

Environment Research and Technology Development Fund

## 環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

5-2005 播磨灘を例とした瀬戸内海の栄養塩管理のための

物理—底質—低次生態系モデルの開発

(JPMEERF20205005)

令和2年度～令和4年度

Development of Hydrodynamic-Benthic-Ecosystem Model  
for Management of Nutrient Load into the Seto Inland Sea

〈研究代表機関〉

愛媛大学

〈研究分担機関〉

香川大学

○図表番号の付番方法について

「Ⅰ。成果の概要」の図表番号は「0。通し番号」としております。なお、「Ⅱ。成果の詳細」にて使用した図表を転用する場合には、転用元と同じ番号を付番しております。

「Ⅱ。成果の詳細」の図表番号は「サブテーマ番号。通し番号」としております。なお、異なるサブテーマから図表を転用する場合は、転用元と同じ図表番号としております。

令和5年5月

## 目次

I. 成果の概要	1
1. はじめに（研究背景等）	
2. 研究開発目的	
3. 研究目標	
4. 研究開発内容	
5. 研究成果	
5-1. 成果の概要	
5-2. 環境政策等への貢献	
5-3. 研究目標の達成状況	
6. 研究成果の発表状況	
6-1. 査読付き論文	
6-2. 知的財産権	
6-3. その他発表件数	
7. 国際共同研究等の状況	
8. 研究者略歴	
II. 成果の詳細	16
II-1 底質からの栄養塩溶出量の変動機構の解明 (香川大学)	
要旨	
1. 研究開発目的	
2. 研究目標	
3. 研究開発内容	
4. 結果及び考察	
5. 研究目標の達成状況	
6. 引用文献	
II-2 物理—底質—低次生態系モデルの開発 (愛媛大学)	
要旨	
1. 研究開発目的	
2. 研究目標	
3. 研究開発内容	
4. 結果及び考察	
5. 研究目標の達成状況	
6. 引用文献	
III. 研究成果の発表状況の詳細	42
IV. 英文Abstract	45

## I. 成果の概要

課題名 5-2005 播磨灘を例とした瀬戸内海の栄養塩管理のための物理—底質—低次生態系モデルの開発

課題代表者名 森本 昭彦 (愛媛大学沿岸環境科学研究センター 教授)

重点課題 主：【重点課題⑩】大気・水・土壌等の環境管理・改善のための対策技術の高度化及び評価・解明に関する研究

副：【重点課題⑩】同上

行政要請研究テーマ (行政ニーズ) 非該当

研究実施期間 令和2年度～令和4年度

### 研究経費

105,837千円 (合計額)

(各年度の内訳：2年度：37,799千円、3年度：34,019千円、4年度：34,019千円)

### 研究体制

(サブテーマ1) 底質からの栄養塩溶出量の変動機構の解明 (香川大学)

(サブテーマ2) 物理—底質—低次生態系モデルの開発 (愛媛大学)

### 研究協力機関

研究協力機関はない

本研究のキーワード 瀬戸内海、数値モデル、栄養塩管理、栄養塩溶出、貧栄養化、基礎生産力

## 1. はじめに（研究背景等）

瀬戸内海の水質は1960～1970年代の高度経済成長期に急激に悪化し、大規模赤潮の頻発、養殖および天然魚の大量死、奇形魚の発生など、「瀕死の海」と呼ばれる状態となった。この状態を改善するため、1973年に瀬戸内海環境保全臨時措置法が施行され（1978年には瀬戸内海環境保全特別措置法に改正）、それ以降、陸からの有機物負荷、リンや窒素の総量削減が行われている。その結果、現在では海域によっては海水中の窒素やリンが不足していると言われるまで水質は改善し、ある意味きれいな海となった。その一方で、イワシ類やイカナゴの不漁、ノリの色落ちなど漁業生産量は水質の改善と反対に低下している。このような事実から、漁業生産量の低下は、陸からの窒素やリンなどの栄養塩負荷を減らした結果であるとの主張がある。海洋の生態系では、栄養塩を取り込み植物プランクトンが増殖し（基礎生産）、動物プランクトンが植物プランクトンを捕食、さらにイカナゴのような小さな魚が動物プランクトンを捕食する。単純に考えれば、栄養塩濃度の低下は基礎生産力を低下させ、さらに高次の栄養段階の現存量を低下させるであろう。一方で、漁業生産量の低下は基礎生産の低下の結果ではなく、藻場・干潟などの埋め立てや、垂直護岸による仔魚・稚魚の成育場の減少や、水温が上昇したためであるとの意見もある。また、近年では栄養塩濃度が低下している一方で、それに植物プランクトンが単純に応答していないとの報告もある。瀬戸内海の栄養塩濃度の高かった時代に漁業生産が高かったことは事実であるが、上述したような栄養塩濃度の低下が基礎生産力を低下させるという単純な応答を考え、科学的根拠のないままに漁業生産をあげるために再び陸からの栄養塩負荷を増加させてよいわけではない。

瀬戸内海は四方を陸に囲まれ多くの都市に面していることから、基礎生産に必要な栄養塩は主に河川を通じて陸から供給されていると考えがちである。しかし、既往の研究によれば、瀬戸内海の約60%の栄養塩は太平洋起源のものであり、さらに海底の底質から溶出する栄養塩量は河川から入ってくる栄養塩よりも多いとの見積もりもある。これらの見積もりが正しいとすると、河川から供給される栄養塩が瀬戸内海の全栄養塩に占める割合は十数%にすぎない。したがって、太平洋や底質からの栄養塩の供給量が増えると、それらの変化は陸からの栄養塩負荷量の変化よりも瀬戸内海の栄養塩濃度の変化に大きな影響を与える可能性がある。しかしながら、現状では瀬戸内海の栄養塩に、どこを起源としたものがどの程度含まれ、そしてそれぞれ異なる起源の栄養塩が過去から現在までどのような時間変化をしてきたのかは定量的に把握できていない（図-0.1）。瀬戸内海を漁業生産力の高い豊かで、水質の良いきれいな海にするためには、瀬戸内海の生態系の基盤である低次生態系における物質循環の理解、つまり栄養塩循環と栄養塩濃度変化に伴う基礎生産力の変化を理解することが必須である。

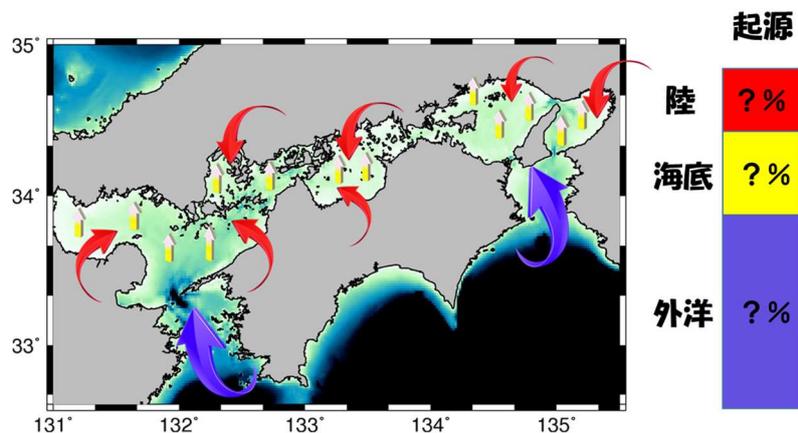


図-0.1 瀬戸内海への栄養塩供給

## 2. 研究開発目的

本課題では、環境の物理・化学データ（栄養塩濃度、懸濁態有機物量、堆積物の有機物量や栄養塩溶出量等）や、植物プランクトン量の長期的な変遷に関する情報が充実している播磨灘を対象とし、陸起

源、底質起源、太平洋起源の栄養塩の割合とその時間変化を明らかにでき、且つ陸からの栄養塩負荷量を変化させたときの栄養塩循環と基礎生産力の変化を定量的に計算可能な物理－底質－低次生態系モデルを構築することを目的とする。

また、底質からの栄養塩溶出をモデル化するためには、海洋表層での有機物の生成（基礎生産）、その有機物の沈降・分解・堆積過程、さらに堆積物からの栄養塩溶出量などの実測データと、これらのプロセスの理解が必要である。現場観測によりデータを蓄積し、このプロセスを定量的に明らかにすることも目的とする。

### 3. 研究目標

全体目標	長期的なデータが充実している播磨灘を対象とし、陸起源、底質起源、太平洋起源の各栄養塩が播磨灘の栄養塩に占める割合と、その時間変化を定量的に示すことができる物理－底質－低次生態系結合モデルを構築する。数値モデルと現場観測・実験により、外洋と底質から供給される栄養塩量の時間変化を定量的に明らかにする。さらに、人為的にコントロールが可能な陸域からの栄養塩供給量を変化させた数値実験を行い、播磨灘の栄養塩濃度の空間分布や応答を調べ、播磨灘の栄養塩管理法について提言を行う。
サブテーマ1	底質からの栄養塩溶出量の変動機構の解明
サブテーマリーダー/所属機関	多田 邦尚/香川大学
目標	香川大学の研究対象海域で、これまでに蓄積してきた底泥の有機物含量や底泥からの栄養塩溶出に関する知見を精査し、テーマ2の開発モデルに使用できるデータ群として再構築する。また、現場観測として、過去に沿岸海域では例のない基礎生産量、沈降粒子束、および底泥からの栄養塩溶出速度をすべて同時に実測する。これらより、水柱における粒状有機物の生産、沈降、分解、海底への堆積、またその後の底泥からの栄養塩溶出に関する一連の過程を定量的に明らかにする。さらに、海底堆積物中に埋没した有機態窒素、リン含量の鉛直分布を明らかにし、過去得られた鉛直分布と比較することにより、堆積物中で長期間にわたって進行する有機物の分解過程について検討し、これらが栄養塩溶出量にどの程度寄与するか明らかにする。 以上により得られた結果から底泥から溶出する栄養塩量の変動機構について明らかにし、それらの知見をサブテーマ2が開発する底質モデルに提供する。
サブテーマ2	物理－底質－低次生態系モデルの開発
サブテーマリーダー/所属機関	森本 昭彦/愛媛大学
目標	播磨灘の栄養塩に占める陸起源、太平洋起源、底質起源の栄養塩の割合とその時間変化を定量的に示すことのできる物理－底質－低次生態系モデルを開発する。このモデルを開発するために以下の4種類のモデルを開発する。①海底での有機物の堆積、分解、栄養塩溶出過程を計算可能な新たな底質モデル、②太平洋起源の栄養塩の瀬戸内海全域における挙動を計算可能な水平解像度1kmの高解像度瀬戸内海・黒潮低次生態系モデル、③播磨灘を対象とした水平解像度500m

の3次元物理モデル、④播磨灘を対象とした低次生態系ボックスモデル。①の底質モデルについては、サブテーマ1による堆積物中の有機物の鉛直分布や底質からの栄養塩溶出量に関する観測・実験データを用いて検証する。③の播磨灘を対象とした3次元物理モデルに①の底質モデルと④の低次生態系ボックスモデルを結合し、②のモデルの出力を境界条件とした物理—底質—低次生態系を構築し、陸からの栄養塩供給量を変化させた場合の播磨灘の栄養塩濃度の応答と空間分布を定量的に示す。

#### 4. 研究開発内容

##### 【サブテーマ1】底質からの栄養塩溶出量の変動機構の解明

底質からの栄養塩（窒素・リン・ケイ素の無機栄養分）溶出メカニズムを明らかにするために、これまで香川大学が定点観測を実施してきた播磨灘の観測地点（Stn. NH）において、ほぼ毎月、①<sup>13</sup>C（炭素安定同位体）法による基礎生産量の測定、②セジメント・トラップ（沈降粒子捕集装置）を用いた沈降粒子束の測定、③堆積物コアインキュベーション法\*による栄養塩溶出速度の測定を同時に行い、①-③の三者の量的関係について明らかにする。

香川大学が過去に堆積物中の有機態炭素・全窒素・全リン含有量等の鉛直分布を報告した播磨灘の観測点（4点）で、新たに柱状堆積物試料を採取する。得られた試料について、有機態炭素・全窒素・全リン含有量等の鉛直分布を明らかにする。さらに、柱状堆積物試料の年代測定も実施し、分解モデルにより堆積時の有機物含量を復元し、底質からの栄養塩溶出量を推定する経験式により長期的な栄養塩溶出量を推定する。

以上の観測結果および過去の蓄積データの整理から、水柱内の生元素をめぐる基礎生産、沈降、分解、埋没、底質からの栄養塩溶出までの循環を定量的に明らかにするとともに、サブテーマ2の「物理—底質—低次生態系モデルの開発」に必要な情報を提供する。

\*コアインキュベーション法：

アクリルチューブを海底泥に突き刺して柱状堆積物試料を採取し、それ（チューブ内には現場の海水が入っている）を実験室に持ち帰り、現場の温度下の暗所で静置し、経時的にチューブ内の直上水の栄養塩濃度を測定する。直上水中の栄養塩濃度の上昇割合から、栄養塩の溶出速度を見積もる。

##### 【サブテーマ2】物理—底質—低次生態系モデルの開発

播磨灘の栄養塩に占める河川起源、太平洋起源、底質起源の栄養塩の割合とその時間変化を定量的に示すことができる物理—底質—低次生態系結合モデルを開発する。このモデルの開発のため以下の4つのモデルを構築する。

①海底の底質における有機物の堆積、分解、埋没、そして底質から水中への栄養塩溶出量を計算可能な新たな底質モデルを開発する。サブテーマ1が過去および研究期間中に得た堆積物コア中の有機物分布を再現することを目標とする。モデル開発においては、サブテーマ1の観測、実験から得られる水中の有機物の分解や底質中のプロセスに関する知見を取り入れる。

②太平洋起源の栄養塩の挙動を計算可能な水平解像度1 kmの瀬戸内海全域を対象とした3次元低次生態系モデルを構築する。このモデルの生態系は、溶存態無機窒素、植物プランクトン1種、動物プランクトン1種、デトリタスを変数としたシンプルなものとする。環境省の広域総合水質調査等の観測データを使いモデルの精度検証を行う。

③最終的なモデルのベースとなる播磨灘を対象とした水平解像度500 mの3次元物理モデルを開発する。このモデルの検証は、検潮所の水位データや、兵庫県と香川県の浅海定線観測の水温、塩分データにより行う。

④播磨灘を対象とした低次生態系ボックスモデルを開発する。本モデルではサブテーマ1で得られる

データを境界条件やモデルの検証データとして使う。まずは15変数のモデルにより、栄養塩や植物プランクトンの季節変化を再現し、播磨灘での低次生態系における物質循環を理解する。その後、3次元モデルに結合できるように予報変数を減らしても観測結果を再現できるモデルを開発する。

③の物理モデルに①の底質モデルと④の低次生態系モデルを結合し、②の瀬戸内海を対象とした広域のモデルから水温、塩分、流速、栄養塩などの変数の値を③の側面境界値として与え、播磨灘を対象とした物理-底質-低次生態系モデルを完成させる。このモデルを使い、各起源の栄養塩の割合と、陸域からの栄養塩負荷量の変化に対する播磨灘の生態系の応答を明らかにする。

## 5. 研究成果

### 5-1. 成果の概要

#### 5-1-1 播磨灘の基礎生産量、沈降粒子束、栄養塩溶出量

瀬戸内海の栄養塩濃度は、陸、太平洋、底質から供給される栄養塩により決まる。陸と太平洋からの栄養塩は、系外から供給されるものであるが、底質から溶出する栄養塩は、陸もしくは太平洋から供給された栄養塩が植物プランクトンの基礎生産により有機物となり、それが海底に沈降・堆積し、堆積物中で分解された結果供給されるものである。したがって、表層での植物プランクトンの基礎生産の内、どの程度が海底へと沈降し、その結果どの程度の栄養塩の溶出が起こるのかを定量的に把握する必要がある。そこで、香川大学がこれまで観測定点としてきた播磨灘の Stn. NH (図-0.2) において、月に1回の頻度で基礎生産量、沈降粒子束、底質からの栄養塩溶出量を同時測定した。

図-0.3に2020年4月～2021年12月までの鉛直積算した基礎生産速度を示す。基礎生産速度は夏季に大きく冬季に小さい季節変化を示しており、318–2090 mgC/m<sup>2</sup>/dの範囲にあった。播磨灘では観測点Stn. NHに近い場所において、1993～1994年にも基礎生産速度が観測されており、その時の基礎生産速度は400–1700 mgC/m<sup>2</sup>/dの範囲であった。本研究により測定された基礎生産速度は、30年前のそれとほぼ同じ値を示しており、播磨灘中央部においては、過去30年で基礎生産速度が大きく変化していないことが示された。なお、Stn. NHの溶存態無機窒素 (DIN) の濃度は過去30年で1/2にまで減少している。

表層で生産された有機物の沈降量を把握するため、水深20 mと30 mにセジメント・トラップを24時間係留し沈降粒子を採取した。水深30 mのトラップには海底での巻き上げによる粒子も含まれていると判断し、主に水深20 mのトラップのデータを解析した。図-0.4に2020年4月～2021年12月までと、1992年4月～1993年10月までの沈降粒子のMass fluxを示す。Mass fluxは秋に大きくなる傾向がみら

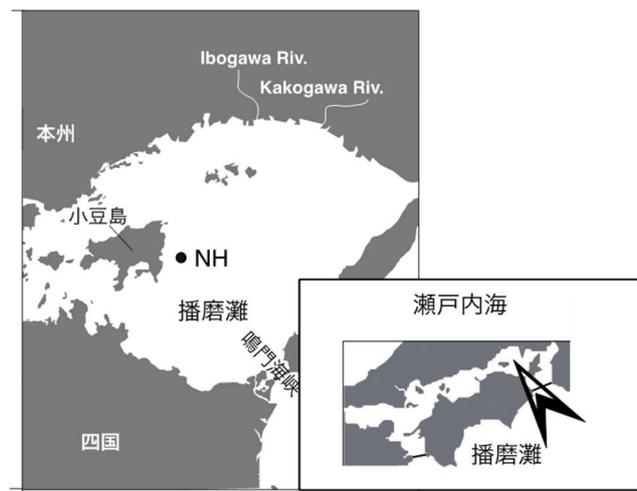


図-0.2 播磨灘と観測定点Stn. NHの位置

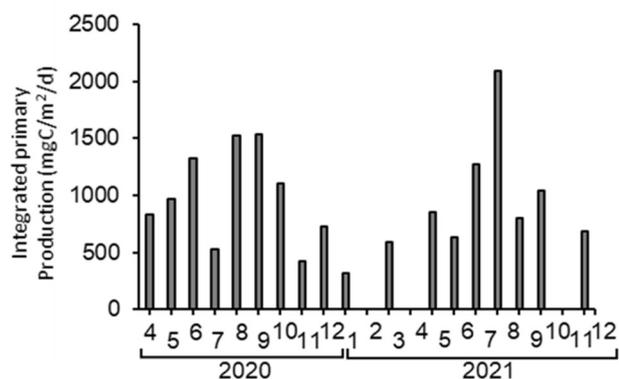


図-0.3 2020年4月～2021年12月までのStn. NHにおける鉛直積算した基礎生産速度

れる。2020-2021年のMass fluxの平均値と標準偏差は $8.2 \pm 9.1 \text{ g/m}^2/\text{d}$ であり、1992-1993年のそれらは $12 \pm 17 \text{ g/m}^2/\text{d}$ であった。平均値は1992-1993年のほうが少し高い値となっているが、変動幅も考慮すると過去30年で沈降粒子のMass fluxは大きく変化していないと言える。

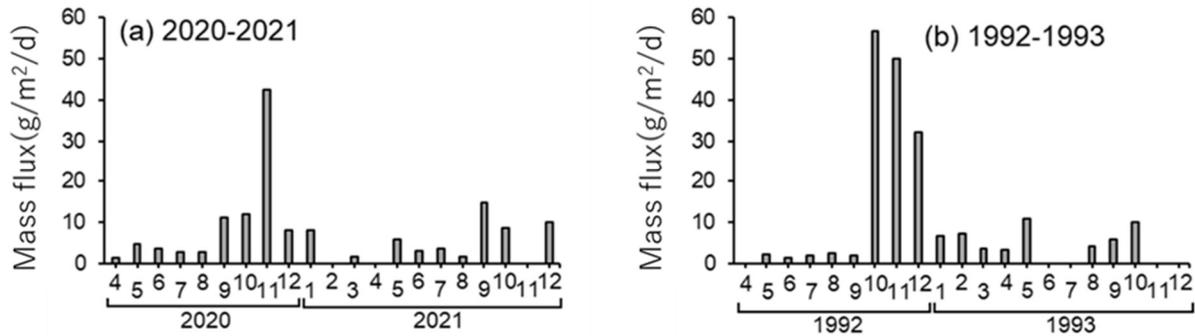


図-0.4 (a) 2020年4月～2021年12月と(b) 1992年4月～1993年10月の沈降粒子のMass flux

海底堆積物からの栄養塩溶出に関しては、堆積物コアを採取しコアインキュベーション法により窒素とリンの溶出速度を測定した。窒素とリンの溶出速度はそれぞれ $3.8\text{--}36.8 \text{ mgN/m}^2/\text{d}$ 、 $0\text{--}9.86 \text{ mgP/m}^2/\text{d}$ であった。栄養塩溶出速度は基礎生産速度や沈降粒子束と対応した変化は見られなかった。また、堆積物コア中のTN（総窒素）の測定と堆積物コアの年代測定を行い、それらから有機物の分解モデルの式を求め、堆積した当時のTNの量を見積もった。この堆積時のTNのデータと底層の水温データから、過去100年程度の期間の堆積物からの栄養塩溶出速度の時間変化を調べた。Stn. NHでの栄養塩溶出速度は $21 \text{ mgN/m}^2/\text{d}$ 程度で推移し、栄養塩溶出速度が長期的にほとんど変化していないことが明らかとなった。

播磨灘中央部における基礎生産、沈降粒子束、栄養塩溶出量の同時観測から図-1.11に示す三者の関係が明らかとなった。つまり、基礎生産により生産される窒素を100とした場合、水深20mまでに6割近くの有機物が分解される。最終的に海底に堆積する有機物量の割合は不明であるが、基礎生産の1割程度に相当する窒素が底質から溶出する。また、過去30年で播磨灘中央部の栄養塩（DIN）の濃度は半分まで低下したが、基礎生産量と沈降粒子束には大きく変化がなく、海底堆積物からの栄養塩溶出量にも大きな変化がなかったことが観測データから示された。

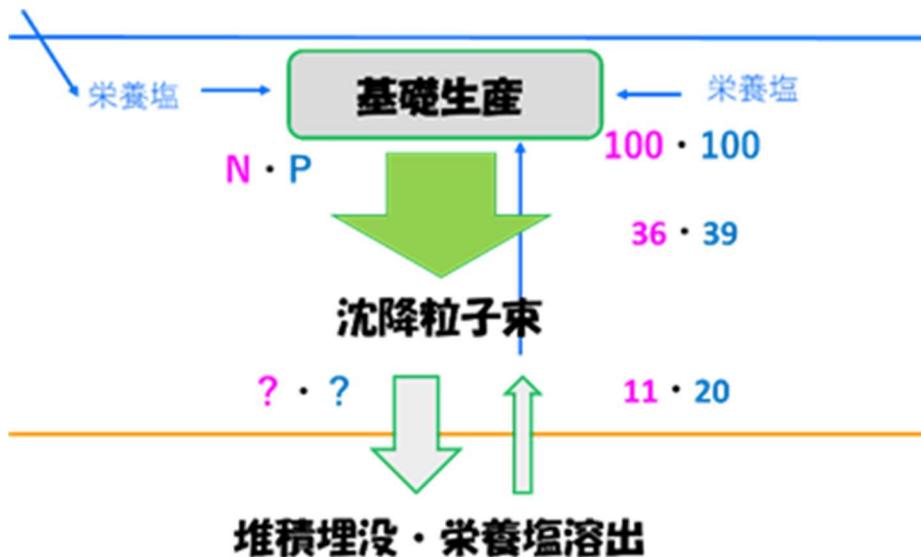


図-1.11 播磨灘のStn. NHにおける基礎生産量、沈降粒子束、および堆積物からの栄養塩溶出量の量的関係。図中の数字は基礎生産を100とした場合の割合で、ピンクが窒素、青がリンの量を表している

5-1-2 3次元物理—底質—低次生態系モデルの開発

播磨灘および瀬戸内海全域における低次生態系をめぐる物質循環と、各湾灘の栄養塩に占める河川起源、太平洋起源、底質起源の栄養塩の割合を調べるため、2種類の3次元物理—底質—低次生態系モデルを開発した(図-0.5)。1つは瀬戸内海全域を対象とした水平解像度1 kmのモデルで、栄養塩、植物プランクトン1種類、動物プランクトン1種類、デトリタスを予報変数とする比較的単純な生態系モデルを3次元物理モデルに組み込んだものである。もう1つのモデルは、播磨灘を対象としたモデルであり、水平解像度500 m、栄養塩3種類、植物プランクトン3種類、動物プランクトン2種類、懸濁態および溶存態の有機窒素とリンを考慮した複雑な生態系モデルを3次元物理モデルに組み込んだものである。底質からの栄養塩溶出の計算については、底質モデルを3次元モデルに組み込むことによる計算量の増加を抑えるため、観測により得られている堆積物表層の総窒素(TN)の分布をモデルの各グリッドに与え、物理モデルにより計算される最下層の水温から各タイムステップでの栄養塩溶出量を、サブテーマ1が構築した関係式により計算した。

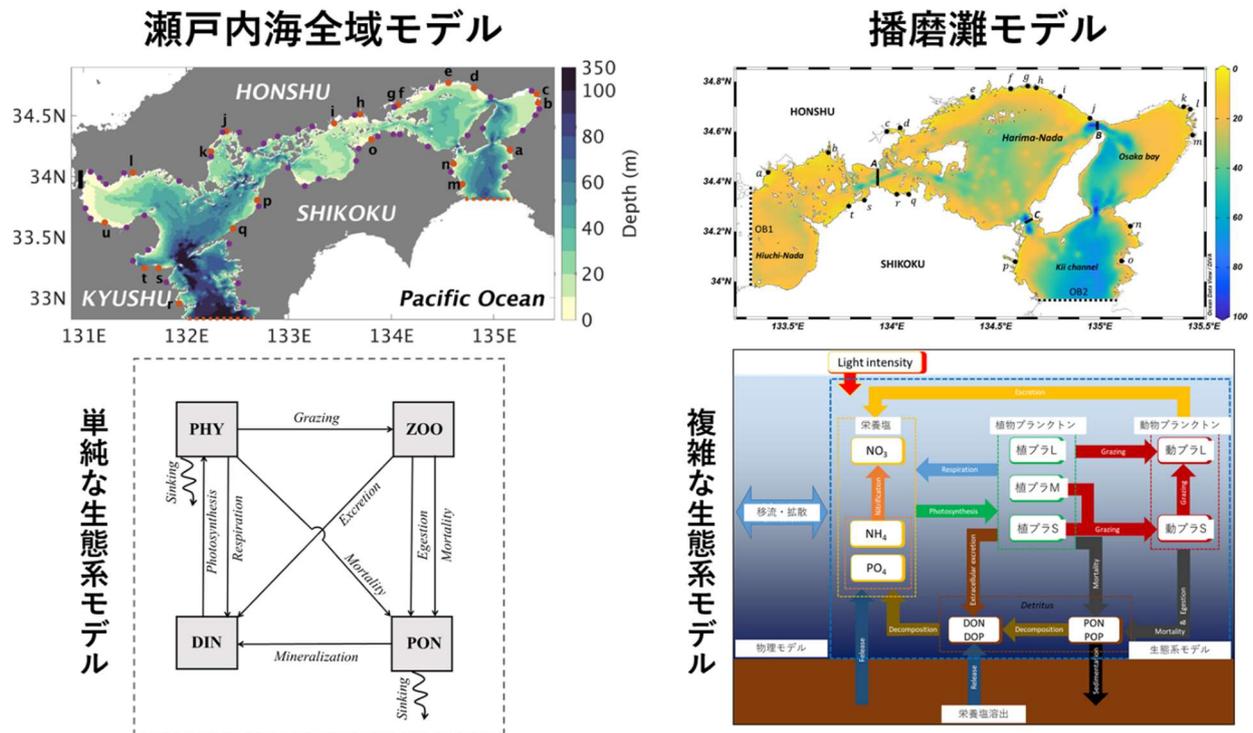


図-0.5 瀬戸内海全域と播磨灘を対象とした物理—底質—低次生態系モデル

どちらのモデルも栄養塩と植物プランクトン量の季節変化と空間分布をよく再現しており、瀬戸内海全域モデルの溶存態無機窒素(DIN)の計算値と観測値の相関係数は0.71、クロロフィル濃度(植物プランクトン量の指標)の計算値と観測値の相関係数は0.63、播磨灘モデルのDINの計算値と観測値の相関係数は0.59、クロロフィル濃度の計算値と観測値の相関係数は0.77であった。播磨灘モデルは、クロロフィル濃度の時空間変化だけでなく、大型、中型、小型植物プランクトンの割合(サイズ組成)も再現した(図-2.14)。

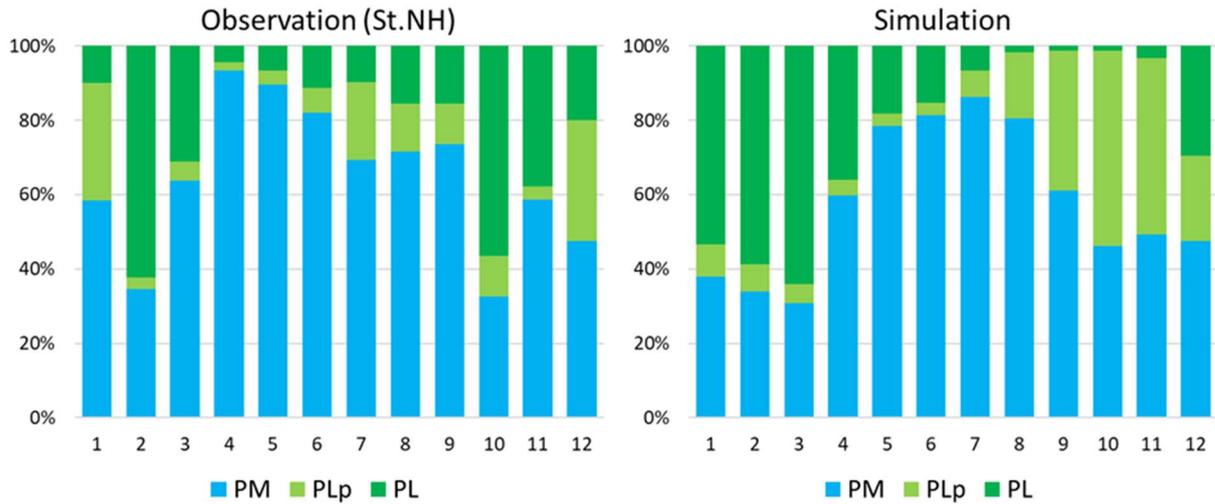


図-2.14 播磨灘中央部における小型 (PM)、中型 (PLp)、大型 (PL) の植物プランクトンのサイズ組成の観測値とモデル計算値の季節変化。

5-1-3 瀬戸内海の栄養塩の起源と窒素循環

3次元物理—底質—低次生態系モデルを使い、瀬戸内海の栄養塩 (DIN) に対する太平洋起源、河川起源、底質起源の栄養塩の割合と、窒素循環を理解するため、栄養塩追跡計算を実施した。この計算では各起源の栄養塩毎に変数を与え、それらの栄養塩を使う植物プランクトン、動物プランクトン、デトリタスにもそれぞれの変数を与えることで起源毎の栄養塩の挙動を追跡した。瀬戸内海全体のDINに対する太平洋起源、河川起源、底質起源のDINの割合はそれぞれ、73%、10%、17%であることが明らかとなった (図-0.6)。

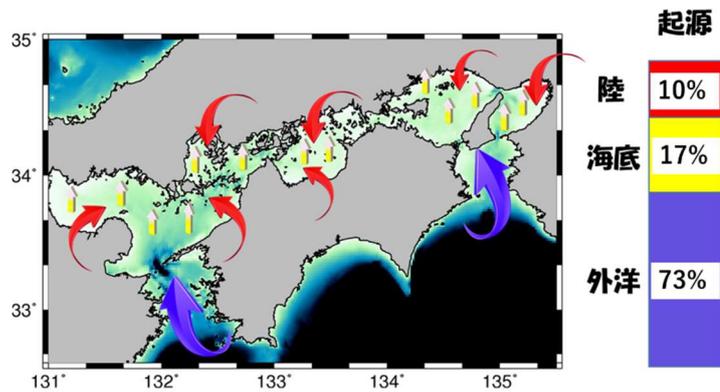


図-0.6 瀬戸内海の溶存態無機窒素 (DIN) に対する外洋起源、河川起源、海底起源のDINの割合

図-2.15に各湾灘における太平洋、河川、底質起源のDINの割合を示す。太平洋に近い紀伊水道、豊後水道、伊予灘では太平洋起源のDINが占める割合が高く、河川起源のDINの割合が極めて低いことが分かる。一方、瀬戸内海内部の湾灘では、底質起源のDINの割合が高く太平洋起源のDINの割合は低くなっている。しかし、瀬戸内海中央部に位置する燧灘でも太平洋起源のDINの割合は50%程度あり、太平洋からの栄養塩供給の影響をかなり受けていることが示唆される。河川起源のDINの割合は、どの湾灘においても他の2つの起源のDINの割合より小さい。このことは瀬戸内海の栄養塩管理において、人為的に

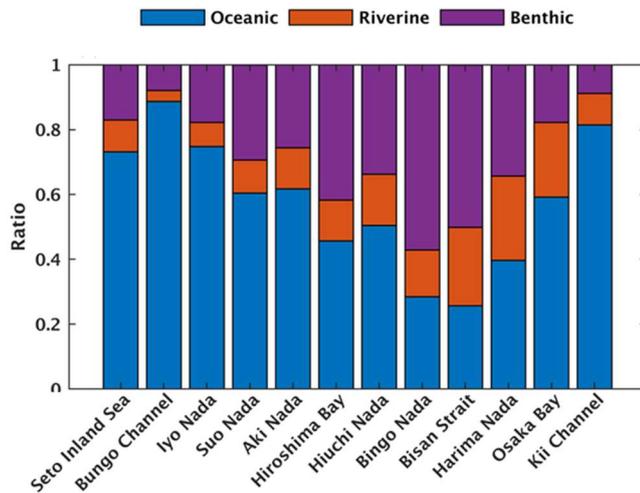


図-2.15 瀬戸内海の各湾灘の栄養塩に占める、太平洋起源、河川起源、底質起源栄養塩の割合

コントロール可能な栄養塩濃度のレンジがあまり大きくないことを示している。

図-0.7に物理—底質—低次生態系モデルにより計算された瀬戸内海の窒素循環を示す。DINと粒状態有機窒素(PON)の合計である総窒素(TN)フラックスは、定常状態においてはバランスしている。つまり、陸から64 mol/s流入し、その内50 mol/sのTNが海底に堆積・埋没し、14 mol/sのTNが外洋へ流出している。DINは陸、海底、外洋からそれぞれ流入しており、最も大きいフラックスは太平洋からの174 mol/sである。DINの瀬戸内海への流入に対し、粒状態の窒素は海底と太平洋にぬけている。窒素の総量削減が行われて以降、陸からのTNの流入は減少していることから、海底と太平洋に抜けるTNフラックスは減少しているはずである。しかし、サブテーマ1の観測結果は、播磨灘では沈降粒子束および海底からの栄養塩溶出量が長期的に変化していないことを示しており、播磨灘においては海底へのTNフラックスの変化はなく、播磨灘外へのTNフラックスのみが変化していると考えられる。

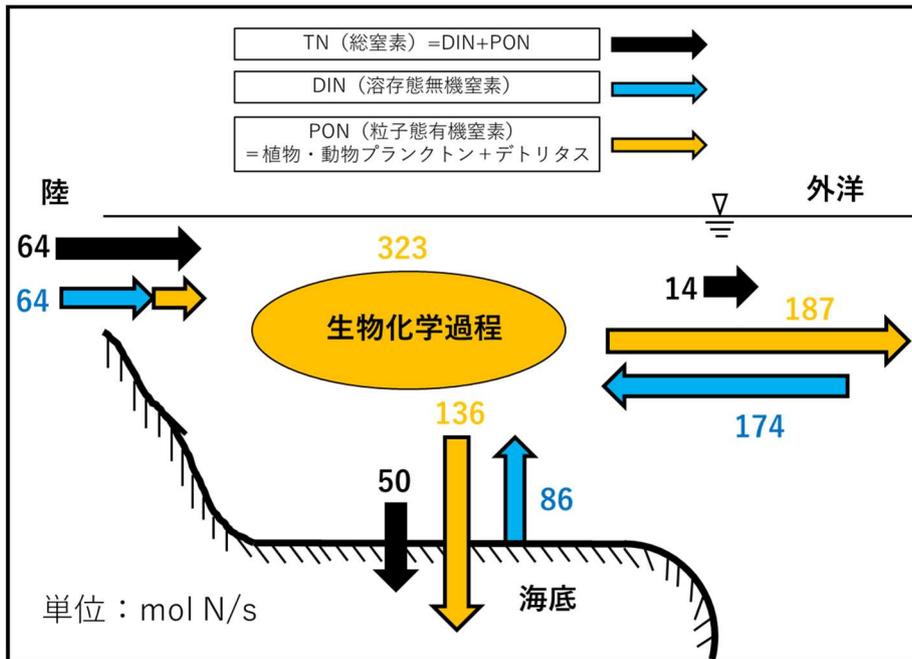


図-0.7 瀬戸内海の窒素循環。黒矢印は総窒素(TN)、青矢印は溶存態無機窒素(DIN)、オレンジ印は粒状態有機窒素(PON)のフラックスを示しており、単位はmol/s

#### 5-1-4 太平洋と河川からの栄養塩負荷量の変化に対する低次生態系の応答解析

太平洋、河川、底質からの栄養塩負荷量の変化により、瀬戸内海の栄養塩濃度と植物プランクトン量がどのように応答するかを調べるため、瀬戸内海全域モデルを使い感度解析実験を行った。各起源の栄養塩負荷量の変動幅は、観測データの標準偏差を基に設定した。太平洋起源の栄養塩負荷量は気候値に対し変動幅を±34%、河川起源の栄養塩負荷量の変動は最大64%、最小-33%とした。それぞれのケースに対する計算結果を表-0.1に示す。太平洋起源のDINを34%増加させたケースでは、瀬戸内海のDIN濃度と植物プランクトン量はそれぞれ26%、12%増加し、太平洋起源のDINを34%減少させたケースでは、それぞれ-24%、-15%の変化がみられた。河川起源のDINを64%増加させたケースでは、瀬戸内海全体のDIN濃度は6.1%増え、植物プランクトン量は5.6%の増加であった。一方、河川起源のDINを33%減少させたケースでは、DINが2.4%、植物プランクトン量が4.5%減少した。瀬戸内海においては太平洋起源のDINの割合が大きいため、太平洋起源のDINの供給量の変化により瀬戸内海の栄養塩濃度と植物プランクトン量が大きく変化することが分かる。本計算で与えた変動幅は現実のデータを参考に行っていることから、瀬戸内海の栄養塩濃度は太平洋からの栄養塩負荷の変動により大きく変化していると考えられる。豊後水道底層の長期的な水温変化をみると、1980年代前半から1990年代前半の底層水温は他の期間よりも低く、底層水温と底層DINの間に負の相関があることから、この期間は太平洋からの栄養塩供給が増加し、瀬戸内海の栄養塩濃度が高くなっていったと考えられる。実際、播磨灘東部のDIN濃度の時系列をみると、1984年から1993年にかけて濃度が増加して

おり、この時期のDINの濃度上昇が太平洋からの栄養塩供給量の増加により起こったと思われる。

表-0.1 各計算ケースにおける太平洋起源、河川起源、底質起源の栄養塩濃度と植物プランクトン量の変化。図中の数字の単位は、DINは( $\mu\text{M}$ )、植物プランクトンは( $\mu\text{g/l}$ )

計算ケース		太平洋起源	河川起源	底質起源	合計
コントロール	DIN	2.13 (73%)	0.29 (10%)	0.51 (17%)	2.93
	植物プランクトン	0.53 (60%)	0.14 (16%)	0.22 (24%)	0.89
太平洋起源DIN 34%増加	DIN	2.87 (78%)	0.29 (8%)	0.52 (14%)	3.68 (+26%)
	植物プランクトン	0.66 (66%)	0.13 (13%)	0.21 (21%)	1.00 (+12%)
太平洋起源DIN 34%減少	DIN	1.41 (64%)	0.29 (13%)	0.52 (23%)	2.22 (-24%)
	植物プランクトン	0.38 (50%)	0.15 (20%)	0.23 (30%)	0.76 (-15%)
河川起源DIN 64%増加	DIN	2.13 (69%)	0.45 (15%)	0.53 (16%)	3.11 (+6.1%)
	植物プランクトン	0.52 (55%)	0.21 (23%)	0.21 (22%)	0.94 (+5.6%)
河川起源DIN 33%減少	DIN	2.13 (75%)	0.21 (7%)	0.52 (18%)	2.86 (-2.4%)
	植物プランクトン	0.53 (62%)	0.10 (12%)	0.22 (26%)	0.85 (-4.5%)

### 5-1-5 播磨灘における河川からの栄養塩負荷量の変化に対する低次生態系の応答

播磨灘周辺に流入する河川からの栄養塩負荷量の変化に対する、播磨灘の低次生態系の応答を調べるため、播磨灘モデルを使い感度実験を行った。感度実験の前に各河川の影響を評価するため、播磨灘の溶存態無機窒素に対する各河川の寄与率を計算した。その結果、最も寄与率が高かったのは淀川の30%であり、大和川と武庫川が11%、旭川が8%、明石川が6%、加古川、揖保川、吉井川がそれぞれ5%であった。この計算結果から、播磨灘の栄養塩環境に淀川を含め大阪湾からの栄養塩負荷が大きく関わっていることが示唆される。感度実験では、河川からの栄養塩負荷量の変化を気候値に対して10、20、30、70%増加させた。図-2.18は各計算ケースにおける鉛直平均したDIN濃度の年平均値を示している。気候値をみると、水深の深い播磨灘中央部でDIN濃度は高く $3\mu\text{M}$ 以上となっている。大阪湾は淀川の河口がある湾奥部でDIN濃度が高濃度となっている。モデル領域中のすべての河川からの栄養塩負荷量を10%、20%増加させたケースでは、気候値より少しDIN濃度が上昇しているが、全体的には大きな変化はみられない。特に播磨灘北部の沿岸域のDIN濃度はほとんど変化していない。河川からの栄養塩負荷を30%増加させると、播磨灘中央部のDIN濃度は $4\mu\text{M}$ 以上となり広域でDIN濃度が上昇していることがわかる。さらに栄養塩負荷量を70%まで増加させると、播磨灘の広域でDIN濃度は $4\mu\text{M}$ 以上となり、播磨灘北部の沿岸域のDIN濃度も上昇している。また、大阪湾奥のDIN濃度は $10\mu\text{M}$ 以上の高濃度となった。

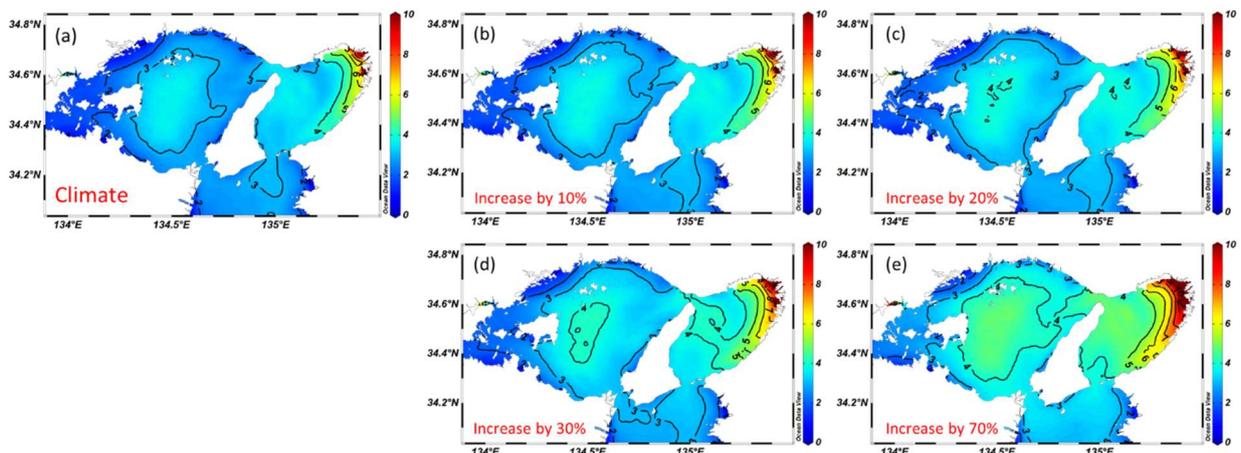


図-2.18 鉛直平均した年平均DINの分布図。(a) 気候値、河川負荷量を気候値より(b)10%増加、(c)20%増加、(d)30%増加、(e)70%増加させたケース

図-2.19は各計算ケースでの植物プランクトン量の季節変化を示したものである。小型、中型、大型植物プランクトン量を合計した全植物プランクトン量の最大値を比べると、河川からの栄養塩負荷量を70%増加させたケースでは、気候値に比べ少し高い値を示しているが大きな差は見られない。つまり、栄養塩濃度が気候値に比べ $1\mu\text{M}$ 以上上昇しているにもかかわらず、植物プランクトン量はほとんど応答していない。この結果は、サブテーマ1の観測結果が示した、過去30年で播磨灘の栄養塩濃度が1/2になったにもかかわらず基礎生産速度がほとんど変化していないという事実と整合的である。サイズ毎の植物プランクトン濃度の季節変化を比べると、河川からの栄養塩負荷を10%, 20%, 30%増加させたケースと気候値の結果はほぼ同じである。一方、河川からの栄養塩負荷を70%まで増加させたケースでは、春に中型の植物プランクトン量が気候値に比べ増加し、小型の植物プランクトン量が気候値に比べ減少している。また、秋においては大型の植物プランクトン量が気候値よりも増加している。全植物プランクトン量には大きな変化が見られないが、河川からの栄養塩負荷の増加により播磨灘の栄養塩濃度が増加すると、植物プランクトンのサイズ組成が変わっていくことが示唆される。この結果は、総量規制により播磨灘の栄養塩濃度の低下が起こる中で、植物プランクトンのサイズ組成の変化、つまり優先する植物プランクトンの変化が起こり、さらに動物プランクトンのサイズ組成変化も引き起こした可能性を示唆している。

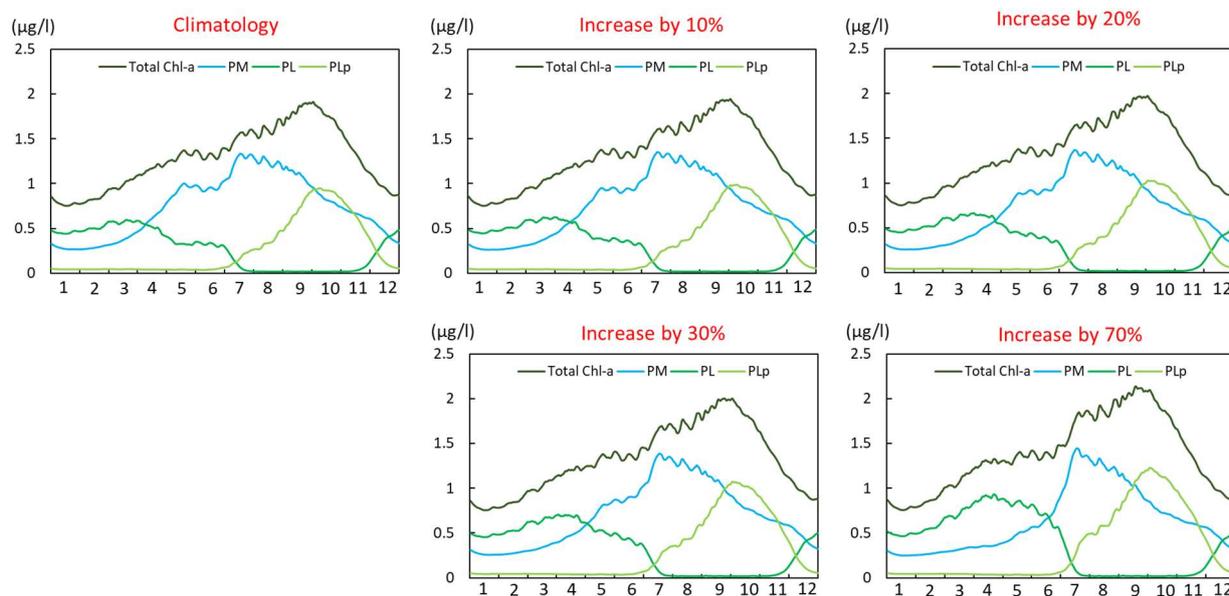


図-2.19 河川からの栄養塩負荷量を気候値、10%、20%、30%、70%増加させた場合の、全植物プランクトン、小型(PM)、中型(PL)、大型(PLp)植物プランクトン濃度の季節変化

## 5-2. 環境政策等への貢献

### <行政等が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

### <行政等が活用することが見込まれる成果>

瀬戸内海の海域環境保全に係る制度の見直しの方向性として、順応的管理プロセスによる栄養塩類の管理が提案されている。順応的管理とは、施策の実施結果に基づいてその施策を変更できる、より柔軟な意思決定方法である。栄養塩管理においては、例えばノリの色落ちへの対策として、栄養塩濃度を増加させるために下水処理場からの排出量を増加させるという対策を実施する場合、実施後の栄養塩濃度のモニタリングを行いそのデータを解析、期待した効果が見られない場合は対策を変更するものである。このような栄養塩管理において、本課題で開発した物理-底質-低次生態

系モデルは、栄養塩負荷量を増加させたときに対象海域の栄養塩濃度がどの程度増加するのか、また、周辺海域への影響がどの程度あるのかを施策実施前に評価することを可能にする。さらに、施策実施後のモニタリングデータなどを取り入れて本モデルを実行することで、どのような改善策があるのかを提案することが可能となる。このように、瀬戸内海の順応的管理プロセスによる栄養塩管理において、本課題で開発した数値モデルが有効に活用されることが見込まれる。

本研究結果が示した各湾灘の栄養塩に占める太平洋起源、河川起源、底質起源の栄養塩の寄与率は、人為的に栄養塩濃度をどの程度コントロールできるかを示すものであり、栄養塩管理計画において重要な情報を提供するものである。また、播磨灘モデルが示した播磨灘の栄養塩に占める各河川起源の栄養塩の割合は、播磨灘の栄養塩管理においてどの河川の栄養塩負荷をコントロールすべきかの情報を与えるものであり、効率的な栄養塩負荷量のコントロールを可能にするものである。

サブテーマ1で提案した『底質からのNH<sub>4</sub>溶出量推定式』は、泥温と表層堆積物中の全窒素含量からNH<sub>4</sub>溶出量を簡易に推定する事ができ、行政等で活用することが見込まれる。更に、本研究で窒素やリンの循環において、①基礎生産量、②沈降粒子束、③埋没量、④底泥からの溶出量の一連の循環の量的な関係をほぼ明らかにしており、①から④のいずれかの数値があれば、生産から分解・溶出に至る一連の物質循環量を推定できる。このことも、行政等で活用することが見込まれる。

### 5-3. 研究目標の達成状況

全体目標	目標の達成状況
<p>長期的なデータが充実している播磨灘を対象とし、陸起源、底質起源、太平洋起源の各栄養塩が播磨灘の栄養塩に占める割合と、その時間変化を定量的に示すことができる物理-底質-低次生態系結合モデルを構築する。数値モデルと現場観測・実験により、外洋と底質から供給される栄養塩量の時間変化を定量的に明らかにする。さらに、人為的にコントロールが可能な陸域からの栄養塩供給量を変化させた数値実験を行い、播磨灘の栄養塩濃度の空間分布や応答を調べ、播磨灘の栄養塩管理法について提言を行う。</p>	<p><u>目標を上回る成果をあげた。</u>  播磨灘だけでなく、瀬戸内海全域の各湾灘の栄養塩に対する、河川起源、底質起源、太平洋起源の栄養塩の占める割合を計算可能な2種類の物理-底質-低次生態系モデルを開発し、3つの起源の栄養塩の割合を定量的に示した。さらに、播磨灘に関しては、播磨灘周辺の各河川を起源とする栄養塩が、播磨灘の栄養塩に占める割合を明らかにした。これら2つのモデルを使い、播磨灘および瀬戸内海全域を対象に、河川と太平洋を起源とする栄養塩の供給量の変化に対する、海域の栄養塩濃度や植物プランクトン濃度の変化を明らかにした。  播磨灘の栄養塩濃度は淀川の影響を強く受けていること、播磨灘においては植物プランクトン量が栄養塩濃度変化にほとんど反応しないことなど、播磨灘の栄養塩管理において重要な情報を提供した。  以上のことから、本研究は目標を上回る成果を上げたと判断した。</p>
サブテーマ1目標	目標の達成状況
<p>香川大学の研究対象海域で、これまでに蓄積してきた底泥の有機物含量や底泥からの栄養塩溶出に</p>	<p><u>目標どおりの成果をあげた。</u>  これまでに香川大学が播磨灘で蓄積してきた底泥</p>

<p>関する知見を精査し、テーマ2の開発モデルに使用できるデータ群として再構築する。また、現場観測として、過去に沿岸海域では例のない基礎生産量、沈降粒子束、および底泥からの栄養塩溶出速度をすべて同時に実測する。これらより、水柱における粒状有機物の生産、沈降、分解、海底への堆積、またその後の底泥からの栄養塩溶出に関する一連の過程を定量的に明らかにする。さらに、海底堆積物中に埋没した有機態窒素、リン含量の鉛直分布を明らかにし、過去得られた鉛直分布と比較することにより、堆積物中で長期間にわたって進行する有機物の分解過程について検討し、これらが栄養塩溶出量にどの程度寄与するか明らかにする。以上により得られた結果から底泥から溶出する栄養塩量の変動機構について明らかにし、それらの知見をサブテーマ2が開発する底質モデルに提供する。</p>	<p>の有機物含量や底泥からの栄養塩溶出に関する知見・データを精査し、サブテーマ2の開発モデルに使用できるデータを提供した。また、その知見・データを論文・総説として公表した。</p> <p>現場観測として、過去に沿岸海域では例のない基礎生産量、沈降粒子束、および底泥からの栄養塩溶出速度をすべて同時にほぼ毎月実測した。その結果、水柱における粒状有機物の炭素、窒素、リンの生産量と沈降量、さらには海底への堆積とその後の底泥からの栄養塩溶出に関する一連の窒素・リン量を定量的に明らかにできた。</p> <p>さらに、海底堆積物中に埋没した有機態窒素、リン含量の鉛直分布を明らかにし、過去得られた鉛直分布と比較することにより、堆積物中で長期間にわたって進行する有機物の分解過程について検討し、これらが栄養塩溶出量にどの程度寄与するか検討した。その結果の一部は、論文、学会発表として公表した。また、これらの一連の知見とデータを、サブテーマ2が開発する底質モデルに提供した。</p> <p>以上のことから、目標とおりの成果をあげたと判断した。</p>
---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

サブテーマ2目標	目標の達成状況
<p>播磨灘の栄養塩に占める陸起源、太平洋起源、底質起源の栄養塩の割合とその時間変化を定量的に示すことのできる物理—底質—低次生態系モデルを開発する。このモデルを開発するために以下の4種類のモデルを開発する。①海底での有機物の堆積、分解、栄養塩溶出過程を計算可能な新たな底質モデル、②太平洋起源の栄養塩の瀬戸内海全域における挙動を計算可能な水平解像度1kmの高解像度瀬戸内海・黒潮低次生態系モデル、③播磨灘を対象とした水平解像度500mの3次元物理モデル、④播磨灘を対象とした低次生態系ボックスモデル。①の底質モデルについては、サブテーマ1による堆積物中の有機物の鉛直分布や底質からの栄養塩溶出量に関する観測・実験データを用いて検証する。③の播磨灘を対象とした3次元物理モデルに①の底質モデルと④の低次生態系ボックスモデルを結合し、②のモデルの出力を境界条件とした物理—底質—低次生態系を構築し、陸からの</p>	<p>目標を上回る成果をあげた。</p> <p>目標とした播磨灘を対象とした物理—底質—低次生態系モデルを開発した。さらに、当初予定していなかった瀬戸内海全域を対象にした物理—底質—低次生態系モデルも開発した。これら2種類のモデルの開発において、研究目標として①～④と定義したモデルをすべて開発した。①～④のモデル、および物理—底質—低次生態系モデルは観測値をよく再現できており、高精度なモデルの開発に成功した。</p> <p>栄養塩負荷量を変化させた場合の低次生態系の応答を調べる感度解析では、河川からの栄養塩負荷の変化だけでなく、太平洋からの栄養塩負荷の変化に対する応答も調べた。また、目標では感度解析は播磨灘だけを対象としていたが、瀬戸内海全域に対する感度解析も実施し、河川および太平洋からの栄養塩供給量の変化に対する瀬戸内海の低次生態系の応答を定量的に示すことに成功した。</p>

栄養塩供給量を変化させた場合の播磨灘の栄養塩濃度の応答と空間分布を定量的に示す。	以上のことから、目標を上回る成果をあげたと判断した。
------------------------------------------	----------------------------

## 6. 研究成果の発表状況

### 6-1. 査読付き論文

#### <件数>

4件

#### <主な査読付き論文>

- 1) 森本昭彦、柴川大雅、滝川哲太郎、平井真紀子、三門哲也、美山透(2021)：沿岸海洋研究 (59巻, 1号), 11-20 (2021), 豊後水道の沿岸定線観測点における潮流調和定数の推定と残差流の季節変化
- 2) J. ZHU, J. SHI and X. GUO: Ocean Science, 18, 659-673 (2022), Interannual variation of a bottom cold water mass in the Seto Inland Sea, Japan (IF:4.3)
- 3) M. NAKAKUNI, N. LOASSACHAN, K. ICHIMI, S. NAGAO and K. TADA: Regional Studies in Marine Science, 50, 102093 (2022), Biophilic elements in core sediments as records of coastal eutrophication in the Seto Inland Sea, Japan (IF:2.1)
- 4) K. TADA, M. NAKAKUNI, H. YAMAGUCHI and K. ICHIMI: La mer (2023), Changes in nutrients and their effects on fisheries after the introduction of land-based nutrient loading regulation in the Seto Inland Sea since 1973: A review. (in press)

### 6-2. 知的財産権

特に記載すべき事項はない。

### 6-3. その他発表件数

査読付き論文に準ずる成果発表	0件
その他誌上発表 (査読なし)	4件
口頭発表 (学会等)	19件
「国民との科学・技術対話」の実施	9件
マスコミ等への公表・報道等	2件
本研究費の研究成果による受賞	1件
その他の成果発表	0件

## 7. 国際共同研究等の状況

サブテーマ2で開発を行った2つの数値モデルの構築のため、中国の中国海洋大学とタイ王国のプラパ大学からそれぞれ1名の計2名を博士後期課程の学生として受け入れた。

## 8. 研究者略歴

## 研究代表者

森本 昭彦

愛媛大学大学院理工学研究科博士前期課程修了、博士（理学）、現在、愛媛大学沿岸環境科学研究センター教授

## 研究分担者

1) 多田 邦尚

北海道大学大学院水産学研究科博士後期課程単位取得退学、水産学博士、現在、香川大学農学部教授、瀬戸内圏研究センター長

2) 一見 和彦

愛媛大学大学院連合農学研究科博士課程修了、博士（農学）、現在、香川大学瀬戸内圏研究センター教授

3) 山口 一岩

北海道大学大学院水産科学研究科博士後期課程修了、博士（水産科学）、現在、香川大学農学部教授

4) 中國 正寿

創価大学大学院理工学研究科博士課程修了、博士（工学）、現在、香川大学博士研究員

5) 郭 新宇

愛媛大学大学院理工学研究科博士後期課程修了、博士（工学）、現在、愛媛大学沿岸環境科学研究センター教授

6) 吉江 直樹

北海道大学大学院地球環境科学研究科博士課程修了、博士（地球環境学）、現在、愛媛大学沿岸環境科学研究センター特任講師

## II. 成果の詳細

### II-1 底質からの栄養塩溶出量の変動機構の解明

香川大学

農学部	多田 邦尚
瀬戸内圏研究センター	一見 和彦
農学部	山口 一岩
農学部	中國 正寿

#### [要旨]

サブテーマ1では、基礎生産、沈降粒子束、および底泥からの栄養塩溶出を同時に測定することにより、沈降、分解、海底への堆積、またその後の底泥からの栄養塩溶出に関する一連の過程を定量的に明らかにすることを試みた。はじめに、基礎生産は、播磨灘の観測地点Stn. NH（水深35 m）において、2020年4月より月に1回の頻度で、測定を実施した。その結果、各月の基礎生産量は、318–2090 mgC/m<sup>2</sup>/dの範囲にあった。この基礎生産量を1990年代に測定された播磨灘の基礎生産量（400–1700 mgC/m<sup>2</sup>/d）と比較したところ、大きな差がないことが確認された。また、沈降粒子速は、観測期間中の水深20 mで、粒状態有機炭素（POC）、粒状態有機窒素（PON）、粒状態リン（PP）の各粒子束が、それぞれ、527 ± 394 mgC/m<sup>2</sup>/d、70 ± 50 mgN/m<sup>2</sup>/d、12 ± 12 mgP/m<sup>2</sup>/dとなった。夏季の成層期において、基礎生産に対する沈降粒子中のPONを比較すると、水深20 mまででおおよそ6割が分解されていることが示された。過去のデータの整理から、同観測地点における1992–1993年の沈降粒子量と同等の量を有しており、例えば、PONでは、1992–1993年で、69 ± 48 mgN/m<sup>2</sup>/dを示し、今回の観測値と大きな差が認められなかった。このことは、POCやPPでも同様であった。最後に、コアインキュベーション法によって測定された栄養塩溶出速度は、窒素で、3.8–36.8 mgN/m<sup>2</sup>/dであった。この量は、基礎生産と比して、約1–2割程度に匹敵する量が底泥から溶出していると見積もられた。また、3地点で採取された海底堆積物の鉛直分布と生元素の分解モデルを用いて、栄養塩溶出速度の過去から現在にかけての変動の復元を試みた。その結果、観測地点（Stn. NH）と播磨灘の中央（Stn. 15）では、推定方法の解釈には注意が必要であるが、過去100年間、大きな変化がないことが示唆された。このことは、1990年代の基礎生産と沈降粒子量と比較して、現在の観測結果に大きな差がなかったことと整合性が取れる。一方で、姫路沖（Stn. 9）では、富栄養化した時代に1.5倍程度の溶出量の増加が確認された。底質中の有機物は、そのほとんどが植物プランクトン由来であるため、この時代の基礎生産量も同様に高かったと推測できる。したがって、播磨灘の富栄養化は、海域ごとで、その応答が大きく異なっていた可能性が高いと考えられる。

#### 1. 研究開発目的

サブテーマ1では、香川大学でこれまでに蓄積してきた過去30年にわたる底泥の有機物含量や底泥からの栄養塩溶出に関する知見を精査し、サブテーマ2の開発モデルに使用できるデータ群として再構築することが第1の目的である。

そして第2の目的は、現場において基礎生産量、沈降粒子束、および底泥からの栄養塩溶出速度をすべて同時に実測することである。これらの観測結果より、水柱における粒状有機物の生産から、沈降、分解、海底への堆積、またその後の底泥からの栄養塩溶出に関する一連の過程を定量的に明らかにすることである。

さらに、第3の目的は、海底堆積物中に記録されている有機態窒素、リン含量の鉛直分布を明らかにし、堆積物中での有機物の分解から栄養塩溶出を推定することである。

以上により得られた知見をサブテーマ2が開発する底質モデルに提供する。

## 2. 研究目標

香川大学の研究対象海域で、これまでに蓄積してきた底泥の有機物含量や底泥からの栄養塩溶出に関する知見を精査し、サブテーマ2の開発モデルに使用できるデータ群として再構築する。また、現場観測として、過去に沿岸海域では例のない基礎生産量、沈降粒子束、および底泥からの栄養塩溶出速度をすべて同時に実測する。これらより、水柱における粒状有機物の生産、沈降、分解、海底への堆積、またその後の底泥からの栄養塩溶出に関する一連の過程を定量的に明らかにする。さらに、海底堆積物中に埋没した有機態窒素、リン含量の鉛直分布を明らかにし、過去得られた鉛直分布と比較することにより、堆積物中で長期間にわたって進行する有機物の分解過程について検討し、これらが栄養塩溶出量にどの程度寄与するか明らかにする。以上により得られた結果から、底泥から溶出する栄養塩量の変動機構について明らかにし、それらの知見をサブテーマ2が開発する底質モデルに提供する。

## 3. 研究開発内容

### 【サブテーマ1】底質からの栄養塩溶出量の変動機構の解明

底質からの栄養塩（窒素・リン・ケイ素の無機栄養分）溶出メカニズムを明らかにするために、これまで香川大学が定点観測を実施してきた播磨灘の定点（Stn.NH）において、ほぼ毎月、①<sup>13</sup>C（炭素安定同位体）法による基礎生産量の測定、②セジメント・トラップ（沈降粒子捕集装置）を用いた沈降粒子束の測定、③堆積物コアインキュベーション法\*による栄養塩溶出速度の測定を同時に行い、①-③の三者の量的関係について明らかにする。

また、香川大学が過去に堆積物中の有機態炭素・全窒素・全リン含有量等の鉛直分布を報告した播磨灘の観測点（4点）において、新たに柱状堆積物試料を採取し、得られた試料について、有機態炭素・全窒素・全リン含有量等の鉛直分布を明らかにする。

さらに、香川大学が播磨灘においてこれまでに蓄積してきた底泥の有機物含量や底質からの栄養塩溶出に関するデータ等を洗い出して整理し取りまとめる。

以上の観測結果および過去の蓄積データの整理から、水柱内の生元素をめぐる基礎生産、沈降、分解、埋没、底質からの栄養塩溶出までの循環を定量的に明らかにするとともに、サブテーマ2の「物理—底質—低次生態系モデルの開発」に必要な情報を提供する。

\*コアインキュベーション法：

アクリルチューブを海底泥に突き刺して柱状堆積物試料を採取し、それ（チューブ内には現場の海水が入っている）を実験室に持ち帰り、現場の温度下の暗所で静置し、経時的にチューブ内の堆積物直上水の栄養塩濃度を測定する。直上水中の栄養塩濃度の上昇割合から、栄養塩の溶出速度を見積もる。

## 4. 結果及び考察

### 〔現場観測〕

#### <sup>13</sup>C法による基礎生産量の測定

播磨灘の観測地点Stn.NH（水深35 m）において、2020年4月より月に1回の頻度で、CTD・透明度計測と、鉛直採水（0, 5, 10, 20, 30 m）を実施した。また、各層から採取した試料水をボトルに分取後<sup>13</sup>Cを添加し、約24時間現場で培養することにより基礎生産量を測定した。現時点において2021年12月までの2年間の結果を得た。

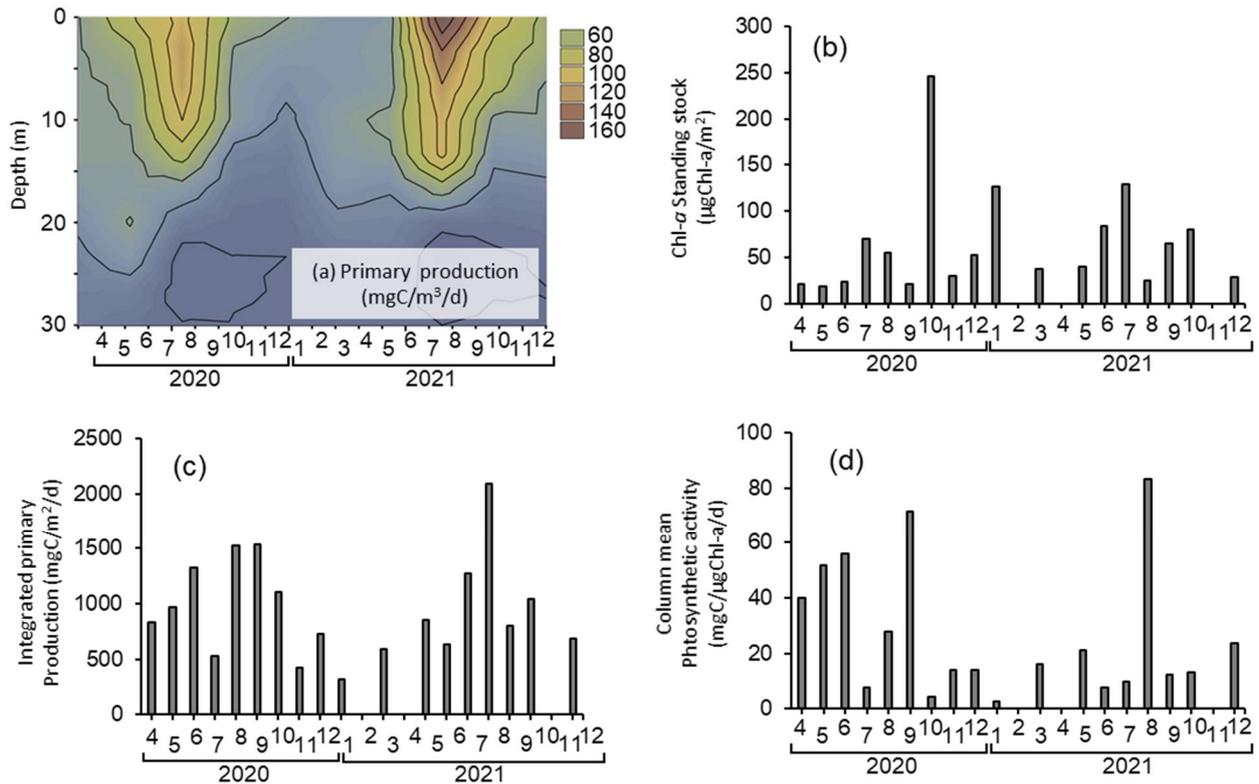


図-1.1 観測期間（2020年4月-2021年12月）における（a）基礎生産速度の鉛直分布、（b）水柱積算Chl-a現存量、（c）水柱積算基礎生産量、（d）水柱平均光合成活性の経時変動

2020年4月から2021年12月における透明度\*は4.0–12.8 mの範囲にあり、調和平均8.9 mであった。この事実から、平均補償深度\*は25 m弱と試算された。以上の経緯より、水深30 m迄の各層における基礎生産速度（図-1.1a）より、各月の水柱積算基礎生産量を算出した（以降、基礎生産量とは水柱積算基礎生産量のことを指す）。各月の基礎生産量は、318–2090 mgC/m²/dの範囲にあった（図-1.1c）。瀬戸内海域では、基礎生産量と水柱クロロフィル（Chl-a）現存量が正の高い相関を示した事実を報告した例が複数あるが、本結果では両者の間に有意な関係は認められなかった。

播磨灘では、1990年代に基礎生産量を測定した実績がある<sup>1)</sup>。それによれば、観測地点Stn. NHに近い観測地点では、基礎生産量が、1993年と1994年の観測で、400–1700 mgC/m²/dの範囲であったと報告している。この数値を、今回得られた基礎生産量（319–2090 mgC/m²/d）と比較すると、両者の範囲に大きな差が見られないことが明らかとなった。西嶋（2018）<sup>2)</sup>はこれまで、大阪湾や広島湾などの高Chl-a濃度を有する海域を除いて、瀬戸内海では、基礎生産量が1980年代と比較し、数倍程度大きな変化は見られなかったとモデル計算の結果から示唆している。本結果は、より実質的な観測値の観点から、同様の傾向が確認できたといえる。

\*透明度：直径30cmの白い円盤を船から沈め、見えなくなった深さ

\*平均補償深度：光合成速度は深さとともに光の減衰により低下する。光合成速度と呼吸速度が等しくなる深さのこと

\*Chl-a：クロロフィルa。植物の光合成色素。ここでは植物プランクトン量の指標

### セジメント・トラップを用いた沈降粒子束の測定

上記の基礎生産量の測定に合わせて、定点Stn. NHの深度20 mと30 mに、M型セジメント・トラップを約24時間係留して沈降粒子を採取した。深度20 mにおける全粒子束（Mass flux）と、粒状態有機炭素（POC）、粒状態有機窒素（PON）、粒状態リン（PP）の各粒子束（flux）の経時変動の結果を図-

1. 2a、 cに示す。深度20 mと30 mトラップから得たMass fluxと、POC、 PON、 PP fluxの変動傾向は、大型珪藻*Coscinodiscus*ブルーム期の10月を除いて、どちらの深度トラップにおいても類似していた。従って、これらの4項目の挙動には、基本的に高い同調性があると考えられた。次に粒子束規模に着目すると、深度20 mと30 mトラップにおいて実測されたMass fluxは、観測期間の平均値として各々 $8.2 \pm 9.1 \text{ g/m}^2/\text{d}$ 、 $23 \pm 17 \text{ g/m}^2/\text{d}$ であった。これらの値は、星加ら (1983) <sup>3)</sup>の報告 ( $0.11\text{--}0.33 \text{ g/cm}^2/\text{y}$ ) から試算される播磨灘における堆積物の平均海底堆積速度 (日平均値 $5.5 \text{ g/m}^2/\text{d}$ 程度) よりも高く、おそらく堆積物の再懸濁等の影響のためと考えられた。

調査定点のStn. NHにおいて、セジメント・トラップを用いた沈降粒子束の測定は、1992–1993年にも実施されている。したがって、1990年代の沈降粒子量と近年の沈降粒子量の比較が可能である。ここでは、1992–1993年と2020–2021年に得られた20 mにおける沈降粒子量の比較を行う (図-1. 2a, b)。1992–1993年の沈降粒子量は、 $1.5\text{--}56 \text{ g/m}^2/\text{d}$ の範囲で変動し、その平均値は、 $12 \pm 17 \text{ g/m}^2/\text{d}$ であった。2020–2021年の沈降粒子量の平均値は、 $8.2 \pm 9.1 \text{ g/m}^2/\text{d}$ であったため、大きな差がないことがわかった。同様に、1992–1993年のPOC、PON、PPの各粒子束の平均値は、それぞれ、 $460 \pm 347 \text{ mg/m}^2/\text{d}$ 、 $69 \pm 48 \text{ mg/m}^2/\text{d}$ 、 $25 \pm 11 \text{ mg/m}^2/\text{d}$ であり、これらも、沈降粒子量と同様に、2020–2021年に得られた数値と大きな差はみうけられなかった。

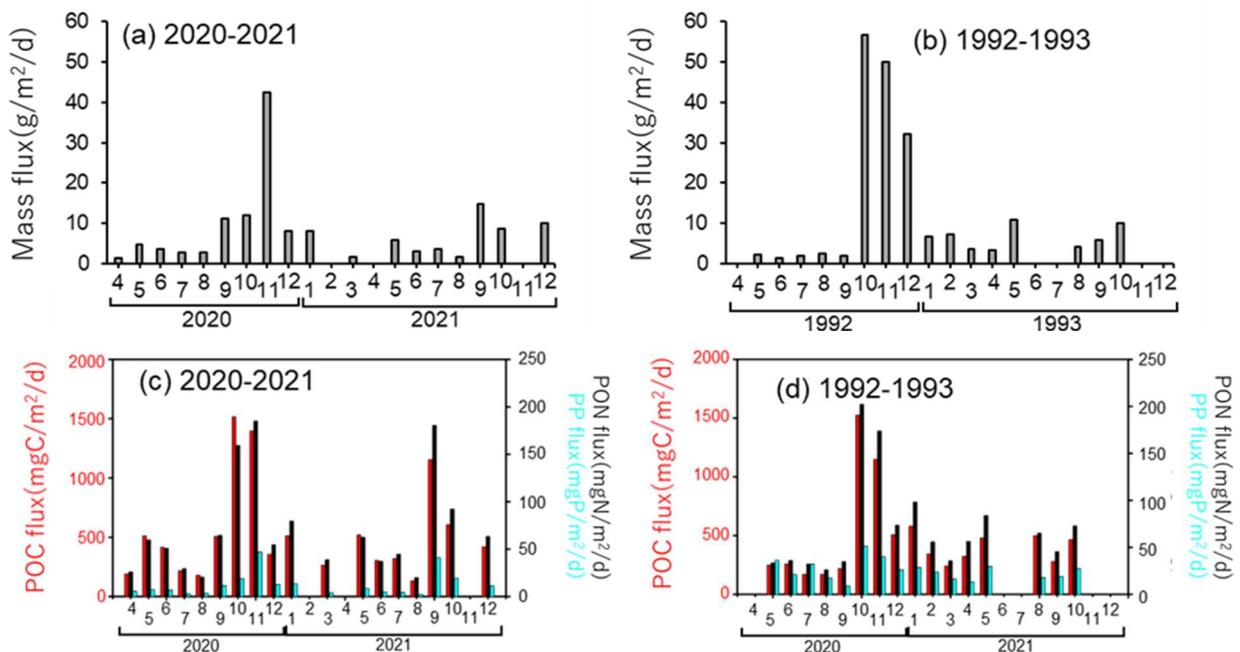


図-1.2 観測定点Stn. NHの深度20 mトラップの (a) 2020年4月から2021年12月までのMass flux、(b) 1992年4月から1993年10月までのMass flux、(c) 2020年4月から2021年12月までのPOC、PON、PP flux、(d) 1992年4月から1993年10月までのPOC、PON、PP flux

### 底泥からの栄養塩溶出

コアインキュベーション法によって測定された栄養塩溶出速度は、窒素、リンでそれぞれ、 $3.8\text{--}36.8 \text{ mgN/m}^2/\text{d}$ 、 $0\text{--}9.86 \text{ mgP/m}^2/\text{d}$ であった。過去、栄養塩溶出速度は泥温変化に応答した季節変動が報告されているが、本結果では両者に明確な季節変動の傾向は認められなかった。上記の基礎生産、沈降粒子束と合わせてみると、3者の量的な関係は図-1.3のようになった。

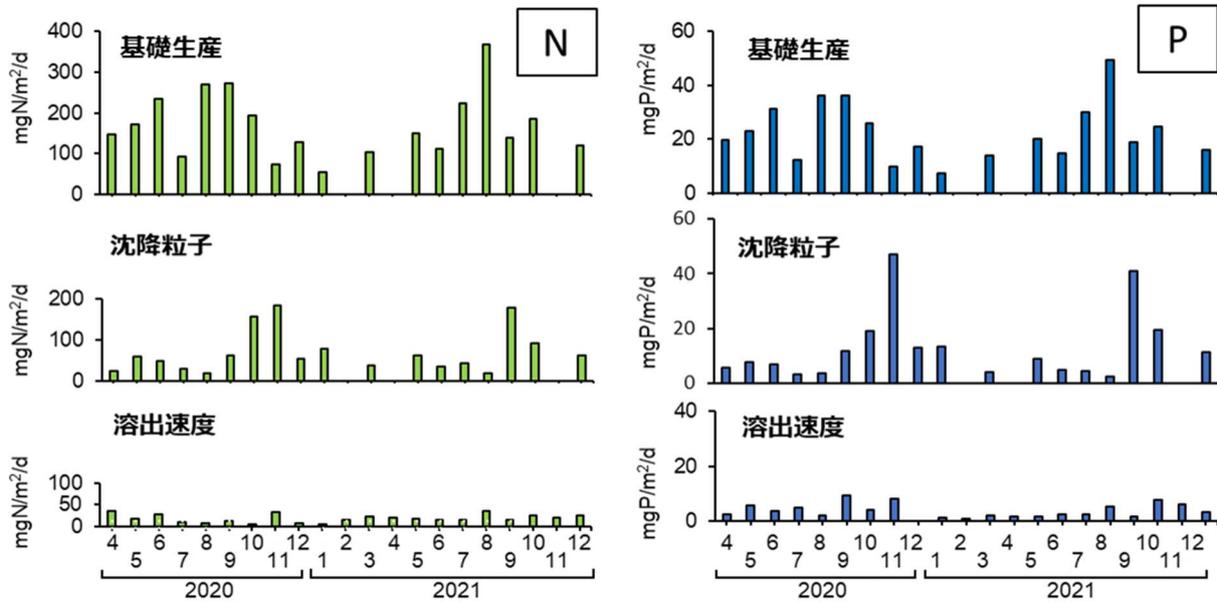


図-1.3 窒素、リンの基礎生産量、沈降フラックス、底泥からの溶出量

〔過去の底泥からの栄養塩溶出と底泥有機物含量に関する蓄積データ・知見の精査〕

#### 栄養塩溶出の実測値

課題担当者らは、過去に瀬戸内海東部の播磨灘において、海底からの栄養塩溶出量を見積もった<sup>4)</sup>。その結果、夏の成層期で海底からのDIN（溶存態無機窒素）溶出量は46.4 ton/dayで、河川からのDIN流入量（14.5 ton/day）に対して3.2倍であった。さらに、播磨灘に隣接する香川県志度湾において、海底からの栄養塩溶出量を測定し、海底から溶出される窒素（DIN：そのほとんどがNH<sub>4</sub>）、リン（PO<sub>4</sub>）、ケイ素（Si(OH)<sub>4</sub>）は、水柱内の植物プランクトンの基礎生産の栄養塩要求量に対し、それぞれ平均で33%、22%、および38%を占めると見積もった<sup>5、6)</sup>。

また課題担当者らは、播磨灘に隣接する津田湾において、コアインキュベーション法により、栄養塩の溶出速度を測定した。その結果、DINおよびSi(OH)<sub>4</sub>の溶出速度は泥温との間に正の相関関係が認められた。尚、PO<sub>4</sub>の溶出速度は泥温との間に一定の関係は認められなかった<sup>7)</sup>。同様に、播磨灘の北部、中央部、南部の3観測点および大阪湾の湾奥から湾口にむけての5観測点の計8定点において、さまざまな季節に計4回、栄養塩の溶出速度を測定した。その結果、得られた栄養塩溶出速度と表層泥（0-1cm層）中のTN含有量との間には正の相関関係が認められた。志度湾で実施した同試験においても有機物含有量（TOC含有量）が高いほど栄養塩の溶出速度も高くなることを報告している<sup>8)</sup>。以上のように、栄養塩の溶出速度と、泥温および表層泥中の有機物含有量との間に良い相関が得られることから、海底からのDIN溶出速度を、泥温および表層泥中のTN含有量から予測し得る以下の式を作成した（図-1.4；多田ら、2018）<sup>7)</sup>。

$$\text{NH}_4\text{溶出速度 (mg/m}^2\text{/day)} = \text{GT} \times (\text{CN} - 1.301)$$

ここで、GTは水温T（℃）のときのCN {TN含有量（mg/g）} に対する溶出速度の勾配で

$$\text{GT} = 1.8020 \times \exp(0.1277 \times T)$$

である。一般に栄養塩の溶出速度には、堆積物の粒度組成\*等も影響すると言われているが、この結果は、実際の現象としては、単純に泥温と表層泥の有機物含量により予測可能であることを示している。実際に、現場で海底堆積物を採取し、インキュベート実験をするなどして栄養塩溶出速度を実測することは、時間やコスト面で問題が多い。従って、今後、泥温および表層泥中のTN含有量から溶出速度を予測するこの式を用いることは非常に有効であると考えられる。尚、本プロジェクト研究では、底泥からの栄養塩溶出の実測を行っている。得られた実測値は、上記の計算式で予測される値と同程度である

が、月ごとの実測値の変動は必ずしも再現されていない。そこで、サブテーマ2の底質モデルでは、上記の泥温および表層泥中のTN含有量から溶出速度を予測する式を用いる事とした。

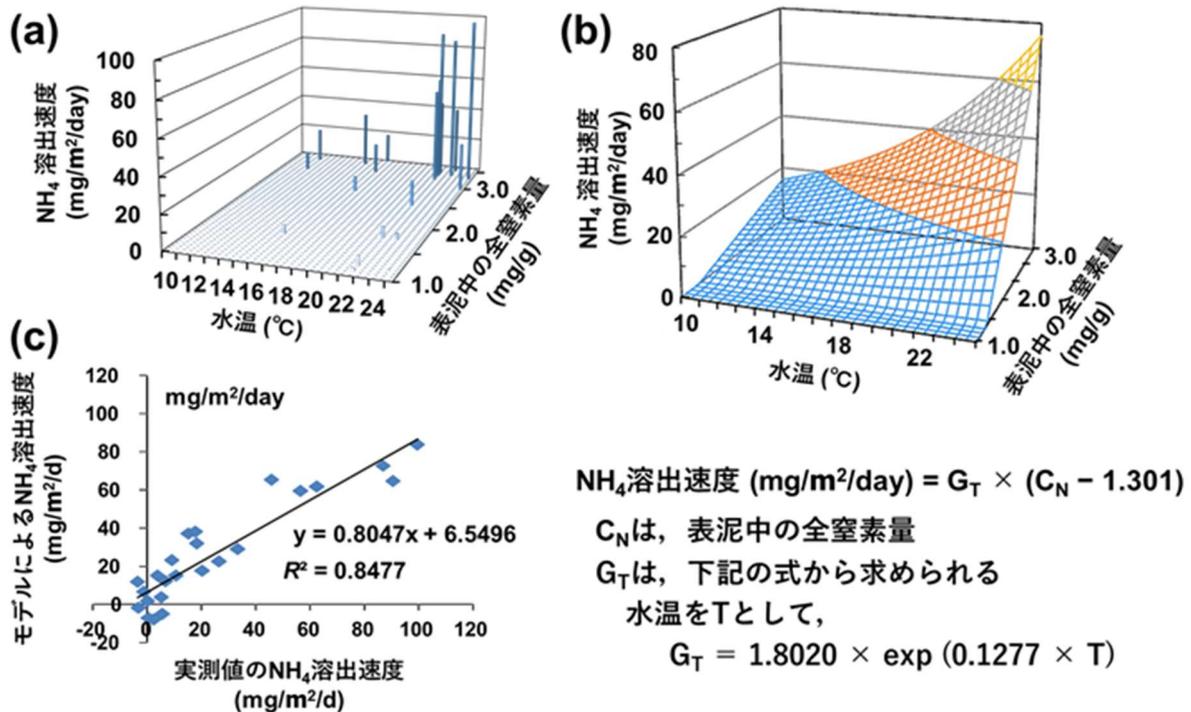


図-1.4  $\text{NH}_4$  フラックスと泥温と表層泥中のTN含量との関係 (a)、右下の推定式で計算される $\text{NH}_4$  フラックス (b)、 $\text{NH}_4$  フラックスの実測値と推定値 (c)

\* 粒度組成：底質を構成する土粒子径の分布の割合。一般に粒子の径が小さいほど単位面積当たりの粒子の表面積が大きいため、有機物や重金属が吸着されやすくその含有率は高くなる。

### 堆積物間隙水中の栄養塩濃度と栄養塩溶出

課題担当者らは過去、播磨灘の姫路沖の観測点 (Stn. 9) において1982年と約30年後の2011年に測定した $\text{PO}_4$ の溶出速度を比較した (両年の観測はそれぞれ同じ季節、同じ方法、同じ条件)。その結果、1982年 (20.1–51.4  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ ) と比較して2011年の $\text{PO}_4$ の溶出速度 (-8.8–20.7  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{day}$ ) は低下していた。また、同時に測定された堆積物間隙水中の $\text{PO}_4$ 濃度は、1982年ではほぼ20  $\mu\text{M}$ 以上であり、最高で70  $\mu\text{M}$ 以上の値も見られたが、2011年では、高くても30  $\mu\text{M}$ 程度の値であった。以上のようにひとつだけのデータセットではあるが、間隙水中の $\text{PO}_4$ 濃度は、1982年と比較して2011年では明らかにその濃度は低下していた<sup>7)</sup>。

栄養塩溶出速度は堆積物の間隙水中の栄養塩濃度に比例すると考えられる。しかしながら、間隙水中に存在している栄養塩量は堆積物中の全NやP量に対してごくわずかな量でしかない。例えば、表層堆積物中の含水率を70%、泥の密度を2.50 g/cm<sup>3</sup>、間隙水の密度を1.00 g/cm<sup>3</sup>と仮定する。また、播磨灘の表層泥中の全N含量は2 mg/g、間隙水中のDIN濃度は1.4 mg/L程度である。この条件で計算すると、表層泥の湿重1 g中には0.6 mgのNが存在する中で、間隙水中にはわずか0.00098mgのDINしか含まれていないことになる。この事は間隙水中のDIN濃度が減少しても、堆積物中の全N含量の変化としては検出できないことを意味する。事実、姫路沖のStn. 9では栄養塩溶出速度が低下していたが、播磨灘北部の表層堆積物中のTN含量には30年前と比較して顕著な低下は認められなかった<sup>9)</sup>。

前述のように、栄養塩の溶出速度は泥温と表層泥中の有機物含有量と良い相関が得られ、この両者から溶出速度が推定可能である。前述の推定式は、表層堆積物中のTN含量が1–3 mg/gの範囲にある播磨灘と大阪湾で作成したものであるが、播磨灘のTN含量は30年間で大きく変化していない (変動量はおお

むね0.6 mg/g程度)。従って栄養度が大きく異なる海域間で溶出速度の高低を評価することは可能であるが、前述の推定式では、溶出速度の長期変化に関する推定は現時点で出来ない。尚、以上の検討結果は、水環境学会誌 (Vol. 44(5), 2021)<sup>10)</sup>に掲載された。

#### 〔堆積物中の生元素（炭素・窒素）の鉛直分布〕

堆積物試料は、Stn. 9、15、およびNHの3地点より採取した(図-1.5)。採泥には、マルチプルコーラーを改造した1 mの亚克力製チューブを用いた。これにより、各採泥地点より、最長80 cm・直径88 mmのコア(柱状堆積物試料)を3本同時に得ることができた。得られたコアの内1本(ワーキングコア)は4°Cの冷蔵庫に保管し、残りの2本(アーカイブコア)は、1 cm間隔で切断し冷凍庫に保存した。より正確な播磨灘の変遷史を得るために、<sup>210</sup>Pbを用いた年代測定\*を行うが、その前にCTスキャンによりコアのかく乱度合いを確認した。結果として、いずれのコアもラミナ層\*などのはっきりとした層準は確認できず、全体的にある程度のかく乱を受けている様子が確認された。そのうえで、表層部のかく乱が比較的少ないと判断されたStn. 15、最も長いコアが得られたStn. NH、および播磨灘北部のStn. 9の3本のワーキングコアに対し、<sup>210</sup>Pbを用いた年代測定を実施した。

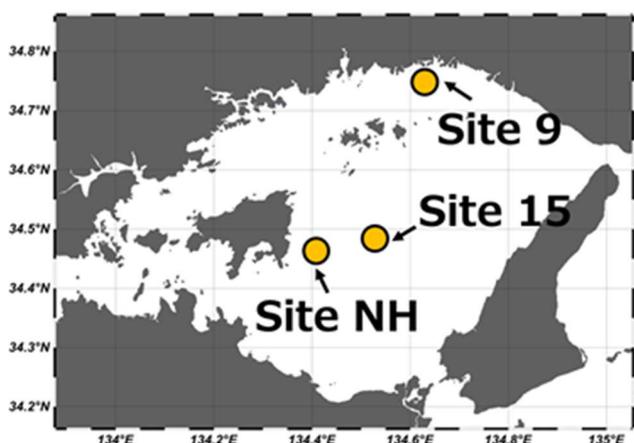


図-1.5 堆積物の採泥地点とStn. 15、NHおよびStn. 9

年代測定の結果は、Stn. NHでは、表層で見られるはずの福島事故に由来する高濃度のCs-137が、泥深度17cmまで分布していた(図-1.6)。このことから、Stn. NHでは、やや生物擾乱があることがわかった(図-1.6)。また、43cm付近に1964年の核実験由来のピーク(Fallout maximum)が見られ、Pb-210のCRS年代モデルのプロットよりも下の深度に位置していた(図-1.6)。生物擾乱によって、ピーク深度が下にずれるということは、従来から指摘されている。本試料におけるFallout maximumとCRS年代モデルによって得られる1964年に相当する深度の差は、10cm程度と、比較的大きい。したがって、年代解釈には、注意が必要である。しかしながら、本研究では、今後、CRS年代モデルを使って議論していくことを決定した。

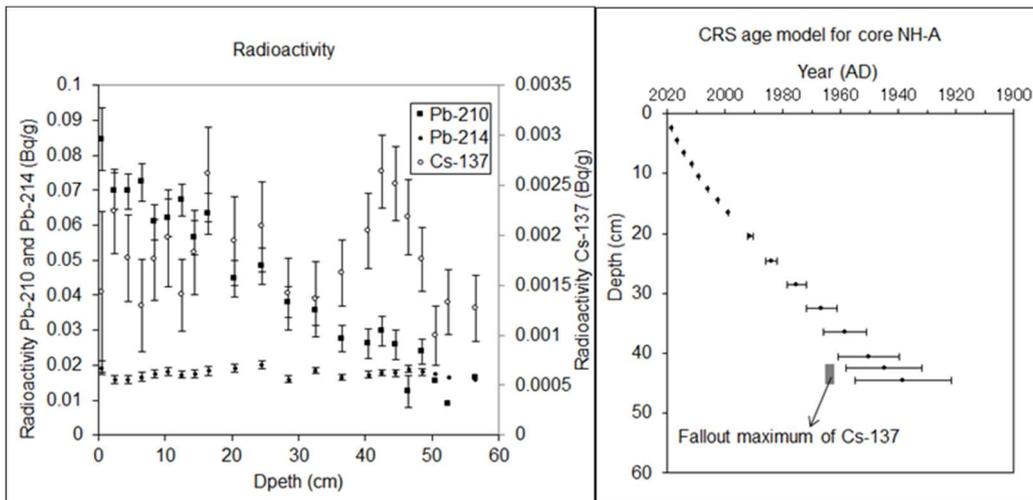


図-1.6 Stn. NHの過剰210Pb放射能強度（左）と年代モデル（右）

Stn.15は、一部の試料は現在測定中である。したがって、本報告では、分析終了したところまでを紹介する。Stn.15では、Cs-137のピーク（Fallout maximum）が明瞭に見られず、生物かく乱をいくらか受けているような傾向が確認された（図-1.7）。ただし、CRS年代モデルのプロットよりすぐ上に Fallout maximumのプロットが存在し、Stn.NHと比べて、CRS年代モデルで示された1964年と見積もられた深度に近い深度でCs-137のピークが落ちることから、Stn.NHよりもかく乱の度合いは小さいかもしれない。一般的に、Cs-137は、間隙水中で上下に移動することが知られている。Stn.15でみられた差は、このCs-137の間隙水中で移動に起因している可能性がある。年代としては、CRS年代モデルを使って十分に議論が可能である。

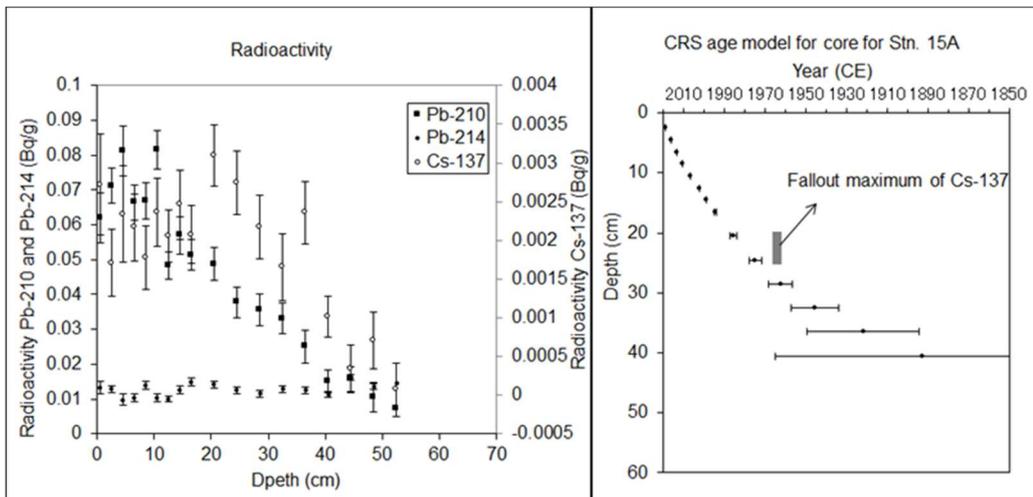


図-1.7 Stn. 15の過剰210Pb放射能強度（左）と年代モデル（右）

一方で、Stn.9では、Cs-137の1964年のピークが認められず、むしろPb-210とよく似た深度パターンを示した（図-1.8）。このことから、大きい生物攪乱を受けていることが考えられた。したがって、年代は、参考までとした方が適当であると判断した。いずれにしても、年代としては、他のサイト同様に、CRS年代モデルを使って議論を進めることとする。

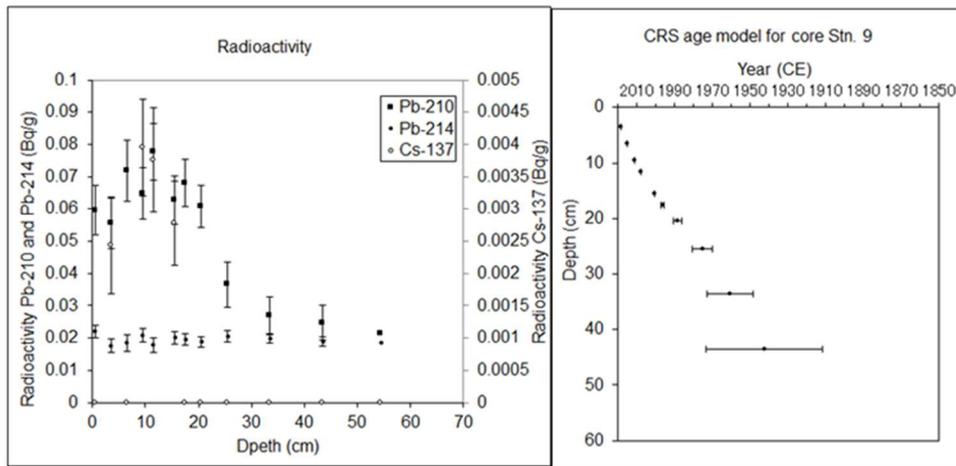


図-1.8 Stn. 9の過剰210Pb放射能強度（左）と年代モデル（右）

はじめに、堆積物中の全有機炭素（TOC）と窒素（TN）の比（C/N比）を用いて、堆積物中有機物の起源の推定を試みた。C/N比は、植物と生物で大きく異なり、植物では25前後の値を示すが、生物（海洋では、植物プランクトンも）は7.69前後の値を示す<sup>11,12</sup>。これらをエンドメンバーとし、堆積物中のC/N比から下記の式を用いて、堆積物中の有機物起源の推定が可能である。

$$\text{陸上植物起源有機物の寄与率(\%)} = \frac{(C/N)_{\text{試料}} - (C/N)_{\text{植物プランクトン}}}{(C/N)_{\text{植物}} - (C/N)_{\text{植物プランクトン}}} \times 100$$

なお、植物プランクトン由来有機物の寄与率の計算は、上記で得られた陸上植物起源有機物の寄与率を100より除することによって求めた。その結果、いずれの採泥地点でも、主要な有機物組成は、植物プランクトンであることが明らかとなった。具体的には、Stn.15では87%が、Stn.9では88%が、Stn.NHでは74%が、植物プランクトンの有機物で構成されていると見積もられた。特に、Stn.9は、姫路沖の1級河川が近い堆積環境にも関わらず、陸上起源の有機物は、堆積物中有機物の主要な構成者ではないことが示された。このような結果は、先行研究でも得られている。例えば、播磨灘全域で採取された表層泥中のC/N比は、9程度をとり、陸起源有機物の寄与が少ないことを示している<sup>9</sup>。また、播磨灘の北部引田沖と燧灘から得られた堆積物中のTOC、TN、生物起源シリカの鉛直プロファイル調べた研究では、生物起源シリカとTOCおよびTNとの間に高い相関関係がみられ、植物プランクトンのなかでも、その構成起源は、珪藻であることが示唆されている<sup>13</sup>。

図-1.9にStn. NH、Stn. 15、Stn. 9のTOCとTNの鉛直分布を示す。いずれの採泥地点においても、TOCとTNの鉛直分布は、表層から下層にかけて、減少していく傾向が見出された。これは、堆積物中での微生物等の分解によるものである。各採泥地点のTOCとTNの分解速度を分解モデルの式にフィッティングさせ、深度に対する分解速度を試算した。その結果、いずれの採泥地点においても、高い決定係数をもって、分解モデルを立てることができた。また、Stn. NHとStn. 15では、多くのプロットが分解モデルに近い位置にプロットされているのに対して、Stn. 9では、約20 cm深にモデルよりも高い位置にプロットが集まる傾向が確認された。

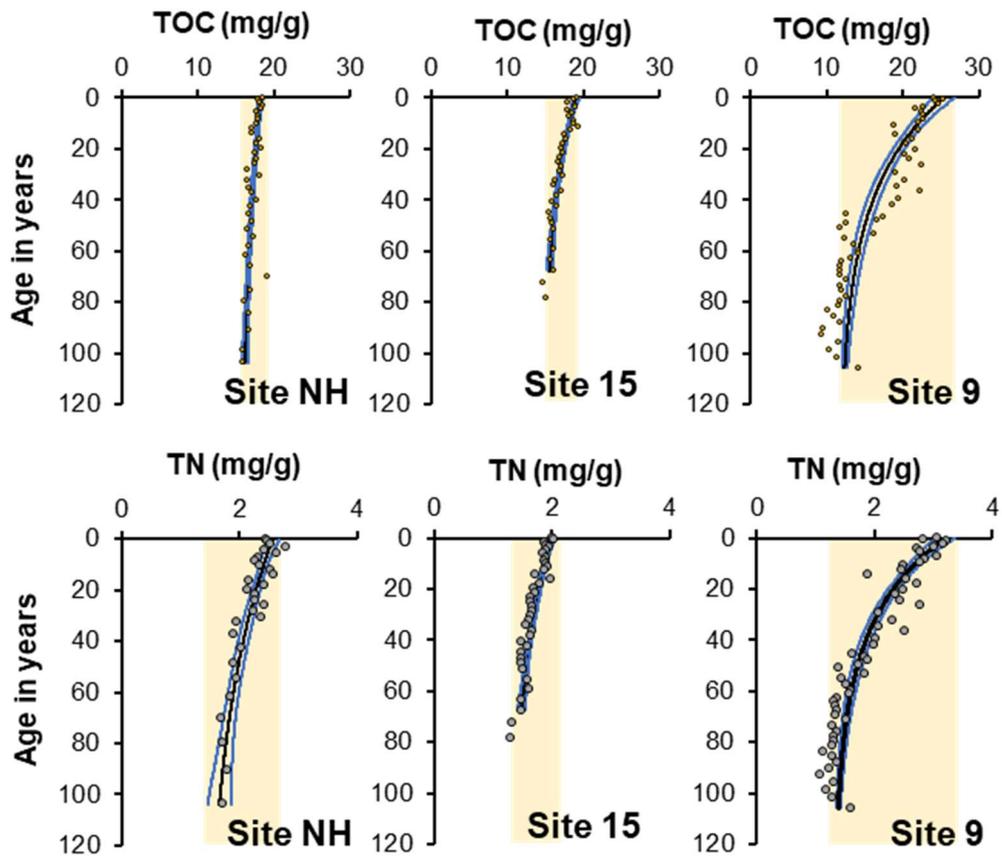


図-1.9 Stn. NH、15およびStn. 9の堆積物中の全有機炭素(TOC)と窒素(TN)の鉛直分布。図中の実線が分解モデルで得られた曲線

得られた分解モデルの式より、それぞれの採泥地点における分解前のTN濃度（表層に到達した当時のTN濃度、以後、未分解TN濃度）を見積もった。そこから、未分解TN濃度と先ほどの多田ら（2018）<sup>7)</sup>の式を用い、過去から現在にかけての堆積物からの無機態窒素（DIN）溶出量の推定を行った（図-1.10）。その結果、Stn. NHと15のDIN溶出量は、10%以内の変動に留まっていた。一方で、Stn. 9では、富栄養化した時代以外では、おおよそ $3500 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{d}$ 溶出していたのに対して、富栄養化した時代（1970-1990年）では、最大で $4800 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{d}$ と1.5倍程度に達する溶出量が見られた。底質からのDIN溶出は、底質に積もった粒子態の有機窒素の分解によって起こり、底質中の有機物の主要な供給源は、水柱の微細藻類を始めとしたデトリタスの沈降物で構成されている。したがって、底泥中の窒素量は、水柱の一次生産の結果であり、その変動を反映している。Stn. NHで、1990年代と比して、基礎生産と沈降粒子量に大きな差が見られず、堆積物からの溶出量も変化していなかったという結果と一貫性が見られる。ただし、先述の通り、沈降粒子量は、基礎生産に直接由来しないものも捉えているため、過去との比較には注意が必要である。一方で、Stn. 9で富栄養化した時代に高い溶出量が見られた結果は、同時に、この海域では、当時、高い一次生産量を有していたと推測できる。したがって、播磨灘における富栄養化は、海域ごとで、その応答が大きく異なっていた可能性が高い。

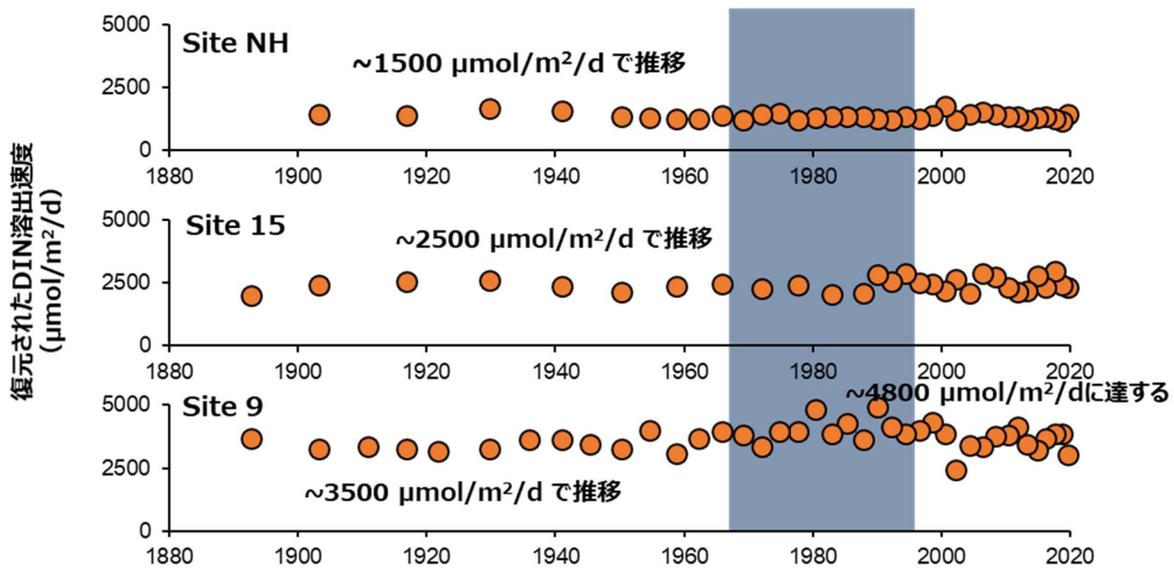


図-1.10 堆積物中のTN濃度と分解モデルおよび先行研究で提案された堆積物からの栄養塩溶出経験式を用いて計算された1900年代から現在にかけての栄養塩溶出量の推定結果

\* $^{210}\text{Pb}$ を用いた年代測定法：放射性鉛（ $^{210}\text{Pb}$ ）を使用する堆積物の年代決定法。水中の粒状物は海底に次々に積もっていくが、それらの粒子に吸着された $^{210}\text{Pb}$ は堆積物に埋没後には供給がなく時間の経過とともに放射性壊変で減る一方であり、堆積物の下の層ほどその含量は少なくなる。その減少量と $^{210}\text{Pb}$ の半減期（22年）から、堆積した年代を算出する。

\*ラミナ層：堆積物断面に見られる粒度や色の違いによる細かな縞模様。かく乱の少ない堆積物で確認される。

#### 〔サブテーマ1のまとめ〕

播磨灘の定点における現場観測で、基礎生産量、沈降粒子束および堆積物からの栄養塩溶出を同時に測定した。三者の量的関係について、以下のように速報値（暫定値）として示すことができた。即ち、生産された有機物（窒素・リン）に対して、その約4割が有光層以深に沈降し、また、約1-2割程度に匹敵する量が底泥から溶出していた（図-1.11）。

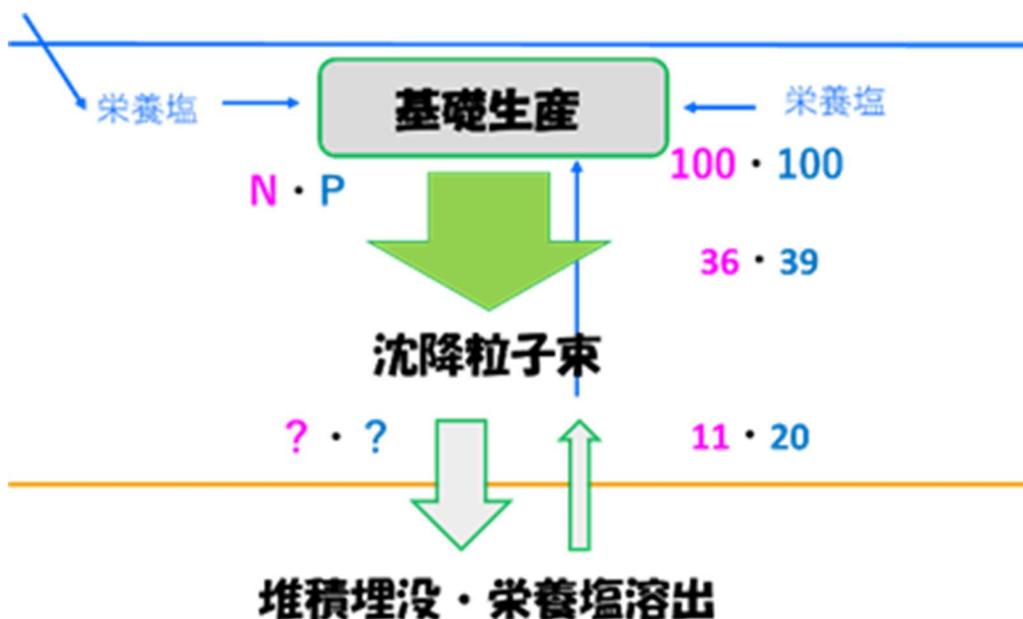


図-1.11 基礎生産量、沈降粒子束、および堆積物からの栄養塩溶出量の量的関係

また、底泥からの栄養塩溶出や堆積物中の有機物含量に関するこれまでの蓄積データを精査し、以下のことを明らかにした。即ち、栄養塩溶出速度は、大まかに泥温と表層堆積物の有機物含量から推定できる。但し、これは「播磨灘よりも、大阪湾の湾奥の方が溶出速度は大きい」程度のことであり、播磨灘の表層泥有機物含量の違いによる栄養塩溶出量の違いを推定できるものではない。また、10-30年前と近年を比較して栄養塩溶出量が低下していること、間隙水中の $PO_4$ 濃度が低下していることを示す数少ないデータセットもあったが、この間に有意な表層堆積物中の有機物含量の低下は認められなかった。

高度成長期の環境悪化の時代（50年程度前）を含めた過去の環境について知る為には、柱状堆積物に刻まれた物質の分布を見るのが有用である。そこで、堆積物中に保存された生元素量を測定することにより、過去の基礎生産量や沈降フラックスを推定することを試みた。播磨灘の観測点（4点）で、柱状堆積物試料を採取した。播磨灘では海水中の栄養塩濃度は過去30年前から現在までに顕著に低下していることが知られているが、得られた有機物の鉛直分布（2観測点分）および、過去に香川大学で得た類似の鉛直分布から、水柱の基礎生産量、有機物の沈降fluxは、現在と高度経済成長期で比較しても、顕著な低下は起きていないことが推察された。但し、播磨灘北部沿岸域では、過去には1.5倍程度の増加があった可能性が示唆された。

## 5. 研究目標の達成状況

これまでに香川大学が播磨灘で蓄積してきた底泥の有機物含量や底泥からの栄養塩溶出に関する知見・データを精査し、サブテーマ2の開発モデルに使用できるデータを提供した。また、その知見・データを論文・総説として公表した。

また、現場観測として、過去に沿岸海域では例のない基礎生産量、沈降粒子束、および底泥からの栄養塩溶出速度をすべて同時にほぼ毎月実測した。その結果、水柱における粒状有機物の炭素、窒素、リンの生産量と沈降量、さらには海底への堆積とその後の底泥からの栄養塩溶出に関する一連の窒素・リン量を定量的に明らかにした。

さらに、海底堆積物中に埋没した有機態窒素、リン含量の鉛直分布を明らかにし、過去得られた鉛直分布と比較することにより、堆積物中で長期間にわたって進行する有機物の分解過程について検討し、これらが栄養塩溶出量にどの程度寄与するか検討した。その結果の一部は、論文、学会発表として公表した。また、これらの一連の知見とデータを、サブテーマ2が開発する底質モデルに提供した。

以上のことから、研究目標どおりの成果をあげた。

## 6. 引用文献

- 1) Tada, K., Monaka, K., Morishita, M., Hashimoto, T., 1998. Standing stocks and production rates of phytoplankton and abundance of bacteria in the Seto Inland Sea, Japan. *J. Oceanogr.* 54, 285-295.
- 2) 西嶋 渉, 2018. 瀬戸内海における栄養塩濃度管理法. 沿岸海洋研究 56, 13-19.
- 3) 星加 章, 塩沢 孝之, 松本 英二, 1983. 播磨灘における堆積速度と重金属汚染. 日本海洋学会誌 39, 82-87.
- 4) 多田 邦尚, 西川 哲也, 樽谷 賢治, 山本 圭吾, 一見 和彦, 山口 一岩, 本城 凡夫, 2014. 瀬戸内海東部海域の栄養塩低下とその低次生物生産過程への影響. 沿岸海洋研究 52, 39-47.
- 5) Srithongouthai, S., Sonoyama, Y., Tada, K., Montani, S., 2003. Annual cycle of ammonium and phosphate fluxes across the sediment water interface in coastal marine environment (the Seto Inland Sea). *Fisheries science* 68, 600-603.
- 6) Srithongouthai, S., Sonoyama, Y.-I., Tada, K., Montani, S., 2003. The influence of environmental variability on silicate exchange rates between sediment and water in a

- shallow-water coastal ecosystem, the Seto Inland Sea, Japan. *Mar. Pollut. Bull.* 47, 10-17.
- 7) 多田 邦尚, 中嶋 昌紀, 山口 一岩, 朝日 俊雅, 一見 和彦, 2018. 沿岸海域における栄養塩濃度決定要因と堆積物. *沿岸海洋研究* 55, 113-124.
  - 8) Srithongouthai, S., Tada, K., 2015. Diffusive fluxes across sediment-water interface in the Seto Inland Sea, Japan. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology* 2, 71-75.
  - 9) Yamaguchi, H., Hirade, N., Kayama, M., Ichimi, K., Tada, K., 2014. Total organic carbon and nitrogen contents in surface sediments of Harima Nada, eastern Seto Inland Sea, Japan: a comparison under two different trophic states. *J. Oceanogr.* 70, 355-366.
  - 10) 多田 邦尚, 2021. 沿岸海域における基礎生産と栄養塩濃度, 堆積物からの栄養塩溶出. *水環境学会誌* 44, 137-141.
  - 11) Jilbert, T., Asmala, E., Schröder, C., Tiihonen, R., Myllykangas, J.P., Virtasalo, J.J., Kotilainen, A., Peltola, P., Ekholm, P., Hietanen, S., 2018. Impacts of flocculation on the distribution and diagenesis of iron in boreal estuarine sediments. *Biogeosciences* 15, 1243-1271.
  - 12) Goñi, M.A., Teixeira, M.J., Perkey, D.W., 2003. Sources and distribution of organic matter in a river-dominated estuary (Winyah Bay, SC, USA). *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 57, 1023-1048.
  - 13) Nakakuni, M., Loassachan, N., Ichimi, K., Nagao, S., Tada, K., 2022. Biophilic elements in core sediments as records of coastal eutrophication in the Seto Inland Sea, Japan. *Regional Studies in Marine Science* 50, 102093.

## II-2 物理-底質-低次生態系モデルの開発

愛媛大学

沿岸環境科学研究センター  
沿岸環境科学研究センター  
沿岸環境科学研究センター

森本 昭彦  
郭 新宇  
吉江 直樹

### 【要旨】

瀬戸内海全域と播磨灘の栄養塩（溶存態無機窒素：DIN）に占める、太平洋起源、河川起源、底質起源の栄養塩の割合を明らかにし、瀬戸内海の窒素循環と河川からの栄養塩負荷量の変化に対する低次生態系の応答を定量的に明らかにするため、2種類の物理-底質-低次生態系モデルを開発した。これらのモデルを開発するため、1次元底質モデル、瀬戸内海全域モデル、播磨灘の低次生態系応答を調べるための生態系ボックスモデル、播磨灘モデルをそれぞれ構築した。すべてのモデルは観測値をよく再現しており、瀬戸内海および播磨灘の低次生態系をめぐる物質循環を定量的に評価できるモデルの開発に成功した。開発した物理-底質-低次生態系モデルの結果から、瀬戸内海全体の栄養塩に占める太平洋起源、河川起源、底質起源の栄養塩の割合がそれぞれ73%、10%、17%であることを明らかにした。播磨灘を対象とした物理-底質-低次生態系モデルにおいて、河川からの栄養塩負荷を10、20、30、70%増加させた計算を行い、河川からの栄養塩負荷に対する播磨灘の低次生態系の応答を調べた。河川からの栄養塩負荷を70%増加させると、播磨灘全域の栄養塩濃度は $1\mu\text{M}$ 以上増加するが、植物プランクトン量には大きな変化がなく、栄養塩濃度の変化に植物プランクトンの基礎生産がほとんど応答しないことが示された。この結果はサブテーマ1の観測結果と整合的であった。河川からの栄養塩負荷量を70%増加させたケースでは、春から夏にかけて小型の植物プランクトン量が減少し、中型の植物プランクトンが増加していた。このことは、過去から現在にかけて栄養塩濃度が低下している播磨灘では、全植物プランクトン量の変化はないものの、植物プランクトンのサイズ組成が変化したことを示唆している。

### 1. 研究開発目的

瀬戸内海の栄養塩濃度を管理する場合、栄養塩負荷量をコントロール可能な、陸からの栄養塩供給量を変化させることになる。対象海域の栄養塩濃度が陸からの栄養塩負荷量に大きく依存しているならば、濃度をコントロールすることは容易であるが、栄養塩は陸だけでなく太平洋と底質からも供給されている<sup>1)</sup>。したがって、対象とする海域の栄養塩に対する陸、太平洋、底質のそれぞれから供給される栄養塩量を定量的に把握することが栄養塩管理においては必須である（図-2.1）。しかしながら、現場で採水し栄養塩濃度を測定しても、その栄養塩に含まれる陸起源、太平洋起源、底質起源それぞれの割合を知ることができない。一方で、数値モデルでは陸起源、太平洋起源、底質起源それぞれの栄養塩や、それらを使うプランクトン等に個別の変数を与えることで、各起源の栄養塩を追跡することが可能である<sup>2)</sup>。サブテーマ2では、陸起源、太平洋起源、底質起源の栄養塩を追跡可能な物理-底質-低次生態系モデルを開発し、瀬戸内海および播磨灘の栄養塩収支を定量的に明らかにすることを目的とする。

### 2. 研究目標

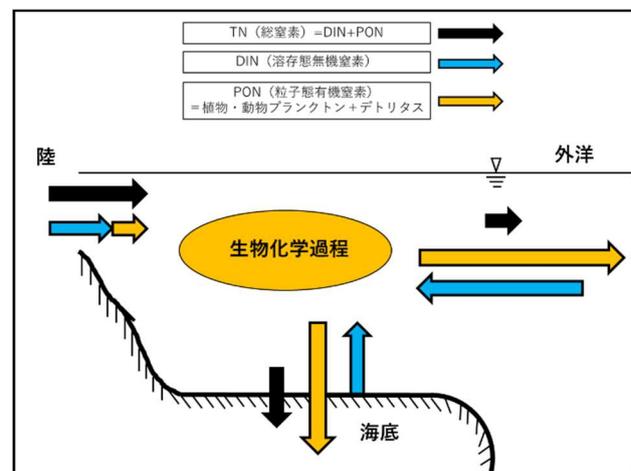


図-2.1 瀬戸内海の窒素循環の模式図

播磨灘の栄養塩に占める陸起源、太平洋起源、底質起源の栄養塩の割合とその時間変化を定量的に示すことのできる物理－底質－低次生態系モデルを開発する。このモデルを開発するために、以下の4種類のモデルを開発する。①海底での有機物の堆積、分解、栄養塩溶出過程を計算可能な新たな底質モデル、②太平洋起源の栄養塩の瀬戸内海全域における挙動を計算可能な水平解像度1kmの高解像度瀬戸内海・黒潮低次生態系モデル、③播磨灘を対象とした水平解像度500mの3次元物理モデル、④播磨灘を対象とした低次生態系ボックスモデル。①の底質モデルについては、サブテーマ1による堆積物中の有機物の鉛直分布や底質からの栄養塩溶出量に関する観測・実験データを用いて検証する。③の播磨灘を対象とした3次元物理モデルに①の底質モデルと④の低次生態系ボックスモデルを結合し、②のモデルの出力を境界条件とした物理－底質－低次生態系を構築し、陸からの栄養塩供給量を変化させた場合の播磨灘の栄養塩濃度の応答と空間分布を定量的に示す。

### 3. 研究開発内容

播磨灘の栄養塩に占める陸起源、太平洋起源、底質起源の栄養塩の割合とその時間変化を定量的に示すことのできる物理－底質－低次生態系結合モデルを開発する。このモデルの開発のため以下の4つのモデルを構築する。

①海底の底質における有機物の堆積、分解、埋没、そして底質から水中への栄養塩溶出量を計算可能な新たな底質モデルを開発する。モデル開発においては、サブテーマ1の観測、実験から得られる水中の有機物の分解や底質中のプロセスに関する知見を取り入れる。

②太平洋起源の栄養塩の挙動を計算可能な、水平解像度1kmの瀬戸内海全域を対象とした3次元低次生態系モデルを構築する。このモデルの生態系は、溶存態無機窒素、植物プランクトン1種、動物プランクトン1種、デトリタスを変数としたシンプルなものである。環境省の広域総合水質調査等の観測データを使いモデルの精度検証を行う。

③最終的なモデルのベースとなる播磨灘を対象とした水平解像度500mの3次元物理モデルを開発する。このモデルの検証は、検潮所の水位データや、兵庫県と香川県の浅海定線観測の水温、塩分データにより行う。

④播磨灘を対象とした低次生態系ボックスモデルを開発する。本モデルではサブテーマ1で得られるデータを境界条件やモデルの検証データとして使用する。まず、15変数のモデルにより栄養塩や植物プランクトンの季節変化を再現し、播磨灘での低次生態系における物質循環を明らかにする。その後、3次元モデルに結合できるように、予報変数を12変数まで減らしたモデルを構築する。

③の物理モデルに、サブテーマ1が作成した底質からの栄養塩溶出量推定式と、④の低次生態系モデルを結合し、②の瀬戸内海を対象とした広域のモデルから水温、塩分、流速、栄養塩などの変数の値を③の側面境界値として与え、播磨灘を対象とした物理－底質－低次生態系モデルを完成させる。

②のモデルにも底質からの栄養塩溶出推定式を組み込み、瀬戸内海全域における各起源の栄養塩の割合と、各起源の栄養塩の変化に対する瀬戸内海の栄養塩濃度の応答を明らかにする。播磨灘を対象とした物理－底質－低次生態系モデルを使い、播磨灘周辺海域に流入する各河川からの栄養塩負荷量の変化に対する応答と、植物プランクトン組成の変化を明らかにする。

## 4. 結果及び考察

### 4. 1 底質モデルの開発

底質での有機物の分解・堆積・埋没過程を考慮した、底質から水中への栄養塩溶出を計算可能な鉛直1次元底質モデルの開発を行った。本モデルでは粒状態有機物として、易分解性と難分解性の粒状態有機窒素、間隙水中の溶存物質としてアンモニア、硝酸、酸素を考慮している。底質中の過程としては、有機物の沈降、堆積、再懸濁（底質上の流れによる巻き上げ）、埋没、拡散、生化学反応を考慮したモデルとなっている（図-2.2）。初期値はサブテーマ1で得られた播磨灘中央部での堆積物中の有機物量と間隙水中のアンモニアと硝酸を、堆積物中の間隙率と溶存酸素量は文献値<sup>3)</sup>を与えた。境界条件としては、サブテーマ1により観測された、播磨灘中央部の底層水中の粒状態有機窒素、アンモニア、硝

酸、水温を与えた。さらに、再懸濁を起こす強制力として潮流による海底応力を与えた。この条件のもとと定常に達する200年間の積分を行った。図-2.3は堆積物中の有機窒素、アンモニア、硝酸の鉛直分布である。モデル結果は観測値を非常によく再現している。

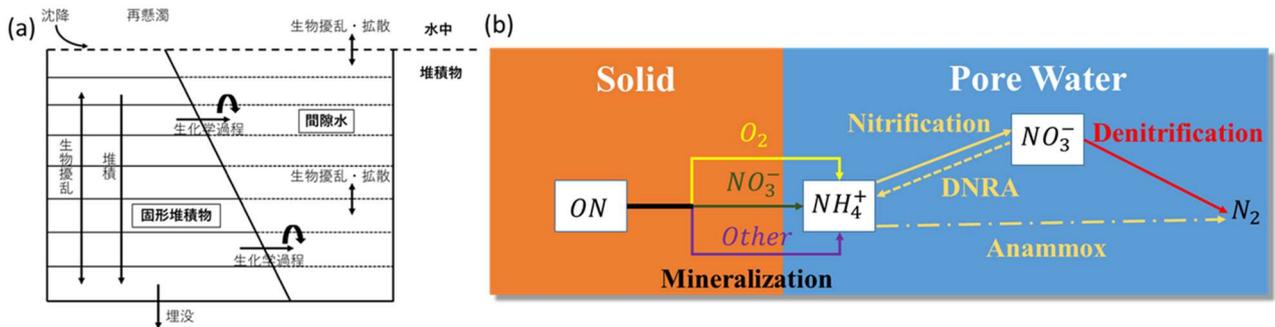


図-2.2 鉛直一次元堆積物モデルの(a)素過程と(b)堆積物中での生化学反応

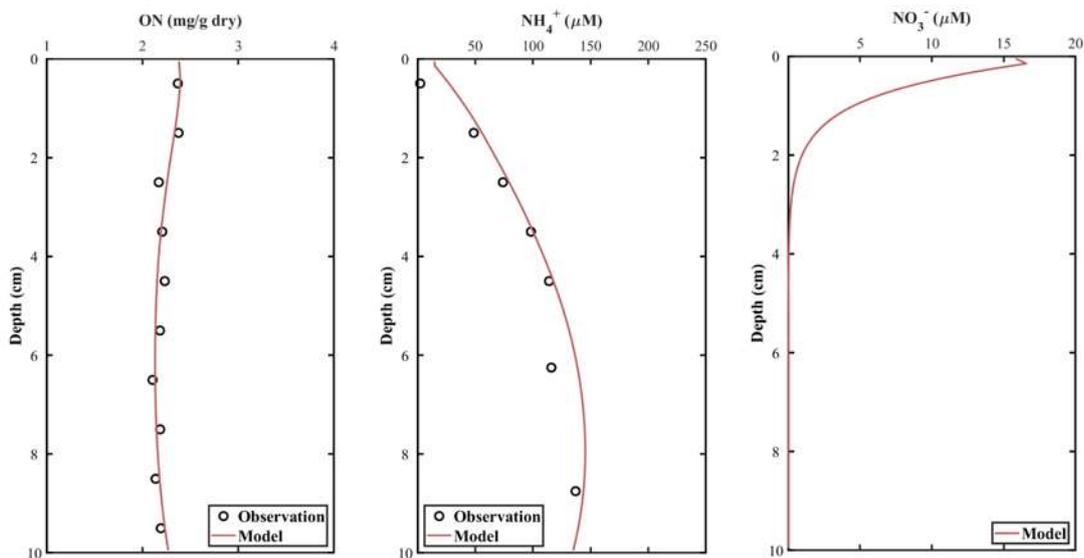


図-2.3 堆積物中の有機物量、アンモニア、硝酸の鉛直分布の観測値（丸印）とモデル（赤実線）の比較。硝酸については観測結果がないため計算値のみを表示

## 4. 2 瀬戸内海全域を対象とした物理—底質—低次生態系モデルの開発

### 4. 2. 1 物理—底質—低次生態系モデルの概要

播磨灘を対象とした最終的な物理—底質—低次生態系モデルにより、河川起源、底質起源、太平洋起源の栄養塩の挙動を計算するためには、モデル計算領域の端となる燧灘中央部と紀伊水道においてすべての予報変数に対して境界条件を与える必要がある。また、栄養塩管理においては瀬戸内海全体での栄養塩収支を把握することも重要であることから、瀬戸内海全域を対象とした物理—底質—低次生態系モデルを開発した。

本モデルの計算領域は豊後水道～紀伊水道までの瀬戸内海全域である（図-2.4a）。物理モデルはPrinceton Ocean Model<sup>4)</sup>をベースとし、水平解像度約1 km、鉛直方向に21層のモデルである。海面から熱フラックスを、21の一級河川と45の二級河川から河川流量を、そして南の境界となる豊後水道南部と紀伊水道南部において水温、塩分、流速を与えている。初期値と境界条件に関しては、開発済みの瀬戸内海モデルの条件を使用した<sup>5)</sup>。生態系モデルは、溶存態無機窒素（DIN：栄養塩）、植物プランクトン、動物プランクトン、デトリタスの4変数を予報変数とするシンプルなものとした（図-2.4b）。栄養塩と植物プランクトンの初期値は、環境省の広域総合水質調査のデータより与え、動物プランクトンとデトリタスは観測データがないため最小値を与えた。河川からの栄養塩負荷は、国土交通省の水質データから得られた各河川のDIN濃度と河川流量を掛け合わせ与えた。南の

境界である豊後水道と紀伊水道のDIN濃度は、観測値からもとめられた水温とDINの関係式より、物理モデルで計算される水温からDIN濃度を推定し与えた。底質からの栄養塩供給に関しては、サブテーマ1が作成した海底堆積物表層の全窒素(TN)と堆積物直上の水温から栄養塩溶出速度を見積もる経験式により与えた<sup>6)</sup>。ここで、堆積物表層のTNは瀬戸内海環境情報基本調査のデータを使用し、水温は物理モデルにより計算された値を使用した。低次生態系過程と底質からの栄養塩溶出過程を3次元物理モデルに結合し、定常状態になるまで計算を行った。

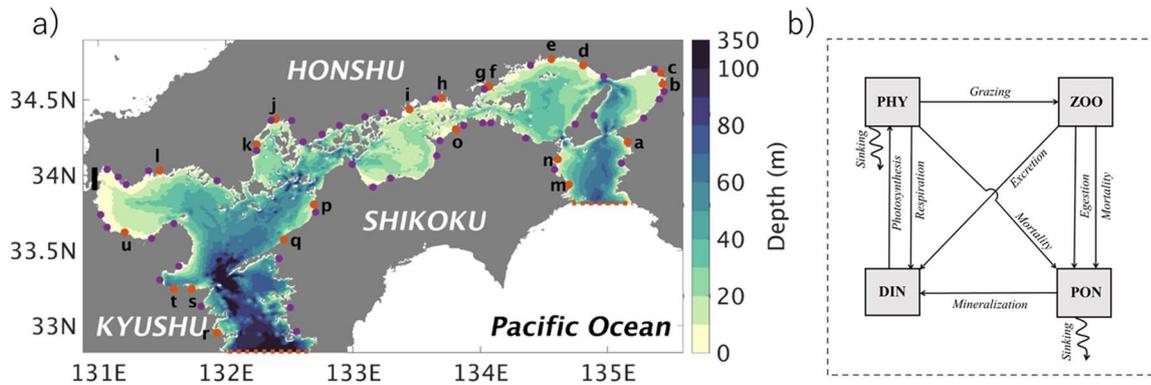


図-2.4 a)モデル計算領域。図中のトーンは海底地形を示し、ローマ字のついた赤丸は1級河川を、小さい赤丸は2級河川の位置を示す。b)低次生態系モデルの構成。PHYは植物プランクトン、ZOOは動物プランクトン、PONはデトリタス

#### 4. 2. 2 開発した数値モデルの精度検証

本モデルで計算された表層と底層のDINと観測値の空間分布を図-2.5に示す。季節変化に着目すると、表層のDIN濃度は5月、7月に低く、1月が最も高い。底層のDIN濃度は周年を通して高いが、瀬戸内海中央部の燧灘などでは5月、7月の濃度は低い傾向にある。空間的にみると、大阪湾や播磨灘のDIN濃度は他の海域より高い傾向にあり、特に岸近くの濃度が高いことが分かる。図-2.5iに示すように、観測値とモデル計算値の相関係数は0.71と高く、本モデルがDINの季節変化や空間変化をよく再現していることが分かる。ただし、大阪湾奥など岸近くの高濃度なDINの分布は再現できていない。これは、本モデルでは、河川からの栄養塩負荷だけを与えており、事業所等から直接負荷される栄養塩を考慮していないためと考えられる。

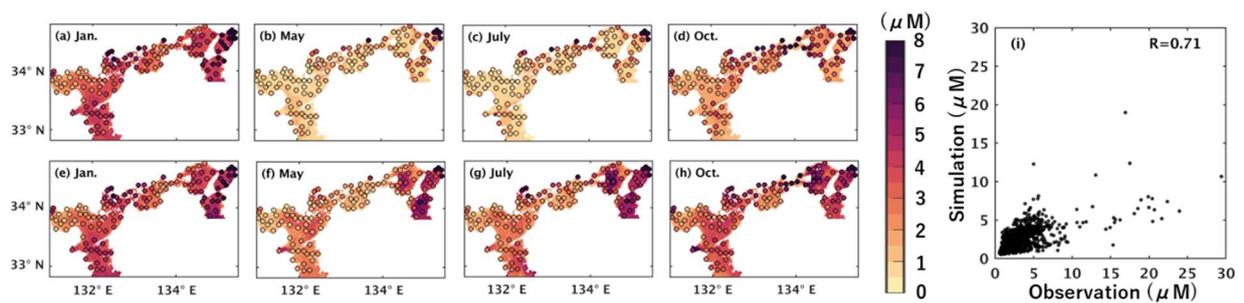


図-2.5 月平均の(a-d)表層と(e-h)底層のDIN濃度分布。丸印が観測値を表し背景の色がモデル結果を示す。(i)DIN濃度の観測値とモデル計算値との比較

栄養塩を使い光合成を行う植物プランクトン量(クロロフィル濃度)の再現性を図-2.6に示す。表層のクロロフィル濃度は5月と10月に高く、成層が発達し表層の栄養塩濃度が低くなる7月と、低水温のため植物プランクトンの活性が低下する1月に濃度が低くなっている。底層は光環境がよくないため、表層に比べクロロフィル濃度は低い。空間分布は栄養塩濃度の分布と同様で、瀬戸内海東部海域で高い傾向があり、特に岸近くで高濃度となっている。観測値とモデル計算値の相関係数は0.63と高く、本モデルが植物プランクトン量をよく再現していることが分かる。ただし、DINと同様

に、岸近くの高濃度なクロロフィル濃度は再現できていない。これは本モデルが事業所からのDINの負荷を考慮していないため、岸近くでDIN濃度が実際より低く、その結果植物プランクトンの光合成量が小さくなったためと考えられる。

DIN濃度、クロロフィル濃度ともに、東部瀬戸内海の岸近くの高濃度域において観測値よりもモデル計算値が低い値となっているが、季節変化と空間分布はよく再現できており、本モデルにより瀬戸内海の低次生態系をめぐる物質循環が再現されていると言える。

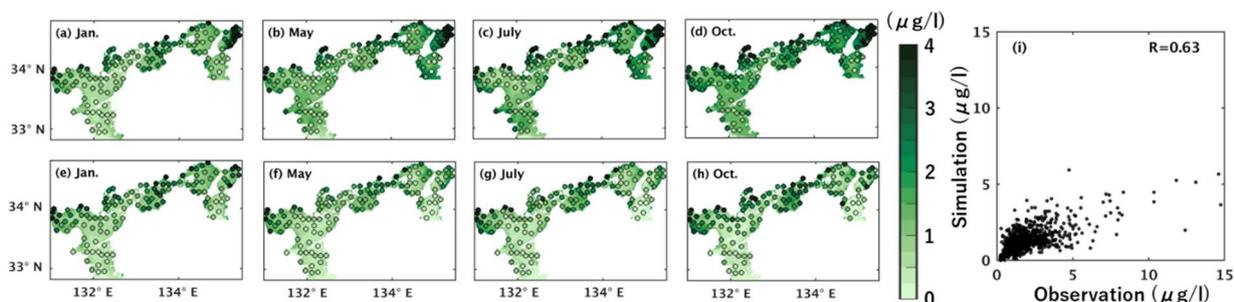


図-2.6 月平均の(a-d)表層と(e-h)底層のクロロフィル濃度分布。丸印が観測値を表し背景の色がモデル結果を示す。(i)クロロフィル濃度の観測値とモデル計算値との比較。

#### 4. 3 播磨灘を対象とした低次生態系ボックスモデルの開発

##### 4. 3. 1 低次生態系ボックスモデルを用いた植物プランクトン量の長期変化の解明

播磨灘では高度経済成長期から現在までに、植物プランクトンの種が大きく変化したことが報告されている<sup>7)</sup>。このことから、播磨灘の低次生態系における物質循環を把握するためには、複数の植物プランクトンや動物プランクトンを考慮した生態系モデルが必要である。そこで、栄養塩4種類、植物プランクトン4種類、動物プランクトン4種類、デトリタス3種類の、合計15予報変数の低次生態系ボックスモデルを作成した。このモデルでは播磨灘を1つのボックスとみなし、境界条件として2000年～2013年の平均値として水温、日射量、底層から有光層への栄養塩供給を与え、ボックス内の栄養塩濃度、植物プランクトン量などの季節変化を計算した。栄養塩（硝酸とリン）と、すべての植物プランクトンの合計量の季節変化は観測値をよく再現した（図-2.7）。一方、小型魚のえさとなる動物プランクトン（カイアシ類）については、春の値を再現できなかった。動物プランクトンの再現性に少し問題が残るが、栄養塩濃度や水温変化に対する植物プランクトンや動物プランクトンの応答を調べるための実験を行った。具体的には、底層もしくは表層の栄養塩濃度を2000～2013年の平均値から年率3%で14年間減少させたケース (Case 1, 2)、水温を年率0.8%で14年間上昇させたケース (Case 3)、年率3%の底層栄養塩の減少と年率0.8%の水温上昇を同時に与えたケース (Case 4) の実験を行い、栄養塩、植物プランクトン、動物プランクトンの14年間での変化率を調べた（表-2.1）。計算結果と観測値を比較したところ、Case 4の底層栄養塩の減少と水温上昇を同時に起こした場合の計算結果が、栄養塩とカイアシ類が減少し、全植物プランクトン量は変化しないという観測事実と最も一致した。栄養塩の低下と水温上昇が、各種の植物プランクトンに与える影響を感度解析により調べた。その結果、低温・富栄養環境に適する大型の珪藻は、栄養塩低下と水温上昇により減少し、高温・貧栄養環境に適する小型の植物プランクトンが増加したことが分かった。つまり、栄養塩低下と水温上昇による大型の植物プランクトンの減少を小型の植物プランクトンが相殺し、全植物プランクトン量は長期的に変化しなかったことが分かった。サブテーマ1の結果でも、栄養塩の低下に関わらず基礎生産力には大きな変化がみられてなく、本モデル結果と整合的であり、モデルで示唆されたような理由で播磨灘では栄養塩濃度が低下したにも関わらず、基礎生産力が長期的に変化していない可能性が示唆された。

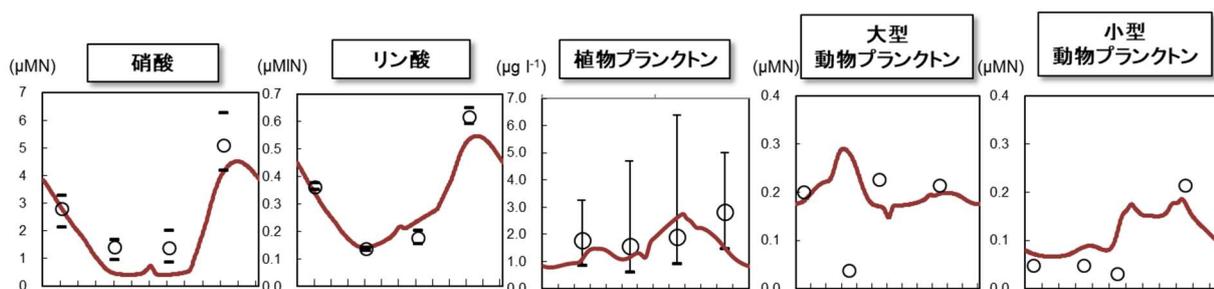


図-2.7 ボックスモデルにより計算された硝酸、リン酸、全植物プランクトン、大型および小型動物プランクトン量の季節変化。黒丸は観測値、赤線はモデルによる計算値

表-2.1 栄養塩と水温をそれぞれ年率3%と0.8%で14年間変化させた計算ケースと、各計算ケースにおける14年間での計算要素の変化率(%)と観測値

計算要素	Case1 底層栄養塩減少	Case2 表層栄養塩減少	Case3 水温上昇	Case4底層栄養塩 減少+水温上昇	観測値
<b>NO<sub>3</sub></b>	-15.7	-32.5	-3.4	-18.5	-26.9
<b>PO<sub>4</sub></b>	-11.4	-32.5	-1.2	-12.6	-19.4
<b>全植物</b>	-3.8	-9.4	+1.6	-2.5	-0.3
低温型ケイ藻	-9.2	-22.8	-8.2	-17.6	ND
ケイ藻(小型)	-1.7	-4.6	+6.2	+4.7	ND
全ケイ藻	-4.4	-9.8	+0.9	-3.8	ND
ナノ植物	-0.9	-8.6	-1.6	-2.2	ND
ピコ植物	+1.6	-2.9	+18.6	+20.8	ND
ヤムシ・オキアミ	-1.8	-5.4	-6.5	-8.2	ND
<b>カイアシ</b>	-3.5	-9.5	-5.8	-9.2	-14.6*
微小動物	-2.6	-8.5	+2.2	-0.4	ND

#### 4. 3. 2 3次元モデルのための低次生態系モデル開発

上述の15予報変数の低次生態系モデルを、3次元物理モデルに組み込むと、変数が多すぎるため計算コストが高くなる。特に、各起源の栄養塩の追跡計算においては、考慮する栄養塩起源が多くなると、その数の倍数で変数が増えるため、播磨灘での優先植物プランクトンの変化を表現しつつ、計算コストの低いモデルが必要となる。そこで、サブテーマ1が観測地点としている播磨灘中央部を対象とした、上記のモデルから予報変数を3変数減らした低次生態系ボックスを構築した。予報変数は硝酸、アンモニア、溶存態無機リン(DIP)、3種類の植物プランクトン、2種類の動物プランクトン、2種類のデトリタス、溶存態有機窒素、溶存態有機リンの合計12変数である。

モデルの再現性を確認するため、サブテーマ1の観測で得られたDIN、溶存態無機リン(DIP)、小型プランクトン、大型プランクトンの季節変化を比較した(図-2.8)。DINとDIPの季節変化は良く再現されていた。小型プランクトンの季節変化については、夏季の値が少し高めであるが、秋以降急激に減少するなど、その季節変化は再現できた。大型の植物プランクトンについても、春に観測値より少し高めの値となっているが、全体的な季節変化は再現できた。

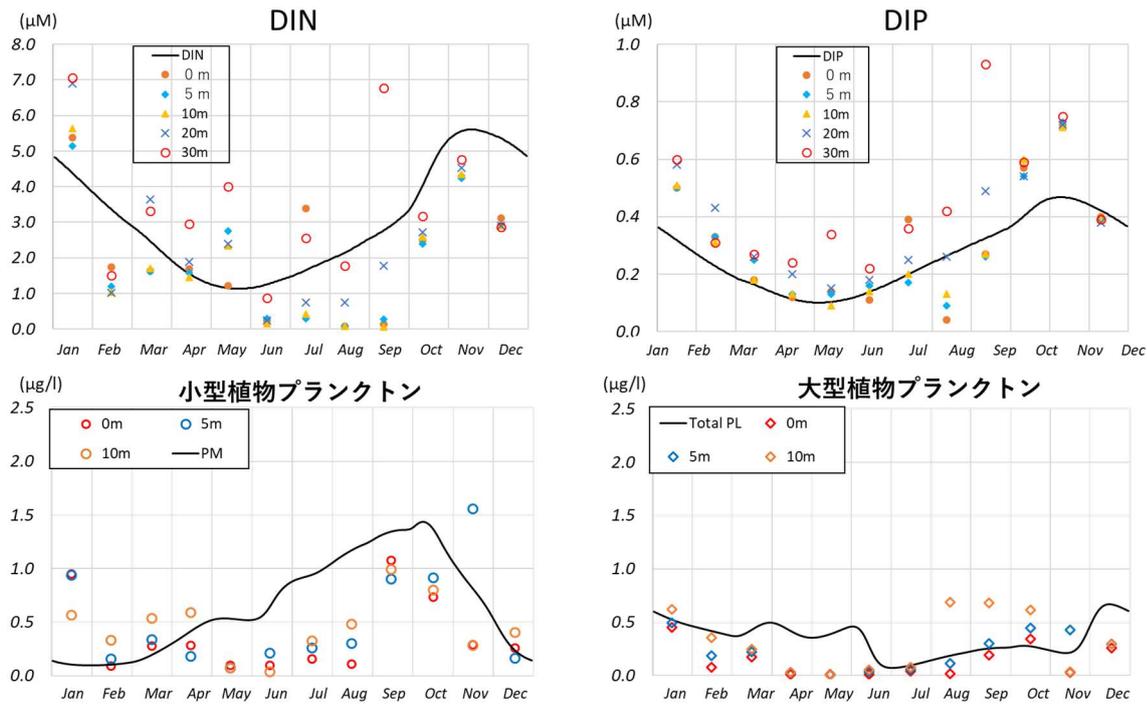


図-2.8 低次生態系ボックスモデルにより計算された栄養塩 (DIN, DIP) と植物プランクトン量の観測値との比較。黒実線がモデルの計算値

#### 4. 4 播磨灘を対象とした物理—底質—低次生態系モデルの開発

##### 4. 4. 1 3次元物理モデルの開発と播磨灘の特徴的な海洋構造

播磨灘の栄養塩循環と優先する植物プランクトンの変化を調べる事が可能な、瀬戸内海全域を対象としたモデルよりもより高解像度で、より複雑な低次生態系モデルを組み込んだ3次元モデルの開発を行うため、まず物理モデルを開発した。本モデルの計算領域は、燧灘中央部から紀伊水道中央部とした (図-2.9)。

水平解像度は約500 m、鉛直の層数は11層とした。西と南の開境界では、瀬戸内海全域モデルの

計算結果を使い、水温、塩分、流速、水位変動を与えた。海面での熱フラックスと風応力は、長期平均した日平均値を与えた。河川流量は計算領域内の20の一級および二級河川の2000年～2019年で平均した日平均流量を与えた。物理モデルの精度検証は、計算領域内の18の検潮所における潮汐調和定数との比較と、香川県と兵庫県により観測された水温、塩分により行った。物理モデルにより計算された主要4分潮の潮汐振幅と位相差と、観測値のそれらとの相関係数は、それぞれ0.96、0.95と高く、精度よく潮汐が再現できた。各季節の水温と塩分の観測値とモデルの比較から、冬季のモデルの水温が1℃程度観測値より高く、また、夏季のモデルの表層塩分が0.5 psu程度観測値より高かったが、季節変化や水温、塩分の空間分布パターンは凡そ再現できていた。また、夏季に播磨灘

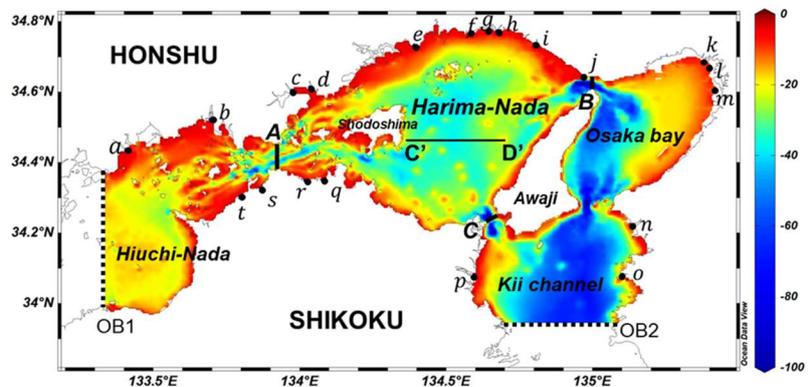


図-2.9 播磨灘モデルの計算領域。図中のa～tは河口を示しており、カラーは水深を示している。

中央部に発達する底部冷水も中心位置が少し違うものの、観測された分布パターンを凡そ再現できていた（図-2.10）。

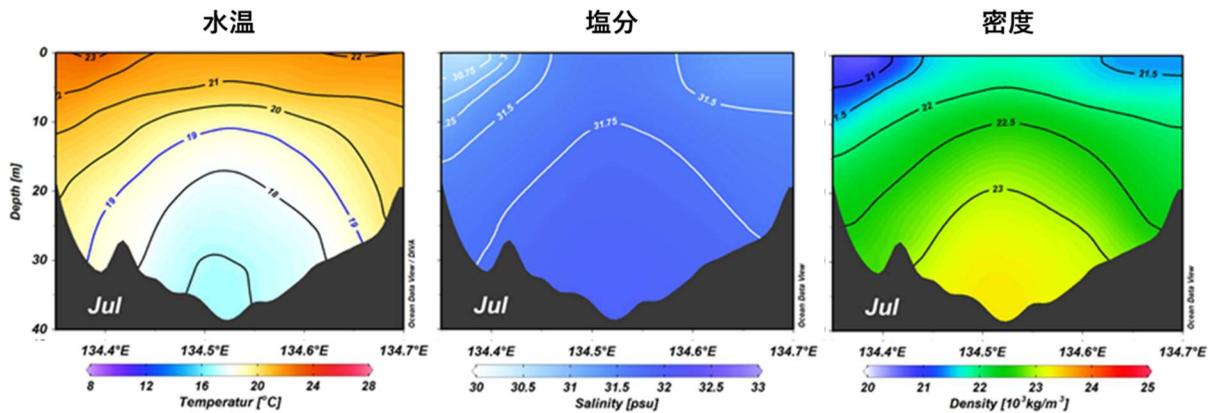


図-2.10 図-2.9のC' -D' 断面における7月の水温、塩分、密度の断面図

本モデルで再現された、夏季に播磨灘中央部で発達する底部冷水の分布と海底堆積物表層の有機物量の分布が一致していること<sup>8)</sup>、底部冷水中の栄養塩濃度が高くなることから、この冷水の発達は播磨灘の低次生態系に与える影響が大きいと考え、底部冷水の特徴と形成メカニズムを調べた。播磨灘の底部冷水は、冬に冷却された水塊が春ごろからの成層により底部に取り残されることで形成され、秋の海面冷却により消失する。底部冷水の水温は初春から夏にかけて約12.5°C上昇する。この水温上昇は、底部冷水の周辺からの水平的な熱の移流により起こっている。また、底部冷水の発達により水平の圧力勾配が生じ、これにコリオリ力がバランスすることで表層では反時計回りの循環流が形成される。底部冷水の発達には春の海面熱フラックスの影響が大きい。また、海底地形をフラットにした計算を行うと、底部冷水が形成されないことから、播磨灘中央部の水深が周辺より深いという地形が（図-2.9）、底部冷水の形成にとって重要な要素となっている。

#### 4. 2. 2 3次元物理—底質—低次生態系モデルの開発

播磨灘における栄養塩循環と低次生態系の応答を明らかにするため、上記の3次元物理モデルにボックスモデルとして検討した予報変数12の低次生態系モデルを結合した（図-2.11）。西と南の開境界における生態系に関する変数の境界値は、瀬戸内海全域を対象としたモデルの出力を使い与えた。ただし、瀬戸内海全域モデルでは栄養塩はDINのみ、植物プランクトンは1種類しか考慮していないことから、播磨灘中央部での硝酸とアンモニアの濃度比と、植物プランクトンの構成比により境界条件を与えた。河川からの栄養塩負荷量は、一級河川については瀬戸内海全域モデルと同様に国土交通省の河川水質データから与え、兵庫県の一級河川については、兵庫県の水質調査データの2000年から2019年までの平均値として与えた。底質からの栄養塩溶出量については、サブテーマ1が求めた海底堆積物表層の総窒素と水温の関係式を使い与えた。ここで、底質の総窒素の分布は、環境省の瀬戸内海環境情報基本調査の第3回と第4回の平均値（2001年～2017年）を与え、底層の水温は物理モデルにより逐次計算された値を使った。

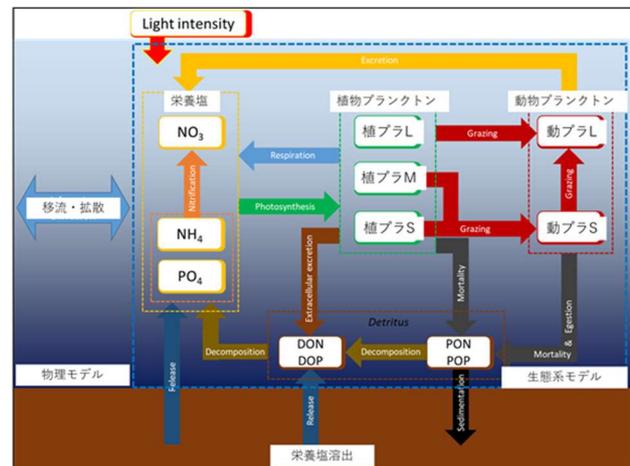


図-2.11 播磨灘を対象とした3次元モデルに組み込んだ低次生態系モデル。

図-2.12に本モデルにより計算された1, 5, 7, 10月の表層と底層のDINと、環境省の広域総合水質調査の観測値を示す。表層のDIN濃度は1月と10月に高く、5月と7月はかなり低い値となっている。底層のDIN濃度については、水塊が鉛直的に混合している1月と10月は表層とほぼ同じ濃度となっており、成層が発達する5月と7月は表層より高い値となっている。特に、播磨灘中央部の5月と7月の底層のDIN濃度は高い。瀬戸内海全域モデルと同様に、事業所からの栄養塩負荷を与えていないため、大阪湾奥ではモデルによる計算値は観測値より濃度が低いが、播磨灘においてはモデルによる計算値は観測値とよく一致している。計算領域全体でのモデル計算値と観測値の相関係数は0.59であった。図-2.13に表層と底層のクロロフィル濃度の季節変化を示す。クロロフィル濃度は1月を除き濃度が高く、特に大阪湾の湾奥と播磨灘北部の岸沿いに濃度の高い分布がみられる。底層のクロロフィル濃度は、光環境が悪いためすべての季節において濃度は低い。表層のクロロフィル濃度のモデル計算値と観測値を比較すると、1月の大阪湾と7月の播磨灘においてクロロフィル濃度の計算値が観測値より低い傾向があるが、全体的には観測値をよく再現している。クロロフィル濃度の計算値と観測値の相関係数は0.77と高い値となっている。図-2.14にサブテーマ1が観測地点としている播磨灘中央部の観測点NHでの、植物プランクトンサイズ組成の季節変化の観測値とモデル計算値を示す。観測結果を見ると、小型の植物プランクトン(PM)は冬にその割合が低く、春から秋の間優先している。中型と大型の植物プランクトン(PLp)は秋から冬に割合が多くなる傾向がある。モデル結果は、冬に大型のプランクトンの優先度が観測よりも大きめになっているものの、3種類の植物プランクトンのサイズ組成やその季節変化が凡そ再現できている。

DIN濃度とクロロフィル濃度の空間分布と、その季節変化の観測値との比較、植物プランクトンのサイズ組成の季節変化の比較結果から、本モデルが播磨灘の低次生態系における物質循環を再現していると言える。

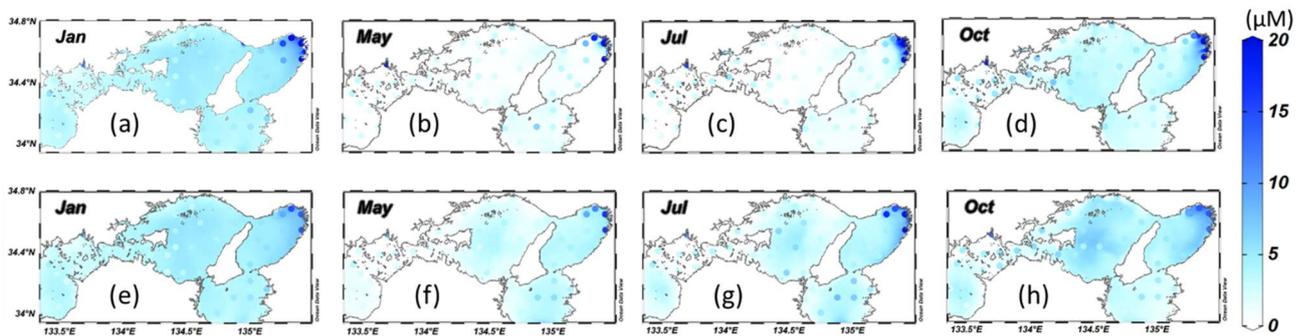


図-2.12 月平均の(a-d)表層と(e-h)底層のDIN濃度分布。丸印が観測値を表し背景の色がモデル結果を示す。

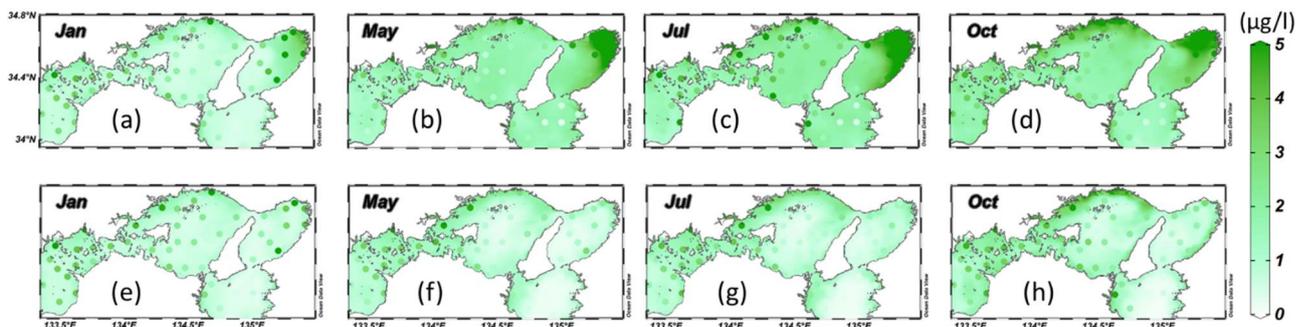


図-2.13 月平均の(a-d)表層と(e-h)底層のクロロフィル濃度分布。丸印が観測値を表し背景の色がモデル結果を示す。

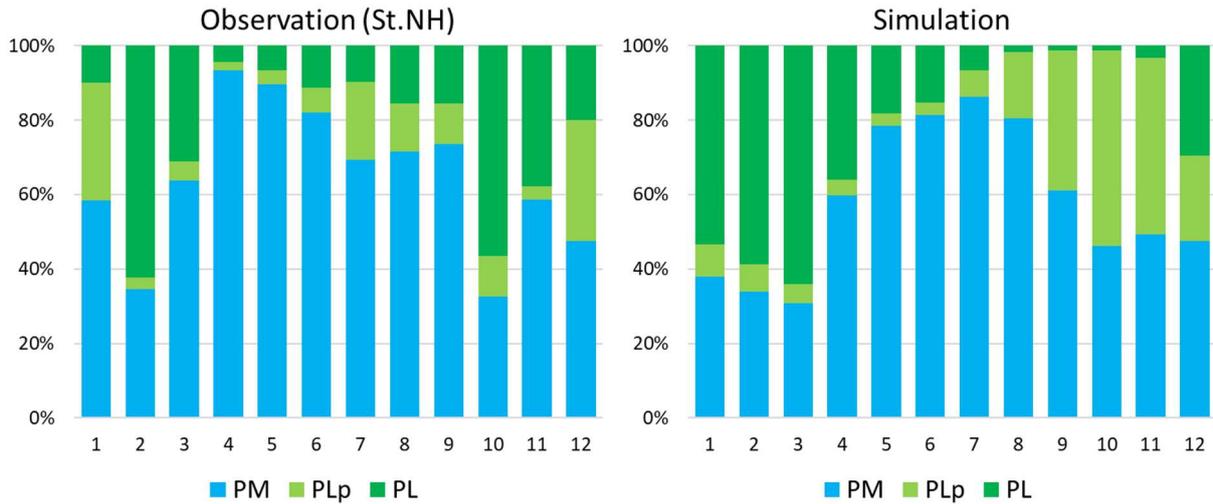


図-2.14 播磨灘中央部における小型 (PM)、中型 (PLp)、大型 (PL) の植物プランクトンのサイズ組成の観測値とモデル計算値の季節変化。

4. 5 物理—底質—低次生態系モデルによる栄養塩追跡

4. 5. 1 瀬戸内海の栄養塩に占める河川起源、底質起源、太平洋起源の栄養塩

瀬戸内海の栄養塩 (DIN) に占める太平洋起源、河川起源、底質起源の栄養塩の寄与率を明らかにするため、瀬戸内海全域を対象とした物理—底質—低次生態系モデルを使い、各起源の栄養塩追跡計算を行った。追跡計算は、それぞれの起源の栄養塩、各起源の栄養塩を使って増殖する植物プランクトン、さらに各起源の栄養塩を使い増殖した植物プランクトンを捕食する動物プランクトン、各起源の栄養塩を使った植物、動物プランクトンの死骸等であるデトリタス、のように起源毎の栄養塩に対する予報変数を設定し計算を行った。各起源の栄養塩の初期値はゼロとし、4年間積分し定常に達した4年目の計算結果を解析に使用した。

瀬戸内海全域で平均した太平洋起源、河川起源、底質起源のDINの寄与率は、それぞれ、73%、10%、17%であり、太平洋起源の栄養塩の占める割合が最も高かった。各湾灘での寄与率の分布をみると、太平洋に面する豊後水道や紀伊水道では、太平洋起源のDINの寄与率は90%程度と高い (図-2.15)。一方で、瀬戸内海中央部に位置する備後灘や備讃瀬戸では太平洋起源のDINの寄与率は30%以下と小さく、これらの湾灘において最も寄与率が高いのは底質起源のDINであった。河川起源のDINの寄与率が高いのは大阪湾、播磨灘、備讃瀬戸で

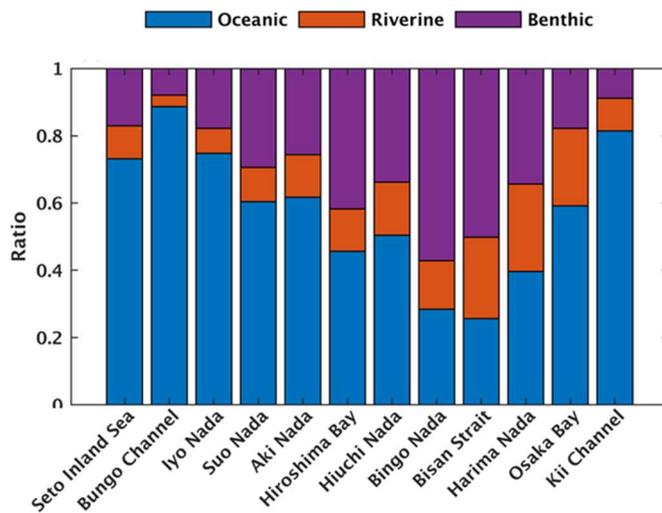


図-2.15 瀬戸内海の各湾灘の栄養塩に占める、太平洋起源、河川起源、底質起源栄養塩の割合。

あり、20%程度であった。この計算結果から、河川からの栄養塩負荷を調整することにより対象海域の栄養塩濃度をコントロールできる割合は、瀬戸内海ではそれほど大きくないことが示唆される。また、太平洋起源の栄養塩の割合が大きい海域においては人為的な栄養塩濃度のコントロールが難しいと考えられる。

図-2.16に瀬戸内海全域における太平洋起源、河川起源、底質起源のDINフラックスの季節変化を示す。太平洋起源のDINフラックスは、冬季から春季に少なく、夏季に最も大きくなる。これは梅雨時期の河川流量の増加と夏季の水温上昇により、瀬戸内海の密度が低下し、表層を瀬戸内海の海水が太平洋へと輸送され、底層を太平洋の海水が瀬戸内海へ流入する重力循環が発達するためと思われる<sup>9)</sup>。河川からのDINフラックスの変化は河川流量に依存しており、

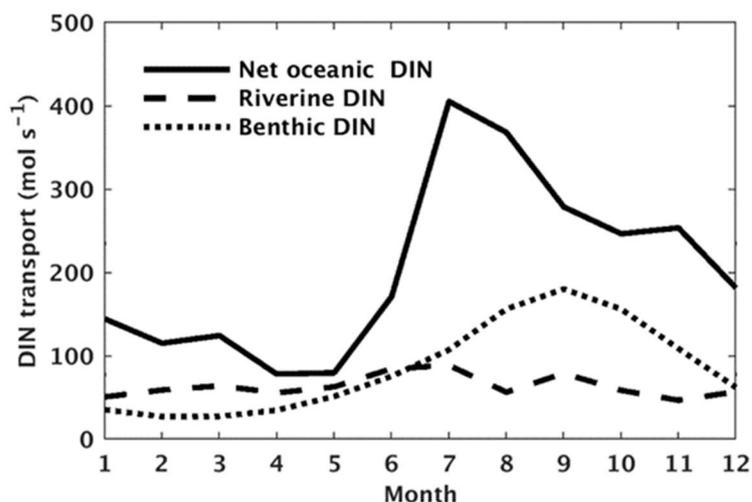


図-2.16 瀬戸内海へ供給される太平洋起源、河川起源、底質起源のDINフラックスの季節変化。

河川流量の増加する6, 7月に多くなっている。底質起源のDINフラックスは、底質表面の総窒素(TN)と底層水温に依存しており、本モデルでは底質表面のTNが季節変化しない設定になっているため、底層水温が最も高くなる9月に最大値をとっている。寄与率の最も高い太平洋起源のDINフラックスは、豊後水道と紀伊水道の栄養塩濃度により経年的に変化しているはずである。豊後水道底層の栄養塩濃度は陸棚斜面域の底層水が豊後水道内に進入する底入り潮の強度により変化することが報告されており<sup>10)</sup>、紀伊水道底層の栄養塩濃度については黒潮の離接岸により大きく変化することが報告されている<sup>11)</sup>。このことから、瀬戸内海の栄養塩濃度は太平洋起源の栄養塩フラックスの変化により大きく変化している可能性が示唆される。

#### 4. 5. 2 瀬戸内海の低次生態系における窒素循環

栄養塩管理においては、瀬戸内海の低次生態系をめぐる窒素循環の理解が不可欠である。図-2.17は本モデルにより計算された、瀬戸内海全域での窒素循環を示している。DINの現存量は $26.0 \times 10^8$  molと粒子態の窒素(PHY+ZOO+PON)の $16.76 \times 10^8$  molよりも大きい。DINの河川、底質、太平洋からのフラックスはそれぞれ、64 mol/s、86 mol/s、799 mol/sであり、太平洋から供給されるDINが圧倒的に大きい。太平洋起源のDIN、植物プランクトン、動物プランクトンの現存量は、他の2つの起源(河川と底質)に比べ大きく、瀬戸内海の低次生態系は太平洋起源の栄養塩に大きく依存していることが分かる。一方で、太平洋起源の窒素の現存量は、系内へ供給されるDINフラックスが大きいかに関わらず現存量とフラックスの比は他の2つの起源の窒素に比べ小さく、利用効率が低いことが分かる。これは、太平洋起源のDINが豊後水道と紀伊水道の底層から多く供給されており、すぐには光合成に使えないためと思われる。太平洋起源と河川起源の窒素循環を比較すると、太平洋起源と河川起源のDINフラックスは12:1、それらのDIN現存量の比は7:1であるが、植物プランクトン現存量の比は4:1である。つまり、河川からの栄養塩フラックスを変化させることによる栄養塩濃度変化は大きくないが、植物プランクトンや動物プランクトンに与える影響は大きいと予想される。また、底質起源のDINによる窒素の現存量は河川起源のそれよりも大きい。サブテーマ1の結果から、底質表面のTN濃度の長期的な変化は大きくないことが示されており、栄養塩管理においては対象海域の底質の状態を把握することも重要であることが分かる。

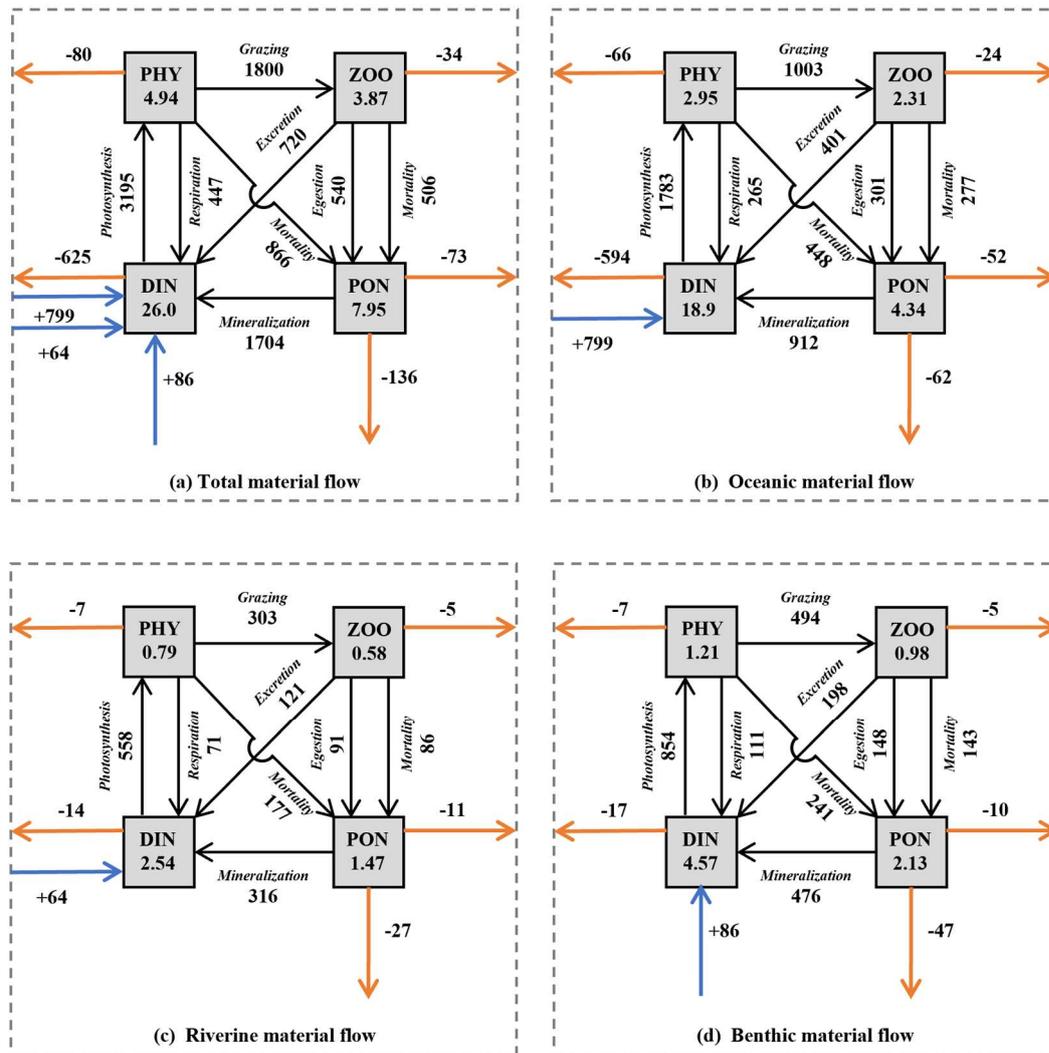


図-2.17 瀬戸内海の窒素循環。(a)全窒素の循環、(b)太平洋起源の窒素の循環、(c)河川起源の窒素の循環、(d)底質起源の窒素の循環。青矢印は流入を、オレンジの矢印は流出を示し単位は  $\text{mol/s}$ 。DIN, PHY, ZOO, PONはそれぞれ溶解態の栄養塩、植物プランクトン、動物プランクトン、デトリタスを示しており、数字は現存量。現存量の単位は  $\times 10^8 \text{ mol}$

#### 4. 5. 2 河川からの栄養塩フラックスの変化に対する播磨灘の低次生態系の応答

播磨灘を対象とした物理-底質-低次生態系モデルを使い、河川からの栄養塩負荷量の変化に対する低次生態系の応答を調べた。河川からの栄養塩負荷量の変化率は、観測データの変動幅を参考にして最大70%とし、2000年から2019年の平均値に対し、10、20、30、70%増加させた計算を行った。図-2.18は鉛直平均したDINの年平均値を示している。10%の栄養塩負荷量の増加では、DIN濃度に大きな変化は見られない。20%、30%増加させた場合、播磨灘中央部のDIN濃度が  $1 \mu\text{M}$  程度増加しているが、岸付近のDIN濃度には大きな変化はみられていない。一方、大阪湾全体のDIN濃度は大きく増加している。これは、淀川からの栄養塩負荷量がこの海域では圧倒的に大きいためである。70%まで増加させた結果を見ると、播磨灘全域のDIN濃度は気候値に比べ  $1 \mu\text{M}$  程度増加しており、播磨灘の広域において  $4 \mu\text{M}$  以上の濃度となっている。大阪湾の濃度は湾奥で  $10 \mu\text{M}$  以上となっており富栄養化状態と思われる。播磨灘のDINに占める各河川起源の栄養塩の割合を計算したところ、淀川起源のDINが占める割合が30%と高く、播磨灘の栄養塩濃度を変化させるには淀川からの栄養塩負荷を調整するのが最も効率的である。播磨灘では栄養塩濃度が低下する貧栄養化が問題となっており、これを解消するには淀川からの栄養塩負荷を増加させることが必要であるが、この対応を行うと大

阪湾の富栄養化が進行するため、実際の栄養塩管理においては、淀川からの栄養塩負荷を増加させるのは難しいことがわかる。

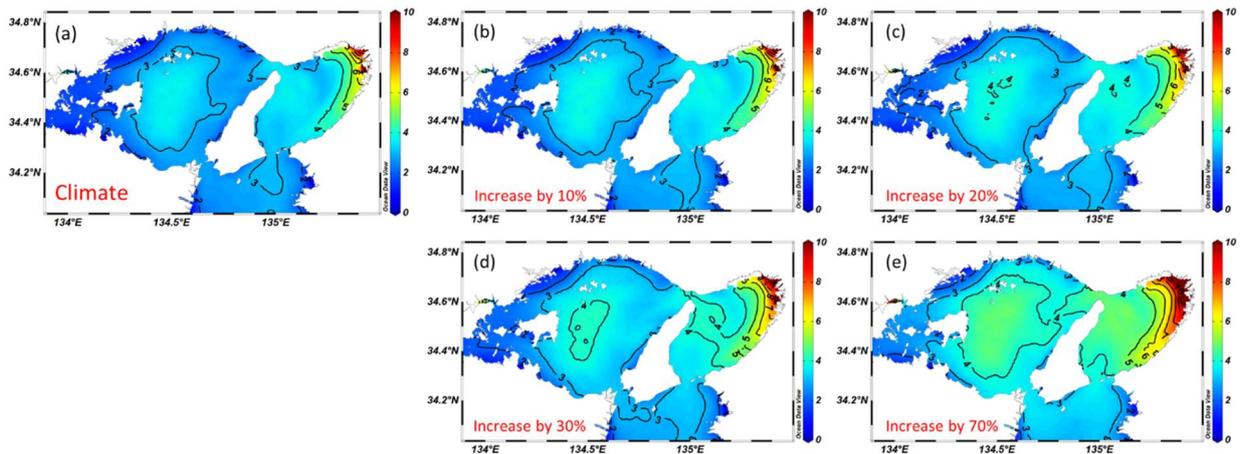


図-2.18 鉛直平均した年平均DINの分布図。(a) 気候値、河川負荷量を気候値より(b)10%増加、(c) 20%増加、(d) 30%増加、(e) 70%増加させたケース

図-2.19に河川からのDIN負荷の変化による全植物プランクトン、大型、中型、小型植物プランクトンの濃度の季節変化を示す。全植物プランクトン濃度の絶対値を比べると、河川からのDIN負荷量を70%増加させた場合においても、その最大値は気候値と大きく変わってなく、栄養塩濃度の変化に対し植物プランクトンの基礎生産が反応していないことが示唆される。サイズ毎の植物プランクトンの季節変化に着目すると、10, 20, 30%のDIN負荷量を増加させたケースでは、気候値の季節変化とほとんど変わらない結果となっている。一方、DIN負荷量を70%増加させたケースでは、春から初夏において中型の植物プランクトン量が増加し、一方、小型の植物プランクトン量が低下している。この結果は、播磨灘においては図-2.18に示す程度の栄養塩の増加では、全植物プランクトンの量はほとんど変化しないが、植物プランクトンのサイズ組成に変化がでることを示している。栄養塩濃度の変化に対し植物プランクトン量が応答しないという結果は、サブテーマ1の観測結果とも整合的である。播磨灘の沿岸を除く海域の栄養塩濃度はもともとそれほど高くないため、この程度の栄養塩濃度の増加では植物プランクトンによる基礎生産は変化しないものと思われる。

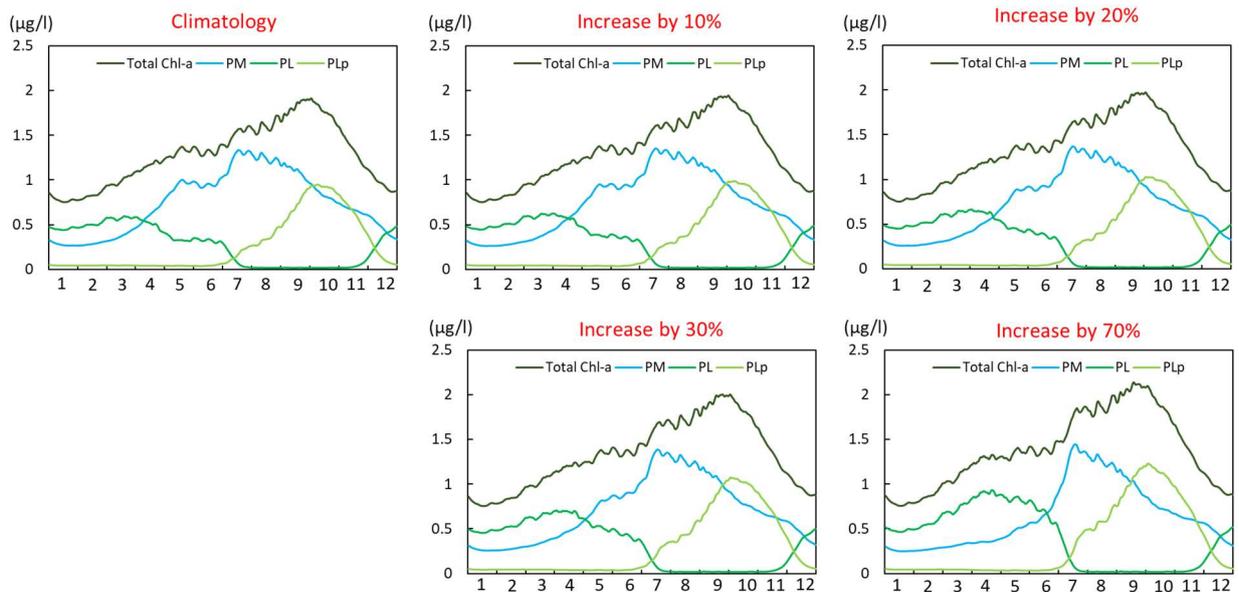


図-2.19 河川からの栄養塩負荷量を気候値、10%, 20%, 30% 70%増加させた場合の、全植物プランクトン、小型(PM)、中型(PL)、大型(PLp)植物プランクトン濃度の季節変化

## 5. 研究目標の達成状況

播磨灘および瀬戸内海の栄養塩に占める河川起源、太平洋起源、底質起源の栄養塩の割合と、その変化を定量的に示すことのできる2種類の物理—底質—低次生態系モデルを開発した。また、これらのモデルの開発のために、海底からの栄養塩溶出を計算可能な底質モデル、瀬戸内海全域を対象とした水平解像度1kmの高解像度瀬戸内海・黒潮低次生態系モデル、播磨灘を対象とした水平解像度500 mの3次元物理モデル、播磨灘を対象とした低次生態系ボックスモデルを新たに構築した。上記のように目標とした数値モデルはすべて開発でき目標を達成した。また、開発した物理—底質—低次生態系モデルにより、陸からの栄養塩供給量を変化させた場合の播磨灘の栄養塩濃度の応答を定量的に示し、栄養塩濃度が増加しても植物プランクトン濃度が大きく変化しないことを示した。河川からの栄養塩供給量の変化に対する播磨灘の低次生態系の応答を定量的に明らかにするという目標も達成した。

## 6. 引用文献

- 1) 武岡英隆, 村尾肇, 1997. 窒素、磷の流入負荷量の削減に対する水質の応答. 沿岸海洋研究, 34, 183-189.
- 2) Kawamiya, M., 2001. Mechanism of offshore nutrient supply in the western Arabian Sea, *J. Mar. Res.*, 59, 675-696
- 3) 左山幹雄, 相馬明郎, 高杉由夫, 2002. 沿岸域の水—堆積物境界面近傍における酸素の動態に対する流速の影響の実験的解析. 海岸工学論文集, 49, 996-1000.
- 4) Blumberg, A. F. and Mellor, G. L., 1987. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model, in: *Coastal and Estuarine Sciences*, vol. 4, edited by: Heaps, N. S., American Geophysical Union, Washington, D. C., 1-16.
- 5) Chang, P.-H., Guo, X., and Takeoka, H., 2009. A numerical study of the seasonal circulation in the Seto Inland Sea, Japan, *J. Oceanogr.*, 65, 721-736.
- 6) 多田 邦尚, 中嶋 昌紀, 山口 一岩, 朝日 俊雅, 一見 和彦, 2018. 沿岸海域における栄養塩濃度決定要因と堆積物. 沿岸海洋研究 55, 113-124.
- 7) Nishikawa, T., Hori, Y., Nagai, S., Miyahara, K., Nakamura, Y., Harada, K., Tanda, M., Manabe, T., Tada, K., 2010. Nutrient and phytoplankton dynamics in Harima-Nada, Eastern Seto Inland Sea, Japan during a 35-year period from 1973 to 2007. *Estuaries and Coasts*, 33, 417-427.
- 8) Yamaguchi, H., Hirade, N., Kayama, M., Ichimi, K., Tada, K., 2014. Total organic carbon and nitrogen contents in surface sediments of Harima Nada, eastern Seto Inland Sea, Japan: a comparison under two different trophic states. *J. Oceanogr.*, 70, 355-366.
- 9) Morimoto, A., Dong, M., Kameda, M., Shibakawa, T., Hirai, M., Takejiri, K., Guo, X., Takeoka, H., 2022. Enhanced Cross-Shelf Exchange Between the Pacific Ocean and the Bungo Channel, Japan Related to a Heavy Rain Event, *Front. Mar. Sci.*, 9, 869285, <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.869285>
- 10) 武岡英隆, 2020. 豊後水道の急潮と底入り潮. 沿岸海洋研究, 58 (1), 19-43.
- 11) Takashi, T., Fujiwara, T., Sumitomo, T., Sakamoto, W., 2006. Prediction of slope water intrusion into the Kii Channel in summer. *J. Oceanogr.*, 62, 105-113.

### Ⅲ. 研究成果の発表状況の詳細

#### (1) 誌上発表

##### <査読付き論文>

###### 【サブテーマ1】

- 1) M. NAKAKUNI, N. LOASSACHAN, K. ICHIMI, S. NAGAO and K. TADA: Regional Studies in Marine Science, 50, 102093 (2022), Biophilic elements in core sediments as records of coastal eutrophication in the Seto Inland Sea, Japan (IF:2.1)
- 2) K. TADA, M. NAKAKUNI, H. YAMAGUCHI and K. ICHIMI: La mer (2023), Changes in nutrients and their effects on fisheries after the introduction of land-based nutrient loading regulation in the Seto Inland Sea since 1973: A review. (in press)

###### 【サブテーマ2】

- 1) 森本昭彦、柴川大雅、滝川哲太郎、平井真紀子、三門哲也、美山透(2021)：沿岸海洋研究(59巻, 1号), 11-20 (2021), 豊後水道の沿岸定線観測点における潮流調和定数の推定と残差流の季節変化
- 2) J. ZHU, J. SHI and X. GUO: Ocean Science, 18, 659-673 (2022), Interannual variation of a bottom cold water mass in the Seto Inland Sea, Japan (IF:4.3)

##### <その他誌上発表(査読なし)>

###### 【サブテーマ1】

- 1) 多田邦尚：水環境学会誌、44, 5, 137-141 (2021)  
「沿岸海域における基礎生産と栄養塩濃度、堆積物からの栄養塩溶出」

###### 【サブテーマ2】

- 1) 吉江直樹、張勁、小松輝久：沿岸海洋研究、58(1), 45-47 (2020)  
「変わりゆく海：沿岸海域への温暖化の影響のまとめ」
- 2) 吉江直樹：JAMBIO New Letter, 10, 5-6 (2020)  
「現場観測と密に連携した沿岸生態系モデリング」
- 3) 吉江直樹：瀬戸内海、81, 74-77 (2021)  
「栄養塩類の働きを踏まえた高次生態系までの統合シミュレーションモデル構築のための課題整理」

#### (2) 口頭発表(学会等)

###### 【サブテーマ1】

- 1) K. TADA, M. NAKAKUNI, H. YAMAGUCHI and K. ICHIMI: EJEA Conference in Kagawa (2021)  
“Environmental Conservation and Fishery of the Seto Inland Sea, Japan”
- 2) 中國正寿, 山口一岩, 一見和彦, 多田邦尚：第29回度瀬戸内海研究フォーラム in 和歌山(2022)  
「播磨灘における海底泥からの栄養塩溶出の四季変動：栄養塩供給源として何割を占めるのか？」
- 3) 大井博誠, 中國正寿, 山口一岩, 一見和彦, 加三千宣, 多田邦尚：第29回度瀬戸内海研究フォーラム in 和歌山 (2022)  
「播磨灘における堆積物中の生元素から見た海洋環境の変化」
- 4) 中國正寿, 山口一岩, 一見和彦, 多田邦尚：日本海洋学会2022年度秋季大会 (2022)  
「播磨灘における海底泥からの栄養塩溶出の季節変動：現場観測とモデル化」

- 5) 大井惇誠, 中國正寿, 山口一岩, 一見和彦, 加三千宣, 多田邦尚: 日本海洋学会2022年度秋季大会 (2022)  
「瀬戸内海東部播磨灘における堆積物中の生元素の鉛直分布」

## 【サブテーマ2】

- 1) N. YOSHIE: PICES 2020 annual meeting(2020)  
“Coastal ocean observing systems in Japan”
- 2) 森本昭彦, 柴川大雅, 滝川哲太郎, 平井真紀子, 三門哲也, 美山透: 日本海洋学会秋季大会 (2020)  
「豊後水道の沿岸定線観測点における潮流調和定数の推定と残差流の季節変化」
- 3) 小川颯兵, 吉江直樹, 大西秀次郎: JpGU Meeting 2021 (2021)  
「瀬戸内海西部における栄養塩の長期変動とその供給機構に関する研究」
- 4) N. YOSHIE and S. HIRAMINE: JpGU 2021 (2021)  
“Interannual variations of the lower-trophic level ecosystem in the Haima-Nada, eastern Seto Inland Sea, Japan simulated by a plankton functional type model”
- 5) S. TONG-U-DOM, A. MORIMOTO, X. GUO and Q. LENG: 2021年度日本海洋学会秋季大会 (2021)  
“Seasonal variations in currents in the Harima-Nada and occurrence of the Bottom Cold Water”
- 6) 吉江直樹: 2022年度水圏生態系モデリングシンポジウム (2022)  
「栄養塩から高次生態系までを取り扱う統合モデルの現状と課題」
- 7) 吉江直樹: 第59回水環境フォーラム (2022)  
「栄養塩から高次生態系までを取り扱う統合モデルの現状と課題」
- 8) N. YOSHIE, S. OGAWA and H. ONISHI: JpGU 2022 (2022)  
“Spatio-temporal variations and supply mechanisms of nutrient in the western Seto Inland Sea”
- 9) TONG-U-DOM, A. MORIMOTO, N. YOSHIE, K. TADA, K. ICHIMI, H. YAMAGUCHI and M. NAKAKUNI: JpGU 2022 (2022)  
“Material cycle in lower trophic ecosystem in the Harima-Nada from 1970’ s to 2020’ s”
- 10) Q. LENG, X. GUO and A. MORIMOTO: 2022年度日本海洋学会秋季大会 (2022)  
“Flux of oceanic nitrogen into and its contribution to nitrogen inventory in the Seto Inland Sea”
- 11) S. TONG-U-DOM, A. MORIMOTO, Q. LENG and X. GUO: 2022年度日本海洋学会秋季大会 (2022)  
“Freshwater and nutrient contributions from rivers in the Harima-Nada”
- 12) X. GUO, Z. WU, J. SHI, K. TADA and H. GAO: 2022年度日本海洋学会秋季大会 (2022)  
“Seasonal variation of DIN flux at the sediment-water interface in Harima Nada”
- 13) Q. LENG, X. GUO and A. MORIMOTO: JpGU 2023 (2023)  
“A significant contribution of open ocean to nutrient and phytoplankton inventory in the Seto Inland Sea”
- 14) S. TONG-U-DOM, A. MORIMOTO, Q. LENG, X. GUO, N. YOSHIE, K. TADA, K. ICHIMI, H. YAMAGUCHI and M. NAKAKUNI: JpGU 2023 (2023)  
“Roles of riverine nutrients from different sources in the Harima-Nada and their contributions to primary production”

## (3) 「国民との科学・技術対話」の実施

### 【サブテーマ1】

- 1) かがわ長寿大学高松校にて「瀬戸内海の環境」について講演（主催：かがわ健康福祉機構、2021年6月8日、観客約120名）
- 2) かがわ長寿大学坂出校にて「瀬戸内海の環境」について講演（主催：かがわ健康福祉機構、2021年6月17日、観客約40名）
- 3) かがわ長寿大学高松校にて「瀬戸内海の環境」について講演（主催：かがわ健康福祉機構、2022年6月7日、観客約120名）
- 4) かがわ長寿大学坂出校にて「瀬戸内海の環境」について講演（主催：かがわ健康福祉機構、2022年6月16日、観客約40名）
- 5) 瀬戸内海の環境保全・創造研究ワークショップ「瀬戸内海の栄養塩循環―播磨灘を例とした瀬戸内海の栄養塩管理に向けて」（主催：特定非営利活動法人瀬戸内海研究会、2022年12月14日、神戸市 三宮研修センター、観客約250名）にて講演

### 【サブテーマ2】

- 1) 令和3年度特別講演会「栄養塩から高次生態系までを包括した統合モデル構築のための課題」（主催：瀬戸内海環境保全協会、2021年5月26日、神戸市 ラッセホール、観客約100名）にて講演
- 2) 令和3年度瀬戸内海の環境保全・創造研究ワークショップ（主催：特定非営利活動法人瀬戸内海研究会、2021年12月8日、神戸市 三宮研究センター、観客約100名）にて講演
- 3) 瀬戸内海環境保全セミナー「瀬戸内海の栄養塩はどこから供給されどのように循環しているのか」（主催：瀬戸内海知事市長会議、2022年7月27日、松山市 ANAクラウンプラザホテル松山、観客約50名）にて講演
- 4) 瀬戸内海の環境保全・創造研究ワークショップ「瀬戸内海の栄養塩循環―播磨灘を例とした瀬戸内海の栄養塩管理に向けて」（主催：特定非営利活動法人瀬戸内海研究会、2022年12月14日、神戸市 三宮研修センター、観客約250名）にて講演

## （4）マスコミ等への公表・報道等

### 【サブテーマ1】

- 1) 毎日新聞（2020年7月21日、全国版、14頁、『瀬戸内海の「美しさ」と「豊かさ」か』）
- 2) 山陽新聞（2023年3月11日、全国版、26頁、『ノリの色落ち年々悪化』）

### 【サブテーマ2】

特に記載すべき事項はない。

## （5）本研究費の研究成果による受賞

2022年度日本海洋学会沿岸海洋研究会 速水論文賞受賞

## （6）その他の成果発表

特に記載すべき事項はない。

#### IV. 英文Abstract

Development of Hydrodynamic-Benthic-Ecosystem Model for Management of Nutrient Load into the Seto Inland Sea

Principal Investigator: Akihiko MORIMOTO

Institution: Ehime University, Matsuyama City, Ehime, JAPAN

Tel: 089-927-9674 / Fax:089-927-9846

E-mail: morimoto.akhiko.cl@ehime-u.ac.jp

Cooperated by: Kagawa University

[Abstract]

Key Words: Seto Inland Sea, Numerical model, Nutrient management, Nutrient elusion, Oligotrophication, Primary productivity

Marine environmental problems such as red tide and hypoxia were occurred in the Seto Inland Sea during high economic growth period. To recover marine environment in the Seto Inland Sea, nutrient and organic matter loading have been controlled since 1970' s. As a result, nutrient concentration decreased, and the Seto Inland Sea becomes "beautiful sea" as before. On the contrary, fish catch has decreased continuously. It is claimed that decreasing of fish catch is caused by oligotrophication in the Seto Inland Sea. Although impact assessment of oligotrophication to higher trophic ecosystem is necessary, we have to understand nutrient cycle in lower trophic ecosystem at first because we do not have much knowledge for nutrient cycle in the Seto Inland Sea. In the present study, 3-dimensional Hydrodynamic-Benthic-Ecosystem coupled model is developed to clarify contribution ratio of oceanic, benthic, and river originated nutrients to nutrient in the Seto Inland Sea quantitatively. It is found that from the developed model that contribution ratios of oceanic, benthic, and river originated nutrient to the nutrient in the Seto Inland Sea are 73%, 17%, and 10%, respectively. We conduct sensitive analysis to change of nutrient supply from the Pacific Ocean. If nutrient supply from the Pacific Ocean is increased by 34%, nutrient concentration in the Seto Inland Sea would be increased by 26%. If nutrient supply from rivers in Harima-Nada is increased by 70%, DIN concentration in Harima-Nada would be increased by more than 1  $\mu\text{M}$ . However, phytoplankton would not be change so much. The result is consistent with observed result in Harima-Nada.