

東京湾の海水交換と貧酸素化に及ぼす  
淡水流入と風の影響について

鈴木 高二郎



# 要 旨

東京湾に流入する栄養塩などの物質の多くは東京湾口を通した外海との海水交換によって東京湾から流出する。また東京湾は本州南岸を流れる黒潮の影響を受け、海水交換によって大きな熱交換が発生して湾内の水温が変化している。したがって東京湾内の水質の現状を把握し将来を予測するためには東京湾口での海水交換と物質収支の特徴を明らかにする必要がある。しかしながら、東京湾口での海水交換や物質収支に関しては未だに不明な点が多く、特に淡水流入や風がどのように東京湾の海水交換や栄養塩の収支に影響を与えているのかはこれまで明確でなかった。明確にできなかったのは、湾内の面的な流れを計測するのが困難だったからであり、たとえ計測できたにしても観測される流れは風による吹送流と淡水流入による密度流の重合したものであり、短期的な観測だけではそれらを分離できなかったためである。

一方、東京湾には大量の栄養塩が都市域から流入し、過度な富栄養化状態にあり、海底では春から秋にかけて底層に大規模な貧酸素水塊が発生し、生物の生息を困難にしている。貧酸素水塊の発達には底泥での酸素消費や赤潮後の酸素消費が寄与していることが明らかになってきているが、貧酸素水塊の発達に及ぼす風や淡水流入といった物理的な因子の影響については未だに不明な点が多い。たとえば、淡水流入は重力循環による海水交換を促進するが、一方で湾表層に低塩分水塊を広げて密度成層を強化して貧酸素化を強めているとも考えられる。また、夏季の東京湾に特徴的な南風は表層の酸素濃度の高い水塊を湾奥底層に送り込んで貧酸素化を軽減させるが、一方で表層流入・下層流出という重力循環と逆の流れを起こして海水交換を低下させている可能性がある。

そこで本研究では、このような湾口での海水交換と湾内の貧酸素水塊の発達に及ぼす淡水流入と風の影響を明らかにすることを目的とした。

本論文の主要な結論は以下のとおりである。

- 1) 東京湾口のフェリーに観測装置(ADCP と水質測定装置)を設置して 2003 年より長期連続観測を実施した。これにより、これまで海上交通が過密で海洋観測が困難だった東京湾口断面の流れと表層水質を観測することが可能となった。このような長期連続的な閉鎖性内湾湾口の断面流況観測は世界的にも例が無かった。なお、本論文ではフェリー観測に加えて、HF レーダーと千葉灯標の観測データをあわせて解析を実施した。
- 2) フェリーによって観測された東京湾口の年平均残差流は、表層流出、中層流入、下層流出という 3 層構造であり、この流速分布は毎年ほとんど変化がなかった。しかし、月平均残差流

は変動が大きく、また季節的な傾向が見られた。なお、東京湾の海水交換日数は約 1 ヶ月であることから、本論文では主に月平均の海水交換量の特徴を調べた。月平均海水交換量は春と秋が最も大きく、最大は 10 月の  $12,000(\text{m}^3/\text{s})$  だった。逆に冬 1~3 月と夏 6~8 月の海水交換量が小さく、最小値は 1 月の  $6,200(\text{m}^3/\text{s})$  だった。これを海水交換日数にすると最も早い 10 月は約 18 日、最も遅い 1 月が 38 日だった。これまで淡水流入の多い夏に海水交換が大きいと言われていた現象(宇野木, 1998)と異なっていた。

- 3) 海水交換と淡水流入量、風を比較したところ、月平均淡水流入  $100\text{m}^3/\text{s}$  によって  $480\text{m}^3/\text{s}$  の海水交換が発生し、月平均の湾軸風速  $1\text{m/s}$  によって海水交換が  $900\text{m}^3/\text{s}$  変動することが分かった。年平均淡水流入量  $424\text{m}^3/\text{s}$  に対して海水交換量は  $2035\text{m}^3/\text{s}$  発生する。一方、冬季(10~3 月)の平均風速は北東風で  $2.5\text{m/s}$  であり、海水交換量は  $2250\text{m}^3/\text{s}$  増加、夏季平均(6~9 月)の平均風速は南西風で  $1.9\text{m/s}$  であり、海水交換量は  $1710\text{m}^3/\text{s}$  減少していることになる。夏季の海水交換が小さいのは、夏季に特徴的な南風によって重力循環と逆向きの吹送流循環が発達し、相殺しあうためであることが分かった。
- 4) HF レーダーによって観測された表層流速とフェリーによって観測された海水交換量には強い相関が見られた。表層流速に及ぼす夏季の南西風の影響は強く、月平均で  $2.5\text{m/s}$  以上になると重力循環(表層流出・下層流入)と逆向きになることが分かった。さらに、湾表層流速の月平均残差流を調べたところ、春から秋にかけて東京湾の湾奥に時計回り循環が発生していること、さらにこの循環流の中心は緯度  $35.56^\circ$  の線上に発生し、南西風が強いほど大きくなり、千葉側へ移動することが明らかとなった。
- 5) 流動モデルを用いて数値計算を実施し、塩分・水温および海水交換量の観測データを再現した。この再現計算を基本ケースとして淡水流入量や風、気温を変えて海水交換の応答を調べた。海水交換に対する影響度は北東風、淡水流入量、南西風、気温の順に大きく、風と淡水流入の影響はほぼ同程度であった。
- 6) 生態系モデルを用いて東京湾の溶存酸素やクロロフィル *a* などの水質を再現した。再現ケースを基本ケースとして夏季の貧酸素水塊に及ぼす淡水流入量と風の影響を調べた。その結果、夏季に淡水流入量が増加すると時計回り循環流の影響で淡水は湾奥の千葉側表層に広がり、湾奥の密度成層を発達させて底層 DO を低下させることが明らかになった。一方、夏季の南西風を強めると湾奥底層の DO は一時的に上昇するものの、海水交換が低下するなどして、最終的に密度成層の強化と底層 DO の低下に至ることが分かった。
- 7) 千葉灯標の観測結果を調べたところ、淡水流入の増加にともなって夏季 6~8 月の表層塩分、密度成層、底層 DO はそれぞれ低下、強化、悪化し、その傾向は平均風速が南よりの風の時により顕著であった。この傾向は本論文の計算結果を裏付けるものである。

近年の都市化によって淡水流入と南よりの風は増加傾向にあり、いずれも夏季の東京湾底層の環境を悪化させている可能性が高いことが明らかとなった。



# 目 次

1 章 序 論 .....	1
1.1 研究の背景と目的 .....	1
1.2 研究の概要 .....	2
2 章 東京湾の海水交換に関する既往の研究 .....	3
2.1 概 要 .....	3
2.2 東京湾での海水交換に関する研究手法の分類 .....	3
2.3 重力循環と吹送流循環 .....	6
2.4 外洋水の影響 .....	10
2.5 定期船舶による連続観測について .....	13
2.6 2 章のまとめ .....	14
3 章 東京湾の流況水質の連続観測 .....	16
3.1 概 要 .....	16
3.2 フェリーによる東京湾口の連続観測 .....	16
3.3 HFレーダーによる東京湾表層流速の連続観測 .....	51
3.4 湾奥(千葉灯標)での水質の連続観測 .....	57
3.5 東京湾への淡水流入と気象条件の特徴 .....	63
3.6 3 章のまとめ .....	67
4 章 海水交換と湾表層流速に及ぼす淡水流入と気象条件の影響 ...	69
4.1 概 要 .....	69
4.2 湾口の海水交換量と湾軸表層流速の関係 .....	69
4.3 海水交換と湾軸表層流速に及ぼす淡水流入の影響 .....	73
4.4 海水交換と湾軸表層流速に及ぼす風の影響 .....	75
4.5 重回帰分析 .....	80
4.6 湾奥の水質との関連について .....	83
4.7 4 章のまとめ .....	89
5 章 数値計算による流況と水質の再現と応答解析 .....	90
5.1 概 要 .....	90
5.2 計算プログラムと計算条件 .....	91

5.3 計算結果の検証 .....	101
5.4 海水交換の応答 .....	113
5.5 5章のまとめ .....	123
6章 夏季の貧酸素水塊と栄養塩収支に及ぼす淡水流入と風の影響 ...	124
6.1 概 要 .....	124
6.2 東京湾の水質の再現 .....	125
6.3 淡水流入と風を変化させた場合の貧酸素水塊と栄養塩収支の応答 .....	139
6.4 考 察 .....	145
6.5 6章のまとめ .....	147
7章 結 論 .....	148
参考文献 .....	152
付 録 .....	157

# 1 章 序 論

## 1.1 研究の背景と目的

東京湾に流入する栄養塩などの物質の多くは東京湾口を通した外海との海水交換によって東京湾から流出する(松村ら, 2002). また東京湾は本州南岸を流れる黒潮の影響を受けやすく, 海水交換によって大きな熱交換が発生し東京湾の水温が変化している(安藤ら, 2003; 八木ら, 2000). したがって東京湾内の水質の現状を把握し将来を予測するためには東京湾口での海水交換と物質収支の特徴を明らかにする必要がある.

海水交換は重力循環や吹送流によって引き起こされている. これらの流れは淡水流入や風によって引き起こされているが, 淡水流入や風がそれぞれどの程度, 東京湾の海水交換や栄養塩の収支に結びついているのか, これまで明確ではなかった.

これまで東京湾の海水交換量および海水交換日数については, 宇野木(1998) が 1961~1970 年までの湾内で計測された塩分水温のデータからボックスモデルにより海水交換を調べ, 東京湾内の淡水の滞留時間が夏季に小さく 0.8 カ月, 冬季が 2.65 カ月であることを示した. その後, 岡田ら(2007)は 2002 年~2003 年に実施された観測結果から淡水の滞留時間が夏季 19 日, 冬季 43 日と 1970 年代よりも短くなっていることを明らかにした. その原因として近年の都市化に伴う淡水流入量の増加と浅海域の埋め立てによる海域面積の減少をあげている. このように海水交換に及ぼす淡水流入の影響については少しずつ明らかになってきている.

一方で風の影響については青潮の発生など短期的な現象については数多くの研究があるものの, より長期的(季節的)な海水交換という観点からすると風の影響は明確ではなかった. 一般に風は湾軸方向に向きが頻繁に変わるため, 月平均のような(海水交換時間程度の)長期的な観点で見ると, 湾奥と湾口へ向かう吹送流はそれぞれ相殺され, 吹送流の海水交換は小さくなっているように思われがちである. しかしながら東京湾では夏季に南より, 冬季に北よりの風が卓越するため, 準定常的な吹送流循環が発達している可能性が高い.

東京湾の流れに及ぼす淡水流入と風の影響を定量的に把握するのを困難にしている理由は, これまで湾内の面的な(断面・平面の)流れを計測するのが困難だったからであり, たとえ計測できたにしても観測される流れは風による吹送流と淡水流入による密度流の重合したものであり, 短期的な観測だけではそれらを分離できなかったためである. そこで本研究では 2003 年から長期連続的に取得されてきた東京湾口のフェリーと HF レーダーによる観測データを用いて, 東京湾の季節的な海水交換の特徴と, 風と淡水流入それぞれの海水交換に及ぼす影響度合を明らかにすることを第一の目的とした.

次に本研究の第二の目的を, 夏季の貧酸素水塊と栄養塩収支に及ぼす淡水流入と風の影響を明らかにすることとした. 東京湾は過度な富栄養化状態にあり, 海底では春から秋にかけ

て底層に大規模な貧酸素水塊が発生し、生物の生息を困難にしている。また、この貧酸素水塊は北東風によって東京湾の湾奥に湧昇し、時には青潮となって湾奥沿岸の生物を死滅させている。このような貧酸素水塊の発達には、底泥での酸素消費や赤潮後の酸素消費が寄与していることが定量的にも明らかになってきている(鯉渕ら, 2001)が、東京湾の貧酸素水塊の発達に及ぼす風や淡水流入といった物理的な因子の影響については不明な点が多い。

たとえば前述した近年の都市化にともなう淡水流入の増加と海水交換の増加について考えてみると、海水交換の増加は一見、富栄養化した湾内の海水を流出させて湾内の水質を良くしているものと考えられる。しかし逆に淡水流入の増加は湾内表層に淡水を広げて密度成層を強化し、結果、貧酸素化を強めているとも考えられる。

また、夏季に特徴的な南風は湾奥で表層と底層の海水を混合させ、貧酸素水塊を縮小させている(Nakayama et al., 2010)ものとも考えられる。しかし一方で、東京湾における南風は淡水流入による重力循環とは逆向きの流れを引き起こすため、海水交換を低下させて栄養塩を滞留させやすくし、長期的に見ると貧酸素水塊の発達に悪影響を与えていることも考えられる。

このように未解明な点の多い淡水流入と風の東京湾の貧酸素化に及ぼす影響を明らかにすることを本論文の第二の目的とした。

## 1.2 研究の概要

本論文は本章を含めて7つの章から構成されている。各章の内容を以下に示す。

第2章では、東京湾の海水交換に関する既往の研究についてレビューを行い、これまでに明らかとなっている海水交換や流れの特徴をとりまとめる。

第3章では、東京湾の海水交換を明らかにするために2003年から長期連続的に実施した東京湾口のフェリーによる流れと水質の観測とこの観測によって得られた海水交換の季節的な特徴について述べる。あわせて関東地方整備局によるHFレーダーによる湾表層の流況観測データと海上保安庁海洋情報部による千葉灯標の水質観測データについて調べる。

第4章では、フェリーとHFレーダーで計測された観測データと淡水流入量、各種気象条件との比較および重回帰分析を行い、淡水流入と風の海水交換と表層流速へ及ぼす影響について調べる。

第5章では、数値計算モデルを用いて東京湾の流れと水質の再現計算を実施した後、淡水流入量や風向風速を変化させて、海水交換の応答解析を実施する。

第6章では、生態系モデルを用いて夏季の貧酸素水塊と栄養塩収支に及ぼす淡水流入と風の影響を調べる。

## 2 章 東京湾の海水交換に関する既往の研究

### 2.1 概 要

海水交換は東京湾の水質に対して大きな影響をもたらすと考えられ、これまでも数多くの海水交換の研究が行われてきた。海水交換量や海水交換日数を推定するため、東京湾口での直接測流や大型の水理模型実験、ボックスモデル解析、あるいは3次元数値シミュレーションが実施されてきた。

そこで2.2節では東京湾での海水交換に関する既往の研究を手法別に分類する。

次に2.3節と2.4節では東京湾の海水交換をもたらす図-2.1に示されるようないくつかの現象について述べる。潮汐残差流(2.3.1)は日々の潮汐によって発生するものであるのに対し、エスチュアリー循環(2.3.2)と吹送流による循環(2.3.3)は河川からの淡水流入や季節風に起因するものでより長い時間スケールで発生するものである。また、黒潮系暖水の流入(2.4.1)や沿岸湧昇による海水の交換(2.4.2)は時間スケールが小さく間欠的ではあるものの、東京湾外より大きな流れの影響を受けて発生するものである。

2.5節では本研究の特徴である定期船舶を用いた既往の海洋観測について述べる。

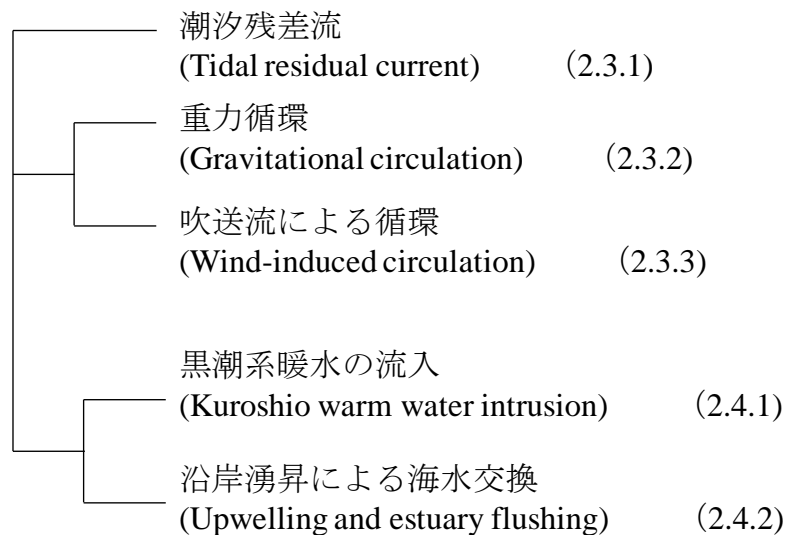


図-2.1 海水交換をもたらす現象

### 2.2 東京湾での海水交換に関する研究手法の分類

図-2.2 は東京湾の海水交換量や海水交換日数を推定するために実施されてきた研究を方法別に分類したものである。海水交換はこれまで、東京湾口での流れや水質の直接測定や大

型の実験場で行う水理模型実験，東京湾内の塩分の観測データから海水交換量を求めるボックスモデル解析，あるいは3次元数値シミュレーションを用いて実施されてきた。



図-2.2 東京湾での海水交換に関する研究手法の分類

#### (1) 湾口の流速測定による海水交換の研究

松本ら(1974)は観音崎と富津岬間で、1974年2月1日～16日にかけて計15測点の断面連続観測を行っている。その結果、観音崎から中央部にかけての表層から東京湾の海水が流出し、底層および富津側から海水が流入するという恒流のパターンがあることを明らかにした。このように断面の流速を計測することで海水交換の特徴や海水交換量を調べることができるが、東京湾口は船舶の往来が多く危険であり、湾口断面の直接測流による海水交換の算定はその後あまり実施されてこなかった。

その後の直接測流による観測として、日向ら(1999)、日向ら(2000)の ADCP を搭載した観測船による観測や、ADP や ADCP による中ノ瀬と横須賀沖での日々野ら(2000)の観測、清水ら(2001)、Yanagi et al.(2003)の第2海堡での観測、横須賀沖での Yanagi and Hinata(2004)の観測例がある。次節で述べるようにこれらの観測で多くの現象が明らかとなっているものの、いずれも観測期間が短いか1地点の観測に限られており、長期(数年)にわたる海水交換の変動などは未解明なままだった。

#### (2) 水理模型実験による海水交換の研究

堀江ら(1977a)、堀江ら(1977b)は水理模型実験によって東京湾の海水交換を求めた。実験は運輸省港湾技術研究所の大型水工実験場で実施されたもので、東京湾の湾軸方向の距離は25m(1/2,000縮尺)、水深は最も深い湾口部で1m(1/100)として実験している。水平方向と鉛直方向の縮尺が違い、いわゆる歪模型である。東京湾は湾軸方向に50kmほどあるのに対し、湾央、湾奥の水深は数10mと浅いため、たとえ鉛直方向と水平方向の縮尺を歪ませても大規模な実験施設が必要だった。潮汐による海水交換率を求めるための4つの算定手法を試し、

松本ら(1974)の観測結果と実験結果を比較し、Parkerら(1972)の算定法が最も実験や観測と合しやすいことを示した。実験の結果、潮汐作用による海水交換効率は観音崎-富津岬間で大潮時に数%だった。

しかし、水理模型実験では風による吹送流や地球自転の効果、水温成層、重力循環を再現することが困難なため、これ以降、水理模型実験による海水交換の研究は見られない。

### (3) ボックスモデルによる海水交換の研究

ボックスモデルは観測船などによって計測された東京湾内の塩分水温のデータと淡水流入量と外海の塩分水温などとの関係式から、海水交換量を求めようとするものである。

宇野木・岸野(1977)、宇野木(1998)は 1947 年～1974 年までの湾内で計測された塩分水温のデータから東京湾の海水交換を調べ、海水交流の強さが季節的に著しく変動すること、東京湾内の淡水の滞留時間は夏季に小さく 0.8 カ月、冬季が 2.65 カ月であることを示した。

2002 年～2003 年に実施された最近の観測結果によると淡水の滞留時間は 1970 年代よりも小さくなり、夏季 19 日、冬季 43 日と短くなっており、岡田ら(2007)はこの原因として都市化に伴う淡水流入量の増加(流域外からの導水量の増加)および海域面積の減少(河口循環流の強化)をあげている。

ボックスモデルによる解析は、観測船によって湾内の塩分と水温を計測することで海水交流量や淡水の滞留時間を算定できるため優れているが、一般には月に 1 回程度のデータから各月の海水交換量を算定するため、日々の変動量の影響を受けやすく、1 年程度の観測では誤差が大きくなる。また、吹送流による海水交換を評価するのが困難だった。

### (4) 3 次元数値シミュレーションによる海水交換の算定

3 次元数値シミュレーションによって東京湾の流動計算が数多く行われており、小林ら(1995)、鯉渕ら(2001)、八木ら(2003)、中山ら(2007)のように海水交換に関する研究例も見られる。数値シミュレーションは水理模型実験やボックスモデルでは評価の難しかった風による吹送流を時々刻々再現できるという強みがある(田中(1993)、鈴木ら(1997)など)。ただし、数値シミュレーションでは適切に初期条件や境界条件を設定する必要がある。特に開境界での塩分水温の鉛直分布の設定が重要となるが、観測データが少なく適切な境界条件を設定できない場合が多い。湾口での海水交流量については検証データさえも少なかった。

### (5) 各種研究手法の比較

表-2.1 に各種研究手法を比較した。それぞれ長所と短所があり、長所短所を補いながら実施するのが望ましいが、これまでの実施状況では(1)の現地観測が少なく、3 次元数値シミュレーションを補強する意味でも観測(特に流速の連続観測)が望まれていた。

表-2.1 各種研究手法の比較

	潮汐	潮汐残差流	地球自転効果	重力循環	吹送流	実施の難易度	信頼度	実施例	その他
(1) 連続的な流速と塩分水温測定	◎	◎	◎	◎	◎	△	◎	少	海上交通が多く、計測が困難
(2) 水理模型実験	◎	◎	×	△	×	△	△	希少	
(3) ボックスモデル解析	×	○	○	◎	△	◎	◎	多	月に1回程度の観測データ 誤差大
(4) 3次元数値シミュレーション	◎	◎	◎	◎	◎	○	○	多	境界条件の設定が難しい。特に湾口。

## 2.3 重力循環と吹送流循環

### 2.3.1 潮汐残差流

東京湾口では日々、潮汐によって海水が出入りしている。湾奥から東京湾フェリーが往復している断面までの東京湾の面積は、 $1.06 \times 10^9 \text{m}^2$  であり、1.5m 程度の潮位差があるとする、1 潮汐あたり  $1.6 \times 10^9 \text{m}^3$  もの海水が湾口を通して出入りすることになる。そのため東京湾では湾口で 0.5m/s を越える(富津－観音崎間では約1m/s にもなる)速い流れが起きている。しかし、潮汐による海水の流動は往復流であるため水塊は数 km 往復するだけであり、50km にも及ぶ東京湾の海水交換には実質的に寄与しない。

潮汐による海水交換を求める方法としてタイダルプリズム法という考え方がある。この方法は潮汐によって外海水が湾内に流入し、1 潮汐毎に湾内の海水と混合すると仮定して海水交換を求めるという手法である。しかし、実際の潮汐による海水の流動は往復流であり、外海水が湾奥まで流入するという事は無い、タイダルプリズム法では海水交換が過大に見積もられるという問題がある(Dyer, 1997)。

潮汐によって海水交換が起きる現象は潮汐残差流と呼ばれるものである。潮汐残差流は地形の影響などで潮汐によって湾内に流入した海水の一部がそのまま残り、以前に湾内に溜まっていたものが出て行くことで、徐々に海水が交換されるというものである。東京湾では湾口の富津岬と観音崎周辺で潮汐によって渦ができ、潮汐残差流を引き起こしている。東京湾では2.2節(1)で述べた松本ら(1974)、堀江ら(1977)がParkerら(1972)のサンフランシスコ湾での解析法を用いて、観音崎-富津岬間の海水交換率が 8～10%であることを示した。しかし、この潮汐残差流も地形の影響を受けた局所的なものであるため(東京湾では主に湾口に限られるため)、湾奥と湾外の水を入れ替えるのは湾軸方向全体に同じ方向に水塊を移動させる重力循環と吹送流循環である。

### 2.3.2 淡水流入による流れと重力循環

荒川、多摩川、江戸川といった河川からの淡水流入は図-2.3 に示すような上層流出、下層流入という海水の循環をもたらす。一般に重力循環(Gravitational circulation)と呼ばれるものである。淡水流入は、淡水の運動量によって下層の流体を引きずって引き起こすことによる効



果と淡水の持つ浮力が引き起こす効果を持っている。後者の効果は、**図-2.4**のようなロックイクスチェンジをイメージすると分かりやすい。淡水は塩水の上に、塩水は淡水の下に潜り込むように流れる。この際の流れは、位置エネルギーの運動エネルギーへの変換によって引き起こされている。

エスチュアリー重力循環に関する研究は古くから行われており、その理論的解析は Pritchard(1956), Hansen and Rattray (1965)によって行われている。Hansen and Rattray (1965)は断面 2 次元の運動方程式と連続式を、流れ関数法を用いて解析的に解き、ジェームズ川の流速分布を再現している。

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial \tau}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left( A_v \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (2.1)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} = g \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} (Bu) + \frac{\partial}{\partial x} (Bw) = 0 \quad (2.3)$$

ここで、 $p, u, w$  は圧力と  $x$  方向と  $z$  方向の流速、 $A_v$  は鉛直渦動粘性係数、 $\tau$  は渦動せん断応力、 $\rho$  は密度、 $g$  は重力加速度、 $B$  は水路(エスチュアリー)の幅である。

エスチュアリーは一般に淡水流入と潮汐の影響を受けている。Officer & Kester (1991)は Narragansett 湾の海水交換量(Flushing rate)が**図-2.5**のような鉛直軸に切片を持ち、淡水流入量とともに増加する曲線上に乗ることを示し、淡水流入量が小さい時には潮汐による海水交換が、淡水流入量が大きくなると淡水流入による重力循環が大きくなることを示した。水深が浅く、潮汐の振幅が大きいエスチュアリーでは潮汐の影響が大きく現れ、大潮と小潮で海水交換量に大きな差が出る(Shaha(2010))。

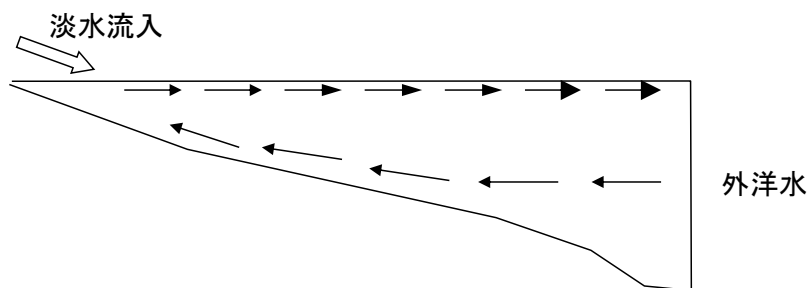


図-2.3 重力循環の模式図

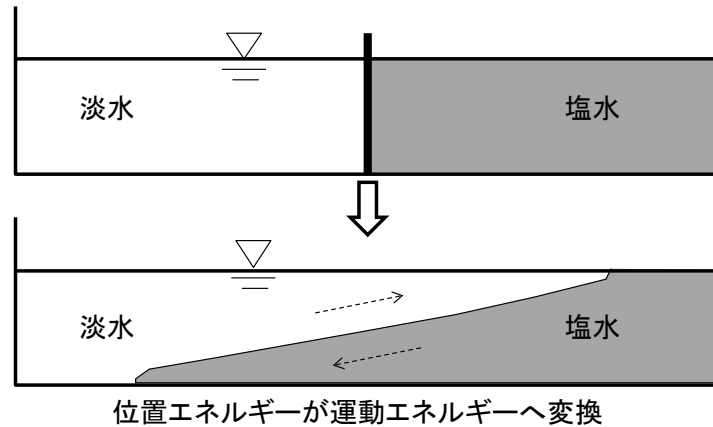


図-2.4 ロックイクスチェンジのイメージ図

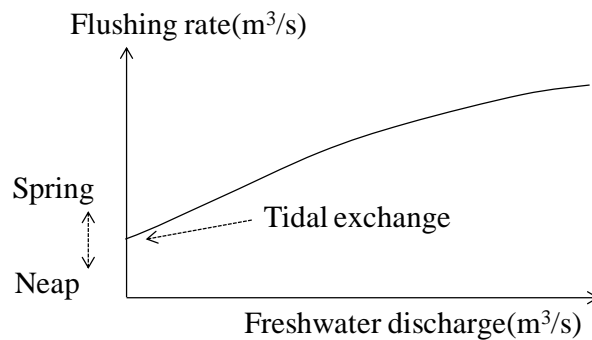


図-2.5 海水交換量(Flushing rate)と淡水流入および潮汐の関係

東京湾の海水交換については、前述した宇野木・岸野(1977)、宇野木(1998)、岡田ら(2007)の研究があり、これらでは主に海水交換が淡水流入による重力循環によって引き起こされるとして検討が行われている。宇野木(1998)は東京湾の鉛直循環について以下のように述べている。“鉛直循環流の流量は河川流量に対して、東京湾では冬は13倍、夏は6倍程度である。”、“湾に河川水が流入すると、重い海水が位置する湾口部と軽い海水が存在する湾奥部との間に密度の、したがって圧力の水平勾配ができて力学的に不安定になる。これを解消するため重い外海水は下層を通過して湾奥に、軽い湾奥水は上層を通過して湾口に向かう流れを生じる。このとき位置エネルギーが運動エネルギーに転換されるので、大きな流速が得られる。その際上下層の間に連行作用が働き、これらの過程が継続して行われるので、強い鉛直循環流が形成されるのである。”

### 2.3.3 吹送流循環(Wind driven circulation)による海水交換

風によっても図-2.6 のような風による海水の循環 (Wind driven circulation) (ここでは吹送流循環と呼ぶ) が発生する. 東京湾では北よりの風が吹くと前項の重力循環を強め, 逆に南よりの風が吹くと重力循環を弱める. 上述の Hansen and Rattray (1965)は重力循環による流

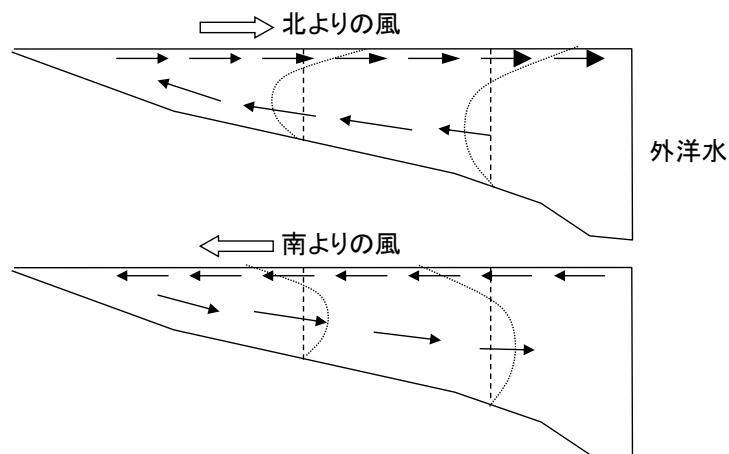


図-2.6 吹送流循環(風による循環)の模式図

れの解析解に吹送流循環の項も加えた解析解を示し, 断面 2 次元での風による流れの変化を示した. 地球自転効果を見捨てた場合, 表層で風向きと同じ方向に水が流れるが, それによって水位勾配が発生し, 下層では表層と反対向きの流れが発生する (Csanady, 1973).

Wong(1994)は下に凸な三角形型のエスチュアリーに関する重力循環と吹送流の流れの解析解を導いた. それによると図-2.7 のように重力循環は長方形型のエスチュアリーでは表層流出・下層流入の流れのパターンがエスチュアリーの横断面方向に一樣なのに対し, 三角形型の水深を持つエスチュアリーでは深い部分が流入, 浅い部分が流出という流れのパターンを持つことを示した. また, 吹送流も類似した流れのパターンとなることを示した.

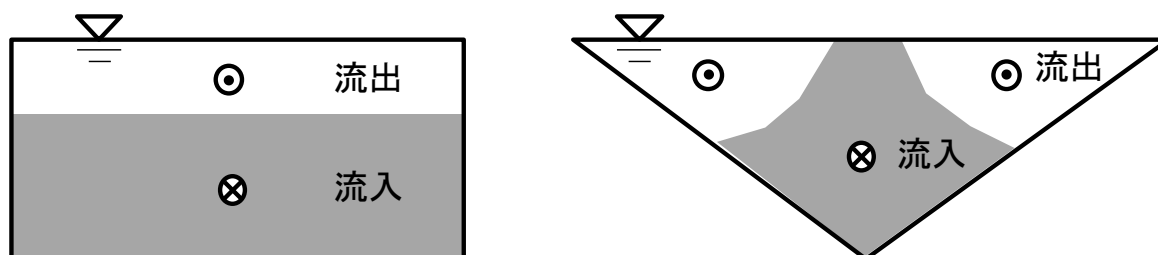


図-2.7 長方形と三角形の横断面分布を持つ循環流

その後, 吹送流に対する地球の自転や海底摩擦, 複雑な海底地形, 風の影響が Kasai et al.(2000), Valle-Levinson et al.(2003), Winant(2004), Sanay & Valle-Levinson(2005),

Hinata et al.(2010)などによって明らかにされてきた。

東京湾の吹送流に関する初期の研究としては、蓮沼(1979)や長島(1982)、森川・村上(1986)が挙げられる。蓮沼(1979)は“9月から翌年5月にかけては湧昇流期であって、表層から湾内水が湾外へと排出され、下層からは外海水が流入し、湾内水の交換が促進される時期といえる。”と述べている。また、長島(1982)は横浜-木更津の横断面流速分布を理論的に解析し、Wong(1994)の解析と同様に、吹送流が横浜側の水深の深い場所では風と逆向き、より浅い沿岸部と木更津側は風と同じ方向に流れることを示した。

その後、吹送流については東京湾奥の青潮に関連して多くの研究が実施されてきた。柿野ら(1987)や宇野木(1990)は北東を中心とする離岸風により東京湾の東側海域で沿岸湧昇が発生し、青潮が発生することを現地観測で示した。また、松山ら(1990)は沿岸湧昇と青潮の関係、湧昇後の内部ケルビン波の伝播過程を数値実験で示した。その後、中辻ら(1995)や佐々木ら(1996)、佐々木(1997)などの研究により青潮の発生機構がより明らかになった。また、鯉淵・磯部(2005)は頻繁に発生する湾奥の青潮以外に、強い南風で東京湾西側の横浜港周辺でも青潮が発生することを明らかにした。

しかし、上述したような吹送流の短期的な発生メカニズムについては明らかになってきたものの、海水交換という観点から見ると検討があまり行われてこなかった。風は方向が頻繁に変わるため、図-2.6に示すような流れが相殺され海水交換が起きにくくなっているものと一見思われがちであるが、実際には季節風が長期間にわたって連吹することがあり、海水交換に大きな影響を与えているものと考えられる。図-2.8は羽田の湾軸方向の風速である。頻繁に風向は変化するものの、夏は数ヶ月にわたって南風が卓越し、冬は北風が卓越する。東京湾の海水交換は約1ヶ月であるので、このように長期間にわたって同方向に風が吹く場合には、海水交換に大きな影響を与えている可能性がある。

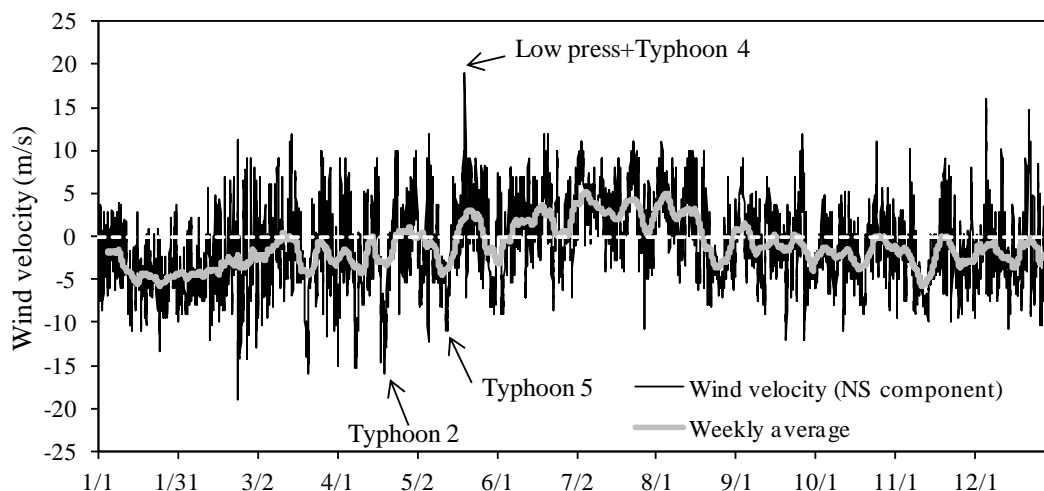


図-2.8 2008年の羽田の南北風速

このように淡水流入による重力循環と風による吹送流については、これまでも数多くの研究が行われてきた。しかしながら、淡水流入と風、それぞれの海水交換や湾内の流れに与える影響度は必ずしも明確になってはいなかった。その原因の一つはこれまで湾内の(断面・平面の)面的な流れを計測するのが困難だったからであり、また、たとえ計測できたにしても観測される流れが風による吹送流と淡水流入による密度流の重合したものであり、短期的な観測だけではそれらを分離できなかったためである。海水交換や流れに対する海水交換や湾内の流れの影響を調べるには、面的でかつ長期連続的な観測を実施し、淡水流入量や風と組み合わせた統計的な解析が必要である。

## 2.4 外洋水の影響

2.3 節で述べた現象のほかに、東京湾口での重要な海洋現象として、非定常的に発生する黒潮系暖水の東京湾への波及現象があげられる。特に特徴的なものは、冬季の熱塩(湾口)フロント、成層季の黒潮系暖水の中層貫入、夏季の底層にそった外洋水の進入である。

### 2.4.1 冬季の熱塩(湾口)フロント

冬季の東京湾口には、外洋の高温－高塩分－低クロロフィル *a* の海水と、低温－低塩分－高クロロフィル *a* の湾内の海水が接してできるフロントが発生する(図-2.9)。図-2.10 は 2005 年 1 月 15 日に房総半島の鋸山ロープウェイ山頂駅(標高 329m)から撮影したフロントであり、東京湾内のより明るい色の沿岸水(カラーでは緑)と暗めの色の外洋水(カラーでは青)が接している(鈴木ら, 2005)。図-2.11 はこのときのフェリーで観測された水温である。フェリーがフロントを横切る時に水温が約 13 度から 16 度まで急激に変化している。なお、12 時の水温が約 13℃で変化がないのは、フェリーの金谷港から久里浜港への航行ルートがより東京湾側に設定されており、フロントを通過しなかったためである。

このフロントは、熱塩フロント(Thermohaline front)として知られ、柳(1989)はその発生機構を以下のように述べている。“冬季海面冷却が大きくなると、浅い沿岸海域の海水は冷やされて重くなる。一方、より岸に近い沿岸海水は低温にはなるが、河川から淡水が供給され低塩分のためにある程度以上は重くなれない。一方、陸棚縁付近の沿岸海水も温かい外洋からの熱の供給を受け高温のため、海面冷却が大きくてもある程度以上は重くなれない。その結果、沿岸海域中央部の海水が最も重くなり沈降して、より岸より、より外洋よりの表層水は沿岸海域中央部に向かって流れてきて収束する。その結果、沿岸海域中央部に沿岸系水と外洋系水の明瞭な境界である熱塩フロントが生成される”。

外洋水、沿岸水はそれぞれコリオリの力を受けて進行方向に対して右側に偏向するため、東京湾では房総半島にそって外洋水が流入し、三浦半島側にそって沿岸水が流出する傾向にある(Endoh, 1977; Oonishi et al., 1978; Harashima and Oonishi, 1981; Yanagi et al., 1989)。

熱塩フロントは冬季、東京湾口に定常的に存在すると考えられ、柳(1990)は熱塩フロントが 3 ヶ

月間存在すると仮定すると、窒素の東京湾からの流出量は年間の40%にも達するという試算した。日向ら(2000)は1998年に東京湾口においてブイによる連続観測と観測船を用いた大規模な観測を実施した。その結果、冬季東京湾に発生するフロントは、熱塩フロントとしての生成機構だけでは説明がつかず、黒潮の流軸変動などによって黒潮から暖水塊が波及することによって発生する、非定常性の強い現象であることを明らかにした。また、日向(2004)は、黒潮の分岐流が東京湾口へ進入する際、大島西水道か、東水道のどちらかを通して来るかによって海水温が異なり、大島西水道を通る場合には、より長い距離を暖水塊が移動するため冷却されて重くなり、東京湾口から底層へ潜り込んで東京湾へ流入しやすくなることを数値実験で示した。

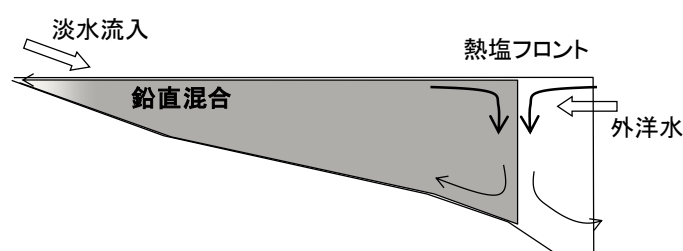


図-2.9 熱塩フロントの模式図



図-2.10 千葉県鋸山で撮影された熱塩フロント 対岸は三浦半島 (2005年1月15日)

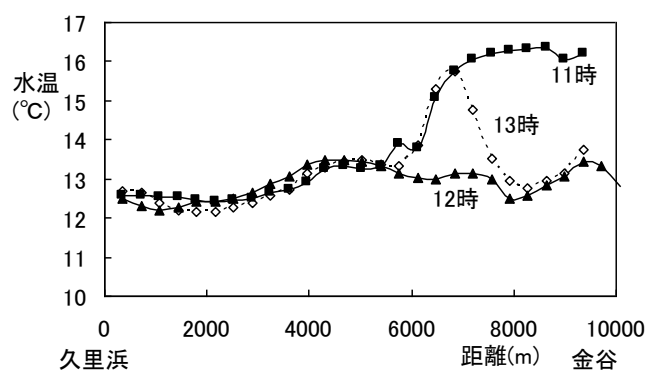


図-2.11 図-2.10の写真が撮影されたときのフェリーで観測された水温

#### 2.4.2 成層期の黒潮系暖水の流入(中層貫入)

Yanagi et al.(1989), 日向ら(2001)は, 高温低塩分, 低密度の海水が表層を覆っている成層化した夏～秋の海域では, 高塩分, 高密度の外洋水(黒潮系暖水)が中層から流入し, 表層では低密度の海水が流出, 下層からは高濁度, 高密度の海水が流出するという, 外洋水の中層貫入現象を明らかにした. 日向らの観測結果によると, 中層貫入は湾口から横浜沖まで発達し, その最大流速は湾口部において 30cm/s 程度となっていた. 八木ら(2003)は数値実験を行い, このような中層貫入現象が湾内と外洋の密度差を与えることで再現できることを示した.

#### 2.4.3 相模湾, 駿河湾, 紀伊水道, 豊後水道における外洋水の影響について

黒潮系水塊の波及は, 東京湾だけでなく太平洋に面した豊後水道(秋山,1991;小泉ら, 1997;武岡, 1990), 紀伊水道(吉岡, 1971,1977,1983), 駿河湾, 相模湾(木村, 1942;松山・岩田, 1977;北出ら, 1996;石戸谷ら, 2006)でも発生している. 共通する特徴として黒潮系の水塊はこれらの湾の東側に位置する半島や岬にそって北上する傾向を持っている.

吉岡は, 紀伊半島の田辺湾の白浜海洋観測塔の長期連続水温データや大阪高知特急フェリー, 神紀フェリー, 航空機によるリモートセンシングデータをもとに, 紀伊水道への黒潮系暖水の流入過程を調べた. その結果, 紀伊水道における黒潮系暖水によるシャープな Oceanic Front の存在や, 黒潮系暖水が紀伊半島沿いに北上して日御碕ー伊島間を北上し, 反時計回りに移動していく状況を明らかにした. 紀伊水道は東京湾口と比較すると水平規模が 2~4 倍ほど大きい, そこでの黒潮系暖水の動きは東京湾での動きと類似している.

相模湾における外洋水の進入に関する初期の研究としては木村(1942)の研究が挙げられる. 木村は長期間にわたるフェリー観測データなどから相模湾の流況を調べ, ”沖合の水塊が多量に沿岸へ流入して沿岸広範囲に強流を生じ, 沿岸水温を急に上昇せしめる現象”を見出し, 「沿岸の大急流れ」と名付けた.

相模湾の急潮の主要因は大きく分けて, ①台風や低気圧の通過と②黒潮系暖水の進入である(松山・岩田, 1977;北出ら, 1996など). このうち, ①台風や低気圧による急潮としては, 台風が房総半島, 鹿島灘沖合を通過した際に発生する陸棚波による急潮と異常潮位がある. 岩田ら(1990)や Matsuyama et al.(1997)は, 台風 8818 号によって発生した急潮を調べ, 銚子沖合で強い北風から北東風の風が吹き続けると, 風によるエクマン輸送により房総～鹿島灘沿岸の表層に暖水が堆積し, 陸棚波となって約 60cm/s の速度で相模湾へ伝播して急潮と異常潮位を引き起こすことを明らかにした. 一方, ②黒潮系暖水の進入については, 石戸谷ら(2006)は東進する黒潮小蛇行が伊豆海嶺の南西に位置する銭州の浅瀬域に達したとき, 浅瀬を越えられない暖水が伊豆諸島や海嶺の西側に沿うように北上し, 相模湾へと波及することを示した.

## 2.5 定期船舶による連続観測について

### 2.5.1 表層水温の観測

フェリーなどの定期船舶を利用した海洋観測は、これまでも数多く行われてきた。水温に関しては定期船舶を用いて古くから観測が実施されており、木村(1942)は東京湾汽船会社八丈島航路の“桐丸”と下田航路の“橘丸”・“葵丸”・“菊丸”が実施していた1935～39年の観測データをとりまとめ、黒潮の特徴やその相模湾への影響について調べている。当時は定点でバケツ採水により航海中甲板に海水を汲上げて水温が測定されていた。

紀伊水道では1971年から、大阪高知特急フェリーの“かつら”，神紀フェリー“勝浦”により長期連続観測が実施されていた(吉岡, 1983)。船底のシーチェストから海水を取水し、塩分・水温が自動計測されていた。これにより紀伊水道における黒潮の暖水波及とその Oceanic front の動態が詳細に調べられた。

瀬戸内海では国立環境研究所を中心にしてフェリーを用いた長期連続観測が実施された(原島ら, 2001)。表層の塩分水温の他、各種栄養塩の観測が行われ、長期にわたって定常的なデータが得られた。瀬戸内海における赤潮を調べ、シリカ欠損の赤潮へ及ぼす影響(Harashima et al., 2006)や、最近では外洋水の赤潮へ及ぼす影響も調べられた。

東京湾では神奈川水産技術センターの東京湾フェリー“しらは丸”による表層水温観測が実施されている。また、海上保安庁の海洋速報には小笠原海運の“おがさわら丸”をはじめとして数多くの定期船舶のデータが使用されており、定期船舶を用いた海洋観測は、黒潮をはじめとして現在、我が国をとりまく海況を把握する上で不可欠なものとなっている。

欧州ではフェリーボックスプロジェクトが進められており、欧州の13の研究機関がそれぞれの地域のフェリーにより、周辺海域の水質を調べている(<http://www.ferrybox.org/>)。

### 2.5.2 ADCP による流況観測

塩分や水温などの水質は海水を取水しなければならないため、表層の水質しか計測できないが、最近では、超音波流向流速計(ADCP: Acoustic Doppler Current Profiler)の開発により、航路断面の流向流速が計測されるようになってきた。Kizu(2001)は小笠原海運の“おがさわら丸”を用いて1991年～2002年にかけて東京ー小笠原間の長期間にわたるADCPによる定期観測を実施している。博多釜山航路“かめりあ”では、表層海水の塩分・水温・蛍光光度の観測の他に、ADCPによる断面の流況流向観測が行われ、対馬海峡の流況が明らかになってきた(Takikawa et al., 2005)。そのほか、東日本フェリーの“Virgo”による津軽海峡と日高湾の観測(黒田ら, 2003)など、徐々に数が増えてきている。

最近では、鈴木ら(2009)によって伊勢湾フェリー“伊勢丸”による伊勢湾口の観測や駿河湾フェリーによる駿河湾の観測が開始されている。ADCPはメンテナンスが比較的容易であるため、今後もADCPによる観測が増えてくるものと考えられる。



## 2.6 2章のまとめ

本章では、東京湾の海水交換に関する既往の研究をとりまとめた。主な内容は以下のとおりである。

- 1) 東京湾の海水交換は、現地での流速測定や水理模型実験、ボックスモデルによって調査されてきた。しかし、水理模型実験は水温の制御が難しく、また、湾口での直接測流も船舶の往来が多く危険なため、いずれもほとんど実施されてこなかった。
- 2) 一方、ボックスモデルを用いることで湾内の塩分水温データから海水交換日数を算定することが可能であり、これまでに宇野木(1998)、岡田ら(2007)などが東京湾の海水交換を調べてきた。宇野木(1998)は1947～74年のデータから夏季が0.8ヶ月、冬季は2.65ヶ月であることを示し、最近では岡田ら(2007)が東京近郊の都市化にともなって淡水流入量が増加して海水交換日数が夏季19日、冬季43日と短くなっていることを示した。ただし、ボックスモデルだけでは吹送流による海水交換の効果を調べることは困難だった。
- 3) 淡水流入による重力循環と風による吹送流について、東京湾ではこれまでも数多くの研究が行われてきた(宇野木, 1998; 柿野ら, 1987 など)。しかしながら、淡水流入と風それぞれの海水交換や湾内の流れに与える影響度は必ずしも明確ではなかった。その原因の一つはこれまで湾内の(断面・平面の)面的な流れを計測するのが困難だったからであり、また、たとえ計測できたにしても観測される流れが風による吹送流と淡水流入による密度流の重合したものであり、短期的な観測だけではそれらを分離できなかったためである。海水交換や流れに対する海水交換や湾内の流れの影響を調べるには、面的でかつ長期連続的な観測を実施し、淡水流入量や風と組み合わせた統計的な解析を行うことが望まれていた。
- 4) 東京湾の流動については、重力循環や吹送流循環に関する研究のほかに、外洋水の影響による冬季の熱塩フロント、秋季の中層貫入現象などが明らかにされてきた(Yanagi et al, 1989; 日向ら, 2001 など)。ただし観測例は限られており、それらの現象がボックスモデルで得られたような海水交換日数とどのように対応するのかは明確ではなく、より多くの観測が望まれていた。
- 5) フェリーなどの定期船舶を用いた表層水質の連続観測はこれまでも数多く行われてきた(木村, 1942; Harashima et al., 2006 など)。近年、超音波流向流速計 ADCP を船舶の船底に設置して、長期連続的に流れを測ることが可能となった。

## 3章 東京湾の流況水質の連続観測

### 3.1 概 要

2003 年以降, 東京湾では長期連続的な水質と流れの観測が実施されるようになってきた。2003 年からは東京湾口でのフェリーによる流況・水質の連続観測が開始され, また同じ年に湾奥では千葉灯標での流況と水質の連続観測を開始された。さらに, 2005 年からは HF レーダーによる東京湾表層流速の連続観測を開始され, データが蓄積されてきている。

本研究ではこれらのデータを用いて, 東京湾の流況・水質に及ぼす淡水流入と風の影響を調べることにした。本章ではこれらの観測方法とそこで得られたデータの特性を述べる。

**3.2 節 「フェリーによる東京湾口の連続観測」**では, 連続観測が実施されている東京湾フェリー“かなや丸”と観測装置について述べた後, 得られたデータから天文潮流と残差流の特徴について述べる。また, 海水交換量と海水交換日数, Flushing time, Flush rate の関係を整理し, 流況データからの海水交換量の算定式を定義して海水交換量を求めた。

**3.3 節 「HFレーダーによる東京湾表層流速の連続観測」**では, HFレーダーによって観測された湾表層の流れの天文潮流と残差流の特徴について, **3.4 節 「千葉灯標での水質の連続観測」**では, 千葉灯標で観測された水質データの特徴について述べる。

**3.5 節 「東京湾への淡水流入と各種気象条件の特徴」**では, 東京湾に流入する淡水流入と風や気温などの気象条件の特徴について述べる。

### 3.2 フェリーによる東京湾口の連続観測

#### 3.2.1 東京湾フェリー“かなや丸”と観測装置

観測は東京湾フェリー株式会社所有の“かなや丸”で実施されている。

図-3.1 は東京湾の水深とフェリーの航路である。フェリーは神奈川県の高里浜港と千葉県の金谷港を船速約 6m/s で移動し, 片道約 35~40 分で, 毎日 AM6:20 から PM7:20 にかけて約 7 往復している。“かなや丸”は総トン数 3,680t, 全長 79.0m, 速力 24km/h, 定員 580 人, 車両数 100 台であり, 1992 年 4 月より就航している。図-3.2 はフェリー観測の模式図である。東京湾口の断面の流向流速, 表層の塩分・水温・クロロフィル  $a$  を計測しており, フェリーの位置は GPS (Leica 製 MX421) で求めている。観測されたデータは高里浜港着岸時に携帯端末 (AirH) で港湾空港技術研究所のインターネットサーバーへ送信されている。

図-3.3 は“かなや丸”の断面図と平面図であり, 図-3.4 は浦賀ドック入渠時のフェリー(a)と ADCP 本体(b), 水質測定装置(c)である。多層流向流速計 (ADCP) は船底中央部に, 水質測定装置は機関室背後変節器室の右舷側に設置されている。

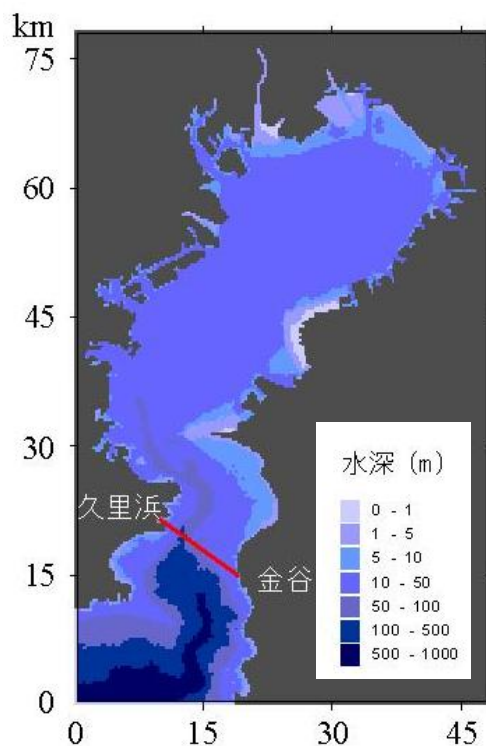


図-3.1 東京湾の水深とフェリー航路

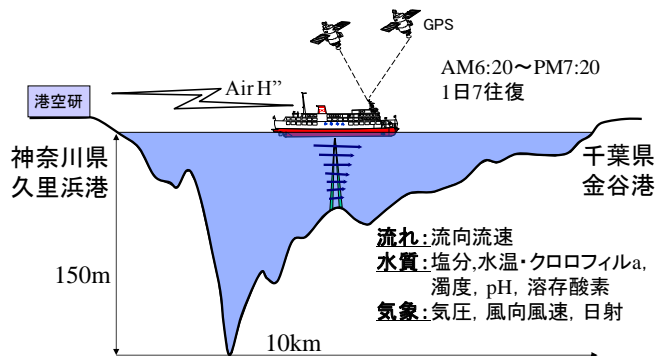


図-3.2 フェリー観測の模式図

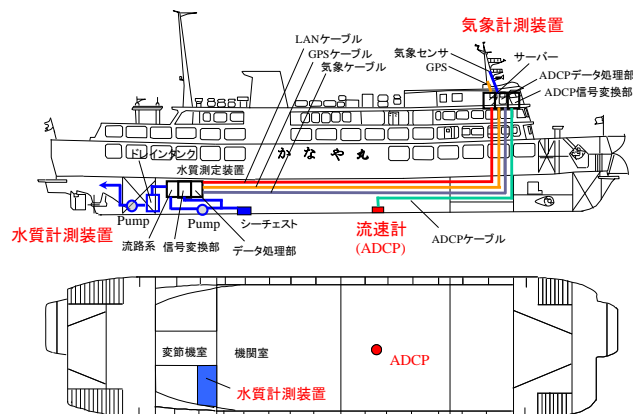


図-3.3 フェリー観測の模式図

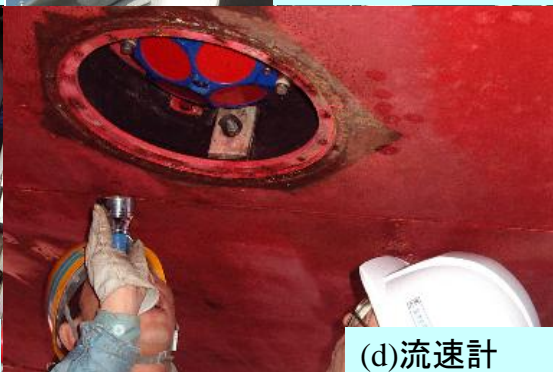
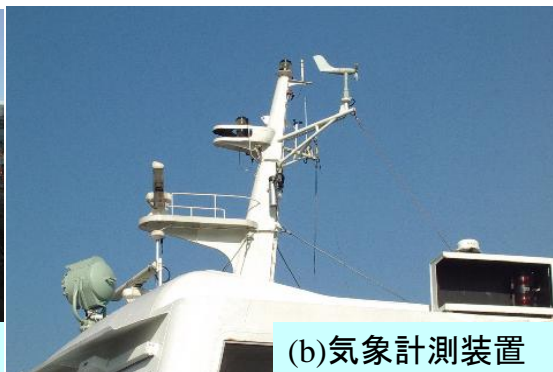
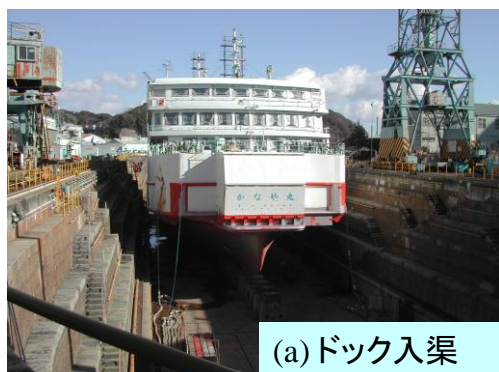


図-3.4 フェリーへの各種計測装置設置状況

### 3.2.2 流向流速測定装置 ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler)

流向流速は RD Instruments 社製の船底装備型 Broad-Band ADCP (Workhorse Mariner ADCP)で計測しており、観測装置は船底に設置された ADCP 本体と艦橋(ブリッジ)に設置された PC で構成されている。

ADCP は独自のジャイロコンパスを持たないため GPS データから船の進行方向を求めている。海水の対地流速は ADCP で得られる各層の流れの対船流速から、海底からの反射波から得られる船速を差し引くことで求めている。なお、この計測手法はボトムトラックリフェレンスと呼ばれている。

ADCP の発振周波数は 300kHz であり、計測可能最大水深は 175m、ボトムトラックが可能な最大水深は 260m、音響発信器のビーム角は 20°である。フェリーの吃水は 3.4m であり、また、サイドローブの影響で ADCP 本体から約 7m までの流速が計測できない。したがって、計測される流速データは水深 10.4m の位置から層厚 4m で 40 層までのデータである。流向流速データは 1.5s 間隔で取得される生データを 20 秒平均して求めている。船速が約 6m/s であるので、データは約 120m 間隔で得られていることになる。久里浜港から金谷港までの距離は 10km なので、1 航海あたり 80 点ほどのデータが得られる。

通常 ADCP の観測では海底面の直上に測定不能な水深域  $D$  ができる。船底直下の水深を  $D_B$ 、ビーム角を  $\theta$  とすると  $D$  は式(3.1)で表される。本研究ではビーム角が 20°であるので、海底から水深の約 6%が測定不能域である。

$$D = D_B(1 - \cos\theta) \quad \cdots(3.1)$$

### 3.2.3 水質測定装置

水質の測定は図-3.5 のように船底のシーチェストからポンプによって海水を採取して計測している。まず、シーチェストから 2m 離れた位置に設置した船底水温計で水温を計測し、その後、その海水を海水分析装置に送って塩分とクロロフィル  $a$  を計測している。

鉄管で管路を構築すると配管内部に錆びが発生するほか、スケール(付着物)が溜まって海水が流れなくなりやすい。ステンレス材でも電食によって錆が発生し、場合によっては配管に孔が空いてしまう。そのため本システムでは錆の発生やスケールの付着を防ぐため、配管内部にポリライニング加工を施している。また、スケール付着を防ぐため、スケール付着防止装置“スケールクリーン”を設置している。これは配管にケーブルを巻いて電磁でスケール成分を細分化し、管内へのスケール付着を防止する装置である。

図-3.6 は、観測開始当時の海水分析装置の概略図である。流量・水温・塩分・クロロフィル  $a$  の順に計測している。分析装置の流路に流れ込んだ海水は大型ゴミを除去させる 5mm のフィルターを通過後、ブースターポンプを経由して約 1.5l/min ( $2.5 \times 10^{-5} \text{m}^3/\text{s}$ )に規定させて各セン

サーを通過させ、排水バッファタンクに流れ落ちるようにしている。

船底水温を含めた各センサーのデータは、AD変換された後にPCに1分間隔で保存されている。船速が約6m/sであるので、約360m間隔でデータが取得されていることになる。なお、センサー自体の汚れを防ぐため、久里浜港および金谷港入港時には、分析装置内部に懸濁海水を流入させず、入港している間、生物付着防止液(塩素)を混ぜた海水を分析装置内部に流す方法をとっている。

水質測定装置に用いた各種センサーの名称と仕様は以下のとおりである。

- 船底水温センサー Sea-Bird Electronics 製 SBE38

測定範囲:-5~35℃, 精度:±0.001℃

- CT センサー FSI 製 Excell Thermosalinograph

水温 測定範囲:-3~+45℃, 精度:0.010℃

電気伝導度 測定範囲:0~90mS/cm, 精度:0.025mS/cm

塩分 測定範囲:2~42PSU, 精度:0.030PSU

- クロロフィル蛍光光度計 Wetlabs 製 ws-3-mf

測定範囲:0.03-75μg/l, 感度:0.03μg/l

蛍光波長:685nm, サンプルングレート:6Hz

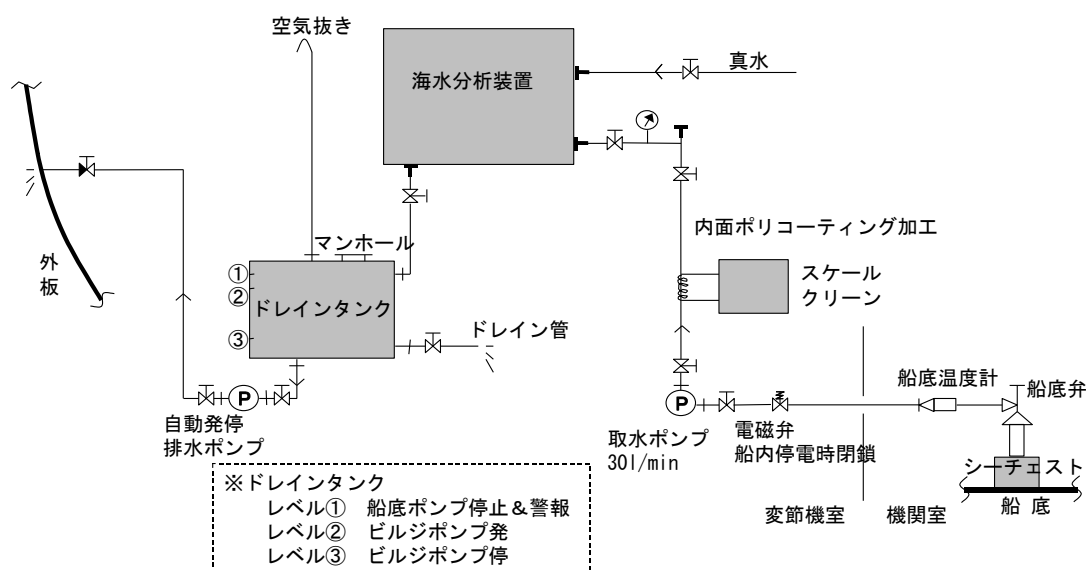


図-3.5 水質測定用の船底配管模式図

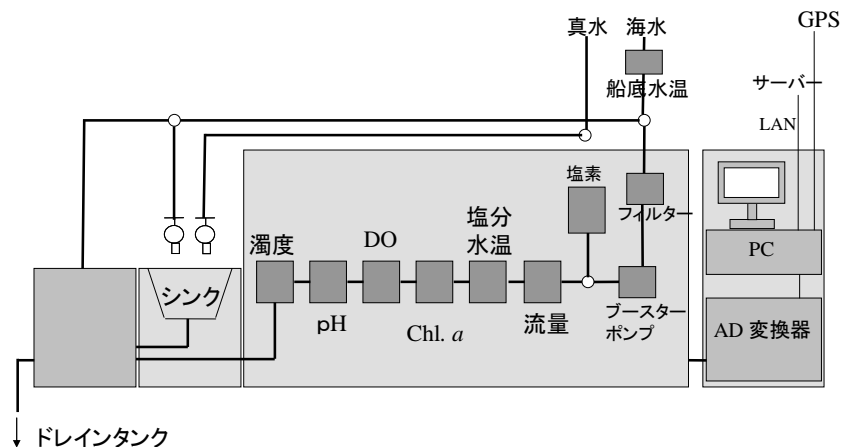


図-3.6 水質測定装置模式図

船底シーチェストから海水分析装置までの距離は約 25m である。配管の管径が 0.025m, 流量が  $5.0 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$  であるので, 管内流速は 1m/s となり, 25s で海水分析装置まで海水が到達する。また, 海水分析装置内にも配管があり, 分析装置内の管路が約 10m, 配管の管径が 0.005m, 流量が  $2.5 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$  であるため, 分析装置入口からセンサーまで海水が到達するには約 31 秒要する。したがって, シーチェストから取水された海水は約 1 分遅れて分析されている。

図-3.7 は金谷側に黒潮系暖水が流入した 2004 年 1 月 21 日のデータであり, 船底シーチェストから約 2m 離れた位置に設置されている船底水温計 (SBE38) の水温データと分析装置内の CT センサーの水温・塩分データを比較したものである。また, 表-3.1 はこの時の船底水温と CT センサーの塩分水温の相関係数であり, 海水分析装置で計測された水温は船底水温より 2 分程度遅れて相関係数が最大になるのに対し, 塩分は 1 分遅れて最大となっている。水温はポンプの影響で上昇するため, 分析装置内で計測される水温は, 船底水温に対してさらに 1 分程度遅れて相関が高くなっているものと推定される。そのため, 船底水温以外の水質データはフェリーが 1 分前にいた海域のデータであるものとして解析を行った。

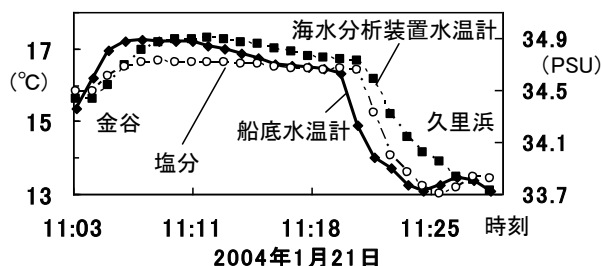


図-3.7 時間遅れ

表-3.1 船底水温計と CT センサーの  
塩分・水温の相関

時間遅れ(分)	2004年1月21日11時04分発	
	水温	塩分
0	0.8191	0.8935
1	0.9544	0.9702
2	0.9910	0.9255
3	0.9057	0.8022

### 3.2.4 航路の蛇行について

東京湾フェリーは右側通行をしており、久里浜から金谷に行くときは太平洋側よりを、金谷から久里浜へ行く便では東京湾よりの航路をとっている。また、東京湾口は東京湾と外洋を往来する船舶が多く、その数は1日500隻以上にもなるため、東京湾フェリーはそれらの船舶を避けて航行する必要がある、航路が一定せず蛇行して航行する場合が多い。

図-3.8 は、2003 年 4 月 25 日と 5 月 4 日の航跡図である。多くの場合、図-3.8(b)のような比較的一定の航路を通っている場合が多いが、図-3.8(a)のように大きく航路がずれる場合がある。

図-3.9 は航跡と表層流速のベクトル図である。図-3.9 では航跡が曲がっていて分かりにくい。そこで、フェリーがある一定の航路(東経 139.7234°, 北緯 35.221°の久里浜港と東経 139.8159°, 北緯35.1712°の金谷港を結ぶ直線)上を航行すると考えて、この航路上に流速ベクトルを投影させて、図-3.10 のようにグラフ化した。

図-3.10 ではフェリーの蛇行を無視することによって、表層の流速ベクトルの変化がよく分かる。12:08 頃、中央部での流れの向きは外海に流出する向きであるが、徐々に久里浜側に向き13:56 頃には逆転して東京湾内に向かっていく。また 12:08 頃のデータを見ると中央部の流れはまだ外海に流出する向きであるのに対し、久里浜側と金谷側の陸付近の流速は既に反転して流入していることなども分かる。そこで本研究では久里浜港と金谷港を結ぶ線を“標準航路”とよび、流速ベクトルをこの航路に投影させて解析を行うこととした。

図-3.11 は本研究の解析に用いる座標系の模式図である。 $x$  座標を久里浜から金谷に向かうラインにとり、久里浜港を  $x$  座標の原点とした。また、 $y$  方向を標準航路に直交するものとし、東京湾に向かう方向をプラスと定義した。また深さ方向を  $z$  軸として原点を表層にとった。

次節では流速データを調和解析して、天文潮流成分と残差流成分の解析を実施するが、その際、得られた観測データを  $x$  方向 125m 間隔、 $z$  方向 4m 間隔のグリッドに振り分けて時系列データを作成した。

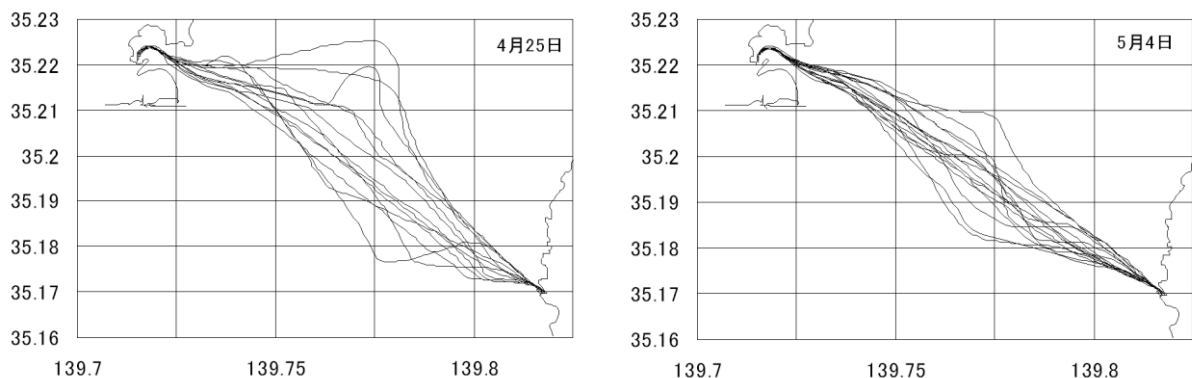


図-3.8 フェリーの蛇行状況 (a)2003 年 4 月 25 日 (b)2003 年 5 月 4 日

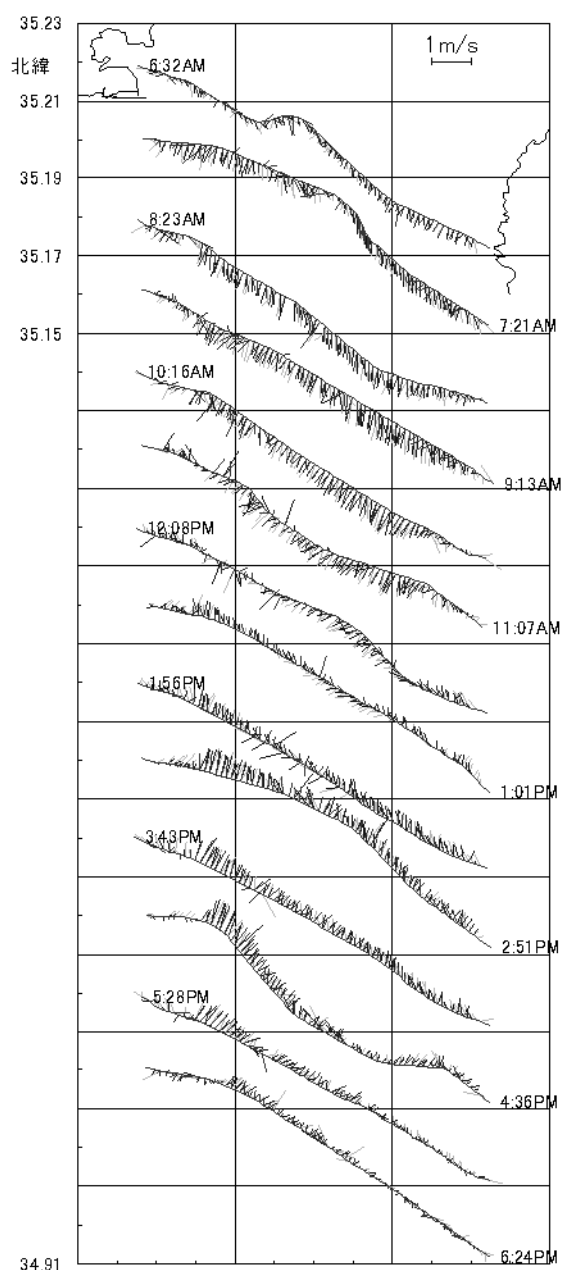


図-3.9 航跡と表面流速ベクトル(2003/5/4)

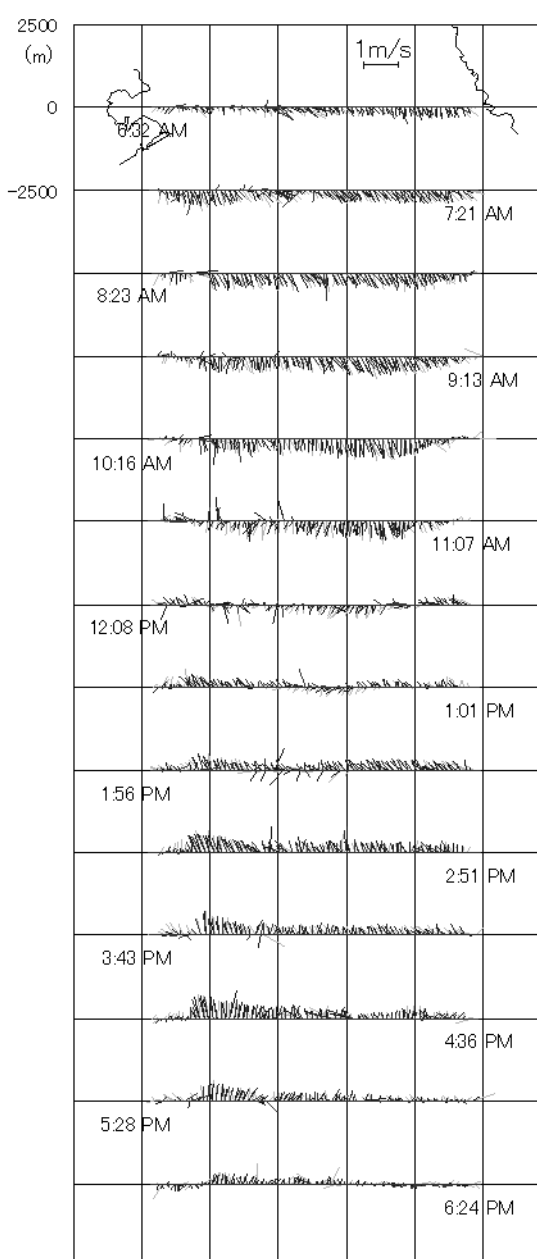


図-3.10 表面流速ベクトル図(久里浜と金谷を結ぶ標準航路に図-3.9の流速を投影した)

図-3.12 は 2003 年 5 月 4 日に得られた南北方向の断面流速分布であり、流速ベクトルを標準航路に投影して求めた図である。青は東京湾から外海へ向かう南向きの流れ、赤は外海から東京湾内に流入する北向きの流れである。この日は連休中であり、6:32～23:23 の間、10 往復のデータが得られている。大潮であったこともあり、流出時の最大流速は金谷よりで最大 0.5m/s、流入時は久里浜よりで最大 0.5m/s の流速と大きな値となっていた。この日の流れは流出時に金谷側から流出し、流入時には久里浜側から流入する傾向にあった。



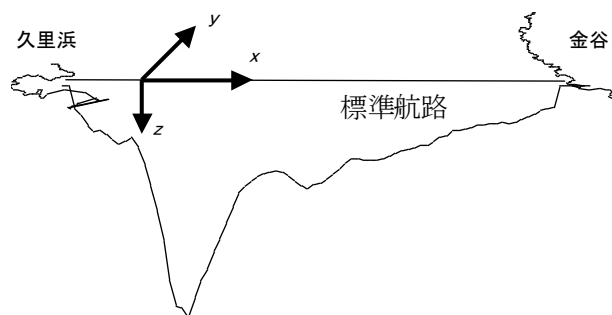


図-3.11 流速を解析する際の座標系(久里浜と金谷を結ぶ線を標準航路と呼ぶ)

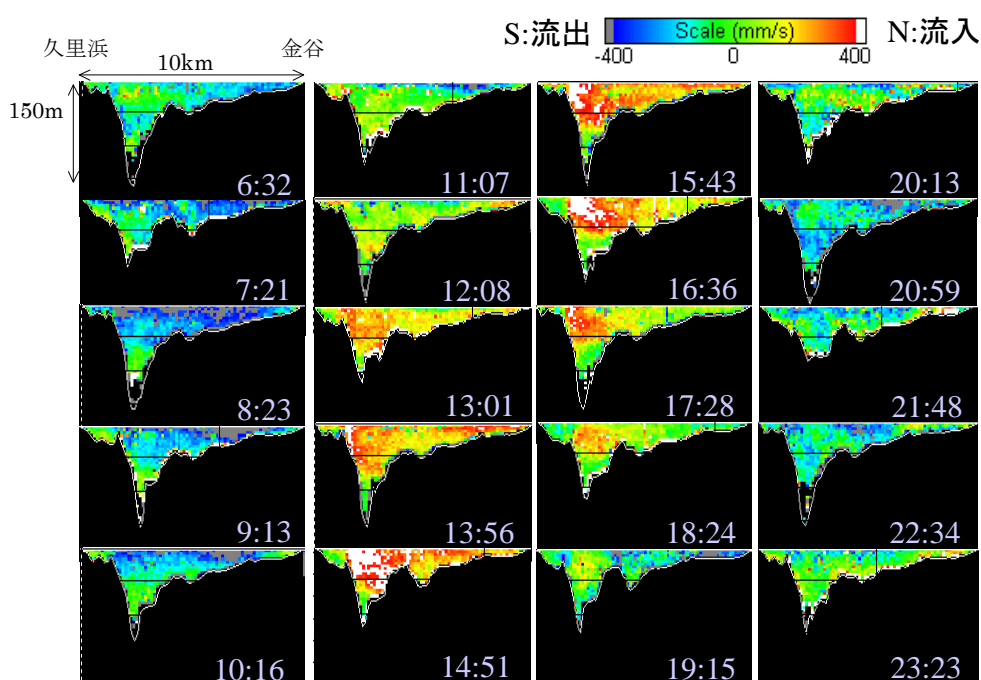


図-3.12 南北方向の断面流速分布(2003 年 5 月 4 日)

### 3.2.5 流れの特徴(天文潮流成分)

#### (1) 摩擦をともなった振動流

図-3.13 は 2005 年 5 月 7 日(大潮の日)の流向流速データである。なお、以後、東京湾から流出する方向を“流出方向”，東京湾へ流入する方向を“流入方向”とよぶ。

AM6:39 には久里浜から約 4km の場所の流速が最大で流出方向に 0.54m/s である。その後、徐々に流速の大きい場所が金谷側へずれて行き、AM9:36 には久里浜側から約 7.5km の位置の流速が最大となっている。一方、久里浜側、金谷側ともに、岸に近い場所の流速が中央部よりも早く流向が変わっている(位相が早い)。AM10:35 時点では、久里浜から 4～8km の中央部は流出方向だが、久里浜、金谷近くの流向はともに流入方向である。

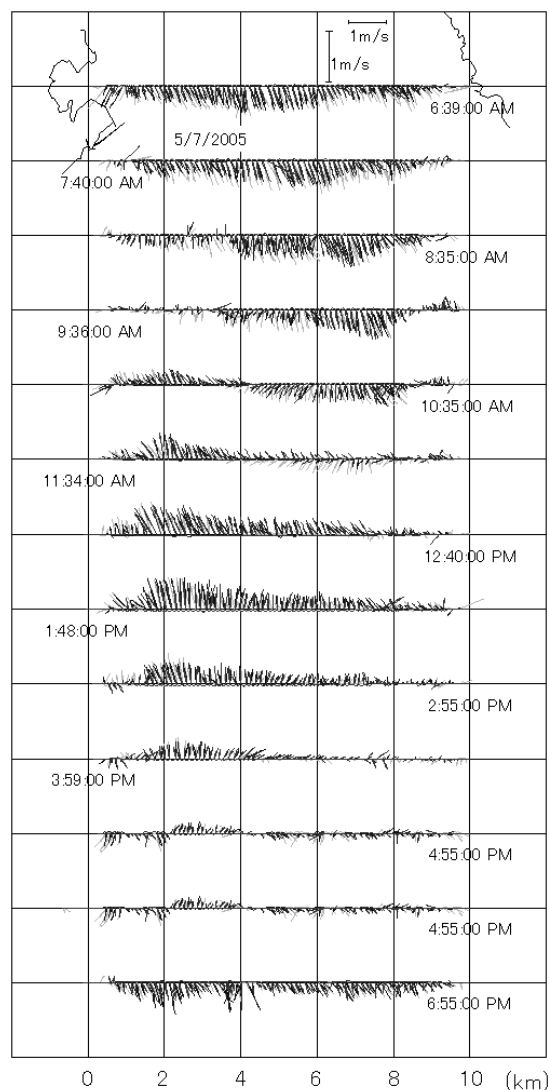


図-3.13 表層の流向流速(2005 年 5 月 7 日)

図-3.14 は、東京港の潮位とその時間微分、および ADCP の断面平均流速である。ADCP の断面平均流速(cm/s)と、潮位の時間微分 (m/hr)の時系列の波形が非常によく似ている。東京湾内の潮汐がその入射波と湾奥で反射した反射波の重なった定常波の性格をもつ(貝塚, 1993)ために、断面平均流速と潮位の時間微分の波形がよく似ているものと考えられる。

図-3.15 は 2004 年 1 月の M2 分潮の潮流楕円であり、海底溪谷のある久里浜から 2.5km の位置の楕円が最も大きくなっている。なお、調和解析は 2004 年 1 月の 1 ヶ月のデータに対して主要 8 分潮の解析を実施したものである。図には、表層の流速が最大となる位相線(楕円中心とその位相の流速を結んだ線)をともに示している。久里浜港と金谷港の周辺および海底付近の位相が他の部分よりも早くなっている。この現象は前掲図-3.12 の表層流速ベクトル図と同じ現象であり、東京湾口の潮汐が宇野木ら(1990)に示されるような摩擦をともなった振動流であることを示している。

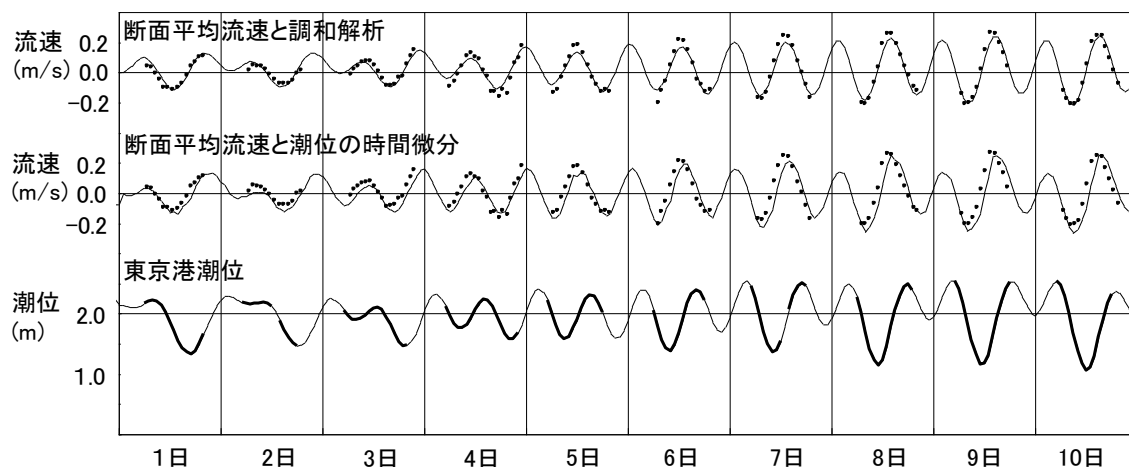


図-3.14 久里浜港の潮位と ADCP 断面平均流速との比較 (2005 年 5 月)

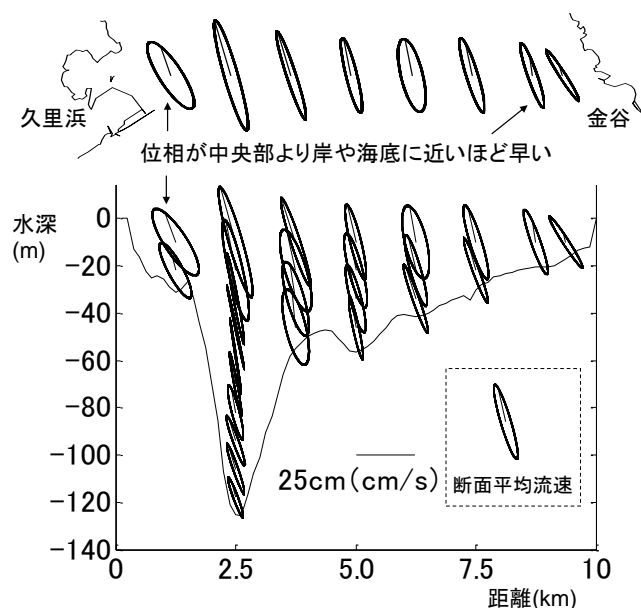


図-3.15 M2 潮流楕円(2004 年 1 月)

## (2) 天文潮流成分の断面分布

図-3.16 は天文潮流の M2, S2, O1, K1 成分の断面分布図である。流速データを標準航路の水平方向 125m 間隔、鉛直方向 4m 間隔のグリッド断面に投影して求めた 1 年間の時系列データに対して 8 分潮の調和解析を実施して求めたものである。最も大きい潮流成分は M2 分潮成分である。久里浜から 2.5km 離れた最も水深の深い地点よりも、少し久里浜側の位置(久里浜から 2km 付近)で流速振幅が最大となっており、約 25cm/s である。次に大きい成分は S2 分潮成分であり、M2 分潮と同様に久里浜から約 2km の位置で最大値をとっている。O1, K1 分潮成分は M2, S2 分潮成分と傾向が異なり、久里浜から 2km と 7km の位置で極大値をとっている。

図-3.17 は潮汐の位相の断面図である。M2 分潮の位相は表層で大きく(位相が遅く)、海底に近いところほど小さい(位相が早い)。また、千葉側より神奈川側で位相が早い。

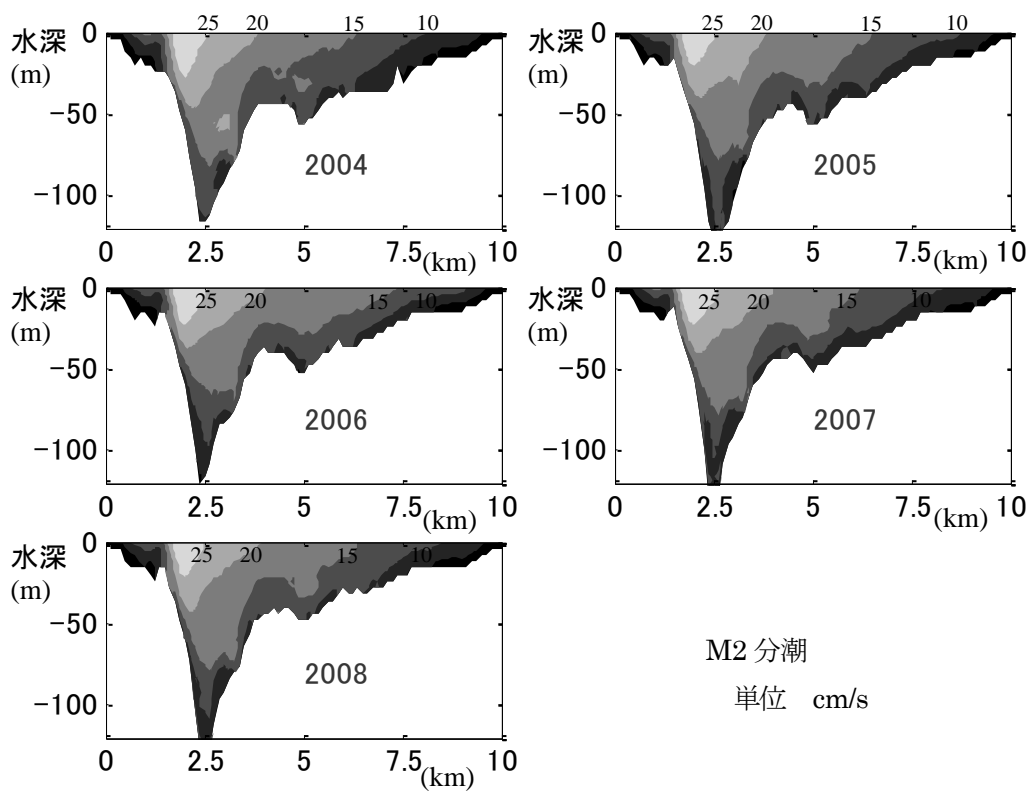


図-3.16(a) 2004～2008 年の潮流振幅 M2 分潮

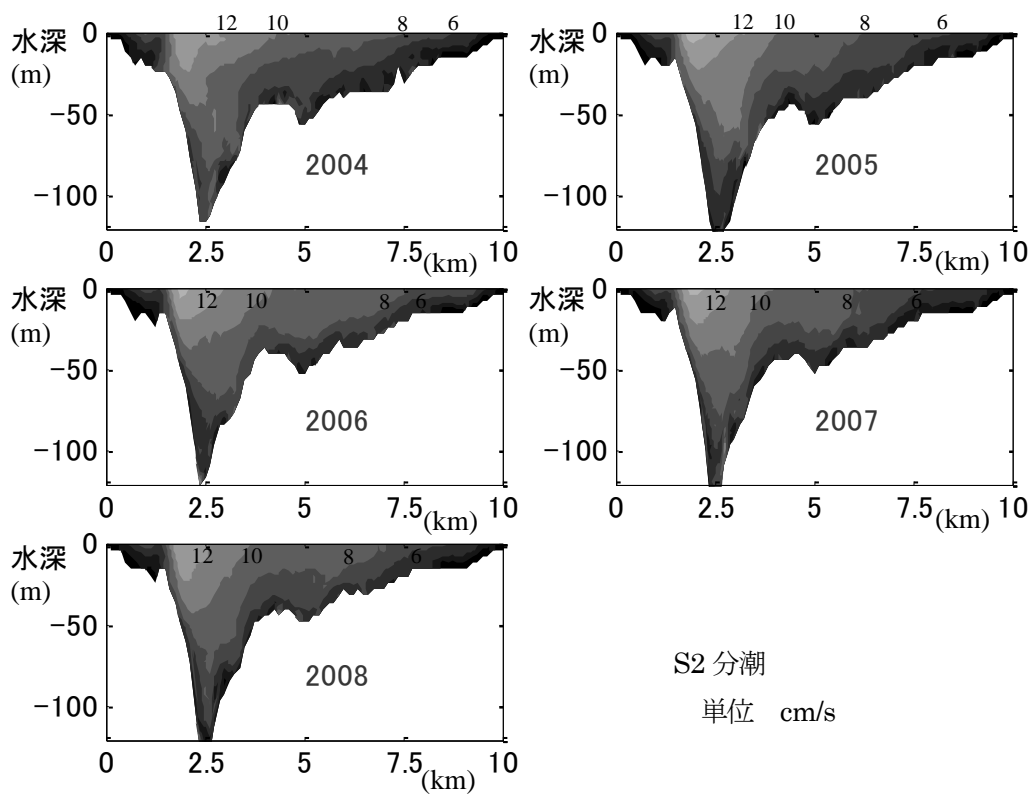


図-3.16(b) 2004～2008 年の潮流振幅 S2 分潮

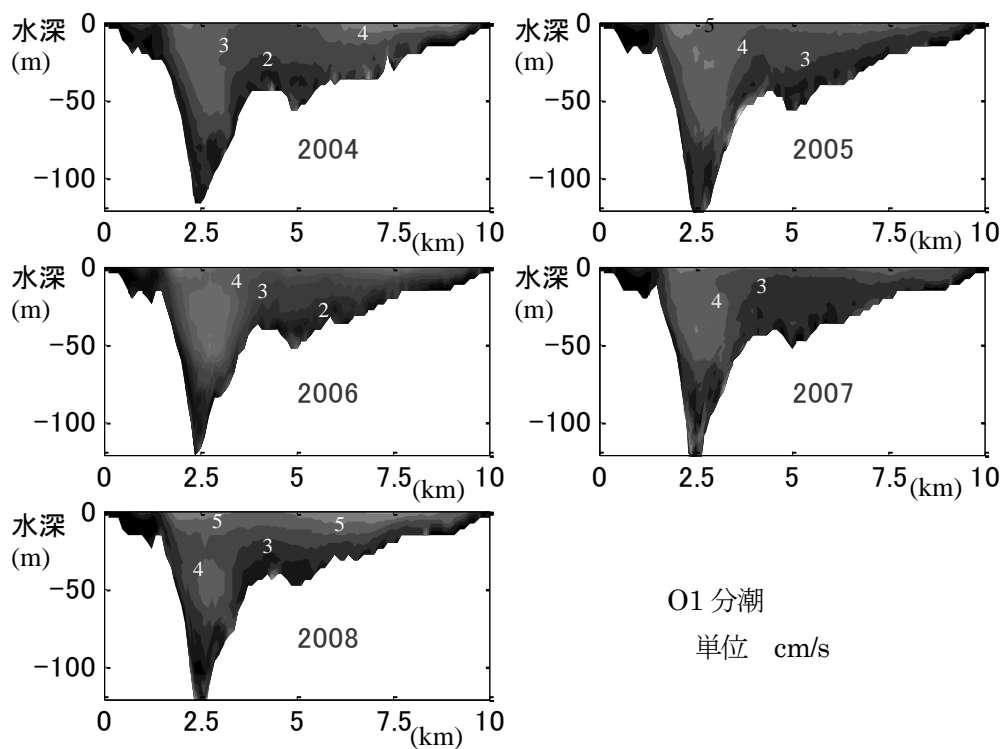


図-3.16(c) 2004～2008 年の潮流振幅 O1 分潮

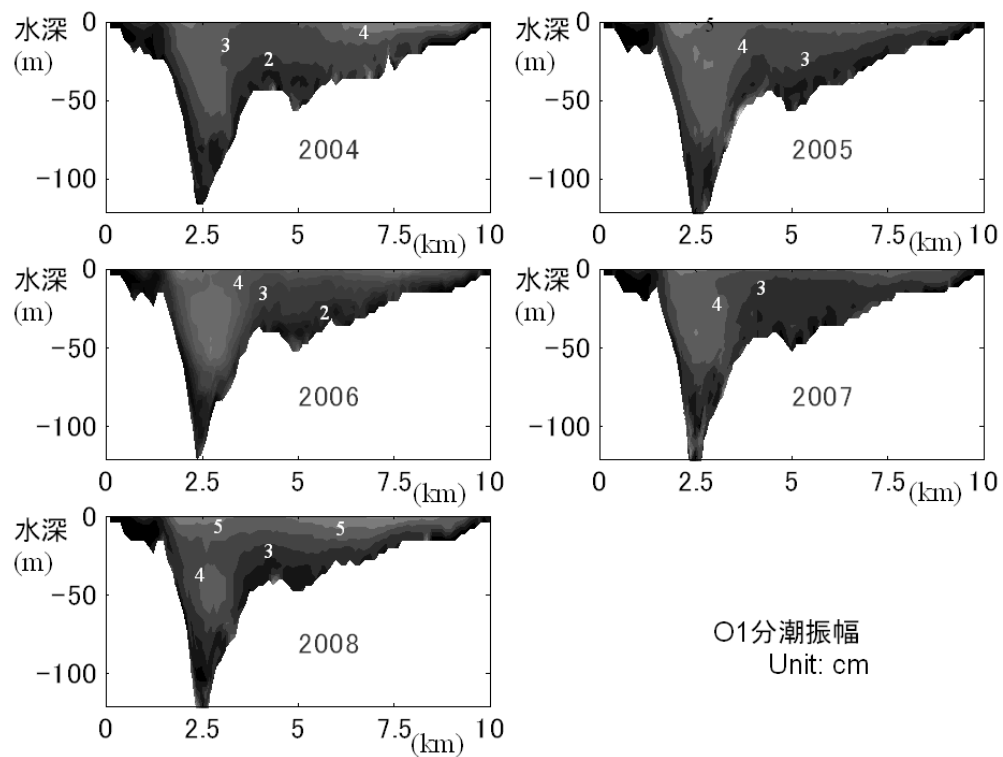


図-3.16(d) 2004～2008 年の潮流振幅 K1 分潮

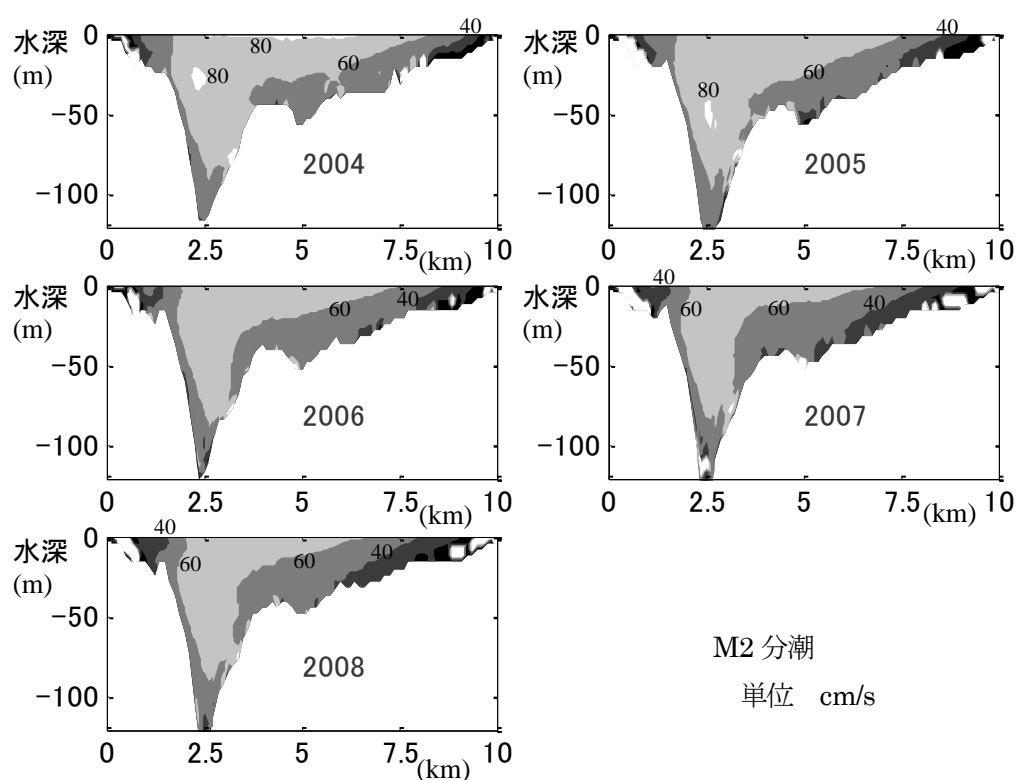


図-3.17(a) 2004～2008 年の潮流の位相 M2 分潮

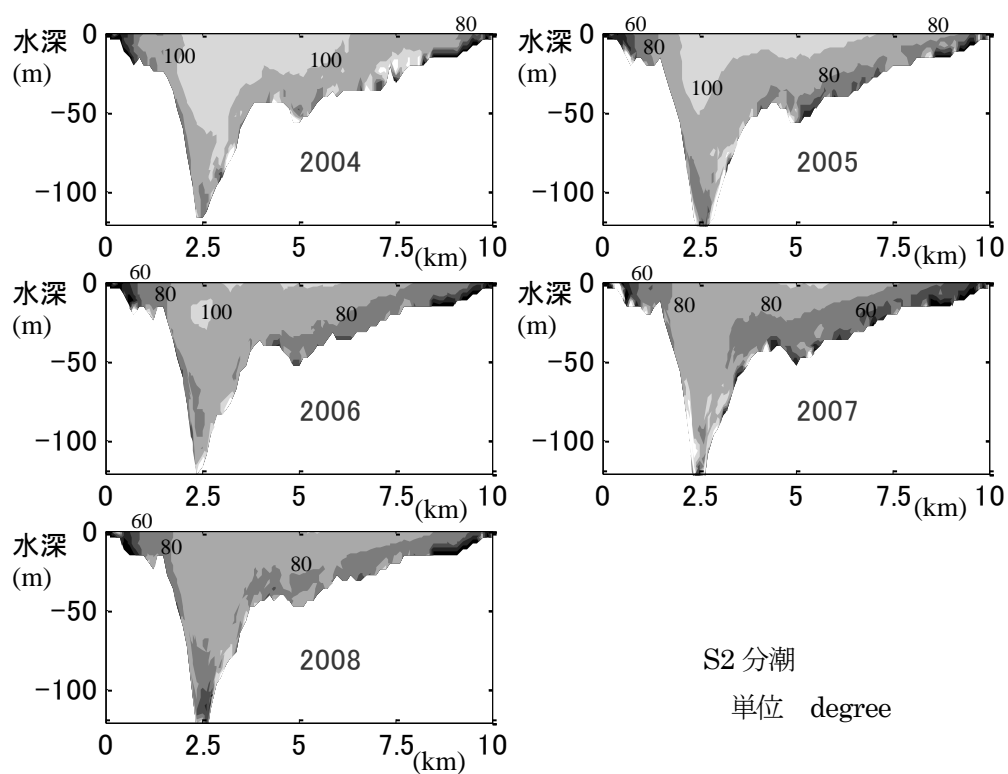


図-3.17(b) 2004～2008 年の潮流の位相 S2 分潮

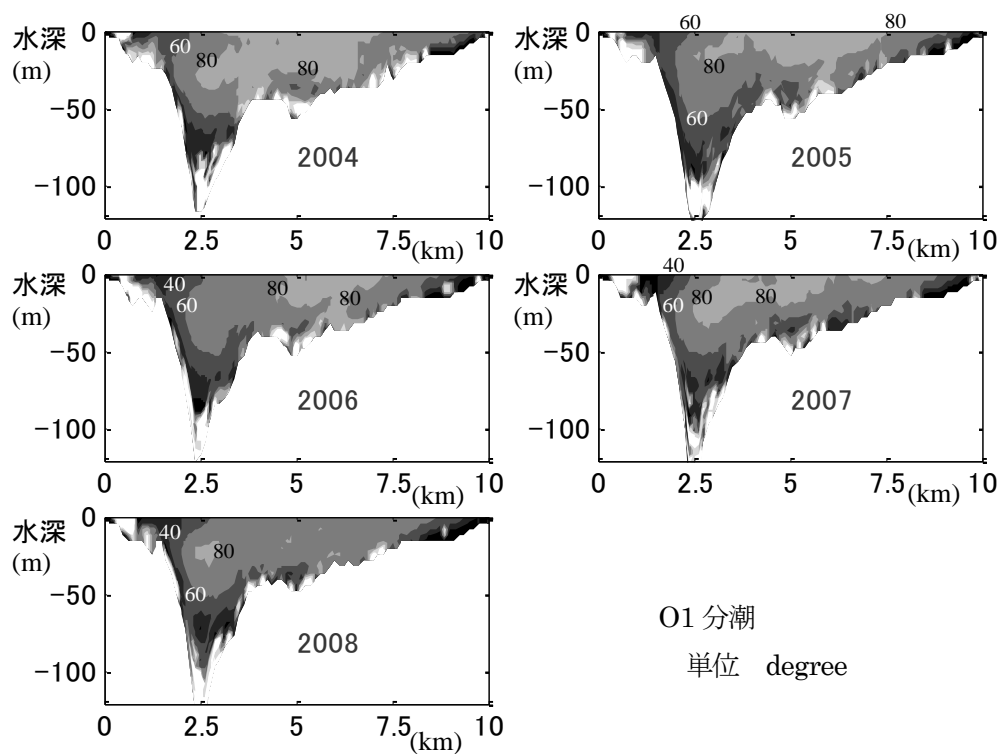


図-3.17(c) 2004～2008 年の潮流の位相 O1 分潮

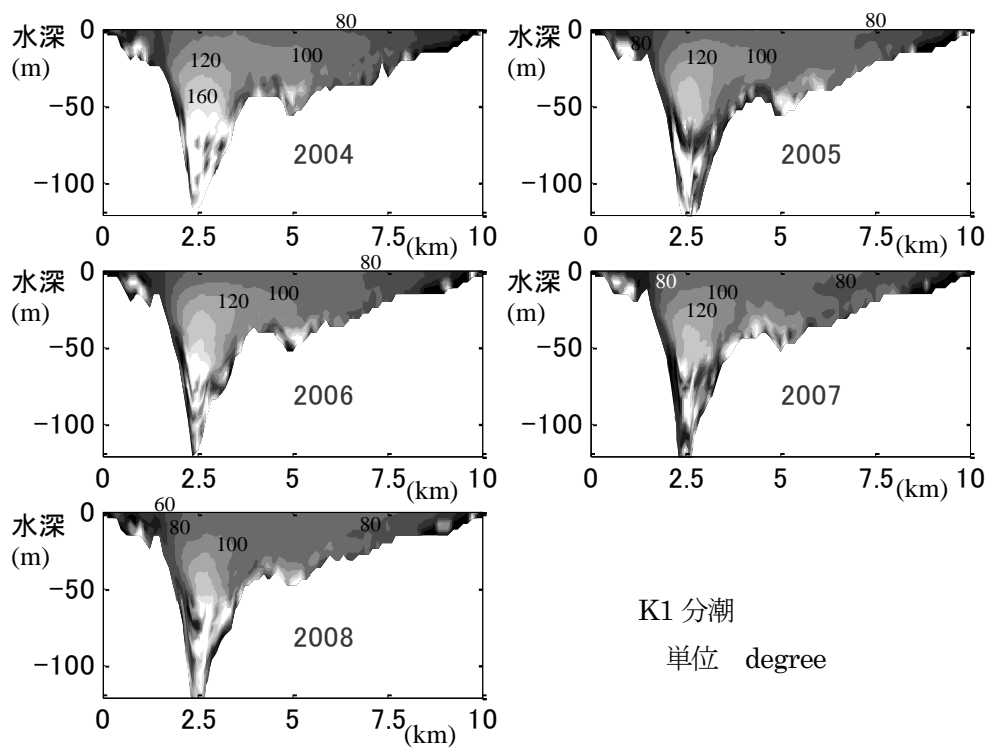


図-3.17(d) 2004～2008 年の潮流の位相 K1 分潮

### 3.2.6 流れの特徴(残差流成分)

#### (1) 残差流の断面分布と鉛直プロファイル

図-3.18 は年平均残差流の断面図である。残差流は 3.2.5 項で求めた流速の時系列データから調和解析で求めた天文潮成分を差し引いて求め、その後年平均したものである。

水深の最も深い久里浜から 2.5km の地点で水深 30m を中心にした場所での流入量が多い。それよりも千葉側(2.5～9km)では表層から水深 20m までは流出となっている。(ただし、サイドローブの影響で表層～水深 10m の流速が計測できないため、表層～水深 10m までは推定である。)また、久里浜から 2.5km 地点では、水深 70m 以深で、流出となっている。このように、全体的に見ると、フェリー航路の流向流速は、上層流出、中層流入、下層流出である。しかしながら、富津―観音崎以北の水深 30m より浅い部分と対応させるならば、上層流出、

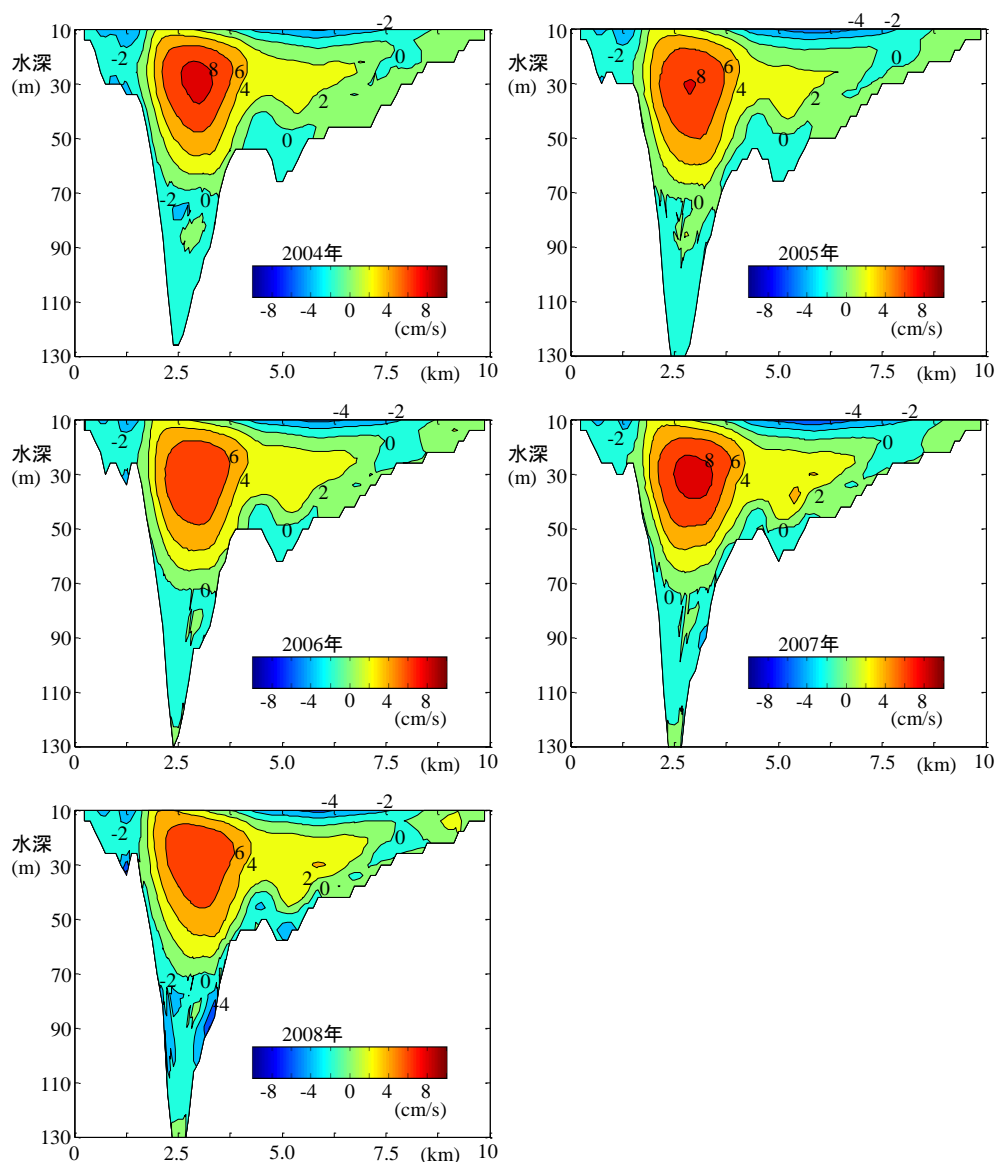


図-3.18 年平均の残差流断面図(2004 年～2008 年)



下層流入であり、東京湾のエスチュアリー循環と対応している。なお、水深の深いところに流入部分が集まる状況は Wong(1994)が示した水深分布を持つエスチュアリー循環の解析結果と一致している。

図-3.19 は、図-3.18 の残差流の断面プロファイルである。最も深い久里浜から 2.5km 地点では、水深 30m 付近で流入流速が 7~8cm/s で最大値をとり、水深 70m で流速が反転し、水深 80m 付近で流出流速が 2~3cm/s で極小値をとる。一方、水深 10~20m のプロファイルの傾きからすると、表層では流出となり 5~10cm/s の流出流速となってもものと推定される。2.5km 地点以外の点では、10~20m の流速プロファイルの傾きから推定すると、表層流速はさらに大きく、5km や 6.25km 地点では、流出流速が 15cm/s よりも大きいものと推定される。

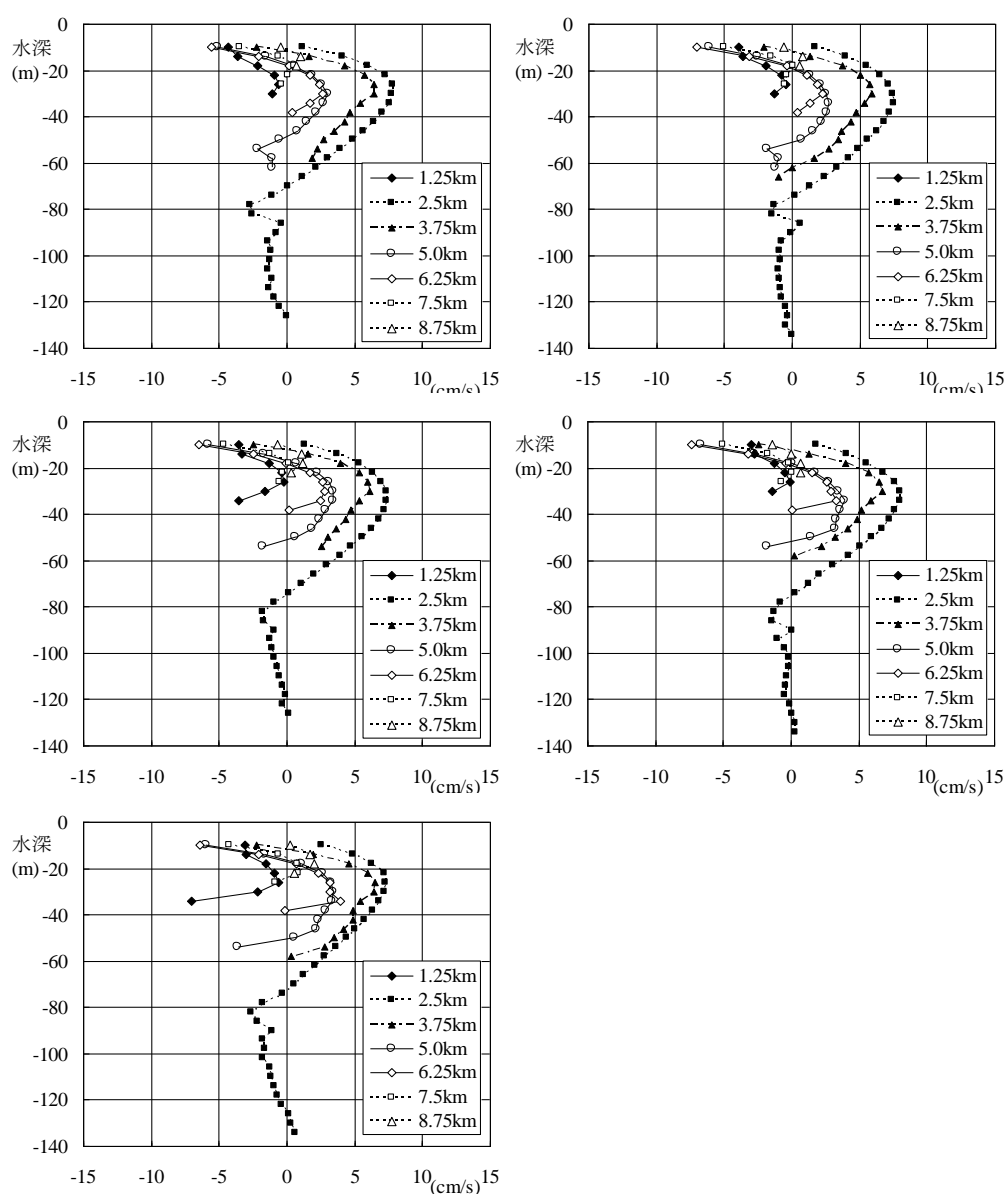


図-3.19 2004 年~2008 年の残差流の鉛直プロファイル

このように、ADCP で計測される流向流速は、表層～水深 10m までの流向流速が計測されていないため、断面平均は流入になる。しかし、実際にはその流入量に匹敵する量の水塊が表層～水深 10m で流出しているものと考えられる。

## (2) 残差流の月平均断面図

図-3.20 は、2004 年～2008 年の残差流の月平均断面図である。ADCP の故障やフェリーの欠航等によりデータ(航海数)の少ない月は誤差が大きくなると考えられるため、図中にその月のデータ数(航海数)を示している。年によって変化はあるものの、降水量の大きい3～5月と9～11月にかけて、流入、流出の平均流速がともに大きくなり、コンター図のコントラストが大きくなる傾向にある。

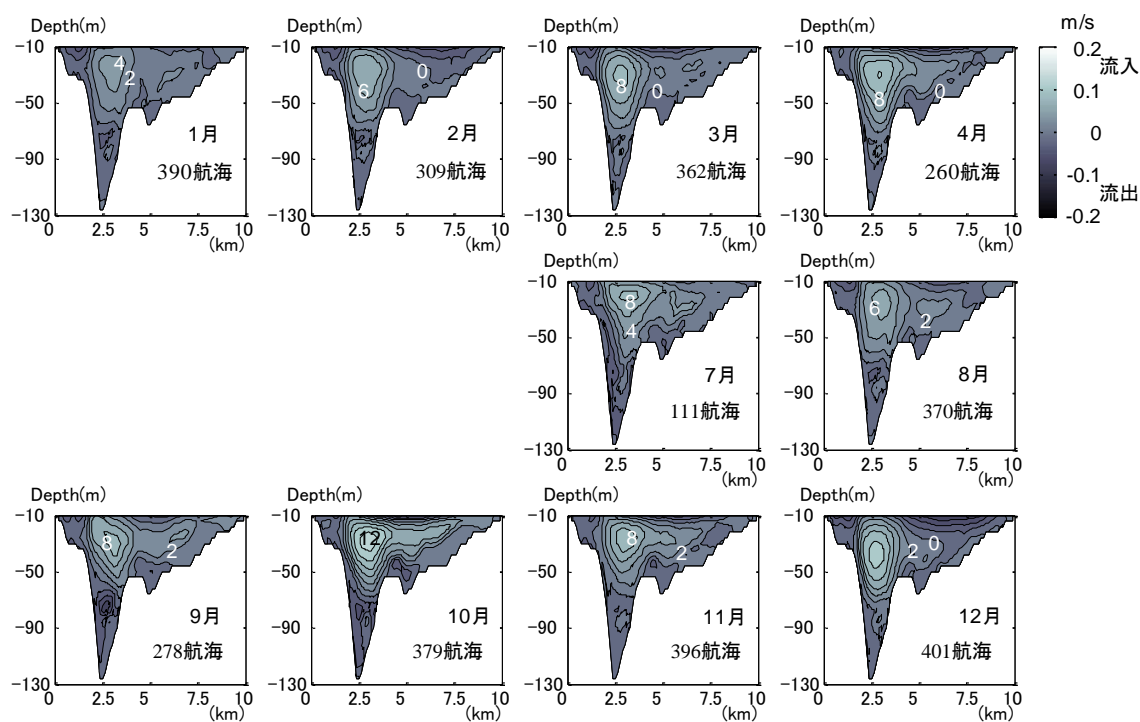


図-3.20(a) 残差流の月平均(2004 年)

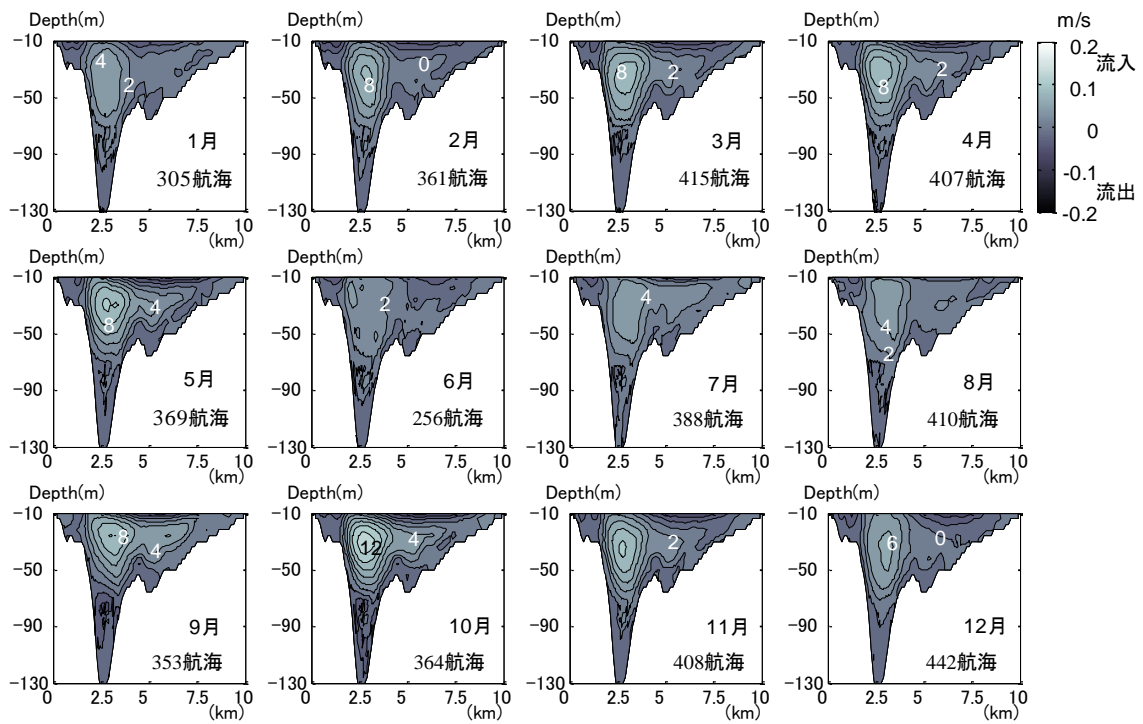


図-3.20(b) 残差流の月平均(2005年)

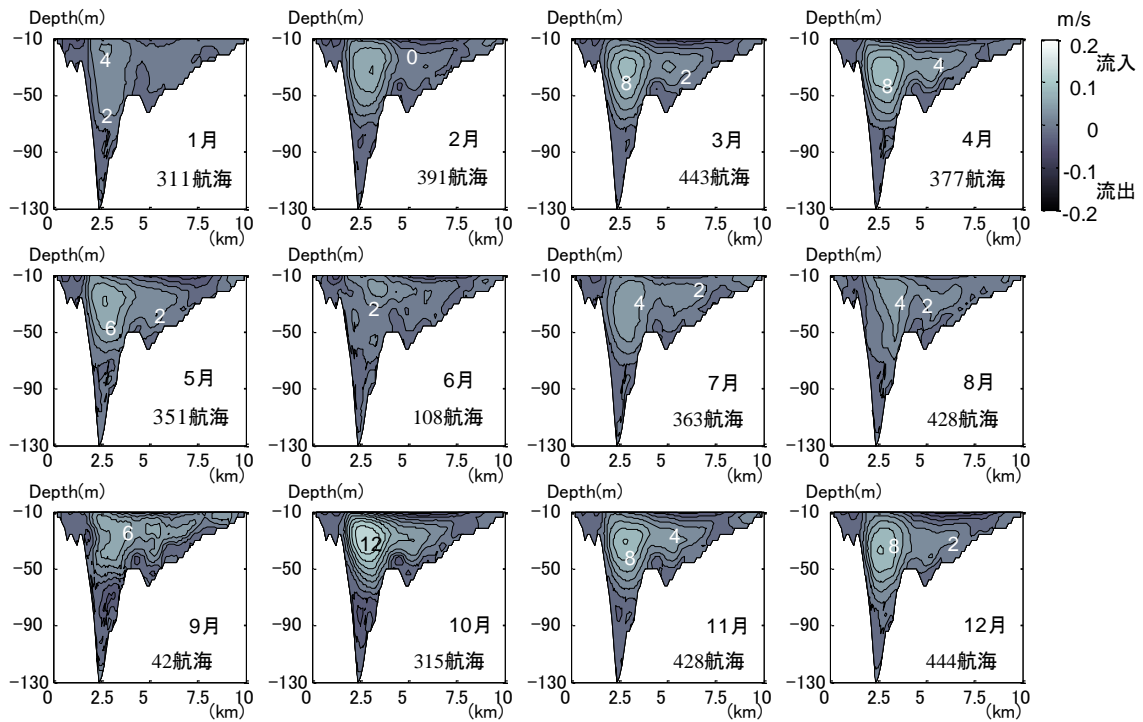


図-3.20(c) 残差流の月平均(2006年)

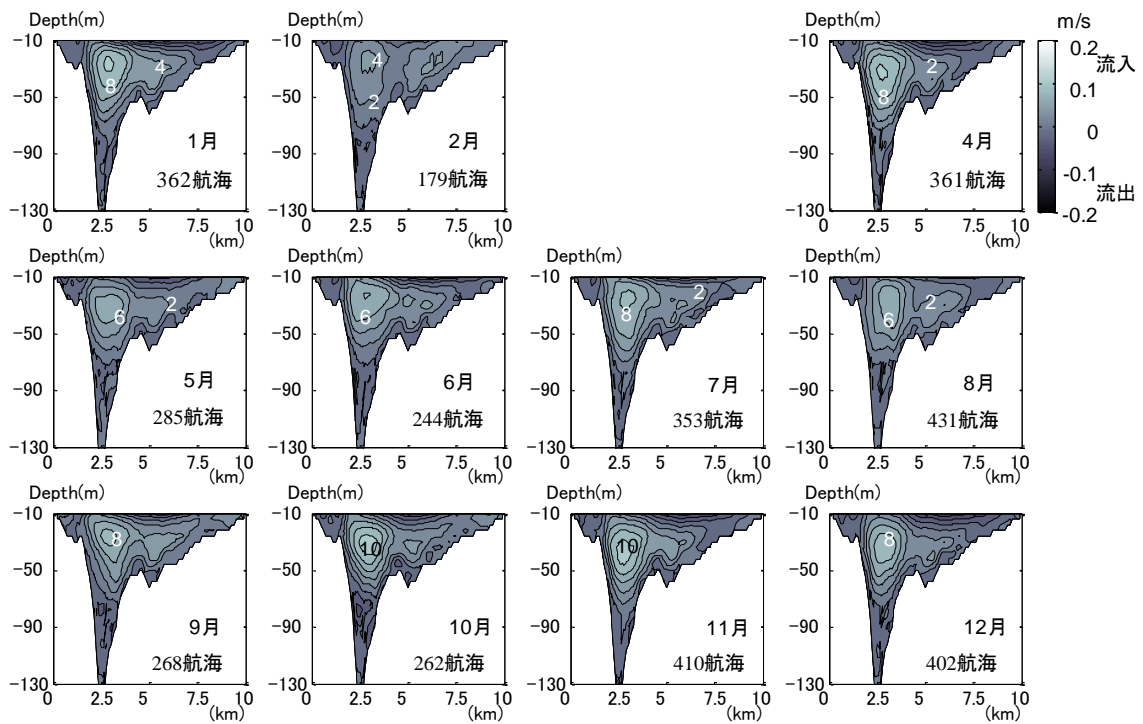


図-3.20(d) 残差流の月平均(2007 年)

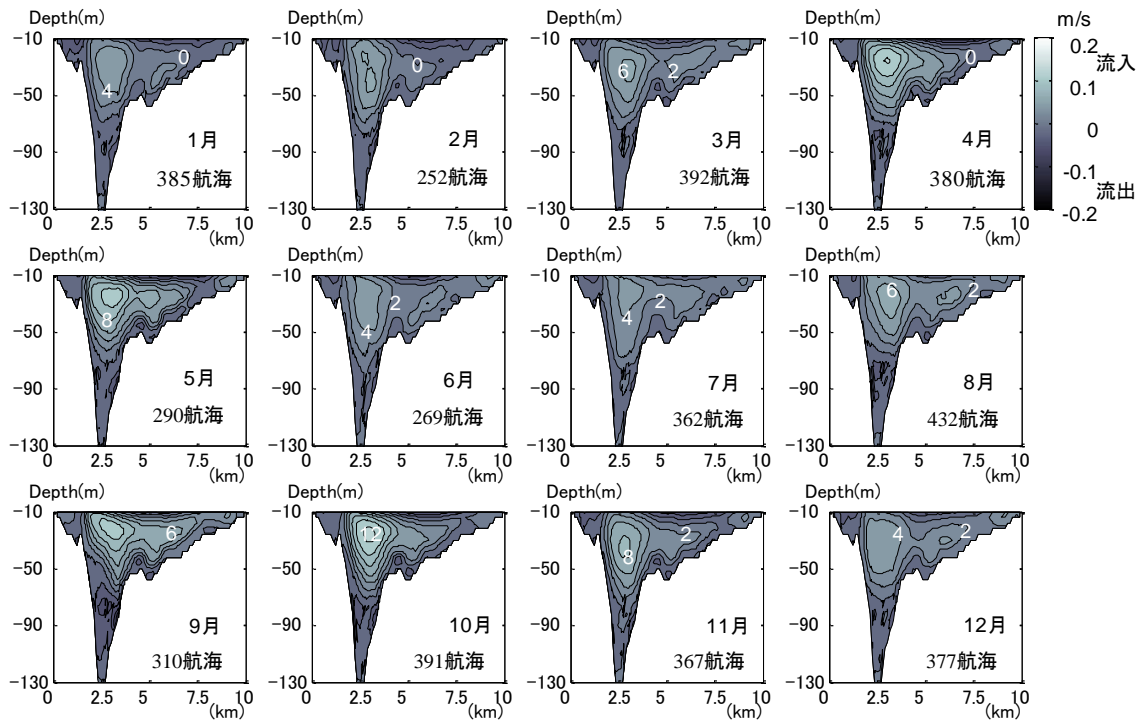


図-3.20(e) 残差流の月平均(2008 年)

### 3.2.7 海水交換量と海水交換日数

#### (1) 海水交換量と海水交換日数の定義

ここでは、フェリーの観測データから海水交換量と海水交換日数を求める。海水交換量や海水の滞留時間についてはいくつかの定義があり、高尾ら(2004)はそれらの定義について考察を行っている。ここではそれにならって、海水交換量と海水交換日数を定義する。

図-3.21 は簡単なボックスモデルの模式図であり、ボックスを湾内と湾外の2つに分けて考えている。このときの湾内の塩分の保存式と海水の保存式は以下のように表される。

$$V \frac{\partial S_1}{\partial t} = Q_{21} S_2 - Q_{12} S_1 \quad (3.1)$$

$$Q_{12} = Q_{21} + F_D \quad (3.2)$$

ここで、 $V$  は湾の体積( $\text{m}^3$ )、 $S_1$ 、 $S_2$  はそれぞれ湾内と外洋の塩分、 $Q_{12}$ 、 $Q_{21}$  はそれぞれ湾内から湾外、湾外から湾内に移動する海水の流量( $\text{m}^3/\text{s}$ )である。 $F_D$  は湾内に入る淡水流入量( $\text{m}^3/\text{s}$ )である。 $V$ 、 $S_1$ 、 $S_2$ 、 $F_D$  が分かれば、海水交換量  $Q_{12}$ 、 $Q_{21}$  が以下の式で求められる。

$$Q_{12} = \left( V \frac{\partial S_1}{\partial t} + F_D S_2 \right) / (S_2 - S_1) \quad (3.3)$$

$$Q_{21} = \left( V \frac{\partial S_1}{\partial t} + F_D S_1 \right) / (S_2 - S_1) \quad (3.4)$$

$Q_{12}$ 、 $Q_{21}$  は拡散も含んだ湾内と湾外の間の海水交換量であり、輸送係数と呼ばれる(宇野木・岸野, 1977)。また、海水の滞留時間  $\tau(\text{s})$  は以下の式で求める。

$$\tau = V / Q_{12} \quad (3.5)$$

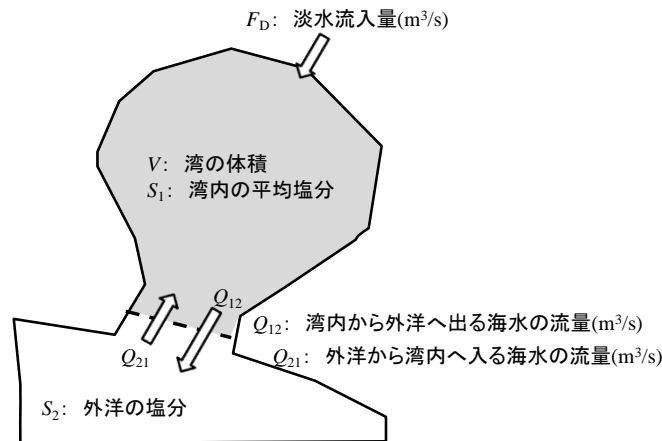


図-3.21 ボックスモデルの模式図

## (2) Flushing rate と Flushing time

海水交換の表現として, Flushing rate  $F_{FL}(\text{m}^3/\text{s})$  と Flushing time  $T_{FL}(\text{s})$ , Fractional freshwater concentration  $f_{FL}$  という表現がよく用いられる(Dyer, 1997; Officer & Kester, 1991). これらはそれぞれ次式で表される.

$$F_{FL} = V/T_{FL} = F_D/f_{FL} \quad (3.6)$$

$$T_{FL} = f_{FL}V/F_D \quad (3.7)$$

$$f_{FL} = (S_2 - S_1)/S_2 \quad (3.8)$$

1ヶ月平均のようなより長い時間スケールでは, その間の塩分変化が小さいものと考えられることから, ここでは準定常と仮定して,

$$\frac{\partial S_1}{\partial t} = 0 \quad (3.9)$$

とすると, 式(3.5)の海水の滞留時間  $\tau$  は Flushing time  $T_{FL}$  と同じになる.

$$\tau = V/Q_{12} = V(S_2 - S_1)/\left(V\frac{\partial S_1}{\partial t} + F_D S_2\right) \cong V(S_2 - S_1)/F_D S_2 = T_{FL} \quad (3.10)$$

### 3.2.8 フェリー観測による海水交換量と海水交換日数の季節変化

#### (1) 海水交換の時間スケール

2章で述べたように東京湾のような閉鎖性内湾では潮汐によるよりも淡水流入にともなう重力循環や風による吹送流などによって海水が交換されている. 2章で述べたように東京湾口では潮汐による流速振幅が  $0.5\text{m/s}$  以上にもなり,  $0.1\sim 0.2\text{m/s}$  程度の重力循環や吹送流は相対的に小さい. しかしながら潮汐では水塊がその場を往復するだけであるのに対し, 重力循環は一定の方向(表層流出・下層流入という方向)を持っており, 湾奥の低塩分水塊は表層を通過して徐々に外洋まで運ばれ, 反対に外洋の高塩分水塊は下層を通過して徐々に湾奥まで運ばれる. また, 風は頻繁に風向が変わるものの東京湾では季節風の影響で夏季は南よりの風が連吹し, 冬季は北寄りの風が連吹する. 年平均をとると夏と冬の風向きが相殺されて風速はほぼゼロになるが, 月平均程度であると準定常的な一定の向きの流れとなる. 東京湾では約1カ月で海水交換が起きていることから, 海水交換に対する淡水流入や風の影響を評価するには月平均程度の時間スケールが妥当だと考えられる. そのため, 以後の解析ではフェリーによる流速の観測データを1ヶ月平均して用いることとした.

#### (2) フェリー観測データからの海水交換量の推定

ADCP で計測された流速データを 1 ヶ月平均して得られる流量がボックスモデルの式(3.3)と(3.4)の  $Q_{12}$ ,  $Q_{21}$  に相当する. また, ボックスモデルでは海水の滞留時間を  $Q_{12}$  を使って求めることから, 海水交換量を  $Q_{12}$  で定義し, 以降では単に  $Q$  で表現する.

$$Q_{12} = \sum u_{in} \Delta A + F_D \quad (3.11)$$

$$Q_{21} = \sum u_{out} \Delta A \quad (3.12)$$

ここで, 小文字の  $u_{in}$ ,  $u_{out}$  はそれぞれ流入, 流出している場所の月平均残差流速  $u_R$  である. また,  $\Delta A$  は ADCP の時系列データを取り扱う各グリッドの面積であり, ここでは水平 125m×鉛直 4m の 500m<sup>2</sup> である.

また, 本論文では海水の滞留時間を日数に直して, 海水交換日数  $\tau$  (day) と定義する.

図-3.22 はフェリーの観測データから得た 2004 年～2008 年の月平均残差流速の季節変化であり, 5 年間の平均値をとともに示している. 全体に流出流速  $u_{in}$  が流入流速  $u_{out}$  よりも小さくなっているが, 流入流出量は足し合わせるとゼロに近くなることと, エスチュアリー循環の性質上, 流出量が大きくなると考えられる表層～水深 10m までのデータが ADCP では得られていないことから, 流出流速も流入流速と同程度の大きさだと考えられる.

この図からすると, 淡水流入の多い 9～10 月が最も平均流速が大きく, ついで 4～6 月が大きい. 一方, 1～3 月と 6～8 月の平均流速が小さい.

図-3.23 は, 式(3.6)で求めた各月の海水交換量  $Q$  である. 海水交換量は, 10 月が最大で 5 年平均で約 12,000(m<sup>3</sup>/s), 1 月が最小で約 6,200(m<sup>3</sup>/s)である.

図-3.24 は東京湾フェリーより北側の東京湾内の体積  $V(=1.82 \times 10^{10} \text{m}^3)$  を図-3.23 の海水交

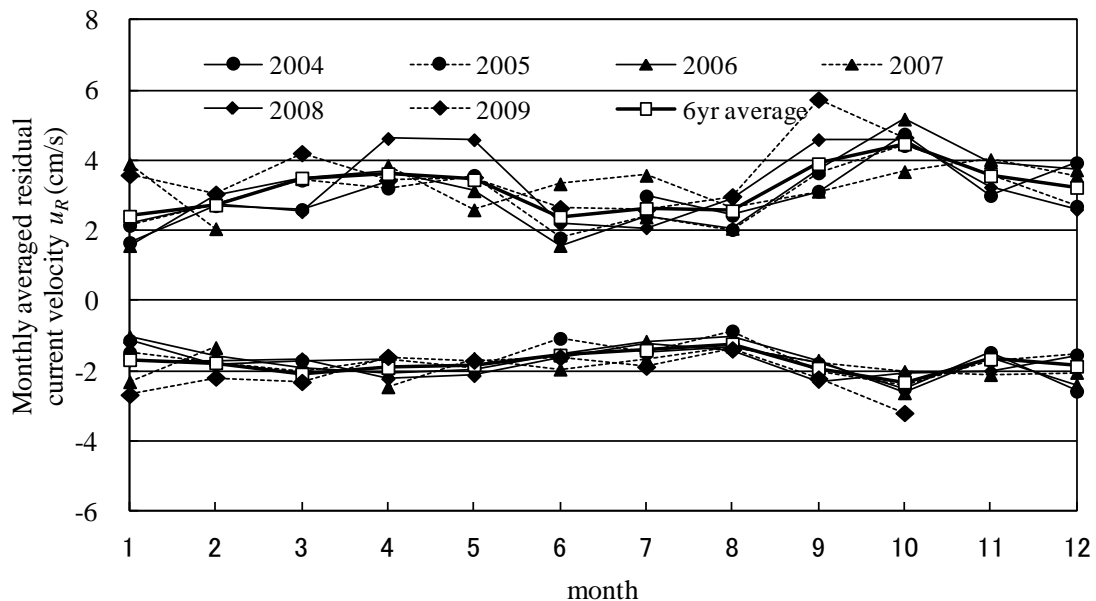


図-3.22 各月の流入流速と流出流速の平均値(2004 年～2009 年)

換量で除した海水交換日数である。1 月が 38 日と最も遅く、最も早い 10 月は約 18 日で交換している。この値は、2 章で述べた高尾ら(2004)、岡田ら(2007)が求めた滞留時間とほぼ一致する値である。

海水交換量は夏季 7～8 月にも極小値をとり、その大きさは冬季と同程度である。このことはこれまで言われてきた夏季の海水交換量が大きいという現象(宇野木, 1998)とは大きく異なる。貧酸素水塊が最も発達する重要な時期であることを考慮すると、この要因を調べるのが重要だと考えられるため、4 章以降で検討する。

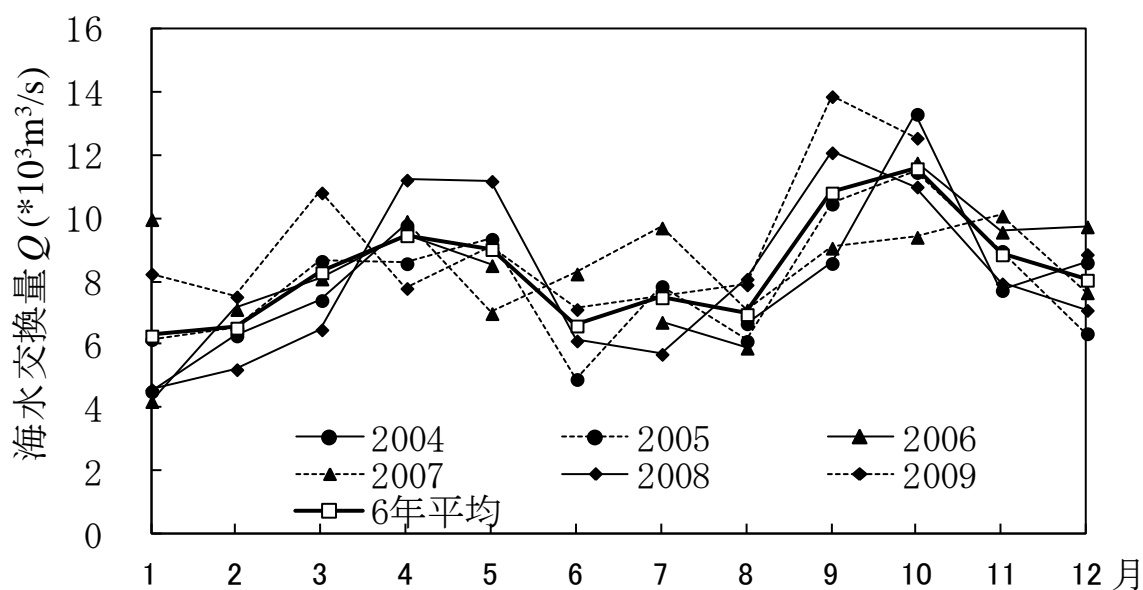


図-3.23 月平均海水交換量(2004 年～2009 年)

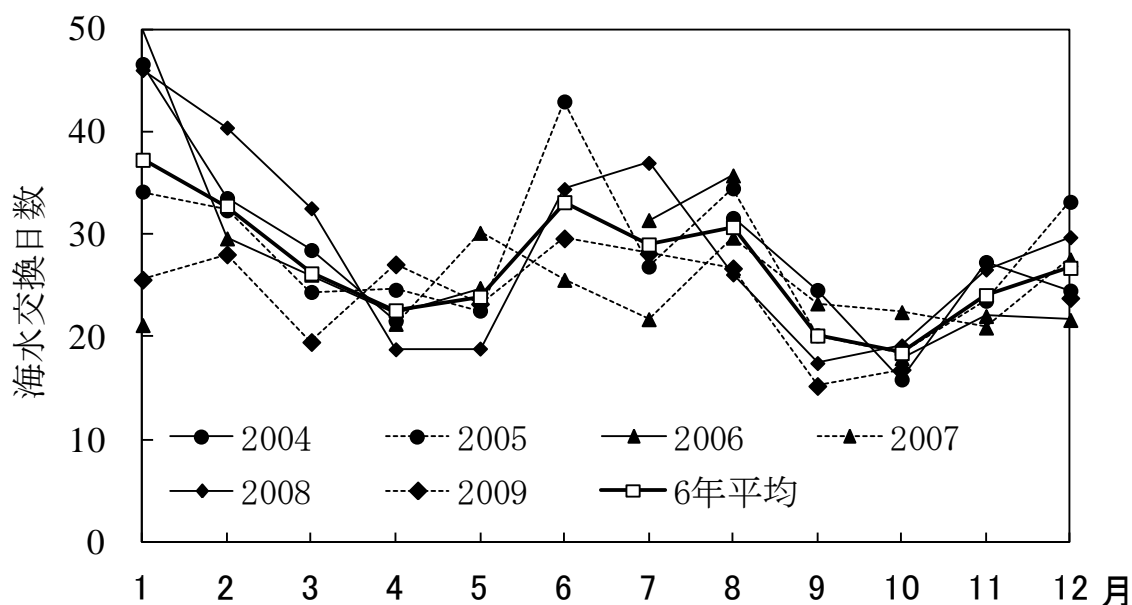


図-3.24 海水交換日数(2004 年～2009 年)



### 3.2.9 各季節の特徴的な現象

#### (1) 冬季の熱塩フロントと海水交換

##### a) 熱塩フロント

図-3.25 は, 2003 年 12 月 23 日～2004 年 3 月 31 日までの水温, 塩分,  $\sigma_t$ , クロロフィル a の変化である. 塩分, 水温は同じタイミングで上下し, 1～2 週間周期で変動しているのに対し, クロロフィル a は塩分, 水温と逆の傾向を示している.

図-3.26 は, 塩分水温が急激に上昇した 1 月 21 日の表層と断面の流速, 塩分, 水温, クロロフィル a と密度  $\sigma_t$  の分布である. 久里浜から 7km の位置では約 0.6m/s もの速さで内湾に流入する流れがあり, そこでの水温は 17°C と冬にもかかわらず暖かく, 塩分も 34.8PSU と高かった. このことから, 高温高塩分の外洋水が速い速度で流入していたものと考えられる. 一方, 久里浜港から約 3.5km の位置では流向が反転しており, 塩分水温はそこを境にそれぞれ 4°C, 1PSU ほど小さくなっており, 久里浜側では東京湾からの海水が流出していたものと考えられる.

久里浜から約 3.5km の位置で塩分・水温・クロロフィル a が急変する点では  $\sigma_t$  が極大値をとっており, 熱塩フロント(柳, 1989)の特徴を持っている.

図-3.27 は, 2004 年 1 月の水温塩分,  $\sigma_t$ , クロロフィル a, および流況の水深 10,20,40,60m の実測値と残差流, さらに潮位, 波浪エネルギーフラックス, 降雨量, 日射, 気圧, 湿度, 南北東西風速の変化を示すものである. 水温等の水質と流況は, 久里浜から金谷までのフェリーで計測された全データがプロットされている. 流速は東京湾へ流入する向きを正として赤で表示し, 流出する向きを負として青で表示している. フェリーで計測された気象データ(日射, 気圧, 湿度, 風速)は 1 航海の平均値が載せてあり, 1 月 1 日～13 日は欠測している. なお, 潮位と波浪は当所海洋情報研究室で計測されている久里浜港の潮位と湾口アシカ島の波浪データであり, 降雨量は国交省の水文水質データ([http:// www1.river.go.jp/](http://www1.river.go.jp/))のうち, 多摩川流域の観測所の平均降雨量である.

夜間はフェリーが航行しないため, 水質, 流況, 気象の実測値はデータが抜けた形となっている. また, 1 月 22～23 日は低気圧の通過にともなって, フェリーが欠航している. 残差流成分は, 赤池ベイズ型情報量基準(ABIC)(Akaike, 1980)を用いて推定しており(鈴木ら, 2006), 残差流成分は時間的になだらかであるという仮定を用いて夜間の欠測部分も推定している.

水温と塩分が 1 月 6～7 日, 1 月 14 日, 1 月 21 日～30 日に上昇しており, 外洋水が流入してきているものと考えられる. このときの残差流は塩分水温が上昇する際に金谷側から中央部にかけて流入しており, 特に 1 月 21 日と 1 月 26 日の流速が大きい.

$\sigma_t$ を見ると, 1 月 7 日, 14 日の前後, 16～20 日, 25 日, 29～31 日は,  $\sigma_t$ が大きくなっており, このような場所にフロントがあったのではないかと推定される.

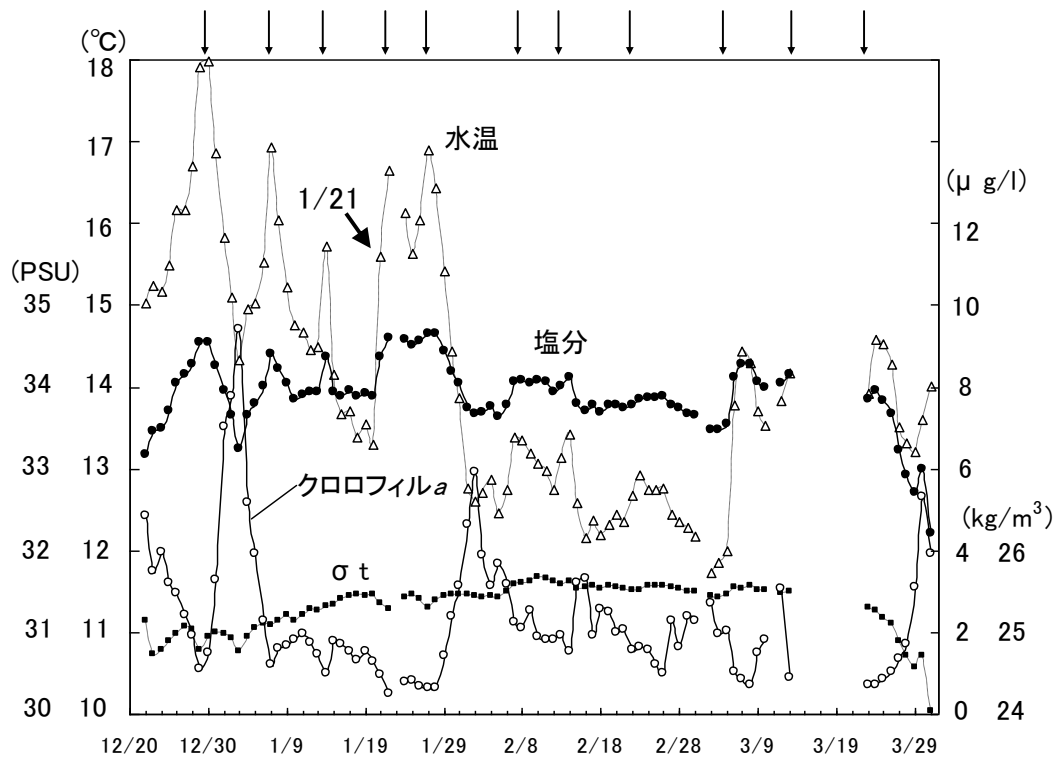


図-3.25 2004 年冬季の塩分, 水温,  $\sigma_t$ , クロロフィル *a*

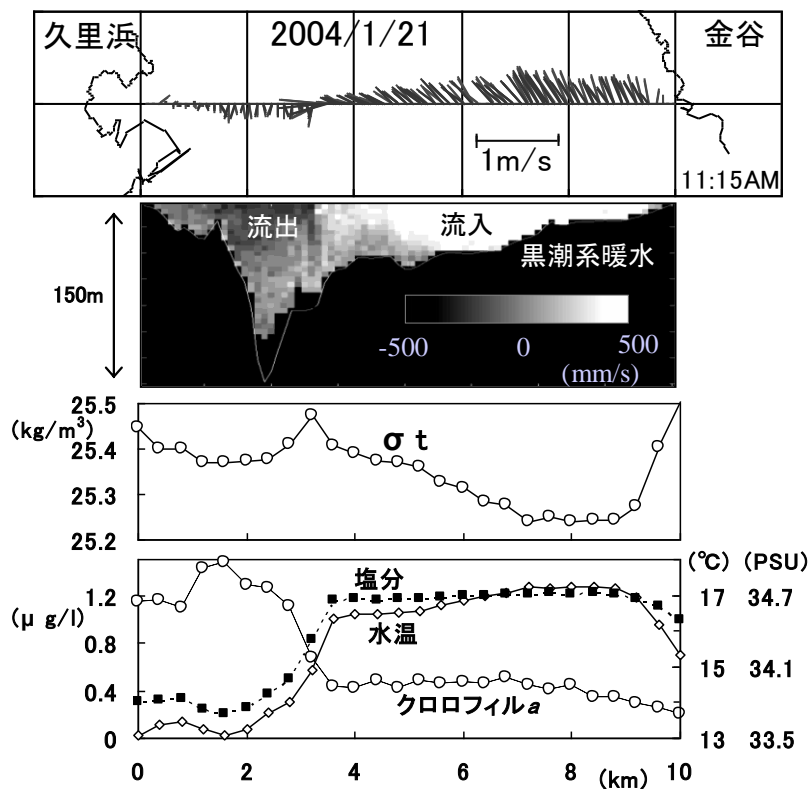


図-3.26 冬季の高温, 高塩分, 低クロロフィル *a* の外洋水の流入とフロント

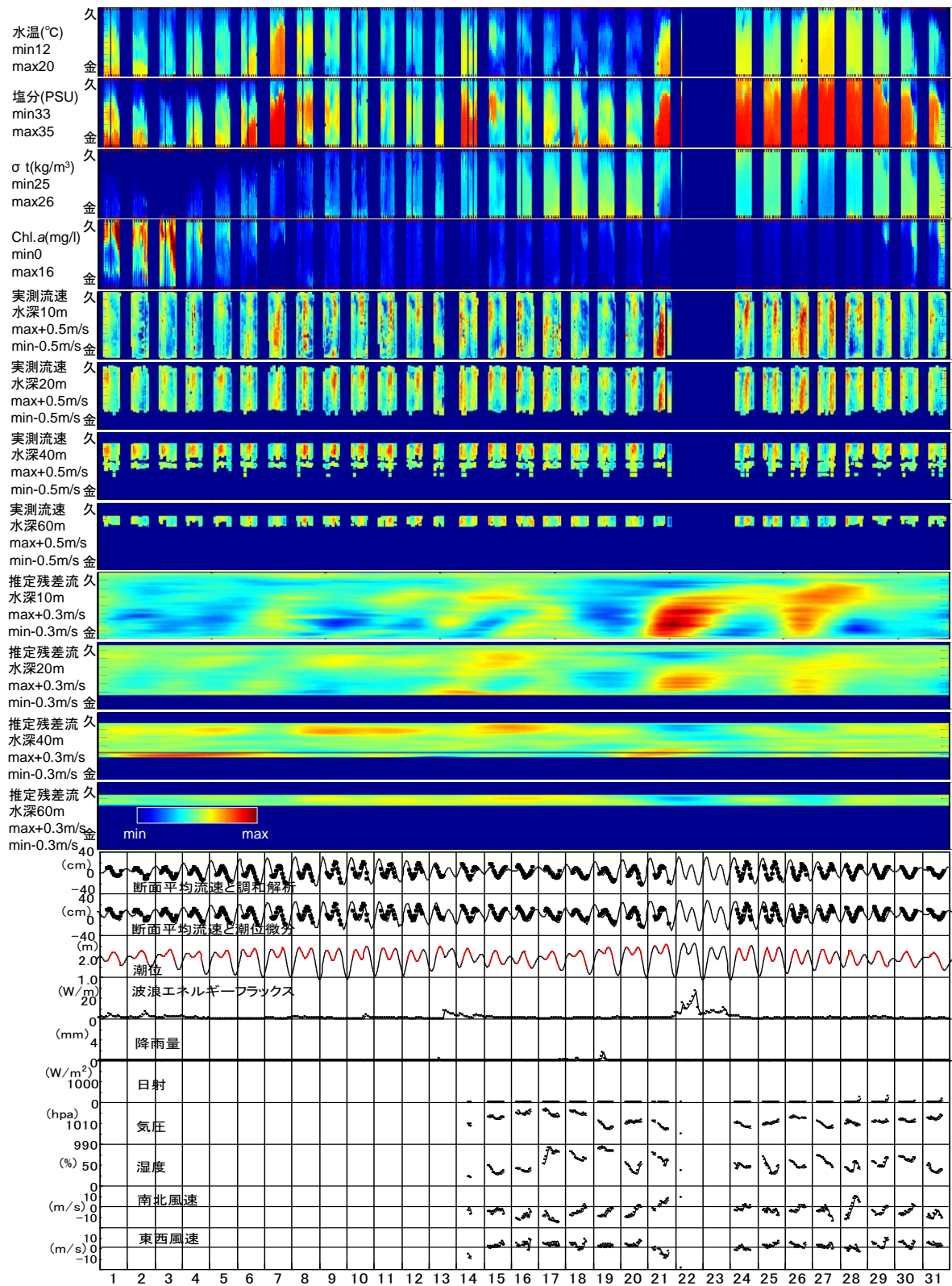


図-3.27 冬季の水質・気象・流況の変化 (2003 年 12 月～2004 年 1 月)

12 月 28 日, 1 月 7, 14, 21, 26 日に外洋水が流入

## b) 冬季の海水交換量に及ぼす外洋水の影響

図-3.28 は 2008 年 1 月の日々の日平均残差流である。図には日々の海水交換量  $Q(\text{m}^3/\text{s})$  から換算した海水交換日数も載せている。ここではこれを換算海水交換日数と呼ぶ。1 月 1 日～5 日は表層流出、下層流入であり、1 月 6 日に千葉県側から強い流入、神奈川県側から流出が見られ、その後 8 日まで表層流入、下層流出となり、5 日までとは異なっていた。1 月 6 日の換算海水交換日数は 17.4 日と小さく、海水交換が大きかったことが分かる。1 月 10 日以降になると再び表層流出、下層流入になった。このような千葉県側からの強い流入とその後の表層流入、下層流出は 1 月 26 日、30 日にも見られた。

図-3.29 は 2008 年 1 月のフェリーで計測された塩分と水温であり、1 月 7～11 日、26～31

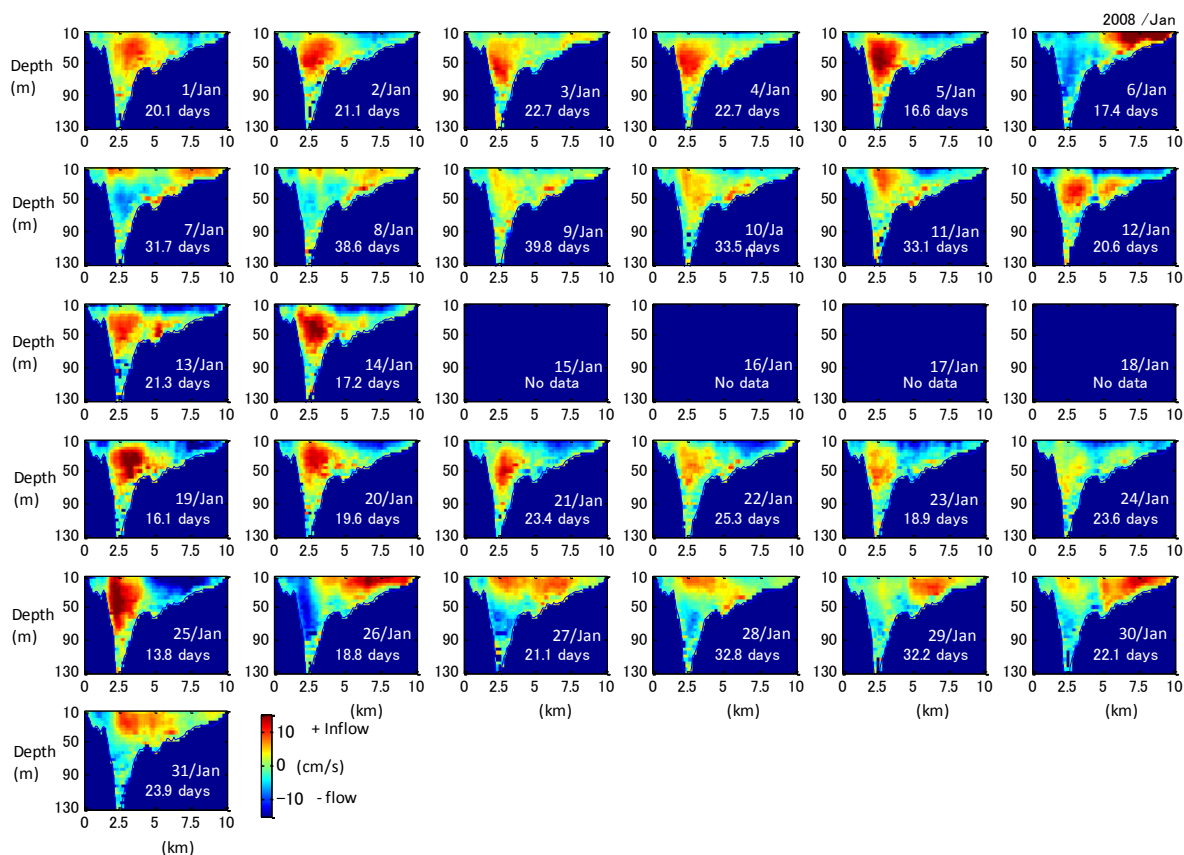


図-3.28 2008 年 1 月の日平均残差流

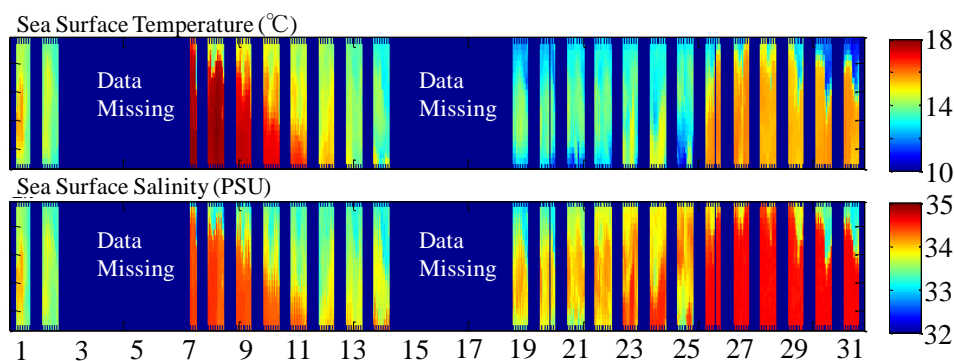


図-3.29 2008 年 1 月のフェリーで計測された表層の水温と塩分

日は表層の水温・塩分が高く、黒潮系暖水が東京湾に波及していることを示している。また、6日、26日のような強い流入の後、高温・高塩分水塊が1週間近く湾口にとどまっていることが分かる。

図-3.30を見ると、1月6日の流入時には湾軸方向風速が小さいのに対し、1月26日はその前後で10m/s近い強い北東風が吹いており、黒潮系暖水の流入には風は影響していないものと考えられる。また、1月は淡水流入量の変化も小さく、黒潮系暖水の流入には淡水流入の影響も小さいことが分かる。

図-3.31(a)は2008年1月の月平均残差流である。水深約30mを中心に流入し、表層と下層で流出するという3層構造になっている。一方、図-3.31(b)は黒潮系暖水の流入のあった1月6,7,8,9,26,27,28,29,30日のデータを除いた平均残差流である。流入水深が若干深くなるとともに、コントラストが強くなっている。図-3.31(a)の月平均流量が $4763\text{m}^3/\text{s}$ なのに対し、図-3.31(b)は $7288\text{m}^3/\text{s}$ (差は約 $2500\text{m}^3/\text{s}$ )だった。黒潮系暖水流入時はそれ以外の時と残差流の流向が異なるため、月平均すると差し引きされて、月平均残差流が小さくなっている。

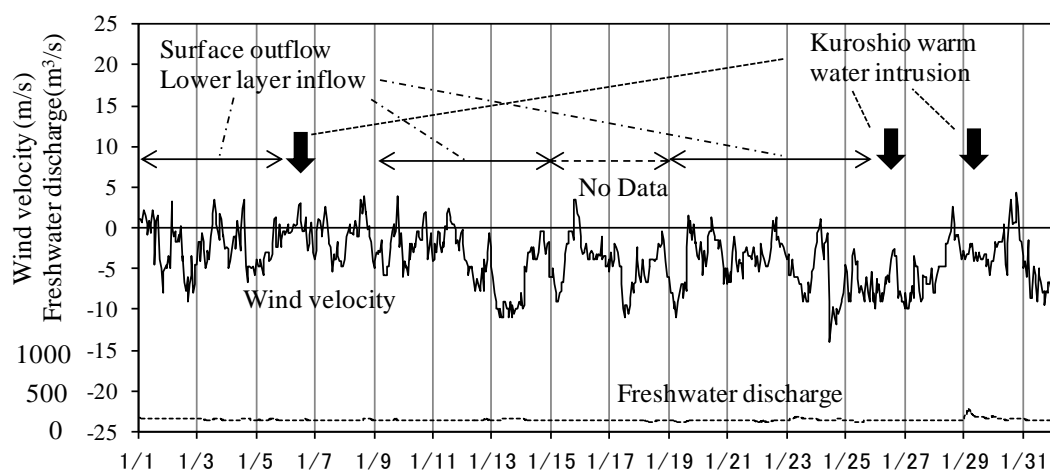


図-3.30 2008年1月の湾軸方向風速(マイナスが北東風)と淡水流入

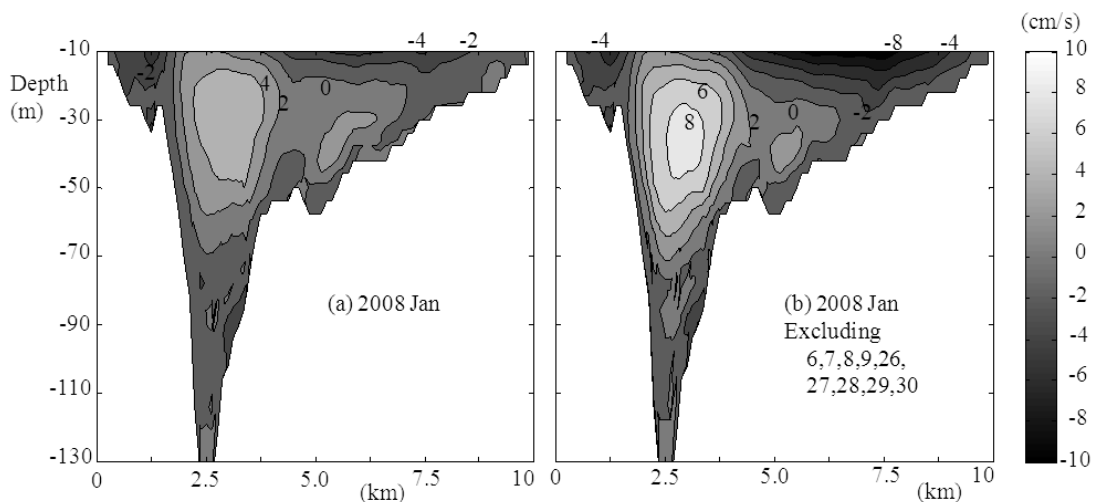


図-3.31 2008年1月の月平均残差流(a)と黒潮系暖水流入時を除いた平均残差流(b)

## (2) 夏季の海水交換について

図-3.32 は日々の日平均残差流である。7 月 5 日～6 日は上層流出・下層流入であるのに対し、7 日以降は流入位置が徐々に上昇し、9 日～12 日にかけては上層流入・下層流出になった。13 日には向きが逆転して 14 日まで上層流出・下層流入である。また、21 日～24 日になると再び強い上層流入・下層流出が見られる。

図-3.33 は、2008 年 7 月の湾軸方向風速と淡水流入量の時系列である。7 月は大きな出水が無く淡水流入量はあまり大きくなかった。一方、湾軸方向風速はプラス(南西風)の日が多く、図-3.32 で上層流入となっている日は南西風が数日連吹した日に見られた。特に 7 月 22 日～24 日は約 10m/s の風が連吹し、その後、23 日～24 日に強い上層流入が見られた。

図-3.34(a)は 2008 年 7 月の月平均残差流である。水深約 20m を中心に流入し、表層と下層で流出するという 3 層構造になっている。一方、図-3.34(b)は表層流入となっていた 7 月 11,12,18,22,23,24,28,29,30 日のデータを除いた平均残差流である。流入水深が約 30m と深くなりコントラストも強くなっている。図-3.34(b) の月平均流量は  $8585\text{m}^3/\text{s}$  だったのに対し、図-3.34(a)では  $6126\text{m}^3/\text{s}$  であり、南西風で約  $2500\text{m}^3/\text{s}$  減少したことになる。

このように夏季は強い南西風が吹き、表層流入・中層流出・下層流入となる日がある。そのため、表層流出・下層流出という重力循環がこのような南西風によって弱められ、月平均の断面残差流を求めると海水の流入位置が浅くなるとともに海水交換量が低下する。

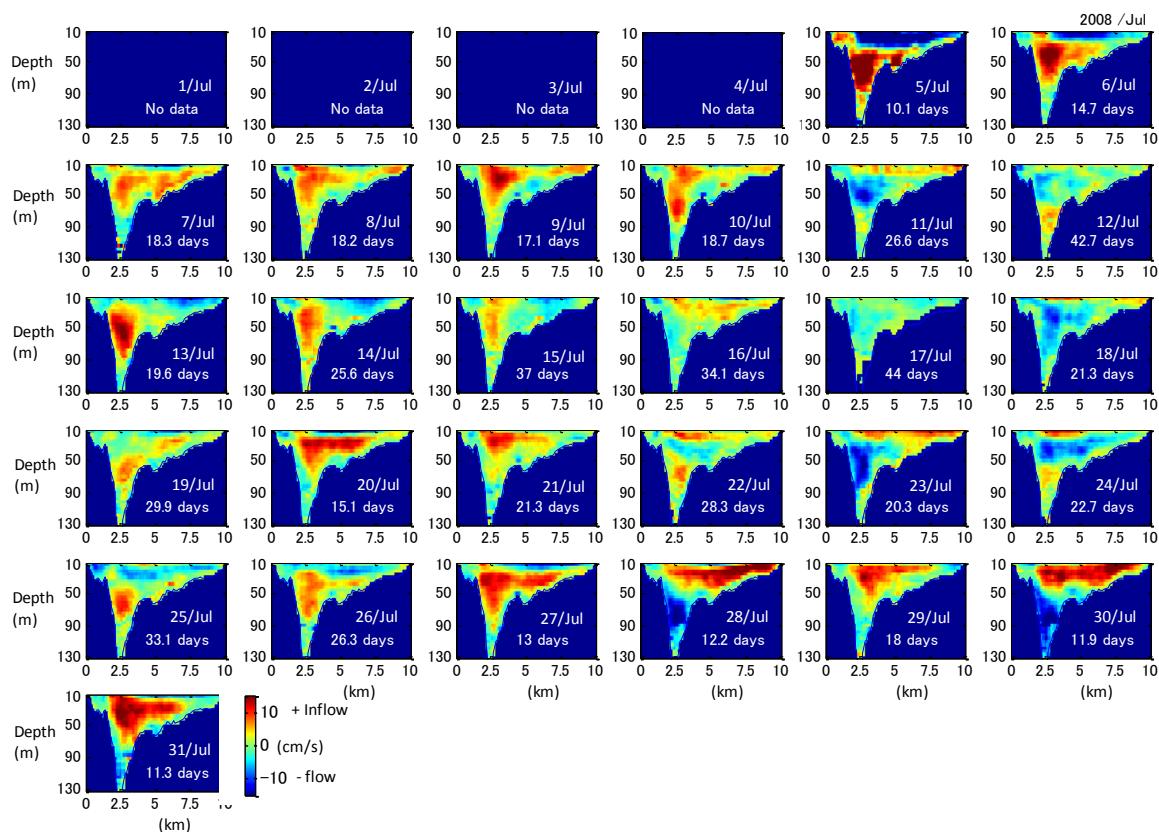


図-3.32 2008 年 7 月の日平均残差流

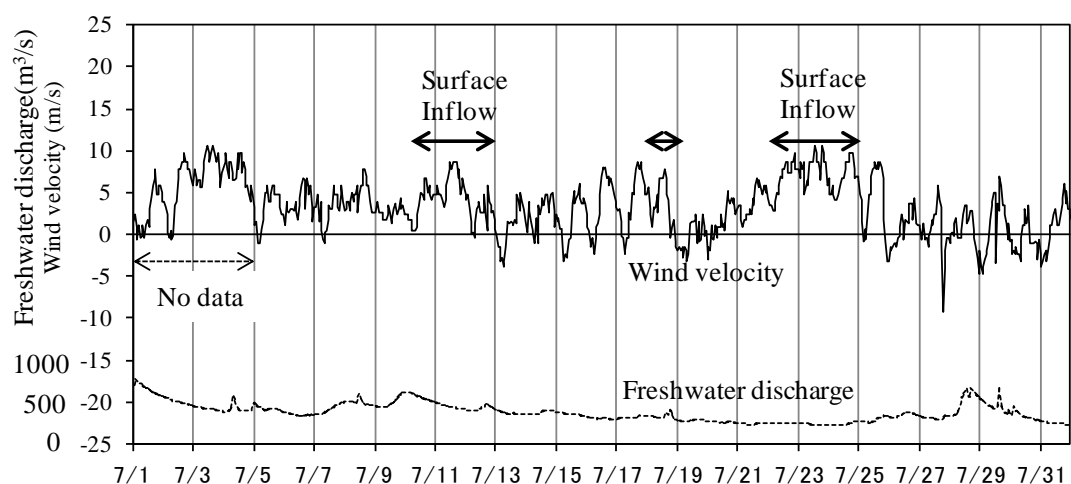


図-3.33 2008 年 7 月の湾軸方向風速(プラスが南西風)と淡水流入量

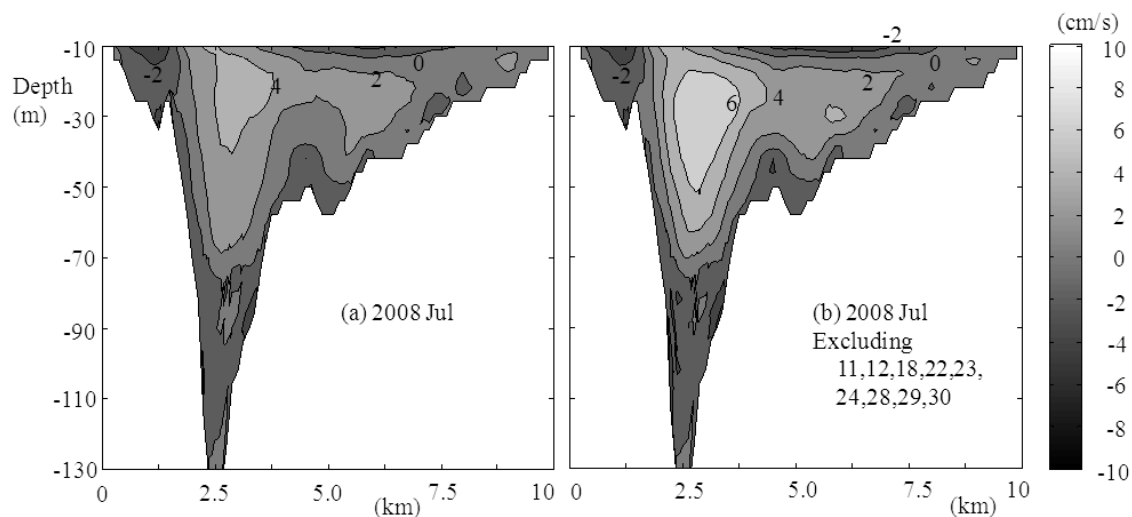


図-3.34 2008 年 7 月の月平均流速(a)と表層流出の強かった日を除いた平均流速(b)

図-3.35 は、2005 年 6 月 11 日～8 月 31 日の 1 日平均の塩分、水温、密度  $\sigma_t$ 、クロロフィル  $a$ 、南北風速(南風が正)、多摩川流域平均降雨量である。南風となっていた日が多く、約 1～2 日遅れて塩分と密度が上昇、水温とクロロフィル  $a$  が下降する傾向にある。

特に台風 11 号が首都圏を通過する前の 8 月 18 日～23 日にかけて風速約 10m/s の南風が連吹しており、これにより湾口に高塩分・高密度で、内湾に比して低温・低クロロフィル  $a$  の外洋水が進入してきたものと考えられる。

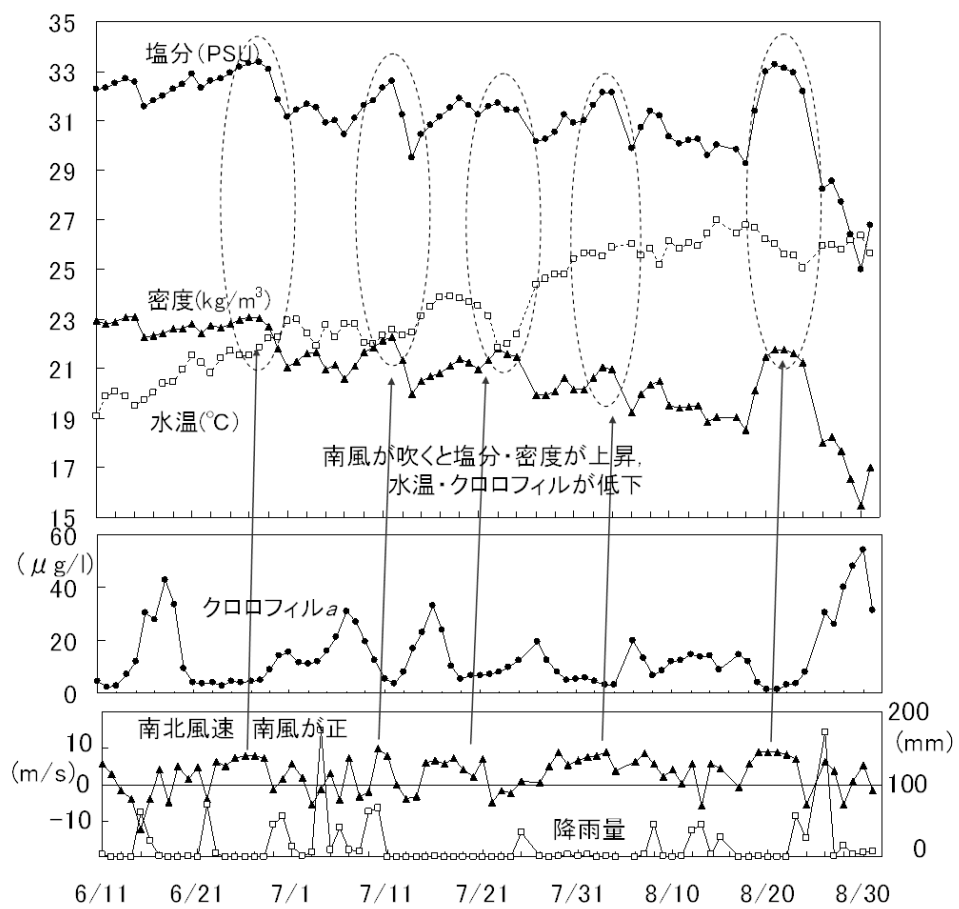


図-3.35 2005 年夏季 塩分・水温・クロロフィル *a* と海上風, 降雨量との関係



### (3) 秋季の外洋水の中層貫入について

図-3.36 は 2004 年秋の降雨量, 風速と水質の関係である. 2004 年秋は台風が頻繁に関東地方に来襲し, 秋雨前線も含めて淡水流入の回数が多かった. 降雨量と水質を比較すると, 数日遅れて塩分, 密度が低下しており, 内湾から低塩分, 低密度の海水が流出していることが分かる. また, 11 月以外は, このような淡水流入にあわせてクロロフィル *a* が増加した.

なお, 9 月 20 日前後は約 10m/s の南風が吹いており, 吹送流が発達して塩分が上昇している.

図-3.37 は, 多摩川流域の降雨量と湾口の表層塩分の低下との相互相関であり, 縦軸が相互相関, 横軸が時間差を示しており, 相互相関は以下の式(3.13)で計算した.

$$C_{SR}(\tau) = \int (34 - S(t + \tau)) * w(t) dt \quad (3.13)$$

$$[C_{SR}]_{max} = \max [C_{SR}(\tau)] \quad (3.14)$$

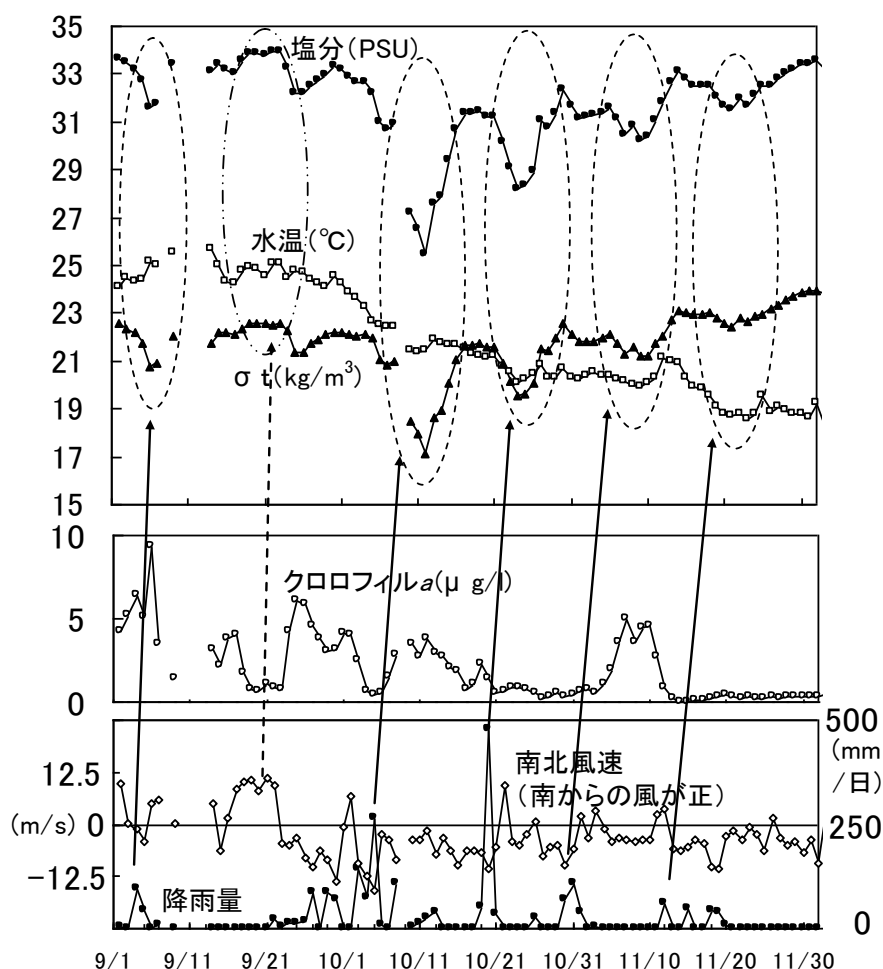


図-3.36 2004 年秋の降雨量, 風速と水質の関係  
(降雨後, 数日遅れて塩分密度が低下し, クロロフィル *a* が増加している)

ここで、 $t$ は時間(日)、 $\tau$ は相互相関を出す際の時間差(日)、 $w(t)$ は多摩川流域の11地点の日平均降雨量(mm/日)、 $S(t)$ は湾口での1日の平均塩分(PSU)であり、塩分の低下量は34PSUからの差として計算している。また、相互相関は $C_{SR}(\tau)/[C_{SR}]_{max}$  というように、その最大値で除して無次元化している。

降雨量と湾口表層塩分低下量の相互相関は約3～5日後に最大となり、降雨の後、約3～5日後に湾口の表層塩分が低下する傾向にあることが分かる。

図-3.38 は、多摩川の石原で計測された河川流量と湾口の表層塩分低下量との相互相関である。相互相関は、上式(3.13)の  $w(t)$  を多摩川の1日平均流量として求めた。

相互相関は約2～3日後に相互相関が最大となっており、多摩川河口から約2～3日後に淡水の大部分が湾口に到達していたのではないかと考えられる。降雨は河川流域だけでなく、東京湾の海表面自体にもあるため、塩分の低下が河川起源だけとは限らないものの、上図からすると比較的速く河川起源の淡水が湾口に到達しているもの推測される。

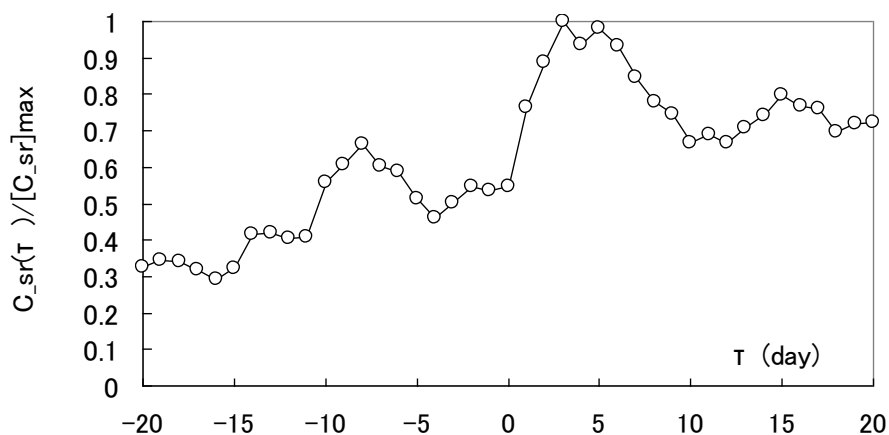


図-3.37 多摩川荒川流域の降雨量と湾口表層塩分低下量との相互相関

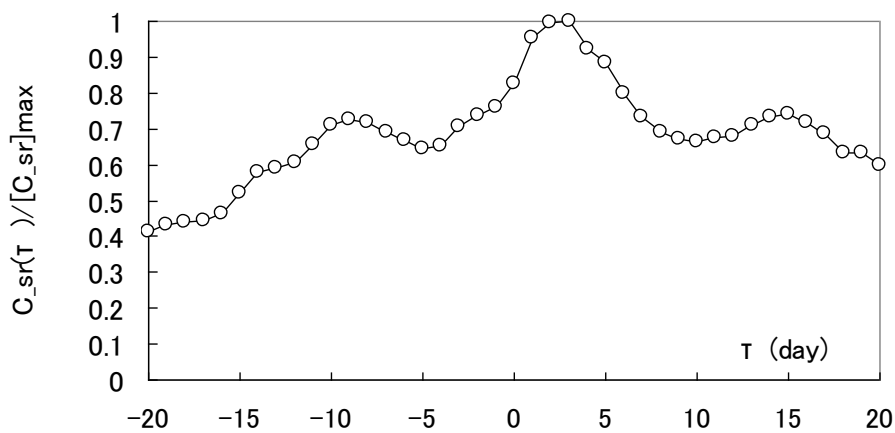


図-3.38 多摩川石原の河川流量と湾口表層塩分低下量との相互相関

図-3.39 は、台風 22 号による塩分低下が見られた 10 月 10 日 16 時頃の断面実測流速である。特徴的な外洋水の流入状況であり、表層流出、中層流入、下層流出という、いわゆる中層貫入(日向ら, 2001)となっている。塩分水温は、表層の流出速度が最も大きい久里浜から 5~6km の位置で最小値となっており、金谷側では比較的塩分水温が大きくなっている。このように中層貫入する場合も、金谷側では塩分水温が高くなっている場合が多く、外洋水が表層に表れるという特徴がある。

図-3.40 は、台風による淡水流入が頻繁に起きた 2004 年 10 月の水温塩分、 $\sigma_t$ 、クロロフィル a、および流況の水深 10m, 20m, 40m, 60m の実測値と残差流、さらに潮位、波浪エネルギーフラックス、降雨量、日射、気圧、湿度、南北東西風速の変化である。2004 年 10 月は、10 月 3 日に秋雨前線、10 月 9 日に台風 22 号、10 月 20 日に台風 23 号が通過し、その後に塩分の低下が見られる。なお、台風通過に伴って荒天となり、フェリーが欠航している。

残差流を見ると、10 月 4~6 日、10~31 日にかけて、表層から流出、中層から流入している。深さ方向の塩分、水温データが無いため、推測しかできないものの、これまでの日向ら(2001)の観測などから類推すると、表層から低塩分、低密度の内湾水が流出し、中層から高塩分、高密度の外洋水が流入しているものと考えられる。

一方、10 月 4~6 日にかけては、表層でその他の期間より強い流出傾向にあり、千葉側でも表層から流出している。3~5 日にかけて、日平均風速が 10m/s を超える北風が吹いており、流出速度が速くなったとも考えられる。

10 月 7~9 日のように中層貫入が弱い日もあるものの、10 月、11 月のほとんどの日が中層貫入となっていた。

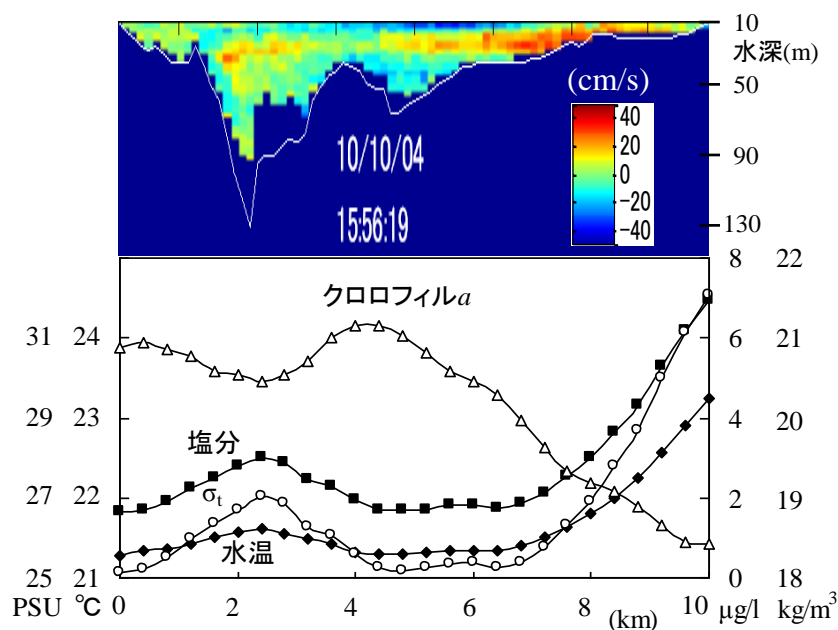


図-3.39 秋の外洋水の中層貫入(2004 年 10 月 10 日)

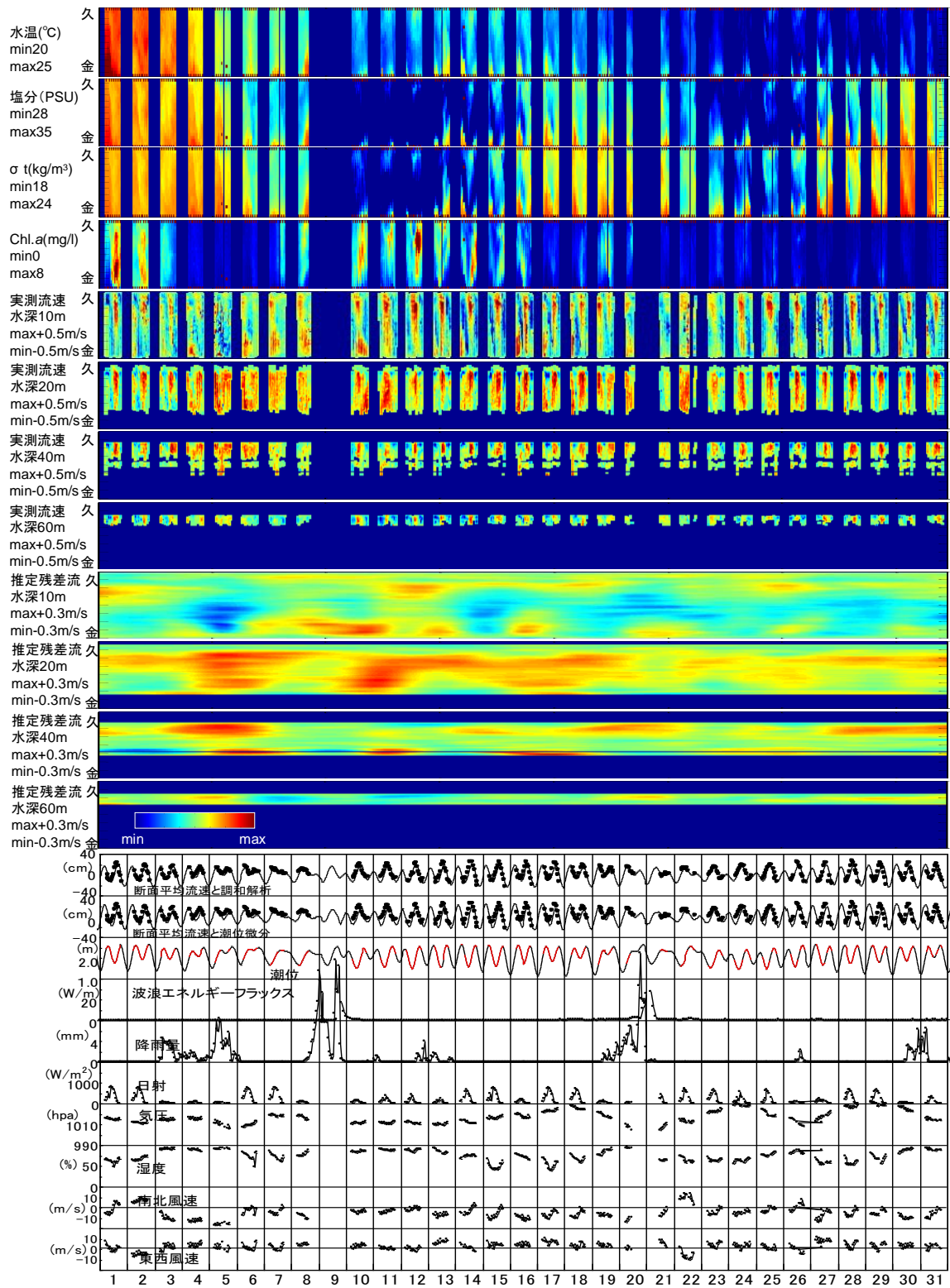


図-3.40 秋季の水質・気象・流況の変化(2004年10月)

### 3.3 HF レーダーによる東京湾表層流速の連続観測

#### 3.3.1 HF レーダーによる東京湾表層流速の長期連続観測

HF レーダーによる東京湾の海表面の観測は 1998 年頃から実施され、M2 分潮の解析などが実施されてきた(日向ら, 2005). その後, 関東地方整備局横浜港湾空港技術調査事務所によって連続観測が実施され, 2005 年 11 月からのデータが東京湾環境情報センター(<http://www.tbeic.go.jp/>)で公開されている. ここではそのうち 2006 年から 2009 年の HF レーダーによる観測データを解析した.

#### 3.3.2 潮流楕円

図-3.41 は 2008 年の観測データに対して 8 分潮の調和解析を実施して求めた M2 分潮の潮流楕円である. 潮流楕円が全体に湾軸方向に並んでいるのが分かる.

ただし, 富津岬周辺のデータが全体に精度が悪い. 千葉, 習志野, 横浜, 走水の 4 局で計測された潮流楕円(日向ら, 2005)と比較すると, 今回の観測データは湾口の潮流楕円が異なっている(富津岬を回り込むような潮流楕円となっていない). これは, HF レーダーの観測システムが千葉局, 船橋局, 大黒ふ頭局の 3 局のみで構成されており, 湾口周辺に観測局が無いためだと考えられる.

なお, 潮流楕円の向きと大きさは 2006~2009 年の 4 年間を通してほとんど変化がない.

#### 3.3.3 残差流

図-3.42 は, 観測データから調和解析で得られた天文潮成分を除いて 1 ヶ月平均をとった月平均残差流である. な図中 Mean は以下の式(4.1)を満たす図-3.41(a)に示すラインより南側の湾央から湾口の観測データの平均値を出したものであり, S.D.はその標準偏差である.

$$(\text{緯度}) < (35.2-35.6)/(140.1-139.6)*((\text{経度})-139.6)+35.6 \quad (4.1)$$

いずれの年も 5 月~9 月にかけて東京湾横断道路よりも北側の湾奥で時計回りの循環流が見られる. この循環流は冬季になると小さくなるが, 1 月や 2 月でも小さいながらも循環が見られる場合が多い.

一方, 東京湾横断道路よりも南側では全般に湾口に向かう流れとなっている. 夏以外は湾口へ向かう約-10~20cm/s の流れ(マイナスが湾口に向かう流れ)が見られるのに対し, 夏季の 6~8 月は流速が小さく 2009 年 7 月には流れの方向が逆転し湾奥へ向かう流れとなっている. また, 夏季に湾口へ向かう流れが小さくなると上記の時計回り循環流の中心が東京港沖から千葉港沖へと移動する傾向にある.

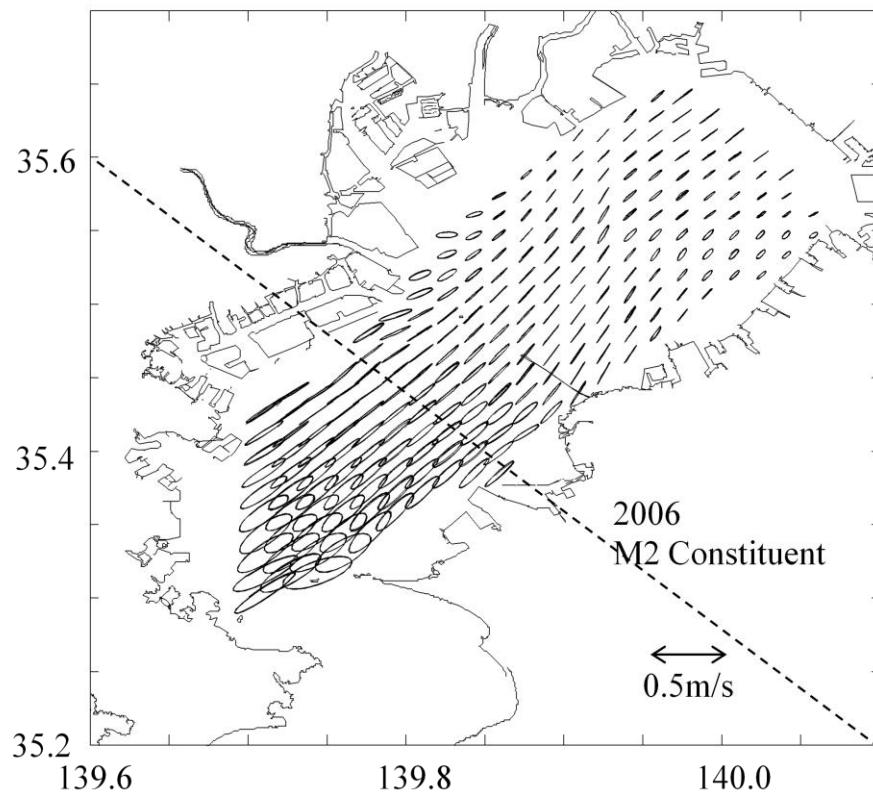


図-3.41(a) HFレーダーによって計測された2006年のM2潮流楕円

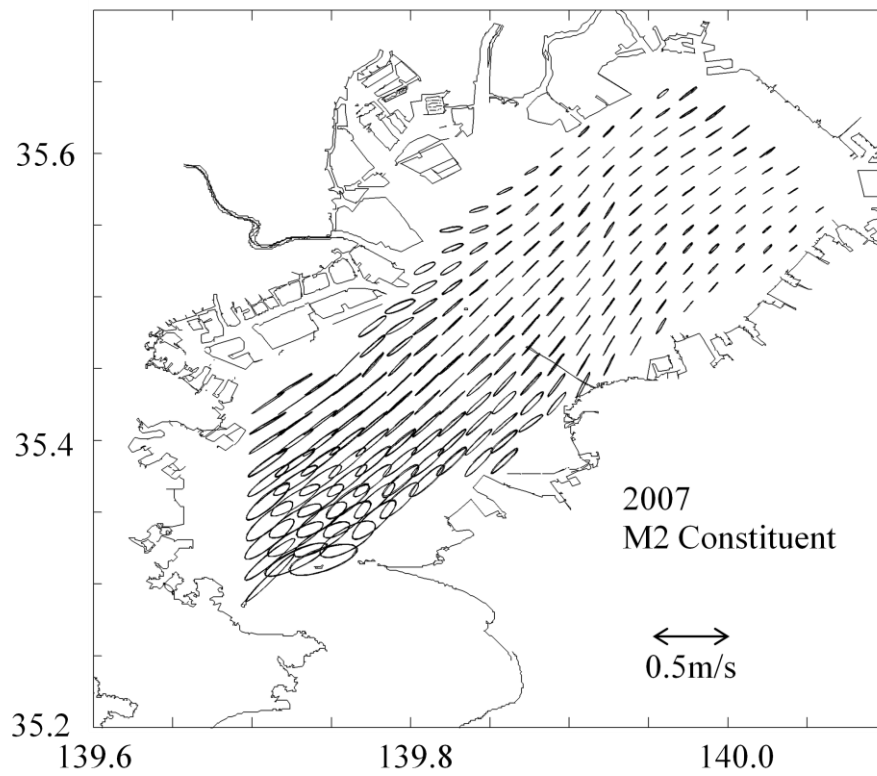


図-3.41(b) HFレーダーによって計測された2007年のM2潮流楕円

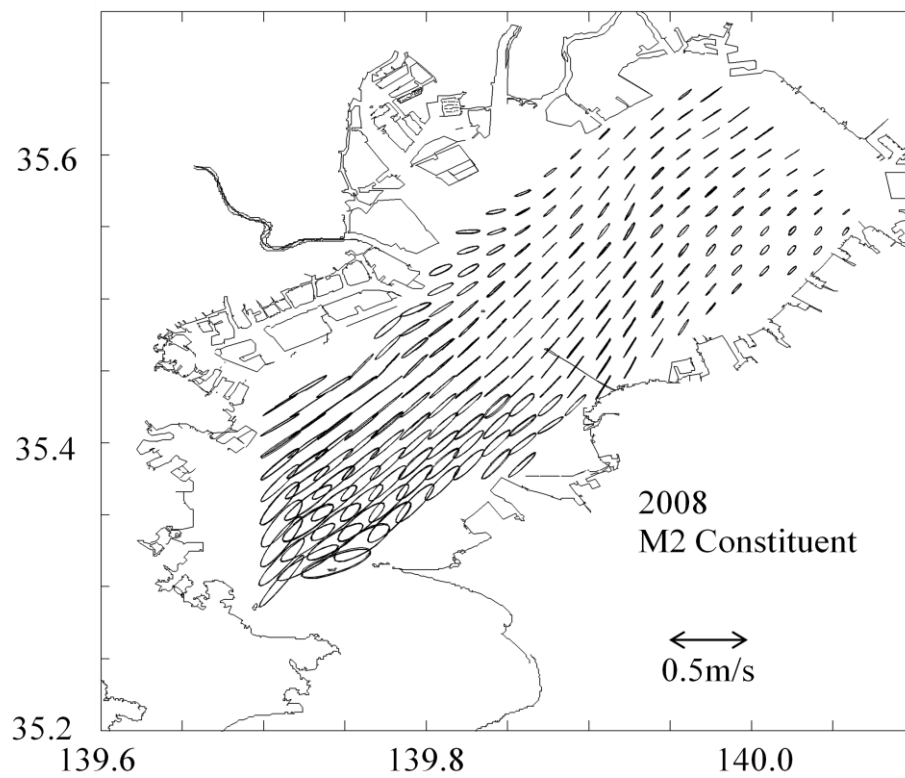


図-3.41(c) HFレーダーによって計測された2008年のM2潮流楕円

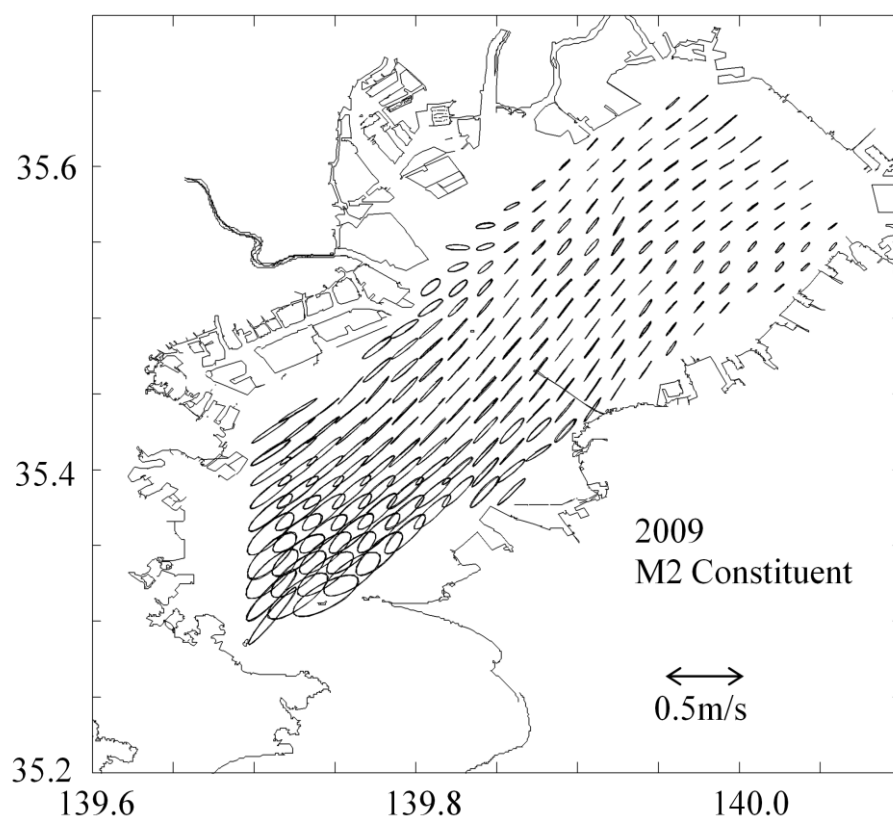


図-3.41(d) HFレーダーによって計測された2009年のM2潮流楕円

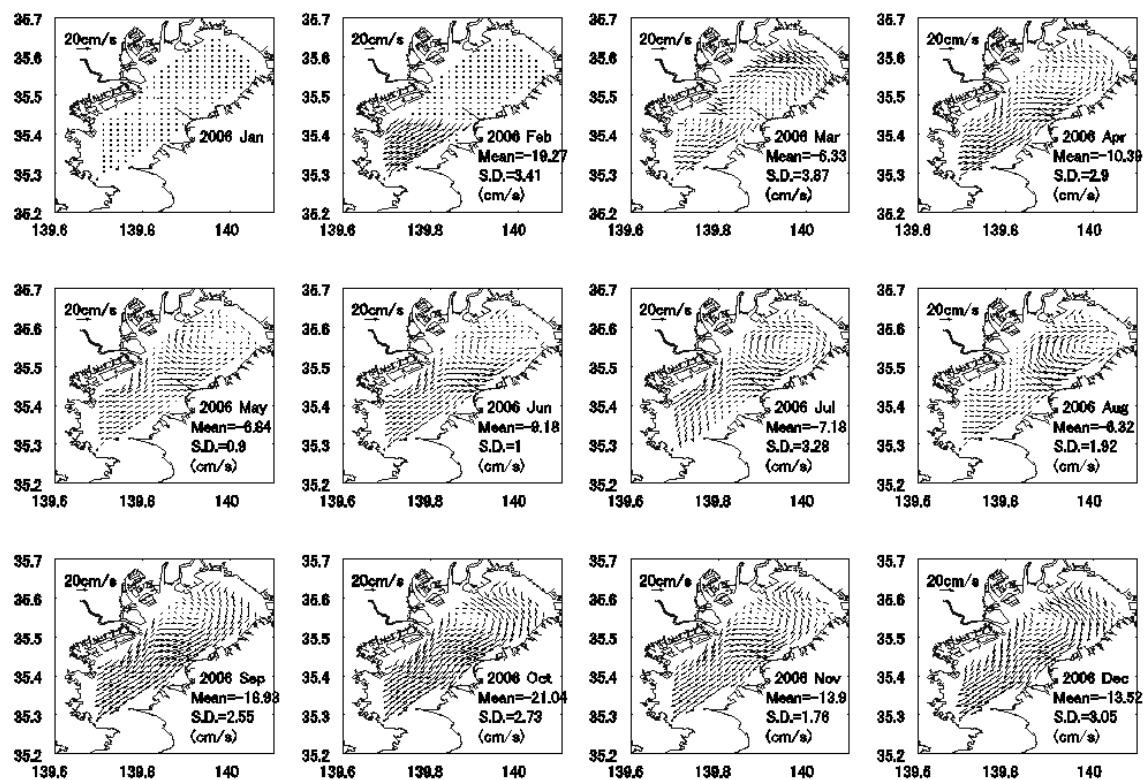


図-3.42(a) HFレーダーによって計測された2006年の月平均残差流

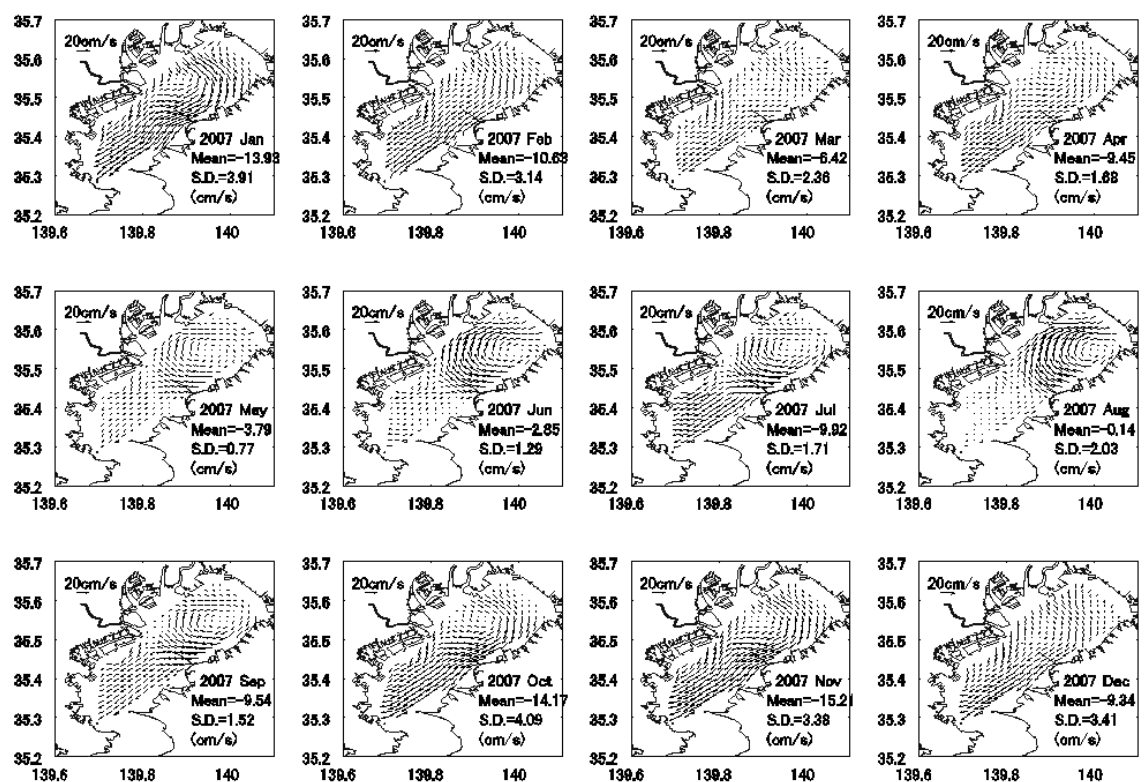


図-3.42(b) HFレーダーによって計測された2007年の月平均残差流



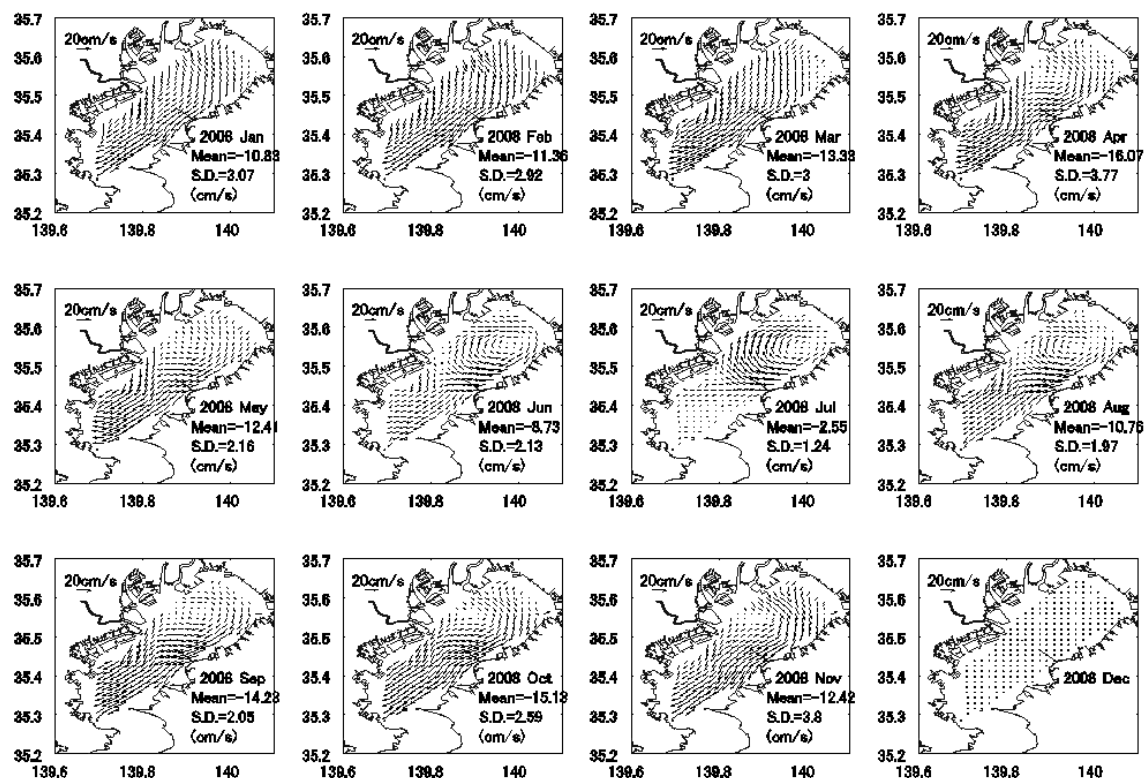


図-3.42(c) HFレーダーによって計測された2008年の月平均残差流

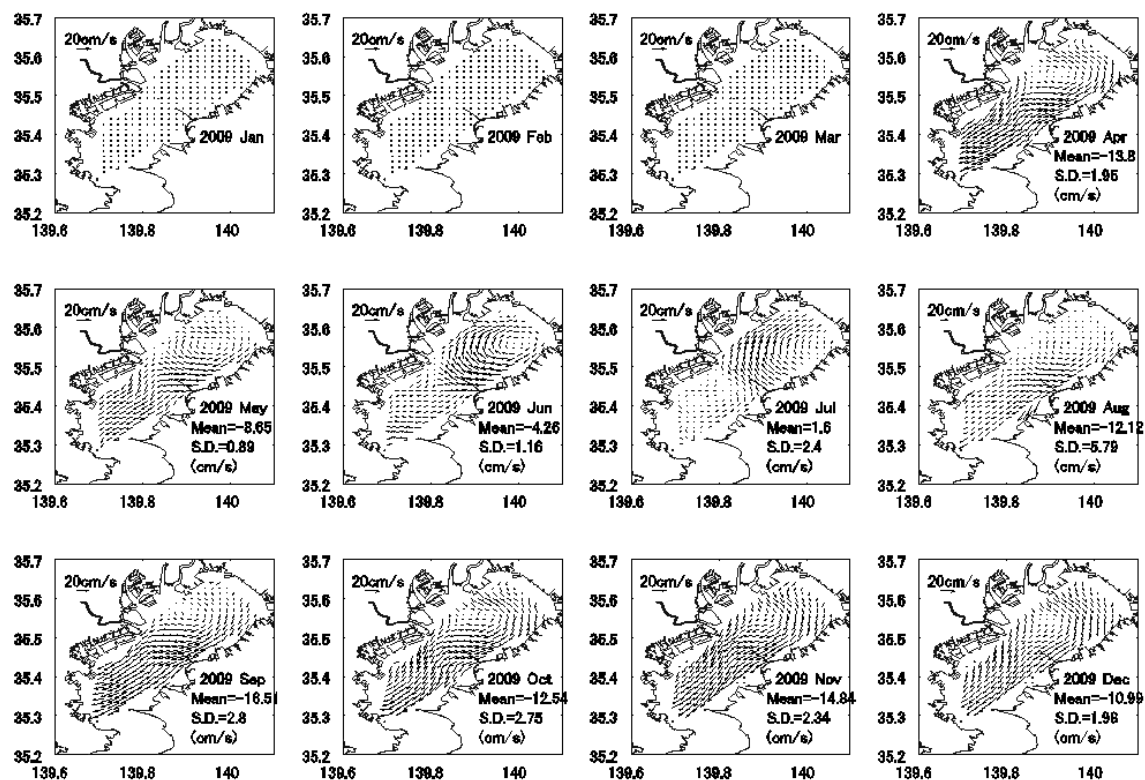


図-3.42(d) HFレーダーによって計測された2009年の月平均残差流

図-3.43 は 2006～2009 年の時計回り循環流の中心の位置(図-3.43(a))と北東-南西方向を軸とする風速(以後、湾軸風速)との関係(図-3.43(b))である. 循環流の中心は緯度  $35.56^{\circ}$  の線上に発生し、その位置は南西風が強いほど東京湾の東側に発生することが明らかとなった.

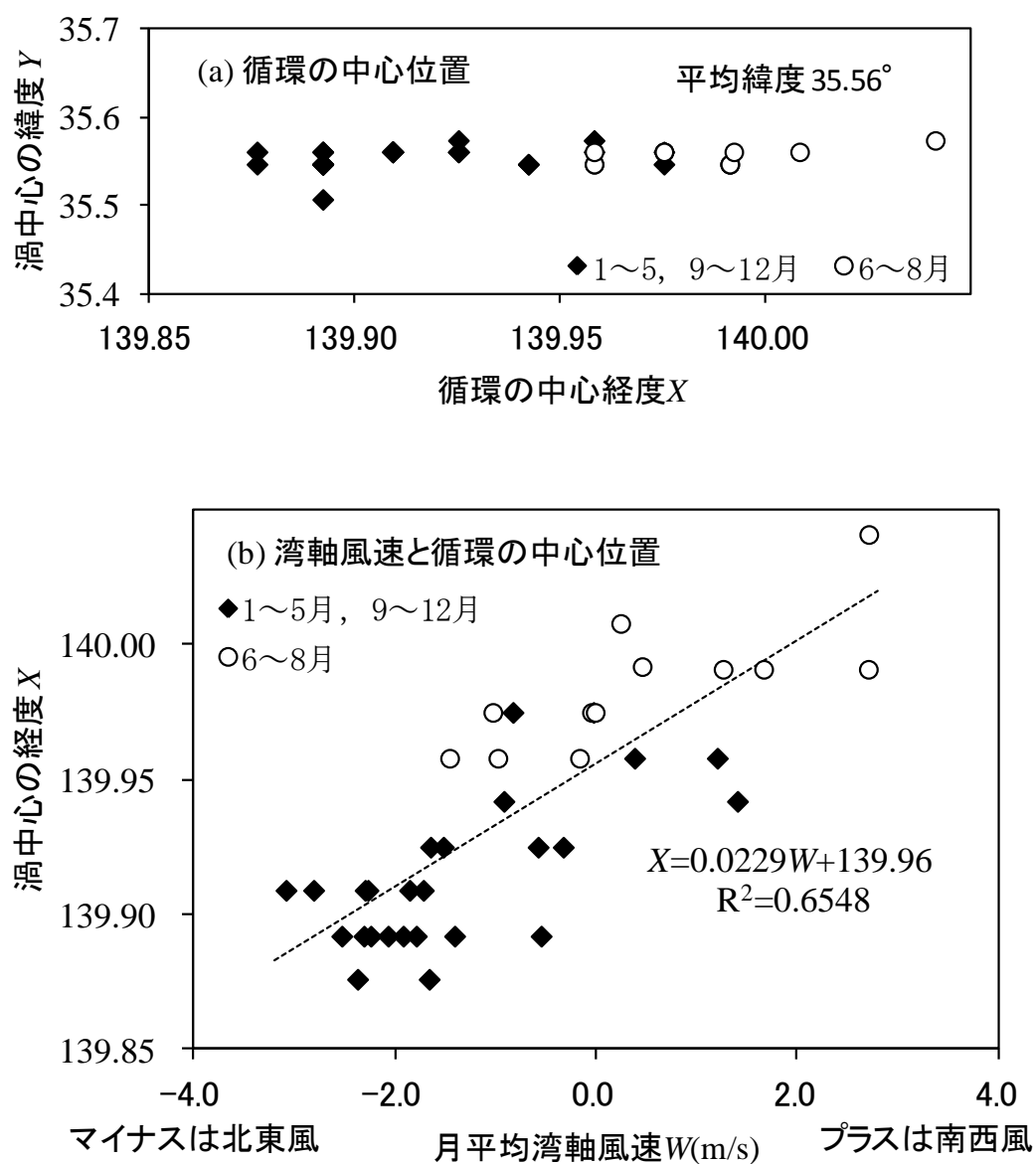


図-3.43 月平均湾軸風速と表層時計回り循環の中心の位置

### 3.4 湾奥(千葉灯標)での水質の連続観測

#### 3.4.1 観測の概要

東京湾奥では海上保安庁海洋情報部が千葉灯標(水深 11m)において 2003 年から水質と流況, 気象の連続観測を実施している. 千葉灯標は東京湾の北東部(北緯 35 度 33 分 54 秒, 東経 140 度 2 分 54 秒, 千葉港の南西約 5km)に位置し, 水深は 10m である. 観測システムは, 自動昇降水質測定システム, 流向流速プロファイラー測定システム, 風向風速測定システムの 3 つの観測システムによりなっており, 水温, 塩分, 溶存酸素, クロロフィル  $a$ , 濁度, 海潮流の流向・流速, 海上風の風向・風速の 7 項目を連続観測されている. 水質測定装置(深さ, 水温, 塩分, 溶存酸素, クロロフィル  $a$ , 濁度)は, 1 時間に 1 回, 計測器を海面から海底まで 1m 間隔で自動的に昇降してデータを取得している. 観測データは, “東京湾リアルタイム水質データモニタリングポスト”のホームページで公開されている.

千葉灯標における水質の特性は, これまでに, 山尾(2003,2004,2006), 渡邊(2009)によってとりまとめられており, ①沿岸湧昇を起こしやすい風は 86 度方向つまり, 東から吹く風が最も強く影響していること, ②2005 年には 2003, 2004 年よりも貧酸素水塊継続期間が長かったこと, ③冬季にも外海由来の高温・高塩分水の流入による貧酸素水塊の発生が起ころことが示されている.

ここではまず, 3.4.2 項で千葉灯標において観測されたデータの特徴を述べたのち, 4 章で各月の密度成層の発達度合いと溶存酸素量, さらに湾口の海水交換量との比較を行う.

#### 3.4.2 各季節の水質の特徴

図-3.44 は, 2003 年 12 月～2009 年 8 月までの千葉灯標の水温, 塩分, クロロフィル  $a$ , 溶存酸素と密度  $\sigma_t$  であり, 黒が表層(深度 1m), 灰色が下層(深度 10m)を示している. 年変動が大きいものの, 全般的な傾向として, 4 月頃から密度成層が発達し始め, 夏期 7 月～8 月にかけては表層と下層の水温差は 5～8℃ほどになる. その後, 9 月中旬から 10 月中旬にかけて, 表層から下層にかけての水温差がなくなる時期がある(図中①). 水温差はほとんど見られない一方で, 塩分,  $\sigma_t$  には表層と下層で差があり, 下層の方が高い状態にある.

その後, 11 月下旬までは, 下層の水温が表層よりも高くなり, しばらく表層と下層で水温差がみられる.(ただし, 2006～2007 年の冬期は 1 月まで水温差がみられた.) また, 10～12 月初旬は全般にクロロフィル  $a$  が小さい.

冬季 12 月(図中②)になると, 鉛直混合によって表層と下層の水温差があまり見られなくなり, その後, 2 月頃までこのような状況が続く.  $\sigma_t$  は水温が低いいため他の季節に比較して全般に高いが, 下層塩分は鉛直混合で表層と同程度になるため, 他の季節と比較して小さい.

一方, 冬季には時々, 高温・高塩の水塊が下層に流入することがある. ただし, このような水塊の密度は, その時期の下層密度と比較して大きな違いがない. 一方, クロロフィル  $a$  を見て

みると、1～2 月に急激に大きくなることがあり(図中③)、密度成層がないためか表層から下層まで大きな値を示している。また、夏期と比較して全般に継続時間が長いという特徴がある。春季 3 月～5 月にかけては高塩分水塊が下層に進入し、年間を通して最も密度の大きな水塊が進入する場合が見られる(図中④)。この時期から徐々に密度成層と貧酸素水塊が発達するようになる。

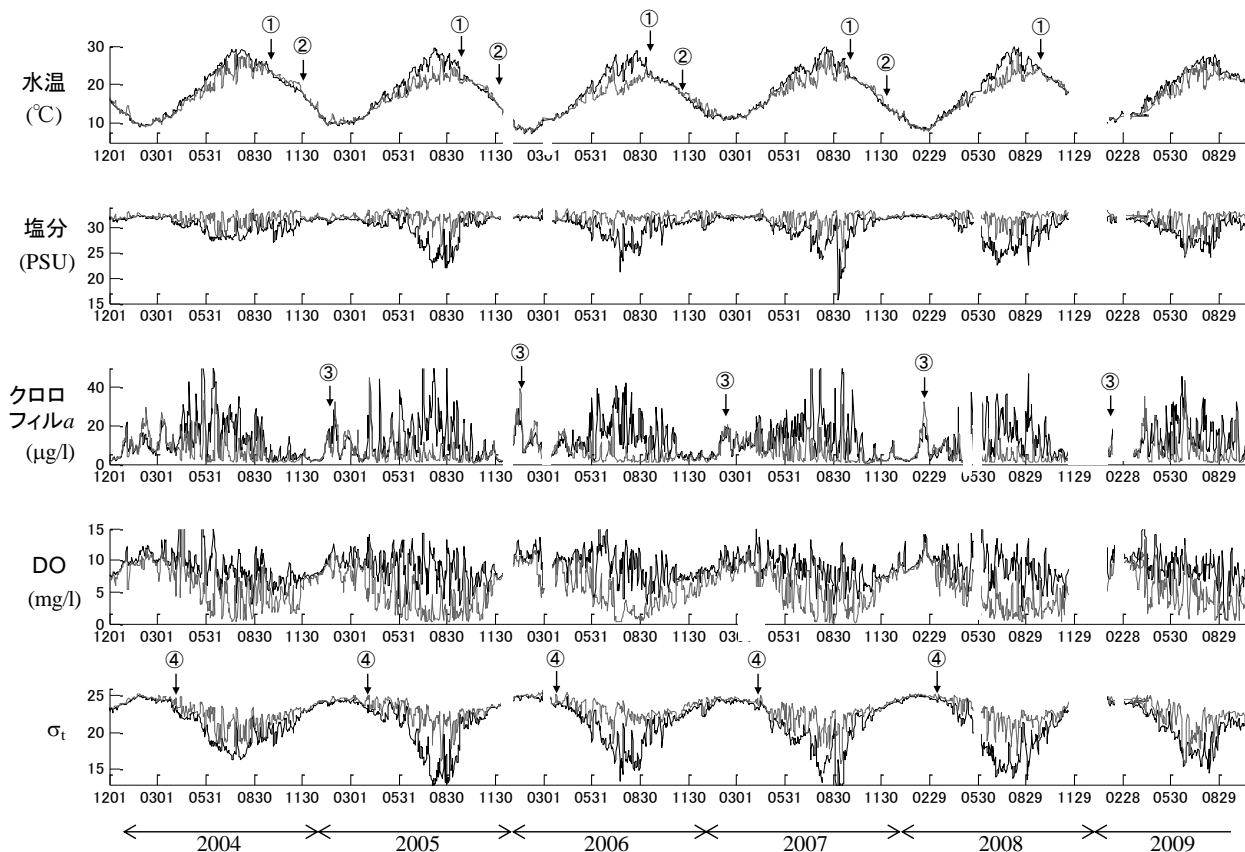


図-3.44 千葉灯標の水質の時系列 黒:深さ 1m 灰色:深さ 10m

### 3.4.3 各季節の水質の特徴

次に月平均した水質の性質を見てみる。水温は年変動が大きく、密度成層の発達にも年によって差が見られる。また、2006 年、2008 年の冬期水温が低いのに対し、2007 年と 2009 年は水温が高く、その差は 3～4℃である。

図-3.45(a)～(e)は、水温、塩分、クロロフィル a、溶存酸素、 $\sigma_t$  の月平均データである。表層(深さ 1m)、中層(深さ 5m)、下層(深さ 10m)と全層平均である。点は各年の値であり白抜きの点は 5 年平均である。

まず、水温について見ると、水温は 2 月に最小、8 月に最大となり、表層と下層を比較すると、4 月頃から水温差が見られはじめ、7～8 月にその差が最大となる。10 月にいったん、表層と下

層の水温差が無くなった後、11月は約1℃ほど下層の方が高くなり、12月から4月にかけては表層と下層の水温差があまり見られない。年変動は、1月と2月、7月と8月に大きく、特に下層で年変動が大きい。下層の1月の水温は2006年と2007年で4.5度、8月の水温は2004年と2006年で5℃の違いが見られる。

次に、塩分について見ると、表層、中層、下層ともに8月が最小となっている。ただし、河川出水の影響を受けるため、表層は6～9月にかけて年変動が大きい。下層の塩分は、他の層と比較すると若干異なっており、1月に極大を取った後、いったん3月に極小値をとって、次に5月に極大値をとり、その後8月まで徐々に低下する。10月には再び塩分が上昇して最大値をとる。下層の塩分は年変動が5月～6月が最も大きいという点も、表層、中層と異なる点である。10～11月に最も高塩分水が流入しやすいものと考えられるが、5年間の最大値を見ると5～6月の塩分が最も高い。

クロロフィル *a* は、密度成層の有無により、表層と下層で異なっており、表層は夏季7月に最大となり、冬季12月に最小となるが、下層は逆に冬季2月に最大となり、夏から秋にかけては小さな値となっている。2月のクロロフィル *a* は表層よりもむしろ下層の方が大きくなっており、このときの中層～下層のクロロフィル *a* は夏季表層のクロロフィル *a* の半分ほどもある。全層平均で見ると、2月の方が7月よりも大きくなっている。また、2月のクロロフィル *a* の増大は、夏季と比較してその継続時間が長いという特徴ももっている。このような2月頃のクロロフィル *a* の増大(ブルーム)は、佐々木ら(2001)の2001年の京葉シーバースでの連続観測にも表れており、夏季における基礎生産に匹敵する量である。

図-3.46は5年平均の塩分・水温・クロロフィル *a*・DO・ $\sigma_t$ の鉛直プロファイルである。深部で最も貧酸素が厳しくなる6月～10月についてみると、表層から底層までの分布は塩分・ $\sigma_t$ とちょうど逆の関係にあり、密度成層の発達に貧酸素水塊の発達に影響していることが分かる。

図中、最下段の図は、それぞれ水温を底層の水温として計算した $\sigma_t$ と塩分を底層の塩分として計算した $\sigma_t$ である。水温も密度成層の発達と関係があるものと考えられるが、その影響度は塩分と比較すると小さく、夏季の密度成層の発達、さらには貧酸素水塊の発達に塩分が大きく影響していることが分かる。

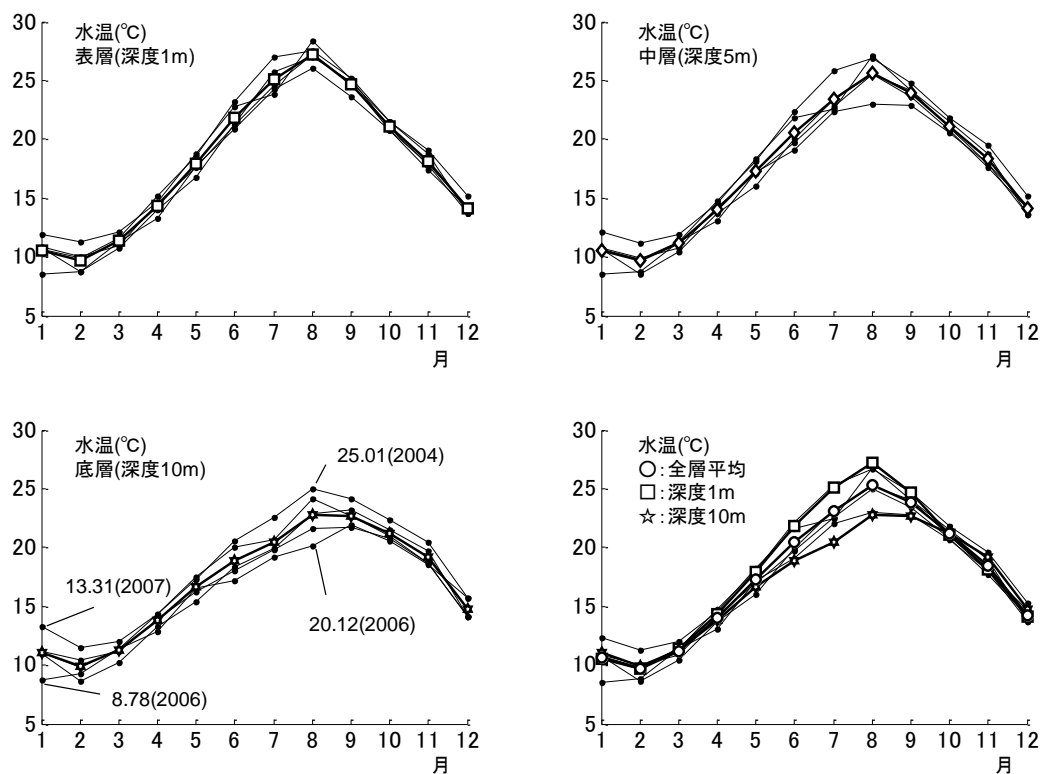


図-3.45(a) 千葉灯標の月平均水温(表層・中層・下層) 白抜きは5年平均

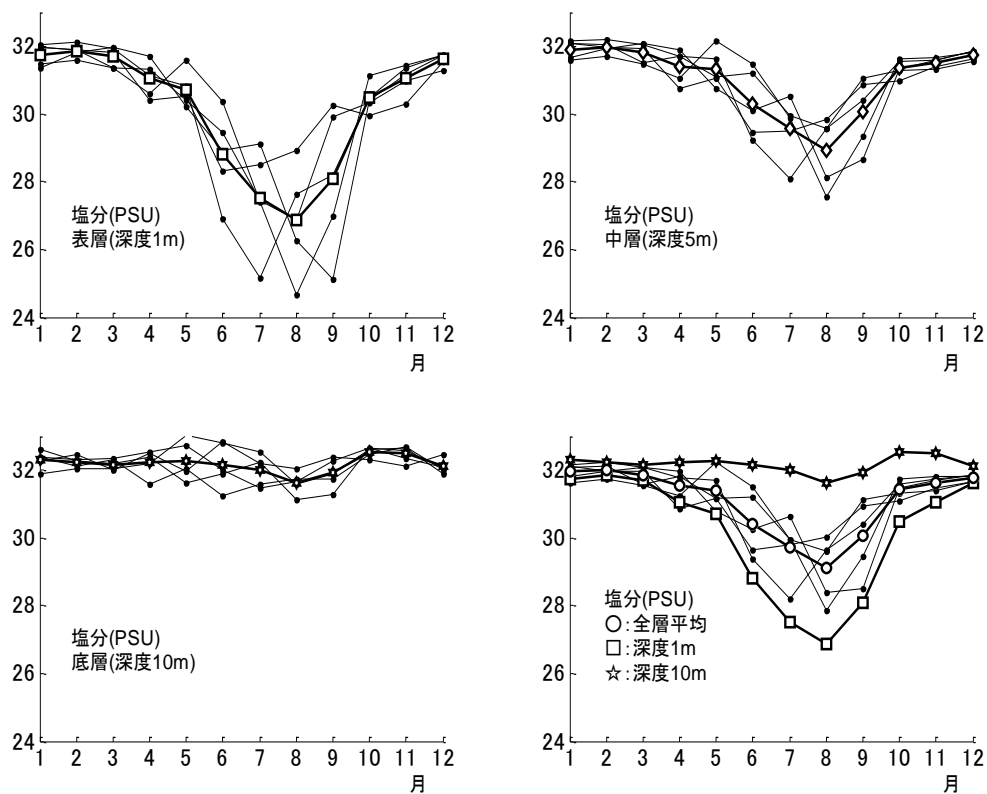


図-3.45(b) 千葉灯標の月平均塩分(表層・中層・下層) 白抜きは5年平均

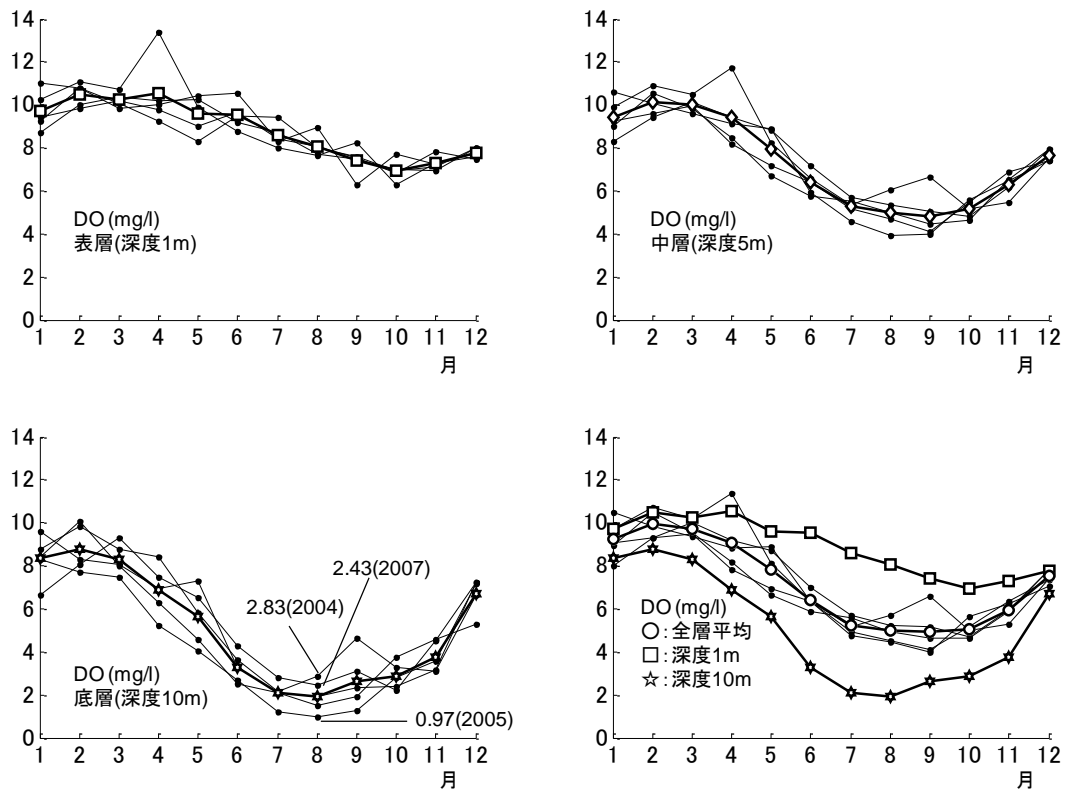


図-3.45(c) 千葉灯標の月平均DO(表層・中層・下層) 白抜きは5年平均

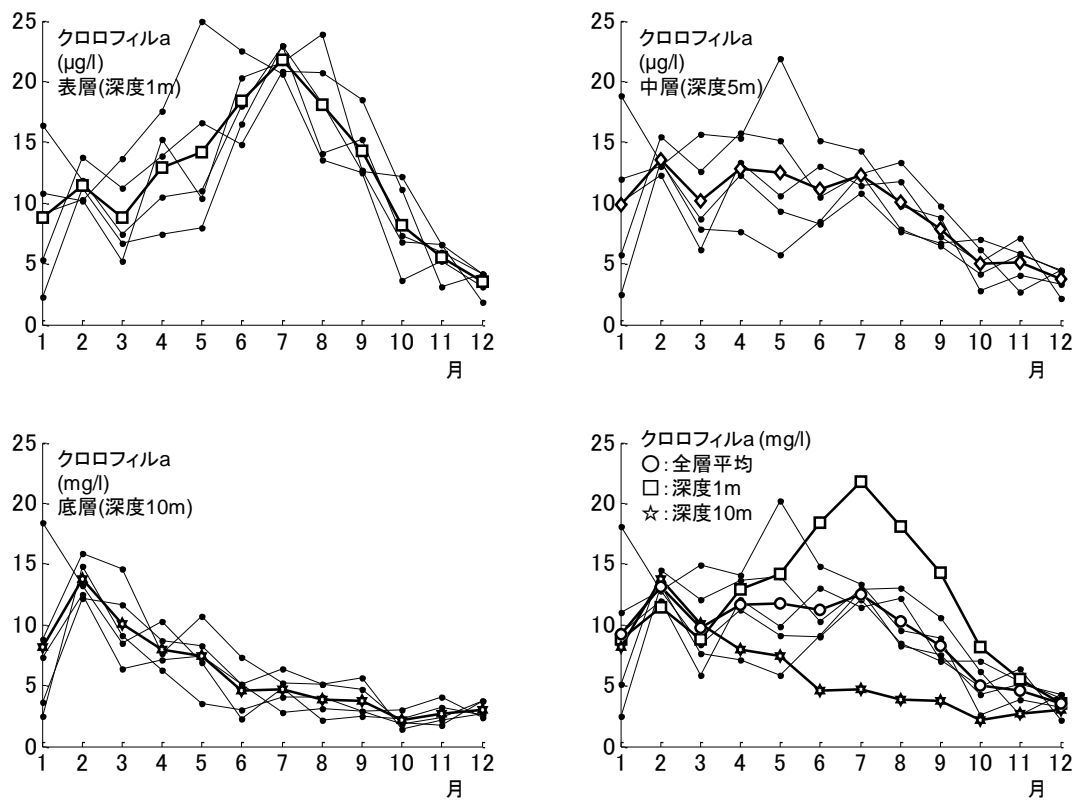


図-3.45(d) 千葉灯標の月平均クロロフィルa(表層・中層・下層) 白抜きは5年平均

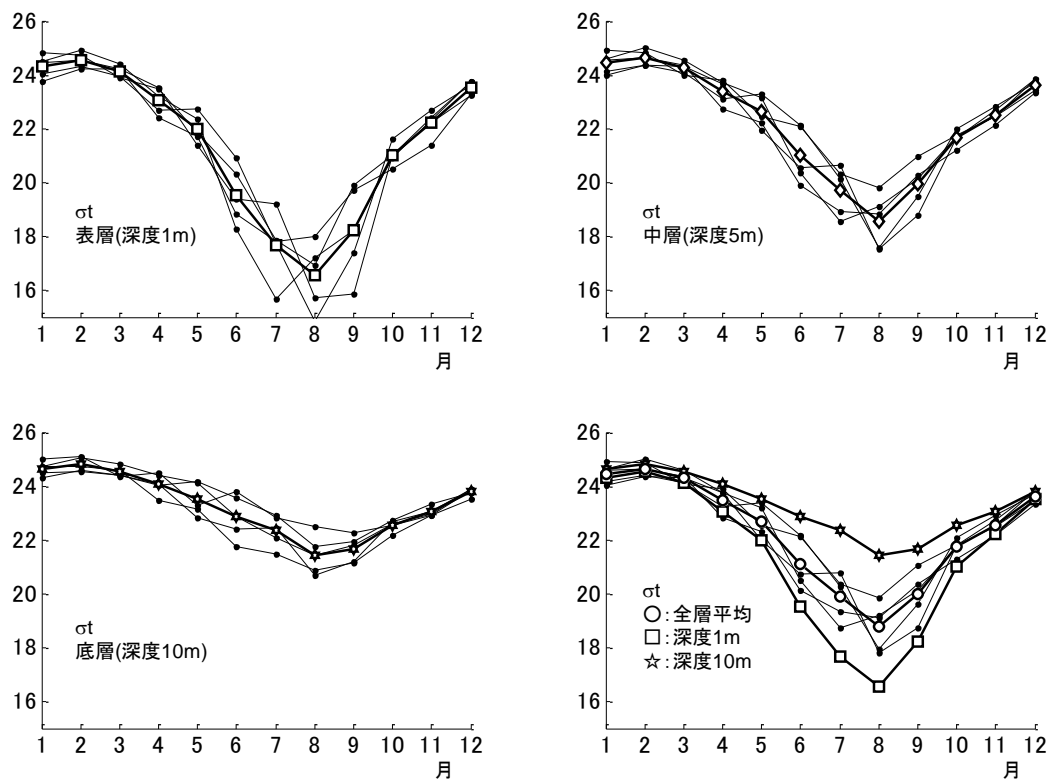


図-3.45(e) 千葉灯標の月平均 $\sigma_t$  (表層・中層・下層) 白抜きは5年平均

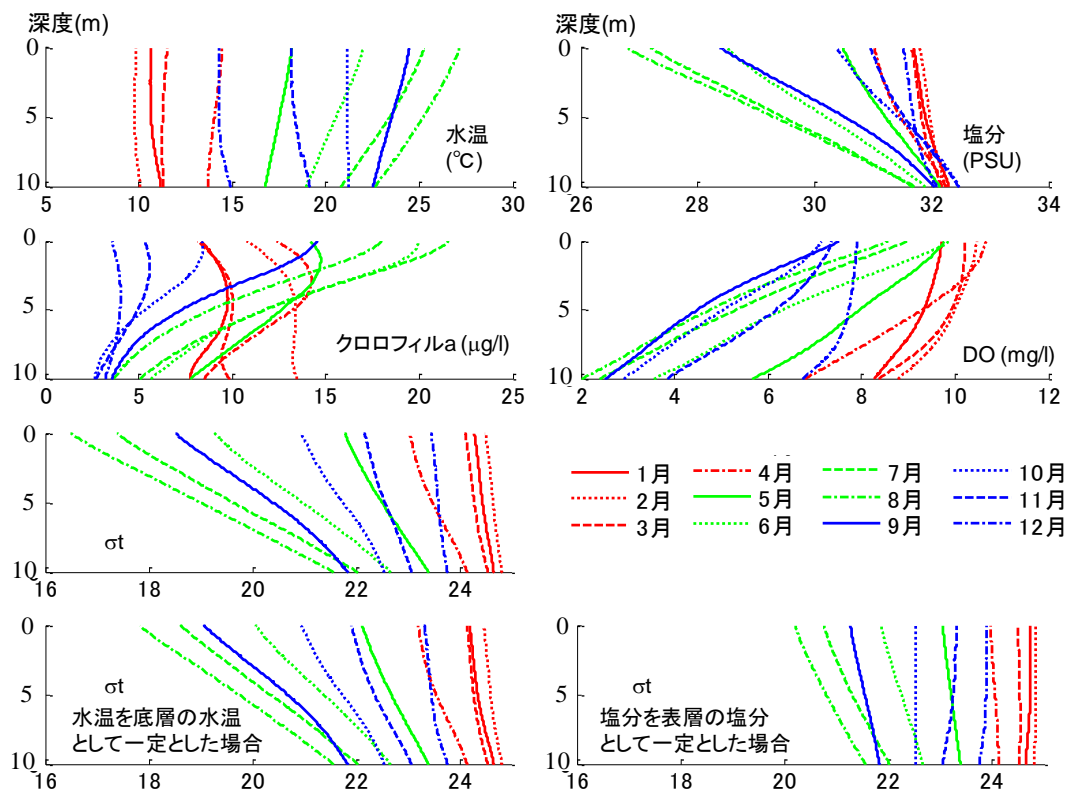


図-3.46 5年平均の塩分・水温・クロロフィル  $a$ ・DO・ $\sigma_t$ の鉛直プロファイル



### 3.5 東京湾への淡水流入の条件と気象条件の特徴

次章以降、東京湾への淡水流入と気象条件の影響を調べる前に、本節では東京湾周辺の気象や淡水流入の特徴を過去の観測データから調べておく。

#### 3.5.1 淡水流入条件

図-3.47 は、荒川の月平均淡水流入量の長期変化であり、このうち 1981～2003 年は雨量・流量年報((社)日本河川協会)から参照した大芦橋と菅間の流量とそれより河口までに加わると推定される  $48.2\text{m}^3/\text{s}$  を合計したものである。また、2004～2010 年は 5 章で述べる方法で水位から求めた流量である。一見して、1 月～3 月と 5 月は年変化が少なく、6 月～10 月は台風の影響などで年変化が大きい。

図-3.48(a), (b)は、それぞれ 1981～2010 年までの荒川と主要 6 河川(荒川, 江戸川, 中川, 隅田川, 多摩川, 鶴見川)の月平均流量の平均と標準偏差である。8 月～10 月にかけては平均流量とその標準偏差が大きく、特に標準偏差は台風の影響により大きくなっている。

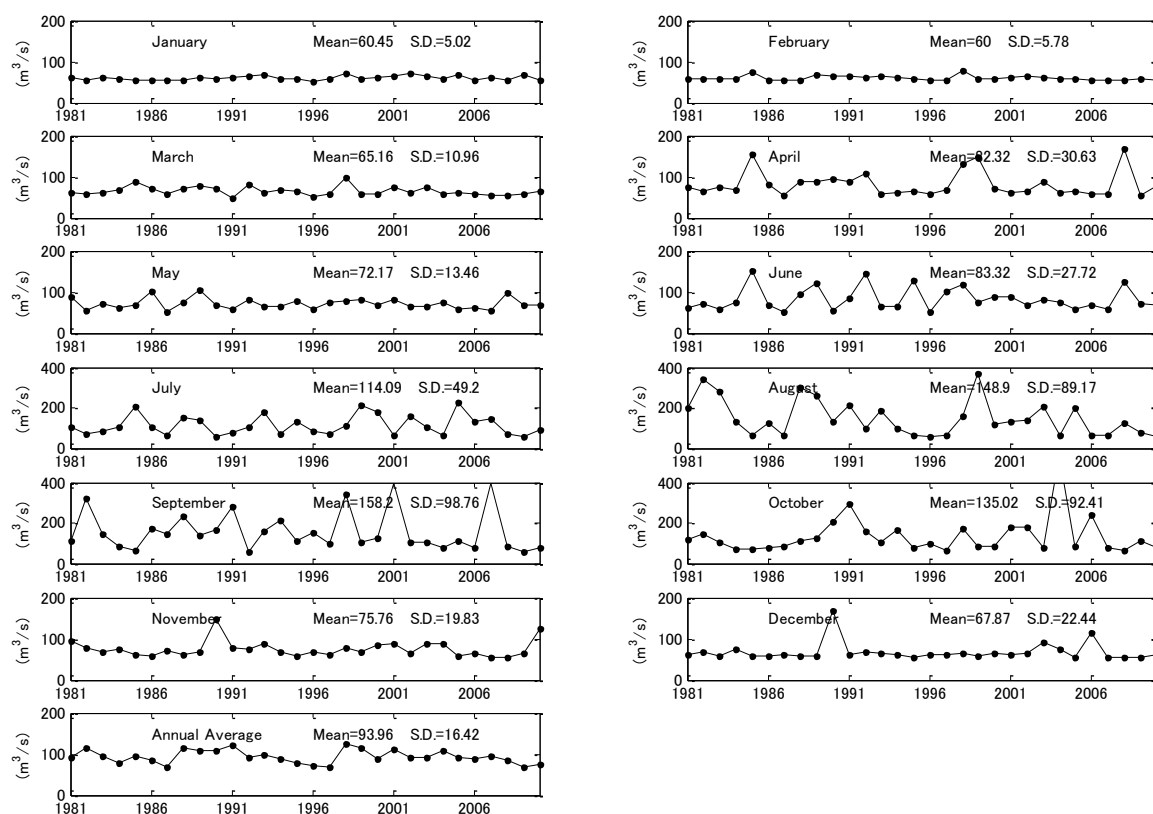


図-3.47 荒川の月平均淡水流入量の長期変化

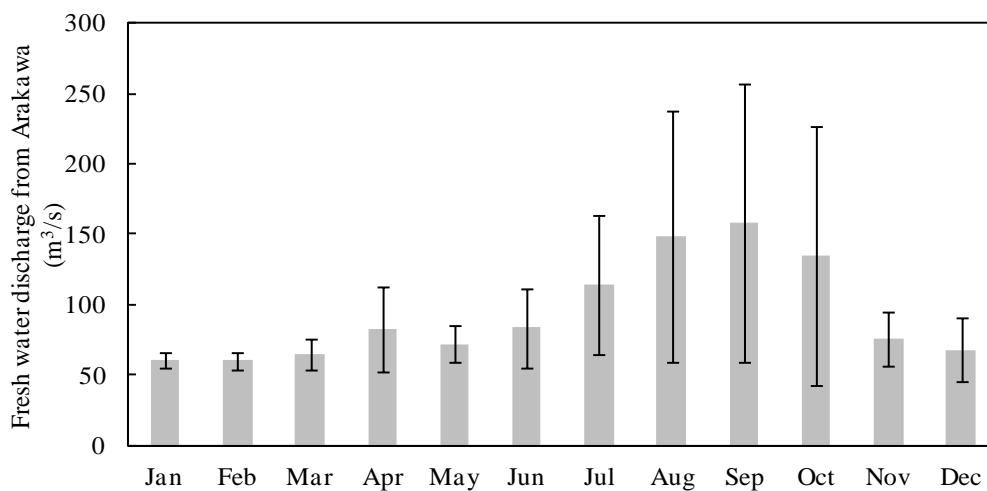


図-3.48(a) 1981～2010 年までの荒川の月平均流量の平均と標準偏差

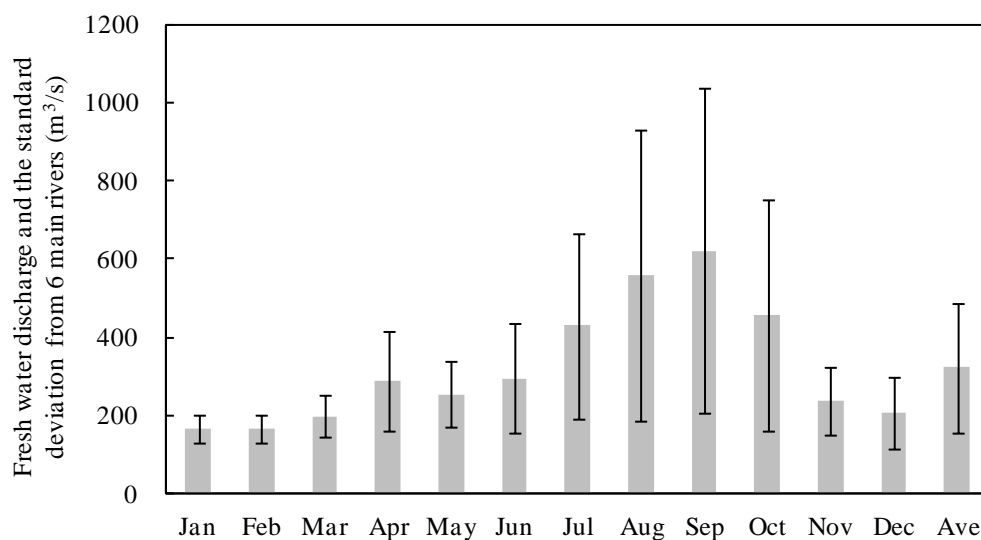


図-3.48(b) 1981～2010 年までの主要 6 河川(荒川, 江戸川, 中川, 隅田川, 多摩川, 鶴見川)の月平均流量の平均と標準偏差

## (2) 風向風速

図-3.49 は 2008 年の羽田の南北風速である。冬は北系の風が卓越するのに対し、6 月～8 月にかけては南風が卓越する。図-3.50 は羽田の月平均風速の 1994 年～2010 年までの変化であり、東京湾の湾軸にほぼ平行な北東-南西軸成分の図である。プラスが南西風、マイナスが北東風である。冬季は北東風が卓越し、夏季は南西風が卓越している。なお、6 月～9 月は標準偏差が約 1.1～1.4m/s と大きい。

## (3) 気温と日射量(短波放射)

図-3.51 と図-3.52 はそれぞれ東京の月平均気温と月平均日射量の 1973 年～2010 年までの長期変化であり、線形回帰直線とともに示している。年変動が大きいため決定係数が小さいも

の、回帰直線を見ると気温、日射量ともに上昇傾向にあることが分かる。年平均(Annual Average)の上昇量はそれぞれ  $0.039^{\circ}\text{C}/\text{年}$ 、 $0.054\text{MJ}/\text{m}^2/\text{年}$ である。

線形回帰直線からのずれを示す標準誤差(S.E.)は、気温では7月と8月に大きくそれぞれ  $1.638$ 、 $1.334^{\circ}\text{C}$ である。それ以外の月の変動は約  $1^{\circ}\text{C}$ である。また、日射量(短波放射)は6月～8月にかけて変動が大きい。

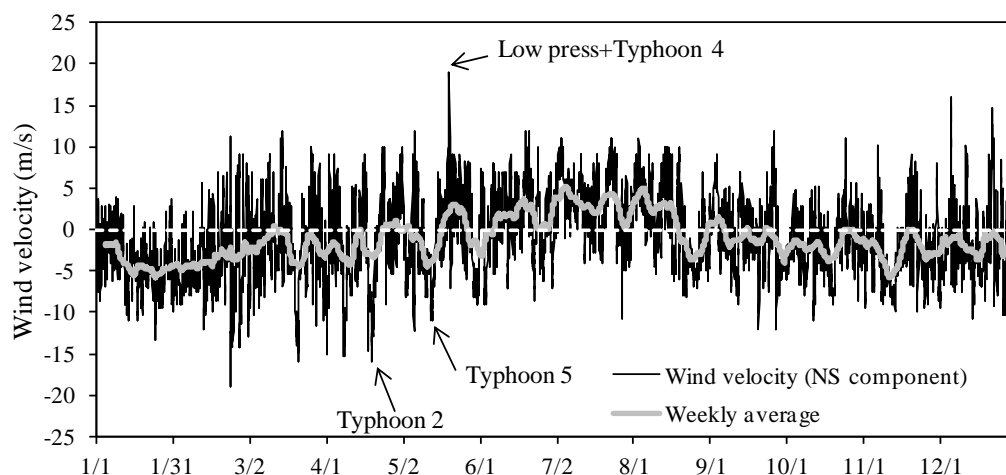


図-3.49 2008 年の羽田の南北風速

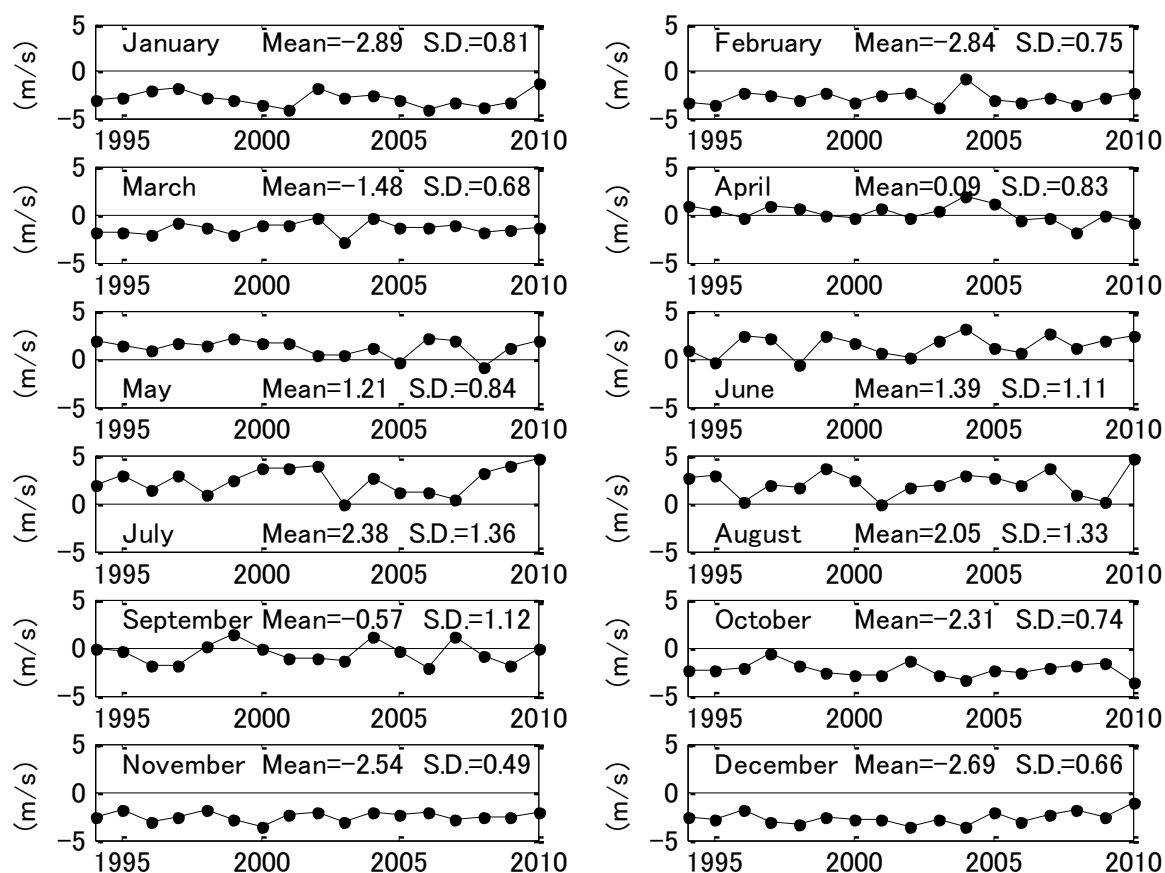


図-3.50 羽田の月平均風速の長期変化

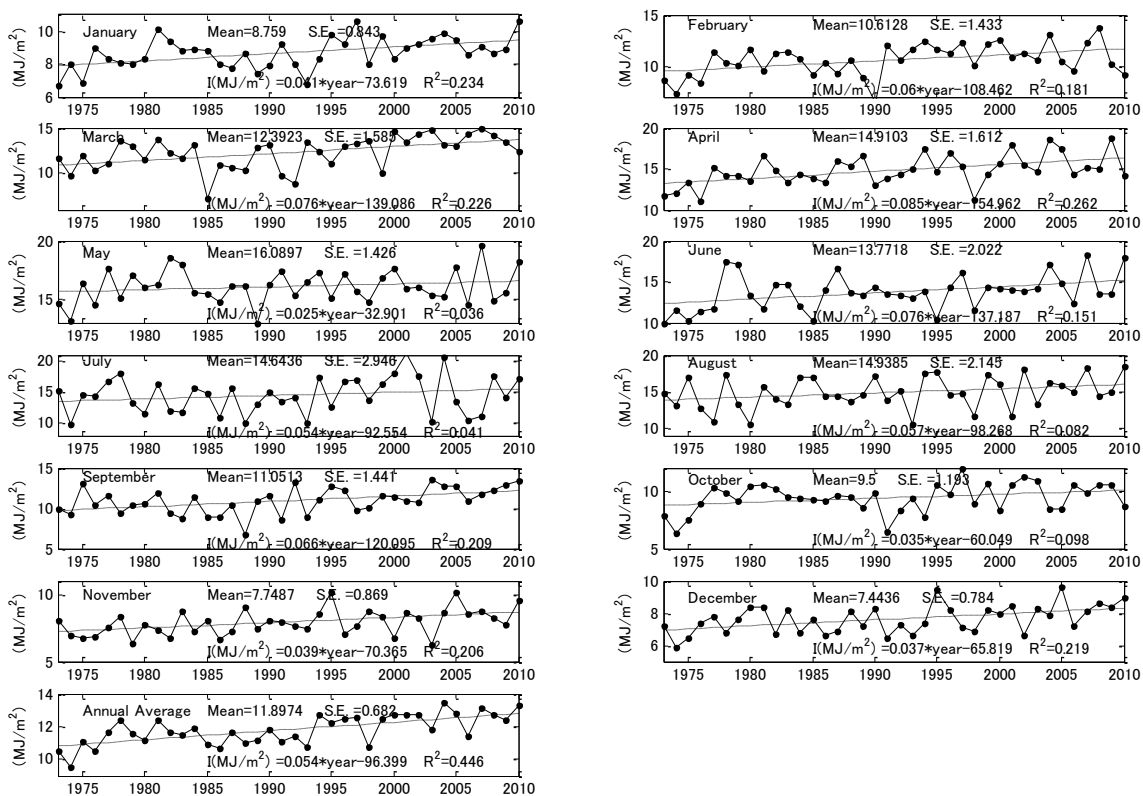


図-3.51 東京の月平均気温の長期変化

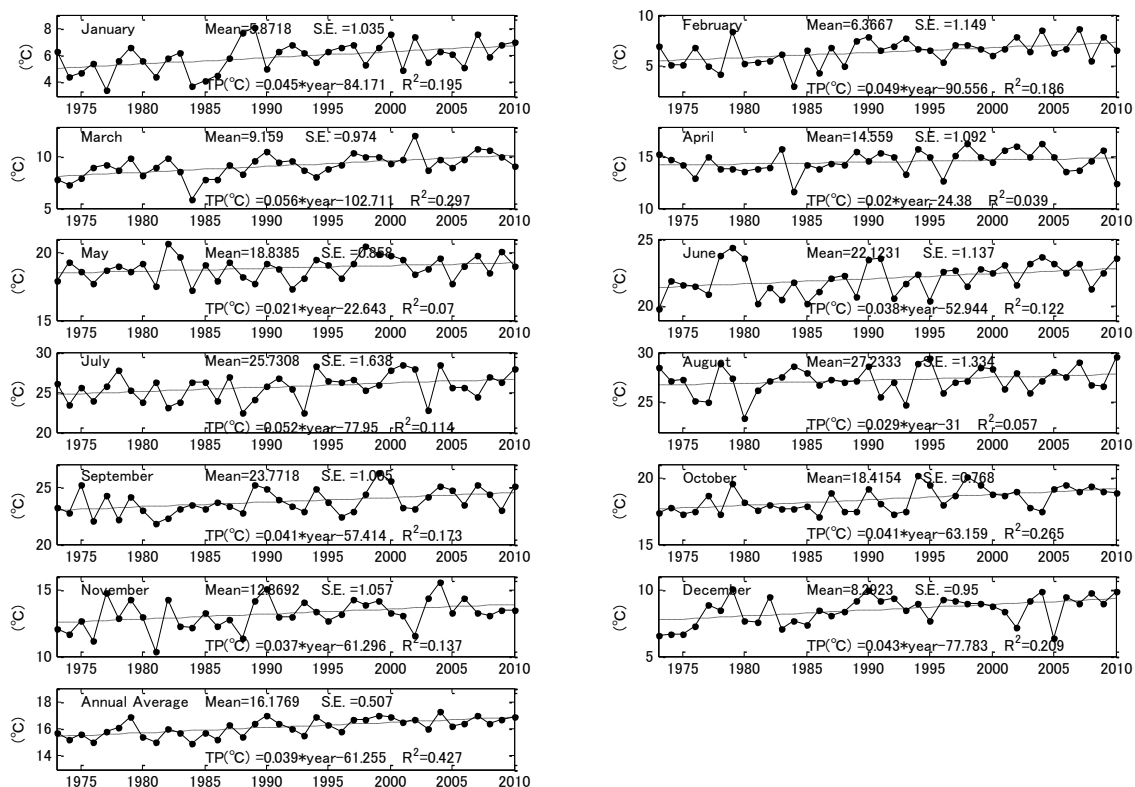


図-3.52 東京の月平均日射量の長期変化

### 3.5.2 変動量のまとめ

図-3.53 は淡水流入量と各種気象条件の年ごとのばらつきを示す各月の標準偏差(S.D.)と標準誤差(S.E.)である。気温と日射量は近年上昇傾向にあるため、回帰直線からのずれとして標準誤差を示した。日射量は6～8月、風と気温は6～9月、淡水流入は8～9月の変動が大きく、全般に夏～秋にかけてのばらつきが大きい。

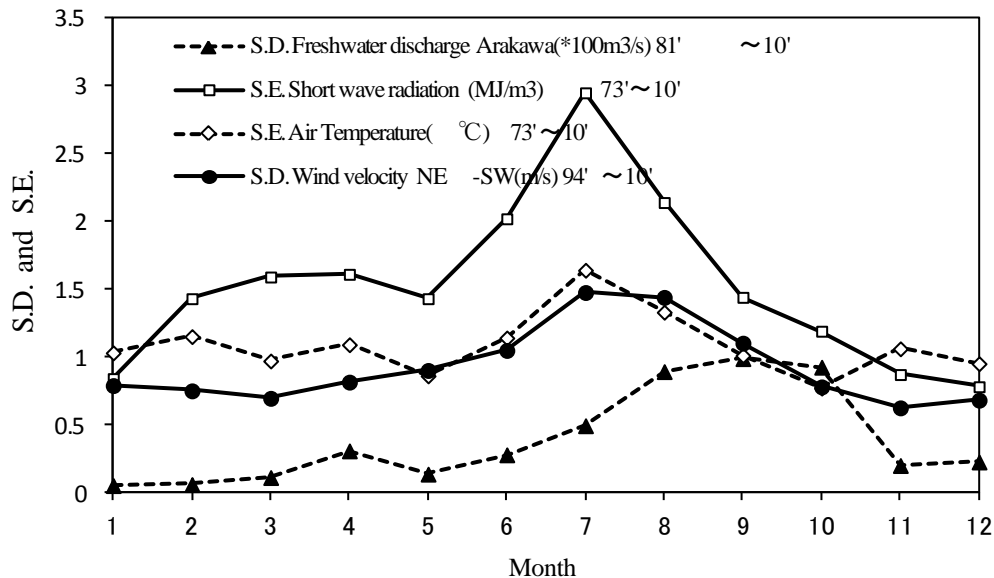


図-3.53 淡水流入と各種気象条件の年変動

### 3.6 3章のまとめ

1) 東京湾の海水交換の特性を明らかにするため、東京湾口の神奈川県久里浜港と千葉県金谷港を結ぶ東京湾フェリー株式会社所有のフェリー“かなや丸”に、ADCP と表層海水の分析装置を設置し、2003 年 12 月から長期連続的な観測を開始した。これにより海上交通が多く観測が困難だった東京湾口での流況・水質の観測が飛躍的に向上した。本研究ではこのうち 2004～2009 年にわたる長期連続的な観測データを解析することとした。

2) 年平均残差流  $u_R$  は、表層流出、中層流入、下層流出という 3 層構造であり、東京湾央の浅い水深に対応させると表層流出・下層流入であり、東京湾の重力循環の性質を示していた。また、この流速分布は毎年ほとんど変化がないことが明らかとなった。

3) 月平均海水交換量  $Q$  は秋季 9～10 月が最も大きく、最大の 10 月は  $12,000(\text{m}^3/\text{s})$  だった。ついで 4～6 月が大きく、逆に 1～3 月と 6～8 月の海水交換量が小さく、最小値は 1 月の

6,200( $\text{m}^3/\text{s}$ )だった。これを海水交換日数  $\tau$  にすると、最も早い 10 月は約 18 日、最も遅い 1 月が 38 日だった。

これまで東京湾では夏季の海水交換日数が小さいと言われていた(宇野木, 1998; 岡田ら, 2007)が、本研究の詳細な観測結果により夏季 7~8 月の海水交換量が他の季節と比較して小さく極小値をとっていることが明らかとなった。貧酸素水塊が最も発達する重要な時期であることを考慮すると、この要因を調べることが重要である。

4) 冬季には 1~2 週間周期で黒潮系暖水(日向ら, 2000; 鈴木ら, 2006)が東京湾口に波及し、房総半島沿いに全層一様に進入して湾口にフロントを形成していた。このときの流速分布は三浦半島よりの海峡部で流入、房総半島よりの表層から流出するという重力循環や冬季の北寄りの風による吹送流循環とは逆の流況分布であった。冬季はこのような流れが 1~2 週間おきに繰り返されるため、月平均をとると通常の残差流構造と相殺し、月平均残差流と海水交換量が約 35%も小さくなっていることが明らかになった。

5) 夏季には強い南西風が連吹し、表層流入・中層流出・下層流入となる日が多かった。このような南西風による吹送流循環(上層流入・下層流出)の発達により、表層流出・下層流出という重力循環が弱められ、月平均の断面残差流を求めると海水の流入位置が浅くなるとともに海水交換量は約 30%低下していることが明らかとなった。

6) HF レーダーによる湾表層流速の月平均残差流を調べたところ、春から秋にかけて毎月、湾奥に時計回り循環が発生していることが明らかになった。循環流の中心は緯度  $35.56^\circ$  の線上に発生し、その位置は南西風が強いほど千葉側に移動し、また南西風が強いほど循環流が大きくなることが明らかとなった。

7) 過去 15 年の羽田の月平均風速は、冬季 10 月~2 月は北寄りの風が卓越し月平均で  $2\text{m/s}$  以上だった。逆に夏季は南寄りの風が卓越し、特に 7~8 月は月平均で  $2\text{m/s}$  以上だった。また、過去 37 年の東京の気温と日射量はともに上昇傾向にあり、年平均でそれぞれ  $0.039^\circ\text{C}/\text{年}$ 、 $0.054\text{MJ}/\text{m}^2/\text{年}$  の増加が見られた。一方、過去 30 年の淡水流入は 9 月、8 月、10 月、7 月の順で夏~秋にかけて大きかった。

## 4 章 海水交換と湾表層流速に及ぼす淡水流入と気象条件の影響

### 4.1 概 要

本章ではフェリー観測による東京湾口の断面流速データと HF レーダーによる表層流速, さらに千葉灯標で計測されている塩分, 水温, 溶存酸素との比較を行い, 東京湾の海水交換や湾表層流速および水質に及ぼす淡水流入量や風向風速などの効果について調べる.

4.2 節ではフェリーで観測された海水交換量  $Q$  と淡水流入量  $F_D$ , 湾軸方向風速  $W$ , 気温  $T_a$ , 日射  $I$  の相関を調べ, 東京湾の海水交換に及ぼす各種要因の影響を調べる.

4.3 節では, フェリーの観測データと HF レーダーとの観測結果との比較を行い, 湾口の断面流速と湾表層の流れの関係を調べる.

4.4 節では, 東京湾奥の千葉灯標で長期連続的に計測されている水質データと比較し, 湾奥の水質と湾口の海水交換の関係を調べる.

### 4.2 湾口の海水交換量と湾軸表層流速の関係

#### 4.2.1 海水交換量 $Q$ と湾軸表層流速 $V_{HF}$ の季節変化

図-4.1 はフェリーによって計測された各月の海水交換量  $Q$  の季節変化であり, 3 章で述べた結果である. また, 図-4.2 は海水交換量から推定した海水交換日数である. 春と秋の海水交換が良く, 6 年間の平均海水交換日数は 4 月に 23 日, 10 月に 19 日という極小値をとっている. 一方, 冬と夏は海水交換が悪く, 1 月に 39 日, 6 月に 34 日の極大値をとった.

図-4.3 は HF レーダーによって計測された月平均湾軸表層流速  $V_{HF}$  の季節変化である. 冬と秋は湾口に向かう流出方向(南西向き)の流れが大きいのに対し, 夏にはこの流れが小さくなり, 2009 年 7 月のように流入方向(北東向き)になる月もあった. 表層流出・下層流入という重力循環が弱まっていることを示しているものと考えられる.

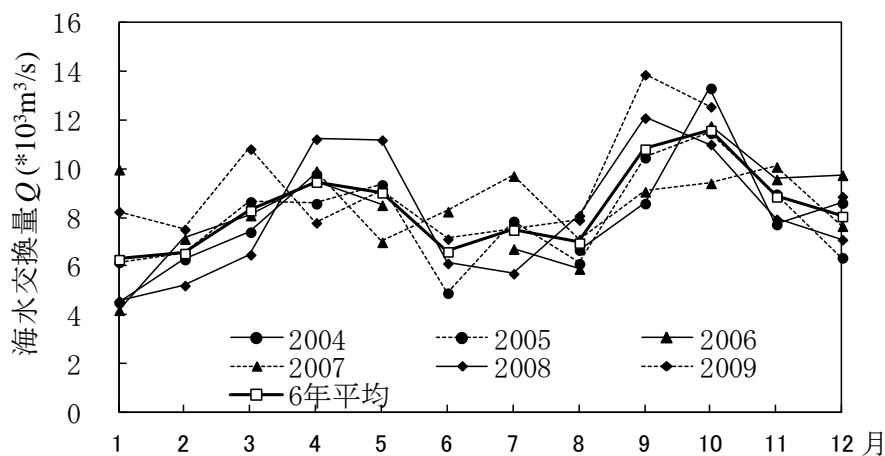


図-4.1 月平均海水交換量(2004 年～2009 年)

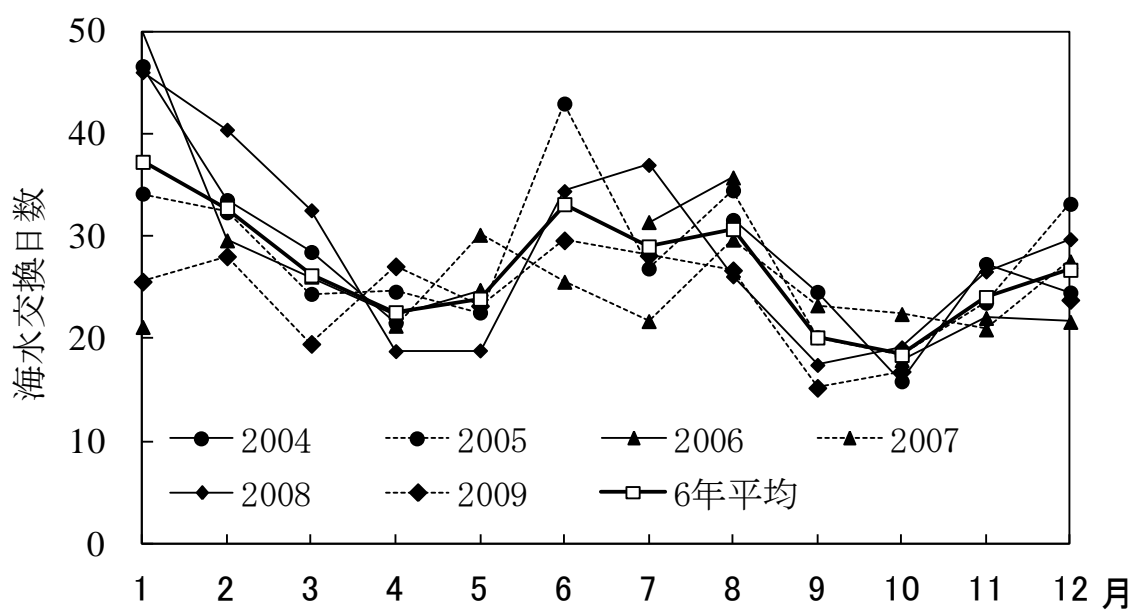


図-4.2 海水交換日数(2004年～2009年)

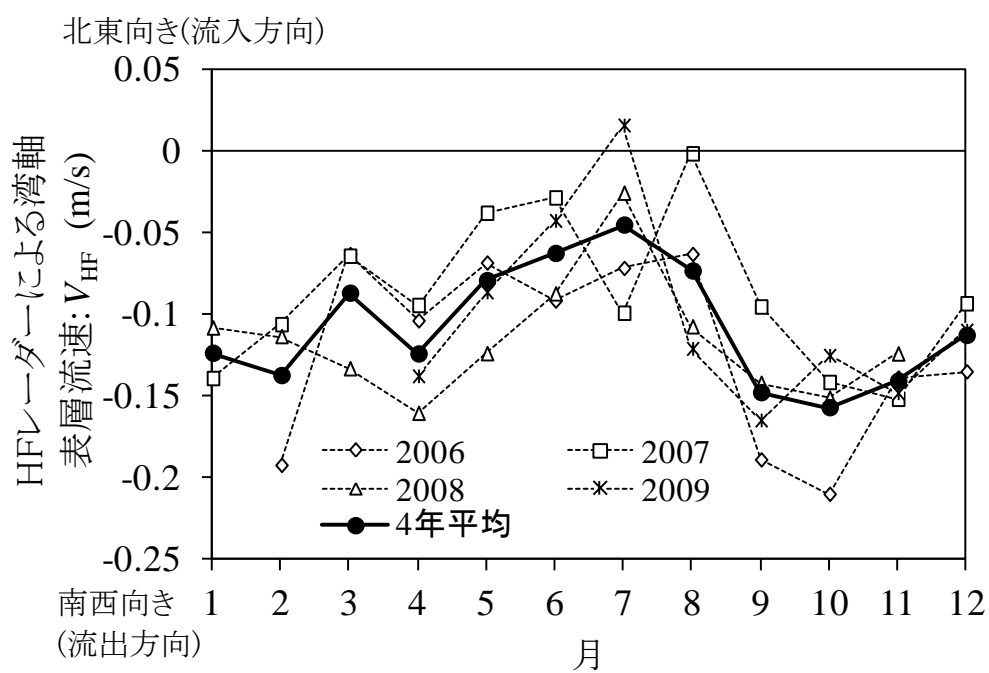


図-4.3 HFレーダーによって計測された湾央から湾口の残差流の月平均データ



#### 4.2.2 海水交換量 $Q$ と湾軸表層流速 $V_{HF}$ の関係

図-4.4 は湾軸表層流速  $V_{HF}$  と海水交換量  $Q$  の 2006 年～2009 年の季節変化である。全体に流出方向(マイナス方向)の湾軸表層流速  $V_{HF}$  が小さくなると、海水交換量  $Q$  も小さくなる傾向にある。

図-4.5 は湾軸表層流速  $V_{HF}$  と海水交換量  $Q$  の関係であり、図-4.6 は各月の 4 年間の平均である。南西向き(流出方向)の湾軸表層流速  $V_{HF}$  が小さいときに、湾口の海水交換量  $Q$  が小さく(悪く)なっているのが分かる。また、4 年平均の図を見ると 1 月と 2 月のみ、他の月と傾向が異なっている。

そこで、1 月と 2 月のデータを除いて示したのが図-4.7 と図-4.8 である。湾軸表層流速  $V_{HF}$  と海水交換量  $Q$  との相関は高く、4 年平均の決定係数  $R^2$  は 0.7929 である。1 月と 2 月の傾向が異なる原因は、後述する冬季の黒潮系暖水の影響ではないかと考えられる。

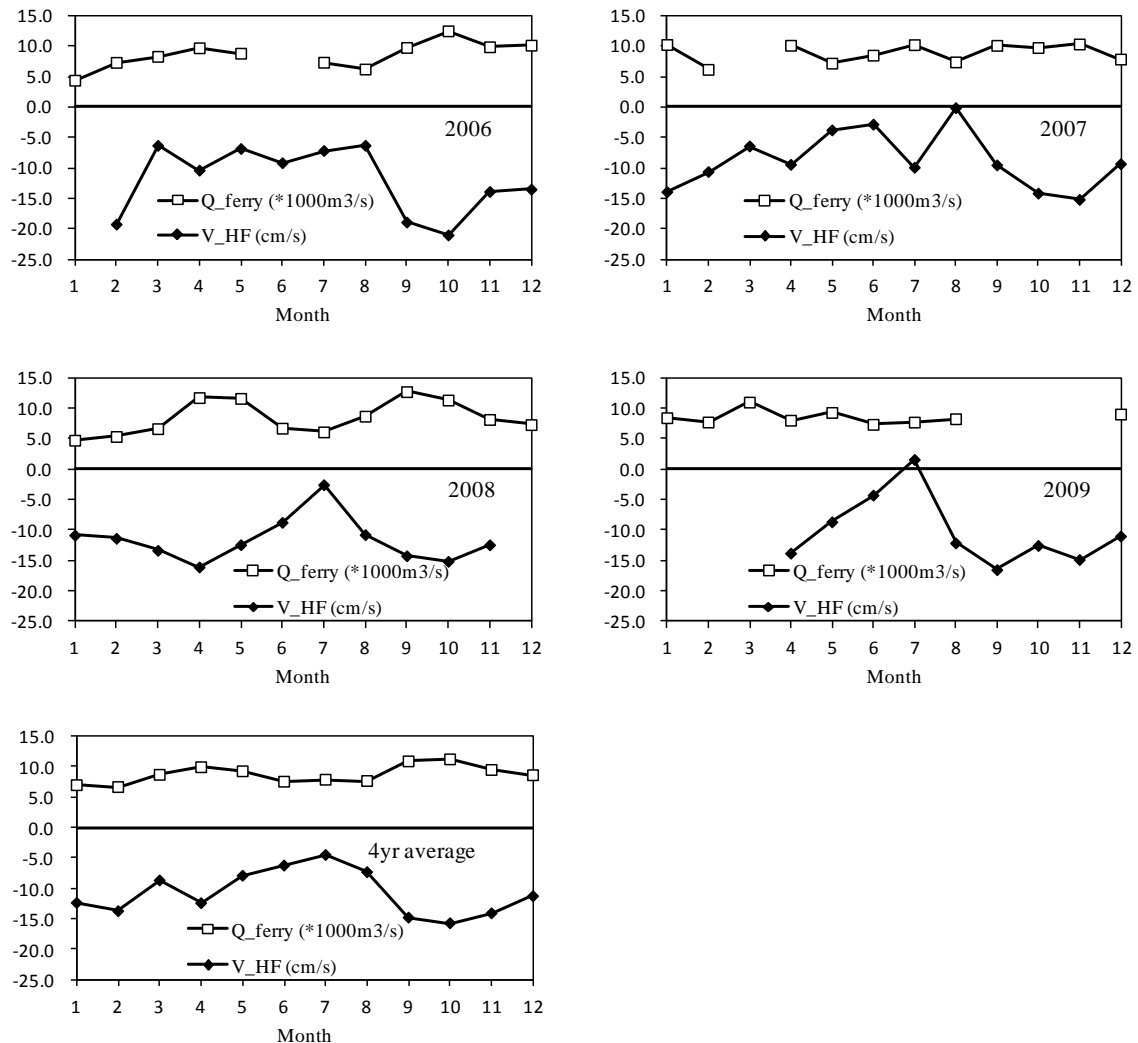


図-4.4 海水交換量  $Q$  と HF レーダーによって得られた湾軸方向流速  $V_{HF}$

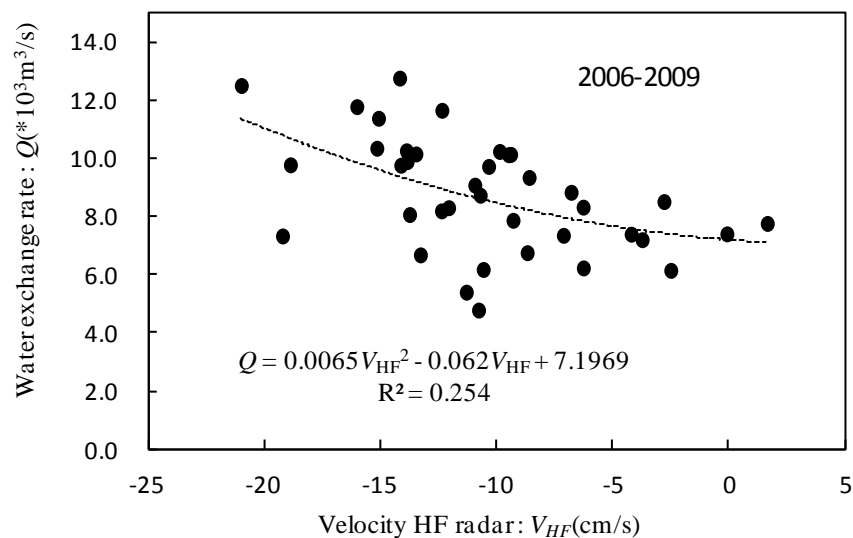


図-4.5 表層の湾軸方向流速  $V_{HF}$  と海水交換量  $Q$

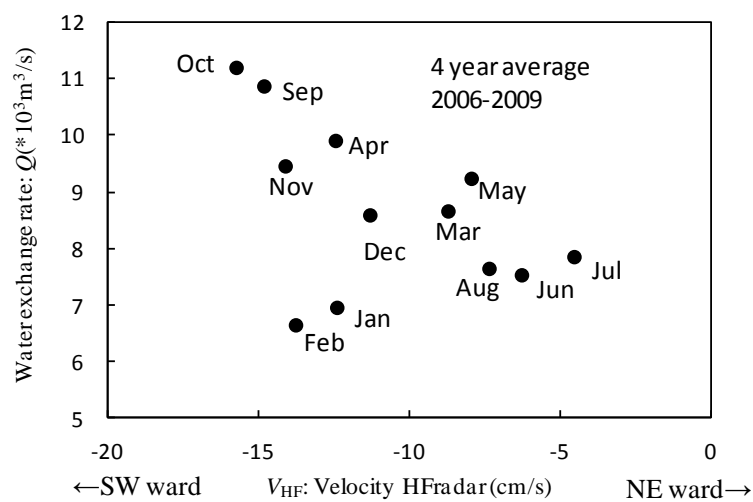


図-4.6 4年平均の海表層の湾軸方向流速  $V_{HF}$  と海水交換量  $Q$

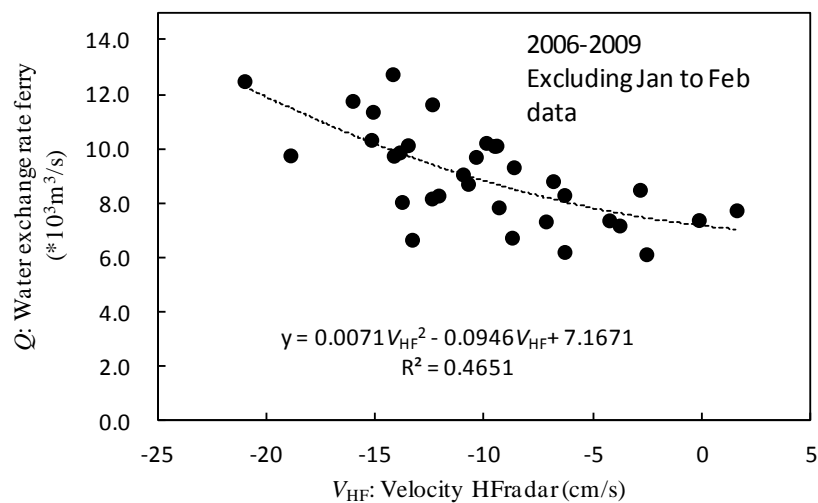


図-4.7 1月と2月のデータを除いた海表層の湾軸方向流速  $V_{HF}$  と海水交換量  $Q$

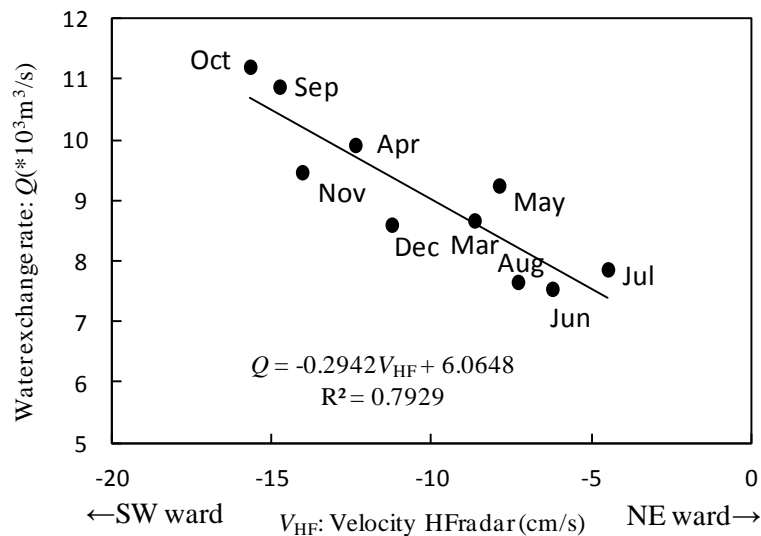


図-4.8 1月と2月を除いた4年平均の海表層の湾軸方向流速  $V_{HF}$  と海水交換量  $Q$

### 4.3 海水交換と湾軸表層流速に及ぼす淡水流入の影響

#### 4.3.1 海水交換と淡水流入の関係

図-4.9 は 2004 年から 2009 年にかけての月平均の淡水流入量  $F_D$  と海水交換量  $Q$  の関係である。ばらつきが大きいものの海水交換量  $Q$  は鉛直軸に切片を持ち、淡水流入量の増加とともに増加する傾向にある。この傾向は Officer & Kester (1991) の Narraganset 湾の傾向(2.1 節参照)と同じであり、淡水流入によって重力循環による海水交換が大きくなることを示している。

この 6 年間のデータに対して回帰直線を求めると、切片が 7140、勾配 4.8 の直線となる。淡水流入量  $\Delta F_D 100 \text{ m}^3/\text{s}$  の増加は海水交換量  $Q$  を  $480 \text{ m}^3/\text{s}$  増加させることになる。ただし、ばらつきが大きく、決定係数  $R^2$  は 0.2109 と小さく、海水交換に対して淡水流入以外の影響も大きいことを示している。

図-4.10 は月平均の淡水流入量  $F_D$  と海水交換量  $Q$  の 6 年間の平均であり、それぞれの月の名前をともに示した。回帰直線と比較すると 1 月と 2 月および 6～8 月にかけての海水交換は回帰直線よりも下にあり、これらの月の海水交換はあまり大きくない。

図-4.11 に月平均の淡水流入量  $F_D$  に対する海水交換量  $Q$  の比を各月毎に示した。6 年間の平均をみると  $Q/F_D$  は冬季の 3～5 月および 11, 12 月に高く約 40 であるのに対し、夏季 7～9 月は低く約 20 である。 $Q/F_D$  は淡水流入量  $F_D$  に対する海水交換の効率とも考えられるが、その効率が夏の 7～9 月に最も悪くなっているのが分かる。

以上のように東京湾の海水交換には淡水流入による重力循環が影響していることが分かる。ただし、 $\Delta F_D / \Delta Q$  や  $F_D / Q$  には季節変化があり、それ以外の要因も顕著なものと考えられる。そこで、次項以降では淡水流入以外の風や気温の影響について調べる。

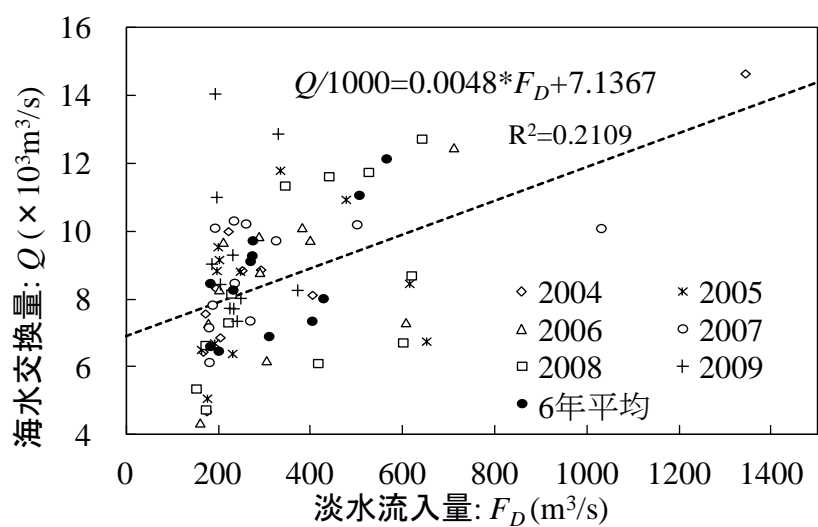


図-4.9 2004 年～2008 年にかけての淡水流入量  $F_D$  と海水交換量  $Q$  の関係

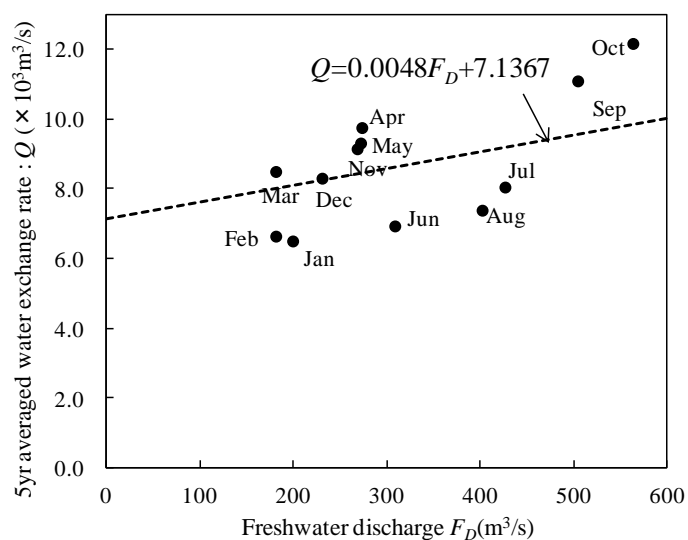


図-4.10 5 年間平均の海水交換量  $Q$  と淡水流入量  $F_D$  の関係

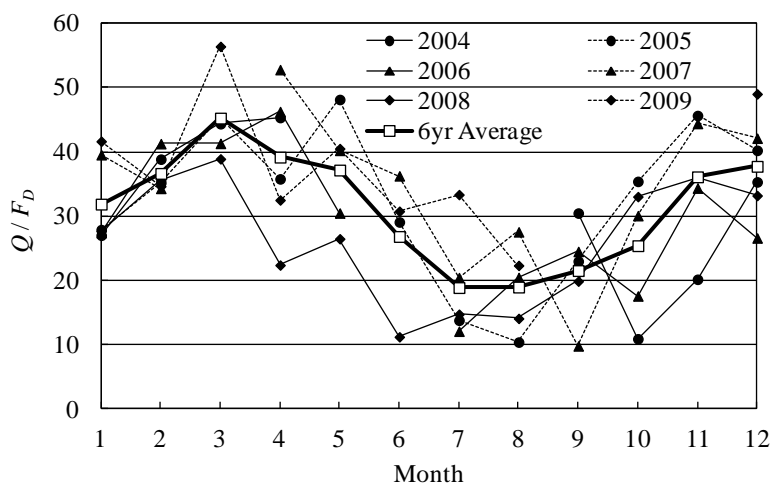


図-4.11 各月の淡水流入量に対する海水交換量の比  $Q/F_D$

#### 4.3.2 湾軸表層流速と淡水流入の関係

図-4.12 は淡水流入量  $F_D$  と湾軸表層流速  $V_{HF}$  との関係である。淡水流入量  $F_D$  が増加すると湾軸表層流速は流出方向に強くなる傾向にあるが、海水交換と淡水流入の関係よりもさらにばらつきが大きく、決定係数  $R^2$  は 0.0253 と非常に小さく、湾軸表層流速に対して淡水流入の影響があまり大きくないことが分かる。

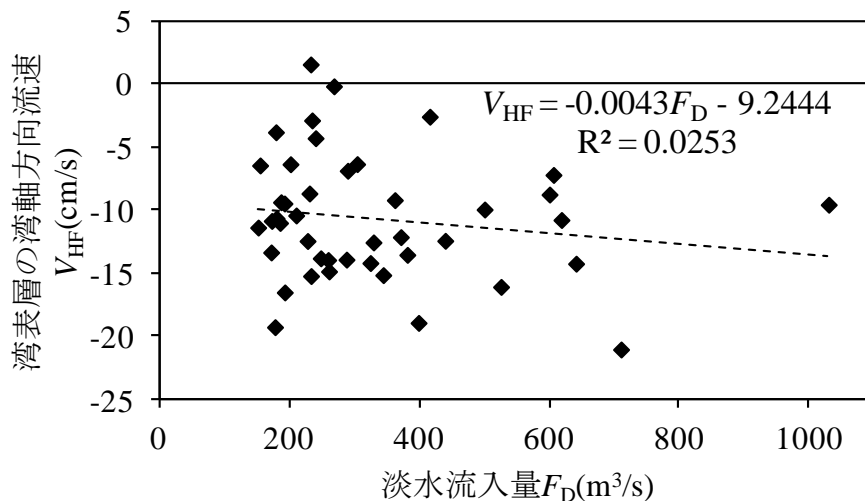


図-4.12 淡水流入量  $F_D$  と湾軸表層流速  $V_{HF}$  との関係

### 4.4 海水交換と湾軸表層流速に及ぼす風の影響

#### 4.4.1 海水交換と風の関係

東京湾の海水交換には湾軸方向の風速が主に影響していると考えられることから、ここでは羽田で計測されている湾軸方向 (NE-SW 方向) の月平均風速  $W$  とフェリー観測で得られた月平均海水交換量  $Q$  を比較する。

図-4.13 は湾軸方向風速  $W$  に対する海水交換量  $Q$  の関係である。プラスが南西風 (北東向き)、マイナスが北東風 (南西向きの風) である。北東風が強いほど海水交換量  $Q$  が大きいように見られるが、北東風の場合でも海水交換量が小さい場合もあり、データのばらつきが大きい。決定係数  $R^2$  が小さいものの、回帰曲線は北東風ほど海水交換量が大きく、南西風になると海水交換量が約  $7500 m^3/s$  に落ち着くような曲線になる。

データを詳細に見ると回帰曲線から大きくずれるのは 1 月と 2 月のデータだった。そこで、それらのデータを除くと図-4.14 のようになり、ばらつきが小さく決定係数も 0.397 と大きい。この回帰直線から月平均湾軸風速  $1 m/s$  によって海水交換が  $900 m^3/s$  変動することが分かる。

3 章で調べた羽田の冬季 (10~3 月) の平均風速は北東風で  $2.5 m/s$  であり、海水交換量は

2250m<sup>3</sup>/s 増加することになる。一方、夏季平均(6~9月)の平均風速は南西風で 1.9m/s であり、海水交換量は 1710m<sup>3</sup>/s 減少していることになる。夏季の海水交換が小さいのは夏季に特徴的な南風によって重力循環と逆向きの吹送流循環が発達し相殺しあうためだと考えられる。

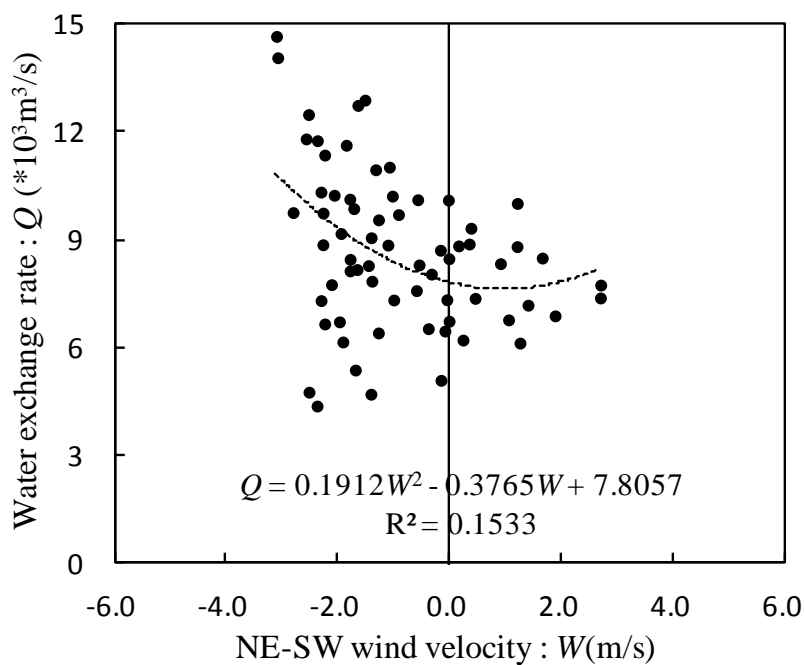


図-4.13 湾軸方向風速  $W$  と海水交換量  $Q$

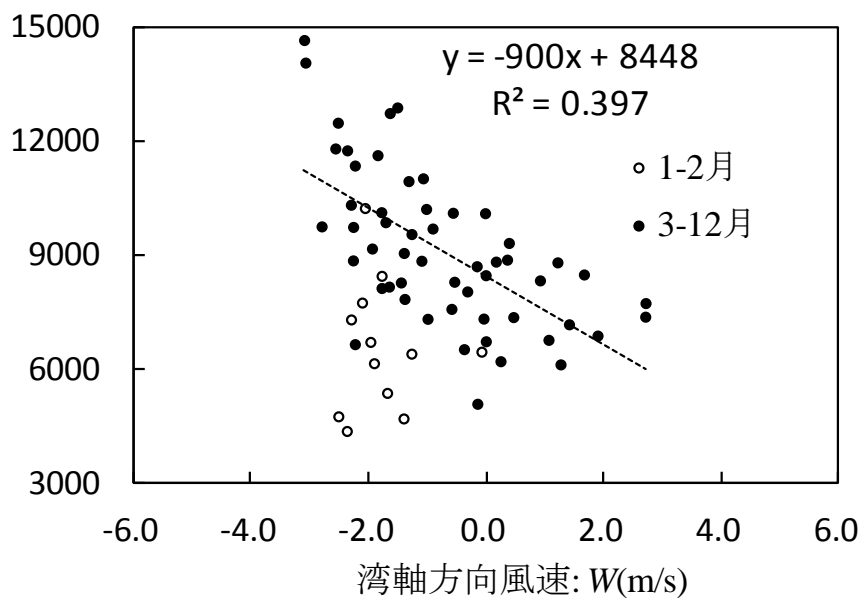


図-4.14 湾軸方向風速  $W$  と海水交換量  $Q$

#### 4.4.2 湾軸表層流速と風の関係

図-4.15 は羽田アメダスの月平均湾軸方向風速  $W$  と HF レーダーで計測された湾表層の湾軸方向流速  $V_{HF}$  との関係である。北東風で湾から流出, 南西風で流入する傾向にある。南西風の影響は強く, 月平均で  $2.5\text{m/s}$  以上になると湾表層の流れは重力循環と逆向きになる。

湾軸表層流速  $V_{HF}$  と湾軸方向風速  $W$  の間の相関は高く, 決定係数は  $0.8144$  だった。ばらつきは淡水流入量などの他の因子によるものと考えられるが, 海表層の流れはその大部分が風によって決定されていることが分かる。

なお, 回帰直線の傾きは風速が  $1\text{m/s}$  増減すると流速が約  $3\text{cm/s}$  増減することを示している。この値は大気と海洋の境界層が相似と仮定した場合に, 吹送流が風速の約  $3.5\%$  になるという解(柳, 1989)と近い値である。

また, 縦軸との接点は  $-7.8\text{cm/s}$  だった。この値は湾軸方向風速  $W$  が  $0$  の場合(風の影響が無いと考えられる場合)の湾軸表層流速を示しており, 主に重力循環によって表層水が  $7.8\text{cm/s}$  の速度で流出していることを示している。

図-4.16 は羽田(アメダス)で計測された湾軸方向風速  $W$  である。東京湾ではこの図のように春から秋にかけて南西風(北東向きの風)が卓越する傾向にある。夏季の海水交換が悪く(図-4.2), 湾表層の流出流速が小さいという傾向(図-4.3)はこのような夏季に特徴的な南西風が影響しているものと考えられる。

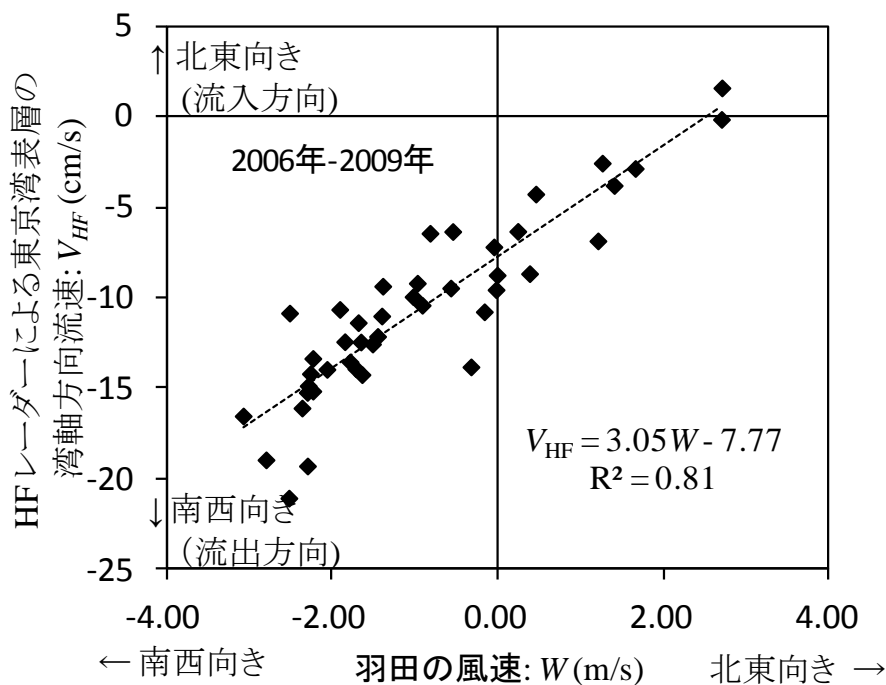


図-4.15 羽田の湾軸方向風速  $W$  と湾軸表層流速  $V_{HF}$  との関係

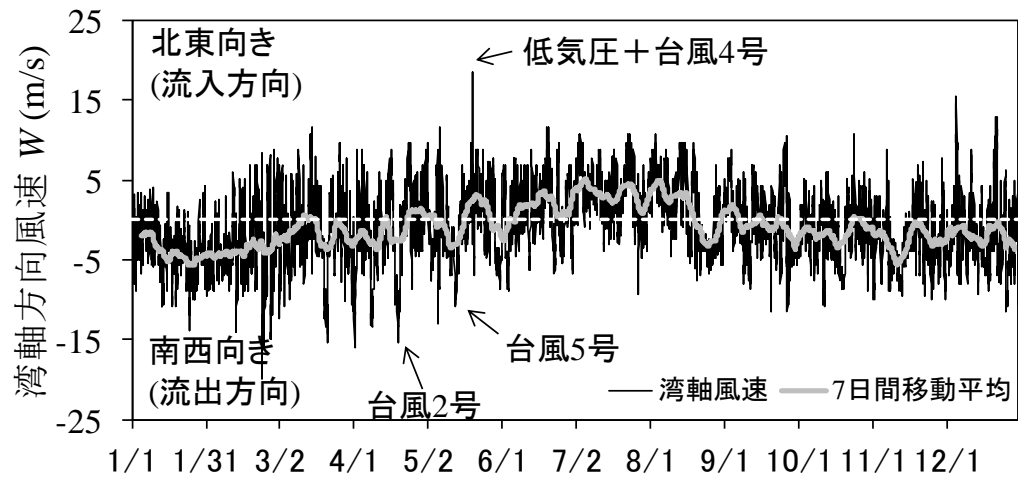


図-4.16 羽田の湾軸方向風速  $W$  と湾軸表層流速  $V_{HF}$  との関係

#### 4. 4. 3 海水交換量と気温, 日射量(短波放射量)の関係

図-4.17 は東京の気温  $T_a$  と海水交換量  $Q$  の関係であり, 図-4.18 は 6 年間の平均である. 図-4.17 中の回帰曲線は気温が  $16^\circ\text{C}$  で最大となるような曲線を描き, 春と秋の海水交換が大きく, 冬と夏の海水交換が小さい. 海水交換に季節変化があることを示唆しているものと考えられる.

図-4.19 は日射量(短波放射量)  $I$  と海水交換量  $Q$  の関係である. ばらつきが大きく, 相関があるようには考えにくい.

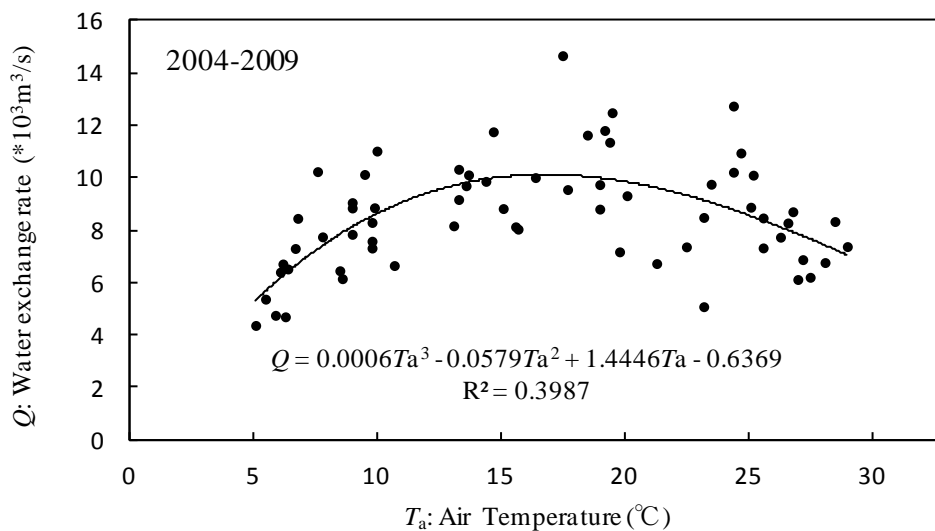


図-4.17 気温  $T_a$  と海水交換量  $Q$  の関係



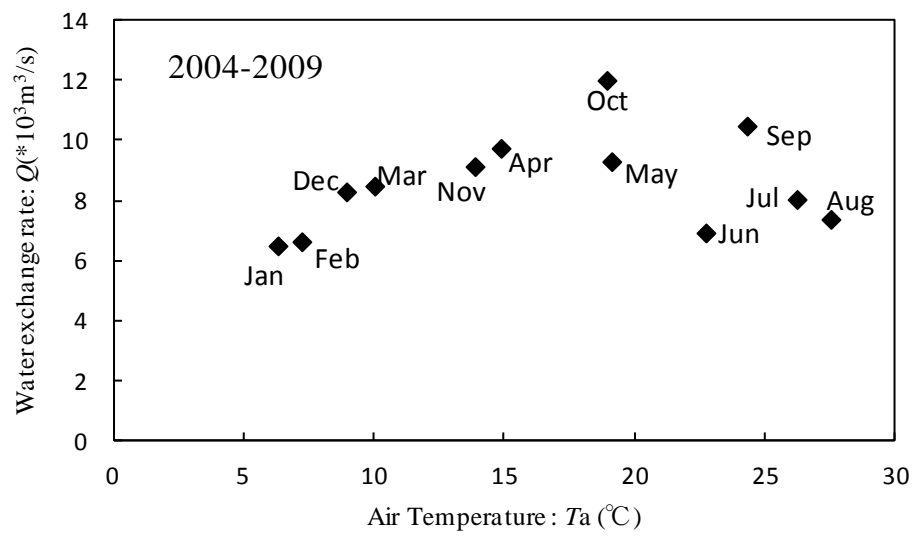


図-4.18 6年平均の気温  $T_a$  と海水交換量  $Q$  の関係

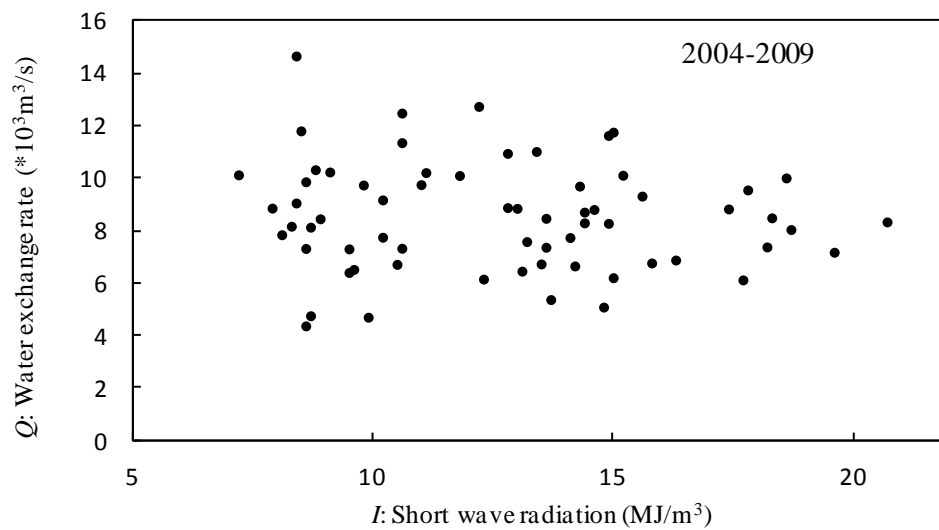


図-4.19 日射量(短波放射量)  $I$  と海水交換量  $Q$  の関係

## 4.5 重回帰分析

### 4.5.1 重回帰分析で仮定した多項式

本節では、AIC(赤池情報量基準)を用いた重回帰分析によって海水交換に影響する因子について調べる。海水交換量  $Q(\text{m}^3/\text{s})$ と湾軸方向風速  $W(\text{m/s})$ , 淡水流入  $F_D$ , 東京の気温  $T_a(^{\circ}\text{C})$ の相関が見られたため、これらの値を変数として以下の25の多項式を仮定し、AICが最小となる多項式を求めた。AICの導出の詳細は北川(2003)に従った。

$$\text{case1 } Q=a_0+a_1W \quad (5.2)$$

$$\text{case2 } Q=a_0+a_1F_R \quad (5.3)$$

$$\text{case3 } Q=a_0+a_1W+a_2F_D \quad (5.4)$$

$$\text{case4 } Q=a_0+a_1W+a_2W^2 \quad (5.5)$$

$$\text{case5 } Q=a_0+a_1F_D+a_2F_D^2 \quad (5.6)$$

$$\text{case6 } Q=a_0+a_1W+a_2W^2+a_3F_D \quad (5.7)$$

$$\text{case7 } Q=a_0+a_1W+a_2W^2+a_3F_D+a_4F_D^2 \quad (5.8)$$

$$\text{case8 } Q=a_0+a_1W+a_2W^2+a_3W^3 \quad (5.9)$$

$$\text{case9 } Q=a_0+a_1F_D+a_2F_D^2+a_3F_D^3 \quad (5.10)$$

$$\text{case10 } Q=a_0+a_1W+a_2W^2+a_3W^3+a_4F_D \quad (5.11)$$

$$\text{case11 } Q=a_0+a_1W+a_2W^2+a_3W^3+a_4F_D+a_5F_D^2 \quad (5.12)$$

$$\text{case12 } Q=a_0+a_1W+a_2W^2+a_3W^3+a_4F_D+a_5F_D^2+a_6F_D^3 \quad (5.13)$$

$$\text{case13 } Q=a_0+a_1W+a_2W^2+a_3W^3+a_4W^4 \quad (5.14)$$

$$\text{case14 } Q=a_0+a_1W+a_2W^2+a_3W^3+a_4W^4+a_5F_D \quad (5.15)$$

$$\text{case15 } Q=a_0+a_1W+a_2W^2+a_3W^3+a_4W^4+a_5F_D+a_6F_D^2 \quad (5.16)$$

$$\text{case16 } Q=a_0+a_1W+a_2W^2+a_3W^3+a_4W^4+a_5F_D+a_6F_D^2+a_7F_D^3 \quad (5.17)$$

$$\text{case17 } Q=a_0+a_1W+a_2W^2+a_3W^3+a_4W^4+a_5F_D+a_6F_D^2+a_7F_D^3+a_8F_D^4 \quad (5.18)$$

$$\text{case18 } Q=a_0+a_1W+a_2W^2+a_3W^3+a_4W^4+a_5W^4+a_6F_D+a_7F_D^2+a_8F_D^3+a_9F_D^4+a_{10}F_D^5 \quad (5.19)$$

$$\text{case19 } Q=a_0+a_1W+a_2W^2+a_3W^3+a_4W^4+a_5W+a_6W \\ +a_7F_D+a_8F_D^2+a_9F_D^3+a_{10}F_D^4+a_{11}F_D^5+a_{12}F_D^6 \quad (5.20)$$

$$\text{case 20 } Q=a_0+a_1W+a_2W^2+a_3F_D+a_4T_a \quad (5.21)$$

$$\text{case 21 } Q=a_0+a_1W+a_2W^2+a_3F_D+a_4T_a+a_5T_a^2 \quad (5.22)$$

$$\text{case 22 } Q=a_0+a_1W+a_2W^2+a_3F_D+a_4T_a+a_5T_a^2+a_6T_a^3 \quad (5.23)$$

$$\text{case 23 } Q=a_0+a_1W+a_2W^2+a_3F_D+a_4T_a+a_5T_a^2+a_6T_a^3+a_7T_a^4 \quad (5.24)$$

$$\text{case 24 } Q=a_0+a_1W+a_2W^2+a_3W^3+a_4F_D+a_5T_a+a_6T_a^2+a_7T_a^3+a_8T_a^4 \quad (5.25)$$

$$\text{case 25 } Q=a_0+a_1W+a_2W^2+a_3W^3+a_4W^4+a_5F_D+a_6T_a+a_7T_a^2+a_8T_a^3+a_9T_a^4 \quad (5.26)$$

$$\text{AIC} = n \log 2\pi + n \log \hat{\sigma}^2 + n + 2(m + 2) \quad (5.27)$$

ここで、 $n$  はデータ数、 $m$  は各ケースの多項式の次数、 $\hat{\sigma}^2$ は最小二乗法で求めた回帰モデルの残差分散である。

#### 4.5.2 重回帰分析結果

図-4.20 は各ケースの AIC と決定係数である。AIC が最小だったのは Case22 の湾軸方向風速が 2 乗, 淡水流入量が 1 乗, 水温が 3 乗の多項式だった。このとき, AIC は 245.6, 次数  $m$  は 6, 決定係数  $R^2$  は 0.62726 だった。なお, データ数  $n$  は 67 である。

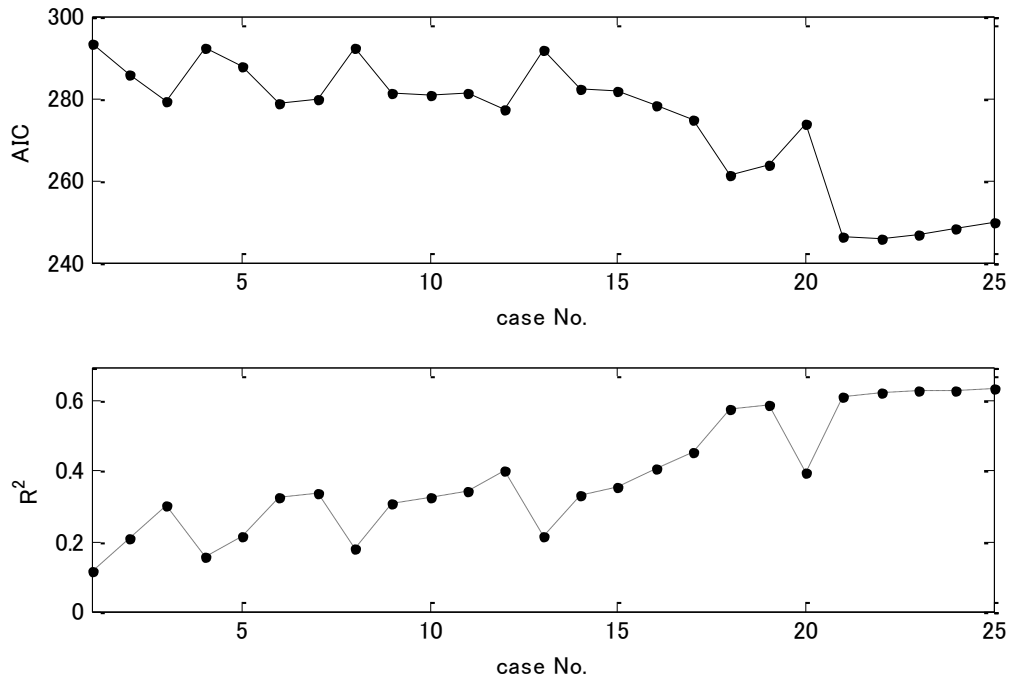


図-4.20 各ケースの AIC と決定係数

図-4.21 は観測データとその推定値であり, 図-4.22 はその時系列である。湾軸方向風速  $W$  および淡水流入量  $F_D$  だけでは再現性が悪く, 気温  $T_a$  を入れることで再現性がよくなっているのが分かる。なお, 図中の Case2, Case5, Case6, Case22 の回帰式は以下のとおりである。風  $W$  の係数には大きな変化が見られないものの, 淡水流入量  $F_D$  の係数は風と気温の効果が入るにつれて小さくなる。Case2 は図-4.9, Case5 は図-4.13 の回帰式と同じである。

$$\text{Case2} \quad Q/1000 = 7.137 + 0.0048 F_D \quad (5.28)$$

$$\text{Case5} \quad Q/1000 = 7.806 - 0.377 W + 0.191 W^2 \quad (5.29)$$

$$\text{Case6} \quad Q/1000 = 6.516 - 0.352 W + 0.156 W^2 + 0.0044 F_D \quad (5.30)$$

$$\begin{aligned} \text{Case22} \quad Q/1000 = & -3.457 - 0.488 W + 0.160 W^2 + 0.0024 F_D \\ & + 1.719 T_a - 0.078 T_a^2 + 0.001 T_a^3 \end{aligned} \quad (5.31)$$

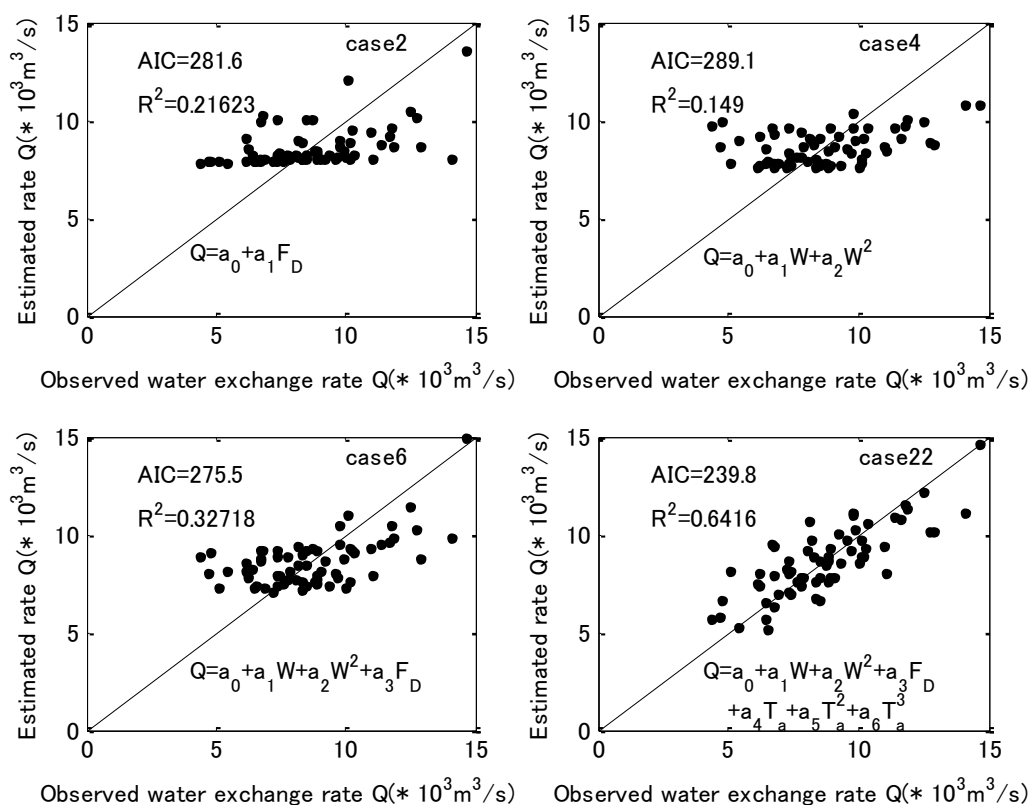


図-4.21 海水交換量の観測データと推定値

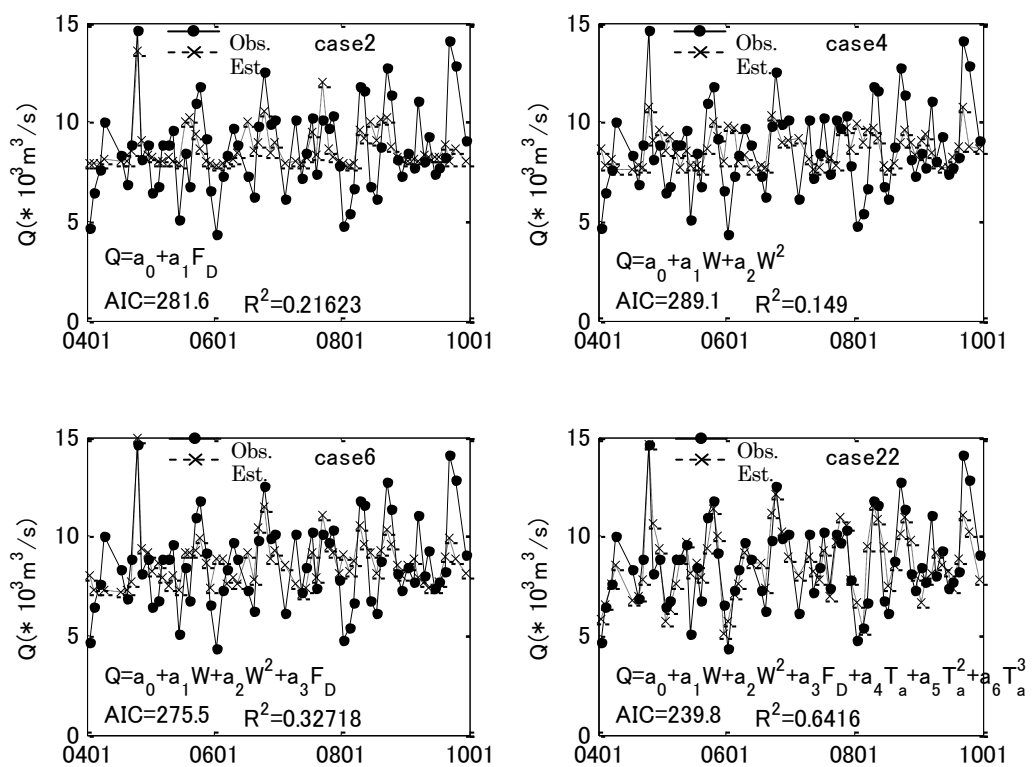


図-4.22 海水交換量の観測データと推定値の2004年～2009年までの時系列

## 4.6 湾奥の水質との関連について

### 4.6.1 千葉灯標の月平均底層溶存酸素と海水交換量および気象条件との関係

ここでは東京湾奥の千葉灯標の観測データと比較することにより、湾口の海水交換と湾奥の水質の関係について調べる。千葉灯標では2003年3月から水質と流れの観測を連続的に実施しており、そのうち月平均の底層(水深10m)の溶存酸素  $DO$  と、月平均の千葉灯標の表層と底層の密度差  $\Delta\sigma_t$ 、塩分差  $\Delta S_H$ 、水温差  $\Delta T_H$ 、気温  $T_a$ 、淡水流入量  $F_D$ 、湾軸方向風速  $W$ 、フェリーによって計測された湾口の海水交換量  $Q$  を比較する。

#### (1) 密度成層と溶存酸素の関係

密度成層は表層と底層の密度差、塩分差、水温差が大きいほど強くなる。そこで溶存酸素と密度成層の関係を調べるため、千葉灯標底層  $DO$  と表層底層の密度差  $\Delta\sigma_t$ 、塩分差  $\Delta S_H$ 、水温差  $\Delta T_H$  を比較したのが図-4.23 (a)～(c)である。

$DO$  は密度差  $\Delta\sigma_t$ 、塩分差  $\Delta S_H$  が増加するにつれて指数関数的に減少する傾向にあり、密度成層が  $DO$  を低下させていることが分かる。

水温差  $\Delta T_H$  との関係(図-4.23(c))についてみると、夏の底層の水温が表層よりも低いときに水温差が大きくなるにつれて  $DO$  が減少する傾向にある(図中の  $\Delta T_H$  がマイナスの時に相当)。図中、 $\Delta T_H$  がプラスの時にも  $DO$  が減少する傾向にあるが、これは冬場、湾中央底層部に入り込んだ表層よりも暖かい外洋水が貧酸素化し、それが湧昇して湾奥底層に広がっていることを示している。

#### (2) 気温、淡水流入量、湾軸方向風速、海水交換量と千葉灯標底層の溶存酸素の関係

図-4.24 は東京の気温  $T_a$  と底層溶存酸素  $DO$  の関係である。溶存酸素は気温と逆相関の関係にあり、1ヶ月前の気温との相関が最も高かった。気温の上昇にともない、密度成層が発達しやすくなることと、有機物の分解にともなう酸素消費が活発になることを示しているものと考えられる。

図-4.25 は淡水流入量  $F_D$  と底層溶存酸素  $DO$  の関係である。淡水流入は表層の塩分を低下させるため、密度成層の発達につながる。そのため、ばらつきはあるものの傾向は密度成層強度と底層溶存酸素の関係を示した図-4.23(a), (b)と同じであり、底層溶存酸素は淡水流入量の増加とともに指数関数的に減少する傾向にある。

図-4.26 は湾軸方向風速  $W$  と底層溶存酸素の関係である。湾奥向きの風(プラス)で  $DO$  が低くなる傾向が見られるが、湾奥向きの風は一般に夏季に吹くことから、図には風の影響というよりも夏の密度成層の影響が出ている可能性がある。

図-4.27 は湾口での海水交換量  $Q$  と底層溶存酸素の関係である。相関は通年で見る限り、ほとんど見られない。

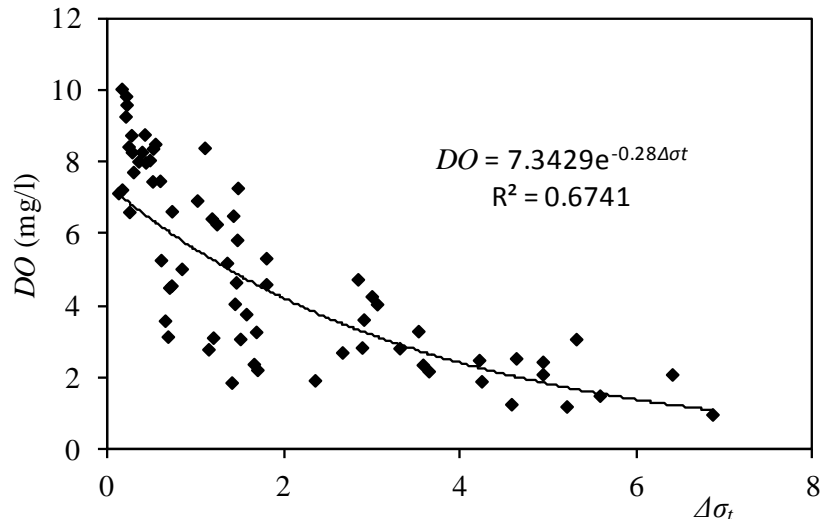


図-4.23(a) 千葉灯標の表層と底層の  $\sigma_t$  の差  $\Delta\sigma_t$  と底層の溶存酸素  $DO$  の関係

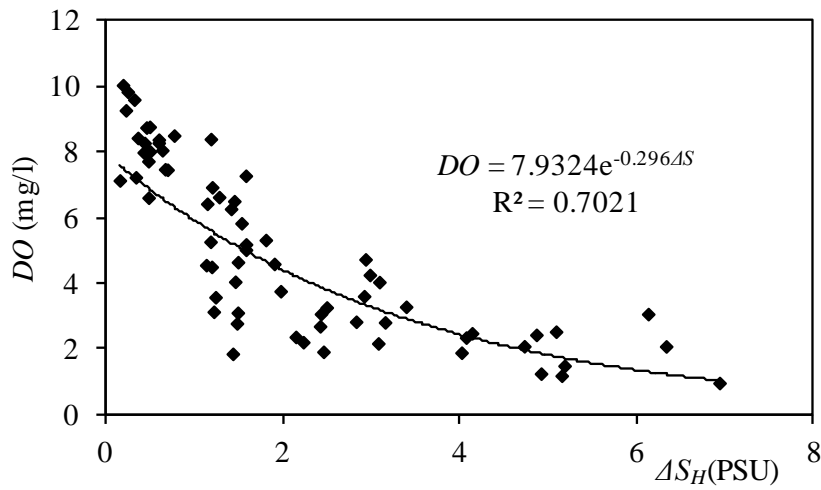


図-4.23(b) 千葉灯標の表層と底層の塩分差  $\Delta S_H$  と底層の溶存酸素  $DO$  の関係

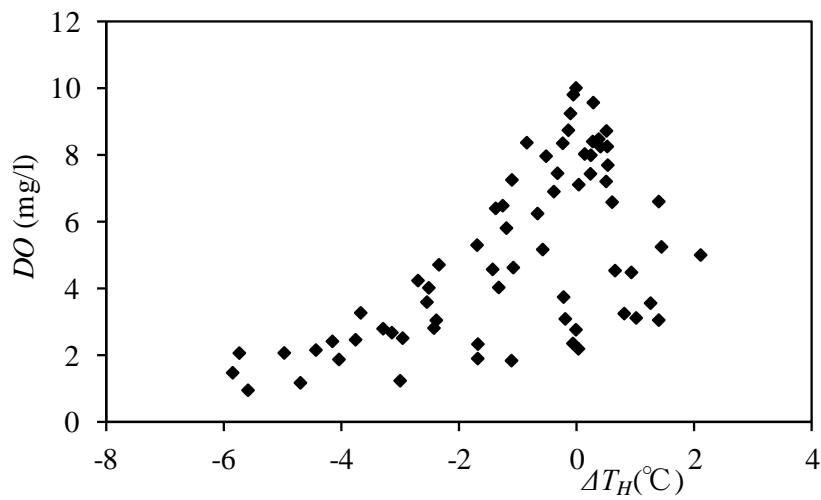


図-4.23(c) 千葉灯標の表層と底層の水温差  $\Delta T_H$  と底層の溶存酸素  $DO$  の関係

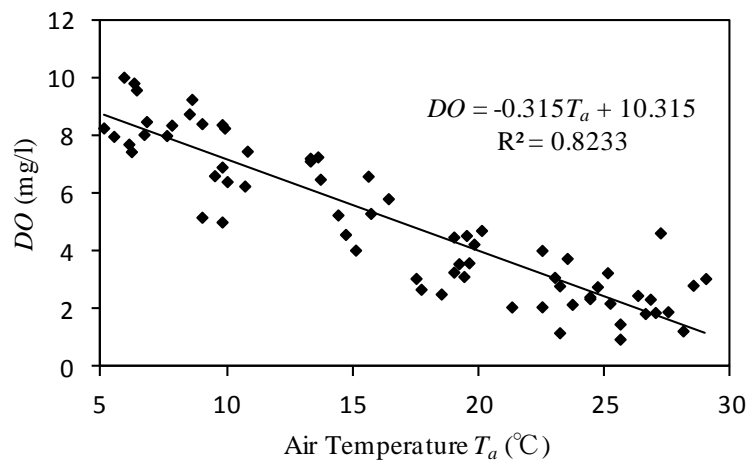


図-4.24 東京の気温  $T_a$  と千葉灯標の溶存酸素  $DO$  の関係

(なお、気温は1ヶ月前の気温であり、同じ月の気温よりも相関が高い)

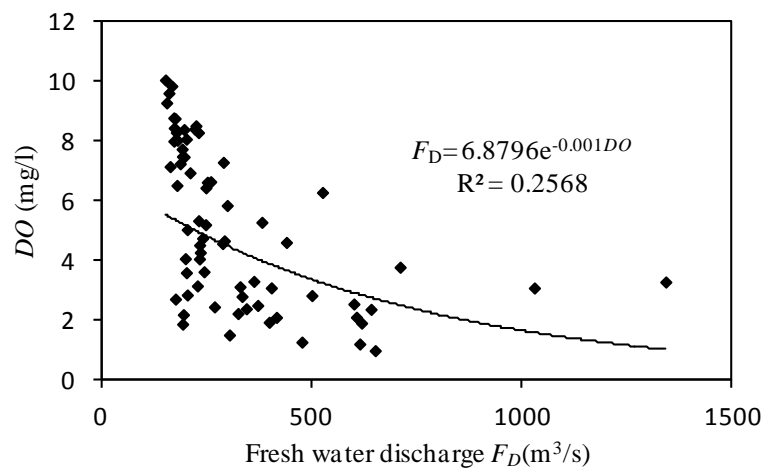


図-4.25 淡水流入量  $F_D$  と千葉灯標の溶存酸素  $DO$  の関係

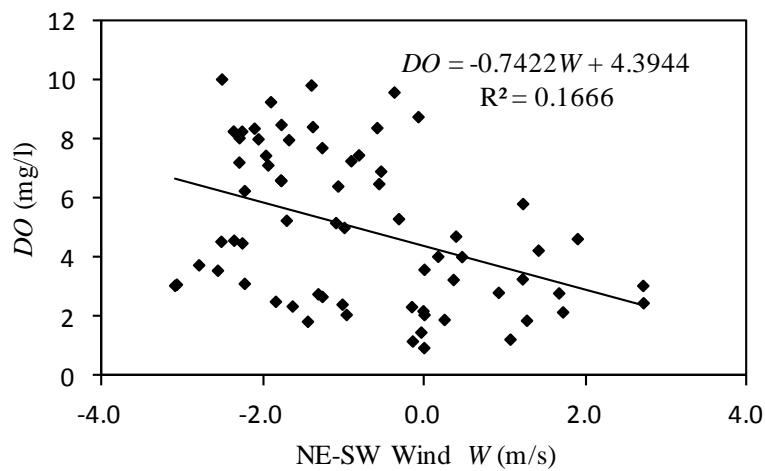


図-4.26 湾軸方向風速  $W$  (プラスが湾奥向きの風) と千葉灯標の溶存酸素  $DO$  の関係

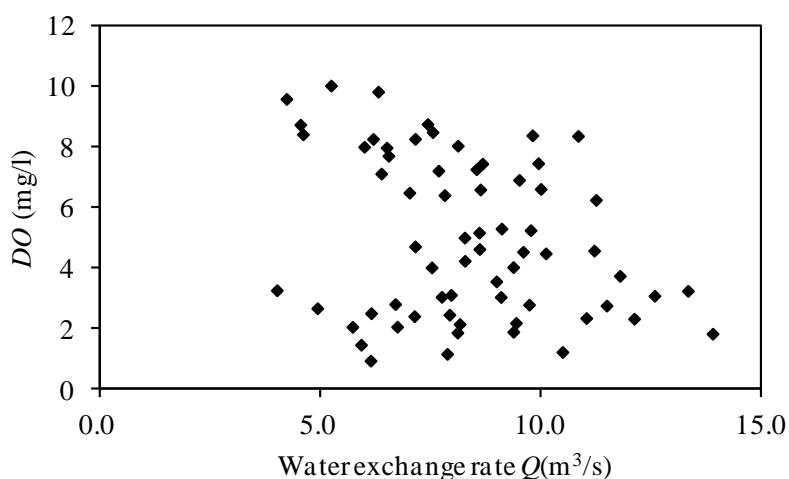


図-4.27 海水交換量  $Q$  と千葉灯標の溶存酸素  $DO$  の関係

#### 4.6.2 夏季の底層溶存酸素について

図-4.28, 4.29, 4.30 はそれぞれ夏季の6月～9月の気温、湾軸風向風速、湾口の海水交換量と底層溶存酸素  $DO$  の関係である。図-4.24, 4.26 のように通年してみると底層溶存酸素と気温、湾軸方向風速は相関があるように見られるものの、夏季だけについてみると必ずしも相関が良くない。

図-4.31 は淡水流入量  $F_D$  と底層溶存酸素  $DO$  の関係である。淡水流入量が多いほど底層溶存酸素が小さくなる傾向にある。そこで、海水交換量  $Q$  を淡水流入量  $F_D$  で割った  $Q/F_D$  で溶存酸素および密度差  $\Delta\sigma_t$  と比較すると、いずれも相関が高くなる傾向が見られた(図-4.32, 図-4.33)。  $Q/F_D$  は淡水流入量に対する海水交換の効率を示すものと考えられ、この効率が低いほど湾奥の密度成層が強くなり、溶存酸素が低くなることを示している可能性がある。

以上まとめると、夏季の湾奥の溶存酸素には密度成層の発達が大きく影響している。湾奥にはHFレーダーの観測で見られた時計回り循環があり、流入した淡水による塩分の低下が密度成層の発達と溶存酸素の低下に最も影響している可能性がある。



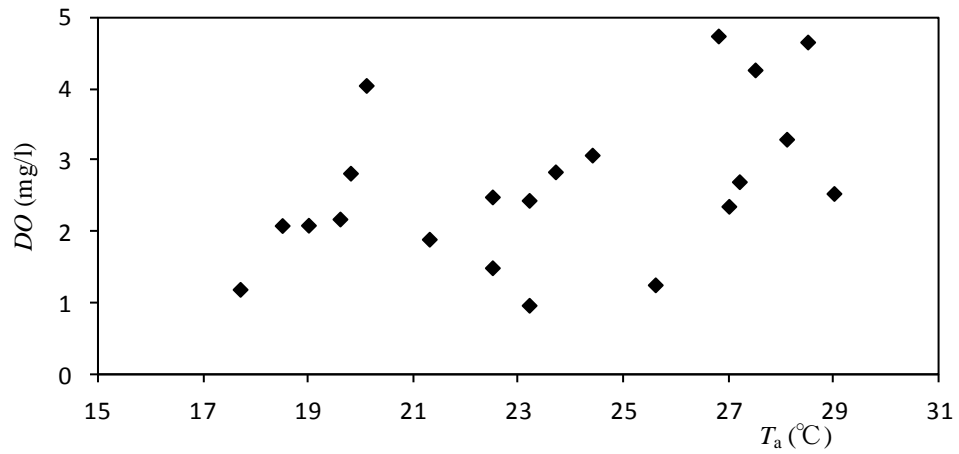


図-4.28 夏季(6～9月)の気温と千葉灯標の底層溶存酸素 DO の関係

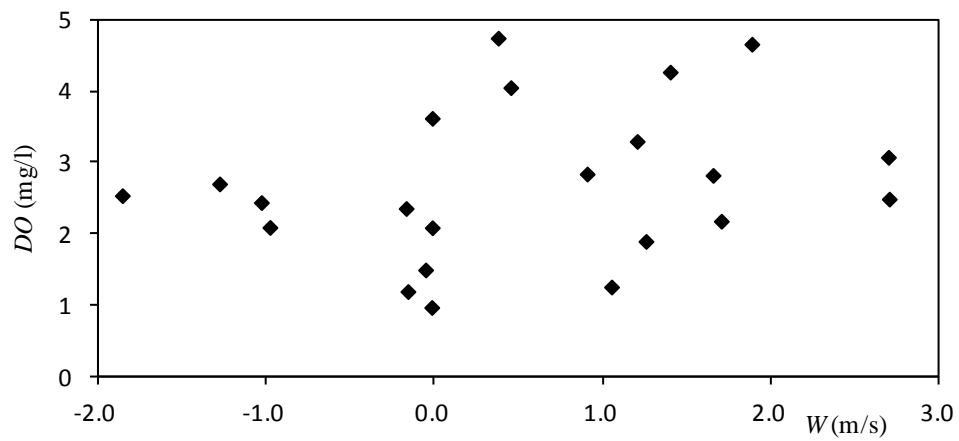


図-4.29 夏季(6～9月)の湾軸方向風速  $W$  と千葉灯標の底層溶存酸素 DO の関係

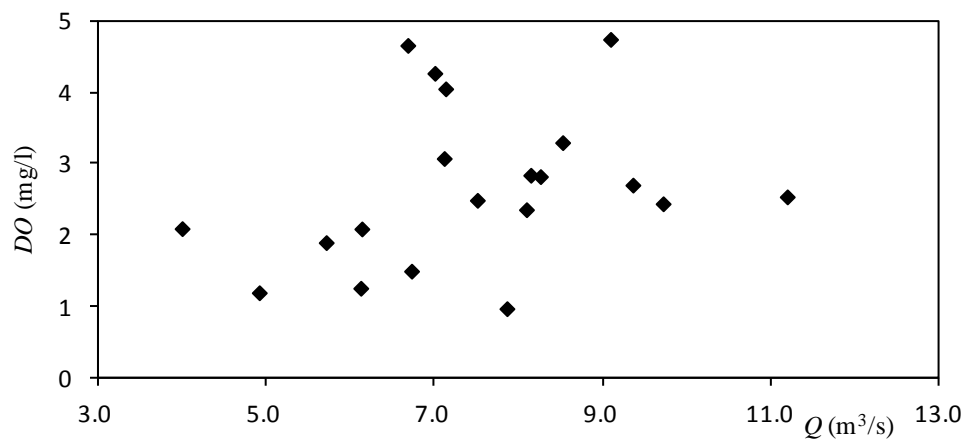


図-4.30 夏季(6～9月)の海水交換量  $Q$  と千葉灯標の底層溶存酸素 DO の関係

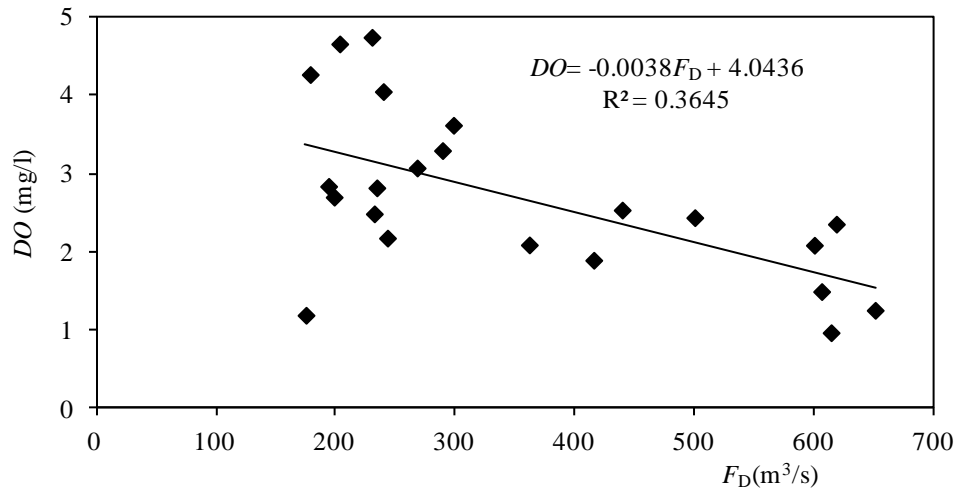


図-4.31 夏季(6～9月)の淡水流入量  $F_D$  と千葉灯標の底層溶存酸素  $DO$  の関係

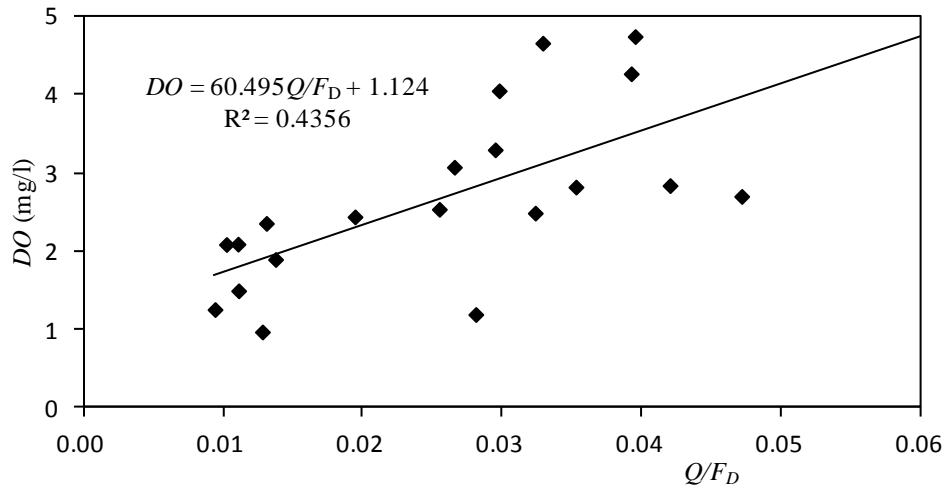


図-4.32 夏季(6～9月)の淡水流入量  $Q/F_D$  と千葉灯標の底層溶存酸素  $DO$  の関係

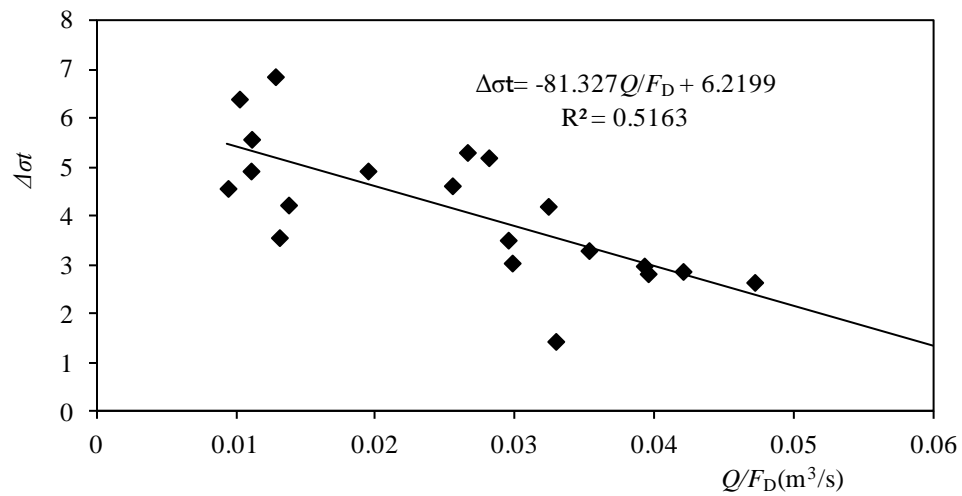


図-4.33 夏季(6～9月)の淡水流入量  $Q/F_D$  と密度差  $\Delta\sigma_t$  の関係

## 4.7 4章のまとめ

1) 海水交換と淡水流入量, 風を比較したところ, 月平均淡水流入  $100\text{m}^3/\text{s}$  よって  $480\text{m}^3/\text{s}$  の海水交換が発生し, 月平均の湾軸風速  $1\text{m/s}$  によって海水交換が  $900\text{m}^3/\text{s}$  変動することが分かった. 年平均淡水流入量  $424\text{m}^3/\text{s}$  に対して海水交換量は  $2035\text{m}^3/\text{s}$  発生する. 一方, 冬季(10~3月)の平均風速は北東風で  $2.5\text{m/s}$  であり, 海水交換量は  $2250\text{m}^3/\text{s}$  増加, 夏季平均(6~9月)の平均風速は南西風で  $1.9\text{m/s}$  であり, 海水交換量は  $1710\text{m}^3/\text{s}$  減少していることになる. 夏季の海水交換が小さいのは, 夏季に特徴的な南風によって重力循環と逆向きの吹送流循環が発達し, 相殺しあうためであることが分かった.

2) HFレーダーの海軸表層流速  $V_{\text{HF}}$  と海水交換量  $Q$  には強い相関があり, とともに風の影響が顕著なことが明らかになった. 特に夏季の南西風の影響は強く, 月平均で  $2.5\text{m/s}$  以上になると湾軸表層流速は重力循環(表層流出・下層流入)と逆向きになることが分かった.

3) 湾軸表層流速  $V_{\text{HF}}$  と湾軸方向風速  $W$  の間の相関は高く, 決定係数は  $0.8144$  だった. なお, 回帰直線の傾きは風速が  $1\text{m/s}$  増減すると流速が約  $3\text{cm/s}$  増減することを示しており, この値は大気と海洋の境界層が相似と仮定した場合に, 吹送流が風速の約  $3.5\%$  になるという解(柳, 1989)と近い値であった. また, 縦軸との接点は  $-7.8\text{cm/s}$  だった. この値は湾軸方向風速  $W$  が  $0$  の場合(風の影響が無いと考えられる場合)の湾軸表層流速を示しており, 主に重力循環によって表層水が  $7.8\text{cm/s}$  の速度で流出していることを示している.

4) 重回帰分析を行ったところ, 海水交換量  $Q$  は湾軸方向風速  $W$  の2次式, 淡水流入量  $F_D$  の1次式, 気温  $T_a$  の3次式で最小 AIC をとった. その関数は以下の式で表された.

$$Q/1000 = -3.457 - 0.488 W + 0.160 W^2 + 0.0024 F_D + 1.719 T_a - 0.078 T_a^2 + 0.001 T_a^3$$

5) 千葉灯標での水質を調べたところ, 溶存酸素 DO は表層と底層の密度差  $\Delta\sigma_t$ , 塩分差  $\Delta S_H$  が増加するにつれて指数関数的に減少する傾向にあり, 密度成層が DO を低下させていることが分かった. また, 溶存酸素は気温と逆相関の関係にあり, 1ヶ月前の気温との相関が最も高かった.

## 5 章 数値計算による流況と水質の再現と応答解析

### 5.1 概 要

一般に海洋観測データは時間的、空間的にまばらにしか得ることができず、東京湾の流れや水質の全体像を捉えるには不足している。例えば、湾内ではいくつかの行政・研究機関によって観測船による水質の観測が実施されているが、そのデータは月 1 回程度であり、気象条件などによって日々変化する現象を把握するには十分ではない。そこで、より現象を詳細に把握するためには、観測データを補間する数値計算を実施することが望まれる。また、数値計算を用いれば淡水流入量や風向風速を変化させるなど、パラメトリックスタディーにより、それぞれの因子が湾内の流動や水質に与える効果を評価することが可能となる。

そこで、本論文では 3 次元の数値計算を用いてフェリーの観測データなどの観測データを再現した後、東京湾口と東京湾中央・湾奥との関係について調べることにする。以下、第 5 章の構成を示す。

**5.2 節「数値計算モデル」**では、本研究で用いた流動モデルの概要を述べる。なお、詳細は付録で述べる。

**5.3 節「計算条件」**では、東京湾の数値計算を実施する際の計算格子と境界条件について述べる。

**5.4 節「計算結果の検証」**では、湾内で観測された塩分水温、および東京湾フェリーで観測されたデータと計算結果を比較して検証を行う。

**5.5 節「各種境界条件に対する海水交換量の応答解析」**では、前節で得られた 2008 年の再現計算を基本ケースとして、淡水流入量などのパラメータを変化させて、海水交換量がどのように応答するかを調べる。まず、過去の河川からの淡水流入量や風向風速、日射量などの気象条件について整理し、それらの年変動などの特性を調べる。その年変動をもとに応答解析に用いる各種境界条件の変化量を定め、東京湾の応答解析を実施する。応答解析では淡水流入、風向風速、日射、気温を変化させて海水交換量の応答を調べることとした。

## 5.2 計算プログラムと計算条件

本論文で用いた計算モデルは(独)港湾空港技術研究所で開発している非静水圧 3 次元流動モデル (Storm Surge and Tsunami Simulator in Oceans and Coastal areas, Long-Term simulation version; STOC-LT) である. 非静水圧 3 次元流動モデルは連続式と  $x, y, z$  方向の運動方程式, および塩分水温の移流拡散方程式を連立させて解くものであり, レベル座標系でコーディングされている.

なお, 数値モデルの構成方程式, その解法については, 付録 A に詳細を記した.

計算は表-5.1 に示す 2007 年 1 月 1 日～2008 年 12 月 31 日を解析期間として東京湾を水平 2km, 鉛直 29 層に分割して実施した. 以下に各種境界条件について述べる.

表-5.1 計算条件一覧

解析期間	2007年1月1日～2008年12月31日			
水平格子	2km			
鉛直格子	34層	格子中心の水深は 3, 0.5, -0.5, -1.5, -2.5, -3.5, -4.5, -6, -8, -10, -12, -14, -16, -18, -20, -22, -24, -26, -28, -30, -32, -34, -36, -38.5, -42.5, -47.5, -52.5, -57.5, -62.5, -67.5, -72.5, -77.5, -82.5, -90(m)		
水平拡散係数	SGSモデル			
鉛直拡散係数	中村ら(1989)			
開境界無反射条件	日野ら(1987)			
初期条件	全セルで水温10℃, 塩分31PSU, 流速ゼロ			
境界条件	湾口	塩分・水温	水深0m以上	勾配ゼロ
			水深0m以深	小型船舶観測S4地点での約2週間おきのデータ
		水位	館山の主要8分潮	
			M2,S2,O1,K1,N2,K2,P1,Q1	
		流速	全水深勾配ゼロ	
	河川	江戸川, 荒川, 中川, 多摩川, 鶴見川, 隅田川		
		流量, 水温	国交省水文水質データベースから算出	
		塩分	ゼロ	
	表層	風向風速	羽田アメダスの1時間おきのデータ	
		気温, 日射, 降水, 気圧	東京アメダスの1時間おきのデータ	

### 5.2.1 計算格子

計算は水平 2km 格子として, 図-5.1 に示す城ヶ島, 館山を結ぶラインよりも湾奥側の東京湾を対象とした. フェリーの観測結果との比較を容易にするため, 反時計まわりに 32 度回転させ, フェリーの航路が  $x$  軸に平行になるようにした. 各格子の水深は以下のようにして求めた.

- ①国土地理院発行の数値地図 50m メッシュ(標高)から各メッシュの海陸判定を行う。
- ②(財)日本水路協会刊行の「沿岸の海の基本図デジタルデータ」から各格子の水深データを抽出する。
- ③格子点に水深データが無い場合には周囲の観測データから空間補間して求めた。
- ④東京湾口の水深は深く、600m にもおよんでいる。水深が深いと潮汐の波速が速く、数値計算の時間間隔  $\Delta t$  を細かくとる必要があるため、ここでは簡略化して水深 90m 以深の地点では水深を 90m とした。

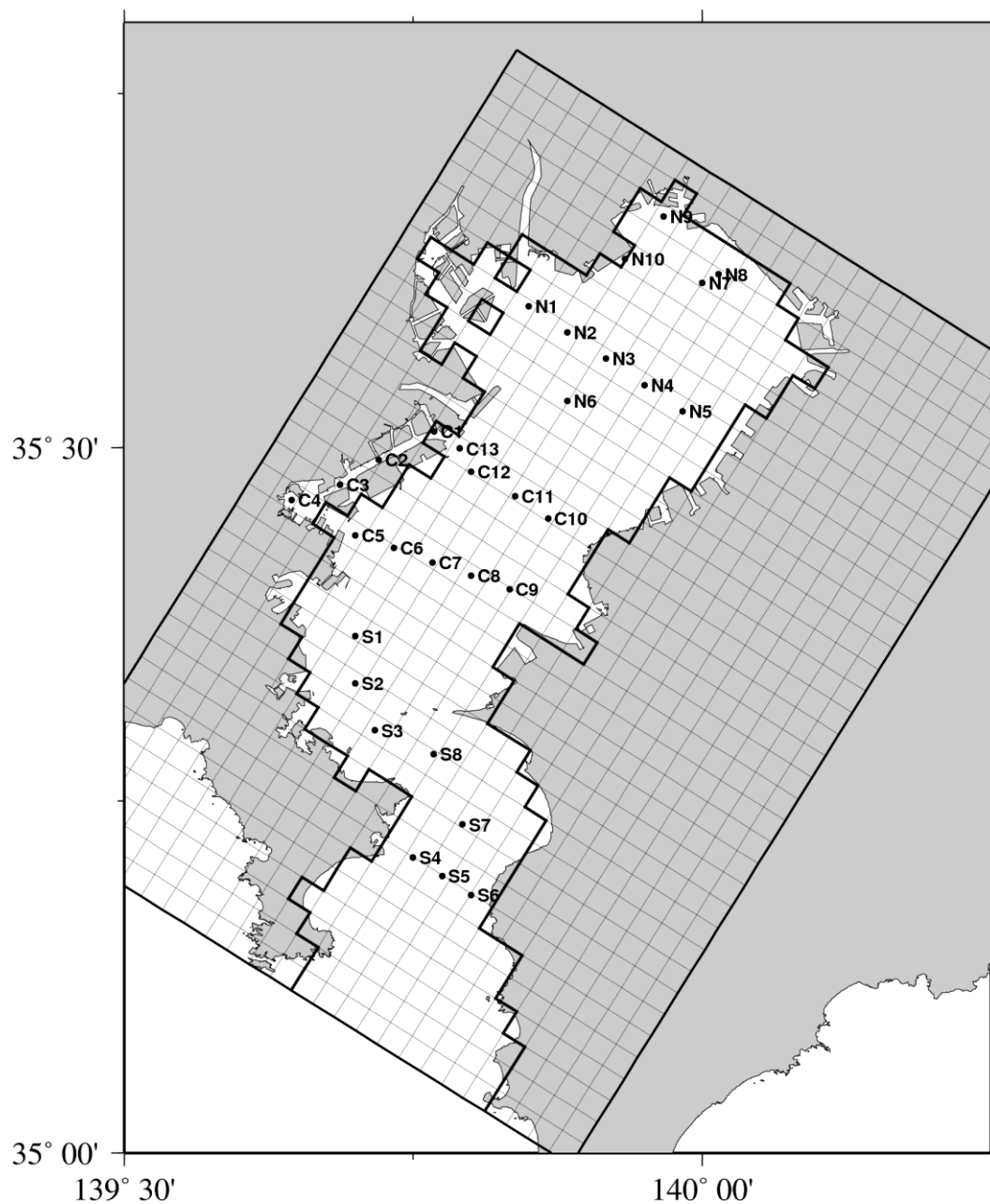


図-5.1 計算に用いた格子と観測点の位置(●:横浜技調観測点)  
東京湾フェリーの標準航路が  $x$  軸に平行になるように地図座標を 32 度回転させている。

## 5.2.2 湾口の境界条件

### (1) 潮 位

湾口の潮位は、館山の潮汐調和定数(海上保安庁, 1992)のうち, 主要 8 分潮(M2, S2, O1, K1, N2, K2, P1, Q1)を用いて図-5.2 のように求めて, 境界条件として与えた.

### (2) 水温と塩分

湾口の水温塩分の境界条件には, 横浜技調の観測船が湾口 S4 地点で計測した塩分水温データを与えた. 観測は 2007 年 8 月から実施されているため, それ以前の条件は 2008 年と 2009 年の観測値の平均値とした. また, 水温, 塩分ともに水深 0m 以上のみ境界条件を勾配ゼロとし, それ以外は観測データから図-5.3(a),(b)のようにして与えた. タイムステップ毎の条件は観測データを時間方向に線形補間して与えた.

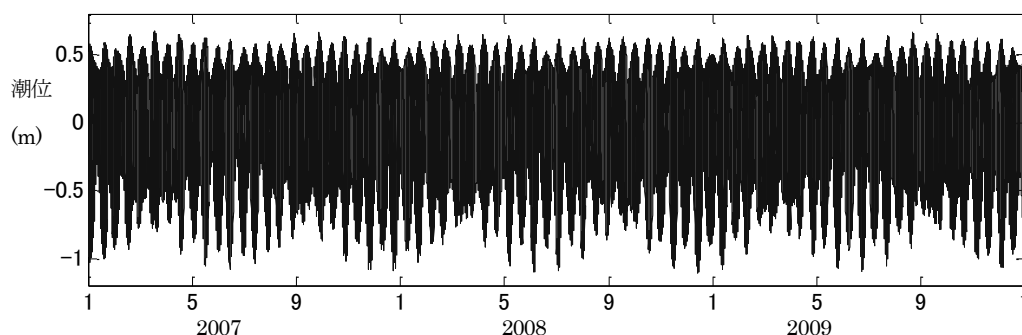


図-5.2 湾口の潮汐(館山主要 8 分潮から算定)

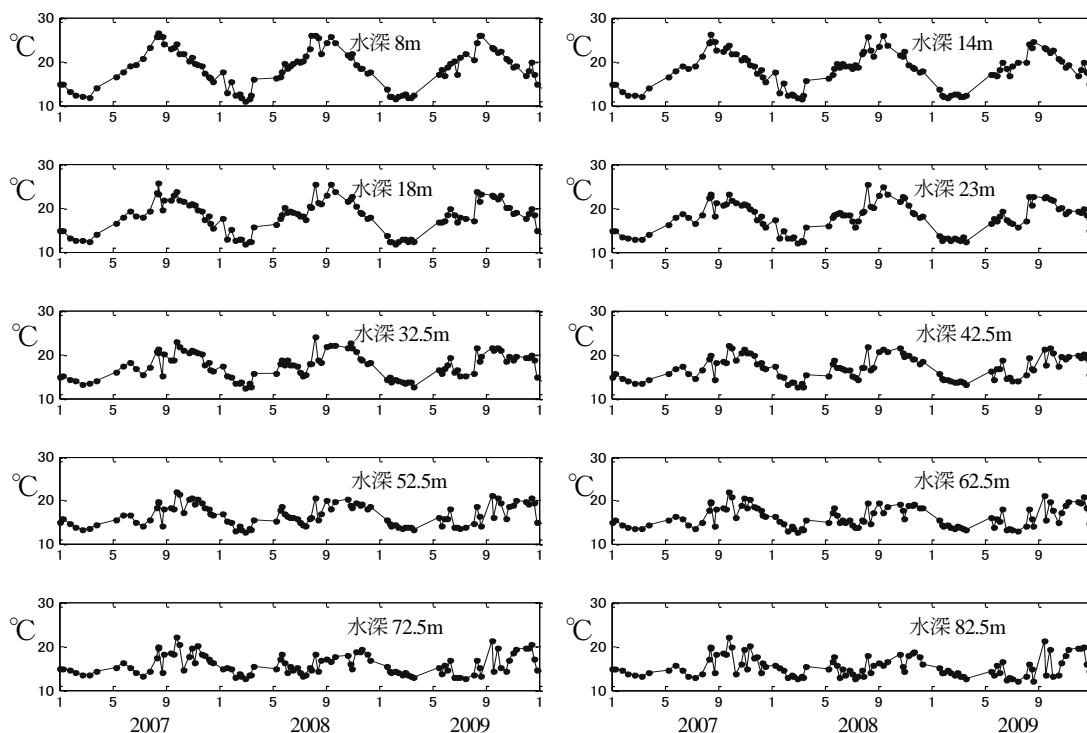


図-5.3(a) 湾口水温の境界条件 横浜技調の湾口 S4 の観測データから算定

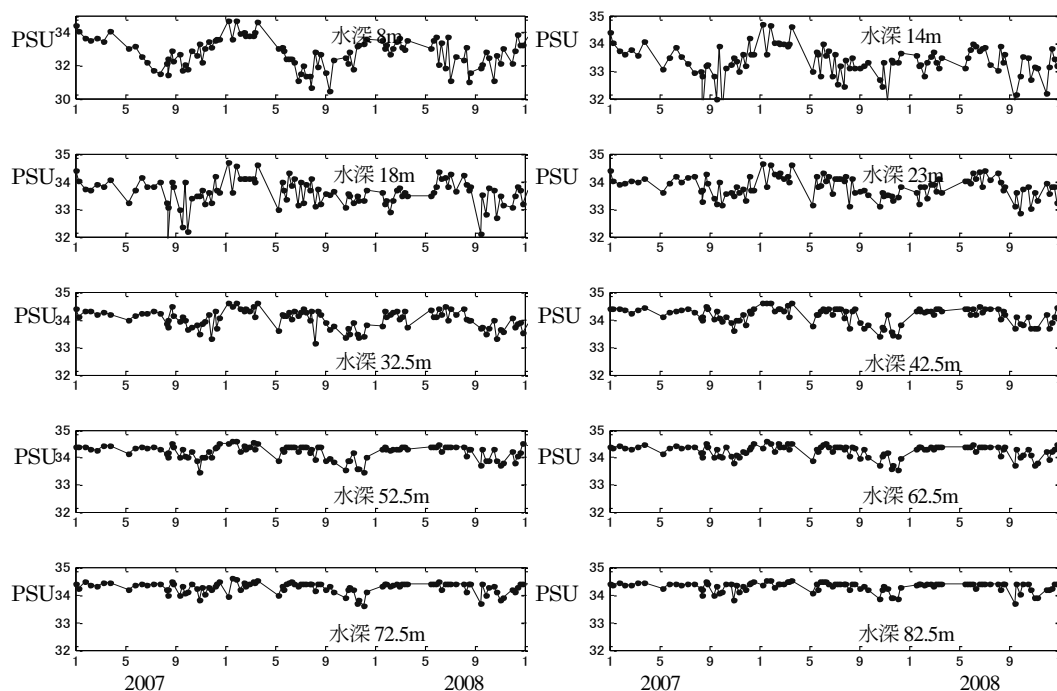


図-5.3(b) 湾口塩分の境界条件 横浜技調の湾口 S4 の観測データから算定

### 5.2.3 河川の流量と水温塩分

#### (1) 主要 6 河川の流量

東京湾に流入する河川流量は国交省水文水質データベースで公開されている荒川、江戸川、多摩川、鶴見川のデータから流量を推定した。水文水質データベースでは水位が公開されているものの、流量は 2004 年以降のデータが公開されていない。(なお、野田は 2007 年まで公開されている)。そのため、1994 年～2003 年までの水位と流量データから水位-流量曲線を推定して、2004 年以降の流量を算定した。なお、水位は水文水質データベース、流量は雨量・流量年表データベース(社団法人 日本河川協会)のデータを用いた。

図-5.4～5.8 は、各観測点の水位と流量の関係であり、多項式近似で流量曲線(水位流量曲線、 $H-Q$  曲線)を推定した。

荒川は埼玉市と川越市の境界付近で支川の入間川と合流し、途中秋ヶ瀬堰でその一部が上水に利用されたのち、東京湾へ流入する。ここでは、本川の“大芦橋”と支川の入間川の“菅間”の水位を用いて、荒川の流量を推定した。流量の一部はそれより下流にある秋ヶ瀬堰で上水として利用されるため、その全てが直接東京湾へ流入するわけではない。ただし、洪水時はその多くが直接東京湾へ流入するため、大芦橋と菅間の流量の和を荒川から東京湾への流入量とした。一方、二瓶ら(2007)は、秋ヶ瀬堰より河口にかけて下水道や都市河川からの流入があり、秋ヶ瀬堰から河口にかけて多くの淡水流入があることを示した。その量は以下のように見積られる。



$$(河口から東京湾へ 81\text{m}^3/\text{s}) + (隅田川へ 11.9\text{m}^3/\text{s}) + (綾瀬川へ 0.8\text{m}^3/\text{s}) \\ - (秋ヶ瀬堰から 45.5\text{m}^3/\text{s} 荒川へ流入) = 48.2\text{m}^3/\text{s} \quad (5.1)$$

以上のことから、荒川の淡水流入量を以下のようにして求めた。なお、隅田川、綾瀬川への淡水流入は荒川の流量に加えて計算を実施した。

$$Q_{\text{大芦橋}} = 45.677H_{\text{大芦橋}}^2 - 0.2214H_{\text{大芦橋}} - 8.0364 \quad (5.2)$$

$$Q_{\text{菅間}} = 11.696H_{\text{菅間}}^2 + 45.795H_{\text{菅間}} + 10.386 \quad (5.3)$$

$$Q_{0\text{荒川}} = Q_{\text{大芦橋}} + Q_{\text{菅間}} + 48.2 \quad (5.4)$$

隅田川からは荒川の約 0.6 倍の淡水流入がある(二瓶ら, 2008)ため以下の流量を与えた。

$$Q_{0\text{隅田川}} = 0.6Q_{\text{荒川}} \quad (5.5)$$

江戸川では、河口の水閘門による水位変化の影響を受けない野田の観測データを用い、さらに 2006 年の月平均流量が二瓶ら(2007)に一致するように以下の式で与えた。

$$Q_{0\text{江戸川}} = 0.77 \times (3.4568H_{\text{野田}}^3 + 5.4914H_{\text{野田}}^2 + 69.395H_{\text{野田}} + 14.053) - 10 \quad (5.6)$$

中川には流量観測点が存在しないが、二瓶ら(2007)の算定結果によると、中川の流量は江戸川の流量が小さい場合には江戸川と同程度の流量であり、出水時には江戸川の約 0.5 である。そこで中川の流量としては、江戸川の流量が  $250\text{m}^3/\text{s}$  未満では江戸川の流量を、それ以上では江戸川の 0.55 倍の流量を与えた。

$$Q_{0\text{中川}} = Q_{\text{江戸川}} \quad Q_{\text{江戸川}} < 250 \quad (5.7)$$

$$Q_{0\text{中川}} = 0.55Q_{\text{江戸川}} \quad Q_{\text{江戸川}} \geq 250 \quad (5.8)$$

一方、多摩川と鶴見川はそれぞれ石原と亀の子橋の観測データを用いた。

ただし、石原の観測値から流量曲線を推定すると、二瓶ら(2007)の推定値よりも大きくなるため、図-5.8 で推定される値よりも  $60.0\text{m}^3/\text{s}$  小さい値を 1.76 で除した量とした。

$$Q_{0\text{多摩川}} = (-21.004H_{\text{石原}}^3 + 264.5H_{\text{石原}}^2 - 313.76H_{\text{石原}} + 106.7 - 60.0)/1.76 \quad (5.9)$$

一方、鶴見川では二瓶ら(2007)の推定値よりも小さいため、二瓶らの結果と一致させるため、HQ 曲線で推定される流量の 1.7 倍に  $20.0\text{m}^3/\text{s}$  加えた値とした。

$$Q_{0\text{鶴見川}} = 1.7 * (18.051H_{\text{亀の子橋}}^2 - 18.055H_{\text{亀の子橋}} + 6.8449) + 20.0 \quad (5.10)$$

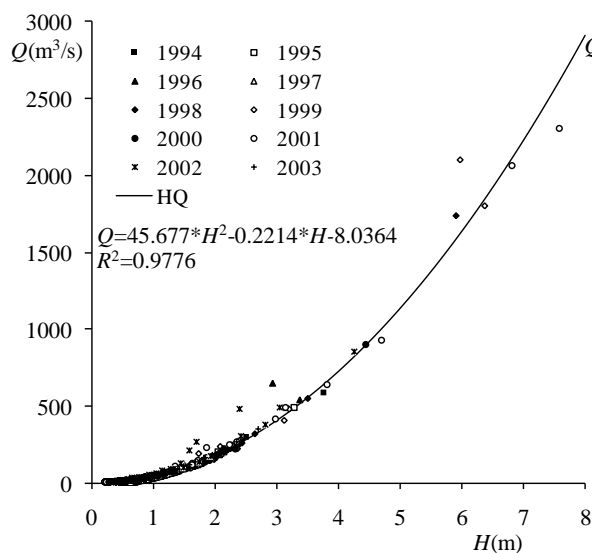


図-5.4 水位流量曲線 荒川大芦橋

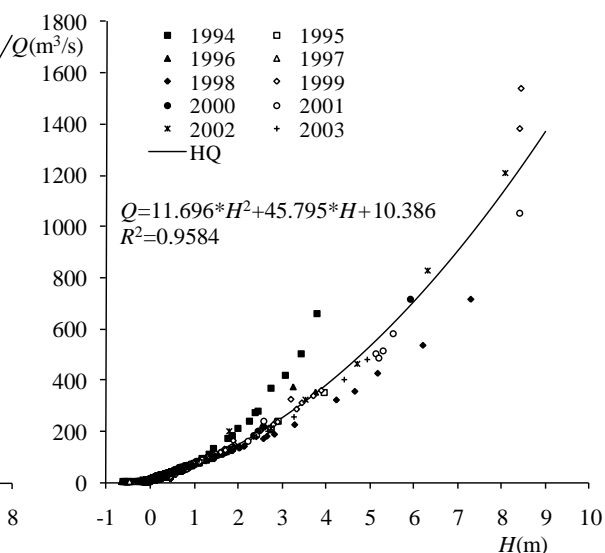


図-5.5 水位流量曲線 入間川菅間

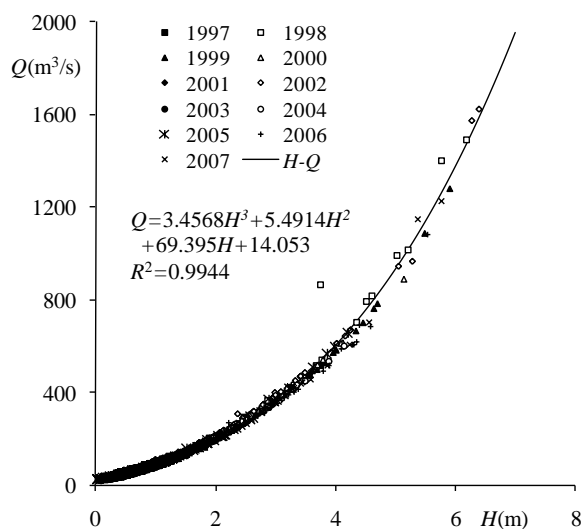


図-5.6 水位流量曲線 江戸川野田

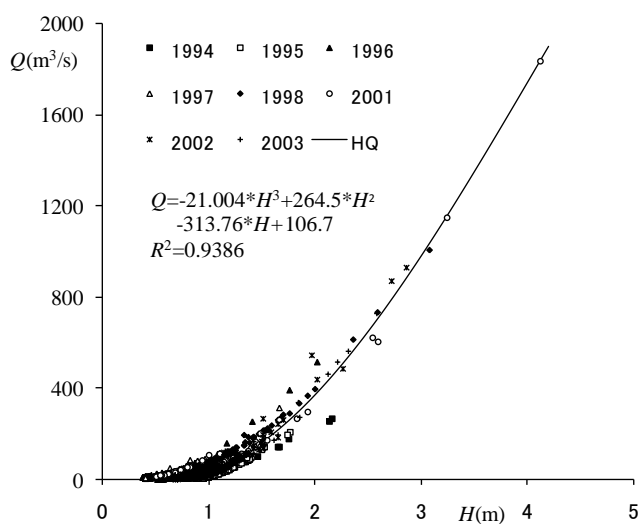


図-5.7 水位流量曲線 多摩川石原

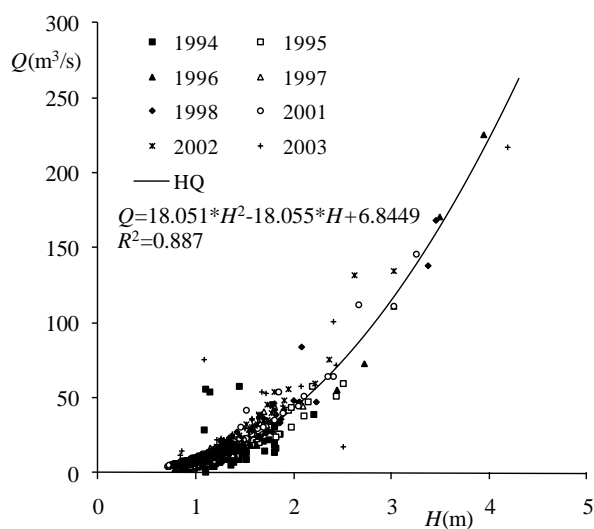


図-5.8 水位流量曲線 鶴見川亀の子橋

以上の算定式から 2006 年の流量を推定したのが図-5.9 である。また、河川毎の各月の推定値を二瓶ら(2007)のデータと比較した(図-5.10～5.14)。鶴見川が若干ばらつくもののそれ以外は  $R^2$  が 0.89～0.97 であり、良い相関が得られている。

## (2) 主要 6 河川以外の淡水供給量の推定

二瓶ら(2008)は、東京湾へ供給される淡水供給量のうち、河川、下水処理場、事業場、降水の占める割合がそれぞれ 75.5%, 10.5%, 6.4%, 9.2%であることを示し、さらに、主要 6 河川(荒川、隅田川、江戸川、中川、多摩川、鶴見川)の河川全体の流量に占める割合が約 90%であることを示した。

そこで本論文では、東京湾全体に流入する淡水流入量をすべて主要 6 河川に割り振ることとし、図-5.4～5.8 の流量曲線で推定される各河川の流量を式(5.11)～(5.16)のように  $1/0.9/(75.5/(75.5+10.5+6.4))$ , すなわち 1.36 倍した。

$$Q_{\text{荒川}} = 1.36Q_{0\text{荒川}} \quad (5.11)$$

$$Q_{\text{隅田川}} = 1.36Q_{0\text{隅田川}} \quad (5.12)$$

$$Q_{\text{江戸川}} = 1.36Q_{0\text{江戸川}} \quad (5.13)$$

$$Q_{\text{中川}} = 1.36Q_{0\text{中川}} \quad (5.14)$$

$$Q_{\text{多摩川}} = 1.36Q_{0\text{多摩川}} \quad (5.15)$$

$$Q_{\text{鶴見川}} = 1.36Q_{0\text{鶴見川}} \quad (5.16)$$

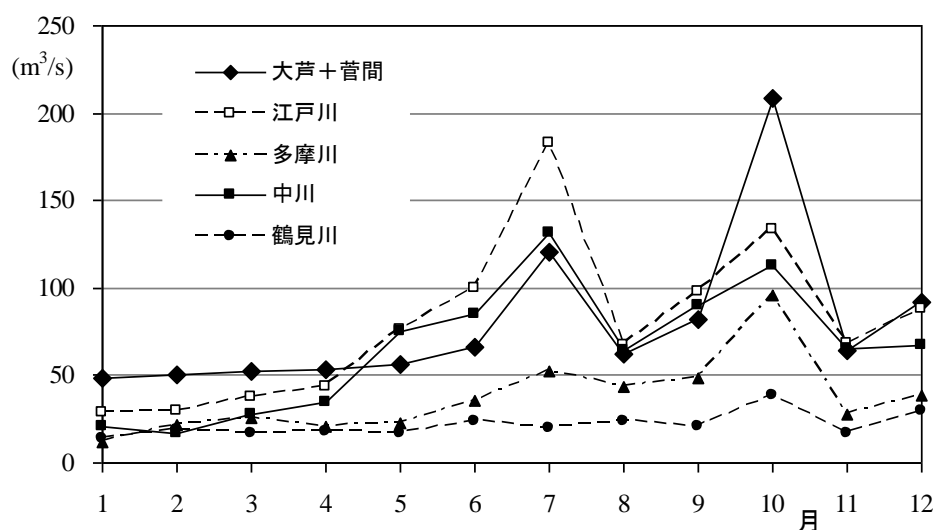


図-5.9 各河川の推定月平均流量

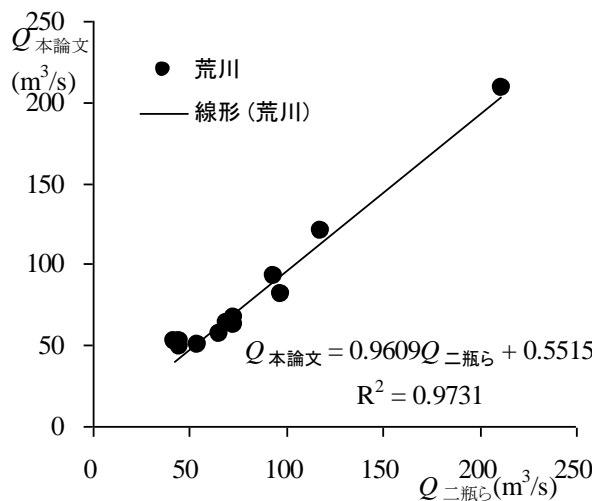


図-5.10 本論文と二瓶ら(2007)の流量の比較(荒川)

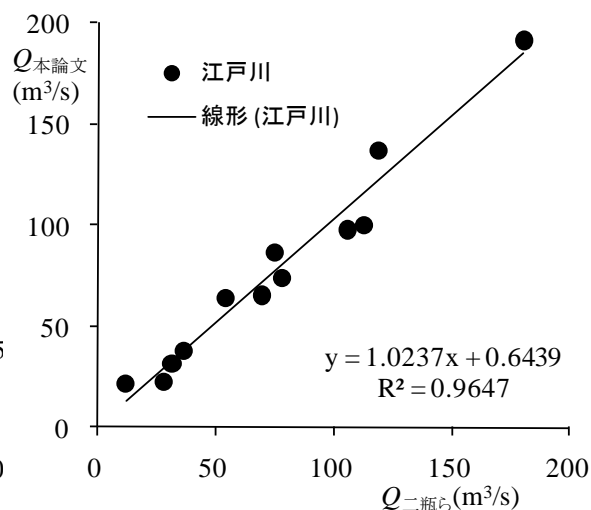


図-5.11 二瓶ら(2007)との比較(江戸川)

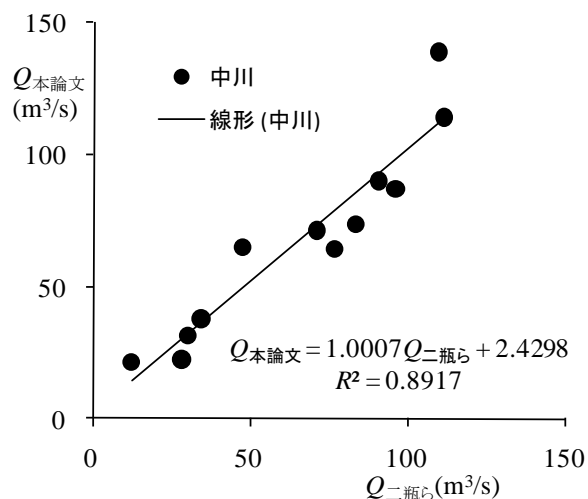


図-5.12 本論文と二瓶ら(2007)の流量の比較(中川)

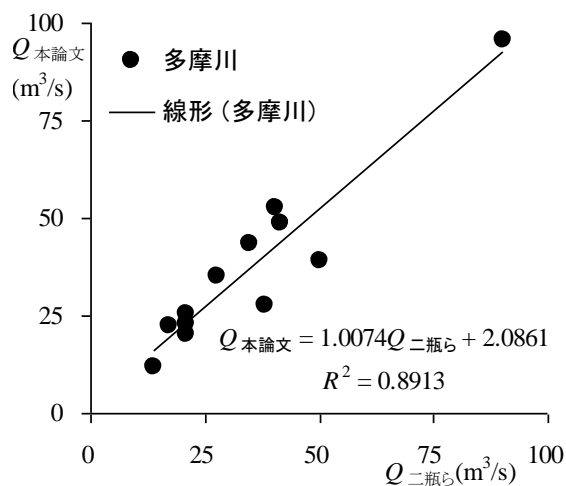


図-5.13 二瓶ら(2007)との比較(多摩川)

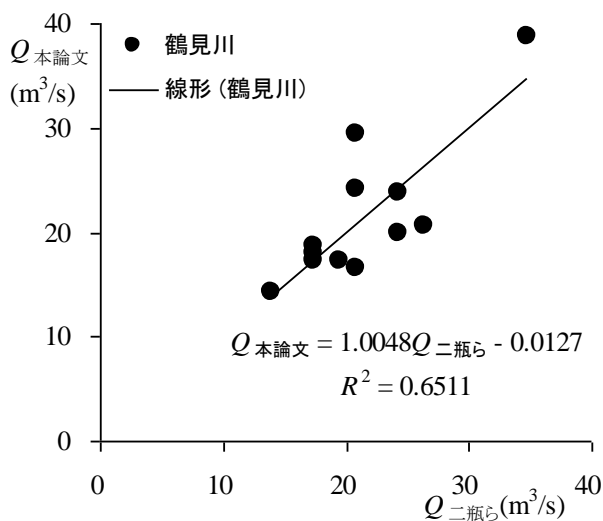


図-5.14 本論文と二瓶ら(2007)の流量の比較(鶴見川)

図-5.15 は数値計算で用いた各河川の流量と水温である。流量は式(5.11)～(5.16)を用いて求めた。水温は国交省水文水質データベースのデータを用いており、江戸川は松戸、荒川は南畑、多摩川は石原のデータを用いた。また、中川、鶴見川はデータが得られなかったため、それぞれ、江戸川と多摩川の水温と同じにした。なお、多摩川では 2009 年のデータが得られなかったため、荒川の水温から以下の式で推定した。多摩川と荒川の夏の水温はほぼ等しいが、冬は多摩川の方が 5℃ほど高い傾向にある。塩分は全河川とも 0 PSU とした。

$$T_{\text{多摩川}} = T_{\text{荒川}} \quad T_{\text{荒川}} \geq 20 \quad (5.17)$$

$$T_{\text{多摩川}} = 0.667(T_{\text{荒川}} + 10) \quad T_{\text{荒川}} < 20 \quad (5.18)$$

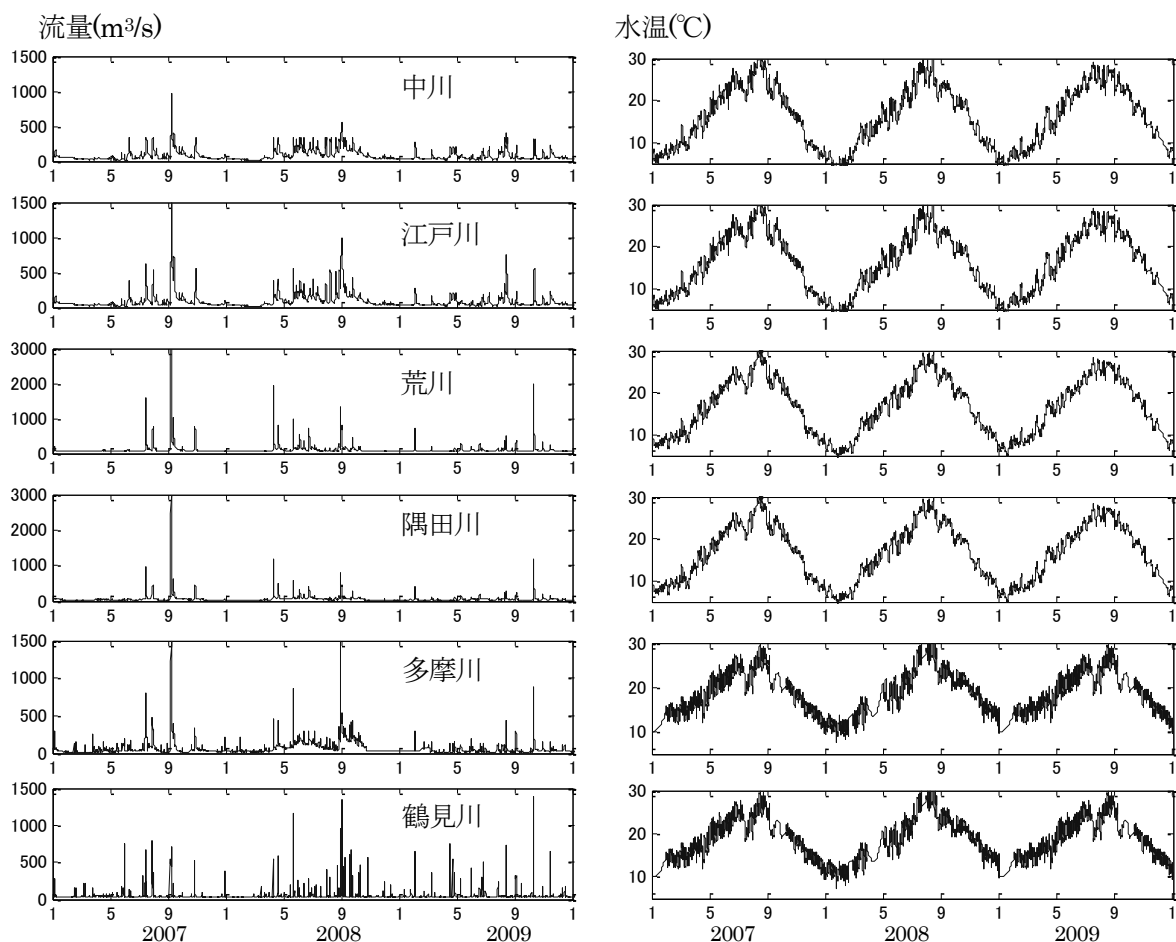


図-5.15 計算で用いた 2007 年～2009 年の各河川の流量と水温

## 5.2.4 気象データ

図-5.16 は海表面に与えた気象条件である. 気象データとしては, 短波放射, 長波放射, 気圧, 気温, 水蒸気圧, 降水を東京気象台のデータから求めて与えた. 風向風速については羽田アメダスのデータを 32 度回転させ, 全てのグリッドに一様に与えた.

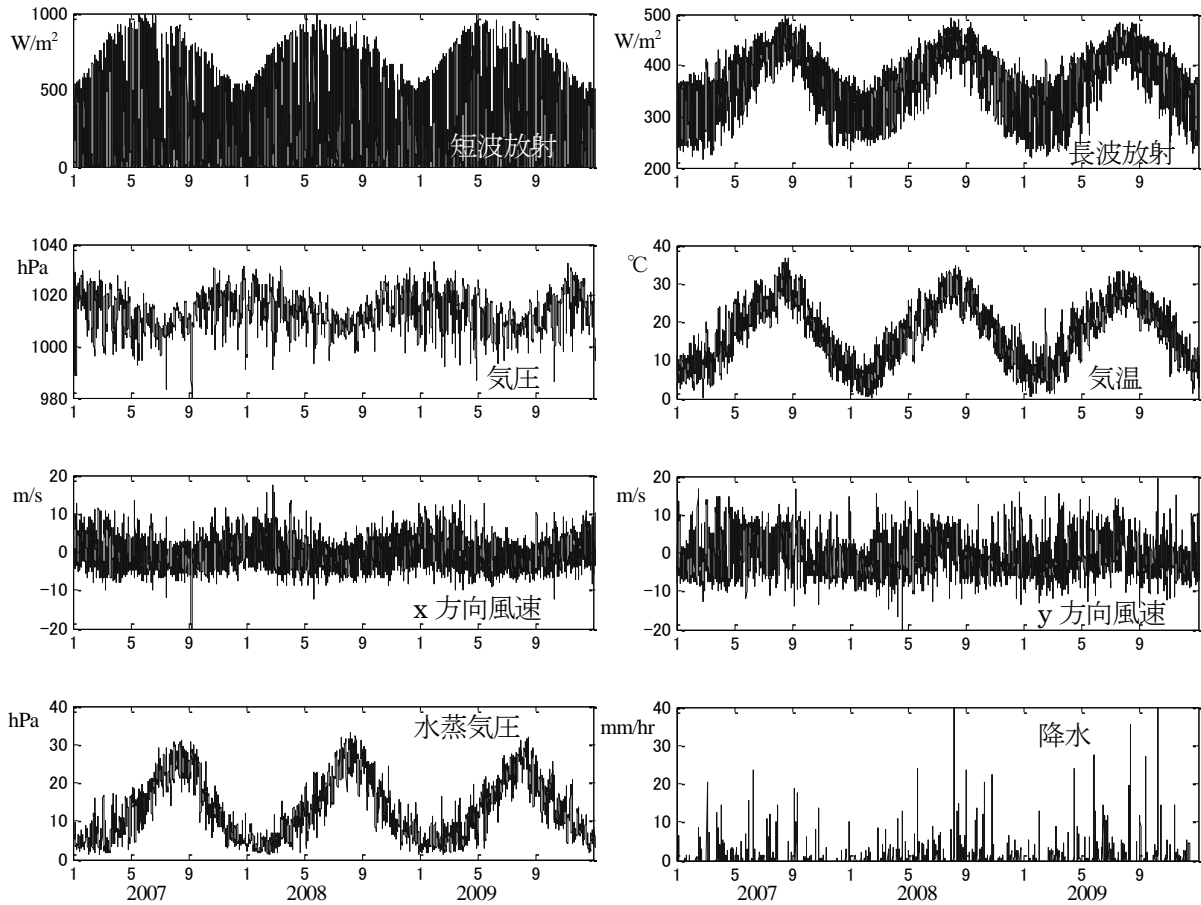


図-5.16 数値計算で用いた気象条件

## 5.3 計算結果の検証

### 5.3.1 塩分水温

図-5.17, 図-5.18 はそれぞれ湾内の水温と塩分の 2008 年の時系列であり, 横浜技調の観測データとの比較である. それぞれ, 下から湾口 S04, S01, 湾央 C06, C12, 湾奥 N06, N03, 浚渫窪地 N08 であり, 左から表層-0.5m, 中層-8m, 下層-20m である.

全体に良好に現地観測結果を再現している. ただし, 水温は夏季になると湾奥ほど, 表層の水温が低めに出る傾向にある. また, N08 の浚渫窪地では夏場の水温を再現できていない. これは, 水平 2km 格子であることと, 湾奥の鉛直拡散が全体に大きいためではないかと考えられる. また, 湾口の水深-20m 地点で塩分が低い傾向にある.

1 月に湾口の S04 では塩分水温の観測値が急に上昇する日が見られるが, 計算では再現できていない. これは黒潮系暖水の波及(急潮)にともなうものであり, 計算では黒潮の動きを考慮していないため再現されていない.

図-5.19 は, 塩分水温の鉛直分布である. 夏場の密度成層など良好に再現されている. ただし, 図-5.17 と図-5.18 と同様に湾奥 N08 の密度成層が実測値と比較すると全体に鉛直方向に均されている傾向にある. また, 湾口 S04 が実測値とずれている. これは, 湾口の境界

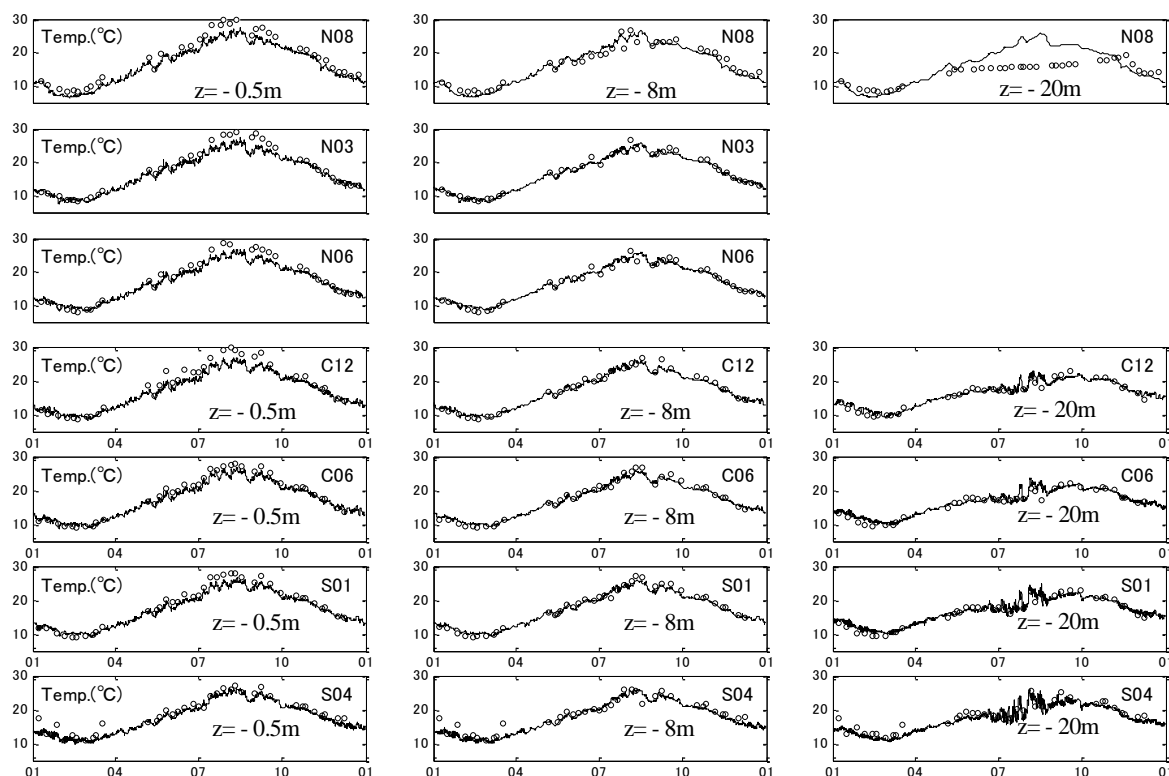


図-5.17 2008 年の水温の時系列(左から表層, 中層, 下層)

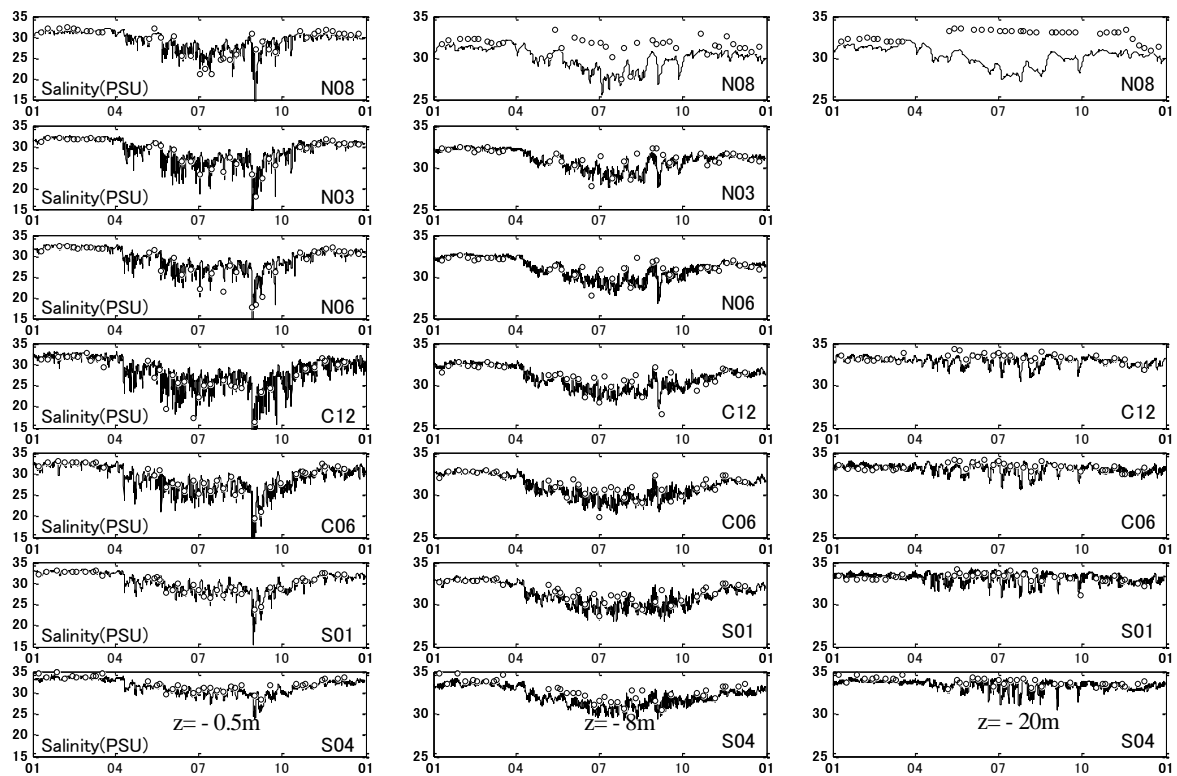


図-5.18 2008 年の塩分の時系列(左から表層, 中層, 下層)

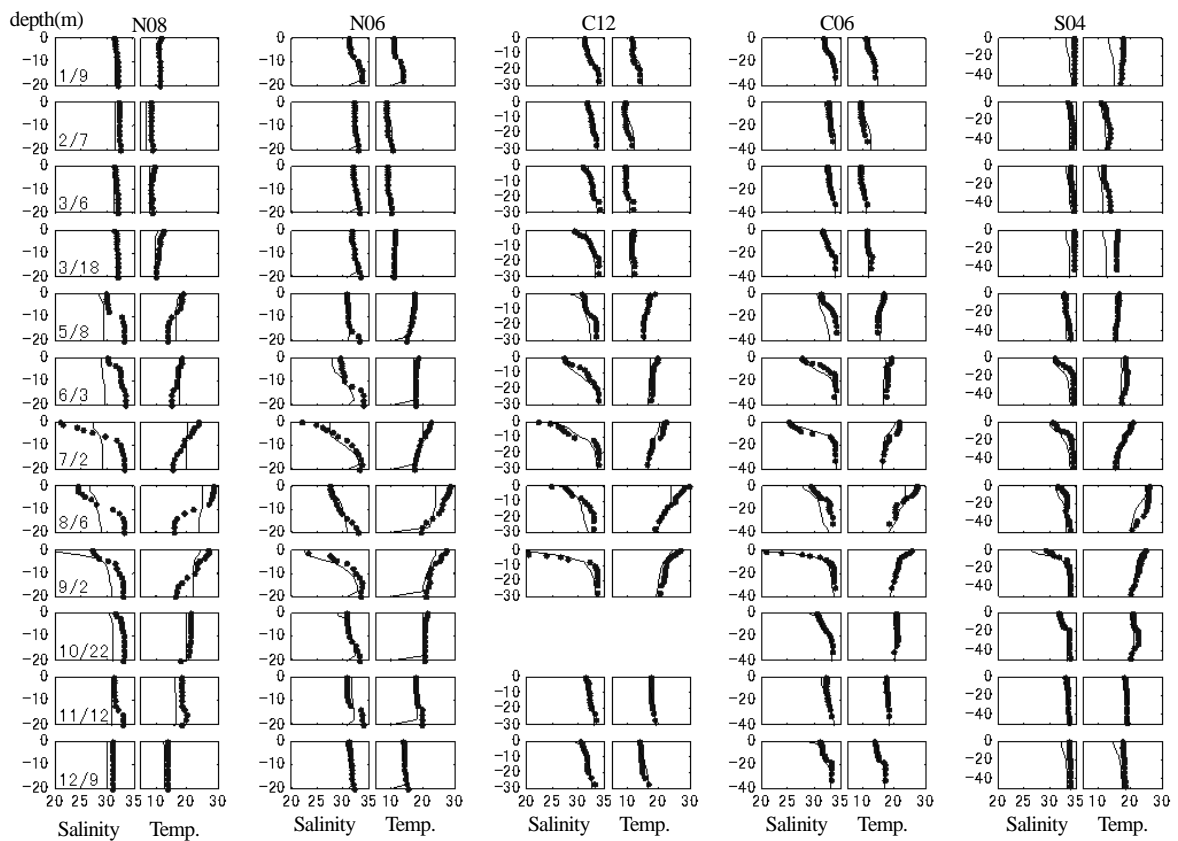


図-5.19 塩分水温の鉛直分布(左から湾奥 N08,N06,湾央 C12,C06,湾口 S04)



が城ヶ島一館山間なのだが、この境界に久里浜沖の S04 で計測された塩分水温を境界条件として入れているためだと考えられる。

図-5.20(a)～(l)は数値計算結果(水深 3.5m)と湾口のフェリーで計測された塩分(喫水 3.5m), および横浜技調の観測データ(水深 3.5m)を比較したものである。冬季の 1,2,3 月と夏季の 7,8 月, および冬季の 11,12 月は観測値より計算値が低い日が多くあり, 特に房総半島側(千葉県側)の S06 でずれており, 観測値が計算値より 1PSU ほど大きい日が見られる。一方, 4 月～6 月と 9 月～10 月は全般によく一致している。

計算値と実測値があわない原因は, 前述したように開境界の塩分水温として久里浜沖の S04 の観測値を用いているためだと考えられる。特に, 冬季は黒潮系暖水の波及があり, また, 夏季には南よりの風によって外洋から高塩分水塊が運ばれてくるため, 実測値とあわないものと考えられる。

なお, 夏季の 7 月 23 日～26 日, 8 月 3 日～7 日, 14 日～18 日の塩分上昇は, 南よりの風が連吹し始めてから 2 日～3 日後に顕著となる。また, 4 月 8 日と 18 日, 5 月 20 日, 8 月 29～30 日にまとまった淡水流入量が見られ, 湾口では 4 月と 5 月は約 4 日～5 日, 8 月は 6 日～7 日後に塩分が低くなっている。

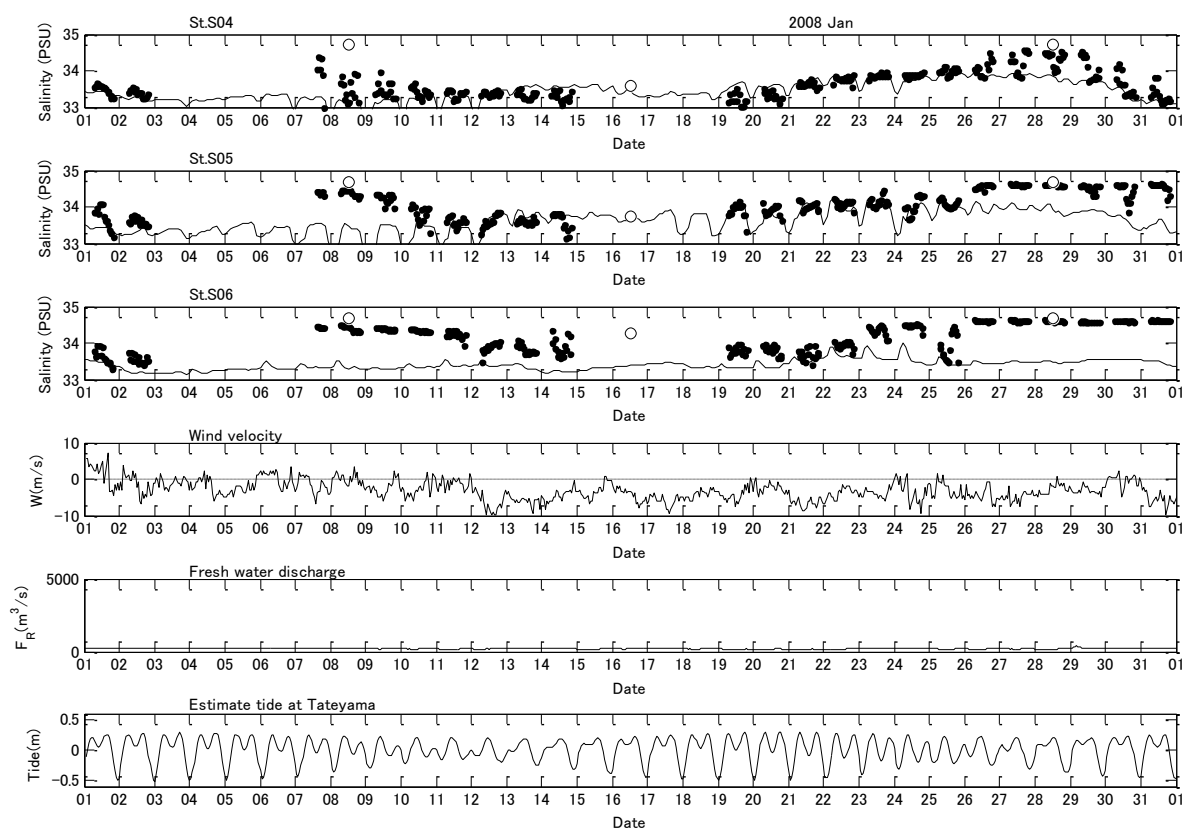


図-5.20(a) フェリー塩分データとの比較(2008 年 1 月) 1 月 6 日～11 日, 24～31 日の塩分上昇が再現できていない。また, 全般に房総半島側(千葉県側)の S06 の塩分が低い。

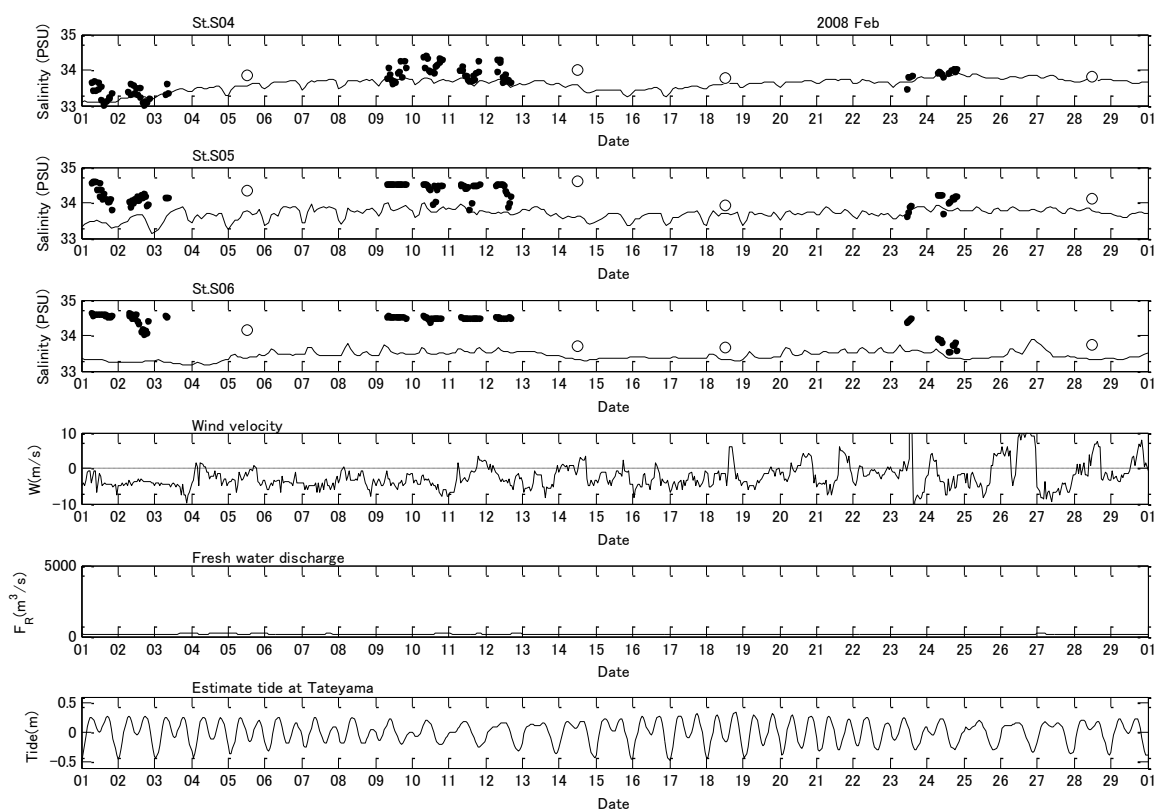


図-5.20(b) フェリー塩分データとの比較(2008年2月) 計器故障でデータが少ない

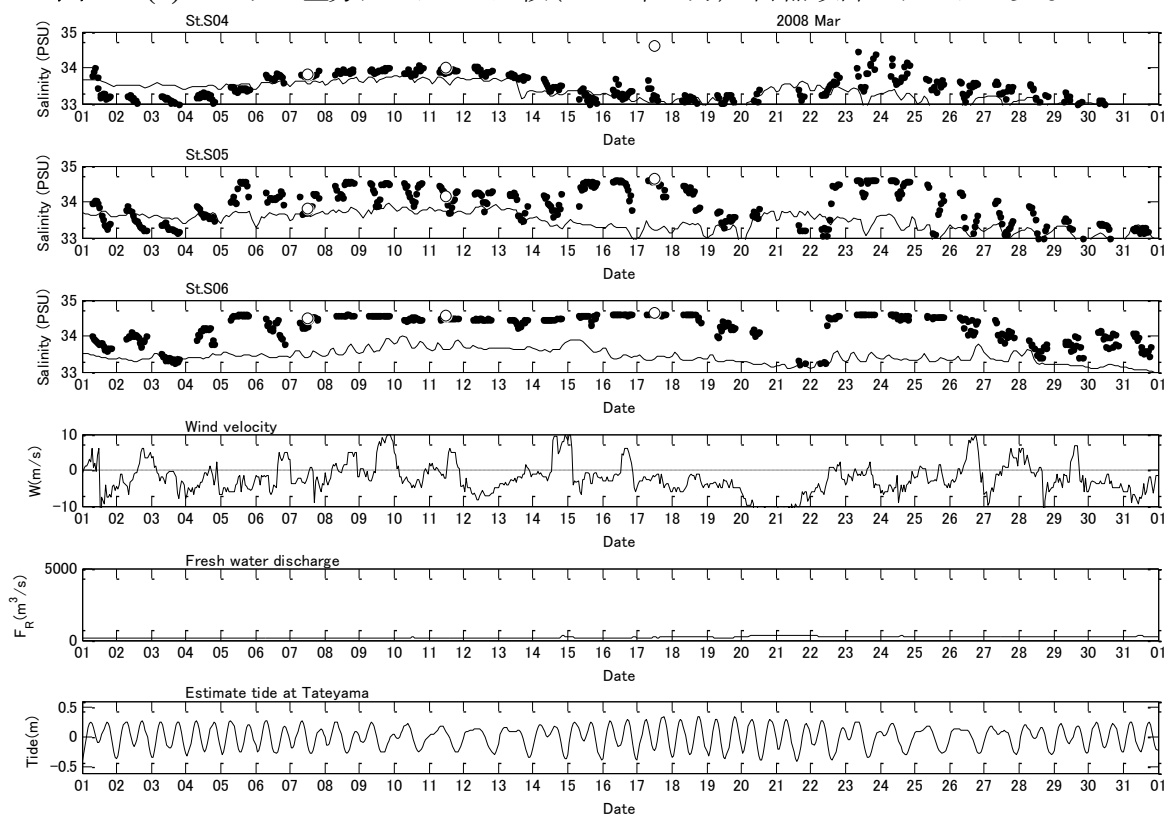


図-5.20(c) フェリー塩分データとの比較(2008年3月)

房総半島側(千葉側)の塩分が全体に低い傾向にある

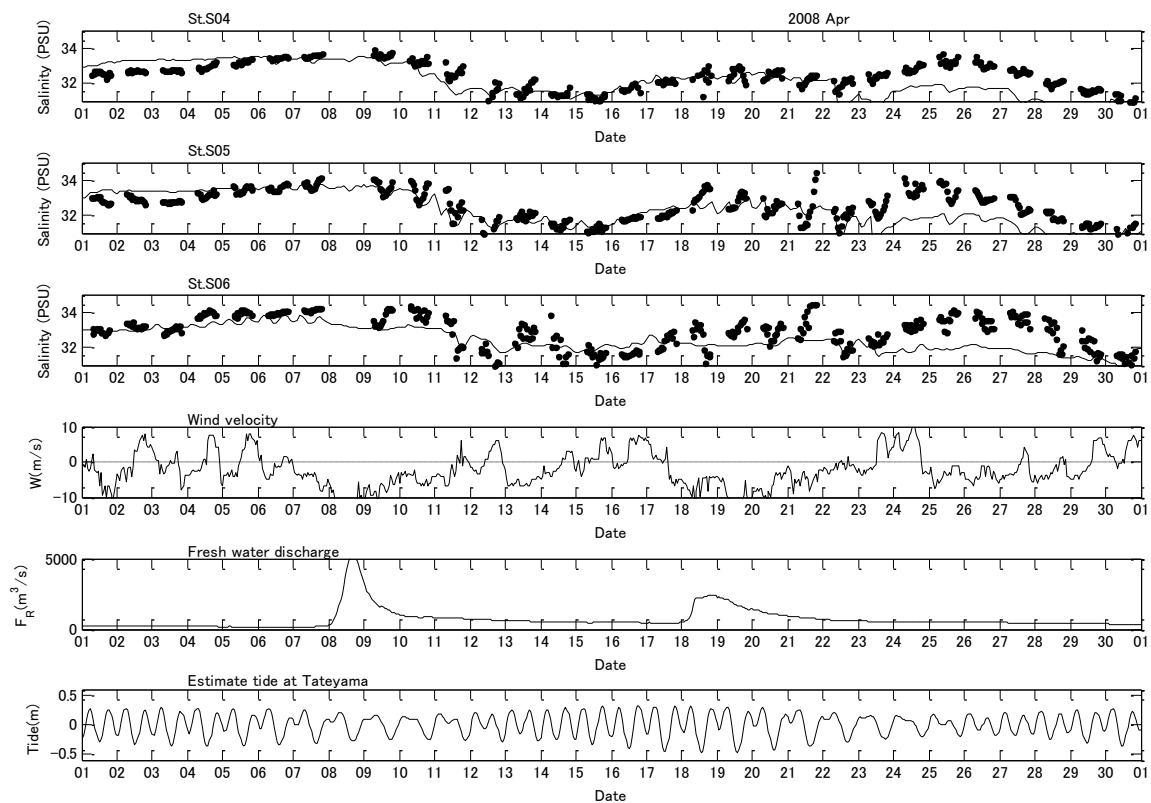


図-5.20(d) フェリー塩分データとの比較(2008 年 4 月) 2 回の出水で塩分が低下傾向

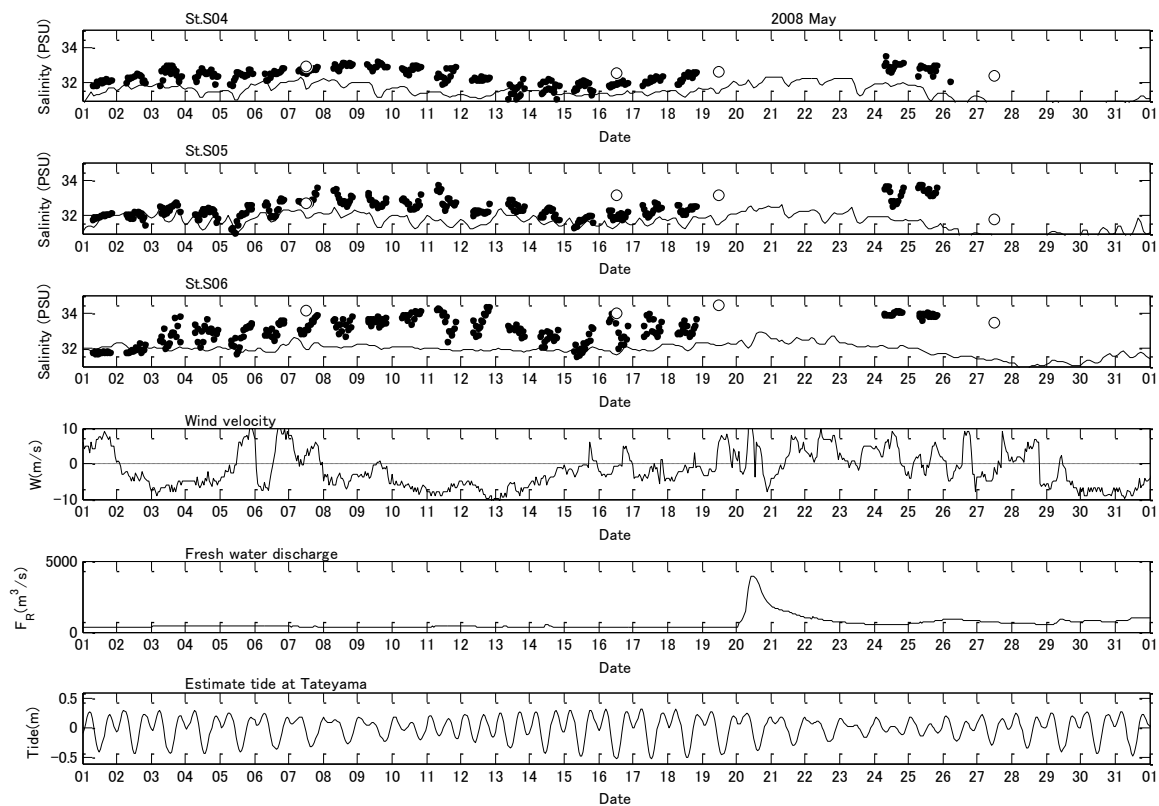


図-5.20(e) フェリー塩分データとの比較(2008 年 5 月) 5 月 26 日からフェリードック入渠

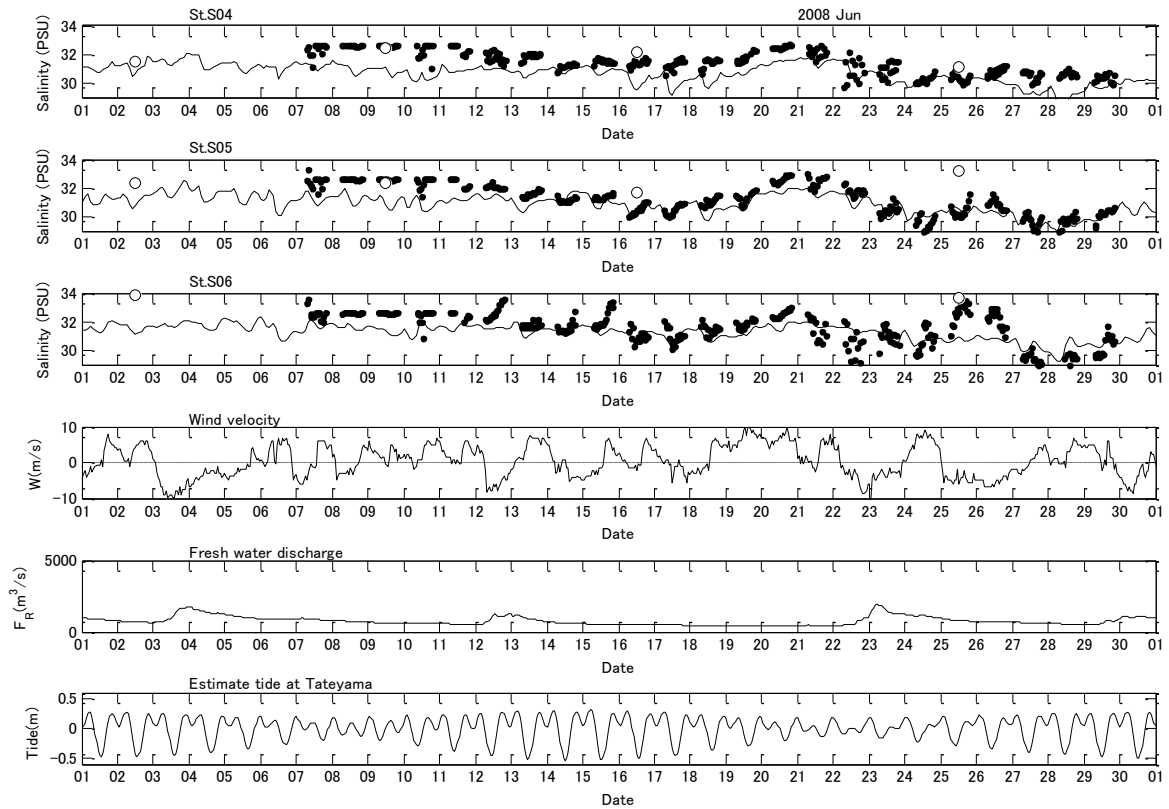


図-5.20(f) フェリー塩分データとの比較(2008年6月)

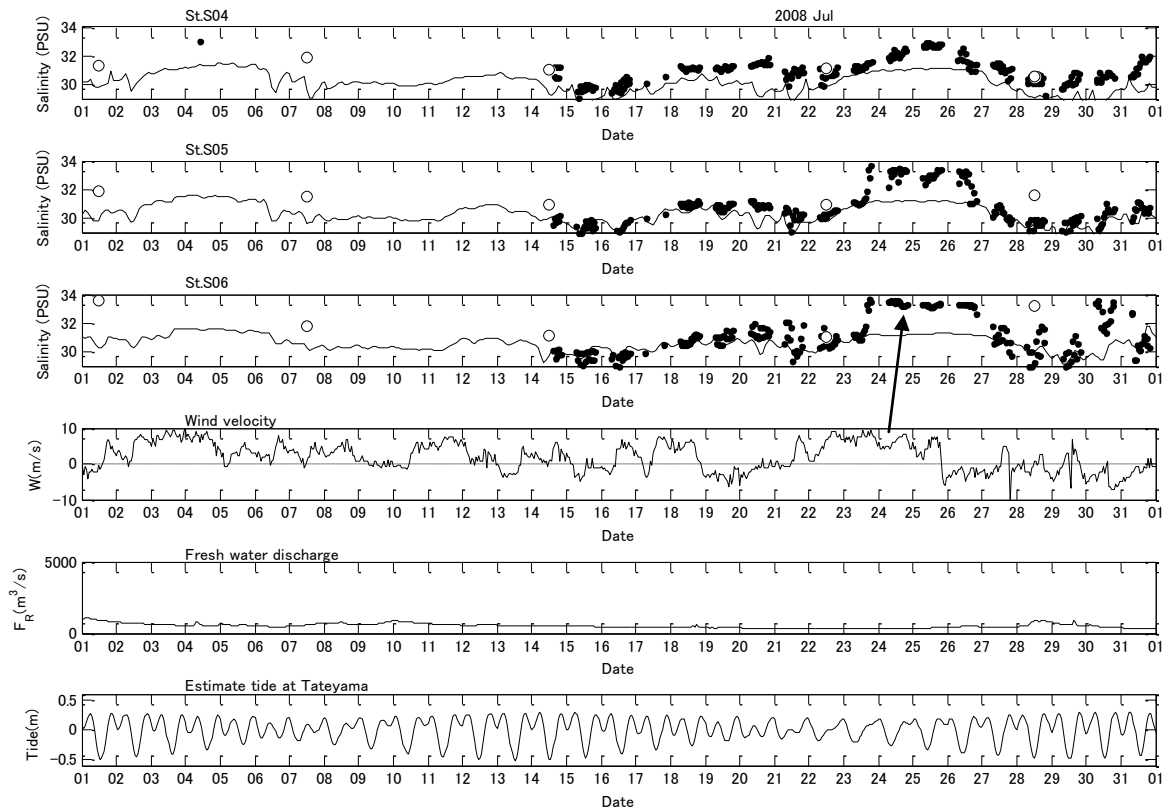


図-5.20(g) フェリー塩分データとの比較(2008年7月) 月の前半水質測定装置故障 22～25日に南風が連吹, その後, 24日～26日にかけて塩分が上昇している

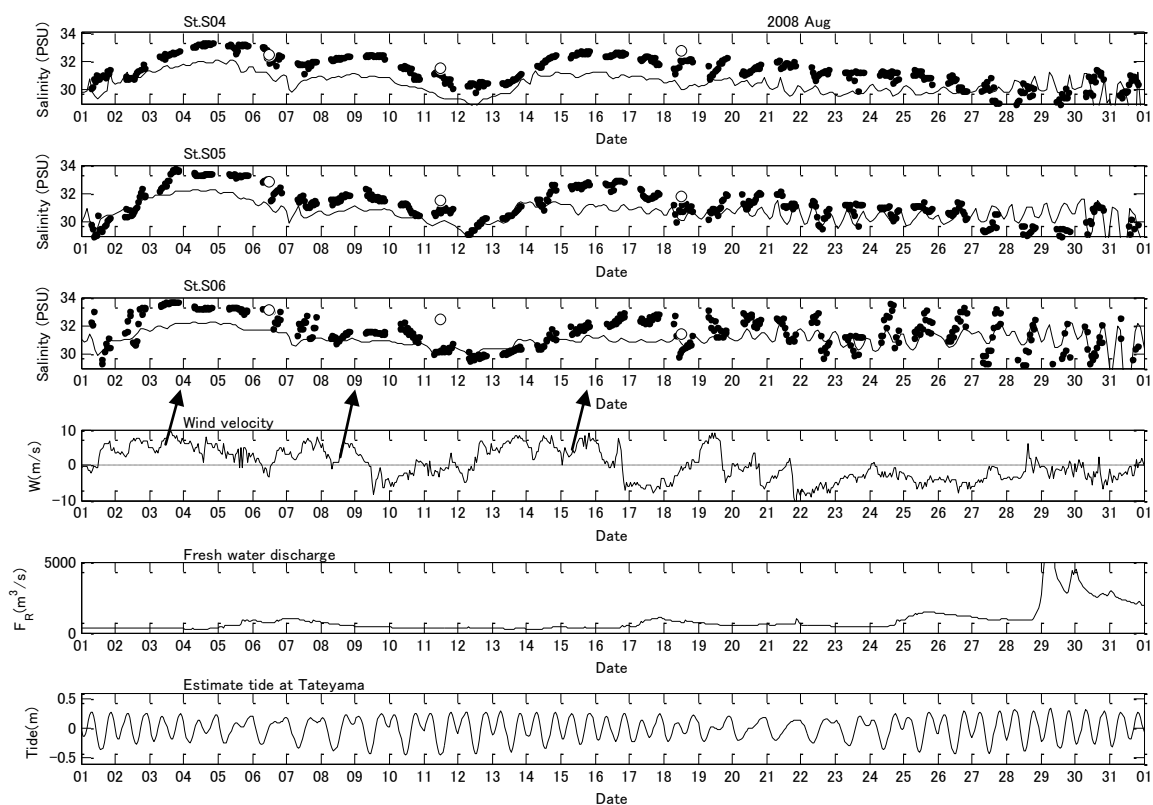


図-5.20(h) フェリー塩分データとの比較(2008年8月) 南風連吹の数日後, 塩分が上昇

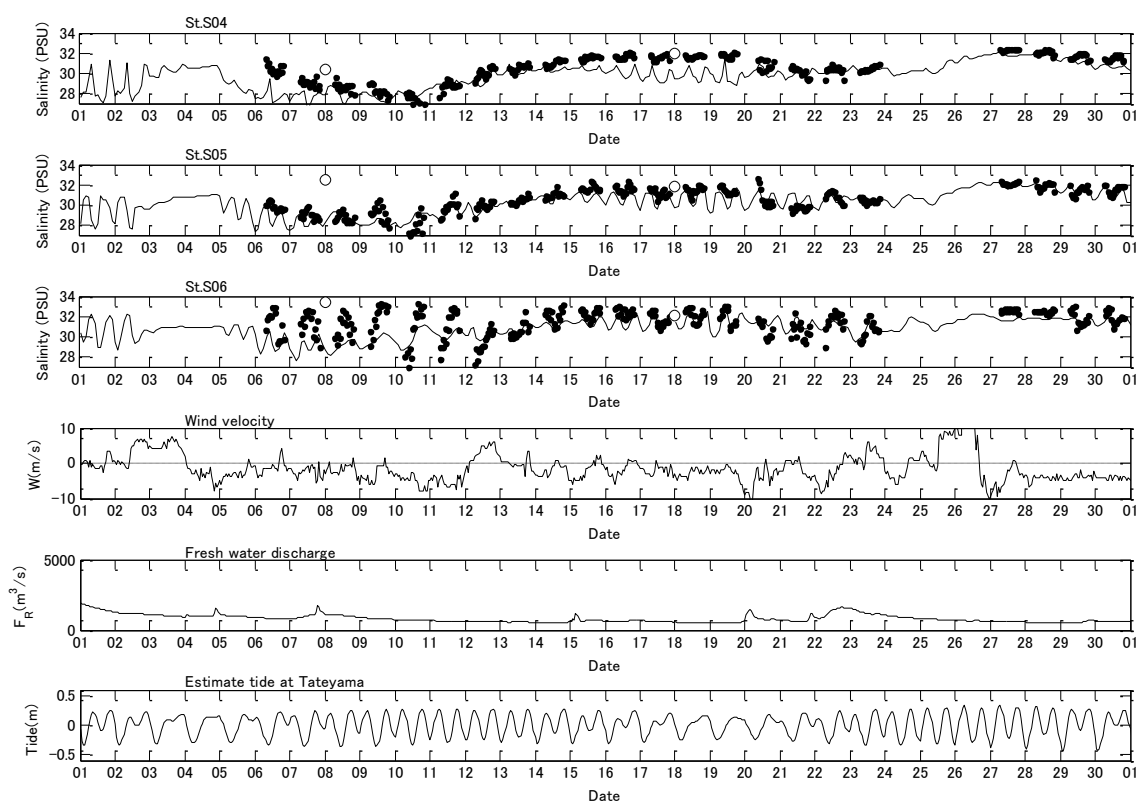


図-5.20(i) フェリー塩分データとの比較(2008年9月)

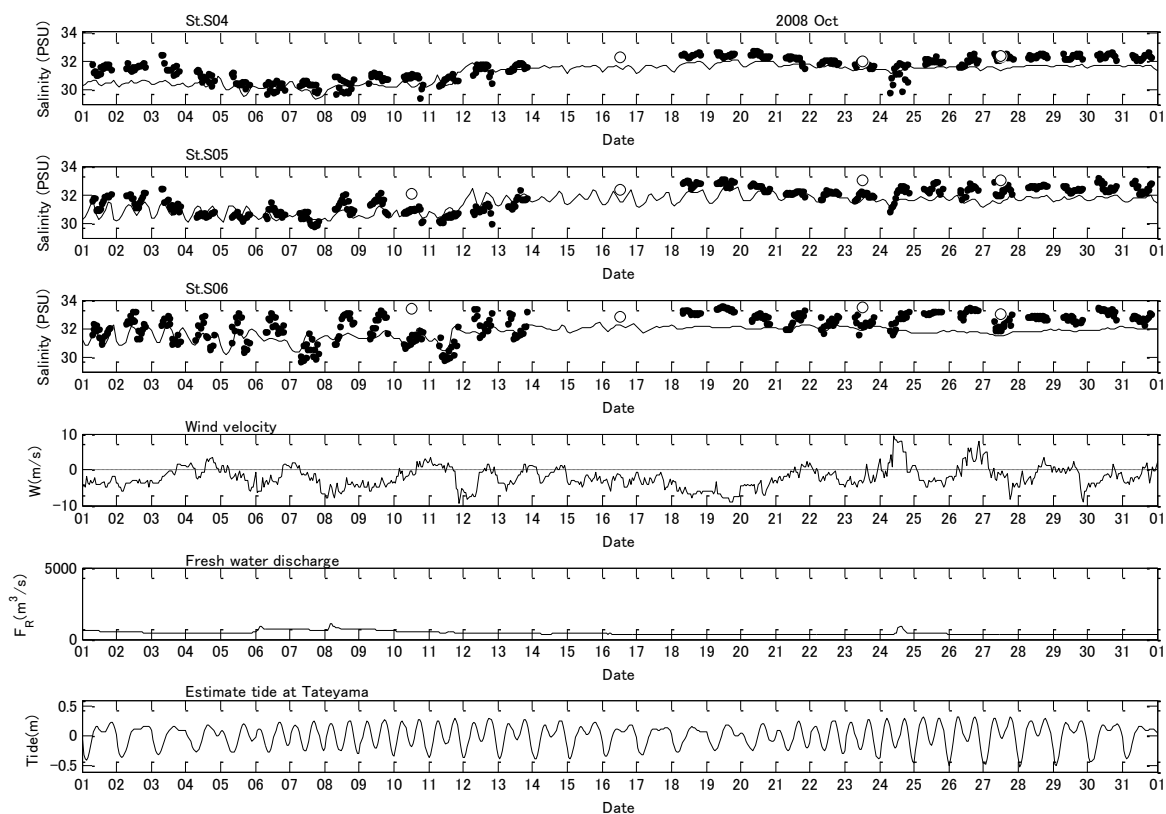


図-5.20(j) フェリー塩分データとの比較(2008 年 10 月)

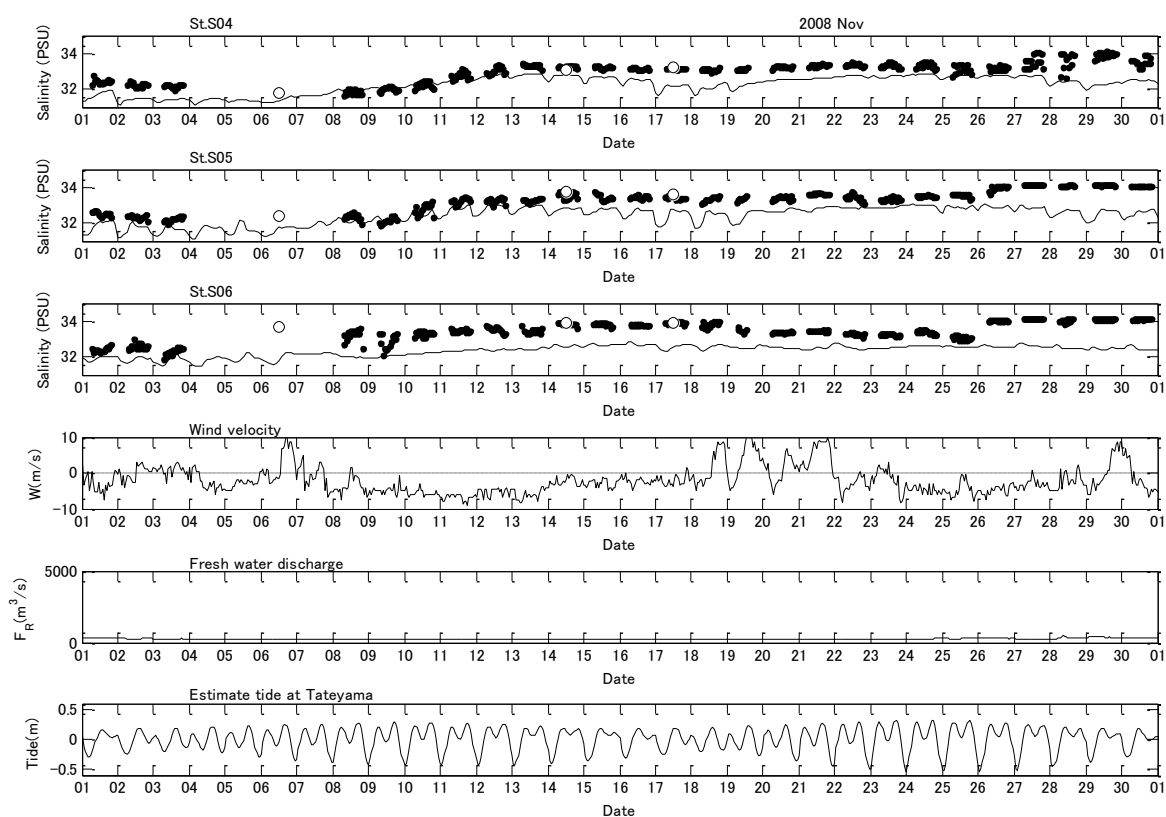


図-5.20(k) フェリー塩分データとの比較(2008 年 11 月) S06 の塩分が観測値より低い

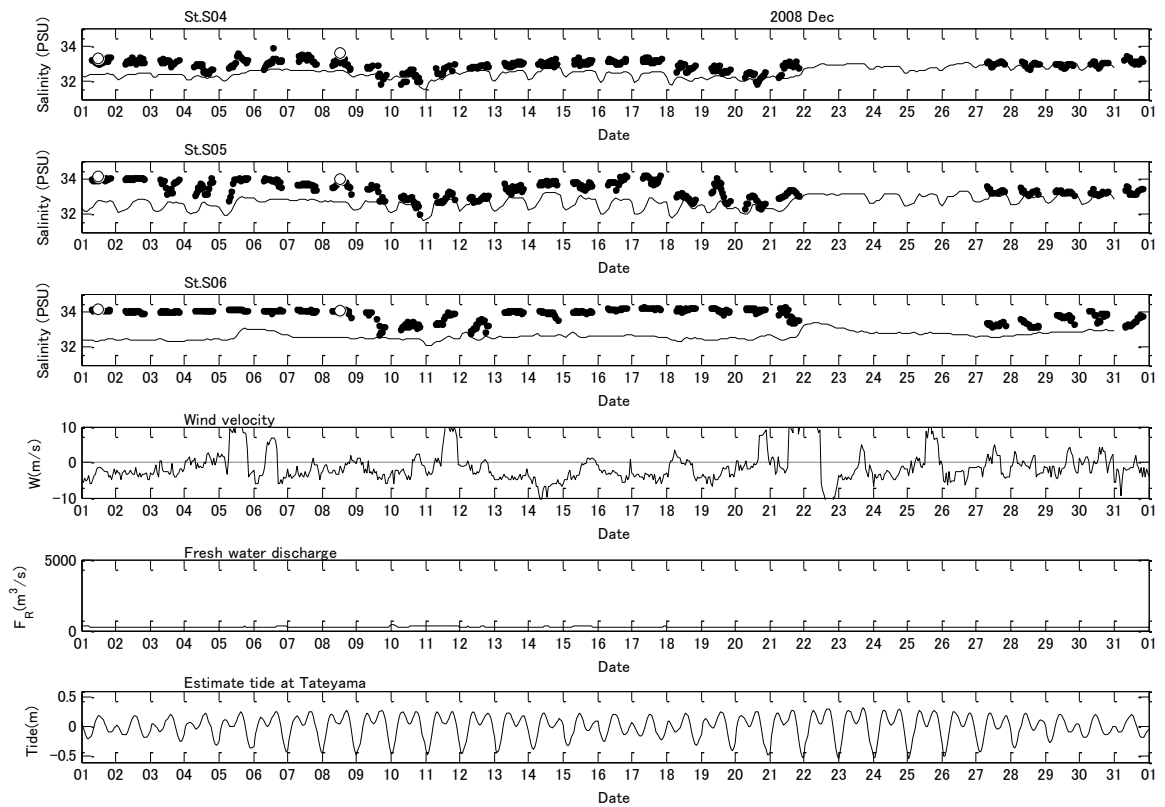


図-5.20(1) フェリー塩分データとの比較(2008 年 12 月)千葉 S06 の塩分が観測値より低い

### 5.3.2 湾口における残差流と海水交換日数

#### (1) 湾口の残差流分布

図-5.21 は数値計算によって求めた 2008 年の月平均残差流である。また、フェリーの観測結果と比較するため、水深-10m からの描画にしたのが図-5.22 である。比較のため図-5.23 にフェリーの観測結果を載せた。

計算が 2km 格子と解像度が悪く、かつ最大水深を 90m としているためフェリーの観測データと完全には一致しないものの、傾向はよく一致している。フェリーでは表層～水深 10m のデータが取得できないが、数値計算結果(図-5.21)では大きな流出となっている。このことは 3 章でフェリーの流速の鉛直プロファイルから予想した表層流速と一致している。

また、外洋水の流入水深の中心が冬季は深い(水深約 25m)のに対し、夏季は浅い(水深約 19m)ことも再現されている。

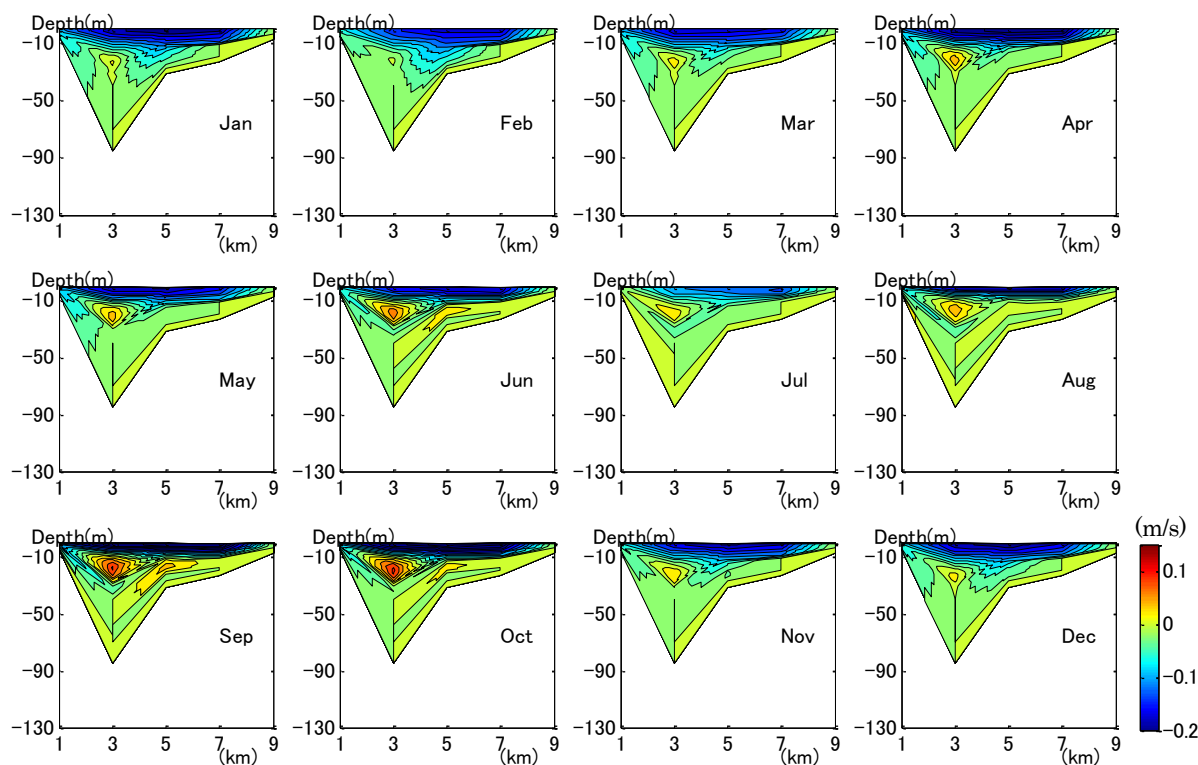


図-5.21 数値計算による 2008 年の月平均残差流



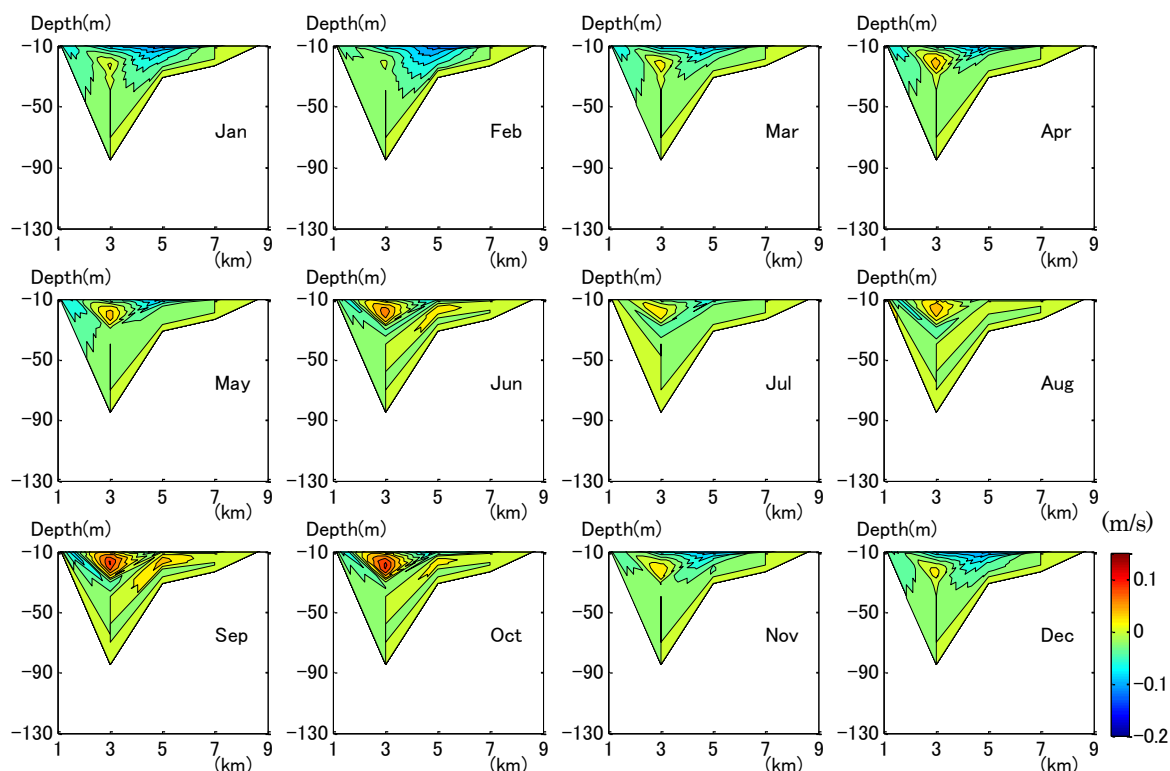


図-5.22 数値計算による2008年の月平均残差流(水深-10mから-130mを描画)

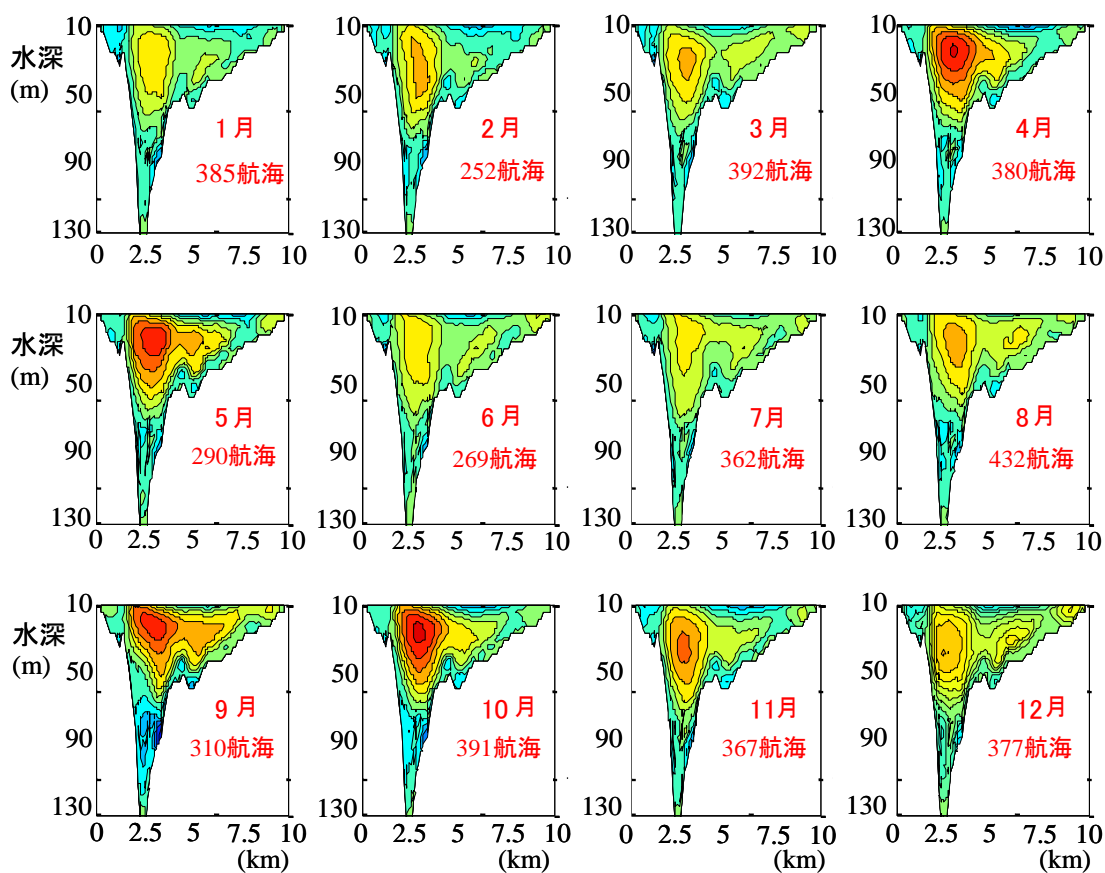


図-5.23 フェリーで計測された2008年の残差流

## (2)海水交換日数

図-5.24, 図-5.25 はそれぞれ上記残差流から求めた海水交換量と海水交換日数である。

4月から11月にかけては観測結果をほぼ再現している。一方、冬季の再現性が悪いのは3章で述べた黒潮系暖水の進入のためである。黒潮系暖水は冬季に房総半島沿いに全層一様に進入して湾口にフロントを形成する(日向ら, 2000; 鈴木ら, 2006)。この流速分布は三浦半島よりの海峡部で流入, 房総半島よりの表層から流出するという通常の残差流構造と逆になっている。冬季はこのような流れが約2週間おきに繰り返されるため, 月平均をとると通常の残差流構造と相殺し, 月平均残差流と海水交換量が小さくなる。数値計算では黒潮系暖水の流入を考慮していないため観測結果を再現できていない。

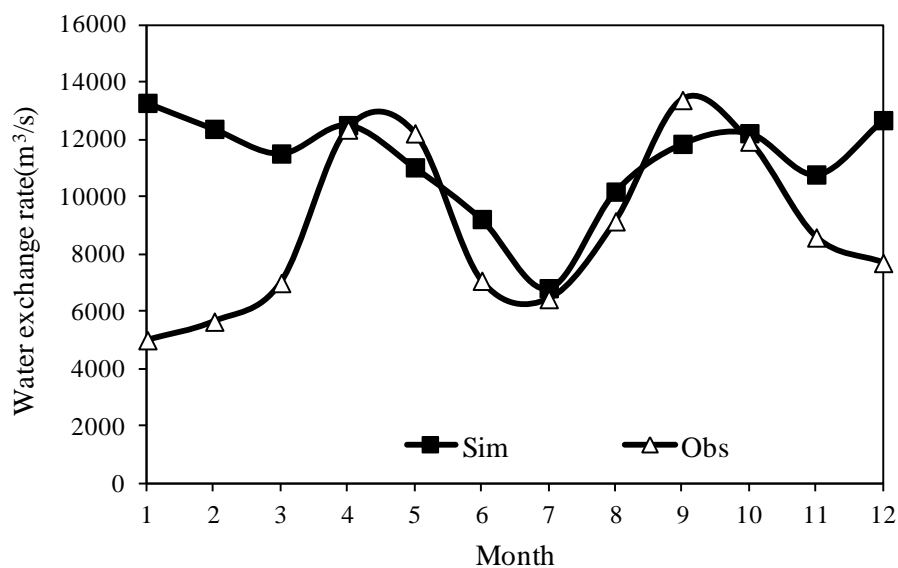


図-5.24 数値計算とフェリーによる観測データとの比較(海水交換量)

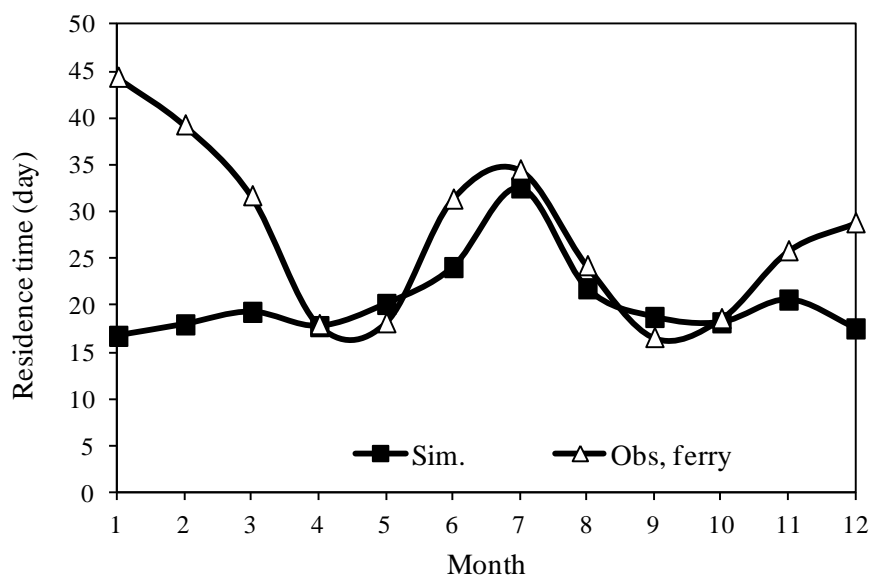


図-5.25 数値計算とフェリーによる観測データとの比較(海水交換日数)

## 5.4 海水交換の応答

東京湾の海水交換に影響する境界条件としては、海表層を通して影響する風や日射量(短波放射)、気温などの気象条件のほか、河川からの淡水流入が考えられる。ここでは **5.3 節**の再現計算を基本ケースとして、風向風速、日射量、気温、淡水流入量を変化させることにより、海水交換量がどのように応答するかを数値計算によって調べる。

### 5.4.1 応答解析の計算条件

ここでは基本ケースに対して、荒川の淡水流入量、湾軸方向風速、気温、日射量(短波放射)を変化させて、海水交換の応答を調べた。

- (1) 淡水流入量は荒川の各月の平均流入量を-20, 0, 20, 40, 60, 80(m<sup>3</sup>/s)増減させて12ヶ月の計72ケースの計算を行った。
- (2) 湾軸風向風速については、それぞれの月の風向風速の平均値を -4, -2, 0, 2, 4, 6(m/s)増減させて72ケースの計算を行った。
- (3) 気温も-2, -1, 0, 1, 2, 3(°C)変化させて72ケースの計算を行った。
- (4) 日射量は各月の日射量に対して  $I/I_0=0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2, 1.3$  として5月～9月までの30ケースの計算を行った。

## 5.4.2 応答計算結果

### (1) 淡水流入量

図-5.26(a), (b)は荒川の淡水流入量 $F_D$ を増減させた場合の湾口の海水交換量 $Q$ の変化である。(a)は1月～6月, (b)は7月～12月の変化である。全体に淡水流入量 $F_D$ が増加するにつれて, 海水交換量 $Q$ が上昇する傾向にある。

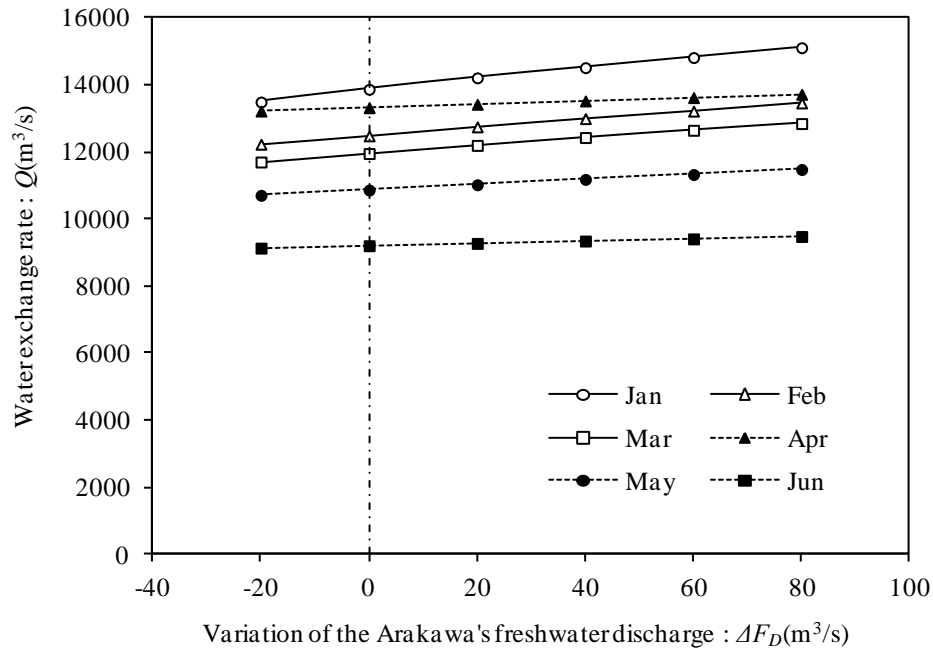


図-5.26(a) 荒川の流量を増減させた場合の東京湾口の海水交換量の変化

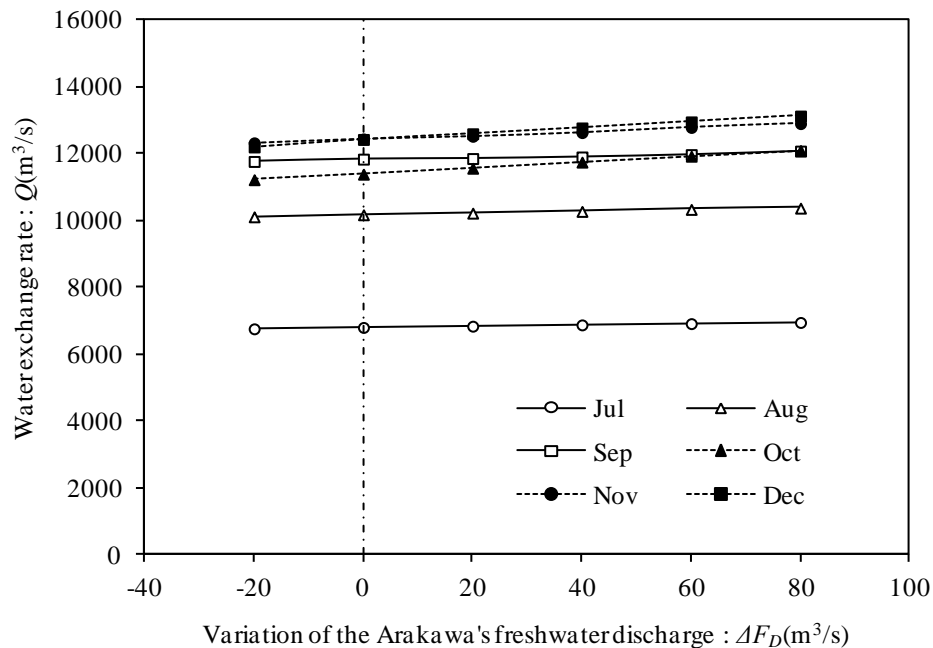


図-5.26(b) 荒川の流量を増減させた場合の東京湾口の海水交換量の変化

図-5.27(a), (b)はそれぞれ1月～6月, 7月～12月の淡水流入量の変化量 $\Delta F_D$ に対する海水交換量の変化量 $\Delta Q$ である. 淡水流入量に対して海水交換はほぼ線形に増えることが分かる. 変化量は冬季の1月, 2月, 3月, 11月, 12月に大きく,  $100\text{m}^3/\text{s}$ の淡水流入に対して海水交換量は約 $850\sim 1500\text{m}^3/\text{s}$ 増加する. 逆に, 夏季の6月～9月は増加量が小さく, 約 $150\sim 300\text{m}^3/\text{s}$ の増加しか見られない.

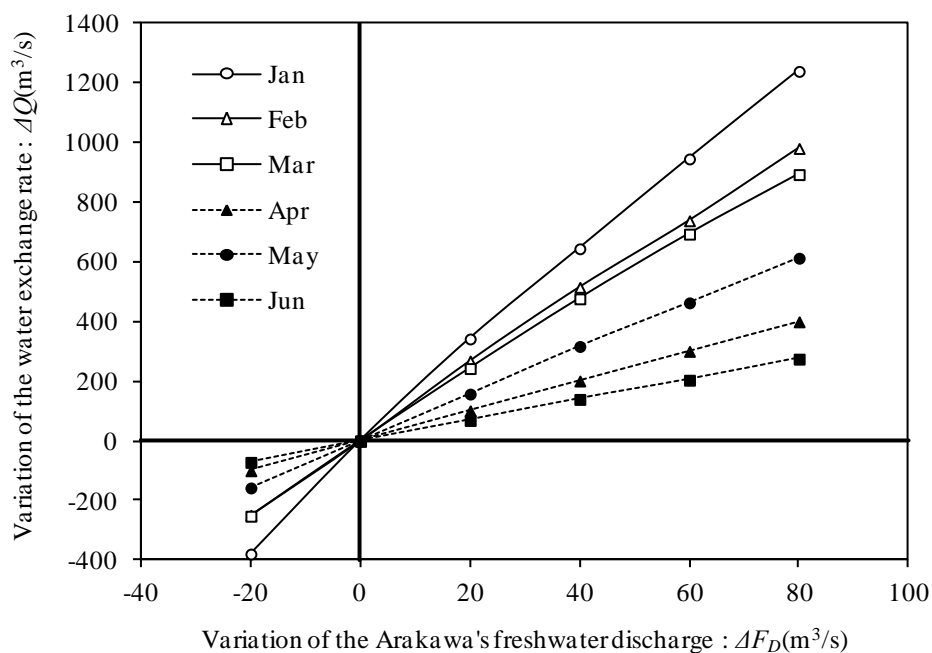


図-5.27(a) 淡水流入の変分に対する海水交換量の応答

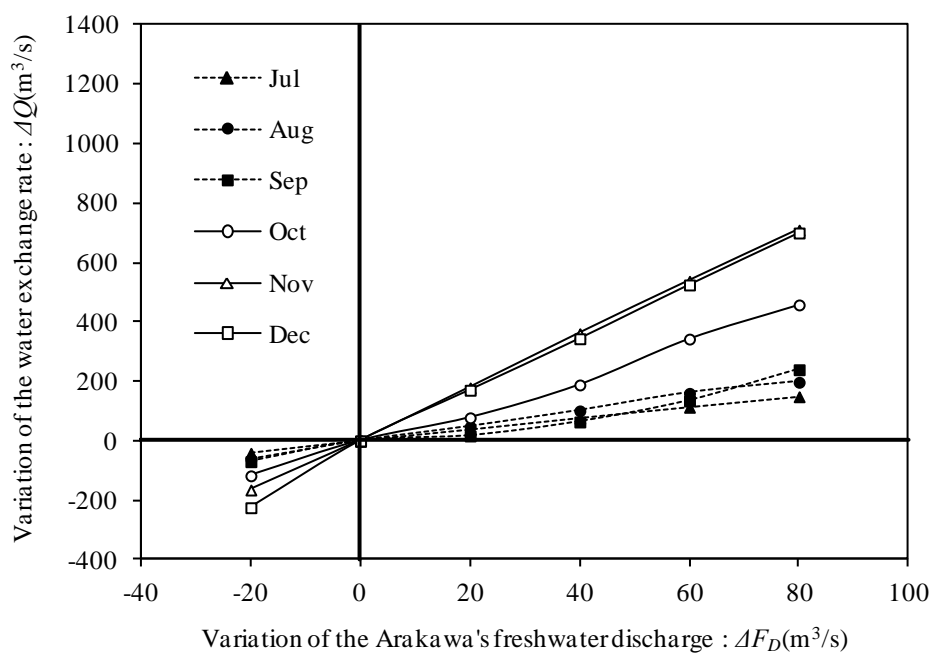


図-5.27(b) 淡水流入の変分に対する海水交換量の応答

## (2) 風速

図-5.28(a), (b)はそれぞれ1月～6月と7月～12月の東京湾の湾軸に平行なNE-SW方向の風速  $W$  を増減させた場合の湾口の海水交換量  $Q$  の変化である。ここで風速  $W$  はプラスが南西風(湾奥向き)であり、マイナスが北東風(湾口向き)である。南西風が増加する(湾奥に吹く風が強くなる)につれて海水交換量  $Q$  が減少し、逆に北東風が増加する(湾口に吹く風が強くなる)につれて海水交換量  $Q$  は増加している。

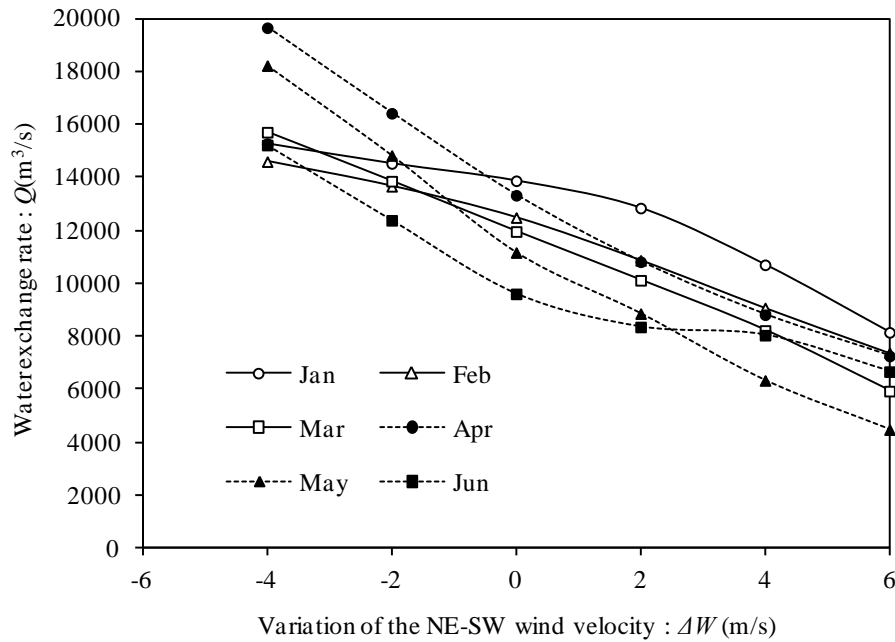


図-5.28(a) 風速(NE-SW 成分)を増減させた場合の海水交換量の変化  $\Delta Q$

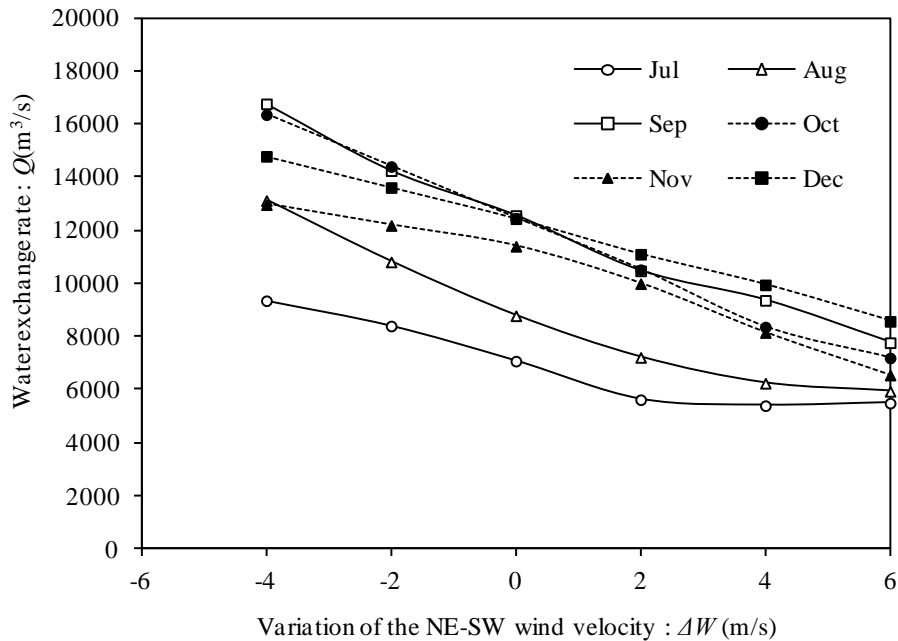


図-5.28(b) 風速(NE-SW 成分)を増減させた場合の海水交換量の変化  $\Delta Q$

図-5.29(a), (b)はそれぞれ1月～6月, 7月～12月の風速の変化量 $\Delta W$ と海水交換量の変化量 $\Delta Q$ である。いずれの月も南西風(プラスの風速)の増加とともに $\Delta Q$ が減少するが, 夏季の6月～8月はその減少量が $\Delta W$ の増加とともに小さくなる傾向がある。

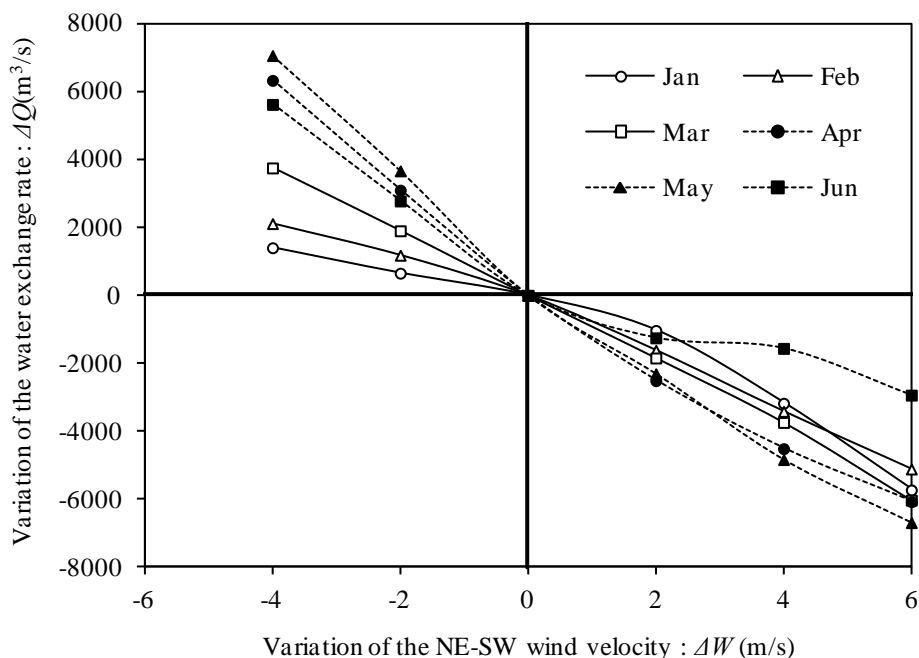


図-5.29 風速(NE-SW 成分)の増減に対する海水交換量の応答

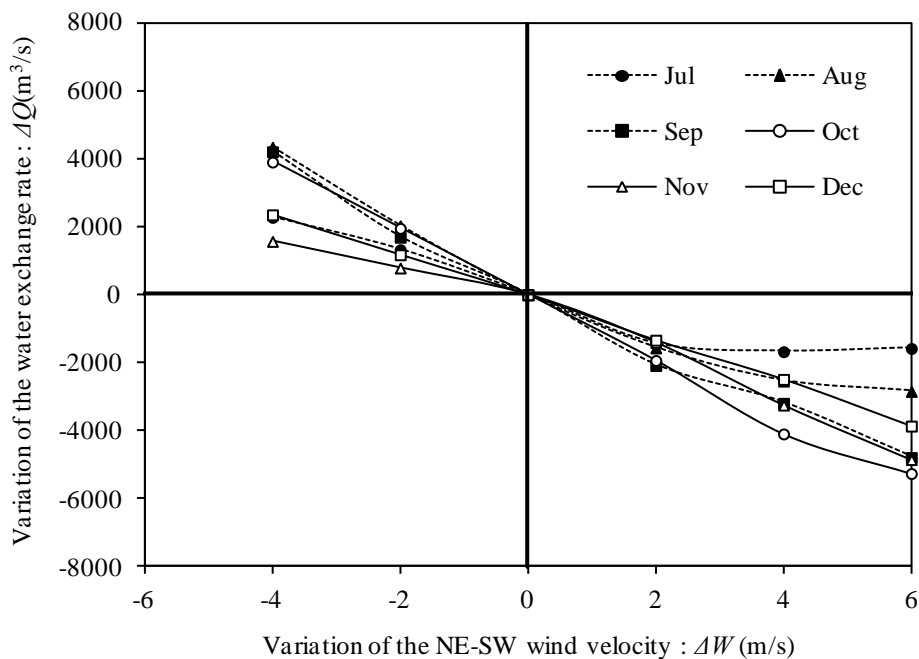


図-5.29 風速(NE-SW 成分)の増減に対する海水交換量の応答

### (3) 気温

図-5.30(a), (b)はそれぞれ1月～6月と7月～12月の気温 $T_a$ を増減させた場合の湾口の海水交換量 $Q$ の変化である。気温 $T_a$ の増加に対する海水交換量 $Q$ の変化は淡水流入量や風速に対する変化よりも小さい。

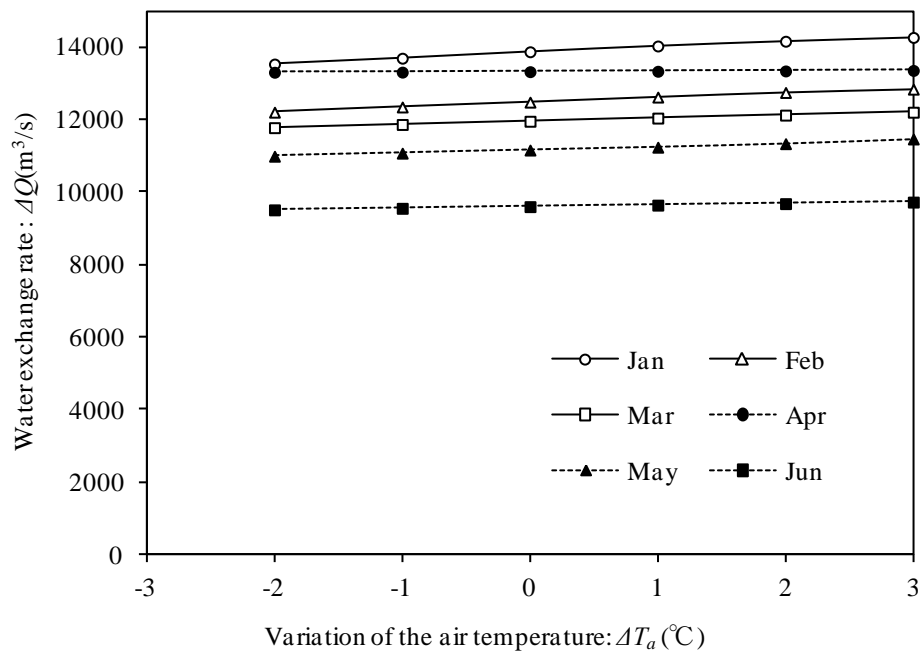


図-5.30(a) 気温を増減させた場合の東京湾口の海水交換量の変化(1月～6月)

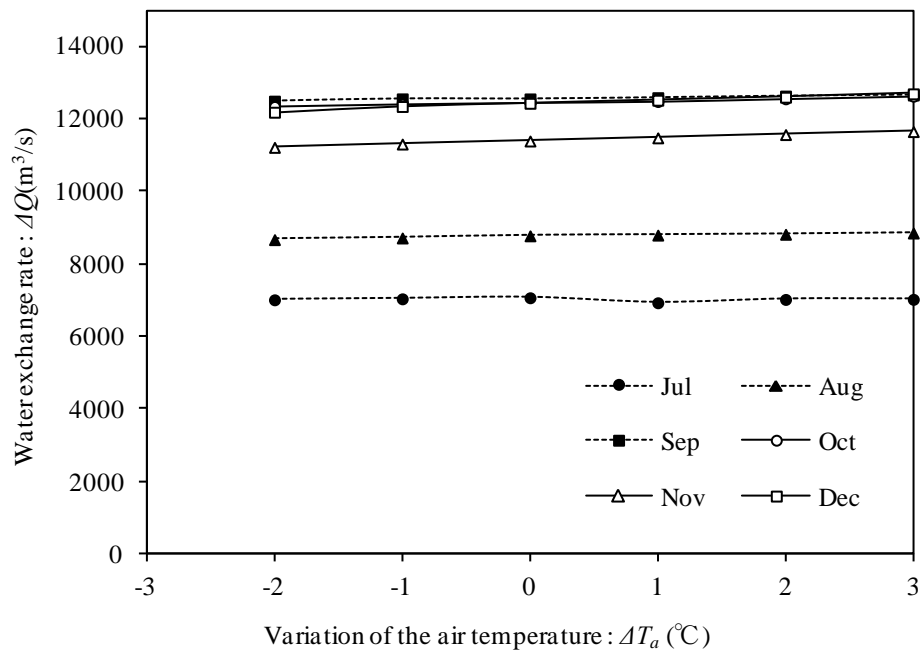


図-5.30(b) 気温を増減させた場合の東京湾口の海水交換量の変化(7月～12月)



図-5.31(a), (b)はそれぞれ1月～6月と7月～12月の気温の変化量 $\Delta T_a$ と海水交換量の応答量 $\Delta Q$ の関係である。冬季の1月, 2月, 3月, 5月, 11月, 12月は気温が上昇すると海水交換量が増加する傾向にあり,  $3^\circ\text{C}$ の上昇で  $200\sim 400\text{m}^3/\text{s}$  増加する。一方, 4月, 7月, 8月, 9月は気温の増加に対する海水交換量の増加量が小さく, 7月は逆に減少している。

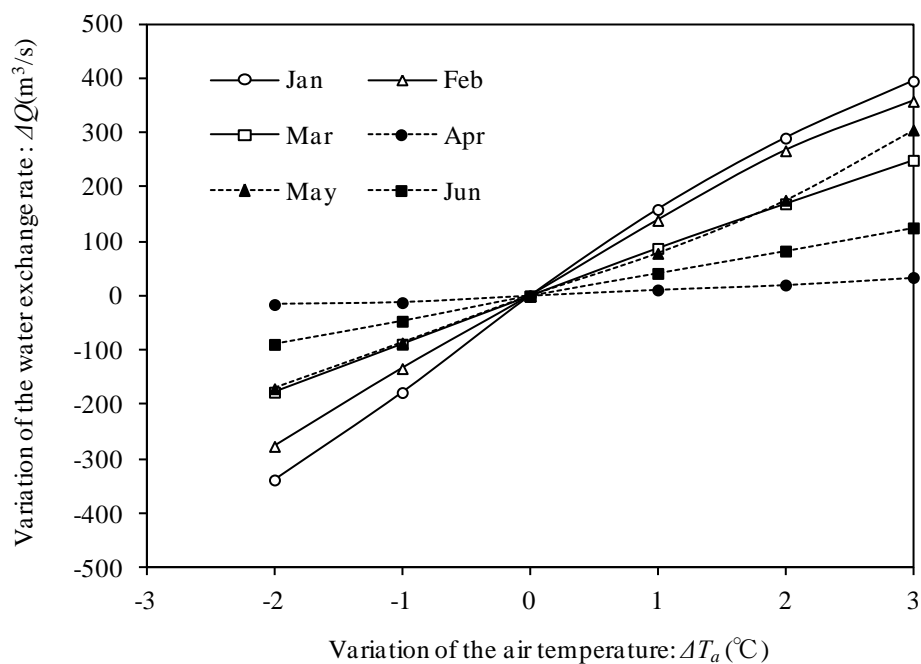


図-5.31(a) 気温の変分に対する海水交換量の応答(1月～6月)

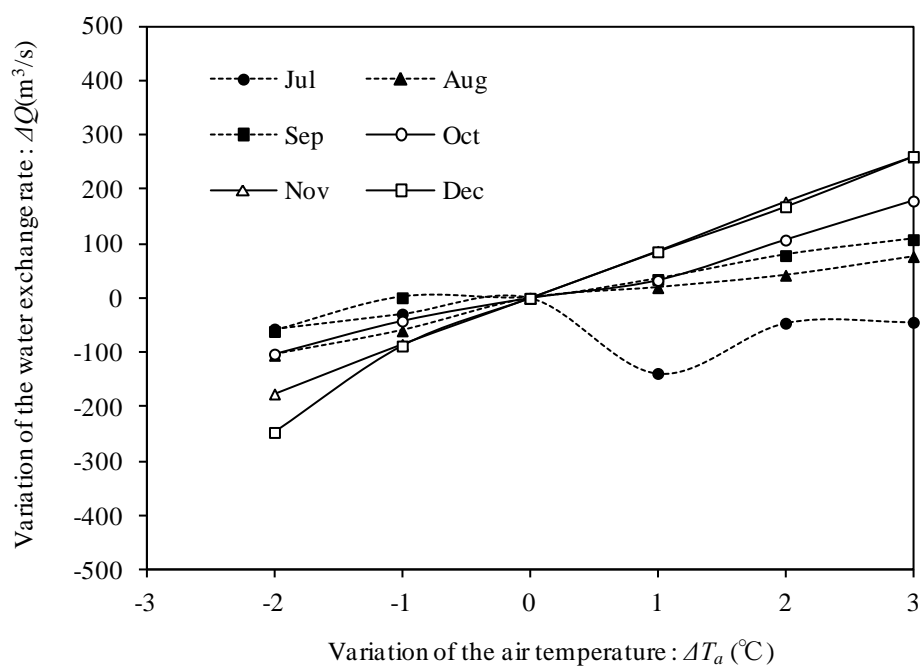


図-5.31(b) 気温の変分に対する海水交換量の応答(7月～12月)

(4) 日射量(短波放射量)

図-5.32 は5月～9月の日射量(短波放射量) $I$ を増減させた場合の湾口の海水交換量 $Q$ の変化である。日射量 $I$ の変化に対する海水交換量 $Q$ の変化は気温と似た傾向を示している。計算は夏を対象としており、水温を上昇させるという点で共通しているためだと考えられる。図-5.33 は日射量の変化量 $\Delta T_a$ と海水交換量の応答量 $\Delta Q$ の関係である。気温と同様に日射量 $I$ の増加とともに海水交換量 $Q$ も増加する傾向にあるが7月は逆に減少している。

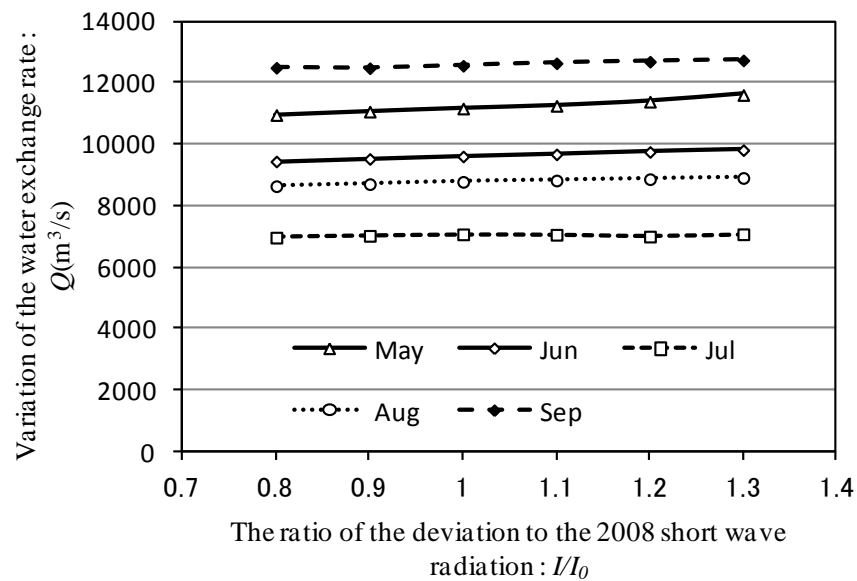


図-5.32 日射量(短波放射量)の増減させた場合の海水交換量の変化

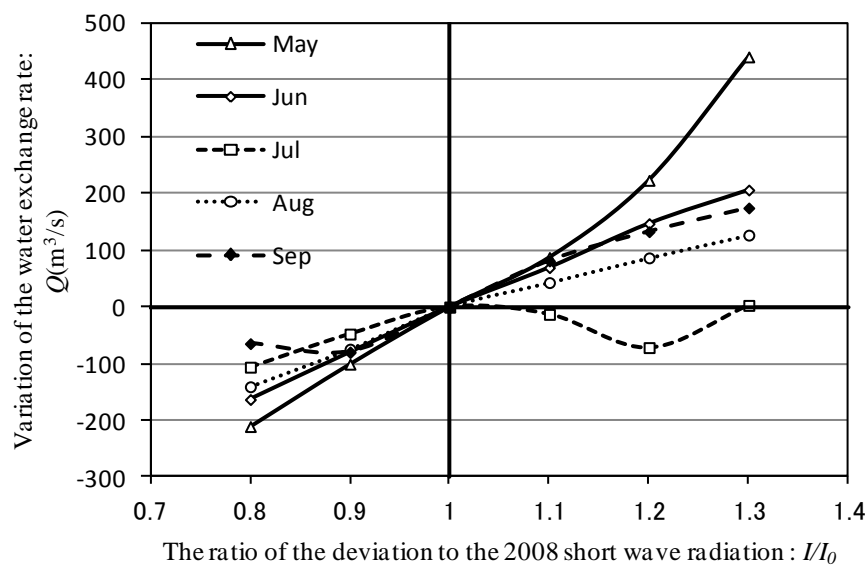


図-5.33 日射量(短波放射量)の変分に対する海水交換量の応答

### 5.4.3 各因子の比較

図-5.34 は前節 5.4.2 の結果から荒川の淡水流入量  $100\text{m}^3/\text{s}$ 、南西風の風速  $1\text{m/s}$ 、北東風の風速  $1\text{m/s}$ 、気温  $1^\circ\text{C}$  の上昇に対する海水交換の変化量  $\Delta Q$  を示したものである。年平均でみると、淡水流入量  $100\text{m}^3/\text{s}$ 、南西風の風速  $1\text{m/s}$ 、北東風の風速  $1\text{m/s}$ 、気温  $1^\circ\text{C}$  の上昇に対する海水交換量  $Q$  の変化は、それぞれ、 $715\text{m}^3/\text{s}$ 、 $-774\text{m}^3/\text{s}$ 、 $936\text{m}^3/\text{s}$ 、 $64\text{m}^3/\text{s}$  である。

まず、荒川の淡水流入量  $F_D$  の増加に対する海水交換量  $Q$  の増加量は冬季に大きく、海水交換量の増加量は淡水流入量の増加量の 10～15 倍である。逆に夏季になると小さく、7 月には 2 倍程度しかない。夏季は淡水流入に対する海水交換の効率が悪いことを示している。

次に風についてみると、北東風が吹くと海水交換量が増加し、特に 4 月～6 月、8 月～10 月に大きい傾向にある。逆に南西風では海水交換量が減少するが、6 月～8 月にかけては減少量が小さくなっている。気温の上昇は海水交換量を増加させる傾向にあるが、夏季はその増加量が小さくなり 7 月には逆に海水交換量が減少している。

図-5.35 は南西風  $1\text{m/s}$ 、北東風  $1\text{m/s}$ 、気温  $1^\circ\text{C}$  の上昇と同程度の海水交換をもたらす淡水流入量の変化量を示したものである。南西風、北東風ともに 4 月～9 月に海水交換量の変化に与える影響度が大きく、北東風  $1\text{m/s}$  の増加は淡水流入量の増加  $300\sim 440\text{m}^3/\text{s}$  の増加量に相当する。

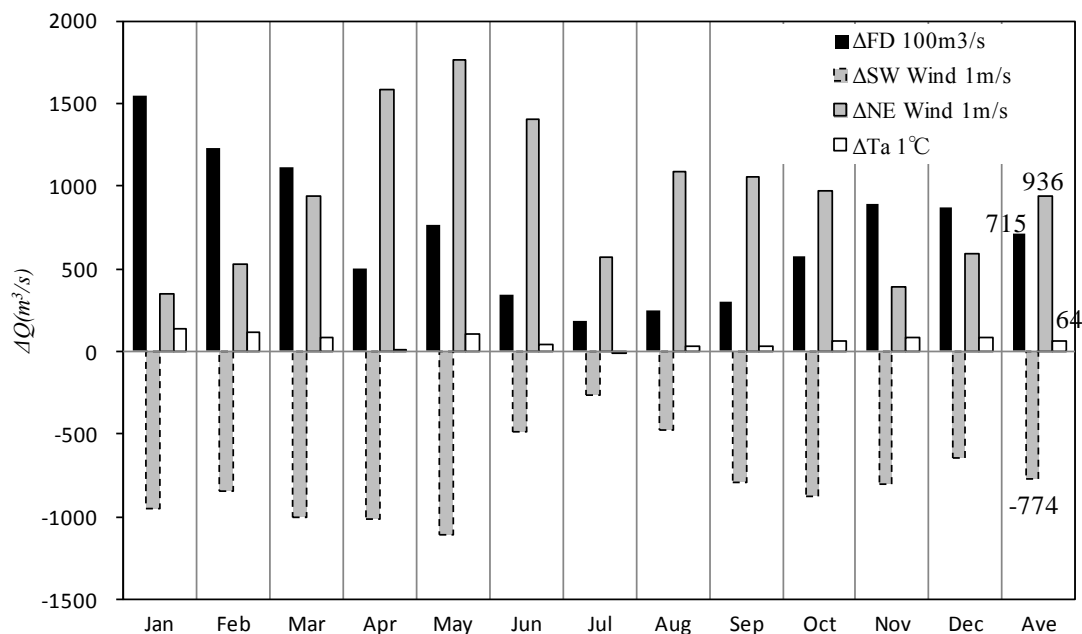


図-5.34 淡水流入量  $F_D(100\text{m}^3/\text{s})$ 、南西風  $W 1\text{m/s}$ 、北東風  $W 1\text{m/s}$ 、  
気温  $T_p 1^\circ\text{C}$  上昇時の海水交換量の増加量  $\Delta Q$

図-5.36 は実際の淡水流入量（図-5.27(b)に示した主要 6 河川），風速，気温の年変動に対する海水交換の変化量である．3 章で調べた示した各因子の標準偏差（ $1\sigma$ ）に対する海水交換の変化量  $\Delta Q$  を示した．北東風，淡水流入量，南西風，気温の順に影響度が大きく，年平均でみるとそれぞれ， $886\text{m}^3/\text{s}$ ， $771\text{m}^3/\text{s}$ ， $-667\text{m}^3/\text{s}$ ， $406\text{m}^3/\text{s}$ ， $64\text{m}^3/\text{s}$  である．このように東京湾では風と淡水流入が同程度で海水交換に影響を与えていることが分かった．

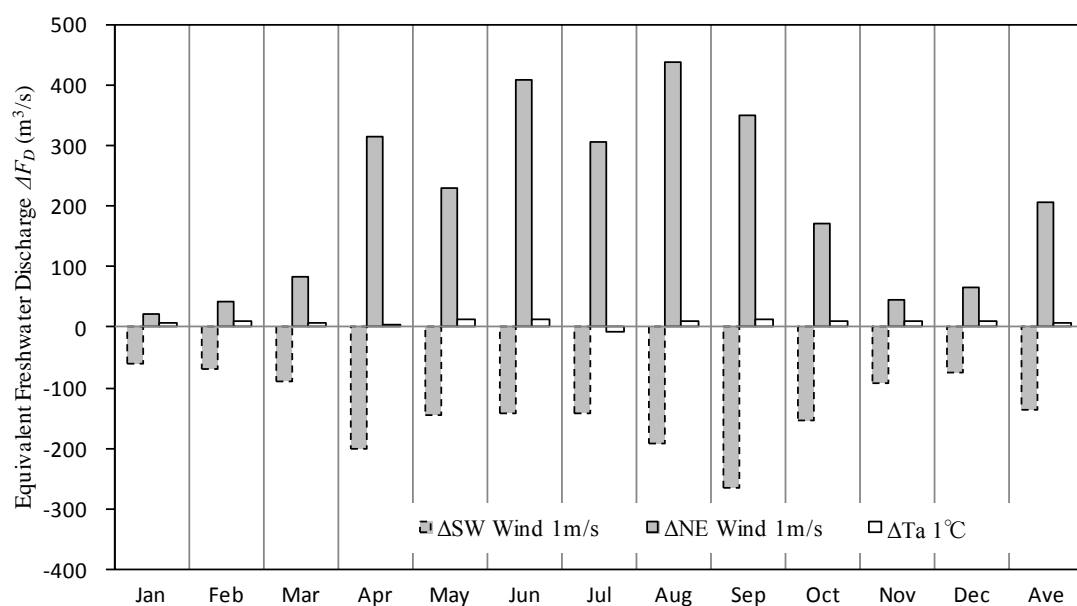


図-5.35 風速 1m/s と気温  $1^\circ\text{C}$  の効果に相当する淡水流入量

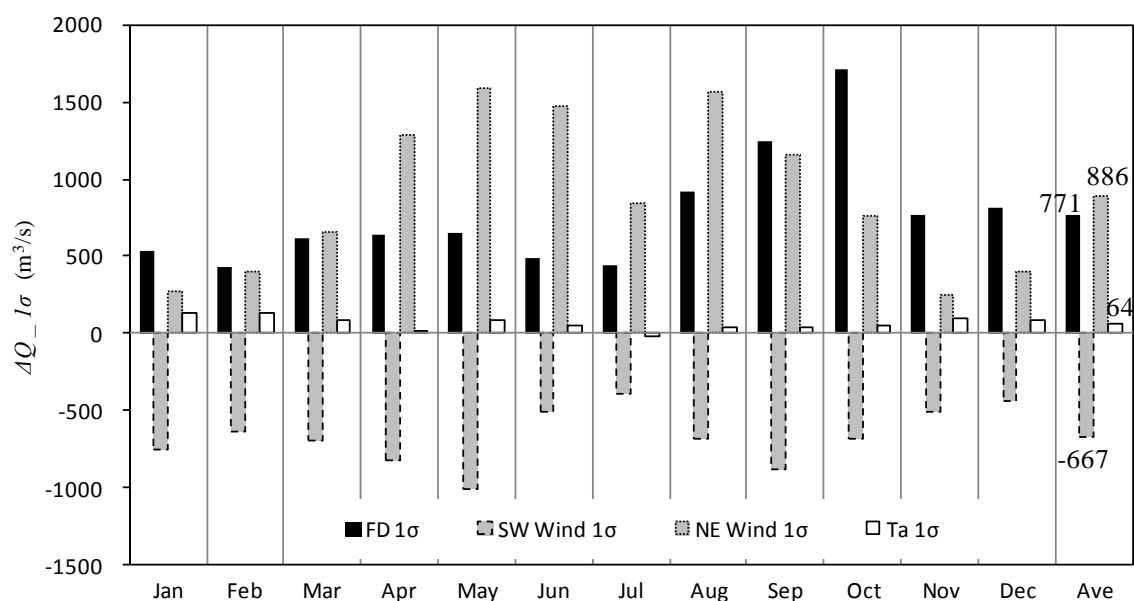


図-5.36 実際の変動量（標準偏差  $\sigma$ ）に対する海水交換量の変化  $\Delta Q(\text{m}^3/\text{s})$

## 5.5 5章のまとめ

本章では、淡水流入量や気象条件によって東京湾の海水交換がどのように変化するかを調べるため、数値計算を実施した。まず、東京湾内の観測データとフェリーによる観測データを再現し、その後、淡水流入量や気象条件を変えて応答を調べた。

1) 非静水圧3次元流動モデルを用いて、2007年～2008年の再現計算を実施し、塩分・水温および海水交換量の観測データと比較して、よい一致をみた。

2) 数値計算によって応答解析を行ったところ、海水交換の応答には季節変化があり、春と秋が大きく、夏と冬は小さかった。淡水流入の影響は台風と秋雨前線のため8月～10月が最も大きく、風の影響は春と秋に最も大きかった。

2) 淡水流入量  $100\text{m}^3/\text{s}$ 、南西風の風速  $1\text{m/s}$ 、北東風の風速  $1\text{m/s}$ 、気温  $1^\circ\text{C}$  の上昇に対する海水交換量  $Q$  の変化は年平均で、それぞれ、 $715\text{m}^3/\text{s}$ 、 $-774\text{m}^3/\text{s}$ 、 $936\text{m}^3/\text{s}$ 、 $64\text{m}^3/\text{s}$  だった。

主要6河川の淡水流入量、風速、気温の年変動（標準偏差（ $1\sigma$ ））に対する海水交換の変化量を調べたところ、北東風、淡水流入量、南西風、気温の順に影響度が大きく、年平均でみるとそれぞれ、 $886\text{m}^3/\text{s}$ 、 $771\text{m}^3/\text{s}$ 、 $-667\text{m}^3/\text{s}$ 、 $406\text{m}^3/\text{s}$ 、 $64\text{m}^3/\text{s}$  だった。

東京湾の海水交換に及ぼす風と淡水流入の影響度はこれまで未解明だったが、本研究の解析によって風と淡水流入の効果がほぼ同程度の海水交換をもたらしていることが明らかとなった。

## 6 章 夏季の貧酸素水塊と栄養塩収支に及ぼす淡水流入と風の影響

### 6.1 概 要

東京湾では春から秋にかけて底層に大規模な貧酸素水塊が発生し、海底生物の生息が困難となっている。この貧酸素水塊は北東風によって湧昇し、時には青潮となって湾奥沿岸の生物を死滅させている。このような底層の貧酸素水塊の発達には、密度成層の発達と底泥での酸素消費や赤潮後の酸素消費が寄与しているが、東京湾の貧酸素水塊の発達に及ぼす淡水流入や風の影響について見ると、不明な点が多い。

岡田ら(2007)は近年の都市化の影響で東京湾への淡水流入量が増加し、海水交換量も増加していることを示した。このような海水交換量の増加は湾内の水質を良くするとも考えられるが、一方で淡水が流入すると密度成層が強化されて逆に悪影響を与えるとも考えられる。4 章の淡水流入量と千葉灯標の底層 DO の関係は、淡水流入が多いほど DO が小さい傾向が見られた。

次に風についてみると、Nakayama(2010)は夏季の南風が湾奥の表層と底層の海水を混合することで、東京湾奥の貧酸素化が減少することを示した。しかし、本研究の 4 章、5 章の結果によると南風が連吹する夏季は湾口での海水交換が減少しており、陸域からの栄養塩が東京湾内に滞留しやすくなっていることも考えられ、総じて見ると湾の環境には悪影響を与えている可能性がある。

一方、二瓶(2009)は、大規模出水後に陸からの有機物が海底に堆積し、その有機物が分解される過程で貧酸素状態が2カ月ほども継続することを示した。3 章で明らかとなった夏季の時計回り循環とあわせて考えると、大規模出水後には淡水が湾奥に滞留しやすくなり、密度成層を強化して、より貧酸素化を強くしていることも考えられる。

そこで本章では、夏季の貧酸素水塊と栄養塩収支に及ぼす淡水流入と風の影響を調べることを目的として 5 章に引き続いて数値計算によって現象を明らかにすることとした。数値計算モデルは流動モデルと生態系モデルを組み合わせたものであり、詳細については付録に記述した。

まず、6.2 節では 2008 年の東京湾の水質を再現することとした。計算結果は塩分・水温・クロロフィル a などの水質の観測データと比較することで検証した。また、本章の流れの計算では 3 章の HF レーダーの観測結果で明らかとなった夏期の時計回り循環の再現にも力点を置いた。東京湾奥表層の時計回り循環は、東京湾奥表層の富栄養化した海水を滞留させ、東京湾奥の貧酸素水塊へ悪影響を及ぼしている可能性があるからである。

次に 6.3 節では、6.2 節の計算結果に基づいて、河川からの栄養塩負荷や湾口での流入出を調べて、東京湾における栄養塩の収支を調べることにした。

さらに 6.4 節では, 6.2 節の計算結果を基本ケースとして, 2008 年 7 月の淡水流入量と風を変化させたケースを実施して, 底層溶存酸素などの水質や栄養塩収支の応答を求め, 淡水流入と風の東京湾の水質, 特に底層貧酸素水塊に及ぼす影響を調べることにした。

## 6.2 東京湾の水質の再現

### 6.2.1 数値計算モデル

用いた数値計算モデルは, 5 章の流動モデルと生態系モデルを組み合わせたモデルであり(田中ら, 2011), 詳細を付録に示した。図-6.1 に示すような食物連鎖網を再現するモデルである。赤潮後に発生する貧酸素化などの現象を再現するため, 有機物を分解速度別に分けるマルチ G モデルが採用されているほか, 微生物ループを考慮して細菌と原生動物を状態変数として取り扱っている。

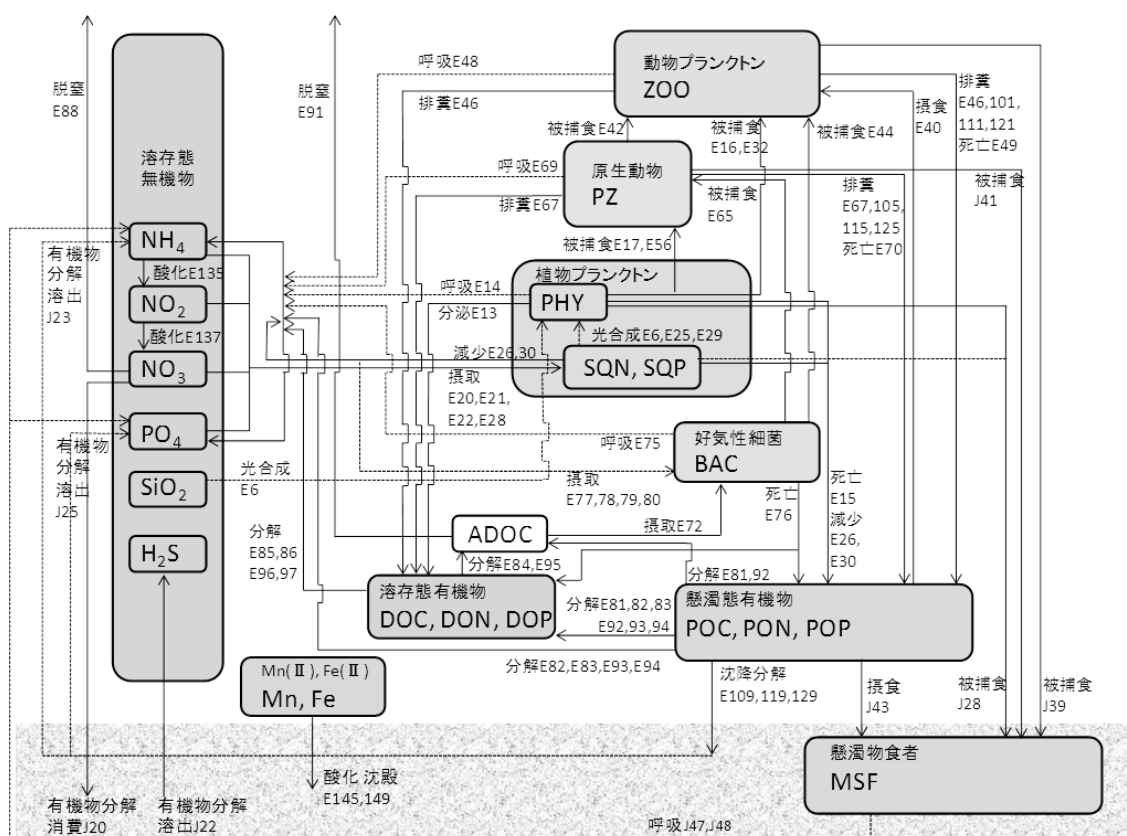


図-6.1(a) 浮遊生態系モデルの物質循環フロー(炭素, 窒素, リン, 珪素, 硫黄)

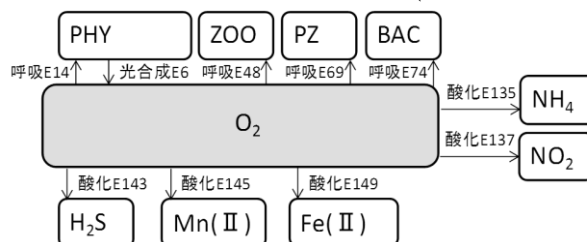


図-6.1(b) 浮遊生態系モデルの物質循環フロー(酸素)

## 6.2.2 計算条件

表-6.1 は再現計算に用いた計算条件のもともであり、以降、その詳細について述べる。

図-6.2 は用いた計算格子と検証に利用した観測データの観測地点、および気象の入力条件作成に用いた気象台、アメダスの位置を示した図であり、図-6.3 は計算格子の水深を示したものであり、あわせて底泥の酸素消費速度(SOD)の分布を示したものである。

表-6.1 計算条件

解析期間	2007 年 1 月 1 日～2008 年 12 月 31 日			
水平格子	2km			
鉛直格子	34 層 格子中心は 3, 0.5, -0.5, -1.5, -2.5, -3.5, -4.5, -6, -8, -10, -12, -14, -16, -18, -20, -22, -24, -26, -28, -30, -32, -34, -36, -38.5, -42.5, -47.5, -52.5, -57.5, -62.5, -67.5, -72.5, -77.5, -82.5, -90(m)			
拡散係数	水平 SGS モデル, 鉛直(中村ら,1987)			
無反射条件	日野の無反射条件			
初期条件	全セルで水温 10℃, 塩分 31PSU, 流速ゼロ			
湾口境界	水質	塩分水温は横浜技調 S4 データ, 栄養塩はいで(2008)から算定		
	水位	館山の主要 8 分潮	流速	勾配ゼロ
河川境界	国交省水文水質データベースから江戸川,荒川,中川,多摩川,鶴見川,隅田川の流量水温を推定,塩分はゼロ,栄養塩は坂井ら(2008),環境省(2000)から算定			
気象条件	風向風速	千葉,江戸川臨海,羽田,木更津のデータを平面補間		
	気温, 日射, 降水, 気圧は東京気象台のデータ			

### (1) 風の平面分布

風の平面分布は以下のようにして求めた。まず、図-6.2 に示す気象台とアメダスの風向風速データから式(6.1)で高度 300m 風速を推定する。

$$W_{300OBS,i} = \ln\left(\frac{10}{z_{0SS}}\right) / \ln\left(\frac{300}{z_{0SS}}\right) \times \ln\left(\frac{300 - z_{HOBS} - z_{MOBS}}{z_{0OBS}}\right) / \ln\left(\frac{z_{MOBS}}{z_{0OBS}}\right) \times W_{OBS,i} \quad (6.1)$$

式中、 $W_{OBS,i}$  は観測地点  $i$  での風速値、 $W_{300OBS,i}$  は観測地点  $i$  の標高 300m 換算風速、 $z_{0SS}$  は海面粗度であり、0.001m とした。また、 $z_{HOBS}$  は図-6.4 で示される観測地点の標高、 $z_{MOBS}$  は風速計の高さ(気象庁、)、 $z_{0OBS}$  は桑形・近藤(1990)の地表面粗度であり、具体的には表-6.2 で示される値を用いた。なお、羽田の粗度は不明なため全方位一様に 0.05m とした。



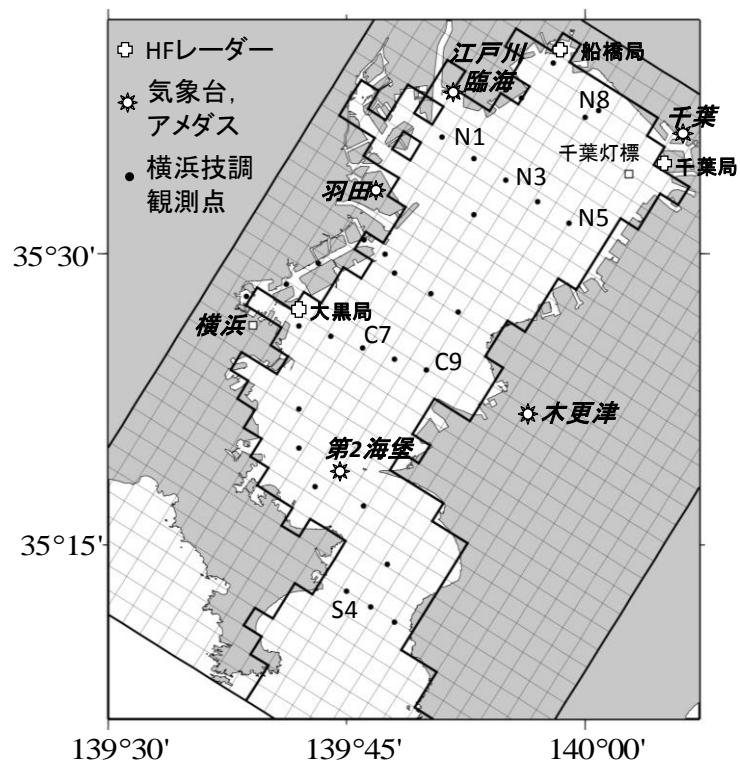


図-6.2 観測地点, 气象台, アメダスの位置と計算格子

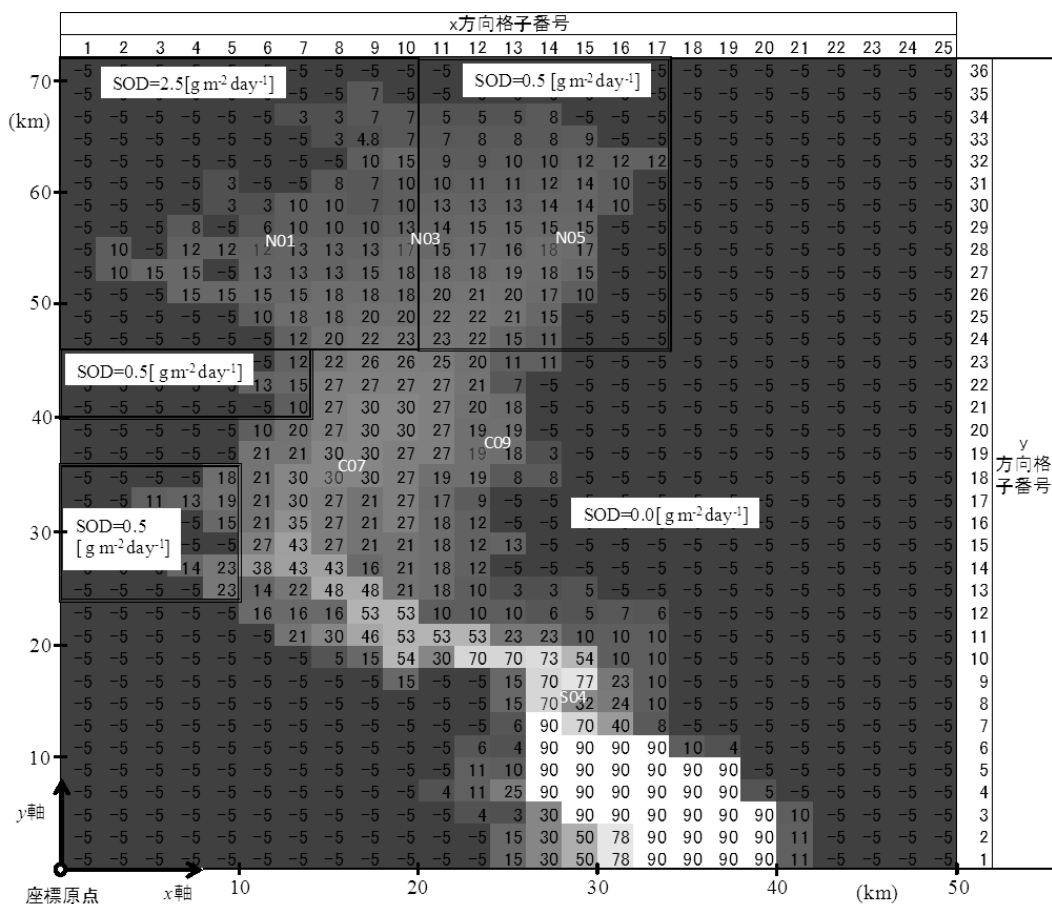


図-6.3 計算格子の座標と水深

次に、式(6.2)と式(6.3)で面的な補間をして各計算格子上の海上 10m 風速を求めた.

$$W = \{\sum W_{300OBS,i} \times f_w(x,y)\} / \sum f_w(x,y) \quad (6.2)$$

$$f_w(x,y) = 1/[1.6 + 0.2 \times \{(x - x_{OBS,i})^2 + (y - y_{OBS,i})^2\}/4000] \quad (6.3)$$

式中  $x(m)$ ,  $y(m)$  は図-6.3 の計算格子の左下点を原点とする座標,  $x_{OBS,i}(m)$ ,  $y_{OBS,i}(m)$  は観測地点  $i$  の座標,  $f_w(x,y)$  は平面補間する際の重み関数である.

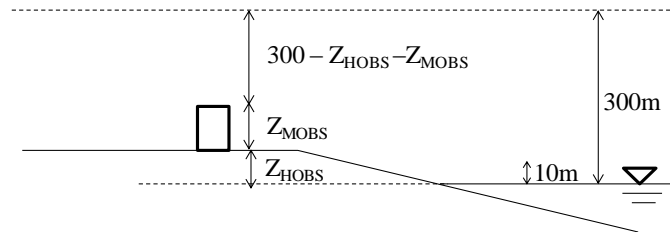


図-6.4 気象台, アメダスの観測値の海上 10m 風速への換算に用いた変数の関係図

表-6.2 気象台, アメダスの地表面粗度, 標高と風速計の設置高さ

	地表面粗度								標高(m)	風速計高
	NNE	ENE	ESE	SSE	SSW	WSW	WNW	NNW	Z <sub>HOBS</sub>	Z <sub>MOBS</sub>
千葉	90	113	80	24	12	12	21	76	4	47.9
船橋	5	28	37	37	20	5	35	18	28	7.9
木更津	118	84	83	77	23	13	18	38	60	10.1
横浜	14	35	67	119	112	110	118	24	39	19.5
羽田	5	5	5	5	5	5	5	5	6	10.0

## (2) 流入負荷量の算定

流入負荷は以下のようにして求めた. まず, 5 章と同様にして 1 級河川の流量を求め, 式(6.4)の L-Q 式を用いて負荷量を算定した.

$$L = aQ^b \quad (6.4)$$

式(6.4)中,  $L$  は負荷量(g/s),  $Q$  は流量(m<sup>3</sup>/s)であり, 係数  $a$ ,  $b$  は坂井(2008)を参考にして表-6.3 の値を用いた.

L-Q 式によって 2007~2010 年の東京湾に流入する負荷量を求めたところ, 1 日あたりの COD, TN, TP, TSi 負荷量はそれぞれ 186.3(t/日), 96.7(t/日), 6.94(t/日), 11.4(t/日)だった.

一方, 東京湾では下水道等からの流入負荷が顕著であり, 環境省(2010)によると 2004 年の負荷量は COD, TN, TP それぞれ, 211(t/日), 208(t/日), 15.3(t/日)である. そのため, L-Q 式から求まる各河川の負荷量を COD, TN, TP それぞれ 1.132, 2.152, 2.205 倍した.

上記の方法で求めた COD, TN, TP から, いであ株式会社(2008)を参考に表-6.4 の分画比で, POC(懸濁態有機炭素), PON(懸濁態有機窒素), POP(懸濁態有機リン), DOC(溶存態有機炭

素), DON(溶存態有機窒素), DOP(溶存態有機リン), NH<sub>4</sub>(アンモニア態窒素), NO<sub>2</sub>(亜硝酸態窒素), NO<sub>3</sub>(硝酸態窒素), PO<sub>4</sub>(リン酸態リン), SiO<sub>2</sub>(珪酸態珪素)を求めた。また, POC, PON, POP, DOC, DON, DOP はそれぞれ, 分解速度別に 3 種類(易分解, 準易分解, 難分解)に分けた。図-6.5 はこのようにして求めた 2008 年の月平均推定流入負荷量である。

### (3) 湾口境界の栄養塩濃度

湾口境界の栄養塩濃度はいであ株式会社(2008)を参考にして表-6.5 の濃度を年間通して全層一定として与えた。また, DO 濃度には式(6.5)で求まる飽和濃度 DO<sub>sat</sub>を与えた。

$$DO_{sat} = -173.4292 + 249.6339 \times \frac{100}{\theta} + 143.3483 \times \log\left(\frac{\theta}{100}\right) - 21.8492 \times \frac{\theta}{100} + S \times \left\{ -0.033096 + 0.014259 \times \frac{\theta}{100} - 0.0017 \times \left(\frac{\theta}{100}\right)^2 \right\} \quad (6.5)$$

$$\theta = T + 273.15 \quad (6.6)$$

式中,  $S$  は塩分(PSU),  $T$  は水温(°C)である。

### (4) 底泥の酸素消費速度

底泥の酸素消費速度 SOD は式(6.7)で与えた。

$$SOD = SOD_{20} \exp(0.0693T) / 3.99823 \quad (6.7)$$

式中  $T$  は水温(°C), SOD<sub>20</sub> は 20°C での酸素消費速度であり, 図-6.3 のような分布を与えた。

票-6.3 河川流入負荷の L-Q 曲線の係数

	COD		TN		TP		TSi	
	$a$	$b$	$a$	$b$	$a$	$b$	$a$	$b$
中川	0.3143	1.1158	0.5524	0.8209	0.0117	1.1025	4.37	1.1598
江戸川	0.0663	1.3470	0.0842	1.1566	0.0001	1.7873	4.37	1.1598
荒川	0.1576	1.2378	0.3582	0.9456	0.0047	1.2954	4.37	1.1598
多摩川	0.0698	1.3473	0.2800	0.9392	0.0057	1.2555	4.37	1.1598
鶴見川	0.3711	1.1158	0.4272	0.8209	0.0135	1.1025	4.37	1.1598
墨田川	0.0597	1.4748	1.1651	0.7525	0.0158	1.0810	4.37	1.1598

表-6.4 河川流入負荷の分画比

分画	割合	分画	割合
DIP/TP	0.54	PCOD/COD	0.23
POP/(POP+DOP)	0.68	POC/PCOD	0.86
DIN/DN	0.73	DOC/DCOD	0.93
NH <sub>4</sub> /DIN	0.42	易分解性	0.5
NO <sub>3</sub> /(NO <sub>2</sub> +NO <sub>3</sub> )	0.97	準易分解性	0.3
		難分解性	0.2

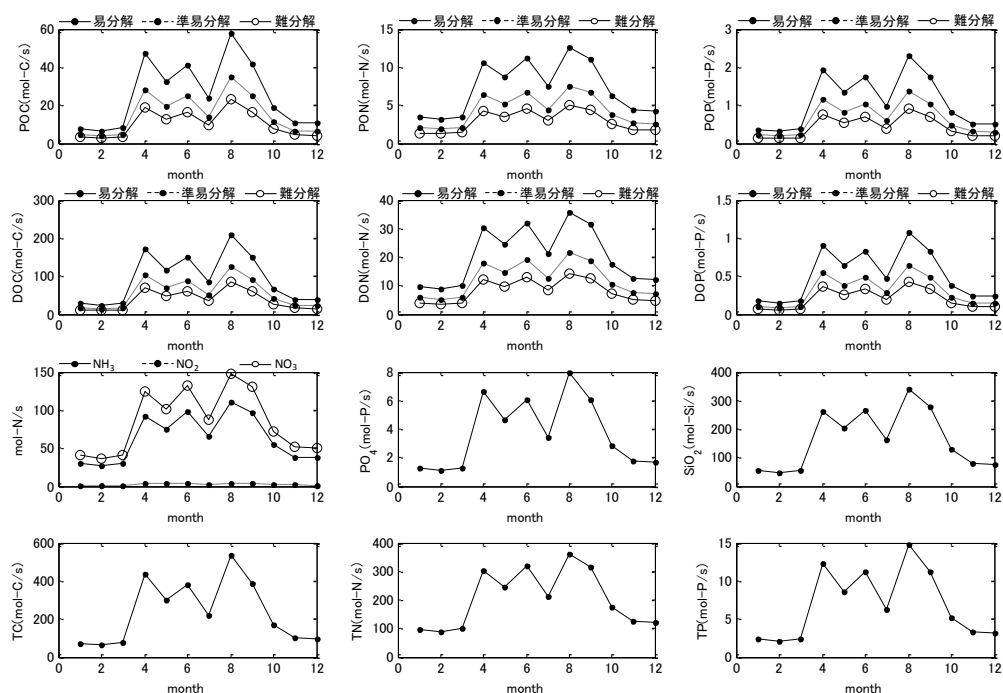


図-6.5 2008年の月平均推定流入負荷量

表-6.5 湾口の栄養塩（年間を通して全層一定とした）

変数	値	単位	変数	値	単位
PHY	0	$\text{mol-C}\cdot\text{m}^{-3}$	POP1	0.000190	$\text{mol-P}\cdot\text{m}^{-3}$
SQN	0	$\text{mol-N}\cdot\text{m}^{-3}$	POP2	0.000114	$\text{mol-P}\cdot\text{m}^{-3}$
SQP	0	$\text{mol-P}\cdot\text{m}^{-3}$	POP3	0.000096	$\text{mol-P}\cdot\text{m}^{-3}$
ZOO	0	$\text{mol-C}\cdot\text{m}^{-3}$	DOP1	0.000197	$\text{mol-P}\cdot\text{m}^{-3}$
PZ	0	$\text{mol-C}\cdot\text{m}^{-3}$	DOP2	0.000118	$\text{mol-P}\cdot\text{m}^{-3}$
BAC	0	$\text{mol-C}\cdot\text{m}^{-3}$	DOP3	0.000079	$\text{mol-P}\cdot\text{m}^{-3}$
POC1	0.02400	$\text{mol-C}\cdot\text{m}^{-3}$	PO <sub>4</sub>	0.00100	$\text{mol-P}\cdot\text{m}^{-3}$
POC2	0.01440	$\text{mol-C}\cdot\text{m}^{-3}$	NH <sub>4</sub>	0.00275	$\text{mol-N}\cdot\text{m}^{-3}$
POC3	0.00958	$\text{mol-C}\cdot\text{m}^{-3}$	NO <sub>2</sub>	0.00014	$\text{mol-N}\cdot\text{m}^{-3}$
DOC1	0.00917	$\text{mol-C}\cdot\text{m}^{-3}$	NO <sub>3</sub>	0.00454	$\text{mol-N}\cdot\text{m}^{-3}$
DOC2	0.05500	$\text{mol-C}\cdot\text{m}^{-3}$	SiO <sub>2</sub>	0.01200	$\text{mol-Si}\cdot\text{m}^{-3}$
DOC3	0.03670	$\text{mol-C}\cdot\text{m}^{-3}$	H <sub>2</sub> S	0	$\text{mol-S}\cdot\text{m}^{-3}$
ADOC	0	$\text{mol-C}\cdot\text{m}^{-3}$	Fe	0	$\text{mol-Fe}\cdot\text{m}^{-3}$
PON1	0.003280	$\text{mol-N}\cdot\text{m}^{-3}$	Fe(OH) <sub>3</sub>	0	$\text{mol-Fe}\cdot\text{m}^{-3}$
PON2	0.001970	$\text{mol-N}\cdot\text{m}^{-3}$	Mn	0	$\text{mol-Mn}\cdot\text{m}^{-3}$
PON3	0.001310	$\text{mol-N}\cdot\text{m}^{-3}$	MnO <sub>2</sub>	0	$\text{mol-Mn}\cdot\text{m}^{-3}$
DON1	0.007290	$\text{mol-N}\cdot\text{m}^{-3}$			
DON2	0.004380	$\text{mol-N}\cdot\text{m}^{-3}$			
DON3	0.002920	$\text{mol-N}\cdot\text{m}^{-3}$			

### 6.2.3 再現計算結果

#### (1) 湾表層の時計回り循環流の再現結果

図-6.6 は表層(0m)と水深 6m, 10m での 2008 年 1 月と 7 月の月平均残差流の計算結果である。表層(水深 0m)では図-3.42(c)の HF レーダーの観測結果と同様の 1 月の湾口に向かう一様な流れと, 7 月の湾奥の時計回り循環流が再現された。

この循環流は水深 6m にも見られるが, その中心は表層 0m よりも南側に位置している。一方, 水深 10m の湾奥では表層と逆向きの流れがあり, 湾の東に北へ向かう流れが見られる。

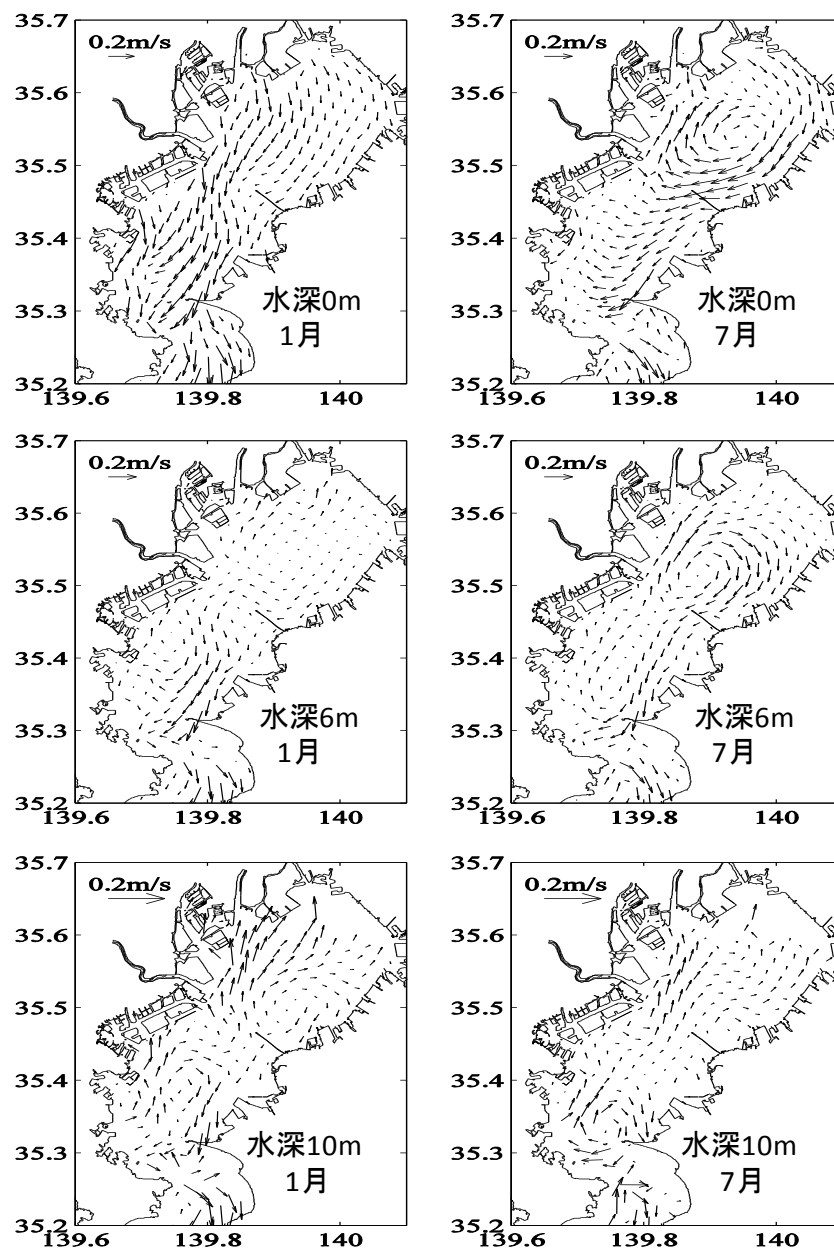


図-6.6 2008 年 1 月と 7 月の月平均流速分布の再現計算結果  
(風の面的な分布を与えた場合)

灘岡ら(1997)は東京湾の時計回り循環流が風の空間分布のない一様な風を与えた場合には発生しないことを示した。そこで、本論文でも一様な風を与えて計算したところ、図-6.7のように表層 0m では 1 月、7 月ともに時計回り循環流が発生せず、表層流速の再現には風の空間変動が不可欠なことが示された。しかし、水深 6m を見ると図-6.6 の場合より規模が小さいものの時計回り循環が見られた。

藤原ら(1994)は閉鎖性内湾の時計回り循環(高気圧性渦)の発生に重力循環にともなう湧昇と風の影響が関係しており、さらに自己励起性があることを指摘している。

ここで得た結果は表層 6m 付近ではこのような重力循環あるいは風による高気圧性渦が発生するが、表層 0m では風の空間的な変動が大きく寄与していることを示している。

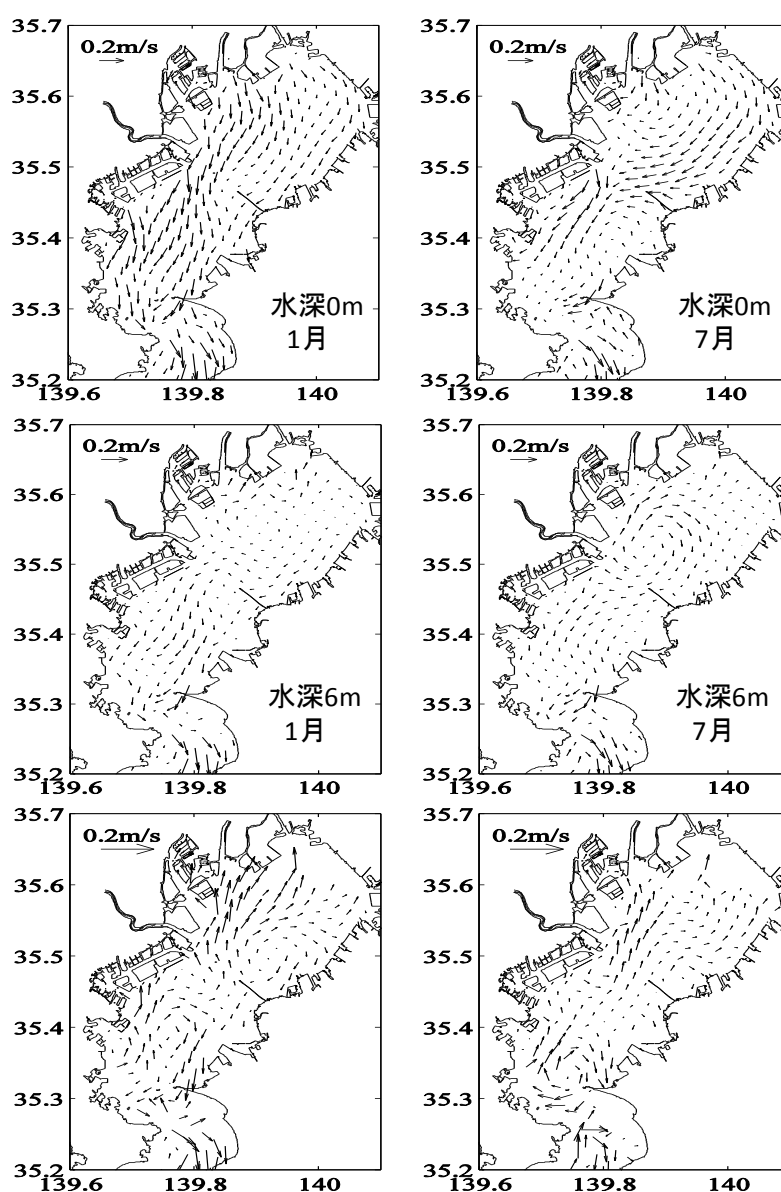


図-6.7 2008 年 1 月と 7 月の月平均流速分布の計算結果(面的に一様な風を与えた場合)

そこで、6.2.2(1)で求めた風の空間分布の特徴を調べてみる。図-6.8 は 2008 年 7 月の月平均風速分布である。それぞれ、左がベクトル図、右が風速の絶対値の分布図である。全般に南風が卓越しており、詳細に見てみると富津岬よりも北側では、湾の西側で湾奥へ向かう風が東側よりも強くなっている。このような風の分布が、湾奥の時計回り循環を発生させているものと考えられる。

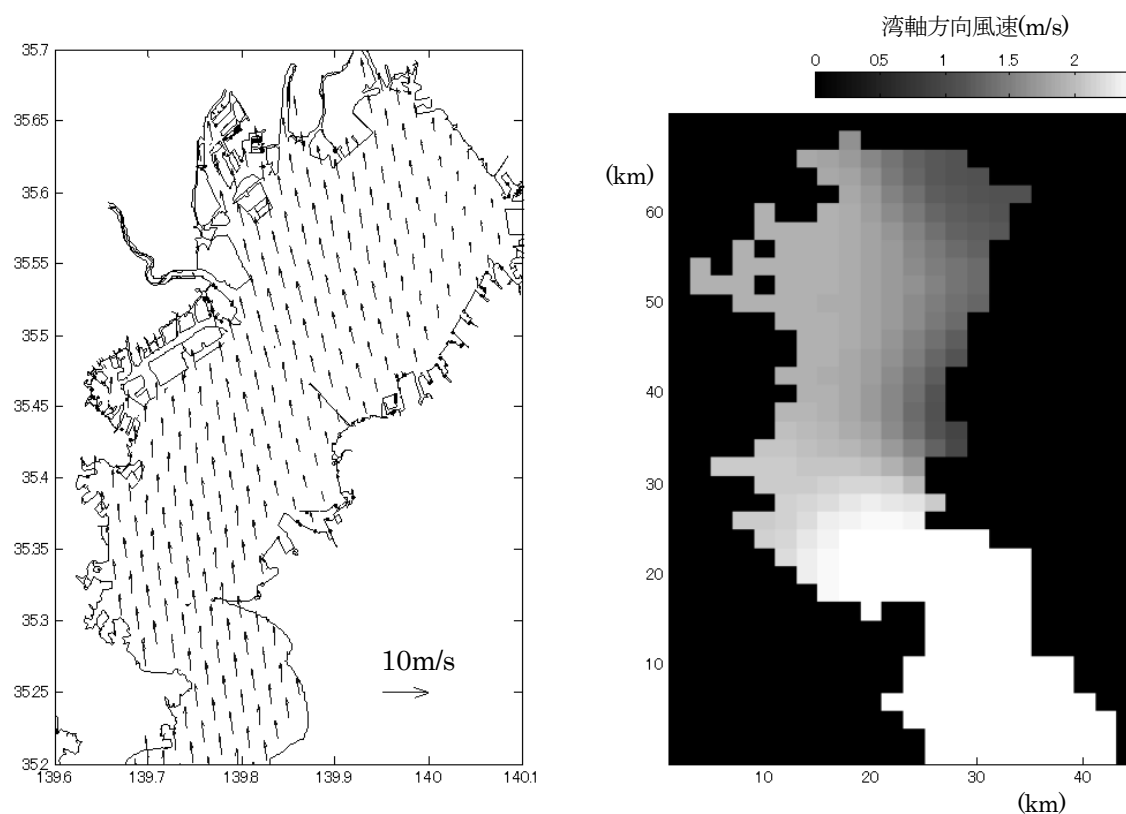


図-6.8 2008 年7月の月平均風速分布(左:ベクトル図, 右:湾軸方向風速の絶対値)

## (2) 水質の再現計算結果

図-6.9(a)～(f)は横浜技調の観測船による2008年のN1, N3, N5, C7, C9, S4地点の塩分、水温、クロロフィル *a*, DO の観測値と計算結果の比較である。図中太実線が表層、細実線が底層の計算結果であり、黒点と白点はそれぞれ表層と底層の観測値である。図には湾軸方向風速と淡水流入量をあわせて載せている。

以下の点で若干再現性が悪いものの、その他はおおむね観測結果を再現している。

- ・冬期の水温が観測値よりも表層、底層ともに高めである。
- ・冬期の底層 DO が観測値よりも全般に低めである。
- ・湾奥の N1, N3, N5 では夏期の底層 DO が観測値よりも高めである。一方、湾口 S4 地点の DO は低めだった。

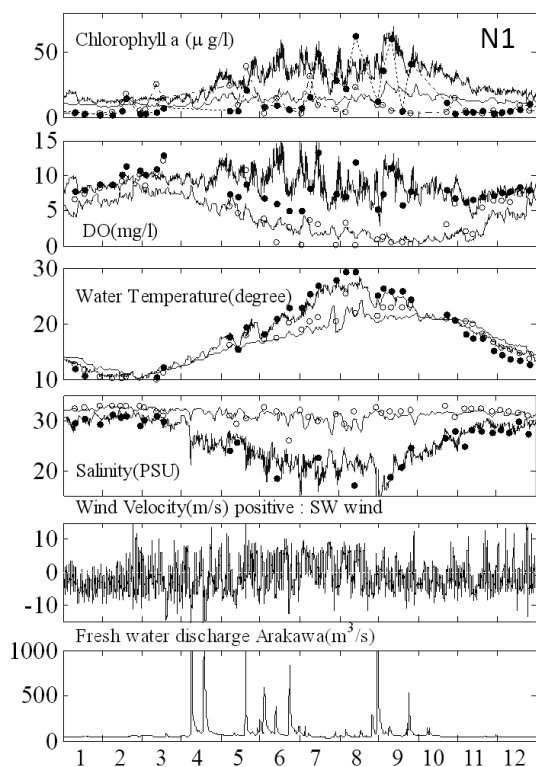


図-6.9(a) N1 地点の水質の再現結果

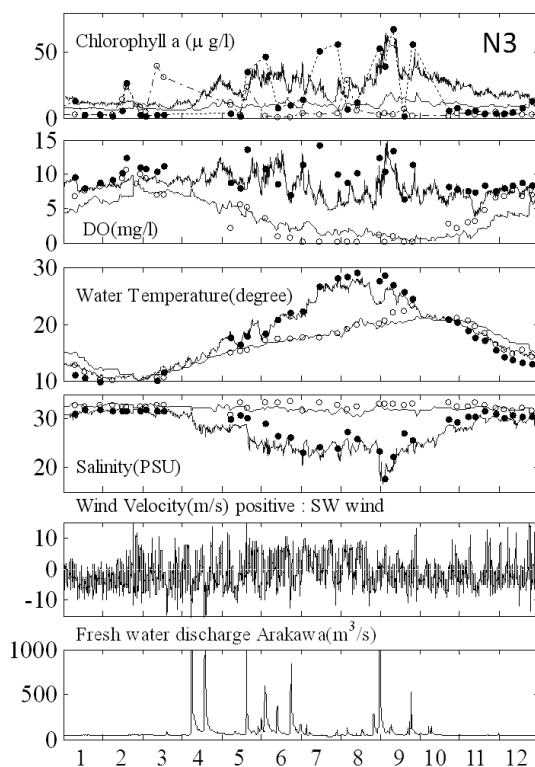


図-6.9(b) N3 地点の水質の再現結果



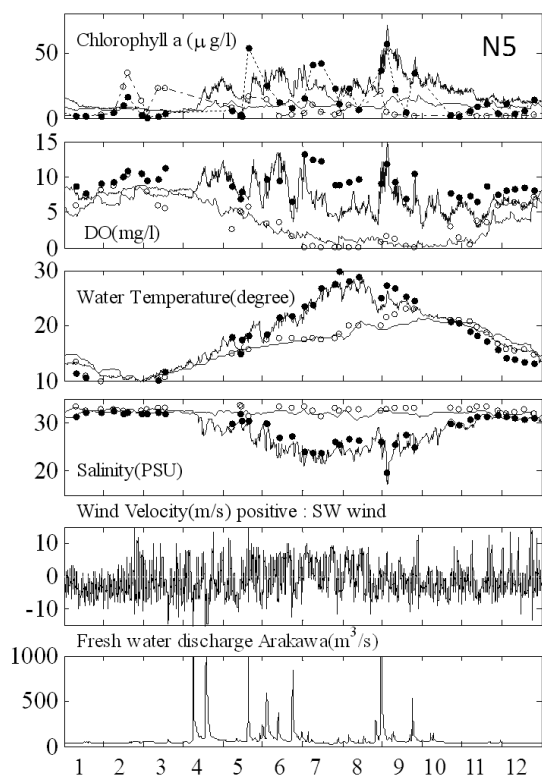


図-6.9(c) N5 地点の水質の再現結果

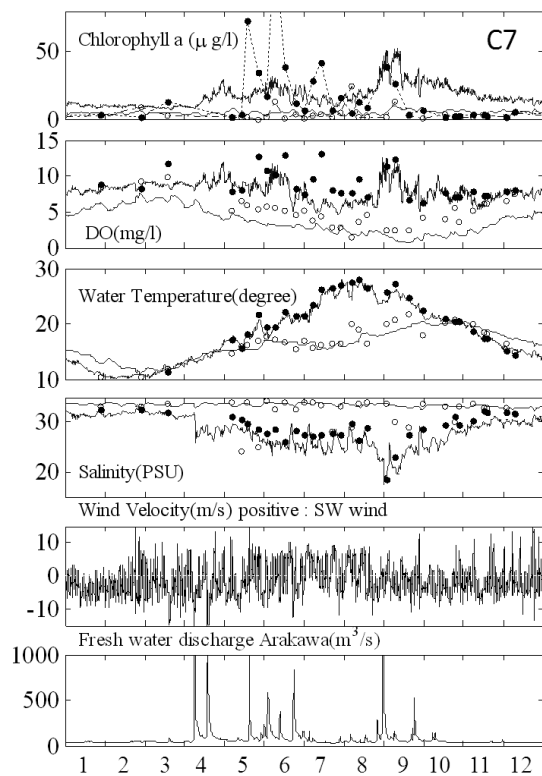


図-6.9(d) C7 地点の水質の再現結果

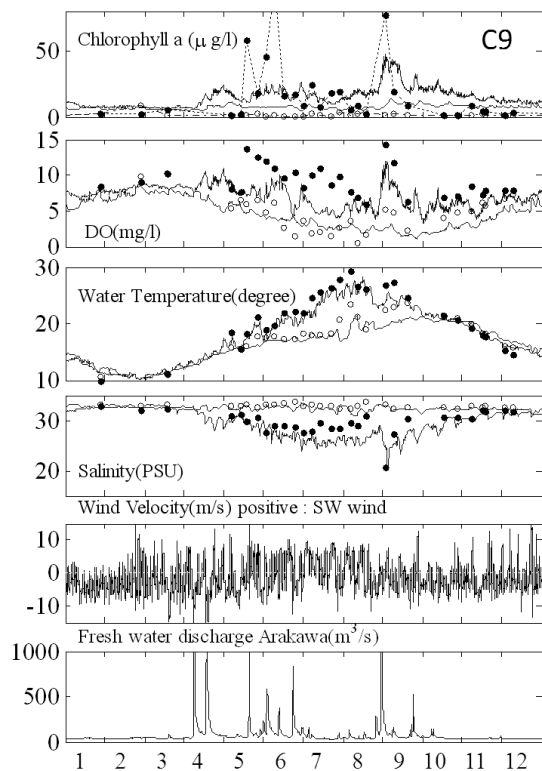


図-6.9(e) C9 地点の水質の再現結果

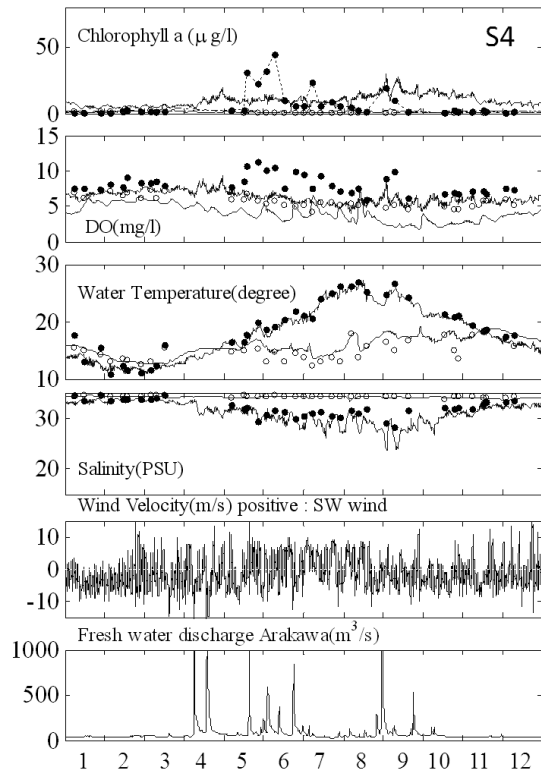


図-6.9(f) S4 地点の水質の再現結果

#### 6.2.4 栄養塩の収支について

図-6.10 は湾口での物質の月平均流入量と流出量であり、プラスが流入、マイナスが流出である。図中、PHY,SQN,SQP は植物プランクトン中の炭素、窒素、リンの量であり、植物プランクトンとして計算した珪藻、渦鞭毛藻、ANF、シアノバクテリアの総量である。それぞれ、易分解、準易分解、難分解に分けて計算している。ZOO は動物プランクトン、POC,PON,POP は懸濁態有機物の炭素、窒素、リン、DOC,DON,DOP は溶存態有機物の炭素、窒素、リンである。BAC は好気性細菌の炭素量、PZ1、PZ2 は原生動物であり、それぞれ繊毛虫、HNF である。そのほか、無機態の栄養塩として、NH<sub>4</sub>、NO<sub>2</sub>,NO<sub>3</sub>、PO<sub>4</sub> はそれぞれアンモニア、亜硝酸、硝酸、リン酸の窒素、リン量を定義している。DO は溶存酸素の酸素量、T、S は水温、塩分である。

植物プランクトンの PHY,SQN,SQP は、4～6 月と 9～10 月に易分解成分の流出量が多く、4～6 月は活発な一次生産で湾内に増えたものが、湾口から流出しているものと考えられる。また、南風の連吹にともなう湾表層流速の減少のため、夏季 7～8 月の流出量が小さくなっている。動物プランクトンは 8 月～12 月に全般に流出量が大きく、植物プランクトンと傾向が異なっている。POC,PON,POP,DOC,DON,DOP は流入流出量が同程度である。易分解の流出量が他の量よりも小さい。

図-6.11 は図-6.10 の計算結果から湾口での物質の月平均の収支を見たものである。プラスが流入、マイナスが流出である。植物プランクトンは年間通して流出傾向にあり、4～6 月と 9～10 月の PHY1(珪藻)の流出量が多く、8～11 月にかけては PHY2(渦鞭毛藻)、PHY3(シアノバクテリア)の流出もみられる。動物プランクトン ZOO も年間通して流出している。懸濁態有機物(POC,PON,POP)は難分解のものを除いて流出する傾向にあり、特に易分解のものの流出量が多く、PHY と同様に春と秋に流出量が多い。一次生産の結果、湾内で増殖したものが湾口から流出しているものと考えられる。一方、溶存態有機物炭素(DOC)の易分解成分は逆に流入傾向にあり、湾口から流入する成分が一次生産で消費されているのではないかと推定される。また、アンモニア(NH<sub>4</sub>)は冬季に流入傾向で、硝酸(NO<sub>3</sub>)は年間とおして流出傾向にある。リン酸(PO<sub>4</sub>)は 1～6 月にかけて流入、7～11 月にかけて流出する傾向にある。溶存酸素(DO)は全般に流出傾向にあり、湾内の一次生産で増加したものが流出しているものと考えられる。ただし、図-6.9(f)に見られるように湾口での DO の再現性が悪いことから、今後精度を高める必要がある。

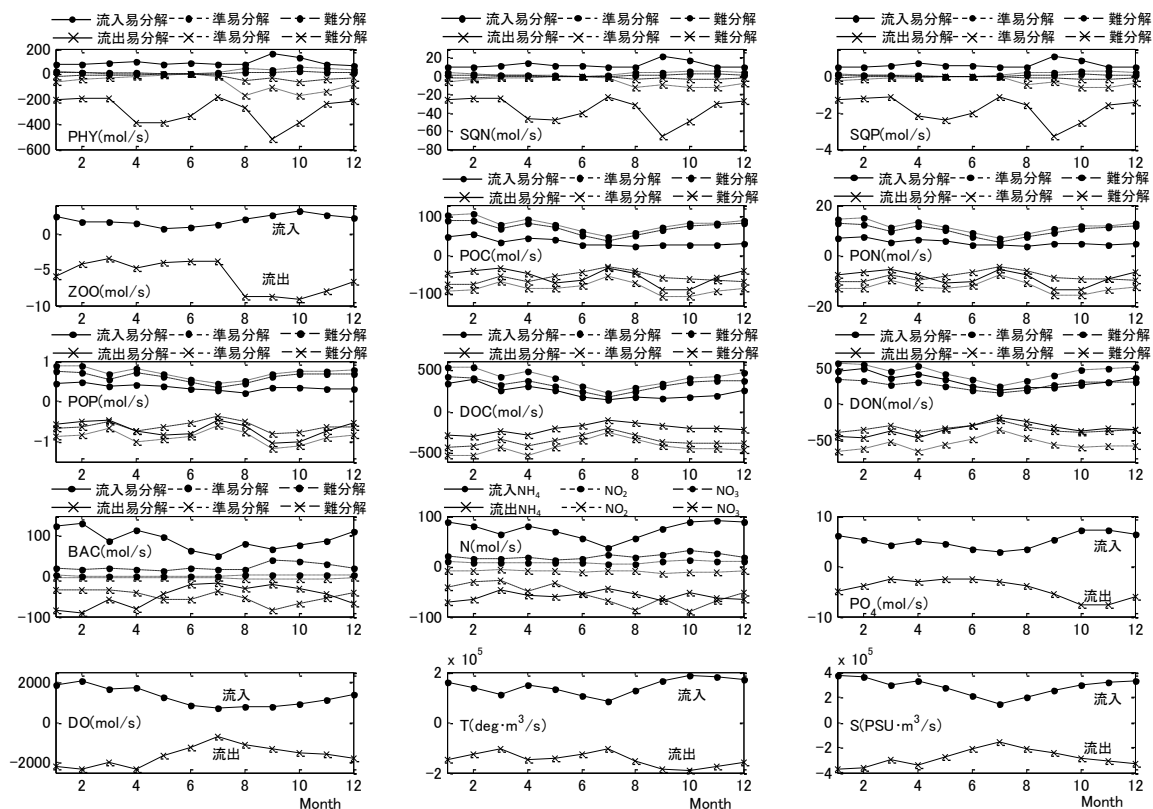


図-6.10 湾口での物質の月平均流入量と流出量

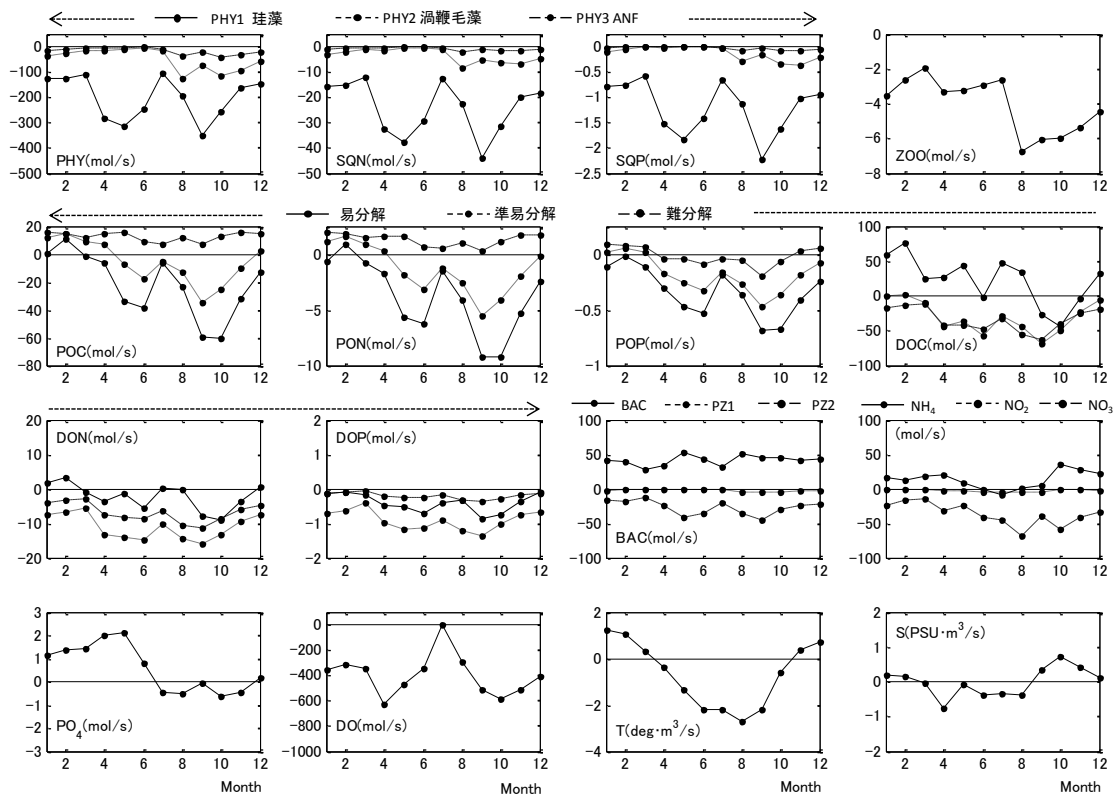


図-6.11 湾口での物質の月平均收支

図-6.12 は陸域からの負荷量と湾口での収支、およびそれらの合計値をともに示したものである。  $LC_{FD}$ ,  $LN_{FD}$ ,  $LP_{FD}$  はそれぞれ陸域からの炭素、窒素、リンの負荷量 (Load),  $Q_{out}$ ,  $QC_{out}$ ,  $QN_{out}$ ,  $QP_{out}$  はそれぞれ湾口での海水の体積、全炭素 TC, 全窒素 TN, 全リン TP の収支であり、プラスが流入、マイナスが流出を示している。  $L_{FD}$  と  $Q_{out}$  の和が正だと湾内に栄養塩が蓄積し、負だと湾外へ流出することを意味する。なお、全炭素 TC, 全窒素 TN, 全リン TP は植物プランクトン PHY, SQN, SQP, 動物プランクトン ZOO, 原生動物 PZ, 好気性細菌 BAC, 懸濁態と溶存態の有機炭素, 有機窒素, 有機リン (POC, PON, POP, DOC, DON, DOP), 無機態の窒素とリン ( $NH_4$ ,  $NO_2$ ,  $NO_3$ ,  $PO_4$ ) の和である。

全炭素 TC は 4 月～9 月にかけて陸域からの負荷  $LC_{FD}$  と湾外への流出  $QC_{out}$  ともに大きい。それらの和は 9～12 月にかけて負となり、湾外へ流出する量が多い。次に、TN と TP は陸域からの負荷量が湾口での流出量よりも全般に大きく、特に 4 月～9 月にかけての流入量が多い。

東京湾への蓄積量という観点からすると、TC に関しては一次生産にともなう二酸化炭素の固定があること、また、TN に関しては脱窒があるため、その量を加味して考慮しなければならない。TP については大気とのやりとりがないため、 $L$  と  $Q$  の和で算定でき、湾への蓄積量は年平均で 1 日あたり約 15t と推定される。

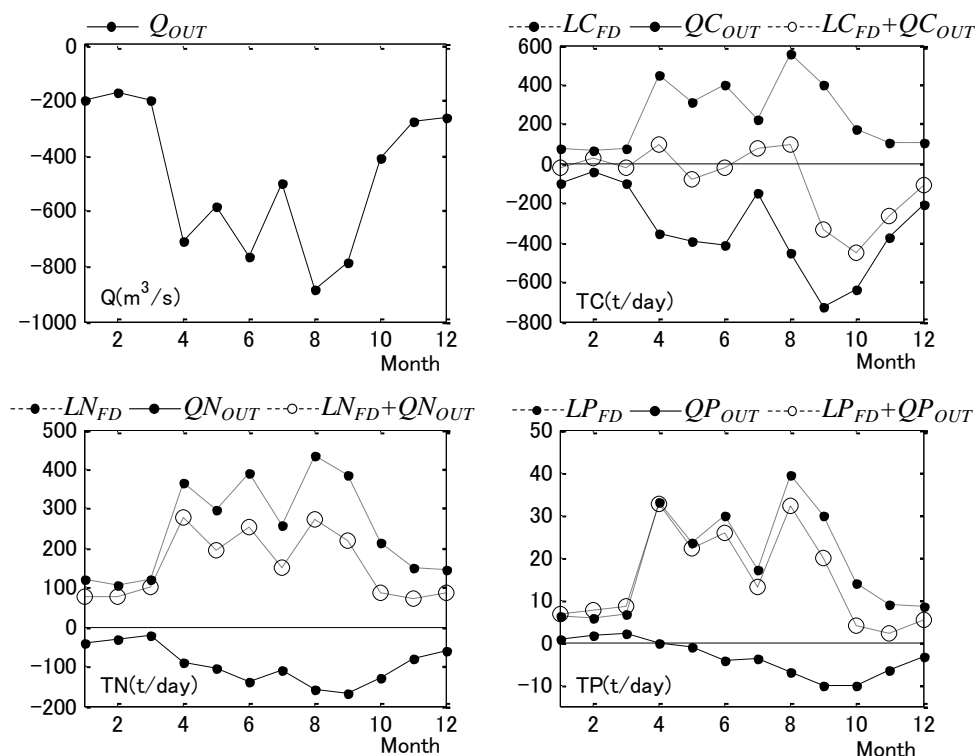


図-6.12 陸域からの負荷量  $L$  と湾口での流出量  $Q_{out}$  およびその差 ( $L+Q_{out}$ )

$Q_{out}$ : 湾口での流出流量,  $LC_{FD}$ : TC の流入量,  $LN_{FD}$ : TN の流入量,  $LP_{FD}$ : TP の流入量,  
 $QC_{out}$ : 湾口での TC の流出量,  $QN_{out}$ : 湾口での TN の流出量,  $QP_{out}$ : 湾口での TP の流出量

## 6.3 淡水流入と風を変化させた場合の貧酸素水塊と栄養塩収支の応答

### 6.3.1 計算条件

淡水流入や風が東京湾の貧酸素水塊や栄養塩の収支にどのように影響するのかを調べることを目的として、ここでは、**6.2 節**の再現計算の条件のうち、風と淡水流入量を変化させることで、夏季の貧酸素水塊と栄養塩の収支の応答を調べることにした。具体的には 7 月の荒川の淡水流入量と風の強さを変化させて、応答を調べることにし、**表-6.6** に示す 3 ケースを実施した。Case0 は **6.2 節**で実施した再現計算である。

表-6.6 応答計算の計算条件

Case0	基本ケース( <b>6.2 節</b> の再現計算)
Case1	7 月の荒川の淡水流入量を $40\text{m}^3/\text{s}$ 増加させた
Case2	Case2 の荒川の栄養塩濃度を総負荷量が Case0 と同量となるように設定
Case3	7 月の湾軸方向風速を $0.1\text{m/s}$ 増加させた(南西風を強くした)

### 6.3.2 貧酸素水塊の応答

#### (1) 荒川の淡水流入量を増加させた場合 (Case1)

**図-6.13** は荒川の淡水流入量を 7 月の 1 ヶ月間  $40\text{m}^3/\text{s}$  増加させた場合の表層と底層の塩分、クロロフィル *a*、DO の基本ケースからの差分であり、7 月の月平均である。なお、過去 30 年の月平均淡水流入量の標準偏差は約  $50\text{m}^3/\text{s}$  である。

低塩分水塊が時計回り循環にそって移動し、湾の北岸の表層塩分が低下し、クロロフィル *a* と DO は増加した。また、底層 DO は全般に低下し、特に表層で低塩分化した場所での低下量が大きかった。なお、浦安から幕張周辺の岸に近い場所の底層では DO が高くなっているが、これは水深が浅く表層の水質と似た性質を持つためであり、一次生産の増加で DO が高くなっている。

**図-6.14** はその後、淡水流入の増加をやめた後の 8 月の月平均である。表層の低塩分水塊は時計回り循環にそって湾の東側へ移動し、底層 DO の低下箇所もそれにともなって東側へ移動した。底層 DO の低下量は 7 月よりも強くなり、月平均の最大で  $0.27\text{mg/l}$  の低下となった。7 月に与えた淡水流入の増加による湾内の水質の変化は最終的に 9 月いっぱい続いた。

このように湾奥で淡水流入が増加すると、時計回り循環によって低塩分水塊が湾奥に拡がり、密度成層の強化と栄養塩の増加によって一次生産が増加し、底層 DO の低下に結びつくことが分かった。

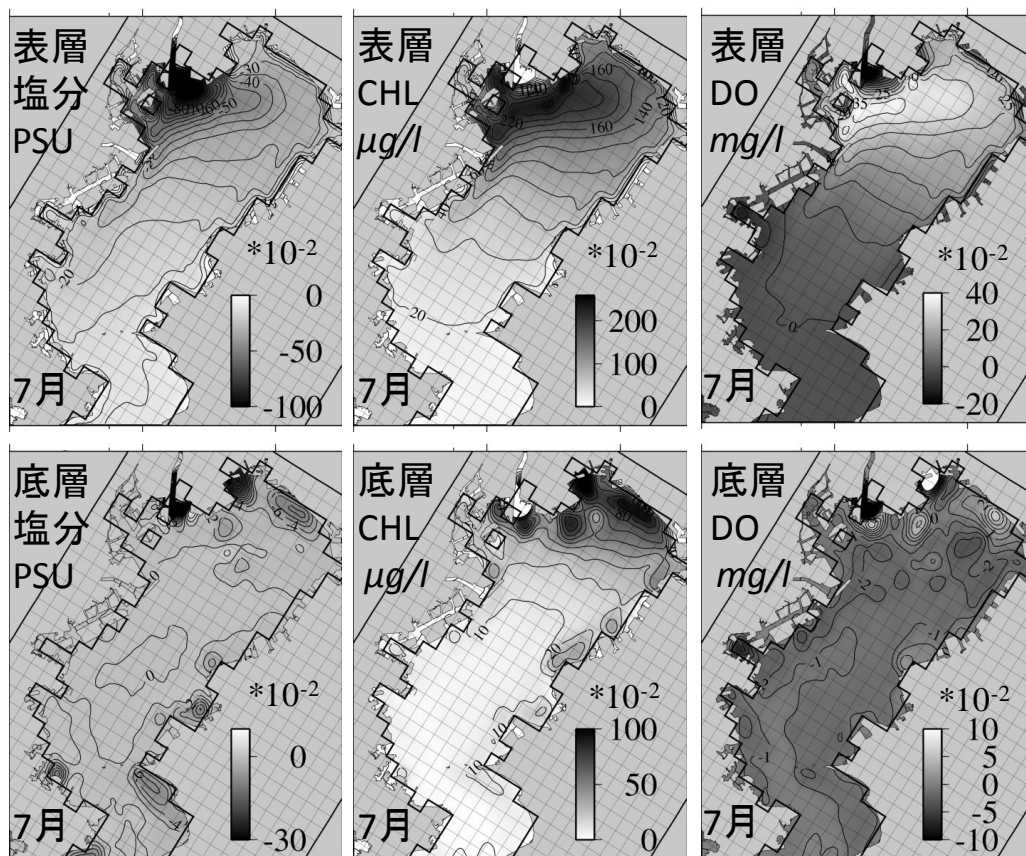


図-6.13 7月の淡水流入量を増加させた場合の7月の水質の変化

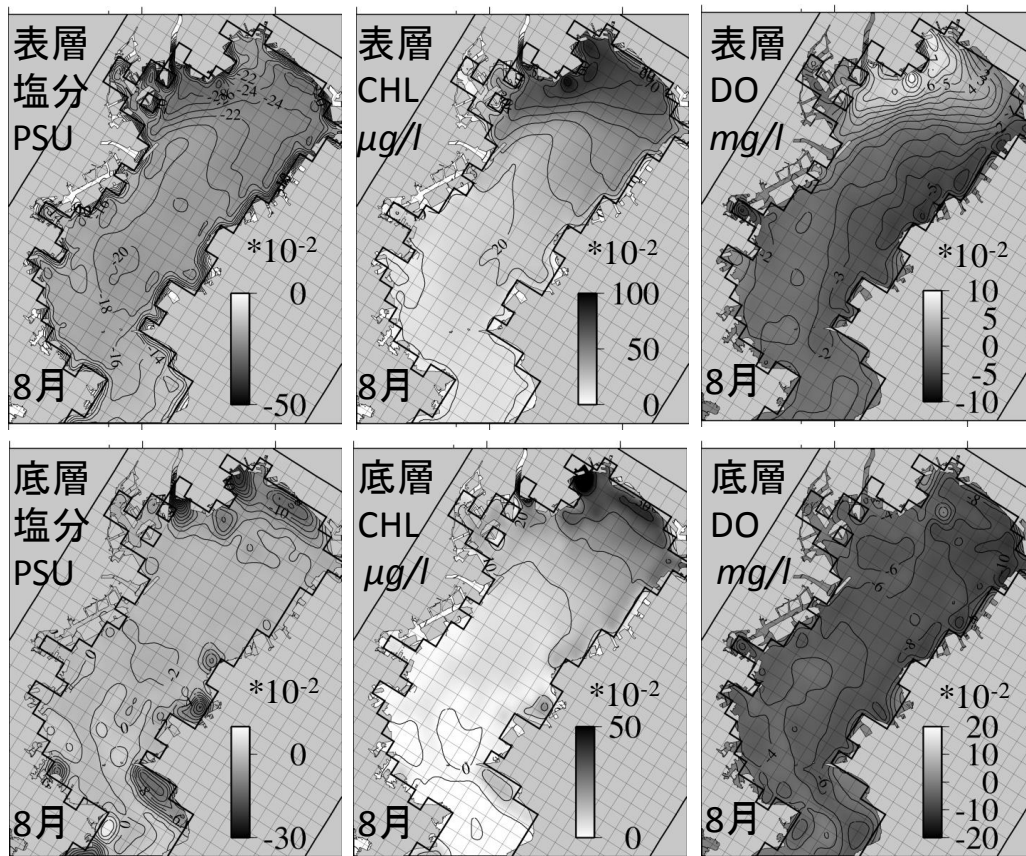


図-6.14 7月の淡水流入量を増加させた場合 Case1 の8月の水質の変化

(2) 流量のみを増加させた場合 (Case2)

(1)のケースでは、荒川の栄養塩濃度を基本ケースと同じとしたため、底層 DO の低下が栄養塩負荷量の増加によるものか、密度成層の強化によるものかが明確ではない。そこで式 (6.8)のように Case0 と栄養塩負荷量が同じになるようにして流量を  $40\text{m}^3/\text{s}$  増加させた。

$$C' = Q * C / (Q + 40) \quad (6.8)$$

ここで、 $C$ は基本ケースの濃度、 $C'$ はトータルの栄養塩負荷が基本ケースと同じようになるように算定した栄養塩濃度、 $Q$ は基本ケースの荒川の流量である。

図-6.15 はこのときの表層と底層の塩分、クロロフィル  $a$ , DO の基本ケースからの差分である。底層の塩分低下量は Case1 と同じである。表層のクロロフィル  $a$  と DO は増加しているが、その増加量は Case1 より小さい。一方、7月の底層 DO の低下量は Case1 ほどではないものの、8月の低下量は同程度だった。このように時計回り循環が卓越する時季の淡水流入の増加は、湾奥の密度成層を強化させ、底層 DO を低下させることが分かった。なお、8月は7月の荒川からの栄養塩の流入量が少ないため、表層の一次生産と DO が基本ケースよりも低下した。沿岸の浅い場所の底層 DO が低下しているのは、Case0 よりも一次生産が少なくなっているためであり、その影響は富津岬周辺にまで及んでいる。

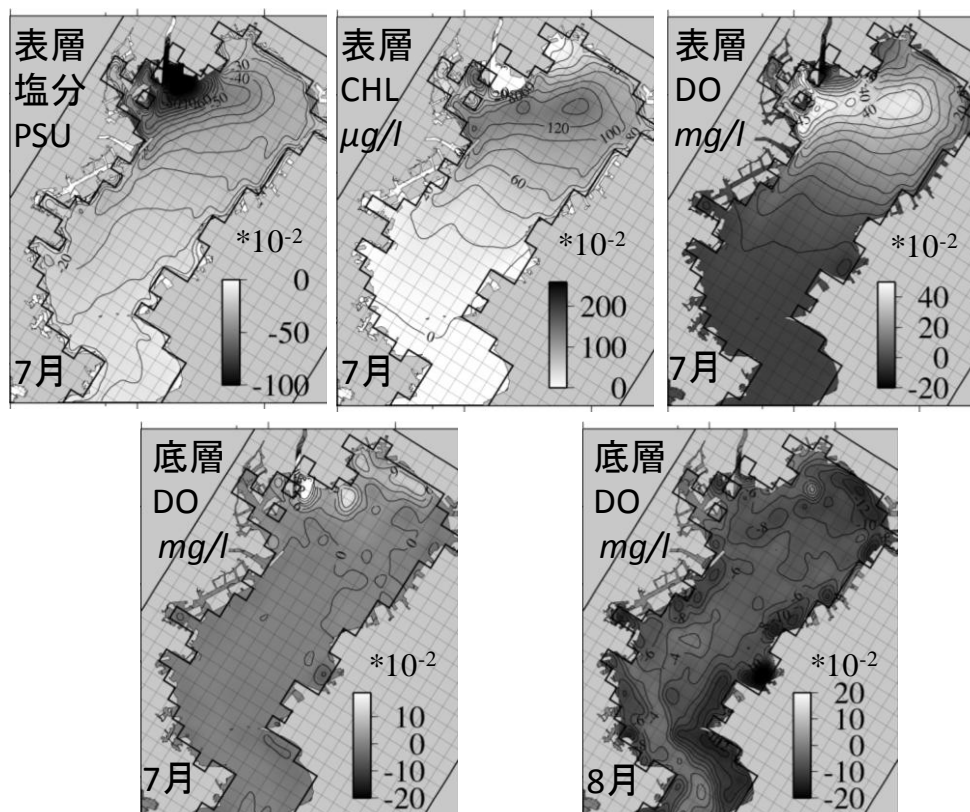


図-6.15 7月の淡水流入量のみを増やした場合 Case2

### (3) 南西風を強くした場合 (Case3)

次に、基本ケースの風の空間分布に対して7月の1ヶ月間、南西風成分を湾全体に一様に0.1m/s 増加させて計算した。なお、過去15年の風の標準偏差は1.5m/s である。

図-6.16 はこのときの表層と底層の塩分、クロロフィル *a*, DO の Case0 からの差分である。

Nakayama et al.(2010)が指摘するように、南西風が強くなると表層と底層の海水が混合し、7月の塩分は表層で高く底層で低くなった。特に湾奥底層は低塩分水塊が南西風によって押し込まれ、塩分低下量が多い。底層 DO はこのような混合と密度成層の縮小により増加した。

しかし、8月(図-6.16)になるとこの関係は逆転し、混合で低塩・低密度となった底層に、高塩・高密度水塊が進入して成層が発達しやすくなり、DO が基本ケースより低下するという結果となった。この原因は、4～5章で見たように南西風が強まることで海水交換が小さくなり、有機物や栄養塩が基本ケースより湾内に滞留したためだと考えられる。滞留した有機物は8月になって底層で分解されるため、8月の底層 DO が基本ケースよりも低下することになる。

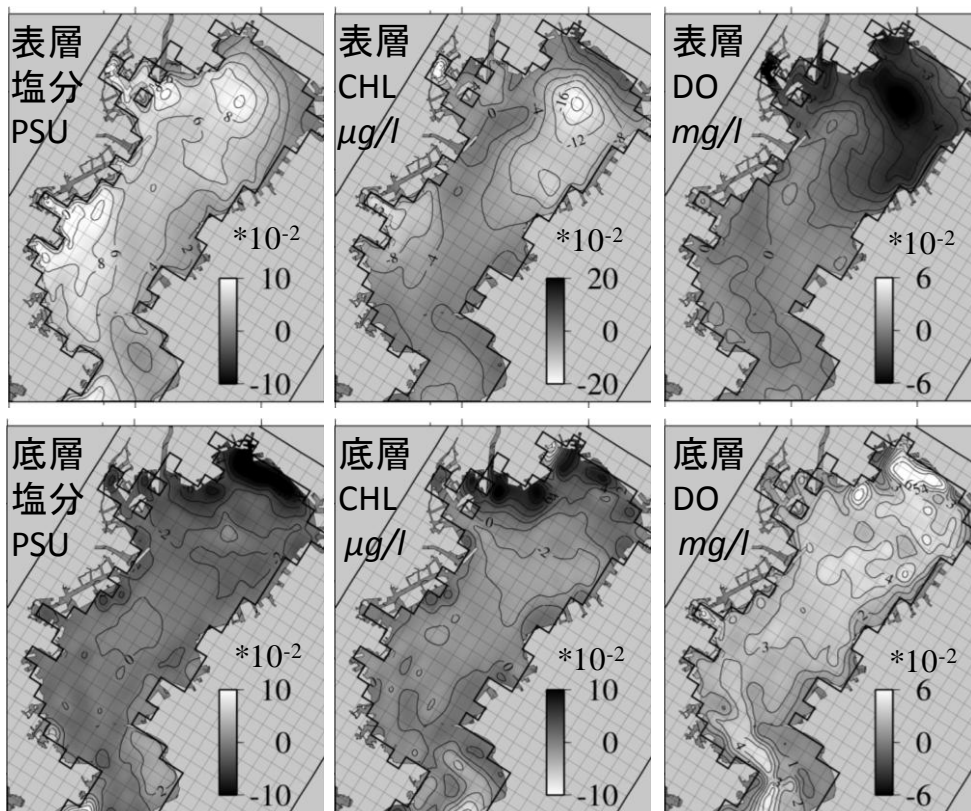


図-6.16 7月の南西風を大きくした場合の7月の水質の変化



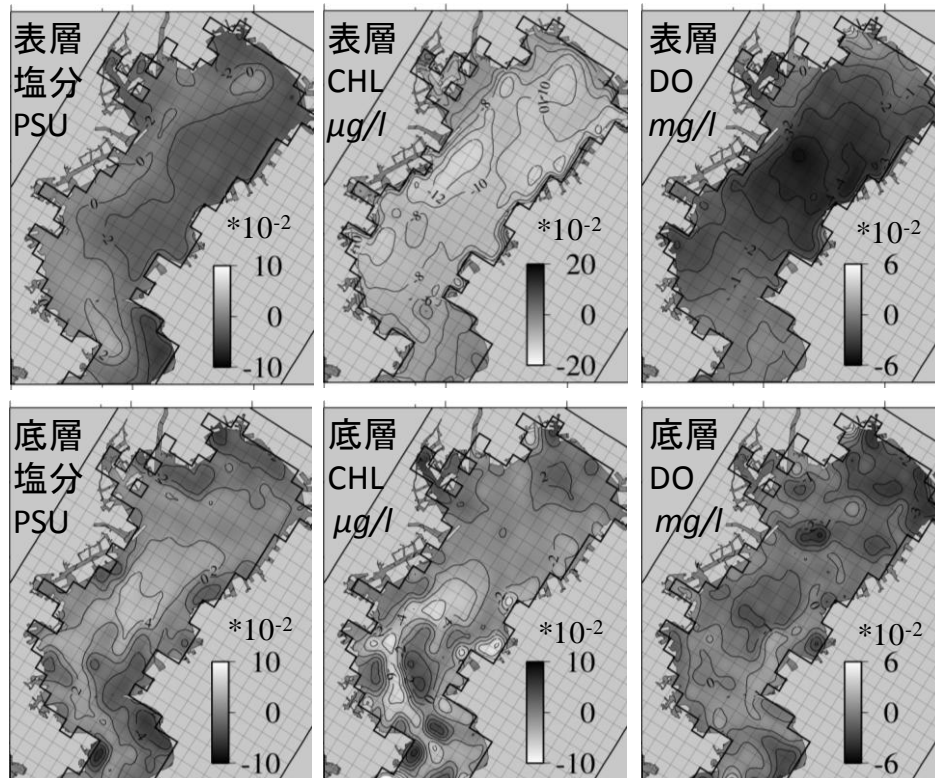


図-6.17 7月の南西風を大きくした場合の8月の水質の変化

### 6.3.3 湾口での栄養塩収支の応答

6.3.2(3)では7月の南西風が増加すると、一時的には底層のDOが増加するものの、海水交換が悪くなるため有機物や栄養塩が湾内に滞留し、その後、南西風が弱まると滞留していた有機物の分解によって貧酸素が強まる可能性がある。このように湾口での栄養塩の収支が湾内の底層DOに与えるものと考えられることから、ここではCase1～Case3について湾口での栄養塩収支の応答を調べる。

図-6.18 は基本ケース(Case0)の湾口での全炭素 TC、全窒素 TN、全リン TP の収支と、Case1～Case3 のCase0からの差分  $\Delta TC$ ,  $\Delta TN$ ,  $\Delta TP$  である。差分値はマイナスだとCase0よりも流出、プラスだと流入することを示している。なお、図(a)～(c)中にはCase0のほか、比較のためCase1の結果もともに示している。

荒川の流量を増加させた場合(Case1)は、栄養塩の流入負荷も増加するため、7月から全般に流出量が多くなり、そのピークは8月であり、影響は12月まで続いていることが分かる。

一方、Case0と流入負荷量を同じにして淡水流入量のみを増加させた場合(Case2)には、栄養塩負荷量が同じにもかかわらず海水交換量が多くなるため、流出量が小さくなる。そのため、7月以降  $\Delta TC$ ,  $\Delta TN$ ,  $\Delta TP$  は増加、すなわちCase0よりも湾内から流出する量が減少している。最後にCase3の場合はCase0よりも流出量が小さくなっており、7月の南西風の増加によって海水交換と栄養塩の流出量が小さくなることを示している。

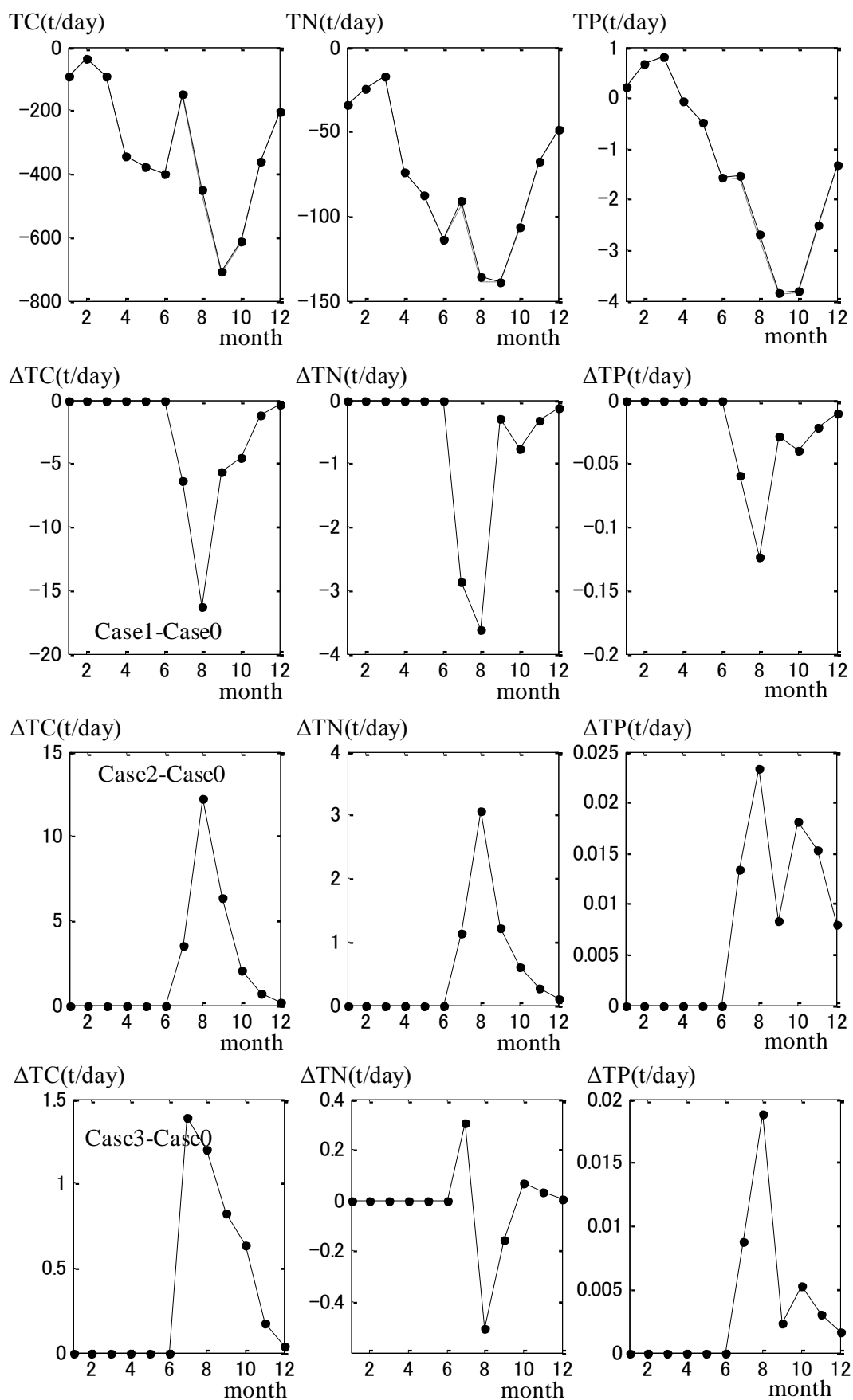


図-6.18 湾口での TC,TN,TP の流出量と Case1～Case3 の Case0 からの差分

## 6.4 考 察

前節までの結果から夏季に淡水流入量が増加すると、時計回り循環流の影響で淡水は湾奥の千葉側表層に広がり、密度成層を発達させて底層 DO を低下させることが明らかになった。一方、夏季に南西風が強まると湾奥底層の DO は一時的に上昇するものの、海水交換が低下するなどして、最終的に密度成層の強化と底層 DO の低下に至ることが分かった。

この結果を検証するために 4 章で調べた千葉灯標の観測結果を図-6.19 のように風の特徴別に再整理した。図中の観測データは 2004～2009 年の 6 月～9 月の月平均の表層塩分、表層と底層の塩分差(密度成層の強弱を示す量)、底層 DO であり、淡水流入量に対する変化を示したものである。白丸と黒丸はそれぞれ羽田の月平均の風向が南よりと北よりの場合を示している。淡水流入の増加にともなって表層塩分、密度成層、底層 DO はそれぞれ低下、強化、悪化しており、その傾向は平均風速が南よりの風(白丸)の時により顕著であることが分かる。このことは夏季の淡水流入と南よりの風が湾奥底層の DO を低下させるという本論文の計算結果を裏付けるものである。

前述したように近年の都市化によって淡水流入と南よりの風は増加傾向にあること(岡田ら, 2007)が分かっているが、近年の風の傾向は明確ではない。図-3.50 に示した羽田アメダスの 1994～2010 年のデータを見ると特に変化が見られないが、羽田空港が近年沖合に拡張してきたことを考えると、たとえ南よりの風が増加したとしてもその変化をとらえることができない可能性がある。そこで、東京湾の沿岸に位置する新木場(アメダス)の南北風の経年変化を調べたのが図-6.20 である。1980 年台から徐々に夏季の南風が増加傾向にあり、3 月は北風が減少している。この現象は風速計周辺の局所的な土地の利用形態の変化による可能性もあ

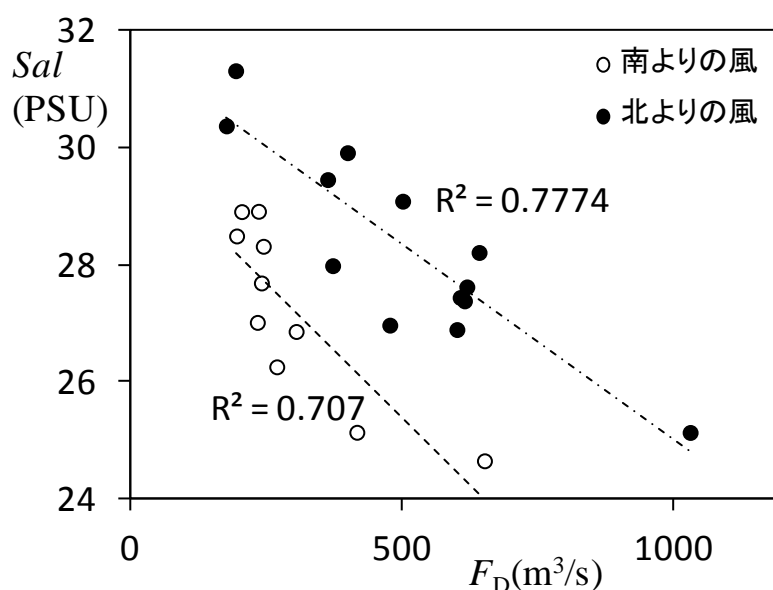


図-6.19(a) 淡水流入と千葉灯標の表層塩分(2004～2009 年の 6～9 月の月平均)

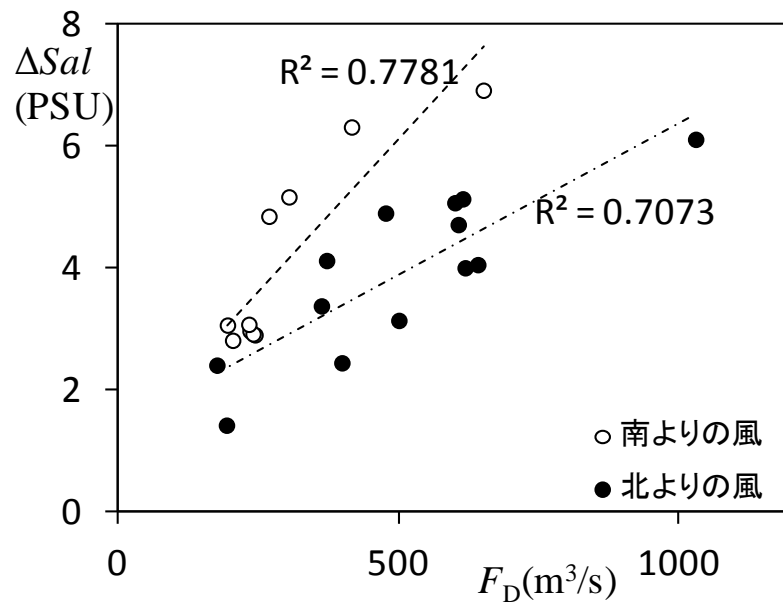


図-6.19(b) 淡水流入と表層と底層の塩分差(密度成層を表す量)  
(2004～2009 年の 6～9 月の月平均)

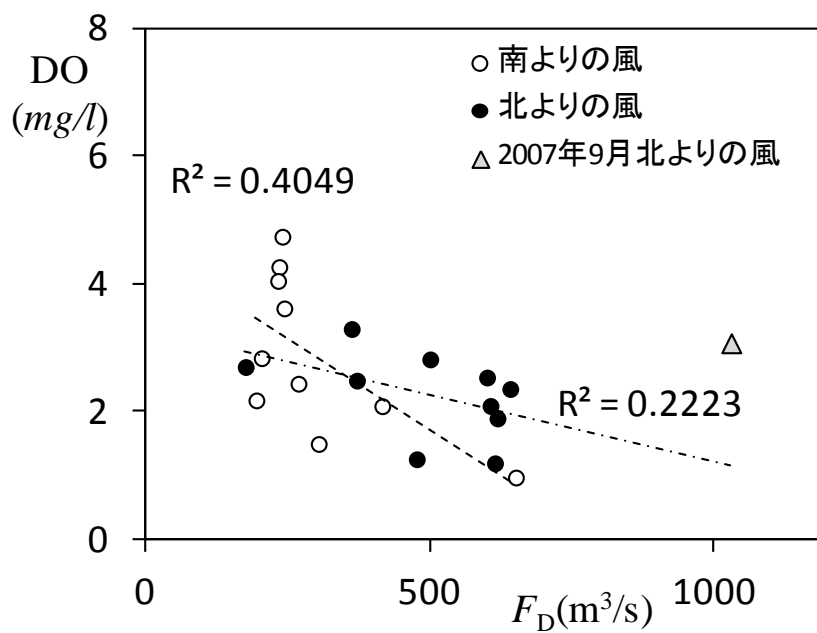


図-6.19(c) 淡水流入と底層 DO (2004～2009 年の 6～9 月の月平均)

るため今後さらに調査が必要ではあるものの、東京湾における南風が増加していることが分かる。都市のヒートアイランド現象は海風を強めることを考慮すると、近年の都市化が東京湾の南風を強めている可能性がある。

このように近年の都市化によって淡水流入と南よりの風は増加傾向にあり、いずれも夏季の東京湾底層の環境を悪化させている可能性が高いことが明らかとなった。

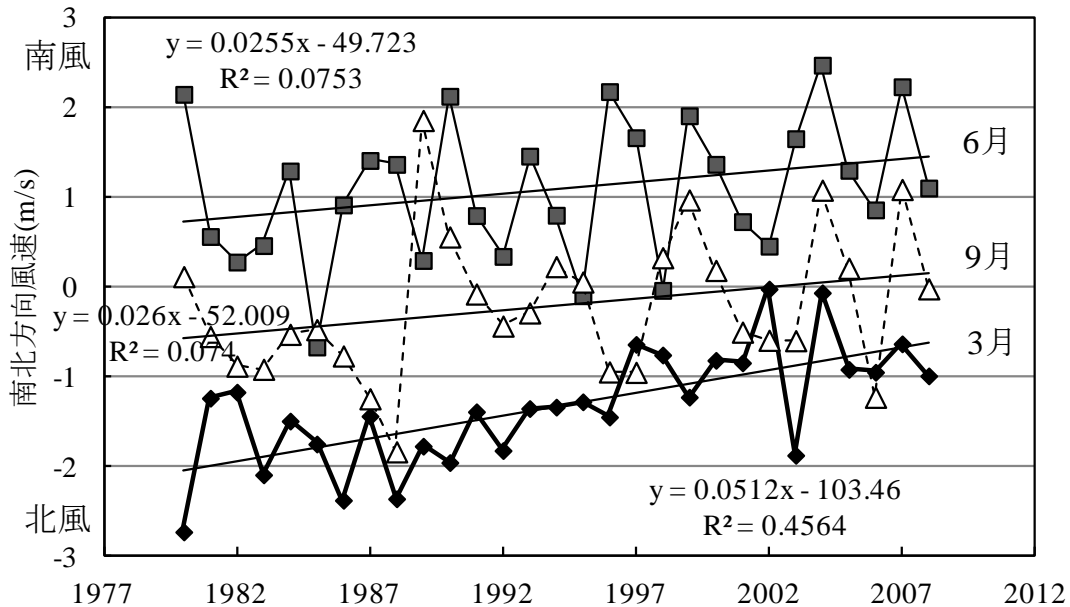


図-6.19 新木場（アメダス）の南北風の経年変化

## 6.5 6章のまとめ

6章の結果をまとめると、以下の通りである。

- 1) 生態系モデルを用いて東京湾の溶存酸素やクロロフィル *a* などの水質を再現した。再現ケースを基本ケースとして夏季の貧酸素水塊に及ぼす淡水流入量と風の影響を調べた。その結果、夏季に淡水流入量が増加すると時計回り循環流の影響で淡水は湾奥の千葉側表層に広がり、湾奥の密度成層を発達させて底層 DO を低下させることが明らかになった。一方、夏季の南西風を強めると湾奥底層の DO は一時的に上昇するものの、海水交換が低下するなどして、最終的に密度成層の強化と底層 DO の低下に至ることが分かった。
- 2) 千葉灯標の観測結果を調べたところ、淡水流入の増加にともなって夏季 6～8 月の表層塩分、密度成層、底層 DO はそれぞれ低下、強化、悪化し、その傾向は平均風速が南よりの風の時により顕著であった。この傾向は本章の計算結果を裏付けるものである。

新木場(アメダス)の南北風の経年変化を調べたところ、夏季の南風は強くなり、冬季の北風は弱くなる傾向が見られた。

近年の都市化によって淡水流入と南よりの風は増加傾向にあり、いずれも夏季の東京湾底層の環境を悪化させている可能性が高いことが明らかとなった。

## 7章 結 論

本研究では、東京湾の海水交換と貧酸素化に及ぼす淡水流入と風の影響について、東京湾口のフェリーによる長期連続観測と数値シミュレーションの結果に基づいて検討した。以下に各章ごとの結論を示す。

### 第1章

東京湾の海水交換と貧酸素化に及ぼす淡水流入と風の影響に関する研究の背景を述べ、本研究の目的を示した。

### 第2章

東京湾の海水交換に関する既往の研究をとりまとめた。

- 1) ボックスモデルにより湾内の塩分水温データから海水交換日数を算定することが可能であり、これまでに宇野木(1998)、岡田ら(2007)などが東京湾の海水交換を調べてきた。宇野木(1998)は 1947～74 年のデータから夏季が 0.8 ヶ月、冬季は 2.65 ヶ月であることを示し、最近では岡田ら(2007)が東京近郊の都市化にともなって淡水流入量が増加して海水交換日数が夏季 19 日、冬季 43 日と短くなっていることを示した。ただし、ボックスモデルだけでは吹送流による海水交換の効果を調べることは困難だった。
- 2) 淡水流入による重力循環と風による吹送流について、東京湾ではこれまでも数多くの研究が行われてきた(宇野木, 1998 など)。しかし、淡水流入と風それぞれの海水交換や湾内の流れに与える影響度は必ずしも明確ではなかった。その原因の一つはこれまで湾内の(断面・平面の)面的な流れを計測するのが困難だったからであり、たとえ計測できたにしても観測される流れが風による吹送流と淡水流入による密度流の重合したものであり、短期的な観測だけではそれらを分離できなかったためである。海水交換や流れに対する海水交換や湾内の流れの影響を調べるには、面的でかつ長期連続的な観測を実施し、淡水流入量や風と組み合わせた統計的な解析を行うことが望まれていた。
- 3) 東京湾の流動については、重力循環や吹送流循環に関する研究のほかに、外洋水の影響による冬季の熱塩フロント、秋季の中層貫入現象などが明らかにされてきた(Yanagi et al, 1989; 日向ら, 2001 など)。ただし観測例は限られており、それらの現象がボックスモデルで得られたような海水交換日数とどのように対応するのかは明確ではなく、より多くの観測が望まれていた。
- 4) フェリーなどの定期船舶を用いた表層水質の連続観測はこれまでも数多く行われてきた(木村, 1942; Harashima et al., 2006 など)。近年、超音波流向流速計 ADCP を船舶の船底に設置して、長期連続的に流れを測ることが可能となった。

### 第3章

- 1) 東京湾の海水交換の特性を明らかにするため、東京湾口の神奈川県久里浜港と千葉県金谷港を結ぶ東京湾フェリー株式会社所有のフェリー“かなや丸”に、ADCP と表層海水の分析装置を設置し、2003 年 12 月から長期連続的な観測を開始した。これにより海上交通が多く観測が困難だった東京湾口での流況・水質の観測が飛躍的に向上した。
- 2) 年平均残差流は、表層流出、中層流入、下層流出という 3 層構造であり、東京湾央の浅い水深に対応させると表層流出・下層流入であり、東京湾の重力循環の性質を示していた。また、この流速分布は毎年ほとんど変化がないことが明らかとなった。
- 3) 月平均海水交換量  $Q$  は秋季 9～10 月が最も大きく、最大の 10 月は  $12,000(\text{m}^3/\text{s})$  だった。ついで 4～6 月が大きく、逆に 1～3 月と 6～8 月の海水交換量が小さく、最小値は 1 月の  $6,200(\text{m}^3/\text{s})$  だった。これを海水交換日数  $\tau$  にすると、最も早い 10 月は約 18 日、最も遅い 1 月が 38 日だった。
- 4) これまで東京湾では夏季の海水交換日数が小さいと言われていた(宇野木, 1998; 岡田ら, 2007)が、本研究の詳細な観測結果により夏季 7～8 月の海水交換量が他の季節と比較して小さく極小値をとっていることが明らかとなった。
- 5) 冬季には 1～2 週間周期で黒潮系暖水(日向ら, 2000; 鈴木ら, 2006)が東京湾口に波及し、房総半島沿いに全層一様に進入して湾口にフロントを形成していた。このときの流速分布は三浦半島よりの海峡部で流入、房総半島よりの表層から流出するという重力循環や冬季の北寄りの風による吹送流循環とは逆の流況分布であった。冬季はこのような流れが 1～2 週間おきに繰り返されるため、月平均をとると通常に残差流構造と相殺し、月平均残差流と海水交換量が約 35% も小さくなっていることが明らかになった。
- 6) 夏季には強い南西風が連吹し、表層流入・中層流出・下層流入となる日が多かった。このような南西風による吹送流循環(上層流入・下層流出)の発達により、表層流出・下層流出という重力循環が弱められ、月平均の断面残差流を求めると海水の流入位置が浅くなるとともに海水交換量は約 30% 低下していることが明らかとなった。
- 7) HF レーダーによる湾表層流速の月平均残差流を調べたところ、春から秋にかけて毎月、湾奥に時計回り循環が発生していることが明らかになった。循環流の中心は緯度  $35.56^\circ$  の線上に発生し、その位置は南西風が強いほど千葉側に移動し、また南西風が強いほど循環流が大きくなることが明らかとなった。
- 8) 過去 15 年の羽田の月平均風速は、冬季 10 月～2 月は北寄りの風が卓越し月平均で  $2\text{m/s}$  以上だった。逆に夏季は南寄りの風が卓越し、特に 7～8 月は月平均で  $2\text{m/s}$  以上だった。また、過去 37 年の東京の気温と日射量はともに上昇傾向にあり、年平均でそれぞれ  $0.039^\circ\text{C}/\text{年}$ 、 $0.054\text{MJ}/\text{m}^2/\text{年}$  の増加が見られた。一方、過去 30 年の淡水流入は 9 月、8 月、10 月、7 月の順で夏～秋にかけて大きかった。

## 第4章

- 1) 海水交換と淡水流入量, 風を比較したところ, 月平均淡水流入  $100\text{m}^3/\text{s}$  よって  $480\text{m}^3/\text{s}$  の海水交換が発生し, 月平均の湾軸風速  $1\text{m/s}$  によって海水交換が  $900\text{m}^3/\text{s}$  変動することが分かった. 年平均淡水流入量  $424\text{m}^3/\text{s}$  に対して海水交換量は  $2035\text{m}^3/\text{s}$  発生する. 一方, 冬季(10~3月)の平均風速は北東風で  $2.5\text{m/s}$  であり, 海水交換量は  $2250\text{m}^3/\text{s}$  増加, 夏季平均(6~9月)の平均風速は南西風で  $1.9\text{m/s}$  であり, 海水交換量は  $1710\text{m}^3/\text{s}$  減少していることになる. 夏季の海水交換が小さいのは, 夏季に特徴的な南風によって重力循環と逆向きの吹送流循環が発達し, 相殺しあうためであることが分かった.
- 2) HF レーダーの海軸表層流速と海水交換量には強い相関があり, ともに風の影響が顕著なことが明らかになった. 特に夏季の南西風の影響は強く, 月平均で  $2.5\text{m/s}$  以上になると湾軸表層流速は重力循環(表層流出・下層流入)と逆向きになることが分かった.
- 3) 湾軸表層流速  $V_{\text{HF}}$  と湾軸方向風速  $W$  の間の相関は高く, 決定係数は  $0.8144$  だった. なお, 回帰直線の傾きは風速が  $1\text{m/s}$  増減すると流速が約  $3\text{cm/s}$  増減することを示しており, この値は大気と海洋の境界層が相似と仮定した場合に, 吹送流が風速の約  $3.5\%$  になるという解(柳, 1989)に近い値であった. また, 縦軸との接点は  $-7.8\text{cm/s}$  だった. この値は湾軸方向風速  $W$  が  $0$  の場合(風の影響が無いと考えられる場合)の湾軸表層流速を示しており, 主に重力循環によって表層水が  $7.8\text{cm/s}$  の速度で流出していることが分かった.
- 4) 重回帰分析を行ったところ, 海水交換量  $Q$  は湾軸方向風速  $W$  の2次式, 淡水流入量  $F_D$  の1次式, 気温  $T_a$  の3次式で最小 AIC をとった. その関数は以下の式で表された.
$$Q/1000 = -3.457 - 0.488 W + 0.160 W^2 + 0.0024 F_D + 1.719 T_a - 0.078 T_a^2 + 0.001 T_a^3$$
- 5) 千葉灯標での水質を調べたところ, 溶存酸素 DO は表層と底層の密度差  $\Delta\sigma_t$ , 塩分差  $\Delta S_H$  が増加するにつれて指数関数的に減少する傾向にあり, 密度成層が DO を低下させていることが分かった. また, 溶存酸素は気温と逆相関の関係にあり, 1ヶ月前の気温との相関が最も高かった.

## 第5章

- 1) 非静水圧3次元流動モデルを用いて, 2007年~2008年の再現計算を実施し, 塩分・水温および海水交換量の観測データと比較して, よい一致をみた.
- 2) 数値計算によって応答解析を行ったところ, 海水交換の応答には季節変化があり, 春と秋が大きく, 夏と冬は小さかった. 淡水流入の影響は台風と秋雨前線のため8月~10月が最も大きく, 風の影響は春と秋に最も大きかった.
- 3) 淡水流入量  $100\text{m}^3/\text{s}$ , 南西風の風速  $1\text{m/s}$ , 北東風の風速  $1\text{m/s}$ , 気温  $1^\circ\text{C}$  の上昇に対する海水交換量  $Q$  の変化は年平均で, それぞれ,  $715\text{m}^3/\text{s}$ ,  $-774\text{m}^3/\text{s}$ ,  $936\text{m}^3/\text{s}$ ,  $64\text{m}^3/\text{s}$  だった. 主要6河川の淡水流入量, 風速, 気温の年変動(標準偏差  $(1\sigma)$ ) に対する海水



交換の変化量を調べたところ、北東風、淡水流入量、南西風、気温の順に影響度が大きく、年平均でみるとそれぞれ、 $886\text{m}^3/\text{s}$ 、 $771\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $-667\text{m}^3/\text{s}$ 、 $406\text{m}^3/\text{s}$ 、 $64\text{m}^3/\text{s}$  だった。

- 4) 東京湾の海水交換に及ぼす風と淡水流入の影響度はこれまで未解明だったが、風と淡水流入の効果がほぼ同程度の海水交換をもたらしていることが分かった。

## 第6章

- 1) 生態系モデルを用いて東京湾の溶存酸素やクロロフィル *a* などの水質を再現した。これを基本ケースとして夏季の貧酸素水塊に及ぼす淡水流入量と風の影響を調べた。その結果、夏季に淡水流入量が増加すると時計回り循環流の影響で淡水は湾奥の千葉側表層に広がり、湾奥の密度成層を発達させて底層 DO を低下させることが明らかになった。一方、夏季の南西風を強めると湾奥底層の DO は一時的に上昇するものの、海水交換が低下するなどして最終的に密度成層の強化と底層 DO の低下に至ることが分かった。
- 2) 千葉灯標の観測結果を調べたところ淡水流入の増加にともなって夏季6～8月の表層塩分、密度成層、底層 DO はそれぞれ低下、強化、悪化し、その傾向は平均風速が南よりの風の時により顕著であった。この傾向は上述の計算結果を裏付けるものだった。

新木場(アメダス)の南北風の経年変化を調べたところ、夏季の南風は強くなり、冬季の北風は弱くなる傾向が見られた。

近年の都市化によって淡水流入と南よりの風は増加傾向にあり、いずれも夏季の東京湾底層の環境を悪化させている可能性が高いことが明らかとなった。

## 今後の展望

本論文ではフェリーによる流況観測や数値計算などにより淡水流入と風が東京湾の海水交換と貧酸素化に及ぼす影響を明らかにするとともに、数値計算を実施するなどして近年の淡水流入と南風の増加が東京湾の底層 DO に悪影響を与えている可能性を示した。このような物理化学過程を解き明かすことは東京湾の環境を引き続き保全し再生していく上でさらに必要になってくるものと考えられる。しかし、閉鎖性内湾の流れに及ぼす各種因子の物理的メカニズムにはさらに検討されるべき項目が多く残されている。例えば本論文では主に淡水流入と風を中心に述べたが、気温や日射、黒潮の影響などもより詳細に検討することが望まれる。また、近年の都市化にともなって南風が増加し、底層 DO を悪化させている可能性を示したが、東京湾における南風の増加については今後大気の数値シミュレーションなどとも組み合わせて証明していく必要がある。今後、このような研究の取り組みが伊勢湾、大阪湾など他の閉鎖性内湾においても今後広がっていくことが期待される。

# 参考文献

## 1 章

- 1) 松村剛・石丸隆・柳哲雄(2002): 東京湾における窒素とリンの収支, 海の研究, 11(6), pp.613-630.
- 2) 安藤晴夫・柏木宣久・二宮勝幸・小倉久子・山崎正夫(2003): 東京湾における水温の長期変動傾向について, 海の研究, 12(4), pp.407-413.
- 3) 八木宏・灘岡和夫・内山雄介・日向博文(2000): 長期連続観測に基づく東京湾・鹿島灘・霞ヶ浦の表層水温年間変動特性の比較解析, 土木学会論文集 No.656/II-52, pp.239-254.
- 4) 宇野木早苗(1998): 内湾の鉛直循環流量と河川流量の関係, 海の研究, Vol.7(5), pp.283-292.
- 5) 岡田知也・高尾敏幸・中山恵介・古川恵太(2007): 東京湾奥における淡水流入量および海水の滞留時間の長期変化, 土木学会論文集 B, Vol.63, No.1, pp.67-72.
- 6) 鯉渕幸生・佐々木淳・磯部雅彦(2001): 東京湾における窒素・リンに着目した物質循環機構, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp.1076-1080.
- 7) K. Nakayama, M. Sivapalan, C. Sato and K. Furukawa (2010): Stochastic characterization of the onset of and recovery from hypoxia in Tokyo Bay, Japan: Derived distribution analysis based on "strong wind" events, Water Resources Research, Vol. 46, W12532, 15 pp.

## 2 章

### 2.2 東京湾での海水交換に関する研究手法の分類

- 1) 松本輝寿・金子安雄・寺尾 健・川島 毅(1974): 海水交換に関する現地観測, 第 21 回海岸工学講演会論文集, pp.291-296.
- 2) 日向博文・灘岡和夫・田淵広嗣・吉岡健・古川恵太・八木宏(1999): 東京湾における成層期流況の動的変動過程, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp.451-455.
- 3) 日向博文・八木宏・吉岡健・灘岡和夫(2000): 黒潮系暖水波及時における冬季東京湾湾口部の流動構造と熱・物質フラックス, 土木学会論文集, No.656, II-52, pp.221-238.
- 4) 日々野忠志・野村宗弘・岡田知也・古川恵太(2000): 東京湾における密度構造の変化と流れ場—黒潮の流れと東京湾—, 港湾技術研究所報告, 第 39 巻第 1 号, pp.25-55.
- 5) 清水学・柳哲雄・野村宗弘・古川恵太(2001): 東京湾の大潮-小潮期における残差流変動, 海の研究, 10(5), 413-422, 2001.
- 6) Tetsuo Yanagi, Manabu Shimizu, Munehiro Nomura and Keita Furukawa (2003): Spring-neap tidal variations of residual flow in Tokyo Bay, Japan, Continental Shelf Research 23, pp.1087-1097.
- 7) Tetsuo Yanagi and Hirofumi Hinata (2004): Water exchange between Tokyo Bay and the Pacific Ocean during winter, Ocean Dynamics, Vol.54, pp.452-459.
- 8) 堀江毅・村上和男・亀山豊・入尾野幸雄(1977): 東京湾の海水交換に関する水理模型実験, 港湾技術研究所報告, 第 16 巻, 第 3 号, pp.69-99.
- 9) 堀江毅・村上和男・亀山豊・入尾野幸雄(1977): 水理模型実験による海水交換率の算定, 海岸工学講演会論文集, 第 24 回, pp.491-495.
- 10) Parker, D.S., P.Norris and A.W.Nelson (1972): Tidal exchange at Golden Gate, Proc. of ASCE, Vol. 98, NO. SA2, pp.305-323.
- 11) 宇野木早苗・岸野元彰(1977): 大局的に見た内湾の海水交換, 第 24 回海岸工学論文集, pp.486-490.
- 12) 宇野木早苗(1998): 内湾の鉛直循環流量と河川流量の関係, 海の研究, Vol.7, No.5, pp.283-292.
- 13) Yasuo Matsukawa and Katsuyuki Sasaki (1990): Nitrogen budget in Tokyo Bay with special reference to the low sedimentation to supply ratio, Journal of the Oceanographical Society of Japan, Vol.46, pp.44-54.
- 14) 松村剛・石丸隆・柳哲雄(2002): 東京湾における窒素とリンの収支, 海の研究, 11(6), pp.613-630.
- 15) 岡田知也・高尾敏幸・中山恵介・古川恵太(2007): 東京湾奥における淡水流入量および海水の滞留時間の長期変化, 土木学会論文集 B, Vol.63, No.1, pp.67-72.
- 16) 八木宏・片岡理英子・山口肇・藤原建紀(2003): 東京湾の外海水進入特性に関する数値実験, 海岸工学論文集, 第 50 巻, pp.931-935.

- 17) 中山恵介・佐藤千鶴・古川恵太(2007): 東京湾奥における底層 DO に対する風および河川流入の影響評価, 海洋開発論文集, 第 23 巻, pp.633-638.
- 18) 田中昌宏(1993): 成層化した湾の風による湧昇現象の数値モデルに関する研究, 海岸工学論文集, 第 40 巻, pp.1096-1100.
- 19) 鈴木亨・松山優治・長島秀樹(1997): 成層期の東京湾における北東風による循環流および湧昇域の形成過程に関する数値実験, 沿岸海洋研究, 第 35 巻, 第 1 号, pp.99-108.

### 2.3 重力循環と吹送流循環

- 20) Keith R. Dyer (1997): Estuaries, A physical introduction, 2nd edition, John Wiley & Sons, 195p.
- 21) Pritchard, D.W., and R. E. Kent (1956): A method for determining mean longitudinal velocities in a coastal plain estuary, Journal of Marine Research, 15(1), pp.81-91.
- 22) Donald V. Hansen and Maurice Rattray, Jr. (1965): Gravitational circulation in straits and estuaries, Journal of Marine Research, 23 (2), pp.104-122.
- 23) Officer C.B. and Kester D.R. (1991): On estimating the non-advective tidal exchanges and advective gravitational circulation exchanges in an estuary, Estuarine Coastal Shelf Science, 32, pp. 99-103.
- 24) D.C. Shaha, Y.-K.Cho, G.-H. Seo, C.-S. Kim, and K.-T. Jung (2010): Using flushing rate to investigate spring-neap and spatial variations of gravitational circulation and tidal exchange in an estuary, Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 7, pp. 1621-1654.
- 25) G. T. Csanady (1973): Wind-induced barotropic motions in long lakes, Journal of Physical Oceanography, 3, pp.429-438.
- 26) Kuo-Chuin Wong(1994): On the nature of transverse variability in a coastal plain estuary, Journal of Geophysical Research, Vol.99, No.C7, pp.14209-14222.
- 27) A. Kasai, A. E. Hill, T. Fujiwara and J. H. Simpson (2000): Effect of the Earth's rotation on the circulation in regions of freshwater influence, Journal of Geophysical Research, Vol. 105, No.C7, pp.16961-16969.
- 28) A. Valle-Levinson, C. Reyes and R. Sanay (2003): Effects of bathymetry, friction, and rotation on estuary-ocean exchange, Journal of Physical Oceanography, Vol.33, pp.2375-2393.
- 29) C. Winant (2004): Three-dimensional wind-driven flow in an elongated, rotating basin, Journal of Physical Oceanography, Vol.34, pp.462-476.
- 30) R. Sanay and Arnoldo Valle-Levinson (2005): Wind-induced circulation in semiencloded homogeneous, rotating basins, Journal of Physical Oceanography, Vol.35, pp.2520-2531.
- 31) H. Hinata, N. Kanatsu, S. Fujii (2010): Dependence of Wind-Driven Current on Wind Stress Direction in a Small Semiencloded, Homogeneous Rotating Basin, Journal of Physical Oceanography, 40, pp.1488-1500.
- 32) 蓮沼啓一(1979): 東京湾における流動の特徴, 沿岸海洋研究ノート, 第 16 巻, 第 2 号, pp.67-75.
- 33) 森川雅行・村上和男(1986): 東京湾における長周期流れの変動特性—現地データ(1983 年 9 月)による検討—, 港研資料, No.550, 50p.
- 34) 長島秀樹(1982): 傾いた底を持つ水道の吹送流, 理化学研究所報告, 第 58 巻 2 号, pp.23-27.
- 35) 柿野純・松村皐月・佐藤善徳・加藤信明(1987): 風邪による流れと青潮との関係, 日本水産学会誌, Vol.53(8), pp.1475-1481.
- 36) 宇野木早苗(1990): 東京湾の湧昇と青潮, 日本海洋学会大会講演要旨集, pp.156-157.
- 37) 松山優治・当麻一良・大脇厚(1990): 東京湾の湧昇に関する数値実験—青潮に関連して—, 沿岸海洋研究ノート, 第 28 巻, 第 1 号, pp.63-74.
- 38) 中辻啓二・尹鐘星・湯浅泰三・村岡浩爾(1995): 東京湾における吹送密度流と青潮発生機構との関連性, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp.1066-1070.
- 39) 佐々木淳・磯部雅彦・渡辺晃・五明美智男(1996): 東京湾における青潮の発生規模に関する考察, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp.1111-1115.
- 40) 佐々木淳(1997): 東京湾湾奥水塊の湧昇現象と青潮への影響, 海岸工学論文集, 第 44 巻, pp.1101-1105.
- 41) 鯉渕幸生・磯部雅彦(2005): 2004 年の東京湾西岸横浜港周辺における青潮の発生要因, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp.896-900.

## 2.4 外洋水の影響

- 42) 鈴木高二朗・竹田晃(2005):ビデオ画像を用いた表層海洋環境の計測について, 海洋開発論文集, Vol.22, pp.91-96.
- 43) 柳(1989):沿岸海洋学―海の中でのものはどう動くか―, 恒星社厚生閣, 154p.
- 44) Masahiro Endoh(1977):Formation of Thermohaline Front by Cooling of the Sea Surface and Inflow of the Fresh Water, Journal of the Oceanographical Society of Japan, Vol.33, pp.6-15.
- 45) Yukio Oonishi, Akira Harashima and Hideaki Kunishi(1978):Characteristics of a Front Formed by Cooling of the Sea Surface and Inflow of the Fresh Water, Journal of the Oceanographical Society of Japan, Vol.34, pp.17-23.
- 46) Harashima, Akira and Yukio Oonishi(1981):The coriolis effect against frontogenesis in steady buoyancy-driven circulation, Journal of the Oceanographical Society of Japan, Vol.37, pp.49-59.
- 47) T.Yanagi, A.Isobe, T.Saino and T.Ishimaru(1989):Thermohaline front at the mouth of Tokyo Bay in winter, Continental Shelf Research, Vol.9, Issue 1, pp.77-91.
- 48) 柳(1990):潮目の科学―沿岸フロント域の物理・化学・生物過程―, 恒星社厚生閣, 169p.
- 49) 日向(2004):東京湾の流動への概要影響―特に黒潮変動影響について―, 土木学会夏季研修会水工学シリーズ, B-3-1~21.
- 50) Yanagi,T., Tamaru,H., Ishimaru, T. And Saino, T.(1989):Intermittent outflow of high-turbidity bottom water from Tokyo Bay in Summer, La mer, Vol.27, pp.33-40.
- 51) 日向博文・灘岡和夫・八木宏・田渕広嗣・吉岡健(2001):黒潮流路変動に伴う高温沿岸水波及時における成層期東京湾内の流動構造と熱・物質輸送特性, 土木学会論文集, No.684, II -56, pp.93-111.
- 52) 秋山秀樹(1991):宿毛湾の急潮, 沿岸海洋研究ノート, 第 29 巻, 第 1 号, pp.90-96.
- 53) 小泉喜嗣(1991):急潮時の下波湾における海水交換過程, 沿岸海洋研究ノート, 第 29 巻, 第 1 号, pp.82-89.
- 54) Hidetaka Takeoka and Tomotoshi Yoshimura(1988):The Kyucho in Uwajima Bay, Journal of the Oceanographical Society of Japan, Vol.44, pp.6-16.
- 55) 吉岡洋(1971):冬期紀伊水道に発生する Oceanic front について(1), 海と空, 46(2), pp.1-14.
- 56) 吉岡洋(1977):紀伊水道の Oceanic front の変動-フェリーボートによる長期間の水温観測から, 京都大学防災研究所年報, 20B, pp.513-527.
- 57) 吉岡洋(1983):海面水温と海況変動およびその測定方法―紀伊水道を例として―, 海と空, 第 58 巻第2~3合併号, pp.37-51.
- 58) 木村喜之助(1942):沿岸の大急潮に就いて, 中央气象台彙報, Vol.19, pp.1-85.
- 78) 松山優治・岩田静夫(1977):相模湾の急潮について, (1)1975 年に起こった急潮, 水産海洋研究会報, 第 30 号, pp.1-7.
- 59) 北出裕二郎・松山優治・岩田静夫・石戸谷博範・清水顕太郎・渡部勲(1996):台風の通過に伴う相模湾の水温・流速変動, 沿岸海洋研究, 第 33 巻, 第 2 号, pp.191-202.
- 60) 石戸谷博範・北出裕次郎・松山優治・岩田静夫・石井光廣・井桁康介(2006):黒潮小蛇行の東進に伴い相模湾および東京湾湾口に発生した急潮, 海の研究, 15(3), pp.235-247.
- 61) 岩田静夫・松山優治・前田明夫(1990):相模湾の急潮(2), 神水試験報大 11 号, pp.11-15.
- 62) Masaji Matsuyama, Shizuo Iwata and Hiroshi Nagamatsu (1997) : Kyucho in Sagami Bay induced by Typhoon 8818, Journal of Oceanography, Vol.53, pp.199-205.

## 2.5 定期船舶による連続観測について

- 63) 原島省・呉在龍・姜(2001):フェリーによる海洋環境モニタリングの現状と課題, 沿岸海洋研究, 第 38 巻, 第 2 号, pp.79-90.
- 64) Harashima, A., T. Kimoto, T. Wakabayashi, and T. Hadao(2006) : Verification of the Silica Deficiency Hypothesis Based on Biogeochemical Trends in the Aquatic Continuum of Lake Biwa - Yodo River – Seto Inland Sea, Japan, Ambio Vol.35, No.1, Feb, 2006.
- 65) Kizu, S., T. Taneda and K. Hanawa(2001) : Estimation of Tidal Current in Tokyo-Ogasawara Area using TOLEX-ADCP Data, Tohoku Geophysical Journal, Vol.36, No.1.
- 66) Takikawa, T., J.-H. Yoon and K.-D. Cho(2005): The Tsushima Warm Current through

Tsushima Straits Estimated from Ferryboat ADCP Data, Journal of Physical Oceanography, Vol.35, pp.1154-1168.

- 67) 黒田寛・磯田豊・大西光代・石橋雅行・佐藤千鶴・中山智治・伊藤集通・伊勢田賢一・西澤慶介・島茂樹・外川織彦(2004): 定期船 ADCP による semi-regular sampling データを用いた調和解析手法の検討: 津軽海峡東口における潮流と残差流の評価, 海の研究, 13(6), pp.553-564.
- 68) 鈴木高二朗・田中陽二・西村大司・日置幸司・中出浩靖・中村由行(2009): 伊勢湾口における流況・水質のフェリーによる連続観測, 海岸工学論文集, 第 55 巻, pp.1056-1060.

### 3 章

#### 3.3 フェリーによる東京湾口の連続観測

- 1) 宇野木早苗・斎藤晃・小菅晋(2002): 海洋技術者のための流れ学, 東海大学出版会, 312p.
- 2) Kuo-Chuin Wong(1994): On the nature of transverse variability in a coastal plain estuary, Journal of Geophysical Research, Vol.99, No.C7, pp.14209-14222.

#### 3.5 海水交換量と海水交換日数

- 3) 高尾敏幸・岡田知也・中山恵介・古川恵太(2004): 2002 年東京湾広域環境調査に基づく東京湾の滞留時間の季節変化, 国総研資料, 第 169 号, 78p.
- 4) Keith R. Dyer (1997): Estuaries, A physical introduction, 2nd edition, John Wiley & Sons, 195p.
- 5) Officer C.B. and Kester D.R. (1991): On estimating the non-advective tidal exchanges and advective gravitational circulation exchanges in an estuary, Estuarine Coastal Shelf Science, 32, pp. 99-103.
- 6) 岡田知也・高尾敏幸・中山恵介・古川恵太(2007): 東京湾奥における淡水流入量および海水の滞留時間の長期変化, 土木学会論文集 B, Vol.63, No.1, pp.67-72.
- 7) 宇野木早苗(1998): 内湾の鉛直循環流量と河川流量の関係, 海の研究, Vol.7, No.5, pp.283-292.
- 8) 柳(1990): 潮目の科学ー沿岸フロント域の物理・化学・生物過程ー, 恒星社厚生閣, 169p.
- 9) Hirotugu Akaike (1980): Likelihood and Bayes procedure, Bayesian Statistics, University press, Valencia, Spain, pp.143-166.
- 10) 鈴木高二朗・竹田 晃 (2006): 東京湾口フェリーによる海洋環境の 2003~2005 年の観測結果とその特徴, 港空研資料, No.1134, 37p.
- 11) 日向博文・金津伸好・佐藤健治・松岡健志・藤井智史・高尾敏幸(2005): HF レーダーによる東京湾の M2 潮流観測, 沿岸海洋研究, pp.51-60.
- 12) 山尾理(2003): 千葉灯標モニタリングポストによる水質・流況・海上風の常時モニタリング, 海洋調査技術, 15(2), pp.137-141.
- 13) 山尾理(2004): 強成層期の東京湾奥における水質の短期変動に対する海上風の影響, 海洋情報部技報, Vol.22, pp.78-84.
- 14) 山尾理(2006): 東京湾奥部における下層溶存酸素濃度の時間変化(2003 年-2005 年), 海洋情報部技報, Vol.24, pp.116-126.
- 15) 渡邊奈保子・山尾理・須藤幹男・荻籠泰彦(2009): 2003 年~2008 年の東京湾奥部の下層溶存酸素濃度時間変化, 日本海洋学会秋季大会講演集, pp.67.
- 16) 佐々木淳・渡邊亮太・磯部雅彦・五明美智男(2001): 自動昇降式観測システムを用いた冬季の東京湾湾奥における基礎生産の推定, 海岸工学論文集, 第 48 巻, pp.1091-1095.
- 17) 社団法人日本河川協会(2003): 雨量・流量年表データベース

### 4 章

- 1) Officer C.B. and Kester D.R. (1991): On estimating the non-advective tidal exchanges and advective gravitational circulation exchanges in an estuary, Estuarine Coastal Shelf Science, 32, pp. 99-103.
- 2) 柳(1989): 沿岸海洋学ー海の中でのものはどう動くかー, 恒星社厚生閣, 154p.
- 3) 北川源四郎 (1993): FORTRAN77 時系列解析プログラミング, 岩波書店, 390p.

### 5 章

- 1) 海上保安庁(1992): 日本沿岸 潮汐調和定数表, 財団法人日本水路協会, 267p.
- 2) 国交省水文水質データベース: <http://www1.river.go.jp/>

- 3) 社団法人日本河川協会(2003)：雨量・流量年表データベース
- 4) 二瓶泰雄・高村智之・渡邊敬之(2007)：東京湾主要流入河川における流量モニタリングの現状と課題，海岸工学論文集，第 54 巻，pp. 1221-1225.
- 5) 二瓶泰雄・大塚慧・影山英将校・広瀬久也(2008)：東京湾における流入負荷の経年変化，海岸工学論文集，第 55 巻，pp. 1226-1230.
- 6) 財団法人日本水路協会(2000)：沿岸の海の基本図デジタルデータ，
- 7) 日向博文・八木宏・吉岡健・灘岡和夫(2000)：黒潮系暖水波及時における冬季東京湾湾口部の流動構造と熱・物質フラックス，土木学会論文集，No.656，II-52，pp.221-238.
- 8) 鈴木高二朗・竹田 晃 (2006)：東京湾口フェリーによる海洋環境の 2003～2005 年の観測結果とその特徴，港空研資料，No.1134，37p.

## 6 章

- 1) 岡田知也・高尾敏幸・中山恵介・古川恵太(2007)：東京湾奥における淡水流入量および海水の滞留時間の長期変化，土木学会論文集 B，Vol.63，No.1，pp.67-72.
- 2) K. Nakayama, M. Sivapalan, C. Sato and K. Furukawa (2010): Stochastic characterization of the onset of and recovery from hypoxia in Tokyo Bay, Japan: Derived distribution analysis based on "strong wind" events, Water Resources Research, Vol. 46, W12532, 15 pp.
- 3) 二瓶泰雄・滝岡健太郎・坂井文子・重田京助(2009)：大規模出水が東京湾の水質環境に及ぼす影響，土木学会論文集 B2(海岸工学)，Vol. B2-65，No.1，pp.1016-1020
- 4) 松村剛・石丸隆・柳哲雄(2002)：東京湾における窒素とリンの収支，海の研究，Vol.11，No.6，pp.613-630.
- 5) 田中陽二・中村由行・鈴木高二朗・井上徹教・西村洋子(2011)：微生物ループを考慮した浮遊生態系モデルの構築，港湾空港技術研究所報告，第 50 号，第 2 号，pp.3-68.
- 6) 気象庁(2011)：地域気象観測所一覧，  
[http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/amedas/ame\\_master.pdf](http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/amedas/ame_master.pdf)
- 7) 桑形恒男・近藤純正(1991)：西日本アメダス地点における地表面粗度の推定，天気，38(8)，pp.491-494.
- 8) 坂井文子・二瓶泰雄・江原圭介・臼田美穂・重田京助・大塚慧(2008)：江戸川・荒川・多摩川・中川における出水時栄養塩・COD 負荷特性，水工学論文集，第 52 巻，pp.1117-1122.
- 9) いであ株式会社(2008)：平成 19 年度特殊案件等環境影響審査調査(三河湾神野西地区埋立事業に係る環境影響基礎調査)報告書，環境省総合環境政策局，234p.
- 10) 灘岡和夫・二瓶泰雄・吉野忠和(1997)：東京湾における風系の時空間変動特性の実態と湾内海水流動への影響について，海岸工学論文集，第 44 巻，pp.396-400.
- 11) 藤原建紀(1994)：大阪湾東部上層水の交換時間と流動特性-内湾奥部にみられる高気圧性渦，沿岸海洋研究ノート，第 31 巻，第 2 号，pp.227-238.

# 付 録

## 数値計算プログラムについて

### A1 概 要

ここでは本論文で用いた数値計算プログラムについて述べる。

まず、**A2**では流動モデルについて記述する。今回用いた数値計算プログラムは港湾空港技術研究所で開発した非静水圧3次元流動モデル (STOC-LT) である。将来的に青潮などの沿岸の湧昇過程や構造物周りの複雑な流れを再現できるように、これまで閉鎖性内湾の流れの計算に多用されてきた静水圧近似をせずに鉛直方向の流れの運動方程式を解いている。

静水圧近似の場合は水中の圧力  $p$  を海面の水位  $\eta$  だけで決めるため、圧力を容易に得ることができる。一方、静水圧近似をしない場合は未知数である3方向の流速  $u, v, w$  と圧力  $p$  を3方向の運動方程式3個と連続式を用いて解く。この場合、圧力を求めるために圧力のポアソン方程式を解く必要がある。圧力のポアソン方程式の解法には繰り返し計算が必要となるため計算時間がかかり、これまであまり利用されてこなかった。また、計算では潮位などによる水面変位  $\eta$  を決める必要があるが、深い場所では自由波の波速  $(gh)^{1/2}$  が速くなり、計算の時間刻み  $\Delta t$  が大きいと波が計算格子の幅  $\Delta x, \Delta y$  を越えてしまうため不安定になってしまう。そのため、これまでは時間刻み  $\Delta t$  を小さく取る必要があり計算時間がかかる原因となっていた。ここでは、基礎方程式と計算時間を短くするために用いた基礎方程式の解法、および各種境界条件について記述する。

次に、**A3**では6章で用いた生態系モデルについて述べる。生態系モデルは流動モデルと組み合わせることで解いている。

### A2 流動モデル(非静水圧3次元モデル)

#### A2.1 基礎方程式

連続式および運動方程式はそれぞれ以下のように表される。

- ・自由表面の境界条件を考慮した連続式

$$\frac{\partial}{\partial t}(dh) + \frac{\partial}{\partial x}(udh) + \frac{\partial}{\partial y}(vdh) + \delta_z w = 0 \quad (\text{F1})$$

- ・運動方程式

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uu) + \frac{\partial}{\partial y}(uv) + \frac{\partial}{\partial z}(uw) = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + f_0 v \quad (\text{F2})$$

$$+ \frac{\partial}{\partial h} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left( 2dh \cdot v_H \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[ dh \cdot v_H \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \delta_z \left[ v_V \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] \right\}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uv) + \frac{\partial}{\partial y}(vv) + \frac{\partial}{\partial z}(vw) = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} - f_0 u \quad (\text{F3})$$

$$+ \frac{\partial}{\partial h} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[ dh \cdot v_H \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left( 2dh \cdot v_H \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \delta_z \left[ v_V \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] \right\}$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uw) + \frac{\partial}{\partial y}(vw) + \frac{\partial}{\partial z}(ww) = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\rho}{\rho_0} g \quad (\text{F4})$$

$$+ \frac{1}{dh} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[ dh \cdot v_H \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ dh \cdot v_H \left( \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] + \delta_z \left( 2hv_V \frac{\partial w}{\partial z} \right) \right\}$$

ここで、 $t$  は時間、 $dh$  は各メッシュの層厚、 $u, v, w$  はそれぞれ  $x, y, z$  方向の流速であり、 $w$  は鉛直上向きが正である。なお、 $\delta_z \Phi = \Phi_k - \Phi_{k-1}$  で表される演算子であり、 $k$  は鉛直方向の格子番号である。また、 $\rho_0$  は基準密度、 $f_0$  はコリオリ係数、 $p$  は圧力であり、 $v_H, v_V$  はそれぞれ水平方向、鉛直方向の渦動粘性係数である。

圧力  $p$  を基準密度  $\rho_0$  による静水圧およびそれからのずれ(動圧)  $\hat{p}$  に分離すると、

$$p = \rho_0 g(z - \eta) + p_a + \hat{p} \quad (\text{F5})$$

ここで、 $p_a$  は大気圧であり、 $x, y, z$  方向の圧力勾配項はそれぞれ次のように表される。

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\rho_0 g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial p_a}{\partial x} + \frac{\partial \hat{p}}{\partial x} \quad (\text{F6})$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = -\rho_0 g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\partial p_a}{\partial y} + \frac{\partial \hat{p}}{\partial y} \quad (\text{F7})$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \rho_0 g + \frac{\partial \hat{p}}{\partial z} \quad (\text{F8})$$

これらの式を代入すると運動方程式は以下のように書き換えられる。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial uu}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \delta_z(uw) = g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \hat{p}}{\partial x} \quad (\text{F9})$$

$$+ \frac{1}{h} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left( 2hv_H \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[ hv_H \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \delta_z \left[ v_V \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] \right\}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial vv}{\partial x} + \delta_z(vw) = g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \hat{p}}{\partial y} \quad (\text{F10})$$

$$+ \frac{1}{h} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[ h v_H \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ 2 h v_H \frac{\partial v}{\partial y} \right] + \delta_z \left[ v_V \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] \right\}$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial uw}{\partial x} + \frac{\partial vw}{\partial x} + \delta_z(ww) = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \hat{p}}{\partial z} + \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} g \quad (\text{F11})$$

$$+ \frac{1}{h} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[ h v_H \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ h v_H \left( \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] + \delta_z \left[ 2 v_V \frac{\partial w}{\partial z} \right] \right\}$$

## A2.2 基礎方程式の解法

圧力勾配項および鉛直拡散項を陰的に評価すると水平方向運動方程式は次のように離散化される。

$$\frac{1}{\Delta t} (u^3 - u^0) + C(u^0) = g \frac{\partial \eta^1}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \hat{p}^1}{\partial x} + D_{xy}(u^0) + D_z(u^3) \quad (\text{F12})$$

$$\frac{1}{\Delta t} (v^3 - v^0) + C(v^0) = g \frac{\partial \eta^1}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \hat{p}^1}{\partial y} + D_{xy}(v^0) + D_z(v^3) \quad (\text{F13})$$

ここで、上付き添字 0 は  $n$  時刻レベルの数値解を表し、その他の上付き添字は  $(n+1)$  時刻または中間的な時刻における数値解を表す。静水圧からのずれ  $\hat{p}$  を陽的に評価すると次式が与えられる。

$$\frac{1}{\Delta t} (u^2 - u^0) + C(u^0) = g \frac{\partial \eta^1}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \hat{p}^0}{\partial x} + D_{xy}(u^0) + D_z(u^2) \quad (\text{F14})$$

$$\frac{1}{\Delta t} (v^2 - v^0) + C(v^0) = g \frac{\partial \eta^1}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \hat{p}^0}{\partial y} + D_{xy}(v^0) + D_z(v^2) \quad (\text{F15})$$

$\delta u = u^2 - u^0, \delta v = v^2 - v^0, \delta \eta = \eta^1 - \eta^0$  において、デルタ・フォームで書き直すと、

$$\frac{1}{\Delta t} \delta u - D_z(\delta u) = g \frac{\partial}{\partial x} (\delta \eta) - C(u^0) + g \frac{\partial \eta^0}{\partial x} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} + D_{xy}(u^0) + D_z(u^0) \quad (\text{F16})$$

$$\frac{1}{\Delta t} \delta v - D_z(\delta v) = g \frac{\partial}{\partial y} (\delta \eta) - C(v^0) + g \frac{\partial \eta^0}{\partial y} - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} + D_{xy}(v^0) + D_z(v^0) \quad (\text{F17})$$

となる。上式は佐藤ら(1993)で取り扱われている方程式と同じ形であるため、佐藤らの手法を用いれば、

$$\partial u = F_u \frac{\partial}{\partial x} (\delta \eta) + G_u \quad (\text{F18})$$

$$\partial v = F_v \frac{\partial}{\partial y} (\delta \eta) + G_v \quad (\text{F19})$$

の形に書くことができる。したがって、

$$u^2 = u^1 + F_u \frac{\partial}{\partial x} (\delta \eta), \quad u^1 = u^0 + G_u \quad (\text{F20})$$

$$v^2 = v^1 + F_v \frac{\partial}{\partial y} (\delta \eta), \quad v^1 = v^0 + G_v \quad (\text{F21})$$

と表される。式(F12)、式(F14)および式(F13)、式(F15)から次式が与えられる。

$$\frac{1}{\Delta t} (u^3 - u^2) = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (\text{F22})$$

$$\frac{1}{\Delta t} (v^3 - v^2) = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \phi}{\partial y} \quad (\text{F23})$$

ここで、 $\phi = \hat{p}^1 - \hat{p}^0$  といった。また、 $D_z(u^3 - u^2)$ 、 $D_z(v^3 - v^2)$  は微小として省略した。圧力勾配項と鉛直拡散項を陰的に評価すると  $z$  方向運動方程式は次のように離散化される。

$$\frac{1}{\Delta t} (w^2 - w^0) + C(w^0) = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \hat{p}^1}{\partial z} + \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} g + D_{xy}(w^0) + D_z(w^2) \quad (\text{F24})$$

静水圧からのずれ  $\hat{p}$  を陽的に評価すると次式が与えられる。

$$\frac{1}{\Delta t} (w^1 - w^0) + C(w^0) = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \hat{p}^0}{\partial z} + \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} g + D_{xy}(w^0) + D_z(w^1) \quad (\text{F25})$$

$\delta w = w^1 - w^0$  において、式(F25)をデルタ・フォームで書き直すと、



$$\frac{1}{\Delta t} \delta w - D_z(\delta w) = -C(w^0) - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \hat{p}^0}{\partial z} + \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} g + D_{xy}(w^0) + D_z(w^0) \quad (\text{F26})$$

となる。式(F26)の係数行列は3重対角行列であるから TDMA 法により計算することができる。式(F24)から式(F25)を差し引くと次式が与えられる。

$$\frac{1}{\Delta t} (w^2 - w^1) = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (\text{F27})$$

ただし、 $D_z(w^2 - w^1)$ は微小とみなして省略した。

連続式(F1)を鉛直方向に積分すると、

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [\sum_k (u \cdot dh)_k] + \frac{\partial}{\partial y} [\sum_k (v \cdot dh)_k] = 0 \quad (\text{F28})$$

式(F20)および式(F21)を式(F28)に代入すると、次の離散式が与えられる。

$$\begin{aligned} & \frac{\delta \eta}{\Delta t} + \frac{\partial}{\partial x} [\sum_k (F_u \cdot dh^0)_k \frac{\partial}{\partial x} (\delta \eta)] + \frac{\partial}{\partial x} [\sum_k (F_v \cdot dh^0)_k \frac{\partial}{\partial y} (\delta \eta)] \\ &= -\frac{\partial}{\partial x} [\sum_k (u^1 \cdot dh^0)_k] - \frac{\partial}{\partial x} [\sum_k (v^1 \cdot dh^0)_k] \end{aligned} \quad (\text{F29})$$

式(F29)を解いて得られる  $\delta \eta$  から中間的な解  $\eta^1, u^2, v^2$  が与えられる。 $\eta^1 > \eta^0$  となるところでは  $w^1$  が未定義となるところが出現する場合がある。このため、連続式

$$\frac{dh^1 - dh^0}{\Delta t} + \frac{\partial}{\partial x} (u^2 \cdot dh^0) + \frac{\partial}{\partial y} (v^2 \cdot dh^0) + \delta_z \tilde{w}^1 = 0 \quad (\text{F30})$$

を満たすよう  $\tilde{w}^1$  を計算する。具体的には次のような手順を  $k = 1$  から  $k = mz$  まで繰り返す。

$$\tilde{w}_k^1 = \tilde{w}_{k-1}^1 - \left[ \frac{dh^1 - dh^0}{\Delta t} + \frac{\partial}{\partial x} (u^2 \cdot dh^0) + \frac{\partial}{\partial y} (v^2 \cdot dh^0) \right]_k \quad (\text{F31})$$

計算された  $\tilde{w}^1$  のうち、 $w^1$  が定義されているところでは  $\tilde{w}^1 = w_k^1$  とする。

式(F22)、式(F23)および式(F27)を連続式(F1)に代入すると次の離散式が与えられる。

$$\begin{aligned} & -\frac{\Delta t}{\rho_0} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( dh^0 \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( dh^0 \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + \delta_z \left( \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) \right] \\ &= -\frac{dh^1 - dh^0}{\Delta t} - \frac{\partial}{\partial x} (u^2 \cdot dh^0) - \frac{\partial}{\partial y} (v^2 \cdot dh^0) - \delta_z \tilde{w}^1 \end{aligned} \quad (\text{F32})$$

式(F32)は(n+1)時刻レベルにおけるフルセルのみを対象として計算する。

## A2.3 移流項と TVD スキーム

移流項には風上差分による数値粘性を抑えるために TVD スキームを採用している(藤井, 1994)。従属変数  $\phi$  に関する保存型移流方程式

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \phi) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u \phi) = 0 \quad (\text{F33})$$

に対する保存型の離散式

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \phi) + \frac{1}{\Delta x} [(\rho u)_{i+1/2} \phi_{i+1/2} - (\rho u)_{i-1/2} \phi_{i-1/2}] = 0 \quad (\text{F34})$$

において, minmod リミターを用いた TVD スキームは次の図-A.1 ようになる.

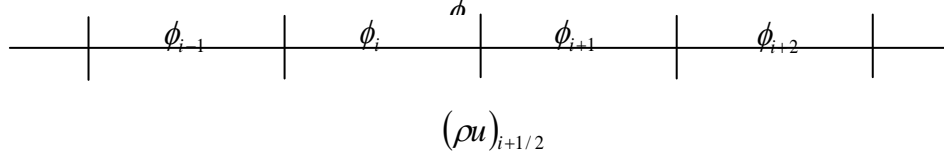


図-A.1 TVD スキームでの差分

$(\rho u)_{i+1/2} \geq 0$  のとき,

$$\phi_{i+1/2} = \phi_i + \frac{1+\kappa}{4} \minmod[\Delta\phi_{i+1/2}, b\Delta\phi_{i-1/2}] + \frac{1-\kappa}{4} \minmod[\Delta\phi_{i-1/2}, b\Delta\phi_{i+1/2}] \quad (F35)$$

$(\rho u)_{i+1/2} < 0$  のとき,

$$\phi_{i+1/2} = \phi_{i+1} - \frac{1+\kappa}{4} \minmod[\Delta\phi_{i+1/2}, b\Delta\phi_{i+3/2}] - \frac{1-\kappa}{4} \minmod[\Delta\phi_{i+3/2}, b\Delta\phi_{i+1/2}] \quad (F36)$$

ここで,  $\Delta\phi_{i+1/2} = \phi_{i+1} - \phi_i$  である. また,

$$\minmod[x, y] = \frac{\text{sign}(x) + \text{sign}(y)}{2} \cdot [|x|, |y|] \quad (F37)$$

$$\text{sign}(x) = \begin{cases} +1 & (x \geq 0) \\ -1 & (x < 0) \end{cases} \quad (F38)$$

$$b = (3 - \kappa)/(1 - \kappa) \quad (F39)$$

$\kappa$  は精度を決めるパラメータで,  $|\kappa| \leq 1$ . リミターの制限を受けないところでは, 一般には 2 次精度となるが,  $\kappa$  の値により以下のようなスキームを選択することができる.

$\kappa = -1$  : 2次精度完全風上差分  
 $\kappa = 1/3$  : UTOPIA (3次精度)  
 $\kappa = 0.5$  : QUICK  
 $\kappa = 1$  : 2次精度中心差分

## A2.4 水平拡散係数 (SGS モデル)

水平方向の渦動粘性係数は計算格子間隔の依存性を考慮した SGS (Sub-Grid Scale) モデルを組み込んでいる. 水平方向の渦動粘性係数は次式で計算される.

$$\nu_H = (C_s \Delta)^2 (2S_{ij}S_{ij})^{1/2} \quad (F40)$$

$$S_{ij}S_{ij} = \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 \quad (F41)$$

$$\Delta = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} \quad (F42)$$

ここで,  $C_s$  はモデル定数であり, 中辻ら(1992)に従って 0.12 を用いている. 水平方向の乱流 Prandtl 数および乱流 Schmidt 数をそれぞれ  $Pr_T$  および  $Sc_T$  とすると, 水平渦熱拡散係数  $K_H$  および水平渦拡散係数  $D_H$  は次のように表される.

$$K_H = \nu_H / Pr_T, \quad D_H = \nu_H / Sc_T \quad (F43)$$

## A2.5 鉛直拡散係数

沿岸・海洋域の計算においては, 鉛直方向の拡散係数に密度成層の効果を取り入れる必要があるとともに, 鉛直方向のメッシュは水平方向のメッシュと比較して  $10^2 \sim 10^3$  倍程度小さいので, 水平方向の拡散係数算定式とは別の式を使う必要がある. 本研究で用いたプログラムには, 0 方程式モデルの Munk-Anderson モデル, 2 方程式モデルの Mellor-Yamada モデルが組み込まれている. 本論文ではこのうち, 中村らのモデルを用いた.

### (1) Munk and Anderson (1948)

Munk-Anderson モデルでは, 鉛直渦動粘性係数  $K_m$  と鉛直渦拡散係数  $K_z$  を Richardson 数  $R_i$  の関数として次式のように与える.

$$K_m/K_{m0} = g(R_i) = (1 + mR_i)^{-n} \quad m = -3/2, \quad n = 10/3 \quad (F44)$$

$$K_z/K_{z0} = f(R_i) = (1 + \alpha R_i)^{-\beta} \quad \alpha = 10/3, \quad \beta = 3/2 \quad (F45)$$

$$R_i = -N^2 \left\{ \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right\}^{-1} = - \frac{(g/\rho)(\partial \rho / \partial z)}{(\partial u / \partial z)^2 + (\partial v / \partial z)^2} \quad (\text{F46})$$

$$N^2 = \frac{g}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} \quad (\text{F47})$$

ここで,  $K_{m0}$ ,  $K_{z0}$  は  $m$ ,  $n$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  はモデル定数で, Munk and Anderson(1948)と Webb(1970)のモデル定数を組み合わせた値である(中辻ら, 1991).

(2) 中村ら(1989)のモデル

$$K_z/K_{z0} = f(Ri) = (1 + \alpha R_i^\gamma)^{-\beta} \quad \alpha = 10/3, \beta = 3/2, \gamma = 1 \quad (\text{F48})$$

$$K_m/K_{m0} = g(Ri) = (1 + m R_i)^{-n} \quad m = 10, n = 1/2 \quad (\text{F49})$$

$$K_{z0} = K_{m0}/S_{C0} \quad (\text{F50})$$

$$S_{C0} = 1.0 \quad (\text{F51})$$

$$K_{m0} = \kappa w^* z \quad (\text{F52})$$

$$w^* = w_s^* \exp(-k_* z) \quad (\text{F53})$$

$$w_s^{*2} = \rho_a C_D U^2 / \rho_w \quad (\text{F54})$$

$$k_* = 4.7f/w_{s*} = 0.51 \sin \phi / U \quad (\text{F55})$$

$$R_i = -1 + [1 + 40N^2 \kappa^2 z^2 / w_s^{*2} \exp(-2k_* z)]^{1/2} / 20 \quad (\text{F56})$$

$$N^2 = (g/\rho) (\partial \rho / \partial z) \quad (\text{F57})$$

ここで,  $z$ は鉛直下向きが正,  $\kappa$ はカルマン定数,  $\rho_a$ は気体の密度,  $\rho$ は水の密度,  $C_D$  抵抗係数,  $f$ はコリオリ係数,  $U$ は流速,  $\phi$ は北緯である.

## A2.6 境界条件

(1) 海岸線上の条件

流速はスリップ, 水温・塩分は勾配ゼロ, 水位は勾配ゼロとした.

(2) 外洋の条件

流速は勾配ゼロ, 水温・塩分は流入時は外洋の水温・塩分, 流出時は勾配ゼロ, 水位は無反射境界として日野(1987)のスキームを用いた.

(3) 水面の条件

風応力として次の計算式を用いた.

$$\tau_x = \rho_a \gamma_a^2 W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2}, \tau_y = \rho_a \gamma_a^2 W_y \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \quad (\text{F58})$$

ここで,  $W_x, W_y$ : 風速の  $x, y$  成分(m<sup>2</sup>/s),  $\rho_a$ : 大気密度,  $\gamma_a^2$ : 海面摩擦係数

なお, 海面摩擦係数は以下の式で表される.

$$\gamma_a^2 = 0.001 \times (1.29 - 0.024 \sqrt{W_x^2 + W_y^2}) \quad (\sqrt{W_x^2 + W_y^2} < 8.0 \text{ m/s のとき}) \quad (\text{F59})$$

$$\gamma_a^2 = 0.001 \times (0.581 + 0.063 \sqrt{W_x^2 + W_y^2}) \quad (\sqrt{W_x^2 + W_y^2} \geq 8.0 \text{ m/s のとき}) \quad (\text{F60})$$

また, 水温・塩分は勾配ゼロである.

(4) 海底の条件

摩擦応力は以下の摩擦応力計算式(A2.49)を用いている.

$$\tau_x = \rho \gamma_b^2 u_b \sqrt{u_b^2 + v_b^2}, \tau_y = \rho \gamma_b^2 v_b \sqrt{u_b^2 + v_b^2} \quad (\text{F61})$$

ここで,  $u_b, v_b$ : 海底隣接メッシュの流速の  $x, y$  成分(m/s),  $\gamma_b^2$ : 海底面の摩擦係数

なお, 水温・塩分は勾配ゼロである.

(5) 河川の条件

河川から流入する流量、水温をソース項の形で河口部計算セルに付加している。

#### (6) 水面の熱収支

水位を考慮した形の水温の移流拡散方程式は以下ようになる。

$$\frac{\partial}{\partial t}(Tdh) + \frac{\partial}{\partial x}(Tudh) + \frac{\partial}{\partial y}(Tvdh) + \delta_z(Tw) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\alpha_H \frac{\partial T}{\partial x} dh\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\alpha_H \frac{\partial T}{\partial y} dh\right) + \delta_z\left(\alpha_V \frac{\partial T}{\partial z}\right) + \frac{Q}{\rho c_p} \quad (\text{F62})$$

また、水面での熱収支  $Q(\text{W/m}^2)$  は

$$Q = Q_s + Q_l - Q_e - Q_c \quad (\text{F63})$$

と表される。ここで、 $Q_s$  : 短波放射量,  $Q_l$  : 長波放射量,  $Q_e$  : 潜熱輸送量,  $Q_c$  : 顕熱輸送量である。このうち、短波放射量は水面を透過して水中のセルでも吸収されるため水面以外のセルにおいても値をもつ。

#### 参考文献:

- 1) 佐藤勝弘・松岡道男・小林一光(1993): 効率的な 3 次元潮流計算法とその適用性について, 海岸工学論文集, 第 40 巻, pp.221-225.
- 2) 中辻啓二・許再寧・室田明(1991): 三次元表層密度流の数値実験, 土木学会論文集, No.434/II-16, pp.16-28.
- 3) 中辻啓二・狩野晋一・栗田秀明(1992): SGS 渦動粘性係数を用いた大阪湾潮流の有限要素法解析, 水工学論文集, 第 36 巻, pp.693-696.
- 4) Mellor, G. L. and T. Yamada(1982): Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems, Rev. Geophys. And Space Phys., Vol. 20, No.4, pp.851-875.
- 5) Munk, W.H. and E.R. Anderson (1948): Notes on a theory of the thermocline, Journal of Marine Research, Vol. 7., pp.276-295.
- 6) 中村由行・西田克司・早川典生・西村肇(1989): 沿岸海域における鉛直拡散係数の推定法に関する研究, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp.809-813.
- 7) 日野幹雄・仲座栄三(1987): 水理計算における新しい“無反射境界”の数値的検討, 東工大土木工学科研究報告, No.38, pp.39-50.
- 8) 藤井考蔵(1994): 流体力学の数値計算法, 東京大学出版会, 234p.

## A3 生態系モデル

本論文で用いた浮遊生態系モデルは、植物プランクトン等のコンパートメントを次式の移流拡散方程式を用いて解いている。詳細は田中ら(2011)を参照。

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial wC}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_{c,h} \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_{c,h} \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_{c,z} \frac{\partial C}{\partial z} \right) + S_c \quad (E1)$$

また、以下の式は共通して用いる式である。

$$\text{温度依存関数} \quad f_{\text{temp}}(\alpha, \beta) = \alpha \exp(\beta \cdot \text{Temp}) \quad (E2)$$

$$\text{ミハイエリスメンテン式} \quad f_{\text{MM}}(X, a_{\text{half}}) = X / (X + a_{\text{half}}) \quad (E3)$$

$$\text{飼料濃度の制限関数} \quad f_{\text{feed}}(\lambda, \Pi^{\min}, \Pi) = 1 - \exp\{\lambda \cdot \min(0, \Pi^{\min} - \Pi)\} \quad (E4)$$

### A3.1 植物プランクトン

#### (1) 植物プランクトン(炭素) $\text{PHY}_i [\text{molC} \cdot \text{m}^{-3}]$

$$\begin{aligned} S_{\text{PHY}_i} [\text{molC} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}] &= (\text{光合成 E6}) - (\text{細胞外分泌 E13}) - (\text{呼吸 E14}) - (\text{死亡 E15}) \\ &\quad - (\text{ZOO による被食 E16}) - (\text{PZ による被食 E17}) + (\text{鉛直移動 E18}) \\ &= B_{\text{PhyPs},i}^C - B_{\text{PhyExt},i} - B_{\text{PhyResp},i} - B_{\text{PhyLoss},i} - \sum_j^{N_{\text{Zoo}}} B_{\text{Phy2Zoo},i,j} - \sum_n^{N_{\text{Pz}}} B_{\text{Phy2Pz},i,n} + B_{\text{PhyMig},i} \end{aligned} \quad (E5)$$

・光合成	$B_{\text{PhyPs},i}^C = V_{\text{PhyPs},i} \cdot u_{\text{PhyPsN},i} \cdot u_{\text{PhyPsL},i} \cdot \text{PHY}_i$	(E6)	パラメーター
最大増殖速度	$v_{\text{PhyPs},i} = f_{\text{temp}}(\alpha_{\text{PhyPs},i}, \beta_{\text{Phy},i})$	(E7)	$\alpha_{\text{PhyPs},i} \quad \beta_{\text{Phy},i}$
栄養塩制限	$u_{\text{PhyPsN},i} = \min(f_{\text{MM}}(\text{SQN}_i, \alpha_{\text{PhyPsNut},i} \cdot P_c^{\text{PHY},i} \cdot \text{PHY}_i),$ $f_{\text{MM}}(\text{SQN}_i, \alpha_{\text{PhyPsNut},i} \cdot N_c^{\text{PHY},i} \cdot \text{PHY}_i),$ $f_{\text{MM}}(\text{SiO}_2, \alpha_{\text{PhyPsNut},i} \cdot S_{\text{ic}}^{\text{PHY},i} \cdot \text{PHY}_i))$	(E8)	$\alpha_{\text{PhyPsNut},i} \quad P_c^{\text{PHY},i}$ $N_c^{\text{PHY},i}$ $S_{\text{ic}}^{\text{PHY},i}$
光制限	$u_{\text{PhyPsL},i} = \frac{1}{k_{\text{ext}}(z_b - z_t)} \left[ \exp\left(1 - \frac{I(z_t)}{I_{\text{opt},i}}\right) - \exp\left(1 - \frac{I(z_b)}{I_{\text{opt},i}}\right) \right]$	(E9)	$I_{\text{opt},i}$
光透過関数	$I(z_b) = I(z_t) \exp(-k_{\text{ext}}(z_b - z_t))$	(E10)	
消散係数	$k_{\text{ext}} = k_0 + \alpha_{\text{ext}1} \cdot \text{CHL} + \alpha_{\text{ext}2} \cdot (\text{CHL})^{2/3}$	(E11)	$\alpha_{\text{ext}1} \quad \alpha_{\text{ext}2}$
クロロフィル a 量	$\text{CHL} = \sum_i^{N_{\text{PHY}}} \text{CHL}_c^{\text{PHY},i} \cdot \text{PHY}_i$	(E12)	
・細胞外分泌	$B_{\text{PhyExt},i} = B_{\text{PhyPs},i} \cdot \alpha_{\text{PhyExt},i} \cdot \exp(-\beta_{\text{PhyExt},i} \cdot \text{CHL}_c^{\text{PHY},i} \cdot \text{PHY}_i)$	(E13)	$\alpha_{\text{PhyExt},i} \quad \beta_{\text{PhyExt},i}$
・呼吸	$B_{\text{PhyResp},i} = f_{\text{temp}}(\alpha_{\text{PhyResp},i}, \beta_{\text{PhyResp},i}) \cdot$ $\alpha_{\text{PhyResp},i} \beta_{\text{PhyResp},i} K_{\text{PhyResp}}^{\text{DO}} \cdot f_{\text{MM}}(\text{DO}, K_{\text{PhyResp}}^{\text{DO}}) \cdot \text{PHY}_i$	(E14)	
・自然死亡	$B_{\text{PhyLoss},i} = \alpha_{\text{PhyLoss},i} \cdot (\text{PHY}_i)^2$	(E15)	$\alpha_{\text{PhyLoss},i}$
・被食(動物プランクトン)	$B_{\text{Phy2Zoo},i,j}$	(E16)	
・被食(原生動物)	$B_{\text{Phy2Pz},i,n}$	(E17)	
・鉛直移動	$B_{\text{PhyMig},i} = w_{\text{Phy},i} \cdot \partial \text{PHY}_i / \partial z$	(E18)	$w_{\text{Phy},i}$

#### (2) 植物プランクトンの蓄積栄養塩(窒素) $\text{SQN}_i [\text{molN} \cdot \text{m}^{-3}]$

$$\begin{aligned} S_{\text{SQN},i} [\text{molP} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}] &= (\text{NH}_4 \text{の摂取 E20}) + (\text{NO}_2 \text{の摂取 E21}) + (\text{NO}_3 \text{の摂取 E22}) \\ &\quad - (\text{光合成による SQN の減少 E25}) - (\text{PHY 減少による SQN の減少 E26}) + (\text{鉛直移動 E18}) \\ &= B_{\text{PhyTake},i}^{\text{NH}_4} + B_{\text{PhyTake},i}^{\text{NO}_2} + B_{\text{PhyTake},i}^{\text{NO}_3} - B_{\text{PhyPs},i}^N - B_{\text{SqLoss},i} + B_{\text{PhyMig},i} \cdot \text{SQN}_i / \text{PHY}_i \end{aligned} \quad (E19)$$

・NH <sub>4</sub> の摂取	$B_{\text{PhyTake},i}^{\text{NH}_4} = \text{UN}_{\text{max},i} \cdot u_{\text{PhyTake},i}^N \cdot N_c^{\text{PHY},i} \cdot \text{PHY}_i \cdot (1 - u_{\text{PhyTakeNH}_4,i})$ $\cdot f_{\text{MM}}(\text{NH}_4, K_{\text{PhyTake},i}^{\text{NH}_4})$	(E20)	パラメーター
・NO <sub>2</sub> の摂取	$B_{\text{PhyTake},i}^{\text{NO}_2} = \text{UN}_{\text{max},i} \cdot u_{\text{PhyTake},i}^N \cdot \text{NO}_2 / (\text{NO}_2 + \text{NO}_3)$ $\cdot f_{\text{MM}}(\text{NO}_2, K_{\text{PhyTake},i}^{\text{NO}_2}) \cdot N_c^{\text{PHY},i} \cdot \text{PHY}_i \cdot u_{\text{PhyTakeNH}_4,i}$	(E21)	$\text{UN}_{\text{max},i} \quad K_{\text{PhyTake},i}^{\text{NH}_4}$
・NO <sub>3</sub> の摂取	$B_{\text{PhyTake},i}^{\text{NO}_3} = \text{UN}_{\text{max},i} \cdot u_{\text{PhyTake},i}^N \cdot \text{NO}_2 / (\text{NO}_2 + \text{NO}_3)$ $\cdot f_{\text{MM}}(\text{NO}_3, K_{\text{PhyTake},i}^{\text{NO}_3}) \cdot N_c^{\text{PHY},i} \cdot \text{PHY}_i \cdot u_{\text{PhyTakeNH}_4,i}$	(E22)	$\text{UN}_{\text{max},i} \quad K_{\text{PhyTake},i}^{\text{NO}_2}$
セルクオタによる 窒素摂取制限関数	$u_{\text{PhyTake},i}^N = 1 / (\text{PQN}_{\text{max},i} - 1)$ $\cdot (\text{PQN}_{\text{max},i} - (N_c^{\text{PHY},i} \cdot \text{PHY}_i + \text{SQN}_i) / (N_c^{\text{PHY},i} \cdot \text{PHY}_i))$	(E23)	$\text{UN}_{\text{max},i} \quad K_{\text{PhyTake},i}^{\text{NO}_3}$
硝酸摂取抑制関数	$u_{\text{PhyTakeNH}_4,i} = \exp(-\Psi_{\text{PhyTake},i} \cdot \text{NH}_4)$	(E24)	$\text{PQN}_{\text{max},i}$
・光合成による減少	$B_{\text{PhyPs},i}^N = N_c^{\text{PHY},i} \cdot B_{\text{PhyPs},i}^C$	(E25)	$\Psi_{\text{PhyTake},i}$
・自然死亡等による減少	$B_{\text{SqLoss},i}^P = (B_{\text{PhyLoss},i} + \sum_j^{N_{\text{Zoo}}} B_{\text{Phy2Zoo},i,j} + \sum_n^{N_{\text{Pz}}} B_{\text{Phy2Pz},i,n}) \cdot \text{SQN}_i / \text{PHY}_i$	(E26)	$N_c^{\text{PHY},i}$

### (3) 植物プランクトンの蓄積栄養塩(リン) $SQP_i$ [molP · m<sup>-3</sup>]

$$S_{SQP,i} [\text{molP} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}] = (\text{PO}_4 \text{ 摂取 E28}) - (\text{光合成による減少 E29}) - (\text{PHY 減少による減少 E30}) + (\text{鉛直移動 E18})$$

$$= B_{\text{PhyTake},i}^{\text{PO}_4} - B_{\text{PhyPs},i}^{\text{P}} - B_{\text{SqLoss},i} + B_{\text{PhyMig},i} \cdot SQP_i / \text{PHY}_i \quad (\text{E27})$$

・リンの摂取	$B_{\text{PhyTake},i}^{\text{PO}_4} = U_{\text{max},i}^{\text{PO}_4} \cdot u_{\text{PhyTake},i}^{\text{PO}_4} \cdot f_{\text{MM}}(\text{PO}_4, K_{\text{PhyTake},i}^{\text{PO}_4}) \cdot P_c^{\text{PHY},i} \cdot \text{PHY}_i$	(E28)	パラメーター
・光合成による減少	$B_{\text{PhyPs},i}^{\text{P}} = P_c^{\text{PHY},i} \cdot B_{\text{PhyPs},i}^{\text{C}}$	(E29)	$U_{\text{max},i}^{\text{PO}_4}$ $K_{\text{PhyTake},i}^{\text{PO}_4}$
・自然死亡等による減少	$B_{\text{SqLoss},i}^{\text{P}} = (B_{\text{PhyLoss},i} + \sum_j^{N_{\text{zoo}}} B_{\text{Phy2Zoo},i,j} + \sum_n^{N_{\text{pz}}} B_{\text{Phy2Pz},i,n}) \cdot SQP_i / \text{PHY}_i$	(E30)	

### A3.2 動物プランクトン $ZOO_j$ [molC · m<sup>-3</sup>]

$$S_{ZOO,j} [\text{molC} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}] = (\text{PHY の捕食 E32}) + (\text{POM の摂取 E40}) + (\text{PZ の捕食 E42}) + (\text{BAC の捕食 E44})$$

$$- (\text{排糞 E46}) - (\text{呼吸 E48}) - (\text{死亡 E49}) + (\text{鉛直移動 E50})$$

$$= \sum_i^{N_{\text{PHY}}} (B_{\text{Phy2Zoo},i,j} - \Delta B_{\text{Phy2Zoo},i,j}^{\text{cut}}) + \sum_k^{N_{\text{DEC}}} B_{\text{Pom2Zoo},k,j}$$

$$+ \sum_n^{N_{\text{PZ}}} (B_{\text{Pz2Zoo},n,j} - \Delta B_{\text{Pz2Zoo},n,j}^{\text{cut}}) + \sum_m^{N_{\text{BAC}}} (B_{\text{Bac2Zoo},m,j} - \Delta B_{\text{Bac2Zoo},m,j}^{\text{cut}})$$

$$- B_{\text{ZooExc},j} - B_{\text{ZooResp},j} - B_{\text{ZooLoss},j} + B_{\text{ZooMig},j} \quad (\text{E31})$$

・PHY の捕食	$B_{\text{Phy2Zoo},i,j} = \eta_{\text{Zoo},j}^{\text{PHY},i} \cdot u_{\text{Phy2Zoo},i,j} \cdot R_{\text{ZooFeed},j} \cdot ZOO_j$	(E32)	$\eta_{\text{Zoo},j}^{\text{PHY},i}$
PHY の捕食率	$u_{\text{Phy2Zoo},i,j} = \Pi_{\text{ZOO},j}^{\text{PHY},i} / \Pi_{\text{ZOO},j}$	(E33)	
飼料濃度	$\Pi_{\text{ZOO},j} = \sum_i^{N_{\text{PHY}}} \Pi_{\text{ZOO},j}^{\text{PHY},i} + \sum_k^{N_{\text{DEC}}} \Pi_{\text{ZOO},j}^{\text{POM},k} + \sum_n^{N_{\text{PZ}}} \Pi_{\text{ZOO},j}^{\text{PZ},n} + \sum_m^{N_{\text{BAC}}} \Pi_{\text{ZOO},j}^{\text{BAC},m}$	(E34)	
捕食可能 PHY 濃度	$\Pi_{\text{ZOO},j}^{\text{PHY},i} = \eta_{\text{ZOO},j}^{\text{PHY},i} \cdot \text{PHY}_i \cdot \min(1, N_c^{\text{PHY},i} / N_c^{\text{ZOO},j}, P_c^{\text{PHY},i} / P_c^{\text{ZOO},j})$	(E35)	$\eta_{\text{ZOO},j}^{\text{PHY},i}$ $N_c^{\text{ZOO},j}$ $P_c^{\text{ZOO},j}$
摂食可能 POM 濃度	$\Pi_{\text{ZOO},j}^{\text{POM},k} = \eta_{\text{ZOO},j}^{\text{POM},k} \cdot \min(\text{POC}_k, \text{PON}_k / N_c^{\text{ZOO},j}, \text{POP}_k / P_c^{\text{ZOO},j})$	(E36)	$\eta_{\text{ZOO},j}^{\text{POM},k}$ $P_c^{\text{ZOO},j}$
捕食可能 PZ 濃度	$\Pi_{\text{ZOO},j}^{\text{PZ},n} = \eta_{\text{ZOO},j}^{\text{PZ},n} \cdot \text{PZ}_n \cdot \min(1, N_c^{\text{PZ},n} / N_c^{\text{ZOO},j}, P_c^{\text{PZ},n} / P_c^{\text{ZOO},j})$	(E37)	$\eta_{\text{ZOO},j}^{\text{PZ},n}$ $P_c^{\text{ZOO},j}$
捕食可能 BAC 濃度	$\Pi_{\text{ZOO},j}^{\text{BAC},m} = \eta_{\text{ZOO},j}^{\text{BAC},m} \cdot \text{BAC}_m \cdot \min(1, N_c^{\text{BAC},m} / N_c^{\text{ZOO},j}, P_c^{\text{BAC},m} / P_c^{\text{ZOO},j})$	(E38)	$\eta_{\text{ZOO},j}^{\text{BAC},m}$ $P_c^{\text{ZOO},j}$
捕食速度	$R_{\text{ZooFeed},j} = f_{\text{temp}}(\alpha_{\text{ZooFeed},j}, \beta_{\text{Zoo},j}) \cdot f_{\text{MM}}(\text{DO}, K_{\text{ZooFeed}}^{\text{DO}}) \cdot f_{\text{feed}}(\lambda_{\text{ZOO},j}, \Pi_{\text{ZOO},j}^{\text{min}}, \Pi_{\text{ZOO},j})$	(E39)	$\alpha_{\text{ZooFeed},j}$ $\beta_{\text{Zoo},j}$ $K_{\text{ZooFeed}}^{\text{DO}}$ $\lambda_{\text{ZOO},j}$ $\Pi_{\text{ZOO},j}^{\text{min}}$
・POM の摂取	$B_{\text{Pom2Zoo},i,j} = \eta_{\text{Zoo},j}^{\text{POM},k} \cdot u_{\text{Pom2Zoo},i,j} \cdot R_{\text{ZooFeed},j} \cdot ZOO_j$	(E40)	
POM の摂食率	$u_{\text{Pom2Zoo},i,j} = \Pi_{\text{ZOO},j}^{\text{POM},k} / \Pi_{\text{ZOO},j}$	(E41)	
・PZ の捕食	$B_{\text{Pz2Zoo},i,j} = \eta_{\text{Zoo},j}^{\text{PZ},n} \cdot u_{\text{Pz2Zoo},i,j} \cdot R_{\text{ZooFeed},j} \cdot ZOO_j$	(E42)	
PZ の捕食率	$u_{\text{Pz2Zoo},i,j} = \Pi_{\text{ZOO},j}^{\text{PZ},n} / \Pi_{\text{ZOO},j}$	(E43)	
・BAC の捕食	$B_{\text{Bac2Zoo},i,j} = \eta_{\text{Zoo},j}^{\text{BAC},m} \cdot u_{\text{Bac2Zoo},i,j} \cdot R_{\text{ZooFeed},j} \cdot ZOO_j$	(E44)	
BAC の捕食率	$u_{\text{Bac2Zoo},i,j} = \Pi_{\text{ZOO},j}^{\text{BAC},m} / \Pi_{\text{ZOO},j}$	(E45)	
・排糞・残滓	$B_{\text{ZooExc},j} = \sum_k^{N_{\text{DEC}}} B_{\text{ZooExc},j,k}$	(E46)	
分解速度別の排糞・残滓量	$B_{\text{ZooExc},j,k} = \sum_i^{N_{\text{PHY}}} (1 - e_{\text{ZOO},j}^{\text{PHY},i} \cdot e_{\text{ZOO},j}^{\text{dec},k}) \cdot c_{\text{Phy},i}^{\text{dec},k} \cdot (B_{\text{Phy2Zoo},i,j} - \Delta B_{\text{Phy2Zoo},i,j}^{\text{cut}}) + (1 - e_{\text{ZOO},j}^{\text{POM},k} \cdot e_{\text{ZOO},j}^{\text{dec},k}) \cdot B_{\text{Pom2Zoo},k,j} + \sum_n^{N_{\text{PZ}}} (1 - e_{\text{ZOO},j}^{\text{PZ},n} \cdot e_{\text{ZOO},j}^{\text{dec},k}) \cdot c_{\text{Pz},n}^{\text{dec},k} \cdot (B_{\text{Pz2Zoo},n,j} - \Delta B_{\text{Pz2Zoo},n,j}^{\text{cut}}) + \sum_m^{N_{\text{BAC}}} (1 - e_{\text{ZOO},j}^{\text{BAC},m} \cdot e_{\text{ZOO},j}^{\text{dec},k}) \cdot c_{\text{Bac},m}^{\text{dec},k} \cdot (B_{\text{Bac2Zoo},m,j} - \Delta B_{\text{Bac2Zoo},m,j}^{\text{cut}})$	(E47)	$e_{\text{ZOO},j}^{\text{PHY},i}$ $e_{\text{ZOO},j}^{\text{dec},k}$ $c_{\text{Phy},i}^{\text{dec},k}$ $e_{\text{ZOO},j}^{\text{POM},k}$ $e_{\text{ZOO},j}^{\text{PZ},n}$ $c_{\text{Pz},n}^{\text{dec},k}$ $e_{\text{ZOO},j}^{\text{BAC},m}$ $c_{\text{Bac},m}^{\text{dec},k}$
・呼吸	$B_{\text{ZooResp},j} = f_{\text{temp}}(\alpha_{\text{ZooResp},j}, \beta_{\text{Zoo},j}) \cdot f_{\text{MM}}(\text{DO}, K_{\text{ZooResp}}^{\text{DO}}) \cdot ZOO_j + \alpha_{\text{ZooResp},j} \cdot R_{\text{ZooFeed},j} \cdot ZOO_j$	(E48)	$\alpha_{\text{ZooResp},j}$ $\beta_{\text{Zoo},j}$ $K_{\text{ZooResp}}^{\text{DO}}$
・自然死亡	$B_{\text{ZooLoss},j} = \alpha_{\text{ZooLoss},j} \cdot (ZOO_j)^2$	(E49)	$\alpha_{\text{ZooLoss},j}$
・鉛直移動	$B_{\text{ZooMig},j} = w_{\text{Zoo},j}^{\text{Food}} \cdot \partial ZOO_j / \partial z \cdot (T_{\text{Zoo},s}^{\text{Stop}} < T_{\text{Zoo},s}^{\text{Food}} \text{ or } (T_{\text{Zoo},s}^{\text{Food}} < T_{\text{Zoo},e}^{\text{Food}} \text{ and } T_{\text{Zoo},s}^{\text{Food}} < T_{\text{Zoo},e}^{\text{Food}}))$	(E50)	$\alpha_{\text{ZooLoss},j}$
鉛直移動速度	$w_{\text{Zoo},j} = \begin{cases} w_{\text{Zoo},j}^{\text{Food}} & (T_{\text{Zoo},s}^{\text{Food}} < T_{\text{Zoo},e}^{\text{Food}} \text{ and } T_{\text{Zoo},s}^{\text{Food}} < T_{\text{Zoo},e}^{\text{Food}}) \\ 0 & (T_{\text{Zoo},s}^{\text{Food}} > T_{\text{Zoo},e}^{\text{Food}} \text{ or } T_{\text{Zoo},s}^{\text{Food}} > T_{\text{Zoo},e}^{\text{Food}}) \end{cases}$	(E51)	$T_{\text{Zoo},s}^{\text{Food}}$ $T_{\text{Zoo},e}^{\text{Food}}$
採餌時の移動	$w_{\text{Zoo},j}^{\text{Food}} = \begin{cases} w_{\text{Zoo},j}^{\text{Food,up}} & (T_{\text{Zoo},s}^{\text{Food}} < T_{\text{Zoo},e}^{\text{Food}} \text{ and } T_{\text{Zoo},s}^{\text{Food}} < T_{\text{Zoo},e}^{\text{Food}}) \\ 0 & (T_{\text{Zoo},s}^{\text{Food}} > T_{\text{Zoo},e}^{\text{Food}} \text{ or } T_{\text{Zoo},s}^{\text{Food}} > T_{\text{Zoo},e}^{\text{Food}}) \end{cases}$	(E52)	$w_{\text{Zoo},j}^{\text{Food,up}}$ $w_{\text{Zoo},j}^{\text{Food,dn}}$
光環境による移動	$w_{\text{Zoo},j}^{\text{Light}} = \begin{cases} w_{\text{Zoo},j}^{\text{Light,up}} & (I_{\text{Avg}} < I_{\text{Zoo},j}^{\text{Start}}) \\ 0 & (I_{\text{Avg}} > I_{\text{Zoo},j}^{\text{Start}}) \end{cases}$	(E53)	$I_{\text{Zoo},j}^{\text{Start}}$ $w_{\text{Zoo},j}^{\text{Light,down}}$
セル内強光度	$I_{\text{Avg}} = (I_t - I_b) / (Z_b - Z_t) \cdot \int_{Z_t}^{Z_b} I_t \cdot \exp(-k_{\text{ext}}(z - z_t)) dz$	(E54)	

### A3.3 原生動物 $PZ_n[\text{molC} \cdot \text{m}^{-3}]$

$$\begin{aligned}
 S_{PZ,n}[\text{molC} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}] &= (\text{PHY の捕食 E56}) + (\text{PZ の捕食 E63}) - (\text{PZ による被食 E63}) + (\text{BAC の捕食 E65}) \\
 &\quad - (\text{ZOO による被食 E42}) - (\text{排糞 E67}) - (\text{呼吸 E69}) - (\text{死亡 E70}) \\
 &= \sum_i^{N_{\text{PHY}}} (B_{\text{Phy2Pz},i,n} - \Delta B_{\text{Phy2Pz},i,n}^{\text{cut}}) + \sum_{n'}^{N_{\text{PZ}}} (B_{\text{Pz2Pz},n',n} - \Delta B_{\text{Pz2Pz},n',n}^{\text{cut}}) - \sum_{n'}^{N_{\text{PZ}}} B_{\text{Pz2Pz},n,n'} \\
 &\quad + \sum_n^{N_{\text{BAC}}} (B_{\text{Bac2Pz},m,n} - \Delta B_{\text{Bac2Pz},m,n}^{\text{cut}}) - \sum_j^{N_{\text{ZOO}}} B_{\text{Pz2Zoo},n,j} \\
 &\quad - B_{\text{PzExc},n} - B_{\text{PzResp},n} - B_{\text{PzLoss},n}
 \end{aligned} \tag{E55}$$

・PHY の捕食	$B_{\text{Phy2Pz},i,n} = \eta_{\text{PZ},n}^{\text{PHY},i} \cdot u_{\text{Phy2Pz},i,n} \cdot R_{\text{Pz},n} \cdot PZ_n$	(E56)	$\eta_{\text{PZ},n}^{\text{PHY},i}$
PHY の捕食率	$u_{\text{Phy2Pz},i,n} = \Pi_{\text{PZ},n}^{\text{PHY},i} / \Pi_{\text{PZ},n}$	(E57)	
飼料濃度	$\Pi_{\text{PZ},n} = \sum_i^{N_{\text{PHY}}} \Pi_{\text{PZ},n}^{\text{PHY},i} + \sum_m^{N_{\text{BAC}}} \Pi_{\text{PZ},n}^{\text{BAC},m} + \sum_{n'}^{N_{\text{PZ}}} \Pi_{\text{PZ},n}^{\text{PZ},n'}$	(E58)	
捕食可能 PHY 濃度	$\Pi_{\text{PZ},n}^{\text{PHY},i} = \eta_{\text{PZ},n}^{\text{PHY},i} \cdot \text{PHY}_i \cdot \min(1, N_c^{\text{PHY},i} / N_c^{\text{PZ},n}, p_c^{\text{PHY},i} / p_c^{\text{PZ},n})$	(E59)	$\eta_{\text{PZ},n}^{\text{PHY},i} \quad N_c^{\text{ZOO},j} \quad p_c^{\text{ZOO},j}$
捕食可能 BAC 濃度	$\Pi_{\text{PZ},n}^{\text{BAC},m} = \eta_{\text{PZ},n}^{\text{BAC},m} \cdot \text{BAC}_m \cdot \min(1, N_c^{\text{BAC},m} / N_c^{\text{PZ},n}, p_c^{\text{BAC},m} / p_c^{\text{PZ},n})$	(E60)	$\eta_{\text{PZ},n}^{\text{BAC},m}$
捕食可能 PZ 濃度	$\Pi_{\text{PZ},n}^{\text{PZ},n'} = \eta_{\text{PZ},n}^{\text{PZ},n'} \cdot PZ_{n'} \cdot \min(1, N_c^{\text{PZ},n'} / N_c^{\text{PZ},n}, p_c^{\text{PZ},n'} / p_c^{\text{PZ},n})$	(E61)	$\eta_{\text{PZ},n}^{\text{PZ},n'}$
捕食速度	$R_{\text{PZ},n} = f_{\text{temp}}(\alpha_{\text{PZ},n}, \beta_{\text{PZ},n}) \cdot f_{\text{MM}}(\text{DO}, K_{\text{PZ}}^{\text{DO}}) \cdot f_{\text{feed}}(\lambda_{\text{PZ},n}, \Pi_{\text{PZ},n}^{\text{min}}, \Pi_{\text{PZ},n})$	(E62)	$\alpha_{\text{PZ},n} \quad \beta_{\text{PZ},n} \quad K_{\text{PZ}}^{\text{DO}} \quad \lambda_{\text{PZ},n} \quad \Pi_{\text{PZ},n}^{\text{min}}$
・PZ の捕食	$B_{\text{Pz2Pz},n',n} = \eta_{\text{PZ},n}^{\text{PZ},n'} \cdot u_{\text{Pz2Pz},n',n} \cdot R_{\text{Pz},n} \cdot PZ_n$	(E63)	
PZ の捕食率	$u_{\text{Pz2Pz},n',n} = \Pi_{\text{PZ},n}^{\text{PZ},n'} / \Pi_{\text{PZ},n}$	(E64)	
・BAC の捕食	$B_{\text{Bac2Pz},m,n} = \eta_{\text{PZ},n}^{\text{BAC},m} \cdot u_{\text{Bac2Pz},m,n} \cdot R_{\text{Pz},n} \cdot PZ_n$	(E65)	
BAC の捕食率	$u_{\text{Bac2Pz},m,n} = \Pi_{\text{PZ},n}^{\text{BAC},m} / \Pi_{\text{PZ},n}$	(E66)	
・排糞・残滓	$B_{\text{PzExc},n} = \sum_k^{N_{\text{DEC}}} B_{\text{PzExc},n,k}$	(E67)	
分解速度別の 排糞・残滓量	$B_{\text{PzExc},n,k} = \sum_i^{N_{\text{PHY}}} (1 - e_{\text{PZ},n}^{\text{PHY},i} \cdot e_{\text{PZ},n}^{\text{dec},k}) \cdot c_{\text{Phy},i}^{\text{dec},k} \cdot (B_{\text{Phy2Pz},i,n} - \Delta B_{\text{Phy2Pz},i,n}^{\text{cut}}) + \sum_{n'}^{N_{\text{PZ}}} (1 - e_{\text{PZ},n}^{\text{PZ},n'} \cdot e_{\text{PZ},n}^{\text{dec},k}) \cdot c_{\text{Pz},n'}^{\text{dec},k} \cdot (B_{\text{Pz2Pz},n',n} - \Delta B_{\text{Pz2Pz},n',n}^{\text{cut}}) + \sum_m^{N_{\text{BAC}}} (1 - e_{\text{PZ},n}^{\text{BAC},m} \cdot e_{\text{PZ},n}^{\text{dec},k}) \cdot c_{\text{Bac},m}^{\text{dec},k} \cdot (B_{\text{Bac2Pz},m,n} - \Delta B_{\text{Bac2Pz},m,n}^{\text{cut}})$	(E68)	$e_{\text{PZ},n}^{\text{PHY},i} \quad e_{\text{PZ},n}^{\text{dec},k} \quad c_{\text{Phy},i}^{\text{dec},k} \quad e_{\text{PZ},n}^{\text{PZ},n'} \quad e_{\text{PZ},n}^{\text{dec},k} \quad c_{\text{Pz},n'}^{\text{dec},k} \quad e_{\text{PZ},n}^{\text{BAC},m} \quad e_{\text{PZ},n}^{\text{dec},k} \quad c_{\text{Bac},m}^{\text{dec},k}$
・呼吸	$B_{\text{PzResp},n} = f_{\text{temp}}(\alpha_{\text{PzResp},n}, \beta_{\text{Pz},n}) \cdot f_{\text{MM}}(\text{DO}, K_{\text{PzResp}}^{\text{DO}}) \cdot PZ_n + \alpha_{\text{PzRespA},n} \cdot R_{\text{Pz},n} \cdot PZ_n$	(E69)	$\alpha_{\text{PzResp},n} \quad \beta_{\text{Pz},n} \quad K_{\text{PzResp}}^{\text{DO}} \quad \alpha_{\text{PzRespA},n}$
・自然死亡	$B_{\text{PzLoss},n} = \alpha_{\text{PzLoss},n} \cdot (PZ_n)^2$	(E70)	$\alpha_{\text{PzLoss},n}$

### A3.4 好気性細菌 $\text{BAC}_m[\text{molC} \cdot \text{m}^{-3}]$

$$\begin{aligned}
 S_{\text{BAC},m}[\text{molC} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}] &= (\text{ADOC 摂取 E72}) - (\text{呼吸 E75}) - (\text{死亡 E76}) - (\text{ZOO による被食 E44}) - (\text{PZ による被食 E65}) \\
 &= B_{\text{BacTake},m}^{\text{C}} - B_{\text{BacResp},m} - B_{\text{BacLoss},m} - \sum_j^{N_{\text{ZOO}}} B_{\text{Bac2Zoo},m,j} - \sum_i^{N_{\text{PZ}}} B_{\text{Bac2Pz},m,i}
 \end{aligned} \tag{E71}$$

・ADOC の摂取	$B_{\text{BacTake},m}^{\text{C}} = f_{\text{temp}}(\alpha_{\text{BacTake},m}, \beta_{\text{Bac},m}) \cdot u_{\text{BacDo}} \cdot u_{\text{BacTake},m} \cdot \text{BAC}_m$	(E72)	$\alpha_{\text{BacTake},m} \quad \beta_{\text{Bac},m}$
摂取の酸素制限	$u_{\text{BacDo}} = \begin{cases} 1 & (\text{DO} > \text{DO}_{\text{BAC}}) \\ 0 & (\text{DO} \leq \text{DO}_{\text{BAC}}) \end{cases}$	(E73)	$\text{DO}_{\text{BAC}}$
摂取の栄養塩制限	$u_{\text{BacTake}} = \min \left( f_{\text{MM}}(\text{ADOC}, K_{\text{BacTake},m}^{\text{ADOC}}), f_{\text{MM}}(\text{NH}_4 + \text{NO}_2 + \text{NO}_3, K_{\text{BacTake},m}^{\text{N}}), f_{\text{MM}}(\text{PO}_4, K_{\text{BacTake},m}^{\text{P}}) \right)$	(E74)	$K_{\text{BacTake},m}^{\text{ADOC}} \quad K_{\text{BacTake},m}^{\text{N}} \quad K_{\text{BacTake},m}^{\text{P}}$
・呼吸	$B_{\text{BacResp},m} = (1 - e_{\text{BAC},m}) \cdot B_{\text{BacTake},m}^{\text{C}}$	(E75)	$e_{\text{BAC},m}$
・自然死亡	$B_{\text{PzLoss},n} = f_{\text{temp}}(\alpha_{\text{BacLoss},m}, \beta_{\text{BacLoss},m}) \cdot (\text{BAC}_m)^2$	(E76)	$\alpha_{\text{BacLoss},m} \quad \beta_{\text{BacLoss},m}$
・NH <sub>4</sub> の摂取	$B_{\text{BacTake},m}^{\text{NH}_4} = \text{NH}_4 / (\text{NH}_4 + \text{NO}_2 + \text{NO}_3) \cdot N_c^{\text{BAC},m} \cdot B_{\text{BacTake},m}^{\text{C}}$	(E77)	$N_c^{\text{BAC},m}$
・NO <sub>2</sub> の摂取	$B_{\text{BacTake},m}^{\text{NO}_2} = \text{NO}_2 / (\text{NH}_4 + \text{NO}_2 + \text{NO}_3) \cdot N_c^{\text{BAC},m} \cdot B_{\text{BacTake},m}^{\text{C}}$	(E78)	
・NO <sub>3</sub> の摂取	$B_{\text{BacTake},m}^{\text{NO}_3} = \text{NO}_3 / (\text{NH}_4 + \text{NO}_2 + \text{NO}_3) \cdot N_c^{\text{BAC},m} \cdot B_{\text{BacTake},m}^{\text{C}}$	(E79)	
・PO <sub>4</sub> の摂取	$B_{\text{BacTake},m}^{\text{PO}_4} = p_c^{\text{BAC},m} \cdot B_{\text{BacTake},m}^{\text{C}}$	(E80)	$p_c^{\text{BAC},m}$
・POC の分解	$B_{\text{PomDecA},k,m}^{\text{C}} = \mu_{\text{DecA},k,m} \cdot u_{\text{BacDo}} \cdot \text{POC}_k \cdot \text{BAC}_m$	(E81)	
・PON の分解	$B_{\text{PomDecA},k,m}^{\text{N}} = \mu_{\text{DecA},k,m} \cdot u_{\text{BacDo}} \cdot \text{PON}_k \cdot \text{BAC}_m$	(E82)	
・POP の分解	$B_{\text{PomDecA},k,m}^{\text{P}} = \mu_{\text{DecA},k,m} \cdot u_{\text{BacDo}} \cdot \text{POP}_k \cdot \text{BAC}_m$	(E83)	
・DOC の分解	$B_{\text{DomDecA},k,m}^{\text{C}} = \mu_{\text{DecA},k,m} \cdot u_{\text{BacDo}} \cdot \text{DOC}_k \cdot \text{BAC}_m$	(E84)	
・DON の分解	$B_{\text{DomDecA},k,m}^{\text{N}} = \mu_{\text{DecA},k,m} \cdot u_{\text{BacDo}} \cdot \text{DON}_k \cdot \text{BAC}_m$	(E85)	
・DOP の分解	$B_{\text{DomDecA},k,m}^{\text{P}} = \mu_{\text{DecA},k,m} \cdot u_{\text{BacDo}} \cdot \text{DOP}_k \cdot \text{BAC}_m$	(E86)	
最大分解速度	$\mu_{\text{DecA},k,m} = f_{\text{temp}}(\alpha_{\text{DecA},m,k}, \beta_{\text{BAC},m})$	(E87)	$\alpha_{\text{DecA},m,k}$

### A3.5 脱窒菌 脱窒菌はバイオマスを取り扱わない

・NO <sub>3</sub> の摂取	$B_{DnbTake}^{NO_3} = f_{temp}(\alpha_{DnbTake}, \beta_{Dnb}) \cdot u_{DnbTake} \cdot u_{DnbDo}$	(E88)	$\alpha_{DnbTake}$	$\beta_{Dnb}$
摂取の酸素制限	$u_{DnbDo} = \begin{cases} 1 & (DO > DO_{DnbDo}) \\ 0 & (DO \leq DO_{DnbDo}) \end{cases}$	(E89)	$DO_{DnbDo}$	
摂取の栄養塩制限	$u_{BacTake} = \min \begin{cases} f_{MM}(ADOC, K_{DnbTake}^{ADOC}) \\ f_{MM}(NO_3, K_{DnbTake}^N) \\ f_{MM}(PO_4, K_{DnbTake}^P) \end{cases}$	(E90)	$K_{DnbTake}^{ADOC}$ $K_{DnbTake}^N$ $K_{DnbTake}^P$	
・ADOCの摂取	$B_{DnbTake}^C = 1/N_C^{DNB} \cdot B_{DnbTake}^{NO_3}$	(E91)	$N_C^{DNB}$	

### A3.6 嫌気性細菌(脱窒菌を含む)による有機物の分解 嫌気性細菌はバイオマスを取り扱わない

・POCの分解	$B_{PomDecB,k,m}^C = \mu_{DecB,k} \cdot f_{MM}(POC_k, K_{PomDecB}^{POC}) \cdot u_{DecDo}$	(E92)		
・PONの分解	$B_{PomDecB,k,m}^N = \mu_{DecB,k} \cdot f_{MM}(PON_k, K_{PomDecB}^{PON}) \cdot u_{DecDo} \cdot N_C^{DECB}$	(E93)		
・POPの分解	$B_{PomDecB,k,m}^P = \mu_{DecB,k} \cdot f_{MM}(POP_k, K_{PomDecB}^{POP}) \cdot u_{DecDo} \cdot P_C^{DECB}$	(E94)		
・DOCの分解	$B_{DomDecB,k,m}^C = \mu_{DecB,k} \cdot f_{MM}(DOC_k, K_{DomDecB}^{DOC}) \cdot u_{DecDo}$	(E95)		
・DONの分解	$B_{DomDecB,k,m}^N = \mu_{DecB,k} \cdot f_{MM}(DON_k, K_{DomDecB}^{DON}) \cdot u_{DecDo} \cdot N_C^{DECB}$	(E96)		
・DOPの分解	$B_{DomDecB,k,m}^P = \mu_{DecB,k} \cdot f_{MM}(DOP_k, K_{DomDecB}^{DOP}) \cdot u_{DecDo} \cdot P_C^{DECB}$	(E97)		
最大分解速度	$\mu_{DecB,k} = f_{temp}(\alpha_{DecB,k}, \beta_{DecB})$	(E98)	$\alpha_{DecB,k}$	$\beta_{DecB}$
摂取の酸素制限	$u_{DecbDo} = \begin{cases} 0 & (DO > DO_{DecbDo}) \\ 1 & (DO \leq DO_{DecbDo}) \end{cases}$	(E99)	$DO_{DecbDo}$	

### A3.7 懸濁態有機物

#### (1) 懸濁態有機物(炭素) POC[molC・m<sup>-3</sup>]

$$S_{POC,k}[\text{molC} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}] = (\text{PHYの死亡E15}) + (\text{ZOOの死亡E49}) + (\text{PZの死亡E70}) + (\text{BACの死亡E76}) \\ + (\text{ZOOの排糞・残滓E101}) + (\text{PZの排糞・残滓E105}) - (\text{BACによる分解E81}) - (\text{嫌気性細菌による分解E92}) - (\text{沈降E109}) \\ = \sum_i^{N_{PHY}} C_{PHY,i}^{dec,k} \cdot B_{PHYLoss,i} + \sum_j^{N_{ZOO}} C_{ZOO,j}^{dec,k} \cdot B_{ZooLoss,j} + \sum_n^{N_{PZ}} C_{PZ,n}^{dec,k} \cdot B_{PzLoss,n} + \sum_m^{N_{BAC}} C_{BAC,m}^{dec,k} \cdot \alpha_{BacPom,m} \cdot B_{BacLoss,m} \\ + \sum_j^{N_{ZOO}} K_{ZooExc,j} \cdot B_{ZooExc,j}^{net,C} + \sum_n^{N_{PZ}} K_{PzExc,n} \cdot B_{PzExc,n}^{net,C} - \sum_m^{N_{BAC}} B_{PomDecA,k,m}^C - B_{PomDecB,k}^C - B_{PocSett,k} \quad (E100)$$

・ZOOの排糞・残滓と捕食調整の合計	$B_{ZooExc,j,k}^{net,C} = B_{ZooExc,j,k} + \sum_i^{N_{PHY}} C_{PHY,i}^{dec,k} \cdot \Delta B_{Phy2Zoo,i,j}^{rem,C} + \sum_n^{N_{PZ}} C_{PZ,n}^{dec,k} \cdot \Delta B_{Pz2Zoo,n,j}^{rem,C} + \sum_m^{N_{BAC}} C_{BAC,m}^{dec,k} \cdot \Delta B_{Bac2Zoo,m,j}^{rem,C}$	(E101)	$C_{PHY,i}^{dec,k}$ $C_{PZ,n}^{dec,k}$ $C_{BAC,m}^{dec,k}$
PHY捕食時の調整	$\Delta B_{Phy2Zoo,i,j}^{rem,C} = \Delta B_{Phy2Zoo,i,j}^{cut}$	(E102)	
PZ捕食時の調整	$\Delta B_{Pz2Zoo,n,j}^{rem,C} = \Delta B_{Pz2Zoo,n,j}^{cut}$	(E103)	
BAC捕食時の調整	$\Delta B_{Bac2Zoo,m,j}^{rem,C} = \Delta B_{Bac2Zoo,m,j}^{cut}$	(E104)	
・PZの排糞・残滓と捕食調整の合計	$B_{PzExc,n,k}^{net,C} = B_{PzExc,n,k} + \sum_i^{N_{PHY}} C_{PHY,i}^{dec,k} \cdot \Delta B_{Phy2Pz,i,n}^{rem,C} + \sum_{n'}^{N_{PZ}} C_{PZ,n'}^{dec,k} \cdot \Delta B_{Pz2Pz,n',n}^{rem,C} + \sum_m^{N_{BAC}} C_{BAC,m}^{dec,k} \cdot \Delta B_{Bac2Pz,m,n}^{rem,C}$	(E105)	$C_{PHY,i}^{dec,k}$ $C_{PZ,n'}^{dec,k}$ $C_{BAC,m}^{dec,k}$
PHY捕食時の調整	$\Delta B_{Phy2Pz,i,n}^{rem,C} = \Delta B_{Phy2Pz,i,n}^{cut}$	(E106)	
PZ捕食時の調整	$\Delta B_{Pz2Pz,n',n}^{rem,C} = \Delta B_{Pz2Pz,n',n}^{cut}$	(E107)	
BAC捕食時の調整	$\Delta B_{Bac2Pz,m,n}^{rem,C} = \Delta B_{Bac2Pz,m,n}^{cut}$	(E108)	
・沈降	$B_{PocSett,k} = W_{POM,k} \cdot \partial POC_k / \partial z$	(E109)	$W_{POM,k}$

#### (2) 懸濁態有機物(窒素) PON[molN・m<sup>-3</sup>]

$$S_{PON,k}[\text{molN} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}] = (\text{PHYの死亡E15}) + (\text{ZOOの死亡E49}) + (\text{PZの死亡E70}) + (\text{BACの死亡E76}) \\ + (\text{ZOOの排糞・残滓E111}) + (\text{PZの排糞・残滓E115}) - (\text{BACによる分解E82}) - (\text{嫌気性細菌による分解E93}) - (\text{沈降E119}) \\ = \sum_i^{N_{PHY}} C_{PHY,i}^{dec,k} \cdot N_C^{PHY,i} \cdot B_{PHYLoss,i} + \sum_j^{N_{ZOO}} C_{ZOO,j}^{dec,k} \cdot N_C^{ZOO,j} \cdot B_{ZooLoss,j} + \sum_n^{N_{PZ}} C_{PZ,n}^{dec,k} \cdot N_C^{PZ,n} \cdot B_{PzLoss,n} - \sum_m^{N_{BAC}} B_{PomDecA,k,m}^N \\ + \sum_m^{N_{BAC}} C_{BAC,m}^{dec,k} \cdot \alpha_{BacPom,m} \cdot N_C^{BAC,m} \cdot B_{BacLoss,m} + \sum_j^{N_{ZOO}} K_{ZooExc,j} \cdot B_{ZooExc,j}^{net,N} + \sum_n^{N_{PZ}} K_{PzExc,n} \cdot B_{PzExc,n}^{net,N} - B_{PomDecB,k}^N - B_{PonSett,k}$$

・ZOOの排糞・残滓と捕食調整の合計	$B_{ZooExc,j,k}^{net,N} = N_C^{ZOO,j} \cdot B_{ZooExc,j,k} + \sum_i^{N_{PHY}} C_{PHY,i}^{dec,k} \cdot \Delta B_{Phy2Zoo,i,j}^{rem,N} + \sum_n^{N_{PZ}} C_{PZ,n}^{dec,k} \cdot \Delta B_{Pz2Zoo,n,j}^{rem,N} + \sum_m^{N_{BAC}} C_{BAC,m}^{dec,k} \cdot \Delta B_{Bac2Zoo,m,j}^{rem,N}$	(E111)	$N_C^{ZOO,j}$ $C_{PZ,n}^{dec,k}$ $C_{BAC,m}^{dec,k}$
PHY捕食時の調整	$\Delta B_{Phy2Zoo,i,j}^{rem,N} = (N_C^{PHY,i} - N_C^{ZOO,j}) \cdot B_{Phy2Zoo,i,j} - N_C^{ZOO,j} \cdot \Delta B_{Phy2Zoo,i,j}^{cut}$	(E112)	$N_C^{PHY,i}$ $N_C^{ZOO,j}$
PZ捕食時の調整	$\Delta B_{Pz2Zoo,n,j}^{rem,N} = (N_C^{PZ,n} - N_C^{ZOO,j}) \cdot B_{Pz2Zoo,n,j} - N_C^{ZOO,j} \cdot \Delta B_{Pz2Zoo,n,j}^{cut}$	(E113)	$N_C^{PZ,n}$ $N_C^{ZOO,j}$
BAC捕食時の調整	$\Delta B_{Bac2Zoo,m,j}^{rem,N} = (N_C^{BAC,m} - N_C^{ZOO,j}) \cdot B_{Bac2Zoo,m,j} - N_C^{ZOO,j} \cdot \Delta B_{Bac2Zoo,m,j}^{cut}$	(E114)	
・PZの排糞・残滓と捕食調整の合計	$B_{PzExc,n,k}^{net,N} = N_C^{PZ,n} \cdot B_{PzExc,n,k} + \sum_i^{N_{PHY}} C_{PHY,i}^{dec,k} \cdot \Delta B_{Phy2Pz,i,n}^{rem,N} + \sum_{n'}^{N_{PZ}} C_{PZ,n'}^{dec,k} \cdot \Delta B_{Pz2Pz,n',n}^{rem,N} + \sum_m^{N_{BAC}} C_{BAC,m}^{dec,k} \cdot \Delta B_{Bac2Pz,m,n}^{rem,N}$	(E115)	$C_{PZ,n'}^{dec,k}$
PHY捕食時の調整	$\Delta B_{Phy2Pz,i,n}^{rem,N} = (N_C^{PHY,i} - N_C^{PZ,n}) \cdot B_{Phy2Pz,i,n} - N_C^{PZ,n} \cdot \Delta B_{Phy2Pz,i,n}^{cut}$	(E116)	
PZ捕食時の調整	$\Delta B_{Pz2Pz,n',n}^{rem,N} = (N_C^{PZ,n'} - N_C^{PZ,n}) \cdot B_{Pz2Pz,n',n} - N_C^{PZ,n} \cdot \Delta B_{Pz2Pz,n',n}^{cut}$	(E117)	
BAC捕食時の調整	$\Delta B_{Bac2Pz,m,n}^{rem,N} = (N_C^{BAC,m} - N_C^{PZ,n}) \cdot B_{Bac2Pz,m,n} - N_C^{PZ,n} \cdot \Delta B_{Bac2Pz,m,n}^{cut}$	(E118)	



・沈降

$$B_{\text{PonSett},k} = w_{\text{POM},k} \cdot \partial \text{PON}_k / \partial z$$

$$(E119) \quad w_{\text{POM},k}$$

### (3) 懸濁態有機物(リン) POP[molP・m<sup>-3</sup>]

$$\begin{aligned} S_{\text{POP},k}[\text{molP} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}] &= (\text{PHY の死亡 E15}) + (\text{ZOO の死亡 E49}) + (\text{PZ の死亡 E70}) + (\text{BAC の死亡 E76}) \\ &+ (\text{ZOO の排糞・残滓 E121}) + (\text{PZ の排糞・残滓 E125}) - (\text{BAC による分解 E83}) - (\text{嫌気性細菌による分解 E94}) - (\text{沈降 E129}) \\ &= \sum_i^{N_{\text{PHY}}} c_{\text{PHY},i}^{\text{dec},k} \cdot p_c^{\text{PHY},i} \cdot B_{\text{PhyLoss},i} + \sum_j^{N_{\text{ZOO}}} c_{\text{ZOO},j}^{\text{dec},k} \cdot p_c^{\text{ZOO},j} \cdot B_{\text{ZooLoss},j} + \sum_n^{N_{\text{PZ}}} c_{\text{PZ},n}^{\text{dec},k} \cdot p_c^{\text{PZ},n} \cdot B_{\text{PzLoss},n} \\ &+ \sum_m^{N_{\text{BAC}}} c_{\text{BAC},m}^{\text{dec},k} \cdot \alpha_{\text{BacPom},m} \cdot p_c^{\text{BAC},m} \cdot B_{\text{BacLoss},m} + \sum_j^{N_{\text{ZOO}}} \kappa_{\text{ZooExc},j} \cdot B_{\text{ZooExc},j,k}^{\text{net,P}} + \sum_n^{N_{\text{PZ}}} \kappa_{\text{PzExc},n} \cdot B_{\text{PzExc},n,k}^{\text{net,P}} \\ &- \sum_m^{N_{\text{BAC}}} B_{\text{PomDecA},k,m}^{\text{P}} - B_{\text{PomDecB},k}^{\text{P}} - B_{\text{PopSett},k} \end{aligned} \quad (E120)$$

・ZOO の排糞・残滓と 捕食調整の合計	$B_{\text{ZooExc},j,k}^{\text{net,P}} = p_c^{\text{ZOO},j} \cdot B_{\text{ZooExc},j,k} + \sum_i^{N_{\text{PHY}}} c_{\text{PHY},i}^{\text{dec},k} \cdot \Delta B_{\text{Phy2Zoo},i,j}^{\text{rem,P}} + \sum_n^{N_{\text{PZ}}} c_{\text{PZ},n}^{\text{dec},k} \cdot \Delta B_{\text{Pz2Zoo},n,j}^{\text{rem,P}} + \sum_m^{N_{\text{BAC}}} c_{\text{BAC},m}^{\text{dec},k} \cdot \Delta B_{\text{Bac2Zoo},m,j}^{\text{rem,P}}$	(E121)	$p_c^{\text{ZOO},j}$ $c_{\text{PHY},i}^{\text{dec},k}$ $c_{\text{PZ},n}^{\text{dec},k}$ $c_{\text{BAC},m}^{\text{dec},k}$
PHY 捕食時の調整	$\Delta B_{\text{Phy2Zoo},i,j}^{\text{rem,P}} = (p_c^{\text{PHY},i} - p_c^{\text{ZOO},j}) \cdot B_{\text{Phy2Zoo},i,j} - p_c^{\text{ZOO},j} \cdot \Delta B_{\text{Phy2Zoo},i,j}^{\text{cut}}$	(E122)	$p_c^{\text{PHY},i}$
PZ 捕食時の調整	$\Delta B_{\text{Pz2Zoo},n,j}^{\text{rem,P}} = (p_c^{\text{PZ},n} - p_c^{\text{ZOO},j}) \cdot B_{\text{Pz2Zoo},n,j} - p_c^{\text{ZOO},j} \cdot \Delta B_{\text{Pz2Zoo},n,j}^{\text{cut}}$	(E123)	$p_c^{\text{PZ},n}$
BAC 捕食時の調整	$\Delta B_{\text{Bac2Zoo},m,j}^{\text{rem,P}} = (p_c^{\text{BAC},m} - p_c^{\text{ZOO},j}) \cdot B_{\text{Bac2Zoo},m,j} - p_c^{\text{ZOO},j} \cdot \Delta B_{\text{Bac2Zoo},m,j}^{\text{cut}}$	(E124)	$p_c^{\text{BAC},m}$
・PZ の排糞・残滓と 捕食調整の合計	$B_{\text{PzExc},n,k}^{\text{net,P}} = p_c^{\text{PZ},n} \cdot B_{\text{PzExc},n,k} + \sum_i^{N_{\text{PHY}}} c_{\text{PHY},i}^{\text{dec},k} \cdot \Delta B_{\text{Phy2Pz},i,n}^{\text{rem,P}} + \sum_m^{N_{\text{BAC}}} c_{\text{BAC},m}^{\text{dec},k} \cdot \Delta B_{\text{Bac2Pz},m,n}^{\text{rem,P}}$	(E125)	$c_{\text{PZ},n'}^{\text{dec},k}$
PHY 捕食時の調整	$\Delta B_{\text{Phy2Pz},i,n}^{\text{rem,P}} = (p_c^{\text{PHY},i} - p_c^{\text{PZ},n}) \cdot B_{\text{Phy2Pz},i,n} - p_c^{\text{PZ},n} \cdot \Delta B_{\text{Phy2Pz},i,n}^{\text{cut}}$	(E126)	
PZ 捕食時の調整	$\Delta B_{\text{Pz2Pz},n',n}^{\text{rem,P}} = (p_c^{\text{PZ},n'} - p_c^{\text{PZ},n}) \cdot B_{\text{Pz2Pz},n',n} - p_c^{\text{PZ},n} \cdot \Delta B_{\text{Pz2Pz},n',n}^{\text{cut}}$	(E127)	
BAC 捕食時の調整	$\Delta B_{\text{Bac2Pz},m,n}^{\text{rem,P}} = (p_c^{\text{BAC},m} - p_c^{\text{PZ},n}) \cdot B_{\text{Bac2Pz},m,n} - p_c^{\text{PZ},n} \cdot \Delta B_{\text{Bac2Pz},m,n}^{\text{cut}}$	(E128)	
・沈降	$B_{\text{PopSett},k} = w_{\text{POM},k} \cdot \partial \text{POP}_k / \partial z$	(E129)	$w_{\text{POM},k}$

POC,PON,POR,DOC,DON,DOP 共通パラメーター:  $\alpha_{\text{BacPom},m}$   $\kappa_{\text{ZooExc},j}$   $\kappa_{\text{PzExc},n}$

## A3.8 溶存態有機物

### (1) 溶存態有機物(炭素) DOC[molC・m<sup>-3</sup>]

$$\begin{aligned} S_{\text{POC},k}[\text{molC} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}] &= (\text{PHY の細胞外分泌 E13}) + (\text{ZOO の正味の排糞・残滓 E101}) + (\text{PZ の正味の排糞・残滓 E105}) \\ &+ (\text{BAC の死亡 E76}) + (\text{BAC による POC 分解 E81}) + (\text{嫌気性細菌による POC 分解 E92}) \\ &- (\text{BAC による DOC 分解 E84}) - (\text{嫌気性細菌による DOC 分解 E95}) \\ &= \sum_i^{N_{\text{PHY}}} c_{\text{PHY},i}^{\text{dec},k} \cdot B_{\text{PhyExt},i} + \sum_j^{N_{\text{ZOO}}} (1 - \kappa_{\text{ZooExc},j}) \cdot B_{\text{ZooExc},j,k}^{\text{net,C}} + \sum_n^{N_{\text{PZ}}} (1 - \kappa_{\text{PzExc},n}) \cdot B_{\text{PzExc},n,k}^{\text{net,C}} \\ &+ \sum_m^{N_{\text{BAC}}} c_{\text{BAC},m}^{\text{dec},k} \cdot (1 - \alpha_{\text{BacPom},m}) \cdot B_{\text{BacLoss},m} + \sum_m^{N_{\text{BAC}}} \kappa_{\text{DecA},k} \cdot B_{\text{PomDecA},k,m}^{\text{C}} + \kappa_{\text{DecB},k} \cdot B_{\text{PomDecB},k}^{\text{C}} \\ &- \sum_m^{N_{\text{BAC}}} B_{\text{DomDecA},k,m}^{\text{C}} - B_{\text{DomDecB},k}^{\text{C}} \end{aligned} \quad (E130)$$

DOC,ADOC 共通パラメーター:  $\kappa_{\text{ZooExc},j}$   $\kappa_{\text{PzExc},n}$   $\kappa_{\text{DecA},k}$   $\kappa_{\text{DecB},k}$   $\alpha_{\text{BacPom},m}$

### (2) 溶存態有機物(窒素) DON[molN・m<sup>-3</sup>]

$$\begin{aligned} S_{\text{PON},k}[\text{molN} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}] &= (\text{PHY の細胞外分泌 E9}) + (\text{ZOO の正味の排糞・残滓 E112}) + (\text{PZ の正味の排糞・残滓 E116}) \\ &+ (\text{BAC の死亡 E76}) + (\text{BAC による PON 分解 E82}) + (\text{嫌気性細菌による PON 分解 E93}) \\ &- (\text{BAC による DON 分解 E85}) - (\text{嫌気性細菌による DON 分解 E96}) \\ &= \sum_i^{N_{\text{PHY}}} c_{\text{PHY},i}^{\text{dec},k} \cdot N_c^{\text{PHY},i} \cdot B_{\text{PhyExt},i} + \sum_j^{N_{\text{ZOO}}} (1 - \kappa_{\text{ZooExc},j}) \cdot B_{\text{ZooExc},j,k}^{\text{net,N}} + \sum_n^{N_{\text{PZ}}} (1 - \kappa_{\text{PzExc},n}) \cdot B_{\text{PzExc},n,k}^{\text{net,N}} \\ &+ \sum_m^{N_{\text{BAC}}} c_{\text{BAC},m}^{\text{dec},k} \cdot N_c^{\text{BAC},m} \cdot (1 - \alpha_{\text{BacPom},m}) \cdot B_{\text{BacLoss},m} + \sum_m^{N_{\text{BAC}}} \kappa_{\text{DecA},k} \cdot B_{\text{DomDecA},k,m}^{\text{N}} + \kappa_{\text{DecB},k} \cdot B_{\text{DomDecB},k}^{\text{N}} \\ &- \sum_m^{N_{\text{BAC}}} B_{\text{DomDecA},k,m}^{\text{N}} - B_{\text{DomDecB},k}^{\text{N}} \end{aligned} \quad (E131)$$

### (3) 溶存態有機物(窒素) DOP[molP・m<sup>-3</sup>]

$$\begin{aligned} S_{\text{POP},k}[\text{molP} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}] &= (\text{PHY の細胞外分泌 E9}) + (\text{ZOO の正味の排糞・残滓 E122}) + (\text{PZ の正味の排糞・残滓 E126}) \\ &+ (\text{BAC の死亡 E76}) + (\text{BAC による POP 分解 E83}) + (\text{嫌気性細菌による POP 分解 E94}) \\ &- (\text{BAC による DOP 分解 E86}) - (\text{嫌気性細菌による DOP 分解 E97}) \\ &= \sum_i^{N_{\text{PHY}}} c_{\text{PHY},i}^{\text{dec},k} \cdot p_c^{\text{PHY},i} \cdot B_{\text{PhyExt},i} + \sum_j^{N_{\text{ZOO}}} (1 - \kappa_{\text{ZooExc},j}) \cdot B_{\text{ZooExc},j,k}^{\text{net,P}} + \sum_n^{N_{\text{PZ}}} (1 - \kappa_{\text{PzExc},n}) \cdot B_{\text{PzExc},n,k}^{\text{net,P}} \\ &+ \sum_m^{N_{\text{BAC}}} c_{\text{BAC},m}^{\text{dec},k} \cdot p_c^{\text{BAC},m} \cdot (1 - \alpha_{\text{BacPom},m}) \cdot B_{\text{BacLoss},m} + \sum_m^{N_{\text{BAC}}} \kappa_{\text{DecA},k} \cdot B_{\text{DomDecA},k,m}^{\text{P}} + \kappa_{\text{DecB},k} \cdot B_{\text{DomDecB},k}^{\text{P}} \\ &- \sum_m^{N_{\text{BAC}}} B_{\text{DomDecA},k,m}^{\text{P}} - B_{\text{DomDecB},k}^{\text{P}} \end{aligned} \quad (E132)$$

### (4) ADOC ADOC[molC・m<sup>-3</sup>]

$$\begin{aligned} S_{\text{ADOC},k}[\text{molC} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}] &= (\text{BAC による POC 分解 E81}) + (\text{嫌気性細菌による POC 分解 E92}) \\ &+ (\text{BAC による DOC 分解 E84}) + (\text{嫌気性細菌による DOC 分解 E95}) \\ &+ (\text{BAC による摂取 E72}) + (\text{脱窒菌による摂取 E91}) \\ &= \sum_k^{N_{\text{BAC}}} \sum_k^{N_{\text{DEC}}} (1 - \kappa_{\text{DecA},k}) \cdot B_{\text{PomDecA},k,m}^{\text{C}} + \sum_k^{N_{\text{DEC}}} (1 - \kappa_{\text{DecB},k}) \cdot B_{\text{PomDecB},k}^{\text{D}} \\ &+ \sum_m^{N_{\text{BAC}}} \sum_k^{N_{\text{DEC}}} B_{\text{DomDecA},k,m}^{\text{C}} + \sum_k^{N_{\text{DEC}}} B_{\text{DomDecB},k}^{\text{C}} \\ &- \sum_m^{N_{\text{BAC}}} B_{\text{BacTake},m}^{\text{C}} - B_{\text{DnbTake}}^{\text{C}} \end{aligned} \quad (E133)$$

### A3.9 無機態窒素

#### (1) 窒素(アンモニア) $\text{NH}_4[\text{molN} \cdot \text{m}^{-3}]$

$$\begin{aligned}
 S_{\text{NH}_4}[\text{molN} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}] &= (\text{PHY の呼吸 E14}) + (\text{SQN の減少 E26}) - (\text{PHY による摂取 E20}) \\
 &\quad + (\text{ZOO の呼吸 E48}) + (\text{PZ の呼吸 E69}) + (\text{BAC の呼吸 E75}) - (\text{BAC による摂取 E77}) \\
 &\quad + (\text{BAC による PON の分解 E82}) + (\text{BAC による DON の分解 E85}) \\
 &\quad + (\text{嫌気性細菌による PON の分解 E93}) + (\text{嫌気性細菌による DON の分解 E96}) - (\text{NH}_4 \text{の酸化 E135}) \\
 &= \sum_i^{\text{NPHY}} N_c^{\text{PHY},i} \cdot B_{\text{PhyResp},i} + \sum_i^{\text{NPHY}} B_{\text{SqnLoss},i} - \sum_i^{\text{NPHY}} B_{\text{PhyTake},i}^{\text{NH}_4} \\
 &\quad + \sum_j^{\text{NZOO}} N_c^{\text{ZOO},j} \cdot B_{\text{ZooResp},j} + \sum_n^{\text{NPZ}} N_c^{\text{PZ},n} \cdot B_{\text{PzResp},n} + \sum_m^{\text{NBAC}} N_c^{\text{BAC},m} \cdot B_{\text{BacResp},m} - \sum_m^{\text{NBAC}} B_{\text{BacTake},m}^{\text{NH}_4} \\
 &\quad + \sum_m^{\text{NBAC}} \sum_k^{\text{NDEC}} (1 - \kappa_{\text{DecA},k}) \cdot B_{\text{PomDecB},k}^{\text{N}} + \sum_m^{\text{NBAC}} \sum_k^{\text{NDEC}} B_{\text{DomDecA},k,m}^{\text{N}} \\
 &\quad + \sum_k^{\text{NDEC}} (1 - \kappa_{\text{DecA},k}) B_{\text{PomDecB},k}^{\text{N}} + \sum_k^{\text{NDEC}} B_{\text{DomDecB},k}^{\text{N}} - B_{\text{NH}_4,2\text{NO}_2}
 \end{aligned} \tag{E134}$$

・ $\text{NH}_4$ の酸化	$B_{\text{NH}_4,2\text{NO}_3} = f_{\text{temp}}(\alpha_{\text{NH}_4,2\text{NO}_3}, \beta_{\text{NH}_4,2\text{NO}_3}) \cdot f_{\text{MM}}(\text{DO}, K_{\text{DO},\text{NH}_4,2\text{NO}_2}) \cdot \text{NH}_4$	(E135)	$\alpha_{\text{NH}_4,2\text{NO}_3} \quad \beta_{\text{NH}_4,2\text{NO}_3}$ $K_{\text{DO},\text{NH}_4,2\text{NO}_2}$
---------------------	--	--------	--

#### (2) 窒素(亜硝酸) $\text{NO}_2[\text{molN} \cdot \text{m}^{-3}]$

$$\begin{aligned}
 S_{\text{NO}_2}[\text{molN} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}] &= -(\text{PHY による摂取 E21}) - (\text{BAC による摂取 E78}) + (\text{NH}_4 \text{の酸化 E135}) - (\text{NO}_2 \text{の酸化 E137}) \\
 &= -\sum_i^{\text{NPHY}} B_{\text{PhyTake},i}^{\text{NO}_2} - \sum_m^{\text{NBAC}} B_{\text{BacTake},m}^{\text{NO}_2} + B_{\text{NH}_4,2\text{NO}_3} - B_{\text{NO}_2,2\text{NO}_3}
 \end{aligned} \tag{E136}$$

・ $\text{NO}_2$ の酸化	$B_{\text{NO}_2,2\text{NO}_3} = f_{\text{temp}}(\alpha_{\text{NO}_2,2\text{NO}_3}, \beta_{\text{NO}_2,2\text{NO}_3}) \cdot f_{\text{MM}}(\text{DO}, K_{\text{DO},\text{NO}_2,2\text{NO}_2}) \cdot \text{NO}_2$	(E137)	$\alpha_{\text{NO}_2,2\text{NO}_3} \quad \beta_{\text{NO}_2,2\text{NO}_3}$ $K_{\text{DO},\text{NO}_2,2\text{NO}_2}$
---------------------	--	--------	--

#### (3) 窒素(硝酸) $\text{NO}_3[\text{molN} \cdot \text{m}^{-3}]$

$$\begin{aligned}
 S_{\text{NO}_3}[\text{molN} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}] &= -(\text{PHY による摂取 E22}) - (\text{BAC による摂取 E79}) + (\text{NO}_2 \text{の酸化 E137}) - (\text{脱窒菌による摂取 E88}) \\
 &= -\sum_i^{\text{NPHY}} B_{\text{PhyTake},i}^{\text{NO}_3} - \sum_m^{\text{NBAC}} B_{\text{BacTake},m}^{\text{NO}_3} + B_{\text{NO}_2,2\text{NO}_3} - B_{\text{DnbTake}}^{\text{NO}_3}
 \end{aligned} \tag{E138}$$

### A3.10 リン酸 $\text{PO}_4[\text{molP} \cdot \text{m}^{-3}]$

$$\begin{aligned}
 S_{\text{PO}_4}[\text{molP} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}] &= (\text{PHY の呼吸 E14}) + (\text{SQP の減少 E30}) - (\text{PHY による摂取 E28}) \\
 &\quad + (\text{ZOO の呼吸 E48}) + (\text{PZ の呼吸 E69}) + (\text{BAC の呼吸 E75}) - (\text{BAC による摂取 E80}) \\
 &\quad + (\text{BAC による POP の分解 E83}) + (\text{BAC による DOP の分解 E86}) \\
 &\quad + (\text{嫌気性細菌による POP の分解 E94}) + (\text{嫌気性細菌による DOP の分解 E97}) \\
 &= \sum_i^{\text{NPHY}} P_c^{\text{PHY},i} \cdot B_{\text{PhyResp},i} + \sum_i^{\text{NPHY}} B_{\text{SqpLoss},i} - \sum_i^{\text{NPHY}} B_{\text{PhyTake},i}^{\text{PO}_4} \\
 &\quad + \sum_j^{\text{NZOO}} P_c^{\text{ZOO},j} \cdot B_{\text{ZooResp},j} + \sum_n^{\text{NPZ}} P_c^{\text{PZ},n} \cdot B_{\text{PzResp},n} + \sum_m^{\text{NBAC}} P_c^{\text{BAC},m} \cdot B_{\text{BacResp},m} - \sum_m^{\text{NBAC}} B_{\text{BacTake},m}^{\text{PO}_4} \\
 &\quad + \sum_m^{\text{NBAC}} \sum_k^{\text{NDEC}} (1 - \kappa_{\text{DecA},k}) \cdot B_{\text{PomDecB},k}^{\text{P}} + \sum_m^{\text{NBAC}} \sum_k^{\text{NDEC}} B_{\text{DomDecA},k,m}^{\text{P}} \\
 &\quad + \sum_k^{\text{NDEC}} (1 - \kappa_{\text{DecA},k}) B_{\text{PomDecB},k}^{\text{P}} + \sum_k^{\text{NDEC}} B_{\text{DomDecB},k}^{\text{P}}
 \end{aligned} \tag{E139}$$

### A3.11 ケイ酸 $\text{SiO}_2[\text{molSi} \cdot \text{m}^{-3}]$

$$\begin{aligned}
 S_{\text{SiO}_2}[\text{molSiO}_2 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}] &= -(\text{PHY による摂取 E6}) - (\text{沈降 E141}) \\
 &= -\sum_i^{\text{NPHY}} \text{Si}_c^{\text{PHY},i} \cdot B_{\text{PhyPs},i}^{\text{C}} - B_{\text{SiO}_2\text{Sett}}
 \end{aligned} \tag{E140}$$

・ $\text{SiO}_2$ の沈降	$B_{\text{SiO}_2\text{Sett}} = w_{\text{SiO}_2} \cdot \partial \text{SiO}_2 / \partial z$	(E141)	$w_{\text{SiO}_2}$
----------------------	---	--------	--------------------

### A3.12 硫化水素 $\text{H}_2\text{S}[\text{molS} \cdot \text{m}^{-3}]$

$$\begin{aligned}
 S_{\text{H}_2\text{S}}[\text{molS} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}] &= -(\text{酸化 E143}) \\
 &= -B_{\text{H}_2\text{SOxi}}
 \end{aligned} \tag{E142}$$

・ $\text{H}_2\text{S}$ の酸化	$B_{\text{H}_2\text{SOxi}} = f_{\text{temp}}(\alpha_{\text{H}_2\text{SOxi}}, \beta_{\text{H}_2\text{SOxi}}) \cdot f_{\text{MM}}(\text{DO}, K_{\text{H}_2\text{SOxi}}^{\text{DO}}) \cdot \text{H}_2\text{S}$	(E143)	$\alpha_{\text{H}_2\text{SOxi}} \quad \beta_{\text{H}_2\text{SOxi}}$ $K_{\text{H}_2\text{SOxi}}^{\text{DO}}$
----------------------------	---	--------	---

### A3.13 マンガン

#### (1) 溶存態マンガン( $\text{Mn}^{2+}$ ) $\text{Mn}[\text{molMn} \cdot \text{m}^{-3}]$

$$\begin{aligned} S_{\text{Mn}}[\text{molMn} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}] &= -(\text{酸化 E145}) \\ &= -B_{\text{MnOxi}} \end{aligned} \quad (\text{E144})$$

・ $\text{Mn}^{2+}$ の酸化	$B_{\text{MnOxi}} = f_{temp}(\alpha_{\text{MnOxi}}, \beta_{\text{MnOxi}}) \cdot f_{MM}(DO, K_{\text{MnOxi}}^{DO}) \cdot Mn$	(E145)	$\alpha_{\text{MnOxi}} \quad \beta_{\text{MnOxi}} \quad K_{\text{MnOxi}}^{DO}$
------------------------	---	--------	--

#### (2) 二酸化マンガン( $\text{MnO}_2$ ) $\text{Mn}[\text{molMnO}_2 \cdot \text{m}^{-3}]$

$$\begin{aligned} S_{\text{MnO}_2}[\text{molMnO}_2 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}] &= (\text{酸化 E145}) - (\text{沈降 E147}) \\ &= B_{\text{MnOxi}} - B_{\text{MnO}_2\text{Sett}} \end{aligned} \quad (\text{E146})$$

・ $\text{Mn}^{2+}$ の沈降	$B_{\text{MnO}_2\text{Sett}} = w_{\text{MnO}_2} \cdot \partial \text{MnO}_2 / \partial z$	(E147)	$w_{\text{MnO}_2}$
------------------------	---	--------	--------------------

### A3.14 鉄

#### (1) 溶存態鉄( $\text{Fe}^{2+}$ ) $\text{Fe}[\text{molFe} \cdot \text{m}^{-3}]$

$$\begin{aligned} S_{\text{Fe}}[\text{molFe} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}] &= -(\text{酸化 E149}) \\ &= -B_{\text{FeOxi}} \end{aligned} \quad (\text{E148})$$

・ $\text{Fe}^{2+}$ の沈降	$B_{\text{FeOxi}} = f_{temp}(\alpha_{\text{FeOxi}}, \beta_{\text{FeOxi}}) \cdot f_{MM}(DO, K_{\text{FeOxi}}^{DO}) \cdot Fe$	(E149)	$\alpha_{\text{FeOxi}} \quad \beta_{\text{FeOxi}} \quad K_{\text{FeOxi}}^{DO}$
------------------------	---	--------	--

#### (2) 水酸化第二鉄( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ) $\text{FeOH}_3[\text{molFeOH}_3 \cdot \text{m}^{-3}]$

$$\begin{aligned} S_{\text{FeOH}_3}[\text{molFeOH}_3 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}] &= (\text{酸化 E149}) - (\text{沈降 E151}) \\ &= B_{\text{FeOxi}} - B_{\text{FeOH}_3\text{Sett}} \end{aligned} \quad (\text{E150})$$

・ $\text{Fe}(\text{OH})_3$ の沈降	$B_{\text{FeOH}_3\text{Sett}} = w_{\text{FeOH}_3} \cdot \partial \text{FeOH}_3 / \partial z$	(E151)	$w_{\text{FeOH}_3}$
--------------------------------	--	--------	---------------------

### A3.15 溶存酸素(DO) $\text{DO}[\text{molO}_2 \cdot \text{m}^{-3}]$

$$\begin{aligned} S_{\text{DO}}[\text{molO}_2 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}] &= (\text{PHY の光合成 E6}) - (\text{PHY の呼吸 E14}) - (\text{ZOO の呼吸 E48}) \\ &\quad - (\text{PZ の呼吸 E69}) - (\text{BAC の呼吸 E75}) - (\text{NH}_4 \text{ の酸化 E135}) \\ &\quad - (\text{NO}_2 \text{ の酸化 E137}) - (\text{Mn}^{2+} \text{ の酸化 E145}) - (\text{Fe}^{2+} \text{ の酸化 E149}) - (\text{H}_2\text{S} \text{ の酸化 E143}) \\ &= \sum_i^{\text{NPHY}} \text{TOD}_C^{\text{PHY}_i} \cdot B_{\text{PhyPs},i}^C - \sum_i^{\text{NPHY}} \text{TOD}_C^{\text{PHY}_i} \cdot B_{\text{PhyResp},i} - \sum_j^{\text{NZOO}} \text{TOD}_C^{\text{ZOO}_j} \cdot B_{\text{ZooResp},j} \\ &\quad - \sum_n^{\text{NPZ}} \text{TOD}_C^{\text{PZ}_n} \cdot B_{\text{PZResp},n}^C - \sum_m^{\text{NBAC}} \text{TOD}_C^{\text{BAC}_m} \cdot B_{\text{BacResp},m} - \text{TOD}_N^{\text{NH}_4 2\text{NO}_2} \cdot B_{\text{NH}_4 2\text{NO}_2} \\ &\quad - \text{TOD}_N^{\text{NO}_2 2\text{NO}_3} \cdot B_{\text{NO}_2 2\text{NO}_3} - \text{TOD}_{\text{Mn}}^{\text{MnOxi}} \cdot B_{\text{MnOxi}} - \text{TOD}_{\text{Fe}}^{\text{FeOxi}} \cdot B_{\text{FeOxi}} \\ &\quad - \text{TOD}_S^{\text{H}_2\text{SOxi}} \cdot B_{\text{H}_2\text{SOxi}} \end{aligned} \quad (\text{E152})$$

$$\text{パラメター: } \text{TOD}_C^{\text{PHY}_i} \quad \text{TOD}_C^{\text{ZOO}_j} \quad \text{TOD}_C^{\text{PZ}_n} \quad \text{TOD}_C^{\text{BAC}_m} \quad \text{TOD}_N^{\text{NH}_4 2\text{NO}_2} \quad \text{TOD}_N^{\text{NO}_2 2\text{NO}_3} \\ \text{TOD}_{\text{Mn}}^{\text{MnOxi}} \quad \text{TOD}_{\text{Fe}}^{\text{FeOxi}} \quad \text{TOD}_S^{\text{H}_2\text{SOxi}}$$

### A3.16 海底の境界条件

#### (1) PHY のフラックス

$$J_{\text{PHY},i}^{\text{bp}}[\text{molC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}] = (\text{MSF による被食}) + (\text{底泥への沈降 J2}) = J_{\text{Phy2Msf},i} + J_{\text{Phy2Det},i} \quad (\text{J1})$$

・底泥への沈降	$J_{\text{Phy2Det},i} = \min(0, w_{\text{Phy},i}) \cdot \text{PHY}_i$	(J2)	$w_{\text{Phy},i}$
---------	---	------	--------------------

(2)SQN のフラックス

$$J_{SQN,i}^{bp} [\text{molN} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}] = (\text{PHY の減少に伴う減少 J4}) = J_{SQNLoss,i} \quad (\text{J3})$$

・PHY 減少に伴う減少	$J_{SQNLoss,i} = (J_{Phy2Msf,i} + J_{Phy2Det,i}) \cdot SQN_i / PHY_i$	(J4)	
--------------	---	------	--

(3)SQP のフラックス

$$J_{SQP,i}^{bp} [\text{molP} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}] = (\text{PHY の減少に伴う減少 J6}) = J_{SQPLoss,i} \quad (\text{J5})$$

・PHY 減少に伴う減少	$J_{SQPLoss,i} = (J_{Phy2Msf,i} + J_{Phy2Det,i}) \cdot SQP_i / PHY_i$	(J6)	
--------------	---	------	--

(4)ZOO のフラックス

$$J_{ZOO,j}^{bp} [\text{molC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}] = (\text{MSF による被食}) = J_{Zoo2Msf,j} \quad (\text{J7})$$

(5)PZ のフラックス

$$J_{PZ,n}^{bp} [\text{molC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}] = (\text{MSF による被食}) = J_{Pz2Msf,n} \quad (\text{J8})$$

(6)POC,PON,POP のフラックス

$$J_{POC,k}^{bp} [\text{molC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}] = (\text{MSF による被食}) + (\text{底泥への沈降}) = J_{POM2Msf,k} + J_{POM2Det,k} \quad (\text{J9})$$

$$J_{PON,k}^{bp} [\text{molN} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}] = (\text{MSF による被食}) + (\text{底泥への沈降}) = N_C^{MSF} \cdot J_{POM2Msf,k} + J_{POM2Det,k}^N \quad (\text{J10})$$

$$J_{POP,k}^{bp} [\text{molN} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}] = (\text{MSF による被食}) + (\text{底泥への沈降}) = P_C^{MSF} \cdot J_{POM2Msf,k} + J_{POM2Det,k}^P \quad (\text{J11})$$

・底泥への沈降	$J_{POM2Det,k}^C = \min(0, w_{POM,k}) \cdot POC_k$	(J12)	$w_{POM,k}$
	$J_{POM2Det,i}^N = \min(0, w_{POM,k}) \cdot PON_k$	(J13)	
	$J_{POM2Det,i}^P = \min(0, w_{POM,k}) \cdot POP_k$	(J14)	

(7)底泥の O<sub>2</sub> フラックス

$$J_{DO}^{sed} [\text{molO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}] = (\text{沈降フラックスに対する成分}) + (\text{定常的な成分})$$

$$= u_{DoSed} \cdot TOD_C^{POC} \cdot J_{POC}^{sed} + u_{DoSed} \cdot J_{DO,const}^{sed} \quad (\text{J15})$$

・分解される POC	$J_{POC}^{sed} = \sum_k^{N_{DEC}} f_{temp}^{sed}(\alpha_{sed,k}, \beta_{sed}) \cdot J_C^{sed,k}$	(J16)	$\alpha_{sed,k} \quad \beta_{sed}$
	$J_C^{sed,k} = J_{Pom2Det,k}^C + \sum_i^{N_{PHY}} c_{Phy,i}^{dec,k} \cdot J_{Phy2Det,i}$	(J17)	
	$f_{temp}^{sed}(\alpha_{sed,k}, \beta_{sed}) = \alpha_{sed,k} \cdot \min[1, \exp\{\beta_{sed}(T - 30)\}]$	(J18)	
	$u_{DoSed} = f_{MM}(DO, K_{DO}^{sed})$	(J19)	

パラメター:  $J_{DO,const}^{sed}$  底泥の酸素消費速度

(8)底泥の NO<sub>3</sub> フラックス(有機物の分解で消費される NO<sub>3</sub>)

$$J_{NO_3}^{sed} [\text{molN} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}] = (\text{底泥の硝酸フラックス}) = N_C^{Dec} \cdot u_{No3Sed} \cdot (1 - u_{DoSed}) \cdot J_{POC}^{sed} \quad (\text{J20})$$

硝酸制限関数	$u_{No3Sed} = f_{MM}(NO_3, K_{NO_3}^{sed})$	(J21)	$N_C^{Dec} \quad K_{NO_3}^{sed}$
--------	---	-------	----------------------------------

(9)底泥の H<sub>2</sub>S フラックス(有機物の分解で SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> が消費され、H<sub>2</sub>S が生成される)

$$J_{H_2S}^{sed} [\text{molS} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}] = (\text{底泥の硫化水素フラックス}) = S_C^{Dec} \cdot (1 - u_{No3Sed}) \cdot (1 - u_{DoSed}) \cdot (-J_{POC}^{sed}) \quad (\text{J22})$$

パラメター:  $S_C^{Dec}$  POC の分解に必要な硫化物

(10)底泥の NH<sub>4</sub> フラックス

$$J_{NH_4}^{sed} [\text{molN} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}] = (\text{底泥のアンモニアフラックス})$$

$$= \sum_k^{N_{DEC}} f_{temp}^{sed}(\alpha_{sed,k}, \beta_{sed}) \cdot (-J_N^{sed,k}) \quad (\text{J23})$$

$J_N^{sed,k} = J_{Pom2Det,k}^N + \sum_i^{N_{PHY}} c_{Phy,i}^{dec,k} \cdot (N_C^{PHY,i} \cdot J_{Phy2Det,i} + J_{SqnLoss,i})$	(J24)	
--	-------	--

(11)底泥の PO<sub>4</sub> フラックス

$$J_{PO_4}^{sed} [\text{molP} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}] = (\text{底泥のリン酸フラックス})$$

$$= \sum_k^{N_{DEC}} f_{temp}^{sed}(\alpha_{sed,k}, \beta_{sed}) \cdot (-J_P^{sed,k})$$

$$+ J_{Po4Max} \cdot \max\left(\frac{DO_{Po4Flux} - DO}{DO_{Po4Flux}}, 0\right) \quad (\text{J25})$$

$J_P^{sed,k} = J_{Pom2Det,k}^P + \sum_i^{N_{PHY}} c_{Phy,i}^{dec,k} \cdot (P_C^{PHY,i} \cdot J_{Phy2Det,i} + J_{SqnLoss,i})$	(J26)	$J_{Po4Max} \quad DO_{Po4Flux}$
--	-------	---------------------------------

### A3.17 懸濁物食者(MSF) [molC・m<sup>-2</sup>]

$$S_{MSF}[\text{molC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}] = (\text{PHY の捕食 J28}) + (\text{ZOO の捕食 J39}) + (\text{PZ の捕食 J41}) + (\text{POM の摂食 J43}) - (\text{呼吸 J45}) \\ = \sum_i^{N_{PHY}} J_{Phy2Msf,i} + \sum_j^{N_{ZOO}} J_{Zoo2Msf,j} + \sum_n^{N_{PZ}} J_{Pz2Msf,n} + \sum_k^{N_{DEC}} J_{Pom2Msf,k} - B_{MsfResp} \quad (J27)$$

・PHY の捕食 捕食速度 ろ過速度	$J_{Phy2Msf,i} = -\eta_{MSF}^{PHY,i} \cdot u_{Phy2Msf,i} \cdot R_{MSF} \quad (J28)$ $R_{MSF} = F_{MFS} \cdot \Pi_{MSF} \cdot u_{MsfFilt} \quad (J29)$ $F_{MFS} = \alpha_{MsfFeed} \cdot f_{topt}(T_{MsfOpt}, T_{MsfMax}, \beta_{MsfFeed}) \cdot u_{MsfFeed} \cdot MSF \quad (J30)$	$p_c^{PHY,i}$ $\alpha_{MsfFeed}$ $T_{MsfOpt}$ $T_{MsfMax}$ $\beta_{MsfFeed}$
飼料濃度制限関数	$u_{MsfFeed} = \min(1, \frac{\Pi_{MSF}^{max}}{\Pi_{MSF}}) \quad (J31)$	$\Pi_{MSF}^{max}$
直上水の制限関数	$u_{MsfFilt} = \min(1, \frac{\Delta V_w}{F_{MFS} \cdot \Delta S \cdot \Delta t}) \quad (J32)$	
PHY の選択率	$u_{Phy2Msf,i} = \frac{\Pi_{MSF}^{PHY,i}}{\Pi_{MSF}} \quad (J33)$	
飼料濃度	$\Pi_{MSF} = \sum_i^{N_{PHY}} \Pi_{MSF}^{PHY,i} + \sum_j^{N_{ZOO}} \Pi_{MSF}^{ZOO,j} + \sum_n^{N_{PZ}} \Pi_{MSF}^{PZ,n} + \sum_k^{N_{POM}} \Pi_{MSF}^{POM,k} \quad (J34)$	
PHY 飼料濃度	$\Pi_{MSF}^{PHY,i} = \eta_{MSF}^{PHY,i} \cdot PHY_i \cdot \min(1, \frac{N_C^{PHY,i}}{N_C^{MSF}}, \frac{p_c^{PHY,i}}{p_c^{MSF}}) \quad (J35)$	$\eta_{MSF}^{PHY,i}$ $N_C^{MSF}$
ZOO 飼料濃度	$\Pi_{MSF}^{ZOO,j} = \eta_{MSF}^{ZOO,j} \cdot ZOO_j \cdot \min(1, \frac{N_C^{ZOO,j}}{N_C^{MSF}}, \frac{p_c^{ZOO,j}}{p_c^{MSF}}) \quad (J36)$	$\eta_{MSF}^{ZOO,j}$ $p_c^{MSF}$
PZ 飼料濃度	$\Pi_{MSF}^{PZ,n} = \eta_{MSF}^{PZ,n} \cdot PZ_n \cdot \min(1, \frac{N_C^{PZ,n}}{N_C^{MSF}}, \frac{p_c^{PZ,n}}{p_c^{MSF}}) \quad (J37)$	$\eta_{MSF}^{PZ,n}$
POM 飼料濃度	$\Pi_{MSF}^{POM,k} = \min(POC_k, \frac{PON_k}{N_C^{MSF}}, \frac{POP_k}{p_c^{MSF}}) \quad (J38)$	
・ZOO の捕食	$J_{Zoo2Msf,i} = -\eta_{MSF}^{ZOO,j} \cdot u_{Zoo2Msf,j} \cdot R_{MSF} \quad (J39)$	
ZOO の選択率	$u_{Zoo2Msf,j} = \frac{\Pi_{MSF}^{ZOO,j}}{\Pi_{MSF}} \quad (J40)$	
・PZ の捕食	$J_{Pz2Msf,i} = -\eta_{MSF}^{PZ,n} \cdot u_{Pz2Msf,n} \cdot R_{MSF} \quad (J41)$	
ZOO の選択率	$u_{Pz2Msf,j} = \frac{\Pi_{MSF}^{Pz,j}}{\Pi_{MSF}} \quad (J42)$	
・POM の摂食	$J_{Pom2Msf,i} = -u_{Pom2Msf,k} \cdot R_{MSF} \quad (J43)$	
ZOO の選択率	$u_{Pz2Msf,k} = \frac{\Pi_{MSF}^{POM,k}}{\Pi_{MSF}} \quad (J44)$	
・呼吸	$B_{MsfResp} = f_{temp}(\alpha_{MsfRespR}, \beta_{Msf}) \cdot f_{MM}(DO, K_{MsfResp}^{DO}) \cdot MSF \\ + \alpha_{MsfRespA} \cdot R_{MSF} \quad (J45)$	$\alpha_{MsfRespR}$ $\beta_{Msf}$ $K_{MsfResp}^{DO}$ $\alpha_{MsfRespA}$
$\Delta V_w, \Delta S, \Delta t$ 直上水の体積[m <sup>3</sup> ], 底面の面積[m <sup>2</sup> ], 時間刻み[s]		
・呼吸時の酸素消費	$J_{MsfResp}^{O_2} = -TOD_{Msf} \cdot B_{MsfResp}^C \quad (J46)$	$TOD_{Msf}$
・呼吸時の NH <sub>4</sub> 放出	$J_{MsfResp}^N = N_C^{MSF} \cdot B_{MsfResp}^C \quad (J47)$	
・呼吸時の PO <sub>4</sub> 放出	$J_{MsfResp}^P = p_c^{MSF} \cdot B_{MsfResp}^C \quad (J48)$	

#### 参考文献:

- 1) 田中陽二・中村由行・鈴木高二郎・井上徹教・西村洋子(2011):微生物ループを考慮した浮遊生態系モデルの構築, 港湾空港技術研究所報告, 第 50 巻第 2 号, pp.3-68.

## 謝 辞

本論文のとりまとめにあたり、多くの方々から貴重なご指導とご助言を賜りました。

とりわけ、東京大学大学院 磯部雅彦教授には終始一貫して懇切丁寧なご指導を賜りました。ここに深く感謝の意を表します。

フェリーの観測にあたり、東京湾フェリー株式会社 樋口和孝取締役、黒川清和部長はじめ海務部の皆様、船長、機関長をはじめ“かなや丸”の船員の皆様には観測開始から今日に至るまで多大なご協力を頂きました。

また、フェリーの観測を開始するにあたり、港湾空港技術研究所 小和田亮元理事長、高橋重雄理事長、加藤英夫室長、竹田晃研究員にご尽力いただきました。東京湾口フェリー観測のアイディアは高橋重雄理事長の発案により開始されました。

国土交通省関東地方整備局海洋環境技術課の皆様、池上正春元所長、下司弘之元所長、諸星一信元所長、下迫健一郎元所長、米山治男元所長、亀山豊副所長をはじめ、横浜港湾空港技術調査事務所の皆様、とりわけ環境課の皆さまからはフェリー観測にご協力いただくとともに、HF レーダーや東京湾の観測船による観測データをご提供いただきました。

海上保安庁海洋情報部からは千葉灯標の観測データをご提供いただきました。

本論文のとりまとめにあたり、東京大学佐藤慎司教授、佐藤弘泰准教授、佐久間哲哉准教授、鯉渕幸生講師から貴重なご助言を頂きました。

港湾空港技術研究所 中村由行研究主監、栗山善昭特別研究官、平石哲也元部長をはじめ旧海洋・水工部長の皆様にご指導を頂きました。河合弘泰領域長、中川康之チームリーダー、桑江朝比呂チームリーダー、川口浩二チームリーダー、井上徹教上席研究官、有路隆一研究官、田中陽二研究官、福島正明係長はじめ、旧海洋開発研究室、海洋情報研究領域、沿岸環境研究領域ほか、港湾空港技術研究所の皆様から多大なご協力を頂きました。国総研古川恵太新技術研究官、日向博文室長、岡田知也室長からも貴重なご意見を頂いています。また、フェリー観測ではエス・イー・エイ、ハイドロシステム開発、CT&C の皆さまに、数値計算プログラムの開発ではみずほ情報総研、プライアコンサルタントの皆さまにご協力を頂きました。ここに記して各位に感謝の意を表します。最後に本論文が完成するまで何かと我慢を強いてきた妻理恵とみのり、みやびに感謝します。