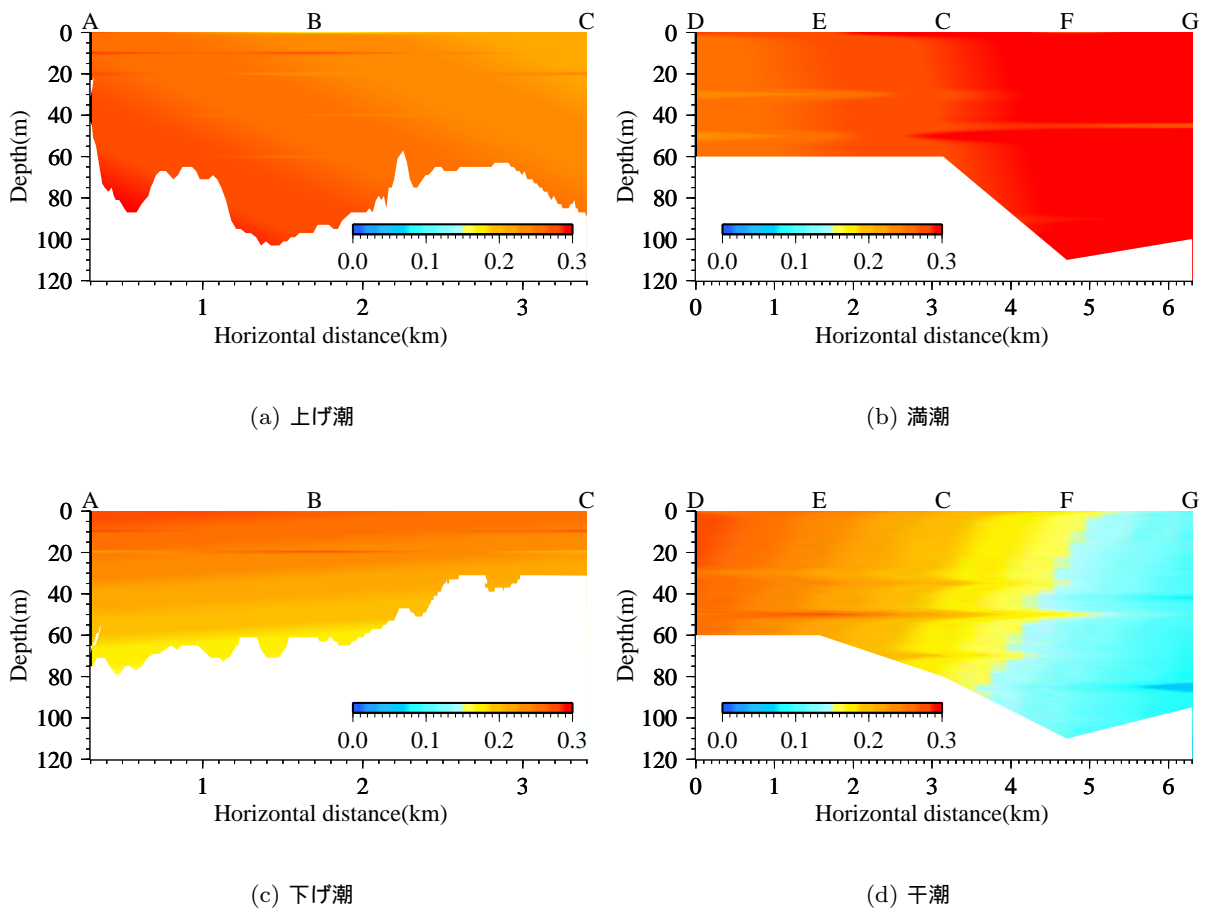


Fig.2.15 リン酸態リン $PO_4\text{-P}$ のイソプレット ($\mu\text{mol/l}$)

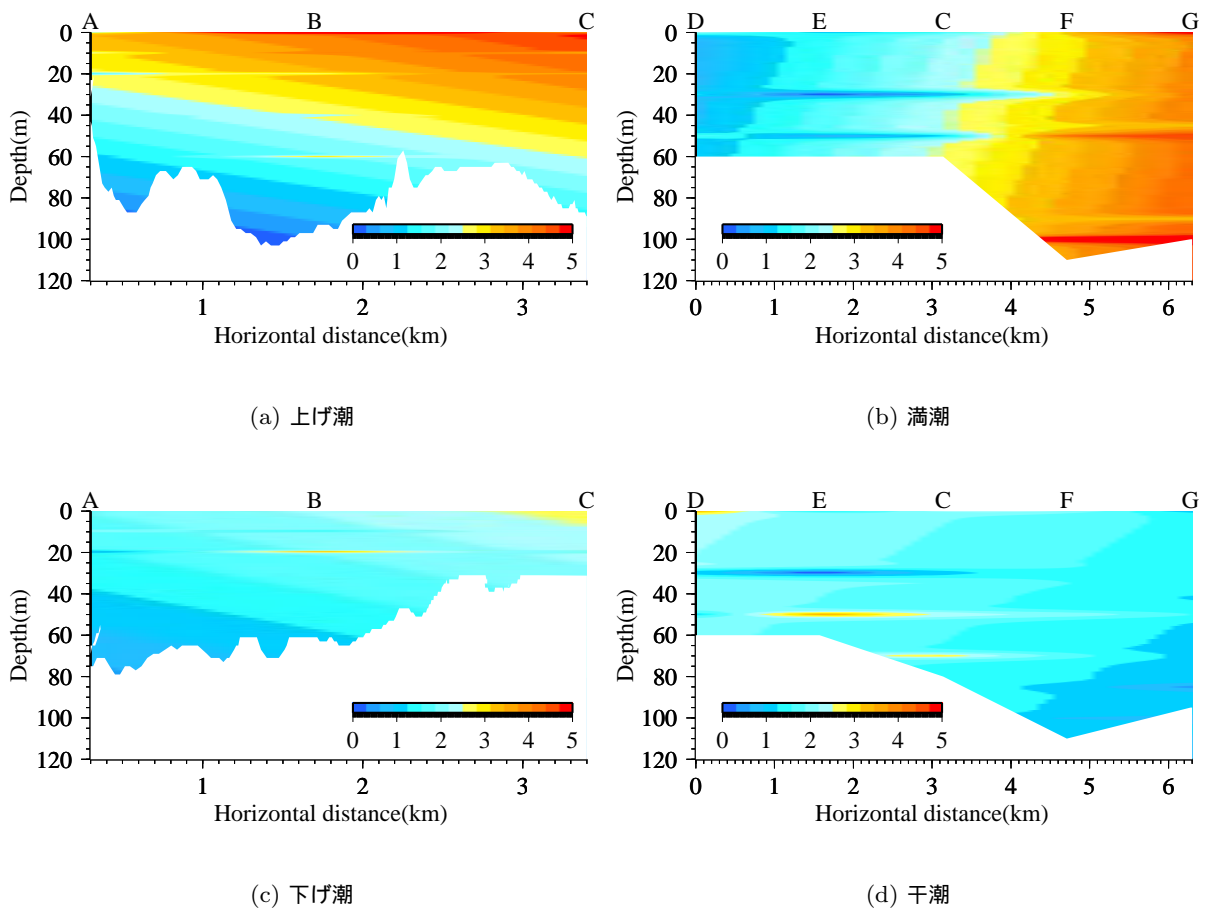


Fig.2.16 無機態窒素 DIN のイソプレット ($\mu\text{mol/l}$)

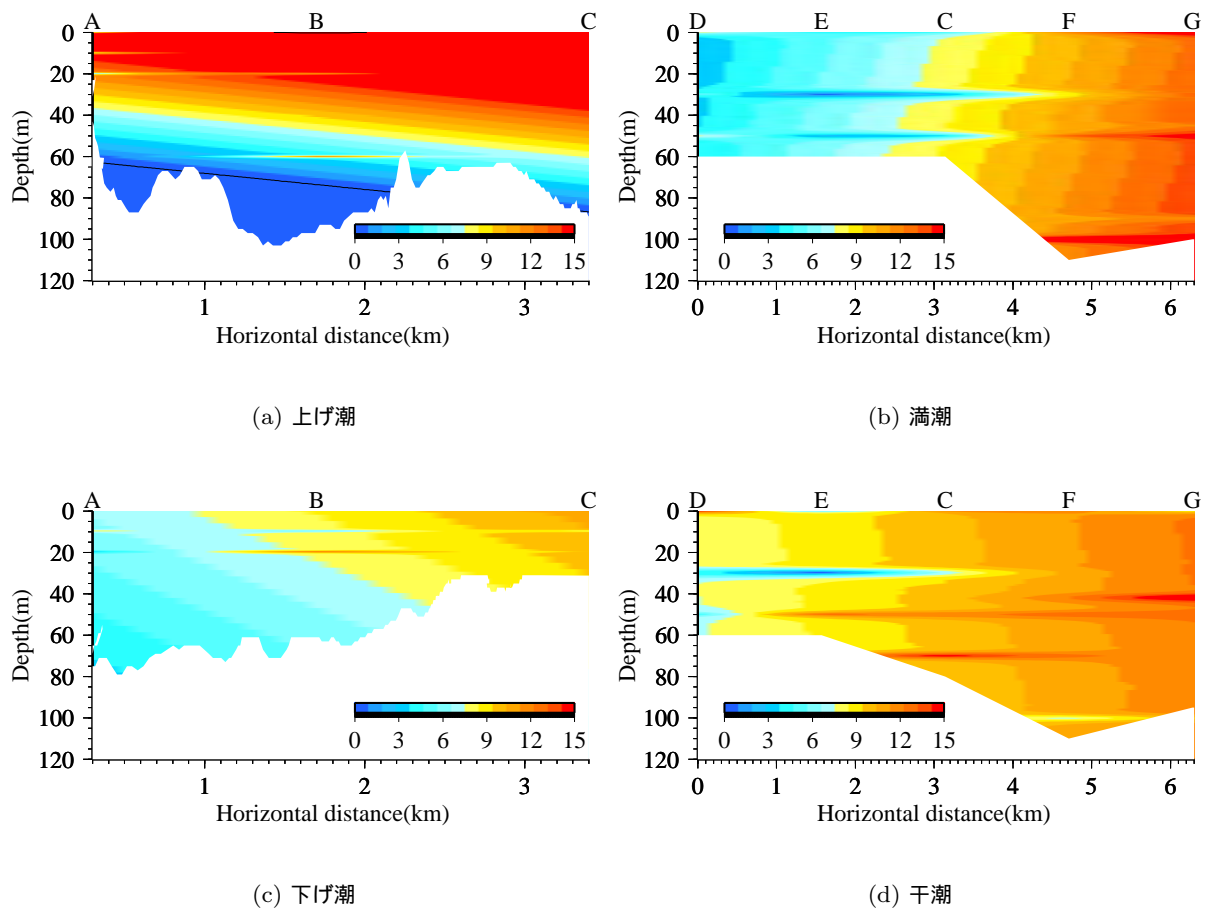


Fig.2.17 N/P のイソプレット

第 3 章

数値シミュレーションによる解析

3.1 解析方法

数値シミュレーションには POM (Princeton Ocean Model) を用いた。POM はプリンストン大学で開発された準 3 次元海洋モデルであり、特徴として鉛直座標に σ 座標を使用し、乱流モデルの鉛直方向は Mellor and Yamada モデル、水平方向は Smagorinsky モデルを採用していることが挙げられる。また、3 次元計算 (内部モード) と平面 2 次元計算 (外部モード) を異なる時間間隔で計算することで高速化が図られている。WEB 上でソースコードを公開しているため多くの適用事例があり、有明海を対象とした数値シミュレーションも既に Manda and Matsuoka (2006) や西田ら (2006) が行っており、干潟モデルなどを組み込むことで良好に流動場を再現できることが示されている。

主な計算条件を Table 3.1 に示す。計算領域は Fig. 3.1 に示した領域であり、水平計算格子サイズは一辺 10 秒 (東西方向: 約 250m, 南北方向: 約 310m), 格子数は東西方向を 438, 南北方向を 468, 鉛直方向を 10 とした。

干潟の干出・冠水計算は、内山 (2004) のモデルを護岸位置より内陸側が冠水しないように改良

Table.3.1 主な計算条件

計算時間ステップ	外部モード: 1 秒 内部モード: 5 秒
格子数	438 × 468 × 10
水平格子サイズ	10 秒 (東西方向: 約 250m, 南北方向: 約 310m)
干潟の干出水深	0.20m
南側の開境界条件	振幅 0.75m の M ₂ 潮
北, 西側の開境界条件	放射条件
塩分	全格子一様に 35
水温	全格子一様に 20

したものを組み込んだ．内山の干潟モデルでは，ある計算格子 (i, j) における水深 $D_{i,j}$ と設定された干出水深 d_{cr} の関係が，

$$D_{i,j} \leq d_{cr} \quad (3.1)$$

を満たさなければ「冠水」とし，満たす場合には以下のように判定を行う．以下に示す隣接する格子に関する3つの判定条件

$$a) \min[\eta_{i-1,j}, \eta_{i+1,j}, \eta_{i,j-1}, \eta_{i,j+1}] \leq \eta_{i,j} \quad (3.2)$$

$$b) \min[D_{i-1,j}, D_{i+1,j}, D_{i,j-1}, D_{i,j+1}] \leq d_{cr} \quad (3.3)$$

$$c) \max[LMF_{i-1,j}, LMF_{i+1,j}, LMF_{i,j-1}, LMF_{i,j+1}] = 0 \quad (3.4)$$

を一つでも満たせば「干出」と判定し，その格子を計算領域から除外し，一つも満たさなければ「冠水」と判定し計算領域に残す，というプロセスで干出・冠水判定を行う．ここで， η は水位， LMF は，0 ならば干出，1 ならば冠水を示す関数である．有明海では沿岸に沿って堤防が建設されておりその内側が冠水することはないと考えられるが，このモデルでは潮位が高くなれば冠水してしまう可能性がある．そこで，本研究では堤防の内側は常に計算領域から除外するように改良を行った．水深は，海図中の水深を9つの潮位基準面により平均水深に変換して用いた．用いた潮位基準面の位置を Fig. 3.2，それぞれの観測基準面上の平均水深を Table 3.2 に示す．干潟域の水深は，護岸前面の平均水深を 0m と考え，海図上の 0m 地点から護岸までの間を直線補間することによって与えた．解析地形として Fig. 3.1 に示した，1980 年代および 2000 年代の2つの年代のものを作成した．これらの海岸線は国土地理院が配布している旧版地図を用いて作成した．ここで，1980 年代

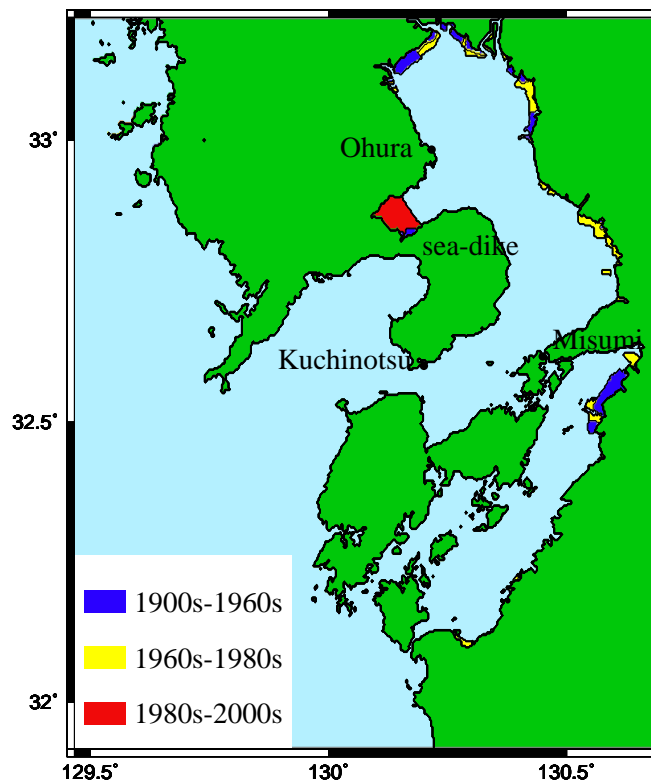


Fig.3.1 各年代間の干拓領域および数値シミュレーションの解析領域

は2000年代(現在)から諫早湾干拓事業による海岸線の変化のみを除いたものである。また,1900年代,1960年代の水深は現在のものを用いており,過去の水深データのない干拓地に関しては干潟であったと考え,前述の方法により水深を設定している。

解析は有明海・八代海で最も卓越する M_2 潮を対象とし,全てのケースで南側開境界 (Fig. 3.1 の下端) に振幅 0.75m の M_2 潮を与えて計算を行った。なお,西側および北側開境界 (Fig. 3.1 の左端, 上端) には以下の式で示す放射境界 (Orlanski, 1976) を用いた。具体的には ϕ を対象とする物理量 (水位や流速) とすると,境界での値は,

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + C \frac{\partial \phi}{\partial x} = 0 \tag{3.5}$$

を用いて計算される。ここで, C は長波の波速である。また,本章では海岸線の変化による潮汐の変化を検討対象としたため,全格子に塩分 35, 水温 20 を一様に与え,河川流入は考慮していない。

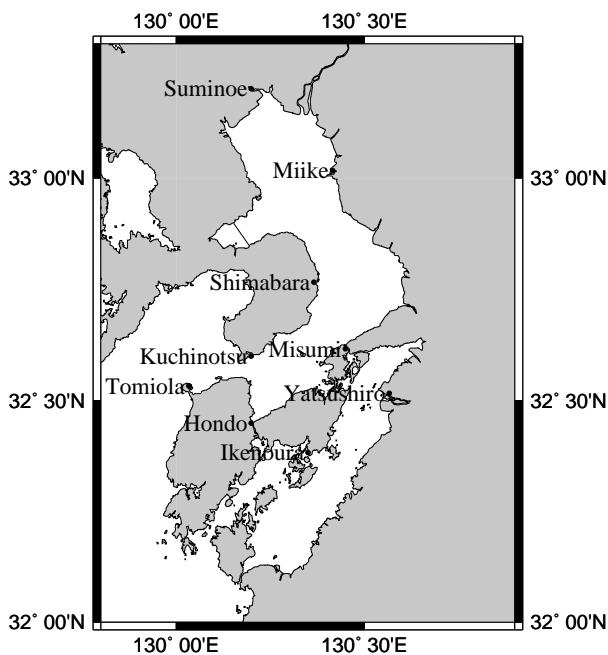


Fig.3.2 潮位基準面の位置

Table.3.2 各観測基準面から平均海面までの高さ (m)

富岡	1.86
口之津	1.94
島原	2.37
住之江	2.96
三池	2.80
三角	2.21
本渡	2.05
八代	2.15
池ノ浦	1.95

3.2 解析結果

Fig. 3.3 に各年代の M_2 潮潮流楕円の長軸長の分布を示す．有明海・八代海ともに湾口付近がもっとも流速の早い領域だと分かる．また，柳の瀬戸など有明海・八代海の境界付近には大きな流速は見られず，両海域の海水のやり取りはそれほど激しいものではないと考えられる．年代が進むにつれて湾奥部の流速が減少していることが分かる．早崎瀬戸周辺でも減少傾向である．

差を良く見ると，有明海湾奥の干拓の影響が湾口の早崎瀬戸で大きく影響が現れ，潮流が減少している．八代海の方は全体的に現象傾向にあり，湾奥くらいにしか局所的な影響は見られない．有明海・八代海の外ではほとんど一様に減少傾向にあるが，橘湾の東側で流速が増加している．あまり影響が見られなかった海域だが，最も潮流の大きい早崎瀬戸に近いということと地形的な理由から潮流が増加したと考えられる．

Fig. 3.4 に各年代の M_2 潮潮流楕円の分布を示す．まず，各年代ともに潮流楕円の向きが東西方向から時計回りに回転しており2章の現地観測結果をよく表していると言える．よって，本モデルにより早崎瀬戸周辺の潮流の変化を検討することの妥当性が示された．元々潮流が大変強いため，違いが見難いが流速は減少している．流向はほとんど変化は見られない．

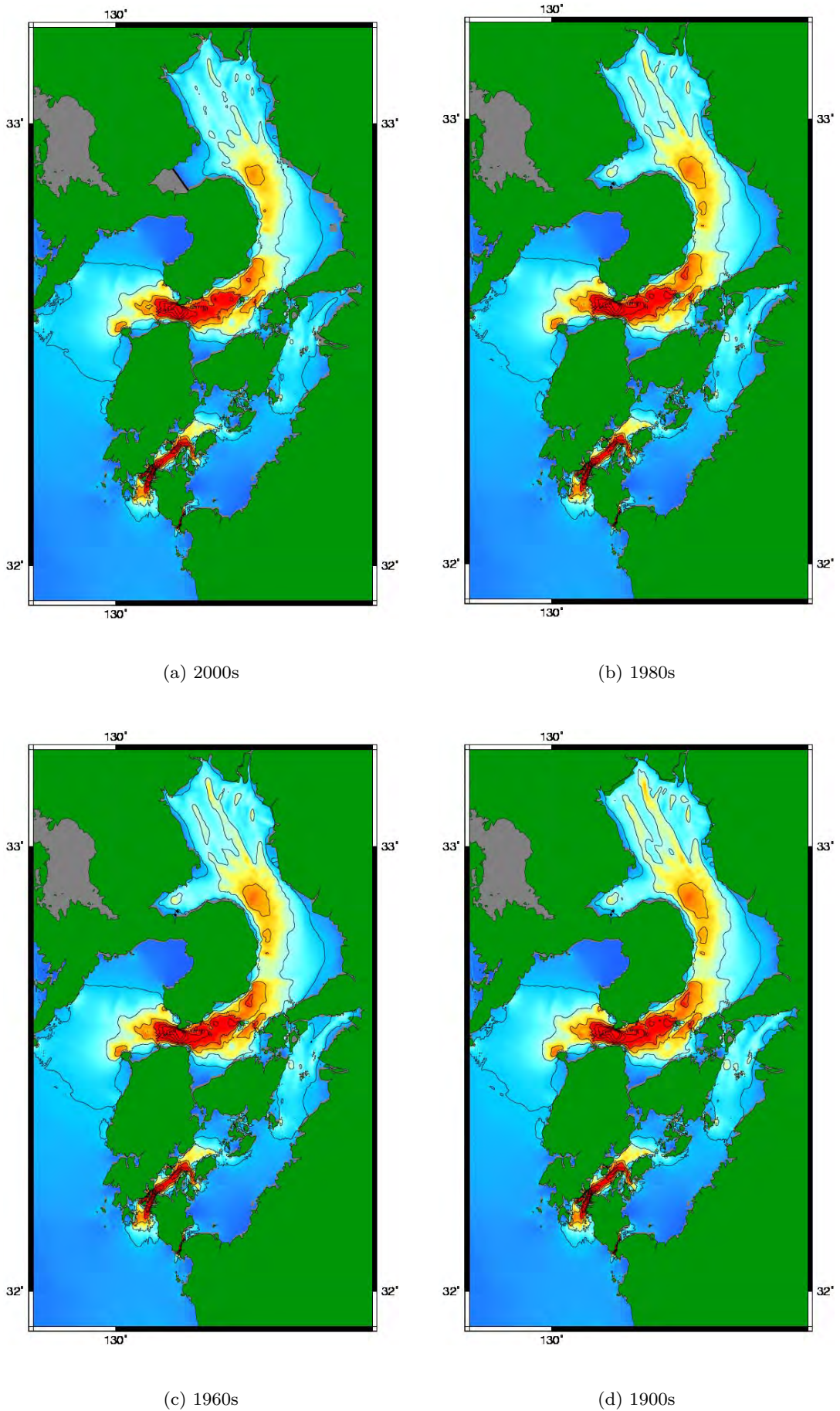


Fig.3.3 M_2 分潮の潮流楕円長軸長の分布

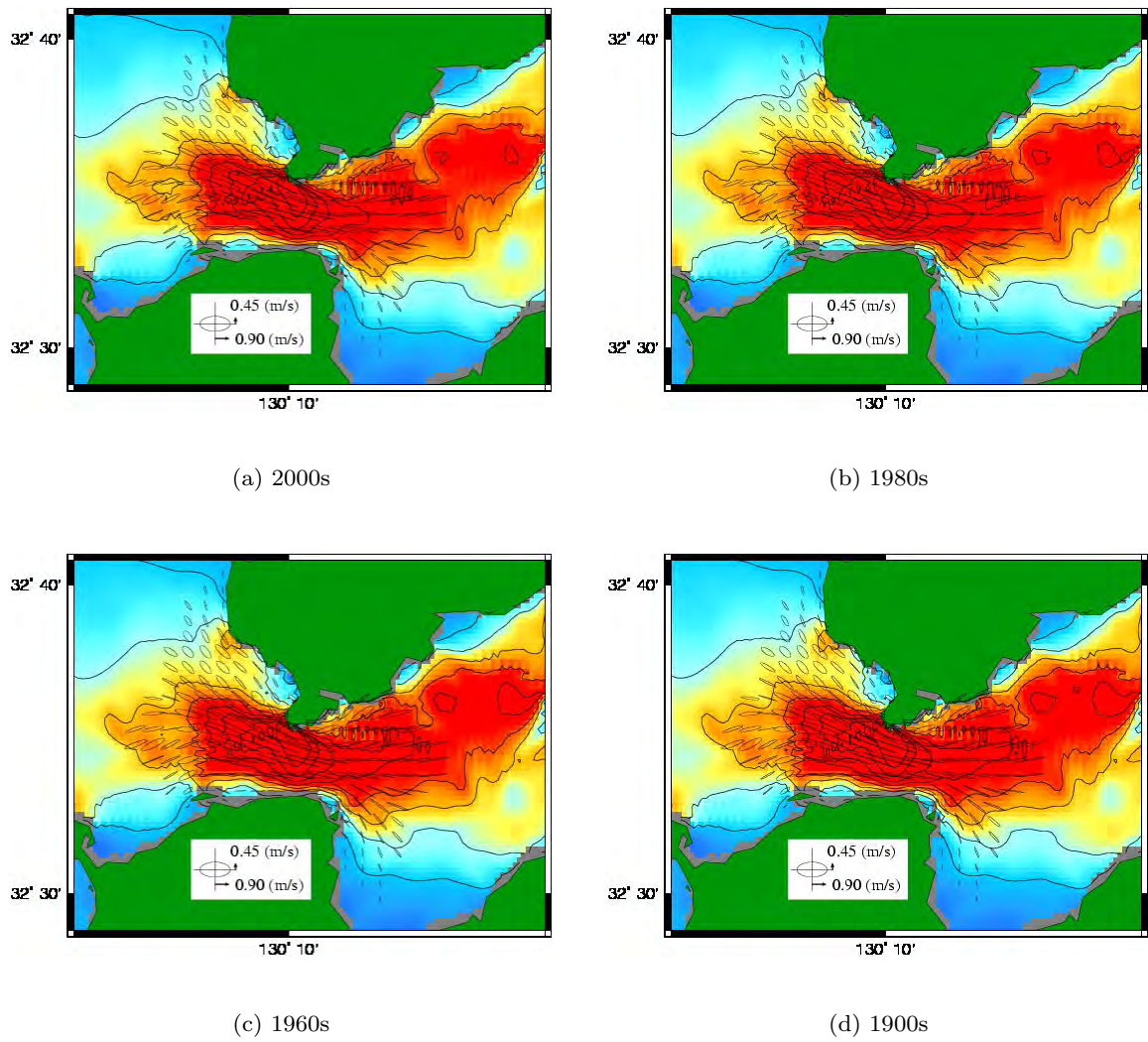


Fig.3.4 M_2 分潮の潮流楕円の分布

第 4 章

考察とまとめ

以下に本研究の考察とまとめを行う。

- ・早崎瀬戸において混合期に一潮汐間の現地観測を実施し，流動構造を明らかにした。
- ・栄養塩の分布は潮時によって大きく異なっていることが分かった。
- ・DIN は下げ潮時よりも上げ潮時のほうが値が大きく，外海から有明海内へ栄養塩が供給されていることが示された。どこまで，到達するのは不明であるが，島原半島沿いの強い潮流により湾奥まで運ばれている可能性は十分にある。
- ・観測データによる流動特性を再現したシミュレーションにより，湾奥の干拓による早崎瀬戸の流速の変化を把握できた。

早崎瀬戸は，その強い潮流のために非線形作用が強く有明海内の潮汐増幅率に大きな影響を与える。また，DIN の結果で示されたように，外海からの栄養塩の供給が行われていることなどが示された。

また，数値モデルにより湾奥の干拓の影響による流動特性の変化を解析する。

参考文献

- 宇野木早苗 (1993) : 沿岸の海洋物理学, 東海大学出版会, 673p .
- 宇野木早苗 (2003): 有明海の潮汐減少の原因に関する観測データの再解析結果, 海の研究, 第 12 巻, 第 3 号, pp.307-313 .
- 小田巻実・大庭幸弘・柴田宣昭 (2003):有明海の潮流新旧比較観測結果について, 海洋情報部研究報告, 第 39 号,pp.33-61 .
- 九州農政局 (1969) : 有明干拓史, pp9-10.
- 田井明, Mukhsan Putra Hatta, 矢野真一郎, 齋田倫範, 小松利光 (2006) : 諫早湾湾奥の締切りが有明海の潮汐・潮流に与えた影響, 海岸工学論文集, 53, pp.331-335.
- 田井明・矢野真一郎 (2008) : 外海を基準とした有明海の M_2 潮増幅率の変動特性と諫早湾潮受け堤防建設による影響, 海の研究, 第 17 巻, 第 3 号, pp.205-211 .
- 千葉賢・武本行正 (1998) : 伊勢湾数値シミュレータの研究・第一報 - 2次元モデルの開発 -, 四日市大学環境情報論集, 第 2 巻, 第 1 号, pp.7-32 .
- 千葉賢・武本行正 (1999) : 伊勢湾数値シミュレータの研究・第二報 - GUI 環境を利用した 2次元構造格子生成プログラムの開発 -, 四日市大学環境情報論集, 第 2 巻, 第 2 号, pp.103-126.
- 千葉賢・武本行正 (2002) : 諫早湾潮受け堤防の影響評価のための潮位観測値の分析と流況数値解析, 四日市大学環境情報論集, 第 5 巻, 第 1・2 号合併号, pp.39-70 .
- 千葉賢・武本行正 (2003a) : 2次元数値モデルによる有明海奥部の潮汐流の流動特性の検討 - 諫早湾潮受け堤防の影響評価 -, 四日市大学環境情報論集, 第 6 巻, 第 3 号, pp.181-205 .
- 千葉賢・武本行正 (2003b) : 諫早湾潮受け堤防設置に伴う有明海の流況変化に関する研究, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp.376-380 .
- 塚本秀史・柳哲雄 (2002):有明海の潮汐・潮流, 空と海, 第 78 巻, 第 1 号, pp.31-38 .
- 中野猿人 (1940) : 潮汐学, 古今書院, 528p.
- 西ノ首英之・小松利光・矢野真一郎・齋田倫範 (2004):諫早湾干拓事業が有明海の流動構造へ及ぼす影響の評価, 海岸工学論文集, 第 51 巻,pp.336-340.

濱田孝治・経塚雄策 (2007) :有明海湾奥における循環流とその変動について, 海の研究, 第16巻, 第3号, pp. 203-221.

速水祐一・濱田孝治 (2006) : 今夏の有明海奥部の大規模貧酸素化について, 佐賀大学有明海総合研究プロジェクト NEWS LETTER, 2006 December No.3.

Kawahara, T and K. Kuwahara (1984): Computation of High Reynolds Number Flow Around a Circular Cylinder with Surface Roughness, AIAA paper-84-0340.

A. MANDA AND K. MATSUOKA. (2006) :Changes in Tidal Currents in the Ariake Sound Due to Reclamation, Estuaries and Coasts, 29(4), pp.645-652.

目次

2.1	9月19日(口之津)	4
2.2	観測場所	5
2.3	採水位置(上げ潮, 下げ潮)	6
2.4	採水位置(満潮, 干潮)	6
2.5	水深平均流速の平面分布(上げ潮)	8
2.6	水深平均流速の平面分布(下げ潮)	8
2.7	断面直交流速の分布(上げ潮)	9
2.8	断面直交流速の分布(下げ潮)	9
2.9	水温の鉛直分布	11
2.10	塩分の鉛直分布	12
2.11	σ_T の鉛直分布	13
2.12	硝酸態窒素 $\text{NO}_3\text{-N}$ のイソプレット ($\mu\text{mol/l}$)	15
2.13	亜硝酸態窒素 $\text{NO}_2\text{-N}$ のイソプレット ($\mu\text{mol/l}$)	16
2.14	アンモニア態窒素 $\text{NH}_4\text{-N}$ のイソプレット ($\mu\text{mol/l}$)	17
2.15	リン酸態リン $\text{PO}_4\text{-P}$ のイソプレット ($\mu\text{mol/l}$)	18
2.16	無機態窒素 DIN のイソプレット ($\mu\text{mol/l}$)	19
2.17	N/P のイソプレット	20
3.1	各年代間の干拓領域および数値シミュレーションの解析領域	22
3.2	潮位基準面の位置	23
3.3	M_2 分潮の潮流楕円長軸長の分布	25
3.4	M_2 分潮の潮流楕円の分布	26

表目次

2.1	観測スケジュール	4
2.2	観測地点の緯度経度	5
3.1	主な計算条件	21
3.2	各観測基準面から平均海面までの高さ (m)	23