

# 半開放性湾の水質変動モデル精度向上へ向けた取り組み —石狩湾を事例として—

足立久美子<sup>1</sup>・山崎真一<sup>2</sup>・山下俊彦<sup>3</sup>

江里口知己<sup>4</sup>・市川哲也<sup>4</sup>

石狩湾の基礎生産を支える栄養塩動態や、石狩川河川水が湾内の生態系に果たす役割を明らかにすることを目的として、流動および水質変動を再現する数値モデルを構築し、現地観測結果との比較検証を行った。石狩湾では最低水温となる 2 月に植物プランクトン大増殖が生じると速やかに栄養塩濃度が減少し、4 月以降に融雪出水により再び上昇する傾向がみられたが、計算ではその再現性に問題があった。そこでプランクトン成長式を見直し、水温 7℃以下で成長量が大きくなるような式を組み込んで再計算したところ、これらの変動傾向の再現性が大きく向上した。

## 1. はじめに

石狩湾は北海道日本海側の中部に位置する椀状の半開放的な湾である。湾内における漁場形成やそれを支える低次生産は、基本的には対馬暖流の影響下にある湾外水の挙動に大きく支配されると考えられる。一方で、湾最奥部には国内でも有数の河川である石狩川が流入し、湾内に栄養塩を供給している。河川からの栄養塩供給は、春季の融雪出水により特徴的な変動特性を有している。山下ら (2002a, 2002b) は石狩川河川水の水質と輸送特性について、山崎ら (2004, 2005) は河川水懸濁物や吸着態リンの挙動と海底底質との関係等について、奥西ら (2005) は河川水由来のリンが夏季の基礎生産に果たす役割について明らかにしている。これらの研究過程で河口部を中心に多くの現地調査が実施されてきた。また、半開放的な湾である石狩湾の基礎生産に、河川水がどの程度寄与しているのかを明らかにすることを目的とし、著者らは 2003 年以降、栄養塩や植物プランクトン量の分布変動の把握にさらに努めると同時に、流動・低次生態系モデルを構築した。その過程において、観測結果との比較検証から、計算領域、沖合境界における水質値の見直し、潮位や海上風の設定条件の見直し等を行い、モデル精度向上を図ってきた。しかしながら冬季の植物プランクトン増殖 (ブルーム) およびそれに起因する栄養塩変動に関して再現性が得られなかった。そこでプランクトン成長式を見直すことにより、精度向上を図ることとした。本論ではその概要について報告する。

## 2. 現地調査

流動・低次生態系モデルの入力条件や検証に必要な現

地データの取得は図-1 に示した観測点で主として 2001~2003 年に行われた。測点ごとの観測期間、観測頻度、観測項目を表-1 に示す。石狩川河川水については、河口から 14.5 km 上流の札幌大橋地点で週 1 回の頻度で採水が行われた。海域部では、St.1~12 で多項目水質計による水温・塩分の鉛直測定のほか、代表的な観測点として St.2, St.7 および St.9 で多層採水が行われ、栄養塩、chl<sub>a</sub> 等が分析された。当海域は通常は貧栄養であり、分析結果の多くが夏季を中心に分析下限値を下回ったことから、当初の計算条件では下限値を使用した。しかし計算結果は明らかに沖合部の栄養塩濃度や chl<sub>a</sub> 量が過大となり、モデル精度上問題と考えられたため、2004 年以降、St.A において月毎に採水調査を行い、栄養塩や chl<sub>a</sub> の高精度な分析を実施し、これにより沖合境界値を是正することとした。St.2 と St.A では調査期間中、水温計や ADCP の設置により多層水温や流動変動も併せてデータが取得された。また、No.1 および No.2 地点でもそれぞれ 1ヶ月間程度の流動・水温連続観測が行われ、これらの水温・流動の分布変動は計算条件の検討や計算結果の検証の参考データとして利用された。春季ブルーミング期と融雪期には A ラインでの断面観

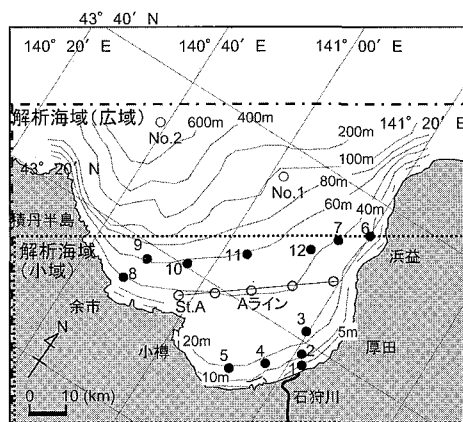


図-1 石狩湾の海底形状・観測点および計算領域

1 正会員 水産修 (独)水産総合研究センター水産工学研究所開発システム研究室  
2 正会員 工修 北海道開発局石狩川開発建設部千歳川河川事務所  
3 正会員 工博 北海道大学大学院教授工学研究科  
4 (株)中電 CTI

表-1 観測内容

| 観測水域  | 観測点            | 観測期間                                       | 頻度           | 保留観測         | 測定項目                     |
|-------|----------------|--------------------------------------------|--------------|--------------|--------------------------|
| 石狩川河口 | 札幌大橋           | 2001年3月～2003年8月                            | 月1～4回        |              | 水温・塩分・SS・TN・TP・栄養塩・chl.a |
| 河口沿岸域 | 1～5            | 2001年3月～2003年6月                            | 月1～4回        | St.2で水温      | 水温・塩分・SS・TN・TP・栄養塩・chl.a |
| 沖合域   | 6～12           | 2001年3月～2003年4月                            | 月1～4回        | 水温7層<br>水温多層 | 水温・塩分・SS・TN・TP・栄養塩・chl.a |
|       | St.A           | 2003年10月～2006年3月                           | 月1回          |              | 水温・塩分・栄養塩・chl.a          |
|       | No.1～2<br>Aライン | 2002年秋季 No.2は2003年6月<br>2005年3月・4月、2006年3月 | 約1ヶ月間<br>各1日 |              | 水温・塩分・栄養塩・chl.a          |

測も行われた。

### 3. 数値計算

流動モデルは、潮汐流、風による吹送流、河川からの淡水流入にともなう密度流などの流れ場を解析するためのマルチレベルモデルを利用した。基本的事項は中田ら(1993)に従った。水質・生態系の数値モデルは動植物プランクトンやデトリタス、栄養塩、溶存酸素量等で構成される物質動態を模式化した沿岸域の生態系モデルを適用した。多くのパラメータはTaguchiら(1999)を引用した。

#### (1) 広域流動モデル

第1段階として、石狩湾全体の流動変動をおおよそ再現するため、図-1に示す広域解析領域(84×120 km)を設定した。水平格子3 km、鉛直層は11分割とし、湾口部の沖合境界条件として潮位は湾東西の留萌・岩内検潮所の計算潮位を、水温・塩分は北海道による10年間の調査報告(1977～1986)を引用し、湾口断面を4区画に分け、各月の平均値を求めて時空間的に内挿して与えた。河川流量は計算期間中の実測値を与えた。気象条件は湾周辺の各気象台・アメダスデータおよび気象庁のメソ客観解析による海上風予測値を用いた。計算の時間刻みは20秒、再現期間は2001年8月～2002年7月とした。

#### (2) 小域流動モデル

広域流動モデルの計算結果は、湾内のおおよその流況をとらえていると判断された。そこで図-1に示す小域の解析領域を設定し、広域領域の計算結果を沖合境界の潮位条件として利用し、詳細な計算を行った。解析領域は50×120 km、水平格子は1 kmとしたが、石狩川河道内も上流15 kmまで計算範囲に加えた。鉛直層は表-2に示す11層分割とした。

沖合境界条件として水温・塩分はSt6～St12の多項目水質計による観測値を時空間的に内挿して与えた。海面摩擦係数について、風速に依存する変動値としたほかは広域モデルと同様の条件で計算を行った。計算の時間刻みは20秒、再現期間は2001年8月～2003年7月とした。

#### (3) 水質・生態系モデル

小域モデルによる計算結果から、観測値の多いSt1～St5の水温・塩分値との比較を行ったところ、時間変動・鉛直分布ともに観測値とよく合致した。また流動計

表-2 鉛直層区分(小域)

| 層番号 | 水深位置(m) | 厚さ(m) |
|-----|---------|-------|
| 1   | 海面～1    | 1.0   |
| 2   | 1～2     | 1.0   |
| 3   | 2～4     | 2.0   |
| 4   | 4～7     | 3.0   |
| 5   | 7～10    | 3.0   |
| 6   | 10～15   | 5.0   |
| 7   | 15～20   | 5.0   |
| 8   | 20～30   | 10.0  |
| 9   | 30～50   | 20.0  |
| 10  | 50～70   | 20.0  |
| 11  | 70～海底   |       |

算結果も、秋季から冬季には北西の季節風により湾口から湾奥部に向かう表層流れが卓越し、融雪期には石狩川河川水が海域に流入後、東岸寄りを北上する傾向など、調査から把握された海域の流動特性をよく表していた。そこで水質の時系列的な変動を再現するモデルを構築した。

プランクトンや栄養塩類等、計算で対象とする水中物質は力学的に受動的で、流れによる輸送等の物理過程に分布が支配されるとともに生物化学過程により変動するものとし、次式を基本式とした。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -(v \cdot \nabla)C - (w + w_p) \frac{\partial C}{\partial t} + [\nabla \cdot (K_H \nabla)]C + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \pm \sum B_i + q \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 $C$ : プランクトンや栄養塩等の生態系構成要素の現存量、 $v, w$ : 流れの水平および鉛直速度成分、 $w_p$ : 懸濁態有機物の沈降速度、 $\nabla$ : 水平傾度、 $K_H, K_z$ : 水平および鉛直渦拡散係数、 $\pm \sum B_i$ : 生物化学過程、 $q$ : 系外からの供給(流入汚濁負荷、底泥溶出等)である。

沖合境界値にはSt7およびSt9の観測値を利用したが、観測値が分析下限値未満であった場合には下限値を与えて計算したところ、栄養塩・chl.a量の計算結果は過大であると判断された。そのため2003年以降StAで行った観測結果で境界値を補正した。石狩川からの負荷量は札幌大橋における栄養塩・SS等の実測値と河川流量から、月ごとにL-Q式を作成して与えた。他の生物化学過程に関するパラメータはTaguchiら(1999)を参考とした。

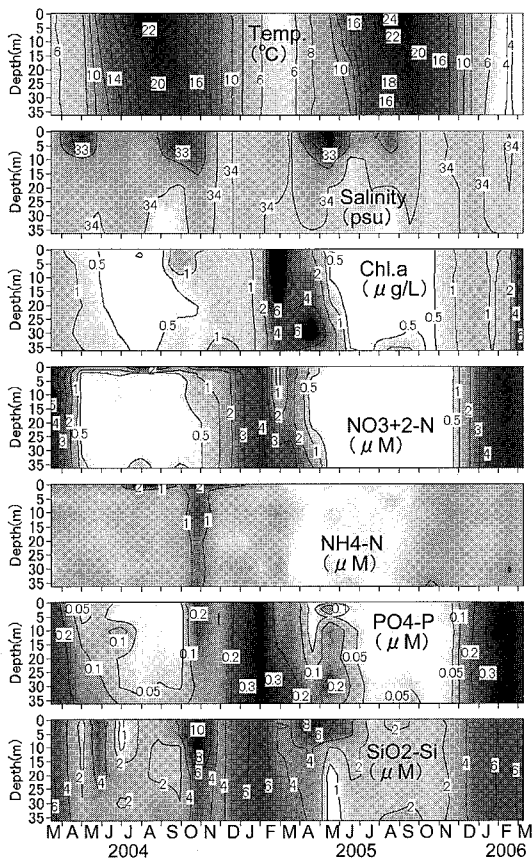


図-2 St.A における水質変動(2004年3月-2006年3月)

#### 4. 現地調査による石狩湾の水質季節変動

現地観測内容は表-1に示したとおり多岐にわたるが、ここではSt.Aで約2年間行った水質調査結果(図-2)をもとに、湾内における水質の季節変動特性を記述する。当点は石狩川河口よりも西側に位置しており、東岸沿いに北上する傾向が強い石狩川河川水の影響を受けにくい。St.1~3付近では融雪期と秋季増水時に表層塩分値が低下し、しばしば15 psu以下となったのに対し、St.Aでは32.5 psuを下回ることとはなく、湾外水の影響が強いと考えられた。夏季には成層状態、冬季には混合状態となり、水温は8~9月に最高値、2~3月頃に最低値を示した。最低水温期には規模こそ違いが植物プランクトン増殖が毎年確認された。顕微鏡観察などから優占種は冬~春季に沿岸でしばしば出現する珪藻類であるとみられ、春季ブルームと判断された。栄養塩は、珪酸塩濃度の推移が低塩分水の挙動とよく合致しており、河川水出水の痕跡を表していると考えられるが、窒素類とリン酸塩には河川からの供給の効果はみられず、低塩分水が当点に到達するまでに速やかに消費されたと推察される。春季

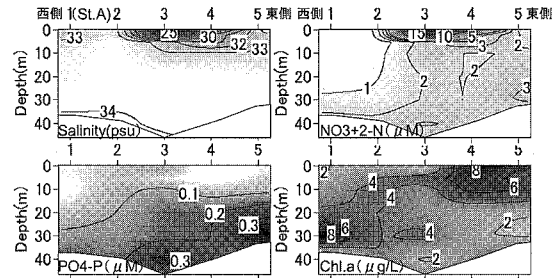


図-3 出水時のA断面における水質分布(2005年4月17日)

ブルーム時には明らかに栄養塩濃度の減少がみられ、消費が速やかに行われたと考えられる。冬季混合により栄養塩濃度は上昇するが、ブルームにより消費された後は成層化にともない深部からの供給が絶たれ、栄養塩およびchl.aは夏季の間低レベルで推移した。

図-3に融雪出水時のA断面における水質分布を示す。低塩分水は湾中央から東岸寄りに分布し、硝酸塩や珪酸塩濃度は低塩分層で顕著に高かった。低塩分層の東側表層にchl.aが高濃度に存在し、その付近ではリン酸塩が低濃度であった。従って河川水の影響が強い地点では、St.Aとは異なり無機態窒素は豊富に供給されるが、リンの供給効果は小さく、窒素よりも先に枯渇すると考えられた。

足立ら(2005)は、河川流量が平常量になり湾内表層での栄養塩濃度が低下する時期に当たる6月の調査結果から、水深100m以浅ではN/P比が2~15と小さく、窒素の枯渇が基礎生産を制限する可能性を示唆している。しかし河川水の影響を強く受けた場合には、N/P比は非常に大きく、リンが制限因子として働くのではないかと推察される。調査結果全体をとおして、春季増殖や夏季の栄養塩枯渇等の現象は、規模の違いはあるものの湾全体で生じているが、河川からの融雪出水の影響は湾東側で大きく湾西側で小さいと判断された。

#### 5. 数値計算結果の検証

##### (1) 数値計算結果

広域計算・小域計算ともに流動場の再現性は良好と判断された。そこで、再現された流動場を利用し、水質・生態系モデルにより栄養塩および植物プランクトンの時空間変動の再現を試みた。主にSt.2における実測値と計算結果を比較し(図-4)、数値モデルの妥当性を検討した。St.2表層は河川水の影響が強く、観測結果においては出水に伴う栄養塩の増大と植物プランクトン増殖がしばしばみられるが、出水のない冬季にもchl.a濃度は緩やかに上昇していた。計算により再現された各水質項目は、概ね傾向は捉えられたものの、高水温期のchl.aが高めになったほか、冬季における植物プランクトンの増殖と、それに伴う栄養塩、特にリン酸塩の減少に関して

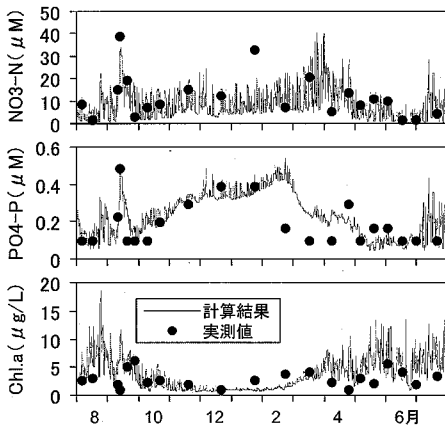


図-4 St.2 表層における計算値と実測値の比較結果  
(2001年8月～2002年7月)

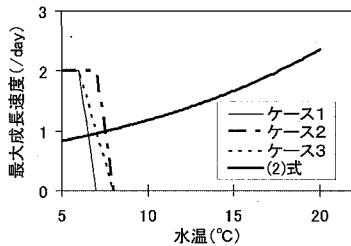


図-5 植物プランクトン成長速度の設定

再現性が得られなかった。その原因として、本計算では植物プランクトンの成長速度が水温に依存するとして、生態系モデルで一般によく使用されている(2)式を用いているが、成長速度が高水温時には過大、低水温時には過小であったことが考えられる。

$$V_{max} = 0.59 \exp(0.0633T) \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $V_{max}$ : 最大可能成長速度、 $T$ : 水温である。  
(2)式を図化した曲線を図-5に示した。

#### (2) プランクトン成長速度の修正による再計算結果

当海域における植物プランクトンの光合成速度に関する知見は少なく、植物プランクトン種組成についても近年の報告事例はない。2月頃に大增殖が生じる機構も明らかではなく、太陽光放射と水塊安定度の厚さのバランスにより生じるとの報告や、また噴火湾では、春季増殖の発生や規模に親潮系水の侵入が関与しているとの報告もある(梁田ら, 1999)が、本研究における現地調査から増殖の機構を推察することは困難であった。しかし、水温が最低となる季節に大增殖が生じる現象を計算で再現するための方法として、プランクトン成長式を見直す必要があると考えた。そのため、本計算では、便宜上、図-5中に示したように水温6ないし7℃以下では成長速度が2で一定となるようなプランクトン種が存在すると

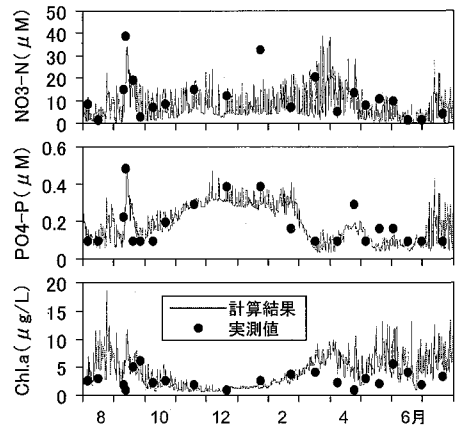


図-6 St.2 表層における計算値と実測値の比較結果  
(2001年8月～2002年7月)  
低水温時に増殖するプランクトンを考慮(ケース1)

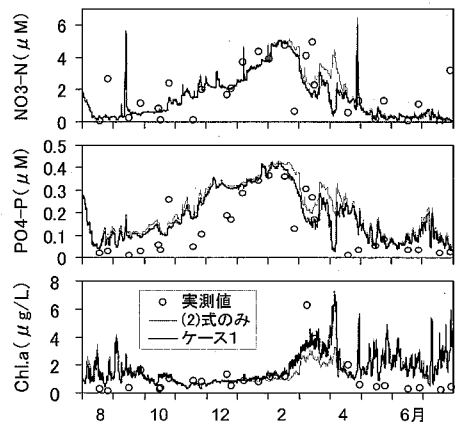


図-7 St.A 表層における計算値と実測値の比較結果  
計算値は2001年8月～2002年7月、実測値は2003年10月～2006年3月データを重ね合わせて表示

仮定した3種類のケースを(2)式に重ね合わせることとした。ある水温以下で一定値を与えたのは、増殖期の水温に4～6℃の範囲で年変動がみられ、最適水温をピークとする曲線式を与えると、再現性が低下する計算年があったためである。

3ケース中では、ケース1で最も高い再現性が得られたため、その検証を行った結果、図-6に示したとおり、冬季の再現性は向上し、1月後半頃から植物プランクトンが徐々に増加し、3月にピークを迎えると同時にリン酸塩が急速に減少する変動傾向が示された。St.2は河川水影響が強いいためN/P比が高く、増殖に伴う栄養塩減少はリンで顕著にみられる。再計算ではまだ時期の遅れが若干解消できていないが、当初計算に比較してリンの減少を精度良く再現することができた。

なお、夏季の高水温時については再検討をしていない

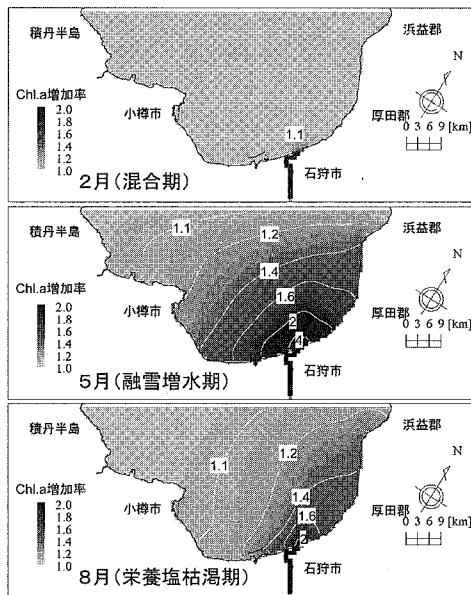


図-8 chl.a 現存量に対する石狩川河川水の影響度の見積もり結果（現状再現計算値の河川負荷が無いとしたときの計算値に対する倍率，1ヶ月平均値）

ため、観測値との誤差の解消には至っていない。

河川水の影響が少ない海域については、図-7に示したとおり、2003年10月以降のSt.Aにおける実測値と比較した。再現期間と観測年が異なるため単純な比較はできないが、硝酸塩の変動傾向はよく合致した。リン酸塩は冬季以外でやや高め、chl.aは夏季を中心に高めの計算結果となったが、季節変動の特徴は再現できた。

### (3) 湾内の生産性に対する石狩川河川水の影響度

本モデルを利用して、石狩湾内の植物プランクトン生産性に対する石狩川の影響範囲や影響度の推定を試みた。図-8に、2月、5月および8月の表層におけるchl.a分布の計算結果を、河川負荷量の実測値を与えた場合に対する負荷量をゼロとした場合の値の比率として、月平均値で示した。海水の鉛直混合により栄養塩が比較的豊富で、河川流量の少ない2月には、石狩川からの栄養塩供給によるプランクトン増大効果はほとんどみられなかった。これに対し融雪出水がピークとなる5月には、湾内の全域で河川水の影響がみられ、その影響度は湾東側で大きく、湾西側で小さい結果となった。成層化により海洋深部からの栄養塩供給が絶たれる夏季においても、河川水の影響は広い範囲で認められ、やはりその傾向は東岸側で強く現れた。これらの傾向は、流動や水質の観測結果に矛盾しなかった。

## 6. ま と め

石狩湾内における低次生態系の時空間変動について、本モデルによりある程度の再現は達成でき、生産性に対

する河川水の影響度などを推定することが可能となった。本論文の主要な結論と残された課題を以下にまとめる。

- (1)石狩湾では、最低水温となる2～3月に生じる植物プランクトン春季増殖に伴い栄養塩濃度が減少し、その後融雪出水により再び上昇した。夏季には栄養塩が枯渇し、河口部付近を除いてchl.aは低レベルで推移した。石狩川河川水の影響は湾の東岸側で強い傾向があった。
- (2)石狩湾の水質変動モデルを構築し現地観測データとの比較検証を行ったところ、低水温時のプランクトン増殖とそれに伴う栄養塩消費が再現できなかったため、水温7℃以下でも増殖するようなプランクトン成長式を組み込み再計算したところ再現性が大きく向上した。
- (3)単純化した条件で低温期の変動を再現したが、春季ブルームの機構を解明し、モデル上での表現方法などに関して精密な検討を行う必要がある。また夏季を中心にchl.a濃度がやや過大評価となったことから、高水温時においてパラメータの再検討が必要である。

これら課題の解決により、モデルのさらなる精度向上が図られれば、生態系の高精度な将来予測が可能となると考えられる。

**謝辞：**本研究の海洋調査に当たっては、北海道立中央水産試験場のご協力をいただいた。ここに厚く御礼申し上げる。なお、本研究はおもに北海道開発土木研究所（現寒地土木研究所）の運営費交付金ならびに北海道開発局からの受託研究により実施された。

## 参 考 文 献

- 足立久美子・大澤義之(2005)：北海道西部日本海沿岸水の栄養塩変動特性，海洋開発論文集，第21巻，pp. 635-639。
- 奥西武・木村榮里子・山崎真一・山下俊彦(2005)：石狩川から供給された粒子状無機態リンが河口沿岸域の生物生産に果たす役割，海講論文集，第52巻，pp. 1071-1075。
- 中田喜三郎(1993)：内湾環境のシミュレーション，海洋環境シミュレーション—水の流れと生物—，白亜書房，pp. 85-112。
- 北海道庁編(1977～1986)：昭和51～60年度石狩湾新港海域生態調査報告書。
- 梁田満・志賀直信・田中仁詞・品田晃良(1999)：1996年春季噴火湾周辺海域における親潮系水中の栄養塩組成：春季ブルームに対する影響，北大水産集報，第50巻(2)，pp. 123-138。
- 山崎真一・山下俊彦(2004)：融雪期に石狩川から流出する懸濁物質が沿岸海域の水質に及ぼす影響，水工学論文集，第48巻，pp. 207-212。
- 山崎真一・山下俊彦(2005)：石狩湾河口沿岸域の底質と石狩川から流出する懸濁物質の関係，海講論文集，第52巻，pp. 1091-1095。
- 山下俊彦・菅沼剛・梅林司・清水康行・橘治国・斉藤大作・山崎真一・渡邊康玄(2002a)：融雪期の石狩川下流部の水質変動・輸送特性，河川技術論文集，第8巻，pp. 141-144。
- 山下俊彦・梅林司・菅沼剛・斉藤大作・山崎真一(2002b)：石狩川の水質輸送特性と河口沿岸域での水質の変動，海講論文集，第49巻，pp. 1011-1015。
- Taguchi K, K Nakata, T Ichikawa(1999)：A 3-D simulation of the lower trophic in the Ise-Mikawa Bay estuary using a coupled physical and biochemical model, Journal of Advanced Marine Science and Technology Society, 5(1&2), pp. 49-62。