

水工学シリーズ 11-B-4

# 沿岸域における流動と低次生産等について

(独) 水産総合研究センター水産工学研究所

水産土木工学部長

中山 哲巖

土木学会  
水工学委員会・海岸工学委員会

2011年8月

# 沿岸域における流動と低次生産等について

The current and primary production in the coastal zone

中山 哲巖

Nakayama Akiyoshi

## 1. はじめに

世界の漁業の現状は現在非常に厳しい状況下にある。FAOによれば、世界の17海域のうち14海域で、少なくとも60%以上の資源が限界まで利用あるいは過剰漁獲されているとされている(図-1参照)。近年の世界の漁業生産は1億4千万トンであり、横ばい状態となっている。世界の人口増加に対応して魚介類に対する需要も急速に伸びてきた。このようなことから、我が国においてもTAC制度をはじめとした資源管理や資源回復対策がなされ、持続的な漁業生産システムの構築に向けての努力がなされている。さらに地球温暖化に海水温上昇、酸性化などにより、生態系の変化が予想され、水産資源も対応して変化すると予想される。

沿岸域を含む陸棚域は、地球規模から見ても、生物生産性が高いことが知られており(図-2参照)、この領域での生物生産力を利用して漁業生産の維持・増進を図ること極めて重要である。

我が国沿岸域では開放性沿岸域が多くを占めているばかりでなく、漁業生産も大きい。近年、沿岸資源は横ばい又は減少傾向が続いている。内湾においては、生産力は非常に高いものの、種々の要因により、貧酸素や赤潮の広域化・発生頻度

増加等により、海域の生態系が変化しており、直接漁業生産に影響を与えている。こうした海域の流動・水質環境の動態評価をベースとした合理的な環境保全対策、漁場整備が求められている。

ここで紹介するのは、開放性沿岸域の代表として、鹿島灘・九十九里、閉鎖性水域として瀬戸内海について、既往の研究成果(本稿では文章のみであるが、研修会では図面も含めて紹介する)とともに著者らが検討してきた内容を紹介します。これらが、皆様の研究の一助になれば幸いです。

## 2. 開放性沿岸域として鹿島灘・九十九里を例にして

### 2. 1 開放性沿岸域に関する研究

開放性沿岸域においては、1990年台前半まで、海岸工学分野では、砂浜域の浸食問題に関する研究

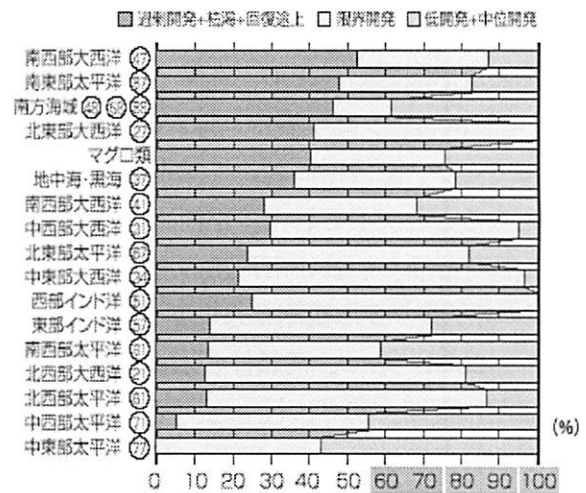


図1 2004年におけるFAO統計海区ごとの資源利用状況別資源の割合

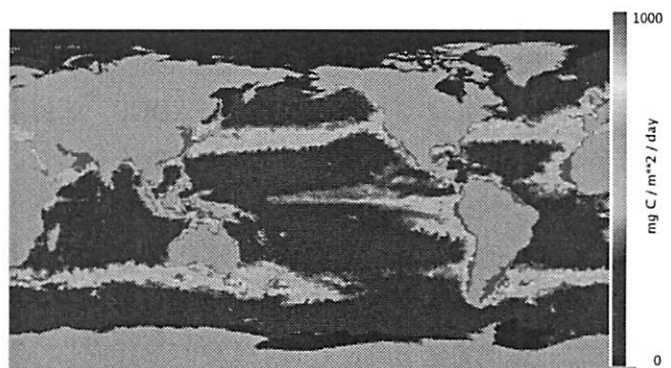


図2 植物プランクトンによる生産量2003年 (MODIS, SeaWiFSデータによる解析結果)

に集中しており、海浜流の卓越する浅海域での土砂移動に関する研究がほとんどを占めていた。それ以降では浸食問題に加え、生態系変化、水産資源の減少傾向などを背景に開放性沿岸環境への関心が高まり、北海道石狩湾や本論で紹介する鹿島灘において広域的な観測や数値計算が行われ始めた。開放性沿岸域は、地形の影響に加えて、外洋の流れ、河川からの淡水量、風の影響を受け、複雑な流れが形成されるとともに、これらに応答した栄養塩分布及び低次生産分布となる。ここでは、系統的に行われた石狩湾と鹿島灘に関する既往の研究について述べることにする。

北海道石狩湾に関しては、山下ら(1997、1999、2000)、王ら(2004)、足立ら(2006)は、観測や数値計算により、検討している。山下ら(1997、1999、2000)は秋季から融雪期にかけて、石狩湾沿岸に観測点を多点配置し、流動、水温・塩分を観測し、分析している。その結果、秋季では、風の影響が強く、特に陸に向かう風の場合には表層は風向きと一致し、底層は逆となること、石狩川の影響は水深20m程度まであり、融雪期において対馬暖流の波及、石狩川流量や風の影響を受け、補償流を伴った強い流れが生じることが示された。季節風(北西風)の強い冬季では、北西風に対する補償流の三次元構造を把握し、時計回りの強い南西流の形成が示され、数値計算(マルチレベルモデル、1.5kmメッシュ、外力;風のみ、風の多点観測結果に基づき積丹半島の影響考慮)により、その流動構造の再現がなされた。

王ら(2004)らは、湾軸沖合水深700m、湾西側、湾東側でADCPにより流速分布、係留系による水温観測を夏期、初冬に行った。その結果、夏期沖合では対馬暖流の影響により、15~20日秋季で変動する流れが卓越し、その影響は水深200mまでであり、16時間程度の慣性周期流動は表層~300m間にあることがわかった。夏期の浅海域の流れは風の影響が強く、陸風ではエクマン効果により湾西側で、海風では湾東側で、それぞれ湧昇流が発生する。冬季においては、季節風(北西風)の影響が強く、北流が卓越するが、夏期より流速は弱いことがわかった。

足立ら(2006)は、石狩湾の基礎生産への河川の寄与度について、2001~2003年に行われた各種現地調査結果(船による多点海洋観測、ADCP、係留系による水温観測等)を利用し、マルチレベルモデル及び低次生態系モデルにより検討を行った。広域(3kmメッシュ)、小域(1kmメッシュ)に区分し、小領域の境界値は広域の結果を用い、広域の境界値(水温・塩分)は10年間の観測値をもとに湾口を4分割し、月別平均値を求め、時空間的に内挿して与え、潮位は近隣検潮記録に基づく予測潮位とした。風はアメダス・気象庁の客観解析データを用いた。栄養塩については観測値を用い、石狩川負荷量は、観測値により、月毎のLQ式を作成し、設定した。その結果、流動に関しては、現地観測と比較すると、季節風(北西風)時の湾口から湾奥への表層流れ、融雪期での石狩川河川水の挙動(湾東側寄りを北上する)などを良く再現していた。混合期(2月)では、外洋の栄養供給が支配的であり、融雪期(5月)では、湾全域に河川影響が現れ、湾東側で強い、夏期(8月)では、河川影響は広い範囲で認められ、湾東側で強い傾向となった。問題点として、夏期での植物プランクトン濃度が過大評価になるなど、生態系モデルのパラメタ等のさらなる検討が必要であるとしている。影響がどの程度影響するか観測や数値計算により、検討している。

鹿島灘沿岸域に関しては、八木ら(1996a、1996b、1997a、1997b、1998、1999、2000a、2000b、2001、2002a、2002b)は、鹿島灘において係留系による水温・塩分の広域・多点観測、ADCP・波高流速計等による多点流速計測、HF海洋レーダーによる表層流の面的観測、調査船を用いた海洋観測を行った。また、 $\kappa$ - $\epsilon$ 乱流モデルによる計算、診断モデルによる流動計算、非線形内部波伝搬計算等を用いて吹送流の構造、広域沿岸流動、内部潮汐の伝搬特性等について詳細な検討を行っている。なお、夏期の成層期、冬季非成層期、通年において検討している。一連の研究を概略的に以下に示す。

成層期の鹿島灘海域の水温については、長周期（約 33 時間以上）、日周期（16～33 時間）、半日周期（9～16 時間）の変動が見られ、それぞれスペクトルピークの岸沖方向断面分布は異なっていることが示された。長周期変動については、風による影響が大きく、鹿島向きの風では沿岸湧昇、銚子向きでは沿岸沈降により、水温変動が起こるとしている。ただし、風と対応関係のない水温変動も見られ、そのような場合には、岸沖方向断面の水温分布では、水温等値線が岸に向かって切り立った分布形となることがわかった。さらに沿岸方向での水温変動の相互相関解析から、銚子側に 0.18cm/s で伝搬しており、陸棚沿岸域にトラップされた内部ケルビン波と考えられた。日周期変動は、浅海部では日射の影響があるが、日射の影響のないと考えられる中層は日周期の内部潮汐が原因であり、沿岸方向には銚子側へ伝搬することがわかった。水平流速のホドグラフから、沿岸方向流速成分が卓越し、沿岸域にトラップされた沿岸方向に伝搬する長周期内部波動の性質を有しているとしている。半日周期変動については、各観測点の水温変動の相互相関から、平均位相速度 0.23m/s で岸に向かって伝搬することが示された。沿岸方向への伝搬については明確ではなかった。流速のホドグラフからも岸沖方向が卓越しており、海岸に直角に入射する内部慣性重力波と考えられた。

内部波の挙動について、観測及び数値計算により、詳細な検討が行われており、陸棚縁辺部における内部波は潮汐成分（前傾化）とともに高周波成分（20～40 分程度、ソリトン波列）が顕著である。内部潮汐は陸棚縁（水深急変部）で、三角波的な非対称性の強い波形（前傾化）に変形すること、数値計算により前傾化は水深急変による移流効果によることを示された。

熱環境に着目し、日スケール以上の長周期流動メカニズムの把握と熱フラックスの検討がなされた（夏期）。その結果、沿岸湧昇後の水温上昇過程では、湧昇の規模によって異なり、規模が小さい場合には大気からの熱輸送が支配的であるが、規模が大きい場合には沖合表層水の輸送が支配的となる。沿岸湧昇による熱輸送は風速レベルと関係している（最大  $2.21^{\circ}\text{C}/\text{day}/\text{m}^3$ ）。長周期内部波が現れ、熱的には最大  $1.62^{\circ}\text{C}/\text{day}/\text{m}^3$  となった。黒潮接岸により、底層水温が上昇する（加熱効果は  $0.62^{\circ}\text{C}/\text{day}/\text{m}^3$  程度）。日周及び半日周期内部波は大気からの輸送量の 3～4 倍となる。

流れについても、長期（1 年）かつ広域的な検討をしており、水深 20m 以上の底層で 30cm/s に達する流れが頻繁に発生していることがわかった。長周期流速成分は平均的には風の影響（相関が高い）が大きい、風では説明出来ない現象（相関が低い、1、2 月）もあり、広域水温分布及び診断モデル（2km メッシュ、25 層）の検討から暖水波及び鹿島港・那珂湊間の流れの卓越周期成分比較により陸棚波（モード 1）による流れと考えられた。

非成層期での流動特性について、観測及び数値計算により検討している。底層流速は潮汐成分と 7～8 日周期の変動が見られた（沿岸方向）。7～8 日周期の変動は風の変動と良く対応していた。 $\kappa\cdot\varepsilon$  乱流モデルにより吹送流に関する数値実験を行い、底層流速は風に対応しているが、計算結果は現地に比べて、小さくなり、経験的にわかっているモデル係数値に対して、海面摩擦係数を大きく、鉛直渦動粘性係数を小さくするメカニズムが必要であるとしている。それ以外の可能性として、陸棚や碎波による影響について検討している。さらに、 $\kappa\cdot\varepsilon$  乱流モデルを用いて地形を単純化し、風速一定、風速が正弦的に変化する場合について数値実験を行った。その結果、沖合では鉛直 3 層構造（表層エクマン境界層＋傾斜流＋海底エクマン境界層）から浅海域での風応力と底面摩擦が釣り合う状態まで、力学バランスを変化させている。鉛直シアが全水深的に有意な大きさを示す沿岸境界層を定義し、これが海面摩擦速度/（コリオリ・水深）に支配されている。非定常な風速場では、変動周期が短いと沿岸境界層のみで沿岸流速が大きくなり、周期が長くなると定常風場の流速構造に近づいていくことを示した。

栄養塩特性・クロロフィル特性に関しては、汀線近傍（11カ所）、水深10m（6カ所）、40m（5カ所）で、2000年6月～10月まで毎月調査船による観測（採水分析、STD）を行った。その結果、栄養塩については、浅海域では相対的に窒素が多く、9,10月河川影響により濃度が高くなる。外海域では、底層で栄養塩レベルは高く、冬季～夏期にかけて濃度が減少する。陸棚海域では初夏には外海域の影響、秋季では浅海域の影響を受ける。汀線域では河川影響の少ない時期に河口から離れるとアンモニア比が高く、再生産の場が形成される。クロロフィルについては、陸棚域では初夏には下層で極大が現れ、秋季になると表層が強大となる。浅海域でも同様な特徴が見られる。黒潮流路変動による栄養塩の変化については、2001年2月～11月に調査船による観測を毎月行い（大洗沖東西方向ライン、最大水深250m）、これらの結果を用いて検討している。その結果、鹿島灘海域の基本的分布構造・季節変化を把握した。冬季から春季では外海側から沿岸域に、初夏から秋季では沿岸域から外海域に栄養塩が輸送される可能性がある。短期的な栄養塩変動現象として、黒潮流路接近時に沖合中層以深の高栄養塩水塊が沿岸域に湧昇する。黒潮接近時の流れの応答は、黒潮流軸の沿岸域への接近度が小さい場合には、親潮系水が沿岸域に侵入し、接近度が大きい場合には、沿岸域に北上流が励起され、湧昇により高栄養塩水塊が沿岸域に波及する。

河川水の沿岸域への影響については、広域観測（係留系11点、ADCP、波高流速計）、HFレーダーによる表層流観測を1998年8月末～9月末実施しており、その観測期間中の台風等による出水に着目して検討している。その結果、那珂川大出水時の河川水挙動は、岸に沿って南下し、利根川極近傍にまで及んでいた。台風9805号による出水時の河川水挙動は、その影響が全観測点に及んでおり、那珂川大出水よりも広域的に河川水が及んでいる。河川水の挙動を支配する大規模流動として、岸に沿った強い南向き流れが確認され、主な支配要因と考えられた。ただし、強い南下流は那珂川大出水時の強い北風と対応関係が見られたが、台風9805号については同様の関係は見られなかった。後者については、前述したような黒潮流路変動など大規模な流動によるものと考えられる。

以上の研究成果から、開放性沿岸域における流動・水温・栄養塩・植物プランクトン動態等について、かなり明確になってきていると考えられる。しかしながら、流動、水温、塩分、栄養塩、植物・動物プランクトン（低次生態系）は、相互に密接に関連しあっており、複雑な挙動を示す。しかも、非定常課程であることから、モニタリングと一体化した数値モデルによる検討が不可欠である。

## 2. 2 鹿島灘・九十九里海域における海洋観測及び流動・低次生産モデルの適用

前述したように、八木らが鹿島灘海域での広域的かつ詳細に検討しているが、著者らも、現在まで鹿島灘・九十九里沿岸において継続的に観測を行っている。あわせて流動・低次生産モデルの開発・改良を行っており、現段階ではかなり再現性の良いモデルとなっている（2000、2004a、2004b、2005、2006、2007a、2007b、2009、2010）。これまでの著者らの研究レビューは省略し、現段階までの成果をここでは紹介する。著者らの目的は、同海域の沿岸の流動や低次生産を適切に評価し、漁場整備・沿岸環境保全対策立案のための基礎的ツールの開発である。なお、本モデルは後に述べる瀬戸内海においてもベースとして利用されている。本モデルの基礎式等については<参考>に記述する。

著者らが観測及び流動・低次生産モデルにより、同

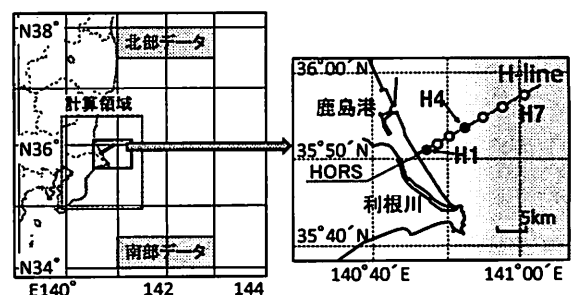


図3 観測地点、数値計算の計算領域および栄養塩境界値の検討に使用したデータ領域

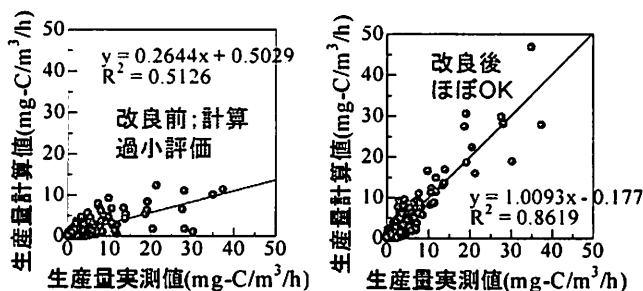


図3 改良前と改良後の比較

パラメータ	単位	改良前	改良後
最適光強度	$I_{opt}$	cal/cm <sup>2</sup> /min	0.07 ↗ 0.15
NO <sub>3</sub> 半飽和定数	KN_NO <sub>3</sub>	μM/L	3.0 ↘ 2.9
NH <sub>4</sub> 半飽和定数	KN_NH <sub>4</sub>	μM/L	3.0 ↘ 1.0
NH <sub>4</sub> 選択係数	ψ	l/μM	1.5 ↘ 1.2
PO <sub>4</sub> 半飽和定数	KN_PO <sub>4</sub>	μM/L	0.15 ↘ 0.065
最大光合成速度	$V_{max}$	/day	1.0 ↘ 0.87
光合成温度係数	$k$	/°C	0.063 ↗ 0.13

表1 パラメータ改良前と改良後の比較

海域の検討を続けてきたが、その過程での問題点等を簡単に以下に示す。計算結果は流動や水質の分布変動の傾向を概ね捉えているが、基礎生産量を過小に、栄養塩濃度を過大に見積もる等、再現精度上いくつかの問題を抱えている。

そこで、1995年7月～2002年7月まで、季節毎に水産工学研究所調査船たか丸により計29回実施した基礎生産調査の結果を使用して、生態系モデルのうち植物プランクトンの各種パラメータの見直しを行った。調査地点は図3に示したSt.H1およびH4の2測点である。両測点は、茨城県神栖市須田の(独法)港湾空港技術研究所波崎海洋研究施設(HORS)の沖合ライン上に位置し、距岸および水深はSt.H1で1.1 km・10 m, St.H4で11 km・40 mである。

鹿島灘の流動・低次生産モデルにおいて、基礎生産量は、(1)式により計算している。

$$GPP = V_{max} \times \min(N_{inhib}, P_{inhib}) \times \exp(kT) \times \frac{I}{I_{opt}} \exp\left(1 - \frac{I}{I_{opt}}\right) \times Chl \quad \dots(1)$$

ここで、

$$N_{inhib} = \frac{NO_3}{NO_3 + K_{N_{NO_3}}} \exp(-\psi NH_4) + \frac{NH_4}{NH_4 + K_{N_{NH_4}}}$$

$$P_{inhib} = \frac{PO_4}{PO_4 + K_{N_{PO_4}}}$$

式中のGPPは基礎生産量、Tは水温、Iは光量子量、NO<sub>3</sub>・NH<sub>4</sub>・PO<sub>4</sub>・Chlはそれぞれ硝酸塩・アンモニウム塩・リン酸塩・chl.a濃度を表す。その他の記号は表-1に示したとおり光合成パラメータであり、見直し前においては表中左段の数値を用いている。(1)式に、観測で得られた水温、光量子量、栄養塩濃度、chl.a濃度および表-1に示したパラメータ値を代入して算出した基礎生産量(GPP)と、基礎生産量実測値との比較を行った。その後、各パラメータを種々に変化させ、パラメータの最適値を求めた。そして基礎生産量の実測値と水温・光量・栄養塩濃度との関係から新たなパラメータの妥当性を検討した。植物プランクトンの各種パラメータについては、図3に示すように基礎生産データを用いて変更した結果、これまで過小評価していた植物プランクトンを精度良く求めることが可能となった。

生態系モデルで重要なのは、栄養塩である。栄養塩は、外洋からの供給、河川からの供給が主である。

外洋から供給される栄養塩は、日本海洋データセンター

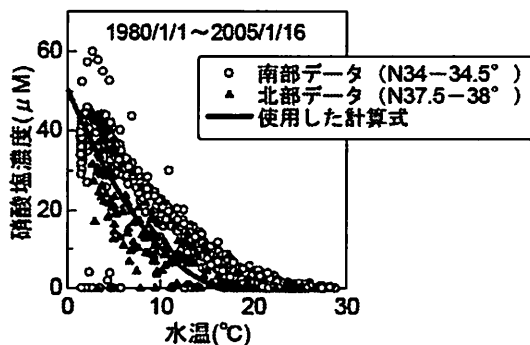


図4 水温と栄養塩(硝酸塩)の関係

JODC のデータベース及び著者らの観測結果を基に設定した。図 4 はこの海域の南北外縁に当たる水温と硝酸塩濃度の関係である。この図からまず水温との相関が非常に高いことがわかる。このデータから水温から硝酸塩濃度を求める関係式を作成した。さらに著者らの観測値との比較や試行計算の結果、当該海域北側の硝酸塩濃度と水温の関係を基にした栄養塩推定式を用いて、外洋境界での栄養塩濃度とした。リン酸塩については同じく JODC データベース、著者らの観測値から、硝酸塩濃度・リン酸濃度比が外洋ではほぼ一定であることから、求められた硝酸塩濃度からリン酸塩濃度を求め、境界値とした。

河川からの栄養塩に関しては、河川の水質データ及び著者らが実施した利根川での通年観測を基に設定した。図 5 に著者らが行った利根川河口堰での栄養塩の通年観測結果を示す。この図から 11~3 月までは  $200 \mu\text{mol}$  程度、4~10 月までは  $100 \mu\text{mol/l}$  程度で推移した。図 6 は利根川河口部において出水時に硝酸塩センサーで連続観測した結果である。出水期においても栄養塩は若干低めであるが  $90 \mu\text{mol/l}$  程度であることがわかる。河川流量は那珂川、利根川ともに最下流の流量観測点の毎時データを用いている。

黒潮・親潮続流の影響を取り込むために、JCOPE データ(水平  $1/12^\circ$  , 鉛直 44 層)を使用した。境界放射条件とし、境界における流れ・水温・塩分は JCOPE データを線形補間したものを計算領域の各境界メッシュ(流れは順圧成分のみ設定)に与えている。気象データ(全天日射量, 雲量, 風向, 風速, 気圧, 気温, 1

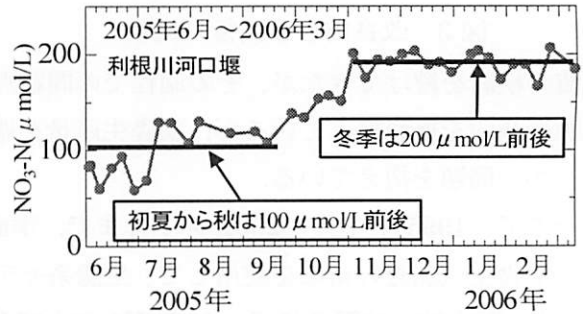


図 5 利根川の硝酸塩濃度の時系列 (毎週採水)

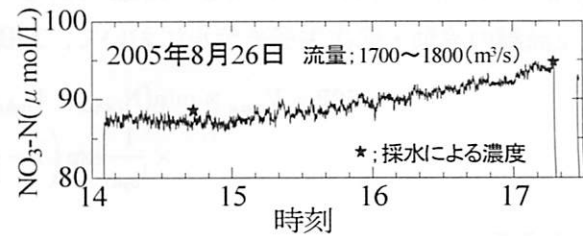


図 6 硝酸塩センサーによる連続観測の時系列

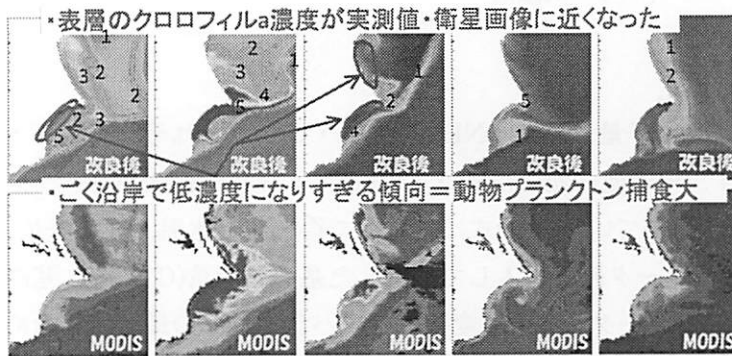


図 7 改良後と衛星データ(MODIS)の比較

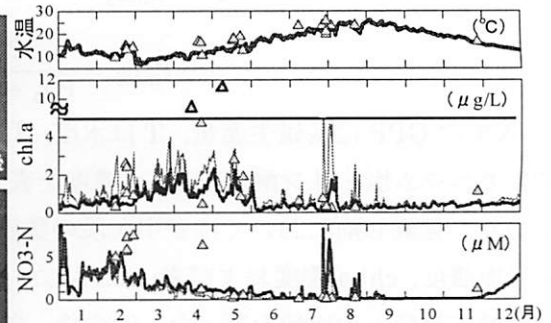


図 8 ST.H7 での観測値と計算値の比較 (黒; 改良前、赤改良後、△観測値、表層)

時間毎) は計算領域のほぼ中央に位置している銚子気象台のデータを用いた。

計算領域を図 3 に示すように南北 175 km, 東西 150 km で、水平メッシュおよび鉛直格子について、それぞれ 1000 m, 20 層としている。現地観測の観測点も同図に示されている。

モデルの再現性については、衛星によ

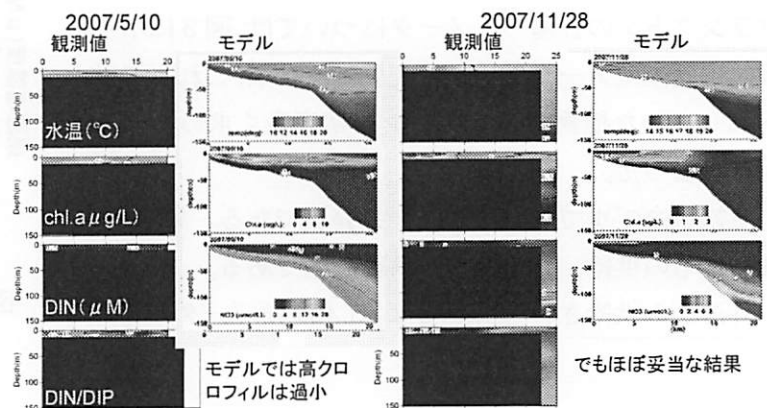


図 9 Hline の観測値と計算結果の比較 (位置; 上図参照)

るクロロフィルの面的な分布、観測点水深別時系列変化、観測ライン断面分布等とモデルによる結果を比較した。改良により、茨城県発行の漁海況情報、MODIS などと比較するとほぼ同様な分布となり、再現性の向上が図られた（図7、8、9）。図7から2005年の衛星データMODISとモデルによる計算値の比較を示している。改良後と衛星データを比較すると、クロロフィル濃度、分布ともほぼあっており、格段に改善された。また、クロロフィルの分布から判断される流れのパターンも衛星データとの一致度は高い。図8は、観測点（図3参照）での観測値とモデルの時系列の比較であるが（図は表層）、観測結果に見られる高クロロフィル（図中段）の場合に過小になる以外は再現性が良いことがわかる。図9は、観測ラインの断面分布を示している。この図から、分布は観測値とモデルの一致度が良いことがわかる。特に図右側の11/28の分布から、岸側での河川水による表層での植物プランクトンの増殖が再現されており、分布の一致度が高い。このように面的分布、観測点での水深別、観測ラインでの断面分布の比較を行った結果、本モデルの再現性は良好あることが示された。ただし、高クロロフィルの場合や面的分布の比較結果で見られる動物プランクトンによる植物プランクトンの過大な摂食に関しては残された課題と考えられる。

長期計算及び準リアルタイム化について、以下に述べる。外洋の同化モデルによる再解析は1993が最も遡及出来る限界である。そこで1993より直近まで（具体的には2008年8月）の期間の長期計算を実施した。FRAJCOPEを用いた場合には計算途中で数回の発散が起こった。その際には、発散した日を除いて、計算を続行した。他にFRAJCOPE2により、計算を実施しているが、この場合には現在のところ発散はFRAJCOPEよりも少なかった。これは両者では同化手法等に違いがあるためと考えられる。発散の原因については今後詳細に検討するが、台風時の強風、外洋での極端な水塊交換等によるものと考えられる。さらに外洋同化データの相違によって、どのような差異が出るか等についても検討する予定である。図10に海域の生産性を示すものとして、平均的な有機懸濁物沈降量の経年変化（2008年まで表示）を示した。これらから年の前半で生産が高いことがわかる。これは春季ブルーミングによるものと考えられる。また、鹿島灘海域が九十九里海域より、生産性が若干高いことがわかる。年ごとの後半でのピークは河川出水によるものである。年によって変動があり、外洋の条件や河川出水の変化を反映しているものと考えられる。これ以外にも計算結果を用いて、海域の生産力等を時空間的に評価することが可能であり、今後、漁獲データ等各種のデータを含めた検討を行うことができると考えられる。

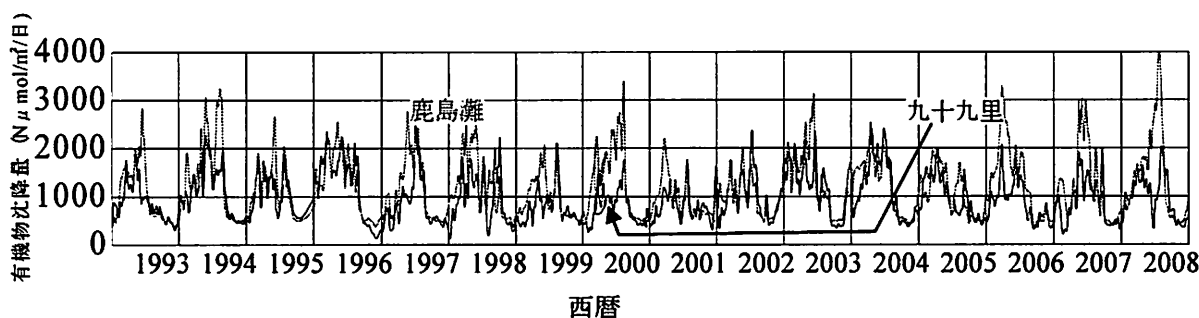


図10 200m以浅での鹿島灘、九十九里海域での平均的な有機懸濁物沈降量（植物プランクトン含む）

### 3. 瀬戸内海

#### 3. 1 瀬戸内海に関する研究



### 3. 1. 1 流動

瀬戸内海の地形を図1に示す。西側に豊後水道、東側に紀伊水道があり、この間を結ぶ長大な水路とみることができる。この水路は単調ではなく、海峡・湾・灘によって構成されている。さらに陸域から数多くの河川が流れ込んでいる（一級河川21）。瀬戸内海の流れは、豊後・紀伊両水道における水位、流速、密度プロファイルと瀬戸内海に流れ込む淡水の流入、風・気圧分布によって支配されており、これらが相互に干渉して、流れが形成されると考えられる。

最初に既存の研究を検討し、瀬戸内海の流れを再現・評価するために必要な重要課題を以下に列挙する。

- (1) 豊後・紀伊両水道での水位、流れ、密度プロファイルの時空間推定（黒潮と豊後・紀伊両水道周辺水塊の応答）
- (2) (1)と連動した両水道周辺の陸棚斜面水（低温・高塩分）の挙動（黒潮と豊後・紀伊両水道周辺水塊の応答）
- (3) 河川流入量の的確な把握（内海の密度流に関係）
- (4) 適切な拡散係数のモデル化又は設定（内海での混合や密度フロント周辺の流れ・物質輸送の再現、強流域・緩流域の流れや成層状況を評価する精度の良い計算が必要）
- (5) 瀬戸内海での風外力の適切な設定（地形の影響を考慮した風速分布）

各海域における流動構造に関する研究密度はまちまちである。研究が数多く行われているのは、豊後水道、紀伊水道、大阪湾、広島湾であろう。個々の海域での研究が数多く、対象とする時期等による相違もある。ここでは、瀬戸内海全体の傾向をつかみ、次にどのようにして、流れの場を時空間的にとらえるか、あるいはこの流れを数値計算などで再現するに当たって検討すべき課題を抽出することを主目的としている。従って、瀬戸内海全域を対象とした研究、外洋と内海との相互作用、海峡と湾での流れ構造、風による広域的な流れ等に関する研究に絞ってレビューすることとする。なお、流動と水質は密接に完成しており、両者を区別することはできない。本論では、流動と水質をあえて分けているが、実際には同一の論文で検討されていることが多い。従って、重複する部分もあることを記しておく。

まず、瀬戸内海全域における流れの特性について述べる。瀬戸内海は先に述べたように外洋と接続する紀伊、豊後両水道に挟まれ、複数の湾・灘・海峡で構成されている。橋本ら(1997、沿岸海洋研究)は、瀬戸内海を鉛直混合強度の季節変動を指標として9海域に区分し、一次生産量の地理的・季節別変動を調べて、海洋構造との関係を考察した。船による観測データ（春、夏、秋、冬）を基に成層・混合状態を検討し、瀬戸内海をⅠ周年成層域、Ⅱ成層卓越域、Ⅲ混合卓越域、Ⅳ周年混合域の4つの海域に区分した。その結果、大阪湾奥、広島湾奥部をⅠ、播磨灘をⅡ、周防灘、伊予灘、広島湾、燧灘、備後灘、明石海峡を含む大阪湾西部をⅢ、備讃瀬戸、安芸灘、伊予灘南部（豊予海峡）をⅣとした。このように混合域、成層が卓越する海域が混在しているのが瀬戸内海であるといえよう。混合域か、成層域かは、流動の大きさ、密度成層の度合いで変化し、各海域に流れ込む河川流量とも関係している。

瀬戸内海を一つの水路とみると、全体的に東西どちらに流れているのであろうか？藤原ら（2006、沿岸海洋研究）は、瀬戸内海を通過する流量の長期変動に関して検討を行っている。通過流は主に風、東西の水位差により生じるとして、経年変化を検討している。風による通過流は主に冬の季節風で起こされるために年平均すると東向きとなる。水位差による通過流は長期的かつ大きな変動をする。西向き傾向の時期は、黒潮が大蛇行した時期に一致するとしている。このような通過流の長期変動は瀬戸内海内部の塩分分布に大きな影響を与える。通過流量の変動は、外洋域における黒潮の変動が大きく影響して

いる。

では、外洋と接続する紀伊、豊後水道の流れはどうであろうか？

紀伊水道、豊後水道に関する流動、水質に関する研究は、藤原ら（2001,2002,2003,海岸工学）、武岡ら（1996,2002,2006,沿岸海洋研究）によって系統的に行われており、以下に述べる。紀伊水道では、黒潮の離接岸によって大きく流況が変化する。黒潮離岸時に顕著に低水温水塊が底層から侵入し、その波及範囲は、紀淡海峡を経て明石海峡にまで及ぶことがある。豊後水道では急潮、「底入り潮」が直接的に宇和海を経て伊予灘南部海域に波及する。このような流れが瀬戸内海の栄養塩分布に大きく影響すると考えられる（後述）。豊後水道では九州東岸への黒潮接岸時にそれぞれ高栄養塩・低温水（陸棚斜面の冷水）の侵入が見られる。どちらもキーとなるのは陸棚斜面に存在する低温・高栄養塩水塊の挙動である。低水温水塊の侵入に対応して、周辺水位もおそらく低下すると考えられる。武岡、藤原らはこのことに着目し、周辺水温と水位に高い相関があることを指摘している。紀伊水道と豊後水道との違いは、紀伊水道に明確な急潮がないことである。武岡は、このことについて豊後水道の小潮時には水塊間に大きな密度差があり、内海に波及しやすいのに対して、紀伊水道では豊後水道に見られるような大きな密度差が無いいため、急潮となって内海へ波及しないとしている。

Kobayashiら（2006,Workshop on Coastal Observatories）は陸棚内と外洋との相互作用効果の把握及びモデル化を目的として、30年間の長期間にわたる数値計算による検討を行っている（対象領域；備讃瀬戸より紀伊水道）。モデルは多層レベルモデルを用い、水平拡散係数、鉛直拡散係数、大気との熱交換、河川流量データ、風データを用いて計算を実施した。計算結果は概ね観測結果を再現している。その結果、水温・塩分、流動構造は、日射、河川流量、風、海水交換に依存しているとしている。境界条件（外洋境界水温・塩分、河川流量）、外力条件（風速）に関して、年変動を考慮するか、しないかによって、どのような変動をもたらすかを検討した。さらに紀伊水道における水温とNO<sub>3</sub>に高い相関があることを用いて、外洋からのNO<sub>3</sub>供給を計算した。その結果、黒潮接岸時と離岸時ではNO<sub>3</sub>の分布が大きく異なっていた。計算値・観測値から、NO<sub>3</sub>に関して、外洋起源の割合の分布を推定している。離岸時においては、NO<sub>3</sub>は大阪湾西部及び播磨灘南部にまで達しており、接岸時では紀伊水道南部までしか波及しない。また、季節的な流れ・密度・NO<sub>3</sub>の分布構造を示している。この数値計算結果から、外洋、陸棚との相互作用は陸棚、内海域に大きな影響を与えること、内湾の物理・生物特性は黒潮など外洋での長期的な流動の変化に影響を受けていることが示された。一連の検討から、瀬戸内海の流動や栄養塩の適切な推定手法として、黒潮離岸距離と紀伊水道の水温の相関関係、紀伊水道における水温・NO<sub>3</sub>の相関関係を利用することを提案している。

田中ら（2005,水圏環境工学会）は、多層モデルを用いて、瀬戸内海全域において潮汐（M2潮成分）による流動を計算した。また、計算においては、風（西風 3m/s）を考慮した計算を行っている。計算では、単層、3層の計算を行っている（ただし、密度一定）。単層、3層とも観測結果との一致度は良かったが、位相誤差は3層レベルモデルの方が少なかった。瀬戸内海での数地点での断面流量を計算した結果、多層レベルモデルの方が、流量が若干小さくなることがわかった。季節風の影響が単層モデルでは小さくできる可能性があり、多層レベルモデルでの検討が必要である。

浜走ら（2001,海岸工学）は国交省のデータ、各地の水位データ等を基本として、ボックスモデルを適用し、海域の水塊体積時間変化率は、海域への流入、流出及び海域への河川流入量で決まるとして、海域間の海水移流量を求めた。海域区分は伊予灘、広島湾・安芸灘、燧灘・備讃瀬戸、播磨灘・大阪湾・紀伊水道としている。移流量の月ごとの変化から、全体として7～10月に移流量が多くなる。2～6月

には瀬戸内海西部、中央部では外から内へ向かう流れが生じ、8~1月には瀬戸内海全体で内から外へ向かう流れが生じている。年平均の移流からは瀬戸内海から外海への流れとなり、特に東部海域は年間を通して外海に向かう流れとなる。さらに瀬戸内海東部を分割し、播磨灘、大阪湾、紀伊水道間の移流量を推定している。結果は、7月頃から大阪湾から紀伊水道への流れが生じ、同時に播磨灘から大阪湾に向かう流れが生じる。9月頃から播磨灘から紀伊水道に向かう流れが卓越すると播磨灘から大阪湾への流れは小さくなる。塩分を保存量として海水交換量を求めている。その結果、紀伊水道・外海間、豊後水道・伊予灘間、備讃瀬戸・播磨灘間は他海域の数倍となる。備讃瀬戸・播磨灘間では7~8月に他海域の10倍近くなる。東部海域での海水交換量に関しては、夏期に海水交換量は卓越する。播磨灘・大阪湾の海水交換は両海域の塩分逆転に対応してピーク値を取っている。東部海域の海水交換量は西部海域の伊予灘・広島湾間と同程度である。

駒井ら(2001,2002,海岸工学)は、瀬戸内海における平年の密度、海面気圧と水位の季節変動量の関係について考察を行い、外海水位、密度、海面気圧による水位変動を推定した。外海水位を境界条件とした平面2次元数値解析モデルによって瀬戸内海の水位の季節変動量を推定した結果、外海水位と密度分布および海面気圧による影響により水位の季節変動量が概ね説明できることが示された。さらに駒井ら(2003,海岸工学)は、瀬戸内海総合水質調査データを用いて、最近の20年間を対象とし、季節的に変動する瀬戸内海での流れ場について検討した。前述した計算モデルを改良し、水位・水温(黒潮流路)、河川流出量の特性から分けられた3つの期間(1982-88豊後水道水位高、1989-93紀伊水道高、河川流量大、1994-99紀伊水道水位大)に適用し、各期間の平均的な1年間の内海での流れ場の比較を行っている。豊後水道から紀伊水道に向かう流れが卓越しているが、内海への河川流出量や密度分布によって流れ方向が変化することが明らかにされたとしている。

陸田ら(2003,海岸工学)は、複雑地形を有する瀬戸内圏を対象とした大気海洋モデルを開発し、16方位の風向によって形成される局地風の風況特性、さらには、これに伴う瀬戸内海の吹送流の応答特性を検討した。瀬戸内海を対象とした大気海洋モデルは、局地気象モデルARPS(The Advanced Regional Prediction System)と海洋モデルPOM(Princeton Ocean Model、ただし密度一定)に基づきモデル構築がなされている。その結果、瀬戸内海では、海域周辺の3次元的な陸地形の効果によって吹送流の応答特性が大きく異なることが明らかとなった。つまり、瀬戸内海のように四方陸地に囲まれた閉鎖性海域の気象・海象特性を把握するには、3次元局地風や瀬戸内海特有の海岸・海底地形を無視することは出来ないとしている。地形的に東西方向に開けた瀬戸内海は、その方向の風によって大きな吹送流が発生しやすい。冬季の季節風により、東方向の流れが強化・卓越する傾向がある。

阿保ら(2006,海岸工学)は、冬季の東部瀬戸内海における無機態窒素濃度に及ぼす残差流の影響を検討している。密度場及び風速場から、診断モデルにより東部瀬戸内海の残差流を計算した。残差流は風の影響を強く受け、季節風の強い1~2月には東向きの通過流が発生し、播磨灘北部では強い東向きの残差流が発生した。この残差流に伴い栄養塩濃度の低い水塊が燧灘から東進し、備讃瀬戸および播磨灘の栄養塩が低下した。播磨灘北部の栄養塩濃度は、夏期に低く秋に上昇して12月に最大となり、冬季になると低下した。この冬季の濃度低下は東向きの残差流発生後に起こり、西よりの季節風が早期から強い年には栄養塩濃度の低下が早くノリ養殖不作の原因になることが指摘されている。

海峡部の流れについては、小林ら(2006,海岸工学)は、瀬戸内海中央部(備讃瀬戸と播磨灘)の潮汐フロント域において密度流の実測(流速・塩分プロファイル、乱流エネルギー逸散率=>鉛直拡散係数)を行い、数値モデルと併せてフロントを横切る流れが生じる機構について検討を行った。潮汐フロント

域では水平密度勾配による密度流が生じ、流れの主成分はコリオリの効果によってフロントに従う方向となる。しかし、それが陸岸に達した後は岸に沿って流れるため、フロントを横切る方向となり、これに対応した物質輸送が生じるとしている。これは陸岸に囲まれた潮汐フロント域に共通するメカニズムであると考えられる。

### 3. 1. 2 水質

瀬戸内海の水質に関する既存の研究を検討して得られた主な結論、課題等をまとめると以下の様になる。

- (1) 外洋からの栄養塩供給は無視出来ない。水温と栄養塩の相関は高い。
- (2) 陸域からの栄養塩負荷は減少した。しかし、海域の栄養塩分布は必ずしもこれに対応していない。
- (3) 西部海域と東部海域では N/P 比が異なる。植物プランクトンにとっては、西部海域では窒素制限、東部海域ではリン制限の傾向があると考えられる。
- (4) 大阪湾は、陸水負荷の寄与率が高い。
- (5) 海峡部は強い流れのために栄養塩の水平輸送能力は高い。
- (6) 栄養塩輸送は、備讃瀬戸周辺を境界として、東西に分かれる傾向にある。
- (7) 河川水に含まれる栄養塩濃度、懸濁態の適切な推定が必要である。

以下に取り上げた既存の研究について述べる。

瀬戸内海に流入する一級河川は 20 程度と多い。これらの河川からの淡水流入による瀬戸内海への栄養塩供給は大きい。年間総流量の変動が大きい、長期なトレンドは見られない。李ら（1995, 海岸工学）は、原単位法を用いて流入負荷量の瀬戸内海水域毎の COD、TN、TP の経年変化（昭和 62 年まで）を推定している。全体的な経年変化の傾向は、①昭和 40 年代の急激な増加傾向、②それ以降の減少、③昭和 50 年前半から昭和 60 年代はほぼ横ばいの傾向となっている。最近の傾向は不明であるが、浄化施設の充実及び排出規制による汚濁負荷の減少等を考慮すると減少傾向であると考えられる。各海域別に見ると、大阪湾への負荷流入が最も大きく、全体の 37.1%を閉めている。続いて播磨灘、周防灘、紀伊水道、燧灘、安芸灘、伊予灘、備讃瀬戸の順である。そのほか、海域別に負荷量についての研究成果があるが、上記の経年変化の傾向は一致している。

では実際の海域別での栄養塩等水質の長期的変はどのようになっているのであろうか？

海域での窒素、リンの経年変化については、せとうちネット (<http://www.seto.or.jp/seto/index.htm>) によると経年的な変化は少ないが、TN、TP はともに近年では横ばい傾向で COD、透明度は漸増傾向であった。平成 15 年度の海域別 COD は、大阪湾、備讃瀬戸、周防灘、播磨灘、燧灘、安芸灘、紀伊水道の順であった。前述した負荷流入量と海域での濃度の順位が異なっているが、これは主にその面積及び流動環境が海域によって異なっていることによるものと考えられるが、第 1 位は大阪湾で共通であり、負荷量も多くかつ富栄養化が進んでいる状態となっていることがわかる。

瀬戸内海全体での栄養塩輸送機構については、藤原ら（2003, 海岸工学）が種々のデータベースや現地調査等から検討している（ただし夏の場合）。外海の高塩分水が紀伊・豊後水道下層から瀬戸内海中央部に進み、備讃瀬戸で上昇して、東西に分離し、上層へ数 km/日の流速で広がる。海域毎にみると潮流の早い海峡部ごとに強混合域が存在する。この鉛直循環流により、紀伊水道側では底層の栄養塩が紀淡海峡で鉛直混合を受け、一部は有効層、残りは大阪湾西部底層を通過し明石海峡で有光層に供給される。豊後水道側では、豊予海峡において有光層に供給され、伊予灘 10m 層を通過し、来島海峡から再度底層を通過する。この輸送ルートでは、伊予灘の有光層内で消費され、来島海峡から燧灘下層への流

入水は貧栄養となる。このために燧灘は全層で貧栄養となる。

柳ら（は、瀬戸内海での栄養塩動態（窒素・リンの現存比率、溶存態 N、P、Si の分布、全リン・全窒素の起源と濃度変動機構、沿岸域・全域における TP・TN 濃度変動機構）について、一連の検討を行っており、以下に述べる。

瀬戸内海で長年実施されている水質調査データ（全域に対する広域総合調査、環境省：沿岸に対する公共用水域水質調査、地方公共団他）を基に、瀬戸内海各灘・湾における水質制御指標を提案し、水域毎の特性を検討した（石井ら,2005,海の研究）。富栄養化対策として実施される陸域からのリン・窒素負荷総量規制の効果の現れやすい水域と現れにくい水域が存在することが示された。陸域負荷の影響を受けやすい陸域から概ね 2~3km の領域を「沿岸域」とし、紀伊水道から豊後水道を含む（響灘を除く）の水域全体を「全域」として検討している。解析対象は鉛直混合が活発な冬季のデータを用いている。1979~1998 年の期間では、沿岸域では TP、TN とも減少していること、TP の減少が大きいこと、全域では TP に関しては減少傾向にならず、むしろ微増傾向であること、全域の TN も長期トレンドとしては微増傾向である。陸域からの負荷が減少しているのに、全域の TP、TN が増加している理由として、外洋起源の栄養塩流入の増加、底質からのリン・窒素の溶出増加の可能性が考えられる。DO の経年変化は微増傾向であることから、底質からの溶出増の可能性は少ないのではないかと考えられた。各海域での沿岸・湾灘全域での沿岸域濃度と全域濃度の比 C-Ratio を検討した。その結果、紀伊水道が最も大きく、大阪湾、備讃瀬戸の順であった。紀伊水道が最大という点には疑問が残るとしている。C-Ratio を沿岸での水質制御指標として、各水域での陸域負荷削減対策による沿岸域での水質改善効果の現れやすさについて検討した。その結果、陸域での負荷削減対策が効果を上げるのは紀伊水道、大阪湾であり、播磨灘、安芸灘、広島湾、別府湾は効果が現れにくいとしている。

橋本らによる 1993（10 月）、1994 年の観測データ（1、4、6 月）から、形態別窒素・リン・珪素の海域別・季節別変化について検討を行っている（林ら,2000,海の研究）。瀬戸内海全体の年平均では DOP、DIP、POP の現存割合は 1/3 程度であり、窒素も同様であった。生物活動が活発なために全体的に DIN の割合が低くなり、DON が高くなる。特に 4 月燧灘~伊予灘・周防灘にかけて DIN が非常に低い。10 月は DIN の比率が高くなり、DON が低くなる。海域別では広島湾北部でプランクトン含有窒素が年間を通して高い。大阪湾北部ではプランクトン含有率窒素は先の海域に比べて低い。この理由としては、同海域の基礎生産は瀬戸内海中最も高いが、陸水による栄養塩供給が過剰なためとしている。リンに関しては、総じて窒素同様の傾向となっている。4・6 月の DIP 現存割合が DIN に比べて大きいこと、DOP の割合が DON に比べて低いことが異なる点である。この傾向は瀬戸内海西部で顕著である。これらのことから、瀬戸内海西部海域での基礎生産が窒素制限の傾向にあることを示していると考えられた。Si/DIP、DIN/DIP の海域別分布から、大阪湾での Si/DIP は年間総じて低く、ケイ藻の生産が制限される可能性の高い海域としている。DIN/DIP では、西部海域で 4、6 月ともに低い傾向にあり、窒素制限傾向である可能性があるとしている。備讃瀬戸以東海域では DIN/DIP がレッドフィールド比を上回っており、リン制限であることが示唆される。

フェリーによる DIP、DIP、DSi 観測データ（1994~2000 年）から、鉛直混合が盛んな冬季の観測結果を利用し、海域別の栄養塩特性を分析した（柳ら,2003,海の研究）。7 年間平均の冬季栄養塩分布を求めた。DIP については、瀬戸内海東部で高く、西部で低かった。大阪湾は他海域の 2~3 倍であった。DIN については、別府湾を除くと DIP と同様な傾向にあった。大阪湾は他海域の 4~9 倍であった。DSi については、別府湾、大阪湾で高く、燧灘でわずかに高く、伊予灘で最も低かった。また、海域別

に陸域からの負荷量を推定している。単位容積あたりでは TN、TP 負荷量は備讃瀬戸と大阪湾で大きい。DIP、DIN 海域別分布から見ると大阪湾は対応しているが、備讃瀬戸は対応していない。播磨灘は備讃瀬戸より負荷量は小さいのに DIP、DIN は逆に大きい。この理由としては、備讃瀬戸の強い潮流により、負荷された栄養塩は速やかに播磨灘、燧灘に輸送されると同時に大阪湾から播磨灘への栄養塩が輸送されてくるためと考えられる。DSi 負荷量に関しては、備讃瀬戸、別府湾、大阪湾の順となっている。しかし、備讃瀬戸では DSi 濃度は低く、潮流による水平輸送が大きいためであると考えられる。DIN/DIP、DSi/DIP、DSi/DIN の海域別分布から、大阪湾は、著しく N/P が高く Si/N が低い。これは淀川の人為的負荷が大きいこと、琵琶湖での植物プランクトン増殖による珪素取り込みによる結果と考えられる。別府湾は河川流量が相対的に多いので Si/P が大きい。さらに各水域間での栄養塩フラックスの推定を行っている。その結果、DIP は大阪湾から別府湾までの水平輸送が存在する。DIN に関しては、大阪湾から燧灘への水平輸送、安芸灘・別府湾から伊予灘への水平輸送がある。DSi は大阪湾から備讃瀬戸経由播磨灘、燧灘から備讃瀬戸・安芸灘、安芸灘・別府湾から伊予灘への水平輸送があるとしている。

環境省により実施されている瀬戸内海総合水質調査で取得された TP、TN 濃度から 1981~2000 年の冬季水域別平均値を使用して、瀬戸内海における陸域と外洋起源の TP、TN 濃度推定を試みている（石井ら、2004,海の研究）。大阪湾では陸起源の TP が 6 割、TN が 7 割も存在し、陸域からの影響が支配的であることがわかった。これは同湾への TP、TN 負荷量が瀬戸内海総負荷量の 1/3 と非常に多い上に、内海最大の流量の淀川を経由して湾内に流入するためであるとしている。一方、瀬戸内海西部では外洋からの寄与率が 8 割以上を占めており、東西で対照的な水域特性を有することが判明した。各水域における外洋起源 TP、TN 濃度変動が紀伊水道・豊後水道のどちらを通じて影響を強く受けているかについて検討した結果、平均的には TP、TN ともに備讃瀬戸付近を境に西では豊後水道、東では紀伊水道を通じての影響が有意であることがわかった。以上までが柳らの一連の研究である。

瀬戸内海での外洋起源の栄養塩比率に関しては、武岡、柳（前述）をはじめとしたいくつかの研究がある。これらを比較するとそれぞれの研究でこの比は異なっているが、外洋起源窒素比率は 2/3 程度であるとしている（武岡,2005,沿岸海洋）。解析においては、河川からの栄養塩供給なしの場合での瀬戸内海の栄養塩濃度は豊後・紀伊両水道に接する栄養塩濃度と等しくなるという考え方から算出した栄養塩濃度を Background 濃度とした。この見積もりは Background 濃度をどの程度にするか他問題点があるものの、外洋起源が少なからず影響していることを示している。

外洋域に接続している豊後水道、紀伊水道からの栄養塩供給については、藤原（2001,2002,2003,海岸工学）及び武岡ら（1996,2002,2006,沿岸海洋研究）が系統的な研究を継続的に行い、両水道からの栄養塩供給は無視出来ない量であることが指摘されている。一連の研究を総括してみると以下のようなことが言える。紀伊水道においては、栄養塩の流出入は黒潮の離接岸に大きく影響を受けており、黒潮接岸期においては主として栄養塩の流出が主であり、黒潮が離岸していると底層からの栄養塩の流入が卓越する。ただし、この現象は夏期に限られ、冬季は黒潮の離接岸に係わらず、流出傾向にあるとしている。豊後水道では、以前から急潮と呼ばれる黒潮暖水の表層侵入とこのイベント後に底層の栄養塩が増加することが知られている。急潮後に湾外からの低温水（陸棚斜面起源）侵入がその原因と考えられている。加えて、武岡らが「底入り潮」という底層からの低温・高塩分水塊が宇和海にまで侵入しており、この二つの現象が外洋からの栄養塩供給メカニズムであるとしている。さらにこれらの現象は周辺海域での動植物プランクトン組成にも大きく影響を与えているとしている。両水道での高栄養塩水塊の侵入は、いずれも黒潮の離接岸に大きく関係していると思われる。ただし、紀伊水道では黒潮離岸時、

豊後水道では九州東岸への黒潮接岸時にそれぞれ高栄養塩・低温水（離棚斜面の冷水）の侵入が見られる。これは、それぞれの水道周辺の地形条件、陸棚斜面起源の冷水領域、黒潮の位置関係及び黒潮の動きによって生起条件が異なってくるためと考えられる。その直接的影響範囲は、紀伊水道側では大阪湾西部海域、豊後水道では伊予灘南部海域に及んでいるとしている。従って、間接的にはそれよりかなり広い範囲に影響を与えるものと考えられる。外海から流入する栄養塩濃度は、紀伊・豊後水道ともに水温との相関が高い。

藤原ら（2006,沿岸海洋研究）は、豊後水道の水深 100m 水温と細島の水位がほぼ連動していることから、細島の水位の長期データから 100m 水温の長期変動を推定した。水温と栄養塩濃度は高い負の相関があるので、これを用いて 100m での栄養塩濃度長期変動を推定した。その結果、数十年スケールの変動があり、硝酸塩窒素濃度は  $7\sim 9\mu\text{M}$  で変動している。変動のパターンは大まかに紀伊水道と共通しており、1980 年代後半は低水温・高栄養塩期となっている。また、大阪湾での栄養塩・水温変動を分析して、外海から流入する栄養塩量の 30 年間の経年変化を調べた。大阪湾西部底層には、紀伊水道から外海起源の栄養塩が流入しており、この流入が大阪湾内の水質に影響を与えている。外海から大阪湾への栄養塩の流入量には大きな経年変化があり、1980 年代後半に極大があり、その後減少し、1990 年代後半には極大時の約 2 分の 1 になった。この変動が瀬戸内海の水質の長期変動に影響を及ぼしていることを示した。外洋からの栄養塩供給の多寡は、陸棚斜面水の動きにより決定されており、黒潮の動きが大きく影響していることを示している。

河川水に含まれる栄養物質は、無機溶存態、有機溶存態、懸濁態（POM）である。これらは源流、上流域、中流域、下流域で変化しているが、沿岸域では河口域でのこれらの量が重要になる。また、河口域は海水と河川水が混合する領域である。河川水に含まれる栄養塩は、流域の土地利用、点源負荷（工場、畜産場、污水处理場等）、地質構造等で変化する。河川水に含まれる栄養塩濃度は季節的にも変化する。例えば、新井ら（2006,海岸工学）は利根川の栄養塩を年間測定したが、その結果、秋期・冬季には硝酸態窒素は、 $200\mu\text{mol/l}$  と春期、夏期に比べて 2 倍の濃度となることを報告している。さらに出水時における硝酸態窒素濃度を連続計測しており、出水に伴う濃度変動はそれ程大きくないことを報告している。また、懸濁態に含まれる窒素・リンは、SS 濃度と比較的相関が高いことを報告している。山本ら（2003, 河川技術）は瀬沼川水系（農地河川）、白川（阿蘇カルデラ集水域）について、観測を行い、溶存態・懸濁態、濁度（SS 濃度）、流量の関係を検討している。その結果、同様に SS 濃度と窒素・リンは相関が高く、SS は流量と関係があるが、一般にその関係はヒステリシスカーブとなる。一方、溶存態窒素  $\text{NO}_3$  はヒステリシスではなく流量とほぼ一次の線形関係にある場合が多いとしている。それぞれの河川は、土地利用や点源負荷等に応じて異なっており、この点について詳細な検討が必要になる。しかし、河川データは、TN、TP、SS データに限られており、溶存態に関するデータは少なく、溶存態栄養塩をこれらのデータから推定せざるを得ない状況にある。

平水期あるいは渇水期には、流速が遅いうえ、ダム、河口堰他流域に滞留域がある場合には、水温が植物プランクトンのにとって適切であるならば増殖する結果、溶存態が減少し、懸濁態に移行するメカニズムが働く。しかし、これは水温が高くなる夏期から秋期にかけて頻繁に起こると考えられるが、水温が低い状態ではこのようなことが起こりにくいと考えられる。冬季に栄養塩が高くなるのは、流域での負荷発生状況も絡んでくるが、河川水域においての一次生産の活性が低くなることも大きな要因の一つではないかと考えられる。

### 3. 1. 3 底質・ベントス等

水質に影響を与える重要な問題として、瀬戸内海における底質分布がある。海域での生産過程や陸水からの有機物負荷により、有機物は海底に堆積する。堆積した有機物は、ベントス、細菌類等により、消費分解される。しかし、負荷量が多くなると未分解の有機物の堆積が増加し、これまで良好であった底質環境が悪化し、夏期の貧酸素化、底質からの栄養塩溶出増加による内部生産の増加によるさらなる貧酸素化・有機物の堆積という悪循環サイクルに陥る。通常的环境下であればベントス類が生息し、適切な物質循環が行われるが、有機汚泥化した領域では、夏期の貧酸素化等によりベントス類の避難あるいは斃死が発生する結果、ベントス群集のサクセッションをストップ（またはリセット）させてしまう。せとうちネットに底質の含泥率、COD、マクロベントス種類・固体数の分布が公表されている。含泥率分布を見ると、瀬戸内海の流れを反映し、流れの速い海域では、含泥率が低く、閉鎖度が高い海域ほど高い分布となっている。CODの分布もほぼ同様である。マクロベントスの個体数・種類数に関しては、含泥率・CODの分布とは異なり、閉鎖性が強い海域の主要な領域では少なく、むしろ流れの強い海域周辺に多い傾向にある。個体数・種類数のみでなく、その構成及びその経年変化が重要であると考えられるが、この分布を見るだけでも、海域の特性を反映した分布特性を示しており、各海域の生産性、負荷、水理環境が密接に関連していることが伺える。大阪湾や広島湾での研究成果等から、底質からの栄養塩溶出は、季節的には夏期に大きく、冬季に少ないと考えられる。特に夏季における貧酸素化は、大阪湾、広島湾奥では深刻である。こうした底質からの栄養塩供給は、瀬戸内海の低次生産や環境を評価する上では無視することは出来ない。

## 2. 2 瀬戸内海全域への流動低次生産モデルへの適用

### (1) モデル概要及び計算条件等

既に述べたが、瀬戸内海は非常に複雑な地形をしていること、周防灘などのように浅く、奥には干潟が広がっている領域もある。河川流量も多い。このことから、流動の数値モデルを適用する場合には、①地形効果を良く反映出来ること、②淡水流入に伴う密度成層の形成を良く再現出来ること、③外洋の条件や気象（風向、風速、気温、湿度、全天日射量、雲量等）を入力しやすいこと、④計算メッシュを小さくするために計算領域が大きくなることからロバスト性に優れていること、⑤生態系（栄養塩も含む）モデルを容易に組み込めること、⑥ネスティングや可変格子形成が容易なことなどを考慮する必要がある。

著者らは、既に述べたが、以前から開放性沿岸域である鹿島灘・九十九里を対象に流動・低次生産モデルの開発を行ってきた。そのベースはPOMである。これに低次生態系モデルを結合させている。同海域には黒潮、親潮続流が存在し、外洋の流れが直接沿岸域に波及する。このため、これら海流を適切に考慮することが必要である。また、利根川、那珂川という1級河川があり、これらの影響（淡水流入、懸濁物、栄養塩等）を考慮することも必要である。前者についてはPOMと沿岸・外洋観測値を用いた同化モデルにより求められる流動、水位、塩分・水温が、既にFRAJCOPE、JCOPEデータ（1日平均）で公表されており、このデータを利用することができるようモデルを構築している。後者については、河川データを用いて淡水流入、栄養塩供給等もモデルに組み込まれている。POMは他のモデルより、コード数が少なく、比較的容易に改良できることが大きな利点である。先に挙げた諸課題に対応する基本的なモデルを構築するために、このモデルを用いることが最も効率的と考え、瀬戸内海に適用出来るように改良を加えた。なお、本モデルは現在でも多重ネスティング、干潟での干出・冠水等種々の改良作業が継続されている。ここでは、途中の段階の計算結果等を紹介する。なお、低次生態系モデル



はKKYSモデル(Kawamiyaら, 1995)をベースとし、リンのコンパートメントおよび底泥の栄養塩溶出項を組み込んでいる。

以下にモデルの概要、条件等を述べる。

瀬戸内海モデルの計算領域は、瀬戸内海全域を含む南北 234km, 東西 421km の領域とし、豊後水道、紀伊水道、関門海峡を開境界とした(図-11)。

既に述べたが、瀬戸内海の流れを駆動する主要な外力は潮汐及び風である。潮流は往復流であるため、正味の物質輸送は潮汐残差流・吹送流・密度流によって決定される(柳,1992)。物質の供給源は河川(陸起源)、底泥からの溶出に加えて、前述したように外洋からの供給が重要であることが明らかにされてきた。瀬戸内海モデルを構築する際には、上記の影響を適切に取り込むことが重要である。

表-2 に瀬戸内海モデルの概要を示す。主要な外力である潮汐は、紀伊水道と豊後水道の開境界に天文潮位を与え、風は気象庁の GPV(RSM)データを使用して時空間的な変化を考慮した。河川は瀬戸内海に流入する 21 の一級河川を考慮し、底泥からの栄養塩溶出量は山本ら(1998)の結果を時間的にスプライン補間して海域ごとに設定した。外洋の流速・水温・塩分は、JCOPE 同化データ(宮澤ら, 2003)を開境界に与えた。JCOPE データの空間分解能は本計算の空間分解能より大きいので、内挿して計算境界値として用いた。外洋の硝酸塩(以下, NO<sub>3</sub>)及びリン酸塩(以下, PO<sub>4</sub>) は、日本海洋データセンター(以下, JODC)のデータを解析して得られた水温と NO<sub>3</sub> 及び NO<sub>3</sub> と PO<sub>4</sub> の関係式(図-12)を使用して、開境界の水温から NO<sub>3</sub>, その NO<sub>3</sub> から PO<sub>4</sub> を算出して開境界に与えた。ただし、40m 以浅では水温と NO<sub>3</sub> の間に明確な相関関係は見られなかったため、40m 以浅の平均値を与えた。

## (2) 計算結果

### (1) 流動場計算結果の検証

流れを駆動する主要な外力である潮位の再現性については、気象庁による観測潮位と計算結果の水位をそれぞれ調和分解して得られた分潮成

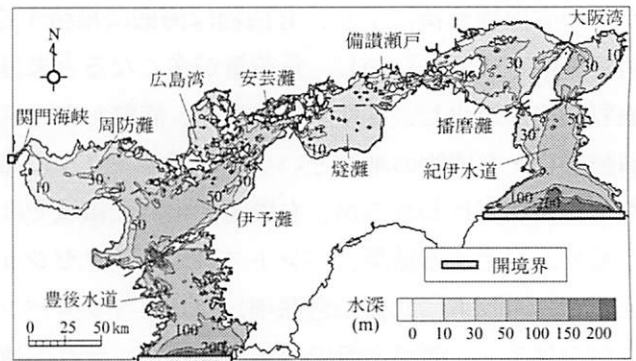


図 11 瀬戸内海モデルの計算領域

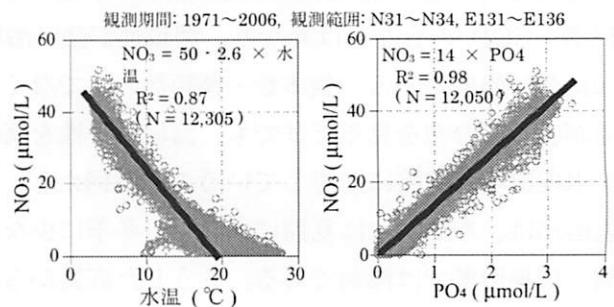


図 12 NO<sub>3</sub> と水温及び NO<sub>3</sub> と PO<sub>4</sub> の関係

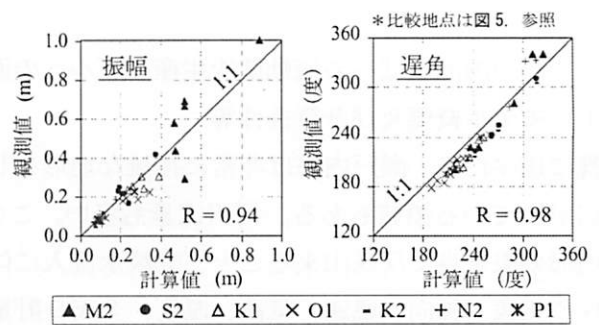


図 13 計算水位と実績潮位の調和成分の比較

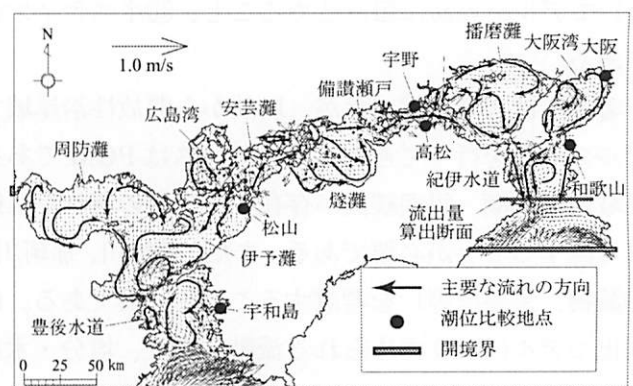


図 14 計算結果による表層残差流

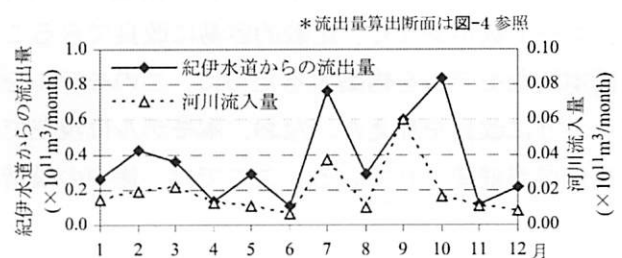


図 15 紀伊水道からの流出量及び瀬戸内海への河川流入量

分(M2,S2,K1,O1,K2,N2,P1)の振幅及び遅角を比較した(図-13)。その結果、相関係数はそれぞれ0.94 および 0.98 であり、潮位の再現性は良好であると考えられた。正味の物質輸送を支配する循環流、恒流は柳ら(1992)など多数の研究がなされており、大阪湾の時計回りの沖ノ瀬環流や広島湾の反時計回りの循環流が知られている。計算による1年間の表層平均流速から(図 14), それら既知の循環流等を概ね表現できていることが確かめ

られた。藤原ら(2006)によると、瀬戸内海を通過する流量は10年スケールの変動があるが、豊後水道から流入して紀伊水道から流出する年が多い。計算による月ごとの平均流速と水深から通過流量を算出

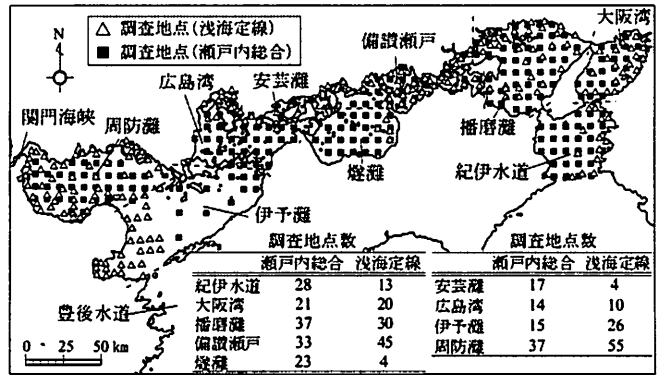


図 16 調査地点及び地点数

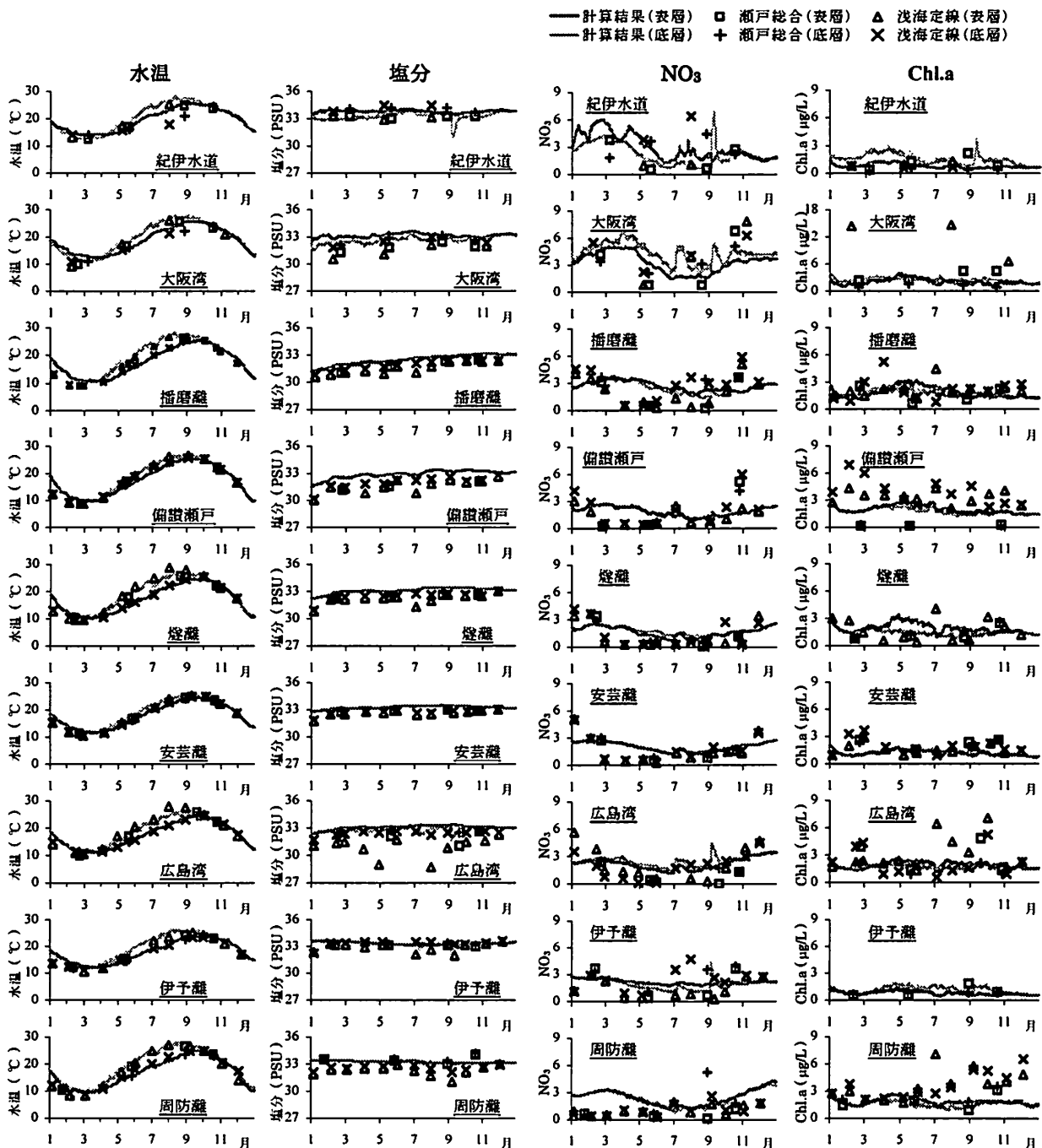


図 17 計算結果と観測値の比較

した結果、2005 年は豊後水道から流入して紀伊水道から流出する傾向がみられ、その流出量は瀬戸内海に流入する 21 の 1 級河川の総流量の 10 倍程度であった(図 15)。

以上より、本モデルは瀬戸内海の流動場を概ね再現できているものと考えられる。

## (2) 水温、塩分及び低次生産計算結果の検証

水温、塩分、 $\text{NO}_3$ 及びクロロフィル a (以下、Chl.a)は、瀬戸内海総合水質調査データ(以下、瀬戸内総合)及び各県の浅海定線データ(以下、浅海定線)の海域ごと平均値との比較検証を行った。図 16 に両データの観測地点を示す。観測結果より、2005 年の瀬戸内海における水温は 3 月頃に  $10^\circ\text{C}$  程度の極小値をとり、4 月以降に水温の上昇に伴い水温成層が発達して 8 月に表層と底層の水温差が最も大きくなる(図 17 最左列)。表層水温は 9 月に約  $25^\circ\text{C}$  の極大値となり、底層水温は 10 月に極大値となる。計算結果は、紀伊水道の 8 月、9 月では実測値に比べて水温は高めであるが、それを除けば、計算結果は観測結果を適切に再現できているものと考えられる。観測結果より、塩分は外洋に面した伊予灘及び紀伊水道以外では、量的な差はあるものの時間の経過と共に高塩分化する傾向があり、燧灘以東で特にその傾向が強い(図 17 左から 2 列目)。計算結果の塩分は、そのような高塩分化の傾向を概ね再現しているものの、全体的に観測結果より高めであった。瀬戸内海に流入する 2 級河川の流域面積の合計は 1 級河川の約 1/2 に相当する(せとうちネット、2009/5/17 参照)。それゆえ、1 級河川のみを考慮した本モデルでは、流入する淡水量が実際よりも少なかった可能性がある。更に、塩分の初期値を瀬戸内海全域の観測値が入手できた瀬戸内総合の 2005 年冬季データ(1 月～3 月)から作成したため、計算初期値が実際の 1 月の塩分より幾分高めであった可能性もあり、今後改善する必要がある。

観測結果から、 $\text{NO}_3$ は 1 月から減少傾向で 3 月、4 月には  $1.0 \text{ mmol/L}$  以下まで減少している。4 月から 6 月は低濃度で推移し、7 月から 9 月は海域ごとに傾向が異なり、10 月以降は増加傾向であった(図 17 右から 2 列目)。一方、Chl.a は  $\text{NO}_3$  が大きく減少する 3 月又は 4 月に極大となり(春季ブルーム)、次の月には減少して安芸灘や広島湾では 1/2 以下になっている(図 17 最右列)。4 月以降は、7 月、8 月に表層、9 月、10 月には表層と底層で一時的に Chl.a が増加している海域がある。計算結果では、夏季に  $\text{NO}_3$  が低く秋季から冬季に濃度が上昇する傾向を再現しているが、春季における  $\text{NO}_3$  の枯渇状況は再現できていない。これは、春季の Chl.a 極大を過小評価したためと考えられる。春季以降は、Chl.a の全体的な濃度は概ね再現できているが、一時的に高濃度となる状況は再現できていない。春季ブルームを再現できていない原因としては低次生産モデルのパラメータ設定及び計算開始から 2 ヶ月後であるため、各物質が春季ブルームを再現しえる濃度ではなかったことが考えられる。今後は、複数年にわたる検証などを通じて春季ブルームや一時的な Chl.a 濃度の上昇を支配する要因を解明し、モデルの精度を向上させる必要がある。

## 3. 終わりに

開放性沿岸域として鹿島灘、閉鎖性海域として瀬戸内海を取り上げ、これまでの研究成果と著者らが行った検討について述べた。まだまだ不十分な点が多いが、今後はこれらをベースに水産資源(高次生態系)の定量的評価に向けて、さらに検討していくことが必要であると考えている。著者らは現在、干潟や島嶼部での高分解能化や干出・冠水の再現などのための検討を継続している。また、最近浮遊系・底泥系の結合による沿岸環境評価モデルが急速に発展しているが、閉鎖性海域については底泥が沿岸環境には大きく影響することから、検討中である。これらについては別の機会に紹介したい。

## 参考文献

### 開放性沿岸域関係

#### <石狩湾>

- ・石狩湾沿岸の流動特性 著者：山下俊彦，木下大也，多田彰秀，福本正，橋本剛，北原繁志，谷野賢二，海岸工学論文集，第44巻，pp.371-375. (1997)
- ・石狩湾沿岸の冬期の三次元流動特性著者：山下俊彦，星秀樹，新山雅紀，長谷部隆光，福本正，多田彰秀，海岸工学論文集，第46巻，pp.426-430. (1999)
- ・融雪洪水期の石狩湾沿岸での広域流動特性と河川水流動に関する現地観測著者：山下俊彦，宮下将典，長谷部隆光，橋本剛，福本正，多田彰秀，海岸工学論文集，第47巻，pp.451-455. (2000)
- ・石狩湾海域における広域の流動・水温変動特性著者：王 毅，隅江 純也，山崎 真一，足立 久美子，山下 俊彦，海岸工学論文集，第51巻，pp.1136-1140. (2004)
- ・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―著者：足立久美子，山崎真一，山下俊彦，江里口知己，市川哲也，海岸工学論文集，第53巻，pp.1121-1125. (2006)

#### <鹿島灘>

- ・開放性海岸における夏季の水温変動特性著者：八木宏，緒方健太郎，坂本太郎，灘岡和夫，海岸工学論文集，第43巻，pp.1201-1205. (1996)
- ・非成層期における開放性沿岸域の底層流動特性 著者：八木宏，日向博文，灘岡和夫，海岸工学論文集，第43巻，pp.406-410. (1996)
- ・開放性沿岸域における成層期の水温構造と流動特性に関する現地観測 著者：八木宏，坂本太郎，灘岡和夫，海岸工学論文集，第44巻，pp.416-420. (1997a)
- ・風が引き起こす非成層期の沿岸境界層の基本特性 著者：八木宏，緒方健太郎，日向博文，灘岡和夫，海岸工学論文集，第44巻，pp.456-460. (1997b)
- ・長期・広域観測データに基づく鹿島灘沿岸域の大規模流動解析 著者：八木宏，日向博文，緒方健太郎，灘岡和夫，海岸工学論文集，第45巻，pp.421-425. (1998)
- ・熱変動特性から見た夏季鹿島灘沿岸域における海水流動特性の解明著者：八木宏，日向博文，内山雄介，灘岡和夫，海岸工学論文集，第46巻，pp.396-400. (1999a)
- ・鹿島灘における広域海水流動と河川水挙動に関する現地観測著者：灘岡和夫，二瓶泰雄，小西伸英，中山哲殿，足立久美子，藤井智文，佐藤健治，山下俊彦，海岸工学論文集，第46巻，pp.486-490. (1999b)
- ・黒潮流路変動に対する大規模沿岸流れの応答と沿岸水の流出過程について 著者：八木宏，身崎成紀，灘岡和夫，中山哲殿，二平章，山下俊彦，福本正，海岸工学論文集，第47巻，pp.391-395. (2000a)
- ・大陸棚縁辺海域における非線形内部波の基本特性について 著者：八木宏，Azhar Mohad，日向博文，灘岡和夫，中山哲殿，足立久美子，海岸工学論文集，第47巻，pp.396-400. (2000b)
- ・鹿島灘沿岸域における栄養塩及びクロロフィル a 量の時空間変動特性 著者：大森義暢，八木宏，足立久美子，二平章，海岸工学論文集，第48巻，pp.1271-1275. (2001)
- ・黒潮流路変動に伴う沿岸域への栄養塩流入現象 著者：八木宏，足立久美子，二平章，高橋正和，海岸工学論文集，第49巻，pp.1216-1220. (2002a)
- ・那珂川河口海域における物質分布構造の季節変化 著者：八木宏，大森義暢，足立久美子，二平章，高橋正和 海岸工学論文集，第49巻，pp.1026-1030. (2002b)
- ・那珂川沿岸河口域における水質・底質分布と一次生産構造 著者：中山 哲殿，佐伯 信哉，足立 久美子，齊藤 肇，奥

西 武, 八木 宏, 海岸工学論文集, 第 51 卷, pp.1086-1090. (2004a)

・鹿島灘南部沿岸域の栄養塩変動に及ぼす利根川河川水の影響 著者: 足立 久美子, 中山 哲殿, 海岸工学論文集, 第 51 卷, pp.1141-1145. (2004b)

・鹿島灘北部海域の一次生産に及ぼす那珂川の影響 著者: 中山哲殿, 齊藤肇, 新井雅之, 足立久美子, 奥西武, 八木宏, 海岸工学論文集, 第 52 卷, pp.1051-1055. (2005)

・鹿島灘・九十九里浜沿岸での一次生産に及ぼす利根川・那珂川の影響について 著者: 新井雅之, 中山哲殿, 足立久美子, 齊藤肇, 奥西武, 八木宏, 海岸工学論文集, 第 53 卷, pp.1101-1105. (2006)

・鹿島灘海岸における長期モニタリングからみた栄養塩および植物プランクトン変動 著者: 足立久美子, 中山哲殿, 齊藤肇, 海岸工学論文集, 第 54 卷, pp.1156-1160. (2007a)

・黒潮・親潮続流の影響が強い開放性沿岸域での一次生産に及ぼす河川水の影響 著者: 新井雅之, 中山哲殿, 足立久美子, 齊藤肇, 奥西武, 海岸工学論文集, 第 54 卷, pp.1176-1180. (2007b)

・開放性沿岸域における基礎生産を制限する環境諸要因について 著者: 足立久美子, 中山哲殿, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 第 65 卷, pp.1131-1135. (2009)

・基礎生産データに基づいた流動・低次生産モデルの開放性沿岸域への適用 著者: 足立久美子, 中山哲殿, 藤井良昭, 佐野朝, 昭土木学会論文集 B2 (海岸工学), 第 66 卷, pp.1116-1120. (2010)

#### 瀬戸内海関係

##### <海岸工学論文集>

・瀬戸内海への栄養塩類の流入負荷解析と物質収支に関する研究 著者: 李寅鉄, 浮田正夫, 関根雅彦, 中西弘 雑誌: 海岸工学論文集, 第 42 卷, pp.1106-1110. (1995)

・瀬戸内海における湾・灘での水質の季節変動特性 著者: 日比野忠史, 浅井正, 細川恭史 雑誌: 海岸工学論文集, 第 47 卷, pp.1036-1040. (2000)

・大阪湾における水質の長期予測計算 著者: 丸谷尊彦, 韓銅珍, 中辻啓二 雑誌: 海岸工学論文集, 第 47 卷, pp.1051-1055. (2000)

・紀伊水道の海洋構造と栄養塩輸送 著者: 笠井亮秀, 藤原建紀, 多田光男 雑誌: 海岸工学論文集, 第 48 卷, pp.436-440. (2001)

・瀬戸内海における湾・灘水塊の移流・交換量の季節変動特性 著者: 浜走幸育, 日比野忠史, 駒井克昭, 松岡純作 雑誌: 海岸工学論文集, 第 48 卷, pp.1036-1040. (2001)

・広島湾奥部の赤潮発生に及ぼす陸域起源の降雨量の影響 著者: 陸田秀実, 土井康明, 河村和憲, 亀山直記 雑誌: 海岸工学論文集, 第 48 卷, pp.1071-1075. (2001)

・瀬戸内海における栄養塩と一次生産力の分布・変動特性 著者: 駒井克昭, 日比野忠史, 仁子幸子, 浜走幸育, 松岡純作 雑誌: 海岸工学論文集, 第 48 卷, pp.1106-1110. (2001)

・瀬戸内海における水位の季節変動量の推定 著者: 駒井克昭, 日比野忠史, 清水勝義, 雑誌: 海岸工学論文集, 第 49 卷, pp.381-385. (2002)

・外洋から紀伊水道への窒素・リンの輸送 著者: 高志利宣, 藤原建紀, 住友寿明, 竹内淳一: 海岸工学論文集, 第 49 卷, pp.1076-1080. (2002)

・瀬戸内海における栄養塩構成比の季節変動と赤潮発生の関係 著者: 陸田秀実, 土井康明, 稲山丈晴: 海岸工学論文集, 第 49 卷, pp.1081-1085. (2002)

・局地気象モデルを用いた瀬戸内圏の風況解析と吹送流の応答特性 著者: 陸田秀実, 市位嘉崇, 秋山佳明, 土井康明: 海岸工

学論文集,第 50 卷,pp.436-440 (2003)

・瀬戸内海における湾・灘間での海水流量の推定およびその長期変動に関する研究 著者: 駒井克昭,竹内健太郎,日比野忠史,松本英雄:第 50 卷,pp.921-925 (2003)

・瀬戸内海の窒素・リンの輸送と起源の現地観測 著者: 藤原建紀,小林志保,高志利宣: 海岸工学論文集,第 50 卷,pp.951-955. (2003)

・瀬戸内海の水質環境に及ぼす黒潮流路と外海の時況変動の影響 著者: 中村充博,小林弘二郎,村上和男 雑誌: 海岸工学論文集,第 52 卷,pp.361-365. (2005)

・瀬戸内海の水質環境に及ぼす黒潮流路と外海の時況変動の影響 著者: 中村充博,小林弘二郎,村上和男 雑誌: 海岸工学論文集,第 52 卷,pp.361-365. (2005)

・陸岸に囲まれた潮汐フロント域における物質輸送機構 著者: 小林志保,藤原建紀, 高杉由夫 雑誌: 海岸工学論文集,第 53 卷,pp.921-925. (2006)

・紀淡海峡における水質変動特性と栄養塩輸送 著者: 西田修三, 金漢九, 高地慶, 入江政安, 中辻啓二 雑誌: 海岸工学論文集,第 53 卷,pp.996-1000. (2006)

・冬季の東部瀬戸内海における残差流と栄養塩環境 著者: 阿保勝之, 杜多哲, 藤原建紀 雑誌: 海岸工学論文集,第 53 卷,pp.1096-1100. (2006)

・瀬戸内海全域を対象とした流動・低次生産モデルの開発及びマコガレイ幼稚仔分散過程への適用, 中山哲殿, 八木宏, 藤井良昭, 伊藤靖, 三浦浩, 安信秀樹, 杉野博之, 山田達夫, 海岸工学論文集,第 56 卷,pp.1126-1130. (2009)

#### <沿岸海洋研究ノート>

・播磨灘の漁場環境と植物プランクトンの変動-20 年間のモニタリングの成果- 著者: 眞鍋武彦反田寛, 堀豊, 長井敏, 中村行延 沿岸海洋研究ノート,第 31 卷,第 2 号 pp.169-181. (1994)

・沿岸海洋と外洋の相互作用 著者: 武岡英隆 沿岸海洋研究ノート ,第 34 卷,第 1 号 pp.3-13. (1996)

・瀬戸内海の一次生産と海洋構造 著者: 橋本俊也, 山本民次, 多田邦尚, 松田治, 永末寿宏 沿岸海洋研究ノート,第 35 卷,第 1 号 pp.109-114. (1997):

・瀬戸内海の栄養塩環境の長期自動モニタリング 著者: 武岡英隆, 速水祐一, 兼田淳史, 松下太郎, 紀本岳志, 渡辺浩三, 藤川淳一 沿岸海洋研究ノート,第 38 卷,第 2 号 pp.91-97. (2001)

・海洋環境モニタリングと情報ネットワーク-「せとうちネット」について- 著者: 柳哲雄 沿岸海洋研究ノート,第 38 卷,第 2 号 pp.99-102. (2001)

・黒潮の離岸が豊後水道の水温に与える影響 著者: 兼田淳史, 乗松桂輔, 渡辺浩三, 小泉喜嗣, 武岡英隆 沿岸海洋研究ノート,第 39 卷,第 2 号 pp.181-188. (2002)

・近年の瀬戸内海における有害・有毒渦鞭毛藻の分布拡大とその原因-溶存態有機リンの生態学的重要性- 著者: 吳碩津, 松山幸彦, 山本民次, 中嶋昌紀, 高辻英之, 藤沢邦康 沿岸海洋研究ノート,第 43 卷,第 1 号 pp.85-95. (2005)

・瀬戸内海に存在する太平洋起源のリン・窒素 著者: 石井大輔, 柳哲雄 沿岸海洋研究ノート,第 43 卷,第 2 号 pp.119-127. (2006)

・瀬戸内海に存在するリン・窒素量の経年変動 著者: 藤原建紀, 小林志保, 國井麻妃, 宇野奈津子 沿岸海洋研究ノート,第 43 卷,第 2 号 pp.129-136. (2006)

・豊後水道における外洋起源栄養塩の供給機構とその生態系への影響 著者: 速水祐一, 兼田淳史, 小濱剛, 中野伸一, 武岡英隆 沿岸海洋研究ノート,第 43 卷,第 2 号 pp.143-149. (2006)

・海砂利採取船からの高濁度排水中の微粒子の挙動-微粒子の特性と沈降速度- 著者: 多田邦尚, 和田彩香, 一見和彦, 橋

本俊也 沿岸海洋研究ノート,第 43 卷,第 2 号 pp.157-162. (2006)

・瀬戸内海における環境の長期変動 著者: 武岡英隆, 速水祐一, 兼田淳史 沿岸海洋研究ノート,第 43 卷,第 1 号 pp.45-50. (2005)

<海の研究>

・瀬戸内海の流動とそれに関する諸問題: 柳哲雄, 海の研究, Vol1, No.2, pp. 9-19. (1992)

・瀬戸内海底泥からの溶存無機態窒素およびリン溶出量の見積もり 著者: 山本民次, 松田治, 橋本俊也, 妹背秀和, 北村智頭 海の研究 Vol.7, No3,pp.151-158. (1998)

・瀬戸内海における窒素・リン現存量比率 著者:林美鶴, 柳哲雄, 橋本俊也 海の研究 Vol.9, No2,pp.83-89. (2000)

・瀬戸内海における溶存態無機リン・窒素・珪素分布の特徴とその要因 著者: 堀哲雄, 原島省 海の研究 Vol.12, pp.565-572. (2003)

・瀬戸内海各灘・湾における全リン・全窒素の起源と濃度変動機構 著者:石井大輔, 柳哲雄 海の研究 Vol.13, pp.389-401. (2004)

・瀬戸内海の沿岸域と全域におけるTP・TN濃度変動 著者: 石井大輔, 柳哲雄 海の研究 Vol.14, pp.35-45. (2005)

<その他>

・濁度計による懸濁態栄養塩負荷推定に関する研究; 山本浩一・二村貴幸・坂野章・日下部隆昭・末次忠司・横山勝英、河川技術論文集,第 9 卷,2003 年 6 月

・瀬戸内海における窒素・リンの存在量とその長期変動: 速水祐一・碓井澄子・武岡英隆, 海と空, 第 80 卷, 第 2 号, pp. 75-78. (2004)

・瀬戸内海全域における海水流動特性の数値実験; 田中陽二、河原能久、末永慶寛、水圏環境工学論文集, 第 1 巻, 第 1 号, pp.9-14, 水圏環境工学会, 2005 年 9 月

・せとうちネット: 瀬戸内海環境情報 自然環境に関する情報, <http://www.seto.or.jp/seto/kankyojoho/sizenkankyo/top-data/hyou1-23.htm> 参照 2009/5/17.

・JCOPE 海洋変動予測システム: 宮澤泰正・山形俊男, 月刊海洋, 12, pp. 881-886. (2003)

・Physical and biochemical responses to decadal variability of shelf water intrusion in the Seto Inland Sea, Japan: Shiho Kobayashi, Tateki Fujiwara, Workshop on Coastal Observatories - Best practice in the synthesis of long-term observations and models, Proudman Oceanographic Laboratory (Liverpool, UK), 2006.

・A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model, three-Dimensional Coastal ocean Models, edited by N. Heaps, American Geophysical Union: Blumberg, A. F. and G. L. Mellor, pp. 1-16. (1987)

・An Ecological-Physical Coupled Model Applied to Station Papa: Kawamiya, M., M. Kishi, Y.Yamanaka and N.Suginohara, Journal of Oceanography, Vol.51, pp. 635-664. (1995)

<参考：流動・低次生産モデル概要>

## 概要

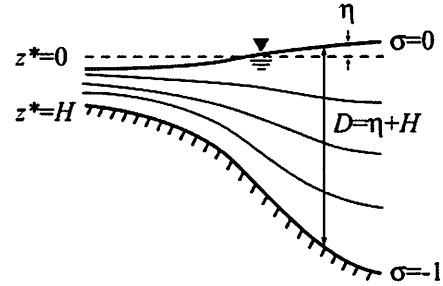
モデルは Princeton Ocean Model (Mellor, 1998)をベースとし、Kawamiya et al. (1995)の浮遊系生態系モデルを組み込んだ低次生態系モデルである。計算フローを以下に示す。

## 支配方程式

### 流動場

非圧縮流体、静水圧近似を仮定し、シグマ座標系の連続式及び運動方程式を使用する。

基礎式は以下の通りである



### 流動場の基礎方程式

座標系

$$x^* = x, \quad y^* = y, \quad \sigma = \frac{z^* - \eta}{D} \quad (1)$$

連続式

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial Du}{\partial x} + \frac{\partial Dv}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} = 0 \quad (2)$$

運動方程式(x 方向流速)

$$\begin{aligned} & \frac{\partial uD}{\partial t} + \frac{\partial uuD}{\partial x} + \frac{\partial uvD}{\partial y} + \frac{\partial u\omega}{\partial \sigma} - fvD \\ & = -gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{gD^2}{\rho_0} \int_{\sigma}^{\sigma} \left[ \frac{\partial \rho}{\partial x} - \frac{\sigma}{D} \frac{\partial D}{\partial x} \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} \right] d\sigma \\ & + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \frac{K_M}{D} \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ D \left( 2A_M \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ D \left( A_M \left( \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) \right\} \end{aligned} \quad (3)$$

運動方程式(y 方向流速)

$$\begin{aligned} & \frac{\partial vD}{\partial t} + \frac{\partial uvD}{\partial x} + \frac{\partial vvD}{\partial y} + \frac{\partial v\omega}{\partial \sigma} + fuD \\ & = -gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{gD^2}{\rho_0} \int_{\sigma}^{\sigma} \left[ \frac{\partial \rho}{\partial y} - \frac{\sigma}{D} \frac{\partial D}{\partial y} \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} \right] d\sigma \\ & + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \frac{K_M}{D} \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ D \left( A_M \left( \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ D \left( 2A_M \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

水温 輸送方程式

$$\begin{aligned} & \frac{\partial TD}{\partial t} + \frac{\partial uTD}{\partial x} + \frac{\partial vTD}{\partial y} + \frac{\partial T\omega}{\partial \sigma} \\ & = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \frac{K_H}{D} \frac{\partial T}{\partial \sigma} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ D \left( A_H \frac{\partial T}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ D \left( A_H \frac{\partial T}{\partial y} \right) \right\} - \frac{\partial R}{\partial z} \end{aligned} \quad (5)$$



塩分 輸送方程式

$$\begin{aligned} & \frac{\partial SD}{\partial t} + \frac{\partial uSD}{\partial x} + \frac{\partial vSD}{\partial y} + \frac{\partial S\omega}{\partial \sigma} \\ & = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \frac{K_H}{D} \frac{\partial S}{\partial \sigma} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ D \left( A_H \frac{\partial S}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ D \left( A_H \frac{\partial S}{\partial y} \right) \right\} \end{aligned} \quad (6)$$

乱流エネルギー 輸送方程式

$$\begin{aligned} & \frac{\partial q^2 D}{\partial t} + \frac{\partial uq^2 D}{\partial x} + \frac{\partial vq^2 D}{\partial y} + \frac{\partial q^2 \omega}{\partial \sigma} \\ & = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \frac{K_q}{D} \frac{\partial q^2}{\partial \sigma} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ D \left( A_H \frac{\partial q^2}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ D \left( A_H \frac{\partial q^2}{\partial y} \right) \right\} \\ & \quad + \frac{2K_M}{D} \left\{ \left( \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right)^2 \right\} + \frac{2g}{\rho_0} K_H \frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial \sigma} - \frac{2Dq^3}{B_1 l} \end{aligned} \quad (7)$$

乱流の長さスケール 輸送方程式

$$\begin{aligned} & \frac{\partial q^2 l D}{\partial t} + \frac{\partial uq^2 l D}{\partial x} + \frac{\partial vq^2 l D}{\partial y} + \frac{\partial q^2 l \omega}{\partial \sigma} \\ & = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \frac{K_q}{D} \frac{\partial q^2 l}{\partial \sigma} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ D \left( A_H \frac{\partial q^2 l}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ D \left( A_H \frac{\partial q^2 l}{\partial y} \right) \right\} \\ & \quad + E_1 l \left\{ \frac{K_M}{D} \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right)^2 \right] + E_3 \frac{g}{\rho_0} K_H \frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial \sigma} \right\} - \frac{Dq^3}{B_1 l} \tilde{w} \end{aligned} \quad (8)$$

$$(E_1, E_2, E_3) = (1.8, 1.33, 1.0) \quad (9)$$

$$\tilde{w} = 1 + E_2 (l / kL) \quad (10)$$

$$\frac{1}{L} = \frac{1}{\eta - z} + \frac{1}{H - z} \quad (11)$$

$$\frac{\partial \tilde{\rho}}{\partial \sigma} \equiv \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} - \frac{1}{c_s^2} \frac{\partial p}{\partial \sigma} \quad (12)$$

$$K_M = qlS_M \quad (13)$$

$$K_H = qlS_H \quad (14)$$

$$S_H = \frac{A_2 [1 - 6A_1 / B_1]}{1 - (3A_2 B_2 + 18A_1 A_2) G_H} \quad (15)$$

$$S_M = \frac{A_1 [1 - 3C_1 - 6A_1 / B_1]}{[1 - 9A_1 A_2 G_H] - S_H [(18A_1^2 + 9A_1 A_2) G_H]} \quad (16)$$

$$G_H = \frac{l^2}{q^2} \frac{g}{\rho_0} \left[ \frac{\partial \rho}{\partial z} - \frac{1}{c_s^2} \frac{\partial p}{\partial z} \right] \quad (0.17)$$

$$(A_1, A_2, B_1, B_2, C_1) = (0.92, 16.6, 0.74, 10.1, 0.08) \quad (0.18)$$

鉛直流速の算出

σ座標に基準化された鉛直方向流速ωとデカルト座標上の実流速の関係は以下の式で表すことができる。

$$w = \omega + u \left( \sigma \frac{\partial D}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) + v \left( \sigma \frac{\partial D}{\partial y} + \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) + \sigma \frac{\partial D}{\partial t} + \frac{\partial \eta}{\partial t} \quad (19)$$

変数一覧

変数名	内容	
$x^*, y^*, z^*$	デカルト座標	
$x, y, \sigma$	$\sigma$ 座標	
$\eta$	水位	(m)
$H$	水深	(m)
$D$	全水深 [= $\eta + H$ ]	(m)
$u, v, \omega$	$x, y, \sigma$ 方向の流速	(m/s)
$f$	コリオリパラメーター	(1/s)
$g$	重力加速度	(m/s <sup>2</sup> )
$\rho$	海水の密度	(kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_0$	参照密度 [= 1,025 ]	(kg/m <sup>3</sup> )
$T$	水温	(°C)
$S$	塩分	(psu)
$q^2$	乱流エネルギー	(m/s)
$q^2 l$	乱流エネルギースケール	(m)
$K_M$	鉛直渦動粘性係数	(m <sup>2</sup> /s)
$A_M$	水平渦動粘性係数	(m <sup>2</sup> /s)
$K_H$	$T, S$ の鉛直渦拡散係数	(m <sup>2</sup> /s)
$A_H$	$T, S$ の水平渦拡散係数	(m <sup>2</sup> /s)
$K_q$	$q^2, q^2 l$ の鉛直渦拡散係数	(m <sup>2</sup> /s)
$A_q$	$q^2, q^2 l$ の水平渦拡散係数	(m <sup>2</sup> /s)
$c_s$	音速	(m/s)
$S_M, S_H$	成層化関数	
$G_H$	リチャードソン数	
$R$	短波放射量フラックス	(°Cm/s)

## モードスプリット法

POM では計算効率を向上させるために、クーラン条件の厳しい水位および水深平均流速を計算する外部モードと流速の鉛直分布、水温、塩分濃度を計算する内部モードとに分離して、外部モードでは小さな時間ステップ、内部モードでは大きな時間ステップで計算するモードスプリット法を用いている。

外部モードでは、式( )を線直積分した次式を解く。上バー付きの文字は、水深平均値を意味する。

連続式

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}D}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}D}{\partial y} = 0 \quad (20)$$

x 方向流速 運動方程式

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{u}D}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}uD}{\partial x} + \frac{\partial \bar{u}vD}{\partial y} - f\bar{v}D + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} \\ = -\langle wu(0) \rangle + \langle wu(-1) \rangle + Gx + Fx - \frac{gD}{\rho_0} \int_{-1}^0 \int_{\sigma}^{\sigma} \left[ D \frac{\partial \rho}{\partial x} - \frac{\partial D}{\partial x} \sigma \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} \right] d\sigma d\sigma \end{aligned} \quad (21)$$

y 方向流速 運動方程式

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{v}D}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}vD}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}vD}{\partial y} + f\bar{u}D + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} \\ = -\langle wv(0) \rangle + \langle wv(-1) \rangle + Gy + Fy - \frac{gD}{\rho_0} \int_{-1}^0 \int_{\sigma}^{\sigma} \left[ D \frac{\partial \rho}{\partial y} - \frac{\partial D}{\partial y} \sigma \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} \right] d\sigma d\sigma \end{aligned} \quad (22)$$

海表面における熱フラックス

バルク式

$$Q_T = Q_S - (Q_R + Q_E + Q_C)$$

- $Q_T$  : 全熱交換量
- $Q_S$  : 短波放射量
- $Q_R$  : 長波放射による有効逆放射量
- $Q_E$  : 蒸発による潜熱輸送量
- $Q_C$  : 熱伝導や対流による顕熱輸送量

単位は、[cal / cm<sup>2</sup> / sec ] に統一する。

短波放射量  $Q_S$

太陽からの放射のこと。0.5 $\mu$ m 付近にピークをもち、0.15~3 $\mu$ m に 99% のエネルギーが含まれる。

可視光は、0.36 $\mu\text{m}$ (紫) ~ 0.75 $\mu\text{m}$ (赤)

$$Q_s = (1 - 0.07)S \times 23.36 / 60 / 60$$

$S$  : 全天日射量

ここで、~~23.36~~ 23.88/60/60 は全天日射量の単位 [MJ / m<sup>2</sup> / hour] を [cal / cm<sup>2</sup> / sec] に変換するための係数

$$1 \text{ cal} = 4.1868 \text{ J} \quad (\text{国際蒸気表カロリー 1956 年 [国際カロリー]})$$

$$1 \text{ MJ} = 10^6 \text{ J} = 10^6 / 4.1868 \text{ cal} \approx 23.88 \times 10^4 \text{ cal}$$

$$1 \text{ MJ} / \text{m}^2 / \text{hour} = 23.88 \times 10^4 \text{ cal} / 10^4 \text{cm}^2 / 60 \times 60 \text{sec} = 23.88 / 60 / 60 \text{ cal} / \text{cm}^2 / \text{sec}$$

長波放射量  $Q_R$

大気中に存在する水蒸気その他微量の気体の出す放射のこと。波長 10 $\mu\text{m}$  付近を中心としたスペクトルを持ち、大部分のエネルギーは 3~100 $\mu\text{m}$  の範囲に含まれる。

$$Q_s = \varepsilon \sigma \theta_s^4 (0.39 - 0.058 e_a^{1/2}) (1 - k_c C^2) + 4 \varepsilon \sigma \theta_s^3 (\theta_s - \theta_a) \quad (\text{中村・高津, 1993})$$

$$Q_s = \varepsilon \sigma \theta_s^4 (0.49 - 0.066 e_a^{1/2}) (1 - k_c C^2) + 4 \varepsilon \sigma \theta_s^3 (\theta_s - \theta_a) \quad (\text{現在のプログラム})$$

$\sigma$  : ステファン・ボルツマン係数

$$5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2/\text{K}^4 = 1.17 \times 10^{-7} \text{ cal/cm}^2/\text{day/K}^4$$

$$= 8.125 \times 10^{-10} \text{ cal/cm}^2/\text{min/K}^4$$

$$\text{プログラム中} = 8.260 \times 10^{-10} \text{ cal/cm}^2/\text{min/K}^4$$

$\varepsilon$  : 有効放射率 emissivity of the sea surface (=0.95)

$\theta_s$  : 絶対温度での海面水温 (K)

Kim(1992)によれば元々は絶対温度の気温だったが Budyko(1963)が a と s を取り間違えた

$\theta_a$  : 絶対温度での気温 (K)

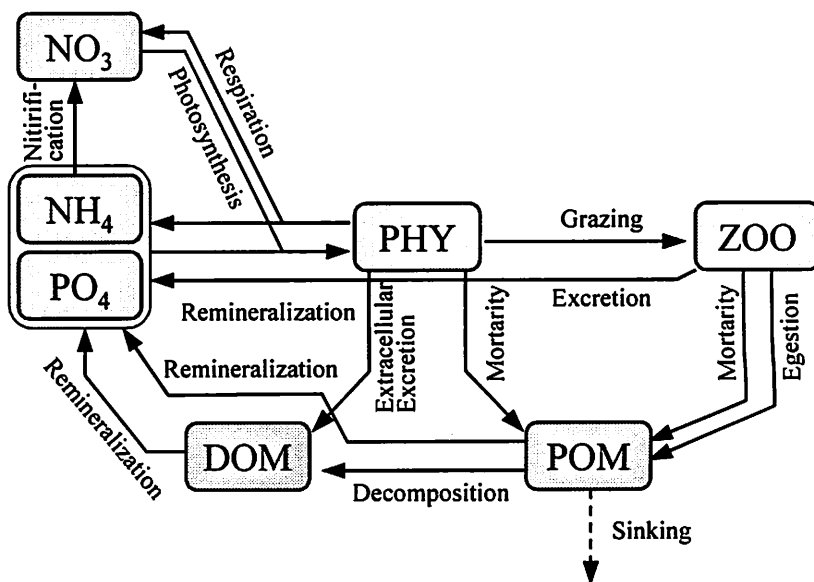
$k_c$  : 緯度による係数 北緯 35° では 0.65

## 1 次生産モデル

KKYS95

低次生態系モデルは、KKYS モデル(Kawamiya *et al*, 1995)<sup>1)</sup>をベースに、リンのコンパートメントを追加したモデルである。

植物プランクトン(Chl)  
動物プランクトン(ZOO)  
硝酸塩(NO<sub>3</sub>)  
アンモニア(NH<sub>4</sub>)  
リン酸塩(PO<sub>4</sub>)  
懸濁態有機窒素(PON)  
溶存態有機窒素(DON)



各コンパートメントは、物理過程と生物化学過程によりその濃度が決められる。物理過程はで結びついており、そのバランスによって濃度が決まる。

$$\frac{\partial CD}{\partial t} + \frac{\partial uCD}{\partial x} + \frac{\partial vCD}{\partial y} + \frac{\partial C\omega}{\partial \sigma} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left( \frac{K_H}{D} \frac{\partial C}{\partial \sigma} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ D \left( A_H \frac{\partial C}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ D \left( A_H \frac{\partial C}{\partial y} \right) \right\} + F_{bio} + F_{phys} \quad (23)$$

- C : 物質濃度  
F<sub>bio</sub> : 生物化学過程によるソース、シンク項  
F<sub>phys</sub> : 移流拡散以外の物理過程によるソース、シンク項  
KH : 鉛直拡散係数  
AH : 水平拡散係数

<sup>1)</sup> M.Kawamiya, M. Kishi, Y.Yamanaka and N.Suginohara: An Ecological-Physical Coupled Model Applied to Station Papa, *Journal of Oceanography*, Vol.51, pp.635-664, 1995.

生物過程一覧

【 植物プランクトンの時間変化 】

$$\frac{d(Chl)}{dt} = \text{光合成} - \text{細胞外分泌} - \text{死亡} - \text{捕食} - \text{沈降} \quad (24)$$

【 動物プランクトンの時間変化 】

$$\frac{d(ZO)}{dt} = \text{摂食} - \text{排泄} - \text{排糞} - \text{死亡} \quad (25)$$

【 硝酸塩の時間変化 】

$$\frac{d(NO_3)}{dt} = -(\text{光合成} - \text{Chl呼吸}) \times R_{NO_3} + \text{硝化} \quad (26)$$

【 リン酸塩の時間変化 】

$$\frac{d(PO_4)}{dt} = -(\text{光合成} - \text{Chl呼吸}) + \text{PON分解} + \text{DON分解} \quad (27)$$

【 アンモニアの時間変化 】

$$\frac{d(NH_4)}{dt} = -(\text{光合成} - \text{Chl呼吸}) \times (1 - R_{NO_3}) + \text{PON分解} + \text{DON分解} - \text{硝化} \quad (28)$$

【 溶存態有機窒素の時間変化 】

$$\frac{d(DON)}{dt} = \text{細胞外分泌} + \text{PON分解} - \text{DON分解} \quad (29)$$

【 懸濁態有機窒素の時間変化 】

$$\frac{d(PON)}{dt} = \text{Chl死亡} + \text{ZO死亡} + \text{排糞} - \text{沈降} \quad (30)$$

## 光合成

光合成は、植物プランクトン濃度、栄養塩(NO3、NH4、PO4)、水温および光強度の関数としている。

$$\begin{aligned} \text{(光合成速度)} &= \text{(植物プランクトン濃度)} \\ &\times \text{(最大増殖速度)} \times \text{(栄養塩制限)} \times \text{(水温依存)} \times \text{(光強度依存)} \end{aligned}$$

### 栄養塩制限

栄養塩類への依存性は Michaelis-Menten 型の式を採用し、Wroblewski(1977)の方法でアンモニア阻害の影響を考慮している。

栄養塩による制限は、窒素制限(NO3、NH4)とリン制限(PO4)に分けて考えることとし、より厳しい制限を採用することとした(リービッヒ(Liebig)の最小律の考えに基づく)。

$$GPP_{nuts} = V_{max} \times \min(N_{inhib}, P_{inhib}) \quad (31)$$

- ・ 窒素制限

$$N_{inhib} = \frac{NO_3}{NO_3 + K_{N_{NO_3}}} \exp(-\psi NH_4) + \frac{NH_4}{NH_4 + K_{N_{NH_4}}} \quad (32)$$

- ・ リン制限

$$P_{inhib} = \frac{PO_4}{PO_4 + K_{N_{PO_4}}} \quad (33)$$

$K_N$  : 半飽和常数(最大増殖速度の 1/2 となる濃度)

### 光強度

光強度への依存性は、光阻害の影響も考慮した Steele(1962)による式を採用している。水中での光強度の減衰は、Lambert-Beer 則に従う。式 1.6 中の  $\Lambda$  は消散係数である。

$$\frac{I}{I_{opt}} \exp\left(1 - \frac{I}{I_{opt}}\right) \quad (34)$$

$$I = I_0 \exp(-\Lambda|z|) \quad (35)$$

$$\Lambda = \alpha_1 + \alpha_2 Chl \quad (36)$$

水温

水温への依存性は、Eppley(1972)による式を採用し、水温が 10°C 上昇すると光合成速度が 2 倍になると想定している。

光合成以外の生物化学過程における温度依存性も同様の式を採用している。

$$\exp(kT) \quad (37)$$
$$k=0.0693$$

【係数について】

Q10 : 水温が 10°C 上昇したときの速度の上昇度合い

$$v = \exp(kT)$$

$$Q_{10} v = \exp\{k(T+10)\}$$

$$\exp(kT) = \frac{1}{Q_{10}} \exp(kT+10k)$$

$$\ln\{\exp(kT)\} = \ln\left\{\frac{1}{Q_{10}} \exp(kT+10k)\right\}$$

$$kT = kT + 10k - \ln Q_{10}$$

$$k = \frac{\ln Q_{10}}{10}$$

Q10=2 の場合、 $\ln 2=0.693$  より、 $k=0.0693$

以上より、光合成速度の式は次のようになる。

$$GPP = V_{\max} \times \min(N_{inhib}, P_{inhib}) \times \exp(kT) \times \frac{I}{I_{opt}} \exp\left(1 - \frac{I}{I_{opt}}\right) \times Chl \quad (38)$$

$$N_{inhib} = \frac{NO_3}{NO_3 + K_{N_{NO_3}}} \exp(-\psi NH_4) + \frac{NH_4}{NH_4 + K_{N_{NH_4}}}$$

$$P_{inhib} = \frac{PO_4}{PO_4 + K_{N_{PO_4}}} \quad (39)$$

細胞外への滲出

光合成の一部が細胞外へ滲出するものとし、次式で与える。

$$(\text{細胞外滲出速度}) = (\text{細胞外への滲出率 } \gamma) \times (\text{光合成速度})$$

$$\gamma = 0.135$$

呼吸(植物プランクトン)

植物プランクトンの呼吸は、温度依存性の植物プランクトン濃度の関数として与える。



(呼吸(植物プランクトン)) = (呼吸速度  $R_0$ ) × (温度依存) × (Chl. a 濃度)

$R_0$  : 0°Cにおける呼吸速度 (/day)

温度依存 :  $\exp(kT)$   $k=0.693$

## 死亡

Steele and Henderson(1992)にしたがって、濃度の2乗に比例し、温度に依存するものとして与える。

(死亡(植物プランクトン)) = (死亡速度  $M_{P0}$ ) × (温度依存 P) × (Chl.a 濃度)<sup>2</sup>

(死亡(動物プランクトン)) = (死亡速度  $M_{Z0}$ ) × (温度依存 Z) × (動物プランクトン濃度)<sup>2</sup>

$M_{P0}$  : 0°Cにおける植物プランクトンの死亡速度(=0.0281 l/ $\mu$ molN day)

$M_{Z0}$  : 0°Cにおける動物プランクトンの死亡速度(=0.0585 l/ $\mu$ molN day)

温度依存 P :  $\exp(k_{up}T)$   $k_{up}=0.693$

温度依存 Z :  $\exp(k_{uz}T)$   $k_{uz}=0.693$

## 捕食

捕食は、水温、植物プランクトンおよび動物プランクトン濃度の関数として与える。

(捕食速度) = (最大捕食速度  $GR_{max}$ ) × (温度依存)

× (植物プランクトンの密度効果) × (動物プランクトン濃度)

$GR_{max}$  : 最大捕食速度 0.3 /day

温度依存 :  $\exp(kT)$   $k=0.693$

植物プランクトンの密度効果 :  $1 - \exp(-\lambda(Chl^* - Chl))$

Chl\* は低濃度側の臨界濃度であり、Chlがこの濃度以下では捕食速度はゼロとする

$\lambda$  はイブレフ定数 1.4 l/ $\mu$ molN

## 排泄と同化(動物プランクトン)

捕食の一部が排泄、同化されるものとして、同化効率 $\alpha$ と成長効率 $\beta$ を用いて次式で与える。

(排泄) = (同化効率 $\alpha$  - 成長効率 $\beta$ ) × (捕食速度)

(排糞) = (1 - 同化効率 $\alpha$ ) × (捕食速度)

$\alpha$  : 動物プランクトンの同化効率 0.70

$\beta$  : 動物プランクトンの成長効率 0.30

ここで排泄とは、細胞内に取り込まれた後、細胞の構成要素となることなく体外へ排出されるもの(排尿)であり、主としてアンモニアやDONなどの溶存態物質よりなる。一方、排糞は、捕食により体内に取り込まれた後、細胞内に吸収されることなく、体外に排出されるもので、主として粒状態物質より構成されるものである。

## 有機物の分解

有機物の分解速度は温度に依存するものとして、次式で与える。

$$(\text{PON から NH}_4 \text{ への分解}) = (\text{分解速度 VPI0}) \times (\text{温度依存 PIT}) \times (\text{PON 濃度})$$

$$(\text{PON から DON への分解}) = (\text{分解速度 VPD0}) \times (\text{温度依存 PDT}) \times (\text{PON 濃度})$$

$$(\text{DON から NH}_4 \text{ への分解}) = (\text{分解速度 VDI0}) \times (\text{温度依存 DIT}) \times (\text{DON 濃度})$$

$$(\text{硝化}) = (\text{硝化速度 } k_{\text{NO}}) \times (\text{温度依存 NT}) \times (\text{アンモニア濃度})$$

$$\text{VPI0} : 0^\circ\text{C における PON から無機態窒素 (NH}_4\text{) への分解速度} \quad 0.03 \text{ /day}$$

$$\text{VPD0} : 0^\circ\text{C における PON から DON への分解速度} \quad 0.03 \text{ /day}$$

$$\text{VDI0} : 0^\circ\text{C における DON から無機態窒素 (NH}_4\text{) への分解速度} \quad 0.03 \text{ /day}$$

$$\text{温度依存 PIT} : \exp(V_{\text{PIT}}T) \quad V_{\text{PIT}} = 0.693 /^\circ\text{C}$$

$$\text{温度依存 PDT} : \exp(V_{\text{PDT}}T) \quad V_{\text{PDT}} = 0.693 /^\circ\text{C}$$

$$\text{温度依存 DIT} : \exp(V_{\text{DIT}}T) \quad V_{\text{DIT}} = 0.693 /^\circ\text{C}$$

$$k_{\text{NO}} : 0^\circ\text{C における硝化速度} \quad 0.03 \text{ /day}$$

$$\text{温度依存 NT} : \exp(k_{\text{NT}}T) \quad k_{\text{NT}} = 0.693 /^\circ\text{C}$$

## 硝化について

質量バランスから考えると、NH<sub>4</sub> の酸化には 2mol の酸素を必要とする。しかしながら、硝化バクテリア(細菌)による硝化では、酸素を消費するのではなく水分子を利用していると考えられている(Person )。(Person によると、貧酸素の状態では硝化速度は増加する)

## 飽和溶存酸素濃度

Weiss の式

$$\ln(DO_s) = -173.4292 + 249.6339 \times (100/T_a) + 143.3483 \times \ln(T_a/100) - 21.8492 \times T_a/100 \\ + S_s \times (-0.033096 + 0.014259 \times (T_a/100) - 0.001700 \times (T_a/100)^2)$$

DO : 溶存酸素 ml/l

Ta : 海表面水温 K

Ss : 海表面塩分 ‰

溶存酸素濃度の単位は、以下の式により ml/l から μmol/l に変換する。

$$DO|_{\mu\text{mol/l}} = DO|_{\text{ml/l}} \times \frac{1}{22.4 \times \frac{T_a}{273.15}} \times 1000$$

$$DO|_{\text{mg/l}} = DO|_{\text{ml/l}} \times \frac{32}{22.4 \times \frac{T_a}{273.15}}$$