

流域における物質循環の動態と 水域環境への影響に関する研究

国土交通省国土技術政策総合研究所

環境研究部長

きしだ ひろゆき
岸田 弘之

1. 研究の背景

国土利用形態の変貌に伴い、流域における物質循環の動態が大きく変化してきている。一方、流域からの水と物質の影響を強く受ける閉鎖性水域や沿岸海域に関して、水環境の悪化や生態系の異変が指摘されている。その主要な要因の一つが、国土利用形態の変化に伴う流域水循環を媒体とした物質循環の動態変化にあり、またそれは有機汚濁物質や栄養塩のうちN、Pの過剰供給という従来の枠組みだけではとらえられないとの仮説が注目されている。海に囲まれ、多くの閉鎖性水域を持つわが国にとって、河川水が流れ込む水域の環境保全は重要であり、国土利用形態の変化との関係の解明および健全な水域環境の回復が喫緊の課題である。

2. 研究の概要

研究フィールドの主対象として、流域・河川を含む陸域に関するデータが豊富であり、沿岸海域の環境劣化と課題が明確で、その過程に関するデータも充実している三河湾流域圏（三河湾とその流域）を取り上げた（図 1 参照）。



図 1 三河湾流域圏

本研究は以下のサブテーマで構成される。

- ・ 着目すべき物質の抽出
- ・ 物質動態変化と水域への供給変化に関する検討
- ・ インパクトとレスポンスに関する分析
- ・ 環境再生の基本的方向の検討
- ・ 今後推進すべき方策の検討

3. 着目すべき物質の抽出

水域生態系と密接な関係を持つという点で着目すべき物質の抽出とその特性について把握した。

(1) 直接的な影響を受ける生物種の選定

流域・河川の変化がもたらすインパクトによって引き起こされる海域環境のレスポンスの分析に役立てることを目指して、三河湾を対象に、種々

のインパクトがもたらす海域変化を抽出し、その影響を受けると考えられる生物種として植物プランクトン、底生生物（アサリ等）、海草類・海藻類（アマモ・コアマモ等）を選定した。

(2) 生物が必要としている栄養塩類とその形態の整理

抽出した生物種が必要とする栄養塩類として、N, P, Si, Fe, Zn, Mn, Co, Niを選定し、各物質の形態・必要とする時期・複数の栄養塩類間の量的な最適バランスといった情報を把握した。それらを、枯渇・過剰による海域生態系への影響のレベル・情報の蓄積量といった観点より、N, P, Siの3物質に絞り込みを行った。

(3) 物質の抽出

河川から供給される土砂には無機態リンが吸着しており、出水による大量の土砂の供給があると、吸着する無機態リンが沿岸域に流出し、これが沿岸域の底泥からの溶出に大きな影響を及ぼす。以上より、窒素・リン・シリカおよび微細土砂の四つを着目すべき物質として抽出した。

4. 物質動態変化と水域への供給変化に関する検討

流域（陸域）の改変に伴う物質動態の変化と水域への供給量・供給形態の変化に関して検討を行った。

(1) 栄養塩類供給量の経年変化

3.で選定した栄養塩3物質について、陸域から三河湾域への昭和30年代から現在に至る供給量の経年変化を推計した（シリカは2時点のみ、その他は5年ごと）。

① 陸域から海域への窒素・リンの供給量の経年変化

三河湾へ流入する豊川、矢作川を対象に、原単位法による積み上げによって算定する方法、順流末端地点の水質調査データおよび流量データから算定する方法、既存L Q式を用いて流量データか

ら算定する方法の三つの方法を用いて推計を行った。各方法で得られた全体的傾向は次のとおりである。

原単位法を用いて算定した結果、T N, T Pともに昭和55年をピークとして増加し、近年まで減少傾向を示していた。

水質調査データから形態別供給量を算定した結果、昭和50年代はNH₄ Nおよび有機体窒素の供給量が多い一方、平成15年はNO₃ Nが増加しており、生活系負荷の処理形態の変化による違いが現れている。

既存L Q式を用いた方法では、豊川・矢作川ともにT N, T Pいずれについても、豊水以上の流量の影響が大きいという結果が得られた。L Q式を用いた方法と原単位法による排出負荷量を比較すると、同等の負荷量となっておらず、河川ごとに変動が大きく、一定の傾向がみられなかった。算定方法の精度向上に向けた検討の必要が示唆された。

② 陸域から海域へのシリカ供給量の経年変化

平成19年（9月）調査によると、豊川の溶存態ケイ酸濃度の縦断変化を見ると、ダム湖で上流に比べてケイ酸濃度は減少しているが、その下流ではケイ酸濃度は増加しており、河川から海域へのケイ酸供給量減少にダム湖が有意な影響を与えているとは認められなかった。また、豊川のケイ酸濃度は過去と比較しても経年的な濃度はほとんど生じていないことがわかった。

③ 土砂供給量の経年変化

豊川、矢作川を対象に、河道特性の変化による河川から海域へ供給される土砂量の昭和30年代からの経年変化を把握するため、平均河床高、河床勾配および河床材料の経年変化を把握するとともに、無次元掃流力による土砂移動の評価、河床変動計算による河川からの供給土砂量の評価を行った。

その結果、矢作川においては昭和40年頃からの砂利採取に伴う河床低下により掃流力が低下し、海域への供給土砂量も減少した。また、豊川においては、豊川放水路の竣工に伴って土砂が出にく

くなる傾向になったが、もともと土砂量が少なかった。

5. インパクトとレスポンスに関する分析

(1) 水域におけるレスポンスおよび流域・河川等からのインパクトの把握

既往の文献・データの整理とヒアリング等を通じて、三河湾の水質、赤潮、ハビタット、生態系など、三河湾域の環境に関わるレスポンスの経年変化状況と、埋立等の直接的な人為的改変および4.で把握した物質供給量の変化等を含む、諸インパクトの作用状況を網羅的に把握した。

(2) インパクト レスポンス分析

上記で得られた知見から、インパクト レスポンスの関係を時系列的に分析し、因果関係特定の

ための基本情報として整理した。さらに、各現象間の関連性を既往データや一般的な知見をもとに整理して、三河湾の現状を表す連関図を図 2 に示すように作成した。

(3) 環境劣化過程の分析

① 環境劣化過程を説明する仮説の提示

以上の検討結果より、三河湾における環境劣化過程を説明できる仮説を作成した。すなわち、昭和30年代からの流入負荷の推移、干潟・浅場・藻場面積の変化、赤潮・貧酸素水塊の発生から、特徴的な段階として図 3 に示す四つのフェーズに区分した。

三河湾は、流入負荷の増大、干潟・浅場・藻場の減少により、貧酸素水塊の発生が顕在化し、二枚貝類の減少、干潟・浅場の浄化機能の低下、赤潮の発生、そして貧酸素化の助長といった図 4 に示すような負のスパイラルに陥っている。

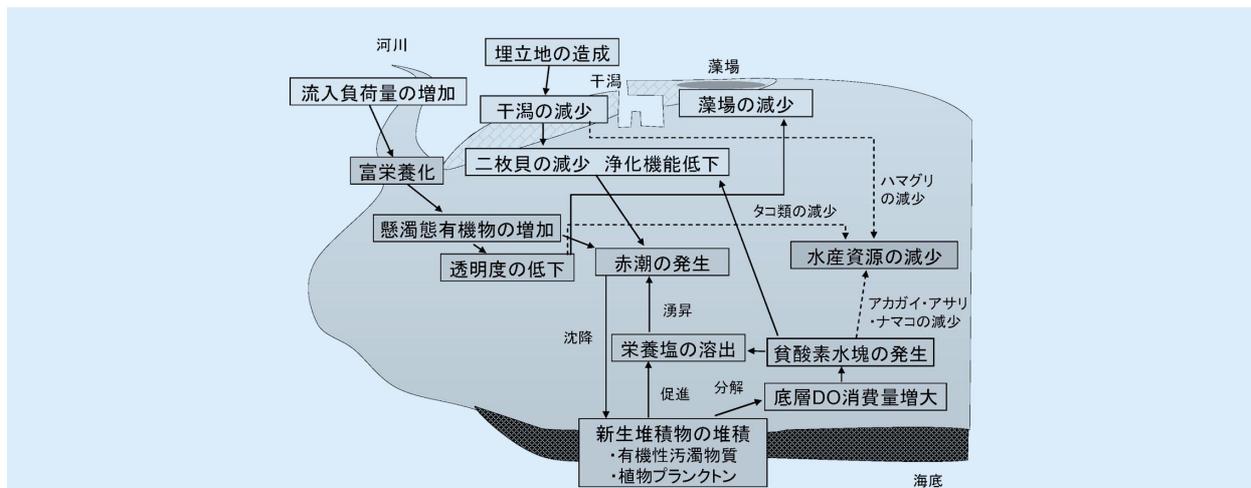


図 2 インパクト レスポンス連関図

	流入負荷	干潟・浅場・藻場面積	赤潮・貧酸素水塊の発生
フェーズ1 ~1965年	少ない	広い	少ない
フェーズ2 1965年~ 1970年	増加	やや減少	少ない
フェーズ3 1970年~ 1975年	最大	埋立・浚渫等により大幅に減少	顕在化
フェーズ4 1975年~ 現況	減少	少ない状態を維持	顕在化を継続

図 3 三河湾環境劣化過程の仮説

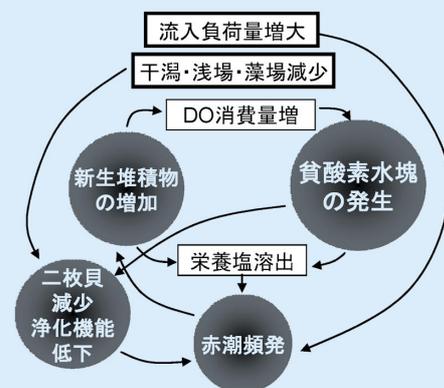


図 4 負のスパイラル

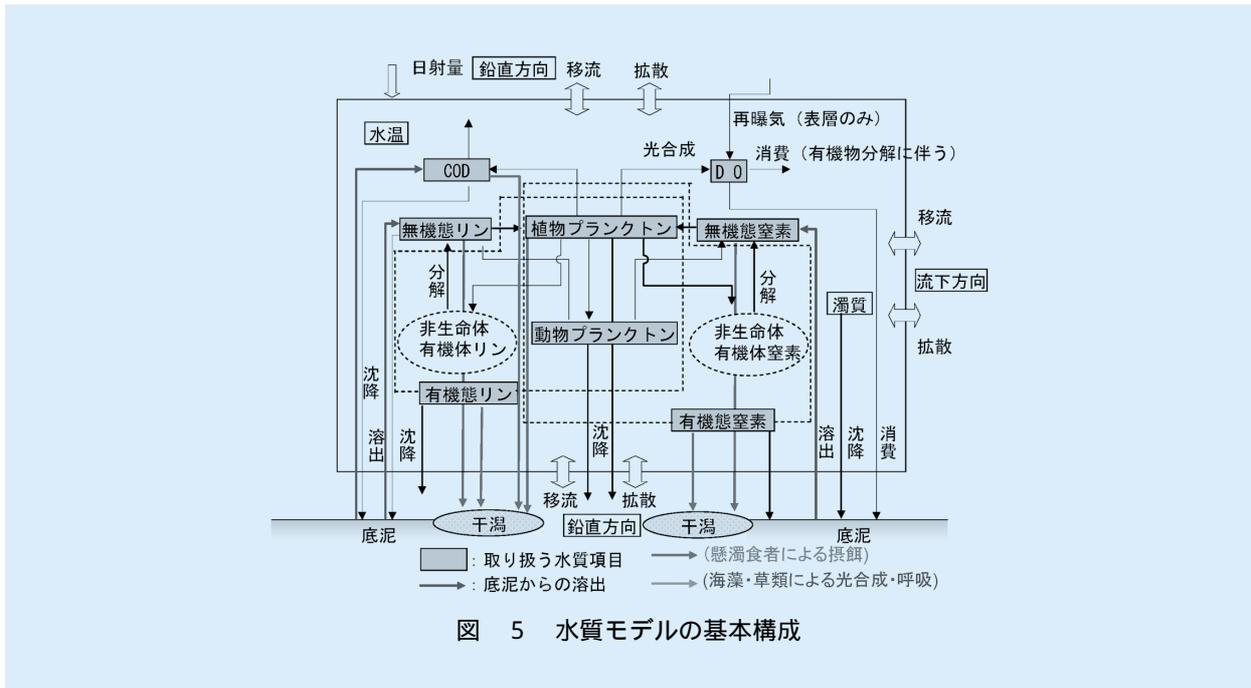


図 5 水質モデルの基本構成

② 水質シミュレーションによる仮説の妥当性の検討

仮説の定量評価およびその不確実性に関する検討のために、水質モデルによって各フェーズにおける物質循環量を評価した。

1) 水質モデルの概要

使用したモデルは、流動計算モデルと水質計算モデルから構成され、流域・河川から供給され流入有機物や栄養塩類等の移流・拡散、植物プランクトンおよび動物プランクトンの生物生産等による反応、有機物の分解・沈降および底泥からの溶出・酸素消費を考慮している。本モデルの概要を図 5 に示す。

2) 渥美湾における物質循環状況

水質計算結果から、物質循環量を評価した結果、各フェーズで物質循環量（沿岸域の体質）が変化したことが分かった。各フェーズにおける特徴は以下のものであった。

フェーズ 1（昭和30年代）：貧酸素水塊の発生はほとんどない

- ・ 流入負荷は少なく、水質も良好
- ・ 干潟・浅場面積が広く、浄化機能が高い
- ・ 藻場が無機態栄養塩の固定機能を果たす

フェーズ 2（昭和30年代の干潟・浅場，昭和50年代の負荷量・藻場）

- ・ 流入負荷の増大による内部生産の増加
- ・ 干潟・浅場が広いため二枚貝の浄化機能は高い
- フェーズ 3（昭和50年代）：貧酸素水塊が顕在化
- ・ 流入負荷の最大期
- ・ 赤潮発生の顕在化
- ・ 干潟・浅場・藻場面積が大幅に減少
- フェーズ 4（現在）：貧酸素水塊の健在化が継続
- ・ 流入負荷は若干減少したものの、内部生産は高い
- ・ 干潟・浅場・浅場藻場面積は減少したまま
- ・ 浄化機能が低下し、負のスパイラルに陥っている

DO消費増大の主な要因は、新生堆積物が分解される際の酸素消費であり、貧酸素水塊の増加は、新生堆積物の増加に直接的に関係している。上記の検討結果より、フェーズ 2 から 3 に移ることで、新生堆積物は顕著に増加しており、先に述べた貧酸素水塊発生の仮説を裏付ける結果が得られている。

6. 環境再生の基本的方向の検討

(1) 環境再生の基本的方向と目標像

これまでの検討から、三河湾の生態系に直接的に影響を及ぼしているさまざまな要因は、貧酸素水塊の発生に集約できると考えられる。そのため、発生している現象は多くの要因が関係した複雑な機構を持っているが、「貧酸素水塊の発生」を機構の中心に捉えることで、関連する現象・物質から現象の全体像を把握することができ、複雑な現象に対する包括的な目標設定・施策の方向性の検討を簡易に行うことが可能になる。

また、沿岸生態系にとって重要な貧酸素水塊の発生は、水産資源の現存量に直接影響することが

ら、目標像や施策効果が見えやすいという特徴もある。

以上の観点から、三河湾の環境再生に向けた物質循環管理の目標像を図6のように設定した。貧酸素水塊抑制を具体的に示す指標として、底層において高次の生物が生息しうるDO（最低2mg/L）を取り上げ、その確保を目標とする。

(2) 物質循環管理の施策検討枠組みの検討

物質循環管理の施策検討枠組みの検討に役立てることを目的として、流域から湾域に連続する物質循環フローの根幹をなす「流入負荷削減」、二枚貝類やより高次の水生生物の回復による健全な物質循環形成を目指した「干潟・浅場の造成」のフィールドの異なる二つの施策について、シミュレーション計算によりその効果を試算した。評価

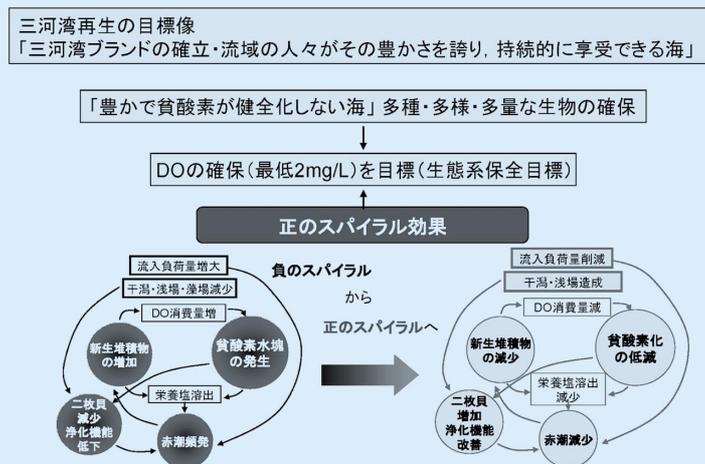


図 6 物質循環管理の目標

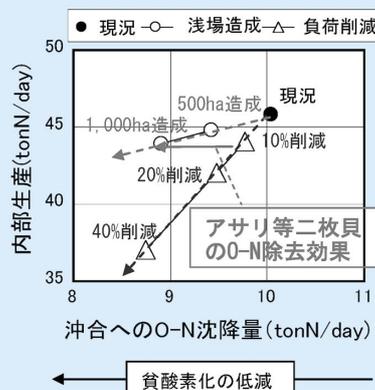


図 7 施策効果（内部生産，O-N沈降量）【渥美湾：夏季の水質計算】

軸には、新生堆積物の主要因であるO₂N沈降量および内部生産量を用いた。試算結果を図7に示す。本結果より、流入負荷削減は内部生産を制限し、O₂N沈降量を減少させる効果があること、干潟・浅場造成は内部生産を制限するとともに、生産された有機物をアサリ等二枚貝が除去することにより、有機物沈降量を減少させる効果があることが示唆された。

以上の結果は試算に過ぎず、個々の数字については、モデルの高度化や精度向上、現象把握・解明を含め、さらに吟味が必要である。その一方、以上に示した検討結果は、今回提案した貧酸素水塊の抑制を評価軸に置くことで、性質・フィールド等が異なるさまざまな施策を同じ土俵で具体的かつ統合的に議論することが可能になることを示すものといえる。

水環境に関わる現象はヒステリシスを持つため、どの程度の施策量で正のスパイラル効果が得られるかについては不明な点も多い。一方で、流域住民等においては施策効果を実感できることが

まさに重要であり、今度は多様な視点からのモニタリングの実施（関係機関との連携）と評価、特に、干潟・浅場造成の実証実験による「浅海域での水質改善効果（DO等）」「干潟・浅場での二枚貝現存量」「藻場や付着藻類」のモニタリングおよび正のスパイラル効果の把握が重要である。

7. 今後推進すべき方策の検討

(1) モニタリング・調査手法の検討

これらの施策の効果や設定した目標の達成状況を把握することを目的とした「施策効果把握のためのモニタリング」と、仮説を検証し、新たに分らかった事実に応じて管理手法を再検討し、必要に応じて修正することを目的とした「機構解明のためのモニタリング」に分けて、項目・手法等を具体的に提示した。

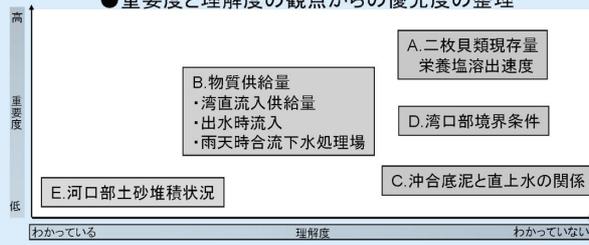
① 施策効果把握のためのモニタリング

最終目標となる貧酸素水塊発生の抑制の主要因

表 1 施策効果把握のためのモニタリング

区分	モニタリング指標	想定アウトプット	方法・頻度等	
施策効果の把握	河川水質	河川水質（平水時）	河川水質の向上	定期採水調査（月1回平水時）
		順流末端の流入負荷量	流入負荷量の減少	多波長の光計測装置による測定設置型（毎時）
	干潟・浅場生物	底生生物の現存量	生物の多様性の向上	項目は種類数・個体数・湿重量 採泥分析（年2回以上春季、夏季）
		二枚貝の現存量	生物の多様性の向上 浄化機能の向上	〃
		藻場の面積・密度	生物の多様性の向上 浄化機能の向上	（年1回以上春季、夏季）
海域栄養塩（平常時）	海域水質の向上 懸濁態有機物の現象	定期採水調査（月1回平常時）		
全体効果の把握	懸濁態有機物	透明度	親水性の向上	〃
	赤潮発生状況	赤潮発生海域，赤潮発生日数，赤潮構成種	赤潮発生の低減	月1回以上の観測 さまざまな通報情報を利用
	新生堆積物沈降量	沖合の新生堆積物沈降量	新生堆積物量の減少	自動トラップ・回収機器の開発による連続観測（春季・夏季）の実施
	貧酸素水塊発生状況	底層DO濃度	底層DO濃度の向上 貧酸素水塊面積の減少	水温，塩分，濁度，DO連続観測（毎時）
	高次生物	魚類等の生息種，生息量 沖合の底生生物の生息種，生息量	生物の多様性の向上	採取計測（月1回以上，春季）

●重要度と理解度の観点からの優先度の整理



区分	測定項目
A. 干潟・浅場での物質循環機構	二枚貝類の場所別現存量, 水深別現存量
	干潟, 浅場の底泥からの形態別栄養塩溶出速度
B. 流域・河川からの物質供給量	出水時における河川からの供給量
	湾直流入供給量 (有機・無機の比率, 豊川用水 (還元水) からの供給)
	雨天時の下水処理場から越流による供給
C. 沖合いでの底泥と直上水の関係	溶出速度の精度向上および出水や赤潮に伴う底泥からの溶出速度, 酸素消費速度の変化
D. 湾口部における境界条件	湾口部における流出入水量, 水質
E. 河口部での土砂堆積状況	河口での土砂堆積量, 堆積土砂の性状

図 8 機構解明のためのモニタリング

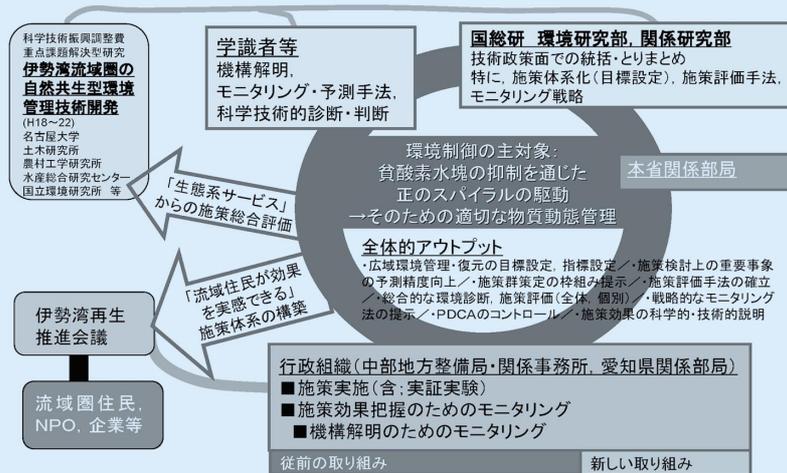


図 9 研究プラットフォーム (案)

である底層DO濃度の向上やそれに伴う生物生息量の増大と, その手前の事象として新生堆積物の減少, 赤潮発生を重要項目として取り上げ, 既存調査の活用を念頭におきながら, モニタリング項目を表 1 に示すように再編・整理を行った。

② 機構解明のためのモニタリング

未解明事象について, 重要度と理解度の観点から機構解明のモニタリング項目を図 8 に示すよ

うに整理した。

(2) 研究プラットフォームの検討

また今後の物質循環管理施策への展開につなげる研究開発を行うために必要な, 研究開発の課題・戦略, 研究体制の要件, 情報蓄積と共有方法等からなる研究プラットフォーム (案) を打ち出した。この構成図を図 9 に示す。