

瀬戸内海の流動と栄養塩に関するレビューと流動・低次生産モデルの開発

中山 哲巖*

Review of characteristics on the current and nutrients distribution of Seto Inland Sea, and development of the hydrodynamic model coupled with primary production model applied to this region

Akiyoshi Nakayama*

Abstract : Decrease in fishery resources in the semi-closed sea, such as Seto Inland Sea, Ariake Bay and so on, has been a serious problem. The project started in 2006 for finding how to improve or preserve their environment for restoring fishery resources in the inland sea and how to keep or improve physical and chemical conditions closely related to fishery resources and ecosystem. Reviews or analysis for investigating material circulation through food chain or ecosystem in the Seto Inland Sea were done in this project.

In this report, the current and nutrients transportation in the Seto Inland Sea as one of important elements that directly influence the biological production are discussed by reviewing the results of studies on the large semi-closed sea such as the Seto Inland Sea. The resolved problems and unresolved problems are made clear. The current and nutrients transportation in the Seto Inland Sea are also discussed from point of the process of biological production, environmental capacity, resource management and increasing fishery resources. According to the review, a hydrodynamic model coupled with primary production model was developed and applied to the Seto Inland Sea. The results calculated by this model show a good agreement on the hydraulic characteristics of the Seto Inland Sea. But primary production model included in this model should be improved by reevaluating its parameters and its structure.

Key words : Inland sea, current, nutrients transportation, hydraulic model, primary production model

瀬戸内海や有明海などは水産資源の減少が深刻となっている。我が国有数の内湾域を豊饒の海へ回帰させるために必要な環境とは何かを解明することを目標に、漁業や生物環境に関連した栄養塩をはじめとする物理・化学環境などの望ましい水準を明らかにするための研究方向を具体化する目的で、地域連携プロジェクト研究により、検討を平成18年に実施した。本プロジェクトでは、瀬戸内海を主な研究対象領域として、食物連鎖を通じた栄養段階間の物質循環の定量的関連

性を把握するための研究レビューやデータの解析など必要な作業を分担して行った。

本論文は、プロジェクトの課題の一つとして海域の生物生産に直接的に影響を与える流動と栄養塩を取り上げ、広域な閉鎖性水域に関するこれまでの研究成果をもとに、生物生産過程や環境容量の把握、資源管理・増殖といった観点から検討したものである。さらに、基本となる流動・低次生産モデルを構築し、瀬戸内海全域に適用した結果を紹介する。

2010年8月30日受理 (Received on August 30, 2010)

独立行政法人水産総合研究センター水産工学研究所水産土木工学部水産基盤グループ 〒314-0408 茨城県神栖市波崎7620-7
(Leader of Fisheries Infrastructure Group, Aquaculture and Fishing Port Engineering Division, National Research Institute of Fisheries Engineering, Fisheries Research Agency, Hasaki 7620-7, Kamisu-shi, Kashima-gun, Ibaragi-ken, Japan, zip code 314-0408)

試料と方法

瀬戸内海という広大な閉鎖性海域に着目し、以下の点に主眼をおいて検討した。

(1) 瀬戸内海及び周辺外洋域を含めた流動に関する研究成果の収集と分析

同海域における流動特性に関する研究成果を収集し、同海域での流動を決定づける潮汐、気象、河川流入に伴う全体的な流動の特性（密度特性、潮汐流・吹送流・河川流等の相互干渉、季節変動等）を把握する。

(2) 瀬戸内海での長期的な栄養塩動態の実態把握及びデータの収集、河川・外洋からの栄養塩動態の把握

同海域における栄養塩動態を長期的な視点で把握するために、研究論文の収集、浅海定線調査・国交省による定点調査等多くのデータベースの収集、主要河川の流量・水質に関するデータベースの収集に努める。

(3) 瀬戸内海の地形特性を適切に取り扱うことができ、流動や水質変動を比較的良く表現出来る数値モデルの検討

多くの海峡や干潟を含んだ同海域において、(1)、(2)で抽出した課題に答え得る複数の数値モデルに関する研究成果及びソフトウェアの機能を検討し、適切なモデルを選定し、瀬戸内海への適用のための改良処理を行い、瀬戸内海全域の流動・水質等の概略検討を行う。

結果及び考察

流動（レビュー）

瀬戸内海の地形を Fig. 1に示す。この図から、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（1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

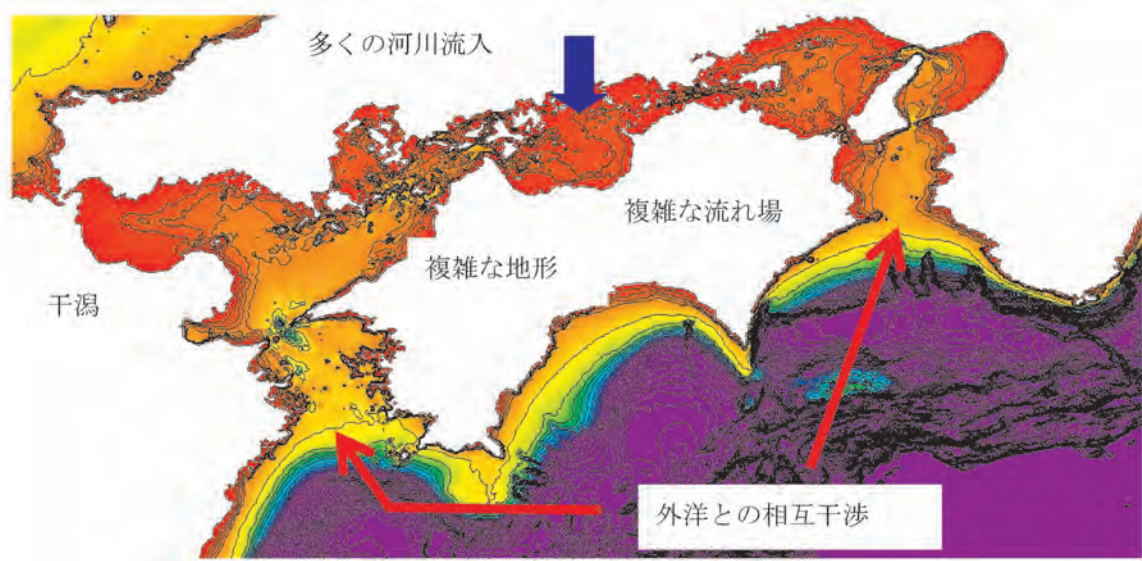


Fig. 1. Bathymetry of the Seto Inland Sea.

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た。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取り上げた。なお、流動と水質は密接に関連しており、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)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)は、瀬戸内海を通過する流量の長期変動に関して、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、笠井ら(2001)、高志ら(2002)、藤原ら(2003)、武岡(1996)、兼田ら(2002)、速水ら(2006)によって系統的に行われてきた。紀伊水道では、黒潮の離岸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低温・高栄養塩水(離棚斜面の冷水)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。兼田(2002)、藤原ら(2006)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(1996)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ため、急潮となって内海へ波及しないとしている。

Kobayashi and Fujiwara(2006)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おり、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。また、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するとともに、紀伊水道における水温とNO₃に高い相関があることを用いて、外洋からのNO₃供給を計算した。その結果、黒潮接岸時と離岸時ではNO₃の分布が大きく異なっており、計算値・観測値から、NO₃に関する外洋起源の割合を推定し、離岸時においては、NO₃は大阪湾西部及び播磨灘南部にまで達すること、接岸時には紀伊水道南部までしか波及しないことを明らかにした。さらに、季節的な流れ・密度・NO₃の分布構造を示し、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を示

した。一連の検討結果から、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・NO₃の相関関係を利用することを提案している。

田中ら（2005）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層の計算を行い（ただし、密度一定）、双方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としている。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のが分かった。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としている。

浜走ら（2001）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り、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た結果から、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としている。塩分を保存量として海水交換量を求め、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こと、また、備讃瀬戸・播磨灘間では7～8月に他海域の10倍近くになることを示した。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などとしている。

駒井ら（2001；2002）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及び海面気圧

による影響により水位の季節変動量が概ね説明できるとしている。さらに駒井ら（2003）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）、河川流出量の特徴から分けられた3つの期間（1982-88豊後水道水位高、89-93紀伊水道高、河川流量大、94-99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（月毎）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）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、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といえる。

阿保ら（2006）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、備讃瀬戸及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）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、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。

水質（レビュー）

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。黒潮の離・接岸が重要である。
- (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、懸濁態等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1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）は、原単位法を用いて流入負荷量の瀬戸内海水域毎のCOD、T-N、T-P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%を占めている。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（2009）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、負荷量も多かつ富栄養化が進んでいる状態となっていることが分かる。

瀬戸内海全体での栄養塩輸送機構については、藤原ら（2003）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。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、一部は有光層、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。

柳を共通とする研究者らは、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、地方公共団体）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・柳、2005）結果、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している。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）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、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ことを明らかにした。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を挙げている。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が、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年(10月)、1994年(1, 4, 6月)の観測データから、形態別窒素・リン・珪素の海域別・季節別変化についての検討が行われた(林ら, 2000)。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く、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おり、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している。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、窒素制限傾向であり、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、リン制限傾向であるとしている。

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・原島, 2003)。7年間平均の冬季栄養塩分布から、DIP 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 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 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た結果、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 を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している。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している。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している。別府湾は河川流量が相対的に多いので Si/P が大きい。各水域間での栄養塩フラックスの推定を行った結果、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・柳, 2004)。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分かった。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經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としている。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。これらと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(武岡ら, 2005)。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など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、笠井ら (2001)、高志ら (2002)、藤原ら (2003)、武岡 (1996)、兼田ら (2002)、速水ら (2006) 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見られる。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（陸棚斜面の冷水）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) 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、硝酸態窒素濃度は7~9 μM 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。また、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になったことから、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としている。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) 等である。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、汚水処理場等)、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) 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、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も報告している。山本ら (2003) は酒沼川水系 (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 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、この点についてさらに詳細な検討が必要になる。しかし、河川データは、TN, TP, SS データに限られていることが多く、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、河口堰など流域に滞留域がある場合には、水温が植物プランクトン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、水温が低い状態では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。

底質・ベントス等 (レビュー)

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。通常環境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 (2009) に底質の含泥率、COD、マクロベントス種類・個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。

数値モデル

1 数値モデル概要

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容量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むこと、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。

海洋流動モデルとして、最も広く利用されているのが、プリンストン・オーシャンモデル(POM)である。POMは、以下に示すように、3次元の流動モデルであり、拡散係数を水平方向についてはスマゴリンスキー型とし、鉛直方向については乱流輸送エネルギー方程式(Mellor & Yamada, 1982)から求めるようになっている。計算の手順としては、まず、2次元の流れを計算し(外部モード)、それより長い時間間隔で傾圧的な流れを計算するようになっている(内部モード)。風応力は海面摩擦係数を介して、水塊に作用する。POMの計算に関する記述は付録に示す。

POMの問題点としては、 σ 座標系でのスカラー量輸送計算における数値分散の介入がある。直交座標系における密度の定義位置と σ 座標系における密度の定義位置が異なることによる計算上の誤差である。POMをベースに様々な改良が加えられ、ROMS、ECOMSED、EFDCなどが開発された。その過程の中で問題点である数値分散等が改善された。POM自身は様々なユーザーにより改良されるとともに、生態系モデル、気象モデルと結合したモデル等が開発され、海洋分野や地球温暖化問題で利用されているが、これらすべてが公開されているわけではない。モデルの基本的特徴(拡散係数、座標系、干出・遡上モデルの有無、土砂の移流拡散・堆積モデル有無等)の一覧表を示す(Table 1)。

瀬戸内海に適用するモデルは、先に述べた流動、水質、底質等に関する課題群に適切に対応出来るモデルでなければならない。著者らは、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、親潮統流が存在し、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

Table 1. Characteristics of hydro dynamic models

表 1. 流動計算ソフトウェアの特徴

Model	Source Code	Vertical turbulence model	Horizontal mixing	Sediment	Morphology	Stratigraphy	Wet/drying	Language	Horiz. Discretization	Horizontal Grid	Vertical Grid	Parallel Processing	Wave forces	Bedload	Sediment Buoyancy	Bank Erosion
ADCIRC3D									FE							
CH3D	P	ARAP	Y				Y	F90		CI	S, Z	Y	Y			
CH3D-IMS	P	ARAP	Y				Y	F90		CI	S, Z	Y	Y			
CH3D-WES	PDL	KE	Y							C	S, Z					
COHERENS	PD	MY25, KE	Y	Limited	N	N	Y	F77	FD	R, S	S	N	N	N	N	N
DELFT3D	P	KE	Y	B	Y	Limited	Y	F77	FD	R, C	S, Z	N	Y	Y	Y	Beta
ECOMSED	PD	MY25	Y	B	N	Y	N	F77	FD	R, C	S	N	N	N	N	External Input
EFDC	PD	MY25	Y	B	Y	Y	Y	F77	FD	CO	S	On Cray MPI Soon	Y	Y	Y	Y
GETM	O	KE	Y	N			Y	F90/95	FD	C	S	Y				
HAMSON	P							F90			Z					
HYDRO3D/SED3D																
Mars3D									FE							
MECO	C	MY25, KE	Y	Y		Y	Y	C	FD	C	Z					
MIKE3D	P	KE		E												
MOHID							Y									
NCOM	PDL	MY25	Y	Beta	N	N	N	F90	FD	C	M	Y	N	N	N	N
POLCOMS	PDL	MY25	Y	Y	N	N	N	F10	FD	B	S	Y	N	N	N	Y
POM2K, OZPOM	PD	MY25	Y	N	N	N	N	F77	FD	C	S	Y	N	N	N	N
QUODDY4	PD	MY25		N			N	F77 or C	FE	Z	S	Y	N	N	N	
RMA10-11		MY25														
ROMS	C	MY25, GLS, KPP		B	Y	Limited	N	F77	FD	C	S	Y	N	N	Y	N
SHORECIRC	PDL			N	Y				FD				Y	Y	?	N
SYMPHONIE	PDL	K + prognostic	Y	C		N	N	F77	FD	R	S	N	Y	N	N	N
TELEMAC-3D	P						Y									
TRIM	P								FE							
UnTRIM	P															

Notes:
 Source code: Proprietary (P), Copywrite (C), Open (O), Public domain (PD; limited distribution PDL)
 Turbulence models: Mellor-Yamada 2.5 (MY25), Generic length scale (GLS), K-epsilon (KE), K-omega (KW), Aeronautical Res. Associates of Princeton (ARAP)
 Sediment: Non-cohesive (N), Cohesive (C), both (B), either (E)
 Horizontal Grid: Rectangular (R), Curvilinear (C), Spherical (S), Irregular (I)

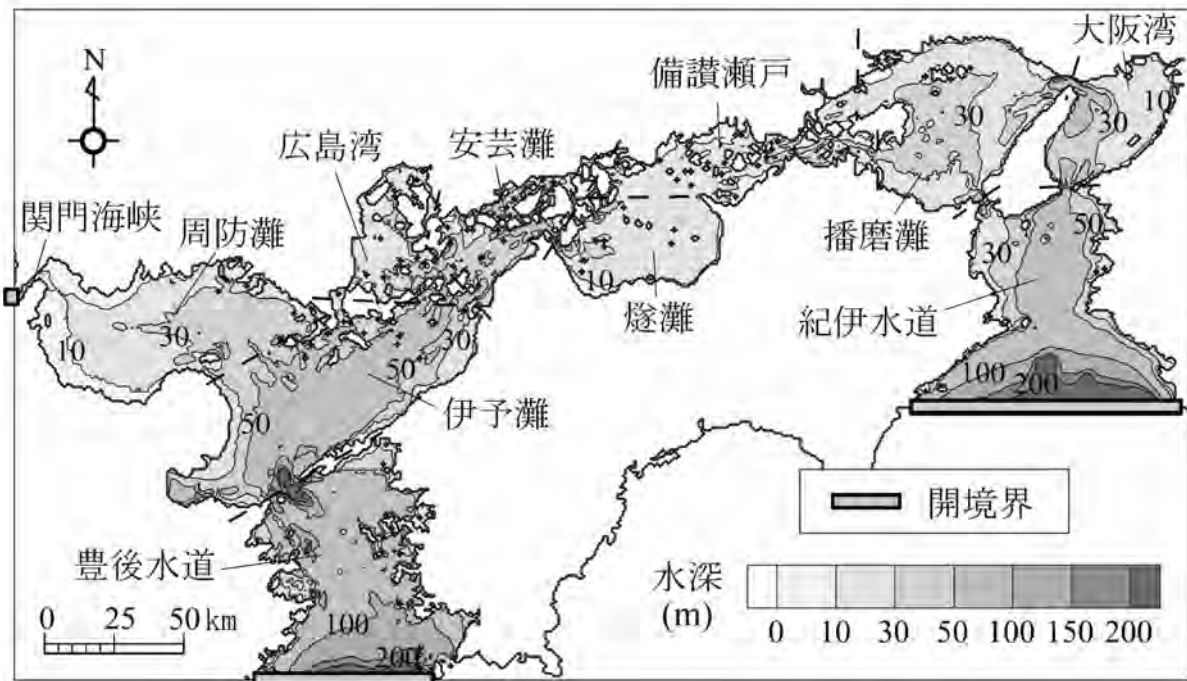


Fig. 2. Calculation domain of the Seto Inland Sea.

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及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（Fig. 2）。

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。

Table 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1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

Table 2. A table of conditions used in the Model.

項目	内容	
計算領域	南北234 km, 東西421 km	
計算格子	水平方向	直交座標 1,000 m
	鉛直方向	σ座標 10 層
分割時間	External Mode = 3.0 秒, Internal Mode = 18.0 秒	
境界条件	潮汐	天文潮位(豊後水道, 紀伊水道)
	水温・塩分	JCOPE同化データ
	NO ₃	0.95 μmol/L : 水深40 m以浅 50 - 2.6 × 水温 μmol/L : 水深40 m以深
	PO ₄	NO ₃ /14 μmol/L
気象条件	風, 気温, 気圧 相対湿度	GPVデータ(気象庁)
	全天日射量, 雲量	気象観測所データ(気象庁)
河川	21の1級河川のデータ(国交省)を設定	
	流量・水温	観測値
	水質濃度	採水データを元に一定値を設定

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・山形、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、内挿して境界値として用いた。外洋の硝酸塩（以下、NO₃）及びリン酸塩（以下、PO₄）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 NO₃ 及び NO₃ と PO₄ の関係式（Fig. 3）を使用して、開境界の水温から NO₃、その NO₃ から PO₄ を算出して開境界に与えた。ただし、40m 以浅では水温と NO₃ 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。

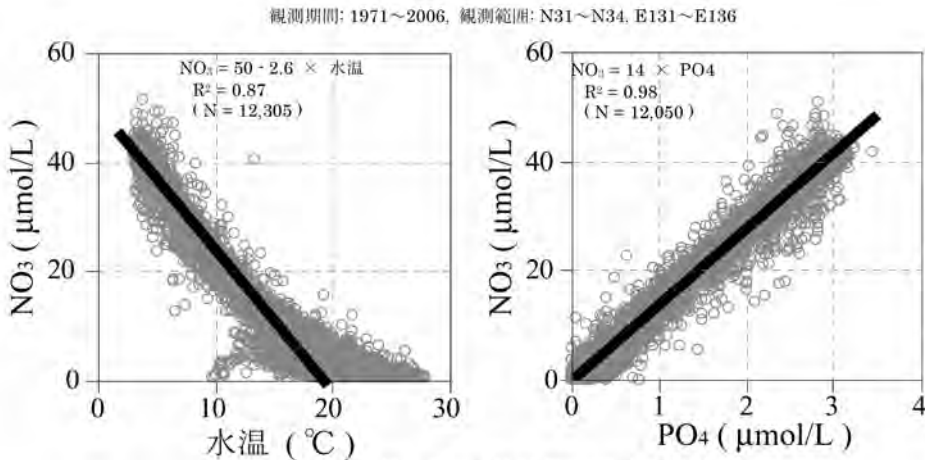


図3. NO₃と水温及びNO₃とPO₄の関係

Fig. 3. The relationships between NO₃ and water temperature and PO₄.

2 モデルの計算結果

(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分 (M2, S2, K1, O1, K2, N2, P1) の振幅及び遅角を比較した (Fig. 4)。その結果、相関係数はそれぞれ0.94及び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 (Fig. 5), 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した結果、2005年は豊後水道から流入して紀伊水道から

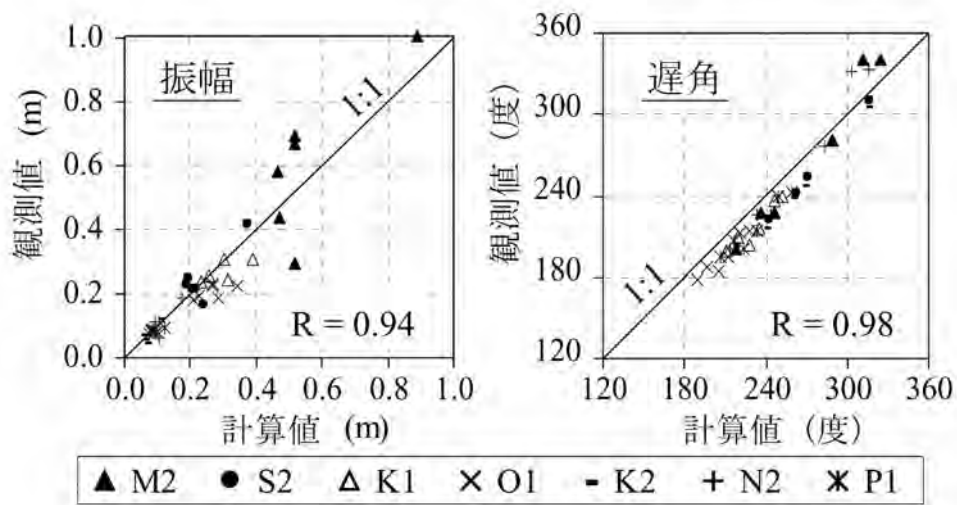


Fig. 4. Comparison of field data to calculated data (amplitude and phase of tide).

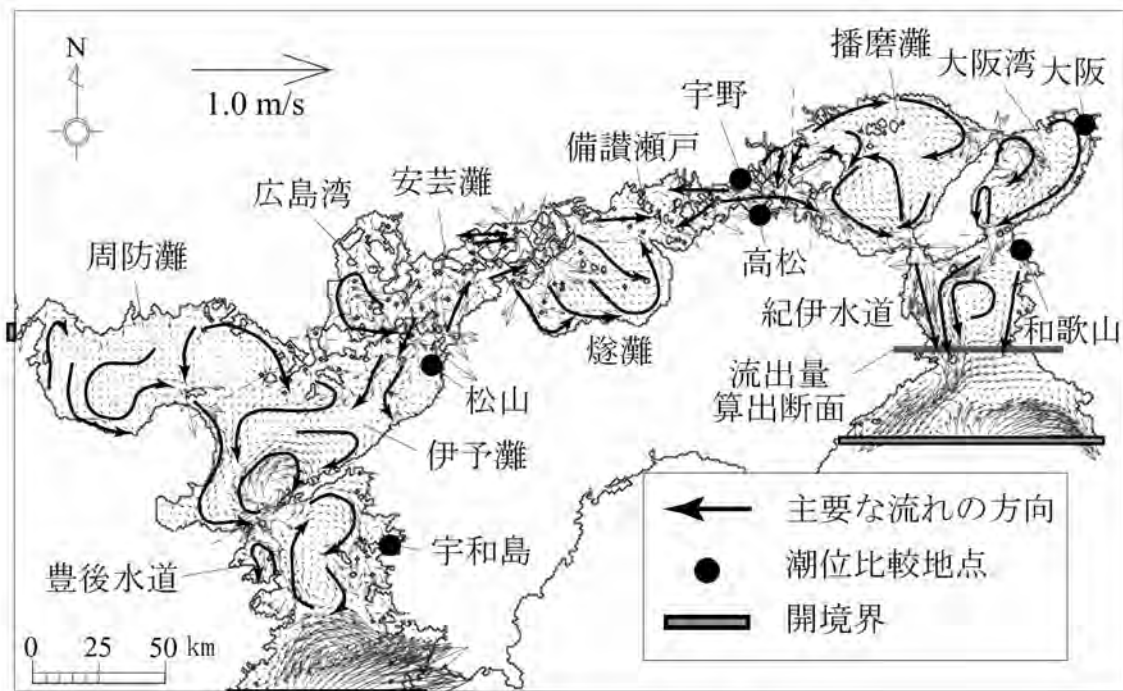


Fig. 5. Calculated residual current vector (surface).

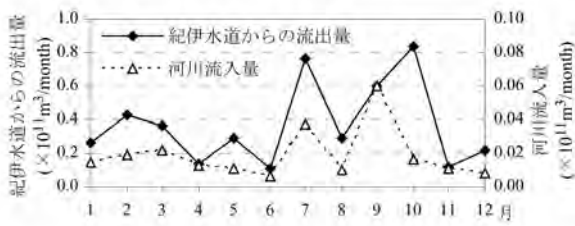


Fig. 6. Water discharge rate of the Kii channel and 21 rivers in the Seto Inland Sea coast.

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 (Fig. 6)。

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、NO₃及びクロロフィル a (以下、Chla) について、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) の各海域平均値と計算結果を比較検証した。Fig. 7に両データの観測地点を示す。水温に関しては、観測結果では、2005年の瀬戸内海における水温は3月頃に10℃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 (Fig. 8最左列)。表層水温は9月に約25℃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、観測結果を適切に再現できているものと考えられる。塩分に関しては、観測結果では、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 (Fig. 8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)。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。また、図には示していないが、塩分・水温分布による成層強度を見ると、計算結果は観測結果よりも弱く、モデルにおいて混合が過大である可能性がある。これは栄養塩輸送、低次生産に直接影響するので、改善する必要がある。改善方策としては、拡散係数の再検討や鉛直分割数の増加などが考えられる。

なお、2005年当初の塩分は平年に比較して低い傾向にある。これは前年の2004年に台風等による出水が多かったためと考えられる。

観測結果では、NO₃は1月から減少傾向で3月、4

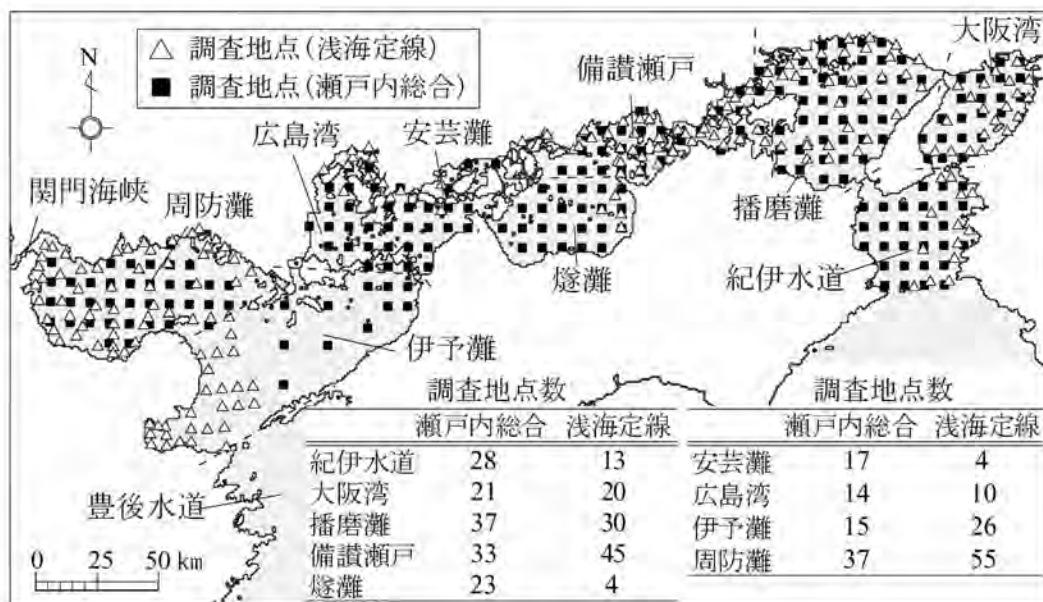


Fig. 7. Location and number of observation points.

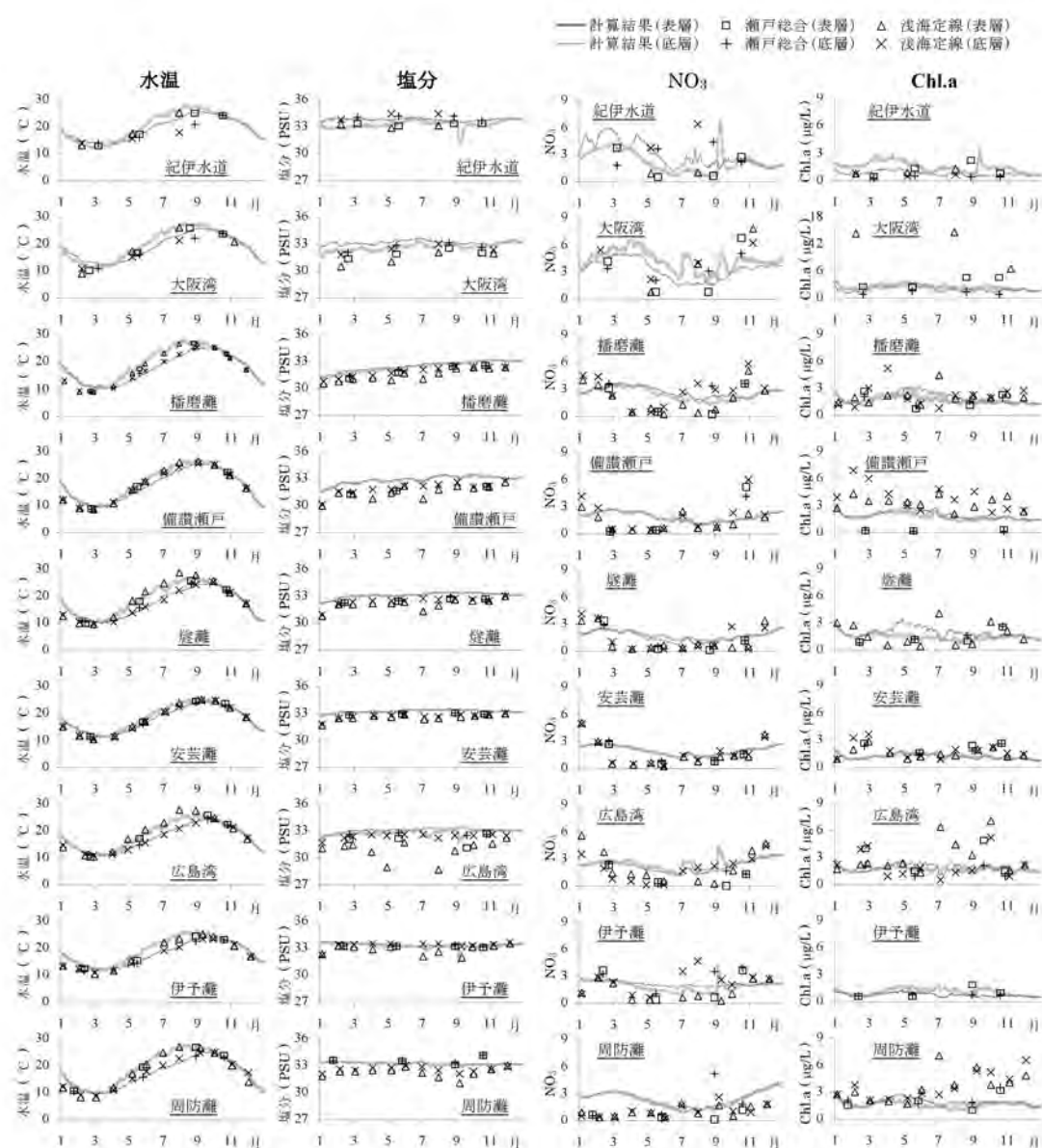


図8. 計算結果と観測値の比較

Fig. 8. Field data and calculated data.

月には1.0mmol/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 (Fig. 8右から2列目)。一方、Chl.aはNO₃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 (Fig. 8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NO₃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NO₃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う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。

なお、図には示していないが、紀伊、豊後両水道の底層から栄養塩が瀬戸内海に輸送されており、その強さは外洋の条件（境界条件）により変動していることが計算結果に現れている。詳細な検討は今後行う予定であるが、前述した外洋からの栄養塩供給機構を反映していると考えられる。

まとめ

以上より、これまでの調査研究成果レビューを行い、諸課題の解決に向けて必要な基本的な流動・低次生態モデルを、流動モデルとして POM、低次生態系モデルとして KKYS モデルをベースに開発し、瀬戸内海に適用した。低次生態系モデルの諸パラメータは基本的に KKYS のデフォルト値を用いており、再現性に課題を多く残している。瀬戸内海における基礎生産調査データ等による生態系モデルのパラメータの見直し、生態系モデルの構造、底泥からの溶出過程等を詳細に検討する必要がある。さらには流動モデルにおいても、既に述べたように混合が過大気味のために成層強度が弱めの計算結果を与えているなどの問題がある。これらの点に関しては、現在、鋭意改良作業を継続している。また、干潟上の流れなどを精度良く再現するために一部領域をより解像度を上げる多重ネスティングや干出・冠水を表現出来る移動境界などの検討も行っている。本論文では基本モデルの紹介にとどめているが、上記の改良・開発に関しては成果が次次第報告する予定である。

今後、本モデルとデータベース、現地観測等を総合的に利用することにより、水産有用種の産卵場から幼生分散・着底過程の検討、着底場における生産環境評価、漁場環境の改善効果評価、中長期の瀬戸内海環境変動予測、準リアルタイム流動・低次生産情報把握などについて検討することを考えている。

なお、浅海定線データ等の提供等に関しては、瀬戸内海沿岸の各県の水産試験場並びに県職員の方々に協力頂いた。1級河川の流量、水質データの提供は該当する21の1級河川の国交省下流事務所の方々に協力頂いた。それぞれ関係機関、氏名を明記すべきところですが、あまりに多いので、省略させていただきました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 阿保勝之, 杜多 哲, 藤原建紀, 2006: 冬季の東部瀬戸内海における残差流と栄養塩環境. 海岸工学論文集, **53**, 1096-1100.
- 新井雅之, 中山哲殿, 足立久美子, 齊藤 肇, 奥西 武, 八木 宏, 2006: 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. 海岸工学論文集, **53**, 1101-1105.
- 藤原建紀, 小林志保, 高志利宣, 2003: 瀬戸内海の窒素・リンの輸送と起源の現地観測. 海岸工学論文集, **50**, 951-955.
- 藤原建紀, 小林志保, 國井麻妃, 宇野奈津子, 2006: 瀬戸内海に存在するリン・窒素量の経年変動. 沿岸海洋研究ノート, **43**(2), 129-136.
- 浜走幸育, 日比野忠史, 駒井克昭, 松岡純作, 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. 海岸工学論文集, **48**, 1036-1040.
- 橋本俊也, 山本民次, 多田邦尚, 松田 治, 永末寿宏, 1997: 瀬戸内海の一次生産と海洋構造. 沿岸海洋研究ノート, **35**(1), 109-114.
- 速水祐一, 兼田淳史, 小濱 剛, 中野伸一, 武岡英隆, 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. 沿岸海洋研究ノート, **43**(2), 143-149.
- 石井大輔, 柳 哲雄, 2004: 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. 海の研究, **13**, 389-401.
- 石井大輔, 柳 哲雄, 2005: 瀬戸内海の沿岸域と全域における TP・TN 濃度変動. 海の研究, **14**, 35-45.
- 石井大輔, 柳 哲雄, 2006: 瀬戸内海に存在する太平洋起源のリン・窒素. 沿岸海洋研究ノート, **43**(2), 119-127.
- 笠井亮秀, 藤原建紀, 多田光男, 2001: 紀伊水道の海洋構造と栄養塩輸送. 海岸工学論文集, **48**, 436-440.
- 兼田淳史, 乗松桂輔, 渡辺浩三, 小泉喜嗣, 武岡英隆, 2002: 黒潮の離接岸が豊後水道の水温に与える影響. 沿岸海洋研究ノート, **39**(2), 181-188.
- Kawamiya, M., M. Kishi, Y. Yamanaka, and N. Suginoara, 1995: An Ecological-Physical Coupled Model Applied to Station Papa. *J. Oceanography*, **51**, 635-664.
- Kobayashi, K. and T. Fujiwara, 2006: Physical and biochemical responses to decadal variability of shelf water intrusion in the Seto Inland Sea,

- Japan. Workshop on Coastal Observatories - Best practice in the synthesis of long-term observations and models, Proudman Oceanographic Laboratory (Liverpool, UK).
- 小林志保, 藤原建紀, 高杉由夫, 2006: 陸岸に囲まれた潮汐フロント域における物質輸送機構. 海岸工学論文集, **53**, 921-925.
- 駒井克昭, 日比野忠史, 清水勝義, 2002: 瀬戸内海における水位の季節変動量の推定. 海岸工学論文集, **49**, 381-385.
- 駒井克昭, 竹内健太郎, 日比野忠史, 松本英雄, 2003: 瀬戸内海における湾・灘間での海水交流量の推定およびその長期変動に関する研究. **50**, 921-925.
- 駒井克昭, 日比野忠史, 仁子幸子, 浜走幸育, 松岡純作, 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. 海岸工学論文集, **48**, 1106-1110.
- Mellor, G. L., and T. Yamada, 1982: Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Rev. Geophys. Space Phys.*, **20**, 851-875.
- 宮澤泰正, 山形俊男, 2003: JCOPE 海洋変動予測システム. 月刊海洋, **12**, 881-886.
- 李寅鉄, 浮田正夫, 関根雅彦, 中西弘, 1995: 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. 海岸工学論文集, **42**, 1106-1110.
- 陸田秀実, 市位嘉崇, 秋山佳明, 土井康明, 2003: 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. 海岸工学論文集, **50**, 436-440.
- 林美鶴, 柳哲雄, 橋本俊也, 2000: 瀬戸内海における窒素・リン現存量比率. 海の研究, **9**(2), 83-89.
- せとうちネット, 2009: 瀬戸内海の情報一自然環境に関する情報一. <http://www.seto.or.jp/seto/kankyojoho/sizenkankyo/top-data/hyou1-23.htm> 参照2009/5/17.
- 高志利宣, 藤原建紀, 住友寿明, 竹内淳一, 2002: 外洋から紀伊水道への窒素・リンの輸送. 海岸工学論文集, **49**, 1076-1080.
- 武岡英隆, 1996: 沿岸海洋と外洋の相互作用. 沿岸海洋研究ノート, **34**(1), 3-13.
- 田中陽二, 河原能久, 末永慶寛, 2005: 瀬戸内海全域における海水流動特性の数値実験. 水圏環境工学論文集, **1**(1), 9-14.
- 山本民次, 松田治, 橋本俊也, 妹背秀和, 北村智顕, 1998: 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. 海の研究, **7**(3), 151-158.
- 山本浩一・二村貴幸・坂野章・日下部隆昭・末次忠司・横山勝英, 2003: 濁度計による懸濁態栄養塩負荷推定に関する研究. 河川技術論文集, **9**, 柳哲雄, 1992: 瀬戸内海の流動とそれに関する諸問題. 海の研究, **1**(2), 9-19.
- 柳哲雄, 原島省, 2003: 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. 海の研究, **12**, 565-572.
- *以下は, 本文中で引用していないが, 関係論文として掲載する。
- Blumberg, A. F. and G. L. Mellor, 1987: A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model, in "Three-Dimensional Coastal Ocean Models" (ed. by N. Heaps), 1-16.
- 呉碩津, 松山幸彦, 山本民次, 中嶋昌紀, 高辻英之, 藤沢邦康, 2005: 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-. 沿岸海洋研究ノート, **43**(1), 85-95.
- 速水祐一, 碓井澄子, 武岡英隆, 2004: 瀬戸内海における窒素・リンの存在量とその長期変動. 海と空, **80**(2), 75-78.
- 日比野忠史, 浅井正, 細川恭史, 2000: 瀬戸内海における湾・灘での水質の季節変動特性. 海岸工学論文集, **47**, 1036-1040.
- 眞鍋武彦, 反田寛, 堀豊, 長井敏, 中村行延, 1994: 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-. 沿岸海洋研究ノート, **31**(2), 169-181.
- 丸谷尊彦, 韓銅珍, 中辻啓二, 2000: 大阪湾における水質の長期予測計算. 海岸工学論文集, **47**, 1051-1055.
- 中村充博, 小林弘二郎, 村上和男, 2005: 瀬戸内海の水質環境に及ぼす黒潮流路と外海の海況変動の影響. 海岸工学論文集, **52**, 361-365.
- 西田修三, 金漢九, 高地慶, 入江政安, 中辻啓二, 2006: 紀淡海峡における水質変動特性と栄養塩輸送. 海岸工学論文集, **53**, 996-1000.
- 陸田秀実, 土井康明, 稲山文晴, 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. 海岸工学論文集, **49**, 1081-1085.
- 陸田秀実, 土井康明, 河村和憲, 亀山直記, 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. 海岸工学論文集, **48**, 1071-1075.

- 多田邦尚, 和田彩香, 一見和彦, 橋本俊也, 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—. 沿岸海洋研究ノート, **43**(2), 157-162.
- 武岡英隆, 速水祐一, 兼田淳史, 2005: 瀬戸内海における環境の長期変動. 沿岸海洋研究ノート, **43**(1), 45-50.
- 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, 2001: 瀬戸内海の栄養塩環境の長期自動モニタリング. 沿岸海洋研究ノート, **38**(2), 91-97.
- 柳 哲雄, 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—. 沿岸海洋研究ノート, **38**(2), 99-102.

付 録

流動・低次生産モデル

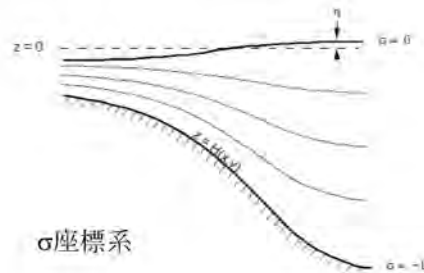
モデルは、流動を POM (Blumberg and Mellor, 1987) で計算し、一次生産過程を KKYS モデル (Kawamiya et al., 1995) にリンのコンパートメントを追加したモデルによって計算するものである。

1 基礎式 (POM、流動)

流動の計算に用いる POM は、水平面は直交座標 (デカルト座標)、鉛直方向に σ -座標を使用したモデルであり、海水の連続式、運動方程式、水温・塩分の輸送方程式、乱流エネルギー・乱流スケールの輸送方程式により構成されている。以下に、座標系の概念図及び各々の方程式を示す。

【 座 標 系 】

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



【 連 続 式 】

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial Du}{\partial x} + \frac{\partial Dv}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} = 0 \tag{1}$$

【 x 方向の運動方程式 】

$$\begin{aligned} & \frac{\partial uD}{\partial t} + \frac{\partial uuD}{\partial x} + \frac{\partial uvD}{\partial y} + \frac{\partial u\omega}{\partial \sigma} - fvD \\ & = -gD \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{gD^2}{\rho_0} \int_{\sigma}^{\sigma_0} \left[\frac{\partial \rho'}{\partial x} - \frac{\sigma}{D} \frac{\partial D}{\partial x} \frac{\partial \rho'}{\partial \sigma} \right] d\sigma \\ & + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_M}{D} \frac{\partial U}{\partial \sigma} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ D \left(2A_M \frac{\partial u}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ D \left(A_M \left(\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) \right\} \end{aligned} \tag{2}$$

【 y 方向の運動方程式 】

$$\begin{aligned} & \frac{\partial vD}{\partial t} + \frac{\partial uvD}{\partial x} + \frac{\partial vvD}{\partial y} + \frac{\partial v\omega}{\partial \sigma} + fuD \\ & = -gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{gD^2}{\rho_0} \int_{\sigma}^{\sigma_0} \left[\frac{\partial \rho'}{\partial y} - \frac{\sigma}{D} \frac{\partial D}{\partial y} \frac{\partial \rho'}{\partial \sigma} \right] d\sigma \\ & + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_M}{D} \frac{\partial V}{\partial \sigma} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ D \left(A_M \left(\frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ D \left(2A_M \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right\} \end{aligned} \tag{3}$$

(σ 座標に基準化された鉛直流速 ω とデカルト座標上の実流速 w の関係)

$$w = \omega + u \left(\sigma \frac{\partial D}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) + v \left(\sigma \frac{\partial D}{\partial y} + \frac{\partial \eta}{\partial y} \right) + \sigma \frac{\partial D}{\partial t} + \frac{\partial \eta}{\partial t} \quad (4)$$

【 水温の輸送方程式 】

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

【 塩分の輸送方程式 】

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

【 乱流エネルギーの輸送方程式 】

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

【 乱流スケールの輸送方程式 】

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

$$\tilde{W} = 1 + E_2(l/kL) \tag{9}$$

$$\frac{1}{L} = \frac{1}{\eta - z} + \frac{1}{H - z} \tag{10}$$

$$\frac{\partial \rho'}{\partial \sigma} \equiv \frac{\partial \rho}{\partial \sigma} - \frac{1}{c_s^2} \frac{\partial p}{\partial \sigma} \tag{11}$$

$$K_M = qlS_M \tag{12}$$

$$K_H = qlS_H \tag{13}$$

$$S_H [1 - (3A_2B_2 + 18A_1A_2)G_H] = A_2 [1 - 6A_1 / B_1] \tag{14}$$

$$S_M [1 - 9A_1A_2G_H] - S_H [(18A_1^2 + 9A_1A_2)G_H] = A_1 [1 - 3C_1 - 6A_1 / B_1] \tag{15}$$

$$G_H = \frac{l^2}{q^2} \frac{g}{\rho_0} \left[\frac{\partial \rho}{\partial z} - \frac{1}{c_s^2} \frac{\partial p}{\partial z} \right] \tag{16}$$

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

表-0.1 変数一覧

変数名	内容	
x^*, y^*, z^*	デカルト座標	
x, y, σ	σ 座標	
η	水位	(m)
D	水深	(m)
u, v, w	x, y, σ 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 ²)
ρ	海水の密度	(kg/m ³)
K_M	鉛直渦動粘性係数	(m ² /s)
A_M	水平渦動粘性係数	(m ² /s)
T	水温	(°C)
S	塩分	(psu)
K_H	鉛直渦拡散係数	(m ² /s)
A_H	水平渦拡散係数	(m ² /s)
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)
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	

2 生態系モデル

一次生産の計算に用いるモデルは、KKYSモデル(Kawamiya et al, 1995)にリンのコンパートメントを追加したモデルであり、以下に示す7つのコンパートメントから構成される。図-2.1に各コンパートメント関係図を示す。

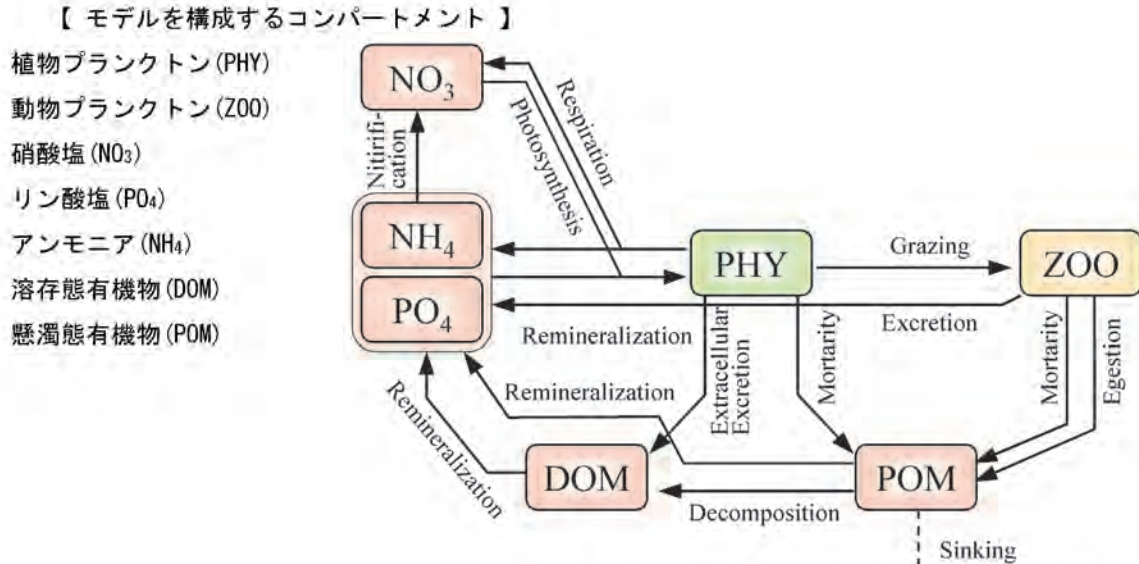


図1 一次生産モデルの構成コンパートメントの関係図

時々刻々の各コンパートメントの濃度変化は、物理的な移流拡散過程と生物学的な過程を考慮した次の輸送方程式により算出される。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial CD}{\partial t} + \frac{\partial uCD}{\partial x} + \frac{\partial vCD}{\partial y} + \frac{\partial C\omega}{\partial \sigma} \\ & = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{K_H}{D} \frac{\partial C}{\partial \sigma} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ D \left(A_H \frac{\partial C}{\partial x} \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ D \left(A_H \frac{\partial C}{\partial y} \right) \right\} + F_{bio} + F_{phys} \end{aligned} \quad (17)$$

- C : コンパートメントの濃度
- D : 水深
- F_{bio} : 生物過程によるソース、シンク項
- F_{phys} : 移流拡散以外の物理過程によるソース、シンク項
- K_H : 鉛直拡散係数
- Λ_H : 水平拡散係数

【 植物プランクトンの時間変化 】

$$\frac{d(Chl)}{dt} = \text{光合成} - \text{細胞外分泌} - \text{死亡} - \text{捕食} - \text{沈降} \quad (18)$$

【 動物プランクトンの時間変化 】

$$\frac{d(ZO)}{dt} = \text{摂食} - \text{排泄} - \text{排糞} - \text{死亡} \quad (19)$$

【 硝酸塩の時間変化 】

$$\frac{d(NO_3)}{dt} = -(\text{光合成} - \text{Chl呼吸}) \times R_{NO_3} + \text{硝化} \quad (20)$$

【 リン酸塩の時間変化 】

$$\frac{d(PO_4)}{dt} = -(\text{光合成} - \text{Chl呼吸}) + \text{PON分解} + \text{DON分解} \quad (21)$$

【 アンモニアの時間変化 】

$$\frac{d(NH_4)}{dt} = -(\text{光合成} - \text{Chl呼吸}) \times (1 - R_{NO_3}) + \text{PON分解} + \text{DON分解} - \text{硝化} \quad (22)$$

【 溶存態有機窒素の時間変化 】

$$\frac{d(DON)}{dt} = \text{細胞外分泌} + \text{PON分解} - \text{DON分解} \quad (23)$$

【 懸濁態有機窒素の時間変化 】

$$\frac{d(PON)}{dt} = \text{Chl死亡} + \text{ZO死亡} + \text{排糞} - \text{沈降} \quad (24)$$

表-0.2 一次生産モデルのパラメータ

分類	項目	値
植物プランクトン	最大光合成速度	2.0 / day
	光合成の温度係数	0.063 / °C
	半飽和定数(NO ₃ 、NH ₄)	3.0 μmol/l
	NH ₄ 選択係数	1.5 l/μmol
	半飽和定数(PO ₄)	0.15 μmol/l
	最適光強度	0.07 cal/cm ² /min
	呼吸速度	0.03 / day
	呼吸の温度依存係数	0.0519 / °C
	細胞外分泌速度	0.135
	植物プランクトン枯死速度	0.0281 l/μmol-N/day
	植物プランクトン枯死の温度係数	0.069 / °C
動物プランクトン	最大捕食速度	0.3 / day
	捕食の温度係数	0.0693 / °C
	捕食の閾値	0.043 μmol-N/l
	イヴレフ定数	1.4 l/μmol-N
	動物プランクトン同化効率	0.7
	動物プランクトン成長効率	0.3
	動物プランクトン死亡速度	0.0585 l/μmol-N/day
	動物プランクトン死亡の温度係数	0.0693 / °C
分解過程	PONからNH ₄ への分解速度	0.030 / day
	PONからNH ₄ への分解速度の温度係数	0.0693 / °C
	PONからDONへの分解速度	0.030 / day
	PONからDONへの分解速度の温度係数	0.0693 / °C
	DONからNH ₄ への分解速度	0.030 / day
	DONからNH ₄ への分解速度の温度係数	0.0693 / °C
	硝化速度	0.030 / day
	硝化速度の温度係数	0.0693 / °C
光の減衰過程	光の消散係数	0.1 / m
	植物プランクトンによる消散係数	0.0179 / μmol-N/m
沈降過程	植物プランクトンの沈降速度	0.173 m/day
	懸濁態粒子の沈降速度	0.432 m/day