

## 1. 研究実施計画

課題名：沿岸海洋生態系における外部負荷及び内部生産有機物の循環過程に関する研究

研究機関名：独立行政法人 産業技術総合研究所

任期付研究員氏名：鈴村昌弘

### ① 研究の意義、目的、必要性

#### (1) 意義

近年、経済産業界において急速なグローバル化、ボーダレス化が進行しているが、環境問題においても地域的な環境汚染から気候変動をも含めた地球環境問題へと広域間に対応した研究が急務となっている。例えば、沿岸海域においては、赤潮、有機汚濁などの富栄養化問題の顕在化から既に久しいが、その後の研究・対策技術の向上に伴いこういった地域的環境汚染の改善が進んでいる。その一方で、地球温暖化ガスの最も主要な吸収源である海洋への物質の入り口として沿岸域を捉えようとする研究の重要性も認識されつつある。生物活動を支える窒素、リンなどの栄養塩、海洋の主要な炭素貯蔵庫である溶存有機物など膨大な物質が陸域から沿岸域を通過し海洋へと流入して行く。また、沿岸域は外洋域の10倍以上の生物生産性を持ち天然のバイオリクターとして可能性を秘めている。人類が地球・自然と共存しつつ持続的な発展を可能とするためには、現存する自然のシステムとの共存・利用が必須であり、沿岸海域における物質循環過程を解明することによって人間活動が海洋生態系に与える影響を評価し、さらに沿岸域の持つ潜在的な可能性を見出すべく、国立研究機関における独創的な基礎研究が求められている。

#### (2) 目的

富栄養化あるいは有機汚濁の進行した沿岸海域では、隣接する都市等から供給されるいわゆる外部負荷物質に加え、活発な生物活動に伴い発生する内部生産物質が混在している。また、様々な生物化学諸過程と物理過程が複雑に関連し、物質循環過程の解明を困難にしている。当該研究では、沿岸海域の有機物（溶存及び粒子態）を対象とした化学（生化学）的手法を用いたキャラクタリゼーションと起源推定を中心に、さらに溶存物質と粒子状物質の相互作用、堆積物中での初期統成過程の解明などを行うことによって、沿岸海域あるいは陸から外洋域までを含めたより広域間における有機物循環過程を明らかにすることを目的としている。

#### (3) 必要性

いわゆる富栄養化対策の結果、我が国の沿岸環境は改善の兆しを見せはじめている。しかしながら、一部の海域では未だに有機汚濁が顕在化しており、沿岸域に蓄積傾向にある栄養塩物質によって引き起こされる二次汚濁に関しては特に深刻な状況にある。このような問題の解決には、沿岸海域における外部負荷及び内部生産物質の量的・質的な把握が必須である。また一方で、沿岸域で生産された（存在する）

有機物は各種栄養塩成分に富み、その詳しい特性解明は海洋の肥沃化など将来的な海洋開発技術に向けての基礎的知見の蓄積にも大きく貢献するものと期待される。当該研究は、沿岸海域の環境保全・改善技術の構築に直接的に貢献するものであり、その実用化には高い関心が寄せられる。また、陸上-海洋間境界領域における物質循環過程の解明という世界的にも注目される研究分野であり、より広域的な視点からの研究が重要であることから、内湾から外洋域まで幅広い海洋研究に取り組む本研究機関での実施が必要である。

## ② 研究の概要

### (1) 海水中の粒子状及び溶存有機物の分離濃縮手法の開発

沿岸域の各種有機物のキャラクタリゼーションや起源推定などを行うに当たって、まず海水中から十分量の目的成分（有機物）の分離が必要である。粒子態及び高分子溶存態有機物に関しては各種孔径フィルター、限外ろ過膜などの用いた濃縮・分離手法が利用可能である。低分子溶存態成分については共存する無機塩類の除去、目的成分の変性を伴わない濃縮法の開発が必須である。本研究では、限外ろ過に併せて、電気透析及び逆浸透法などを組み合わせた手法について検討・開発をおこなう。モデル化合物を用いた検討を始め、その後現場試料を用いた実験・観測に移行してゆく。

### (2) 有機物のキャラクタリゼーション

濃縮された各種形態別、サイズ別有機物成分について、化学的及び生化学的な手法によるキャラクタリゼーション、同位体組成及び指標化合物の含有量などをインデックスとした起源推定を行う。キャラクタリゼーションの手法としては、主要生元素組成比の測定、各種酵素に対する反応性の調査、溶媒に対する親和性評価、各種クロマトグラフィー及び同定分析（核磁気共鳴分析法、赤外吸光分析など）、天然の微生物群集を用いた分解実験などを予定している。

### (3) 堆積物中での有機物初期続成過程の解明

沿岸海域における有機物の主要な蓄積場である堆積物を焦点に絞り、特に沈降してきた有機物の分解過程や分解に伴い再生・放出される栄養塩の挙動、あるいは埋積による除去過程を明らかにする。堆積物は柱状に採取することにより時間の情報を持った試料としてデータを取り扱うことが可能である。そこで、現場柱状堆積物と間隙水試料の各種生元素の分布、沈降粒子の採取とその化学的組成の解明（キャラクタリゼーション）などを基に、沿岸海域堆積物中での初期続成過程に伴う有機物の分解などについて定量的な評価を行う。

## ③ 研究目標

### (1) 海水中の粒子状及び溶存有機物の分離濃縮手法の開発

海水中の有機物の定量的評価はもとより、その化学的特性の解明や起源の推定に当たっては、できる限り多量の目的成分の分離・回収が望まれる。また、天然に存

在する有機物は様々な物質の混合物と考えられるので、より詳細な分析を行うに当たっては分子サイズや親水性などを指標とした前処理的な分別が有効と考えられる。粒子態及び高分子溶存態有機物については、限外ろ過を用いた手法の発展に伴い分離・濃縮が容易になり、米国を中心として盛んに研究が行われている。しかしながら、低分子成分については、海水に多量に存在する無機塩類の妨害や濃縮時に生じる目的成分の変性といった二つの大きな問題を抱え、このいずれについても現時点では解決されていない。低分子成分が海水中の全溶存成分の数 10%を占めるといふ報告もあり、低分子成分を効率良く濃縮・分離する手法の開発は現在最も強く望まれている研究課題の一つといえる。本研究では、新たに高圧逆浸透分離と電気透析法を導入することによってこの問題を克服し、これまで不可能とされていた低分子溶存有機物の分離濃縮法の開発を行う。

### (2) 海水中の有機物のキャラクタリゼーション

沿岸海域における有機物の循環過程を考える上では、海域にどの程度の有機物が存在するのか、どのような分布をしているのかといった定量的な情報がまず重要となるが、併せてそれらの有機物がどこから供給されてきたのか、どのような運命を辿るのかといった定性的な情報も必要である。特に陸起源など外来性有機物と海洋生態系由来の内部生産性有機物が混在する沿岸海域では、絶対量だけでなく、個々の成分の分別・定量が不可欠となる。本研究では、まず陸上の高等植物や土壌由来物質、及び海洋生物由来物質等を対象として沿岸域有機物の起源推定に適した指標成分の検索を行う。また、各種分解酵素に対する反応性、溶媒に対する親和性、分子サイズ、天然の微生物群集による利用性などを調べ、有機物成分の運命予測を行うに必要なパラメータの抽出を行う。これらの研究によって得られる成果は、沿岸域の有機汚濁改善手法の開発や、海洋肥沃化など将来プロジェクトに向けての沿岸海水の潜在的利用性の評価に貢献するものと期待できる。

### (3) 沿岸海域における有機物循環過程のモデル開発

沿岸域の有機汚濁を対象とした物質循環モデルに関しては幾つかの報告例があるが、堆積物中での初期統成過程に伴う有機物の分解や栄養塩物質の海水への再生回帰を詳細且つ定量的に扱ったモデルはほとんど無い。また有機物について、その起源や化学的特性を指標とした循環モデルは皆無といえる。当研究所において沿岸海域の生態系物質循環モデルが確立されており、当該研究によって新たに得られるパラメータ（有機物の組成、堆積物での初期統成過程）を加えることによってモデルの改良を進め、沿岸海域における有機物循環過程について定量的に解明する。さらに、構築されたモデルに基づき、陸上-海洋間境界層としての沿岸海域の役割、あるいは沿岸海域が将来にわたって人類の活動に対して貢献しうる潜在的なポテンシャルについて評価して行くための基礎的知見を得る。

## 2. 研究成果の概要

### ①研究成果

(1) 東京湾の河口域から湾口にかけての有機物濃度分布を調査した。生物活性の低い時期には溶存有機物が保存的に振舞い（塩分に対して直線的に減少）、沿岸に負荷される陸起源有機物が反応性の乏しい難分解性成分に富み、沿岸環境に直接的影響を及ぼさないことを示唆した。一方、沿岸海洋生物による内部生産は陸起源栄養塩の負荷によって引き起こされ、環境に多大な影響を及ぼしていることがわかった。

(2) 内部生産性有機物特性解明の一環として有機物の分離濃縮法及び酵素反応による有機物分画手法の検討を行なった。その結果、小型限外ろ過装置による濃縮・脱塩処理により高分子有機態リン化合物が効率的且つ定量的に回収できること、2種類の酵素を用いることによって海水中の有機態リンを結合状態と生化学的安定性という二つの指標に基づき分画できることを明らかにした。分析の結果、東京湾海水中の有機物は生物量の多い海域で難分解性成分が蓄積していることがわかった。逆に易分解性成分は活発に分解され、分解に伴う栄養塩の再生によって沿岸域に連鎖的有機汚濁を引き起こしていることが示された。また難分解性成分はリポソーム構造を有している可能性が示唆された。

### (3) 海水中のリン脂質の分析法開発と海洋試料への適用

リン脂質はあらゆる生物の細胞膜として重要であり内部生産有機物の主要成分と考えられた。また、リン脂質は栄養塩として沿岸の生物生産を制御しうること、リポソームを形成し有害人工化学物質を含む他の有機化合物の環境中での挙動に影響を及ぼすことが考えられた。そこで溶媒抽出法と固相抽出法を組み合わせた手法による海洋試料中のリン脂質分析法を開発した。合わせて沿岸及び外洋の試料についてリン脂質の分析を行ない、リン脂質が生物体（粒子態）有機態リン化合物として重要な成分であることを明らかにした。また外洋深層ではリン脂質が有機態リンの主要成分として蓄積しており、内部生産性有機物として重要な役割を果たしていることが示唆された。

### (4) 海底堆積物中における有機態リンの初期続成過程

リン脂質をはじめとする有機態リン化合物が富栄養化した沿岸海域の海水中で大量に生産され、その多くは海底の堆積物上に沈降してゆく。堆積物に運ばれた有機物がどの程度がそのまま堆積物中へと除去されてゆくのか、あるいは再び海水中へと回帰してゆくのかを明らかにするために、東京湾において柱状堆積物試料中のリン含量の調査及び擬似現場実験によるリンの再生試験を実施した。その結果、プラ

ンクトンなどにより生産された多量の内部生産性有機態リンは堆積物上に沈降後、その大部分が速やかに分解し海水へと回帰してゆくことがわかった。さらに、堆積物中に取り込まれた有機物の一部も徐々に分解してゆくが、そこで生成された分解産物であるリンの海水への回帰は現場の酸化還元状態に強く依存することが明らかにされた。

## ②波及効果、発展方向、改善点等

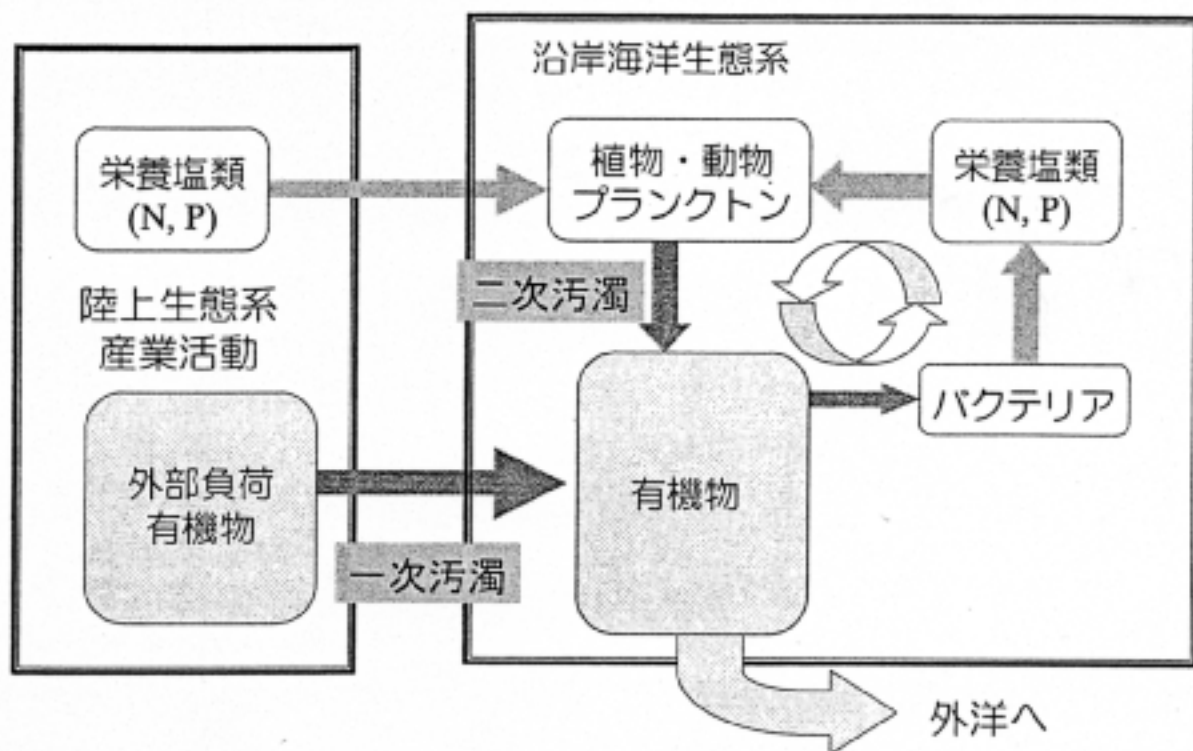
都市部における産業・社会活動の発展に伴い、隣接する沿岸海域には過剰量の栄養塩や有機物が負荷され、その結果、赤潮や青潮、有機汚濁などの著しい水質汚濁が顕在化して久しい。さらに生物毒性の高い重金属や化学物質による汚染、そして近年では環境ホルモンなど内分泌攪乱作用という未知の毒性を持った有害化学物質汚染など、沿岸海域における環境問題は深刻化・複雑化の一途を辿っている。

近年、海域に負荷された汚染物質がどのような挙動を取り、環境にどういった影響を及ぼすのかを評価し、あるいは対策手段を講じた場合、どのような効果・影響が現れるのかなどといった従来では予測の困難であった問題に対して、生態系物質循環モデルが適用されるようになったきた（図参照）。より精度の高い環境評価や予測を行なうためには、より現場環境に近いモデルを構築することが必要である。

当該研究では、沿岸海域における有機物、特にリンを含む化合物を中心に、その起源や循環過程の解明を行なってきた。その中での代表的成果として、沿岸海域の汚濁有機物を外部からの負荷成分と沿岸生態系内部で生産された成分に分別する手法の提案、及びそれら有機物を分解性（安定度）といった指標で評価する手法の提案が挙げられる。これらの成果により、従来のモデルに比較してより精度の高い環境影響予測のための生態系物質循環モデルの構築が可能となった（図参照）。これは単に沿岸海域の有機汚濁・富栄養化問題の対策に寄与するばかりでなく、上述した新規の有害化学物質汚染問題に対しても極めて重要な事項である。即ち、沿岸海域に流入した有害化学物質は単体として挙動するというよりもむしろ、当該研究で取り扱っているような天然の有機物をキャリアーとして生態系内で様々な物理・生物・科学的作用を受けながら循環していると考えられる。従って、有害化学物質の挙動解明、環境影響評価及び対策技術構築においては、これまでの生態系モデルをより高精度化することはもちろん、有害化学物質へのモデルの適用が可能なようにキャリアーとなる天然有機物の特性解明や有害化学物質と天然有機物の相互作用（吸脱着反応など）の解明が不可欠である。当該研究はこれらの問題に対する基礎情報を提供するものであり、今後の研究の方向性を示唆する成果を挙げてきたと言える。

当該研究ではリンを含む有機物を重点に研究を進めたが、今後さらに窒素など他の親生物元素にもその手法を展開してゆくことが重要であると考えられる。

# 従来の沿岸域物質循環概念図



# 本研究で提案している沿岸域物質循環概念図

