

閉鎖性水域における環境再生の実現に向けて

－三河湾流域をモデルとして－

環境研究部長

岸田 弘之

閉鎖性水域における環境再生の実現に向けて  
－三河湾流域をモデルとして－

環境研究部長 岸田弘之

## 1. はじめに

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1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我が国にとって、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）

### ○流域圏情報（陸域）

主要な河川として豊川、矢作川がある

- |  |        |                      |
|--|--------|----------------------|
| ・ 豊川                                       | 幹川流路延長 | 77km                 |
|  | 流域面積   | 724km <sup>2</sup>   |
|  | 流域人口   | 69 万人                |
| ・ 矢作川                                      | 幹川流路延長 | 118km                |
|  | 流域面積   | 1,830km <sup>2</sup> |
|  | 流域人口   | 21 万人                |
| ・ 豊川・矢作川の三河湾への流入量 約 20 億 m <sup>3</sup> /年 |        |                      |

### ○流域圏情報（海域）

- |        |                    |        |                    |
|--------|--------------------|--------|--------------------|
| ・ 水域面積 | 604km <sup>2</sup> | ・ 平均水深 | 9.2m               |
| ・ 干潟面積 | 14km <sup>2</sup>  | ・ 浅場面積 | 289km <sup>2</sup> |

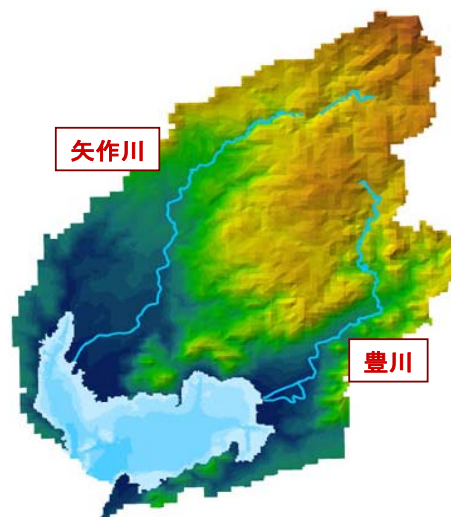


図-1 三河湾流域圏

本研究は以下のサブテーマで構成される。

- ・ 三河湾流域の概況把握
- ・ 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等の検討
- ・ 今後推進していく方策の検討

### 3. 三河湾流域の概況把握

#### 3. 1 着目すべき物質の抽出

また、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。

##### 3. 1. 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。

##### 3. 1. 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. 1. 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・シリカ及び微細土砂の 4 つを着目すべき物質として抽出した。

#### 3. 2 物質動態変化と水域への供給変化に関する検討

三河湾流域（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。

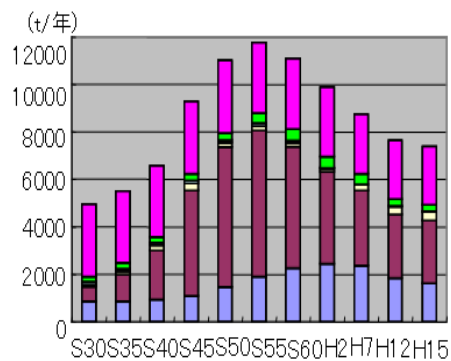
##### 3. 2. 1 栄養塩類供給量の経年変化

3.1 で選定した選定した栄養塩 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 年毎）

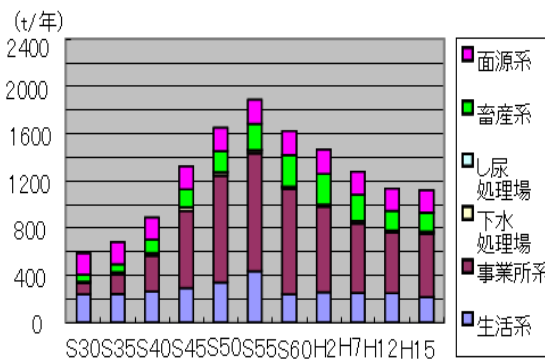
###### （1）陸域から海域への窒素・リンの供給量の経年変化

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及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 3 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通りである。

原単位法を用いて、昭和 30 年代から 5 年毎に、豊川・矢作川からの窒素・リンの供給量を算定し、供給量の経年変化の傾向を把握した。その結果、T-N、T-P とともに昭和 55 年をピークとして増加し、その後は浄化対策、排出規制等により減少している。（図-2, 3 参照）

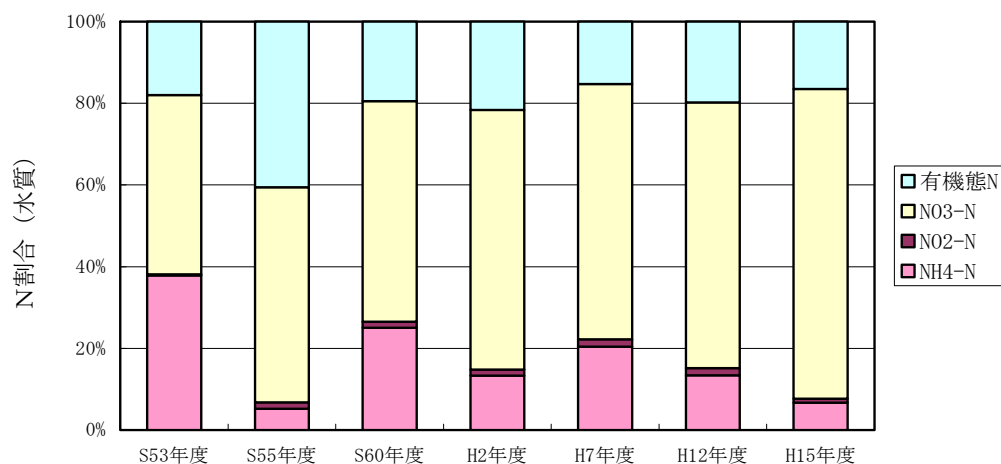


図－２ 豊川＋矢作川（順流＋感潮）の  
負荷量の変化（T-N）



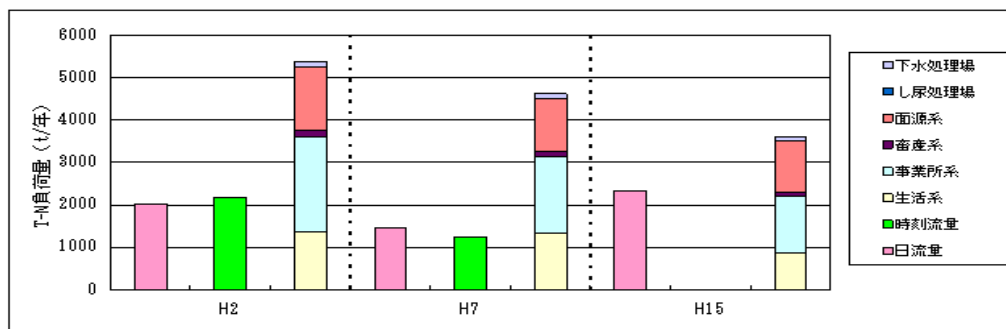
図－３ 豊川＋矢作川（順流＋感潮）の  
負荷量の変化（T-P）

次に、水質調査データから形態別供給量を算定した結果を図－４に示す。これによれば、昭和 50 年代は  $\text{NH}_4\text{-N}$  及び有機体窒素の供給量が多い一方、平成 15 年は  $\text{NO}_3\text{-N}$  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。

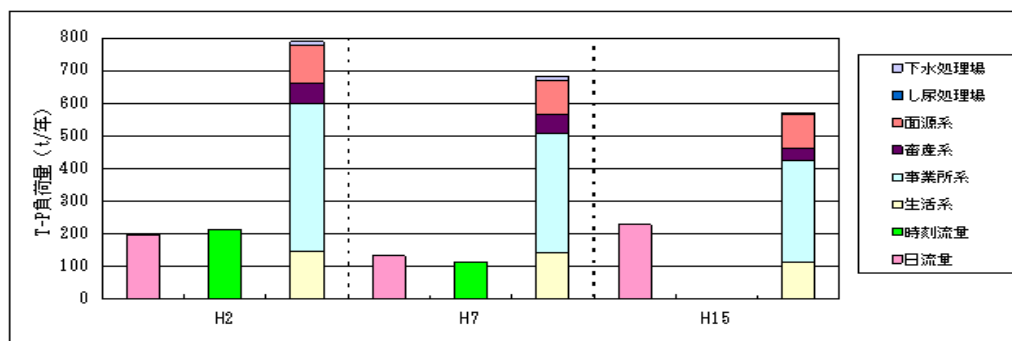


図－４ 水質データからの算出した形態別供給量

さらに、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、河川毎に変動が大きく、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。



図－５ 矢作川における負荷量の算定（T-N）

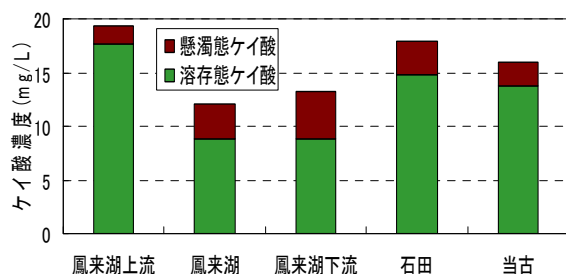


図－6 矢作川における負荷量の算定 (T-P)

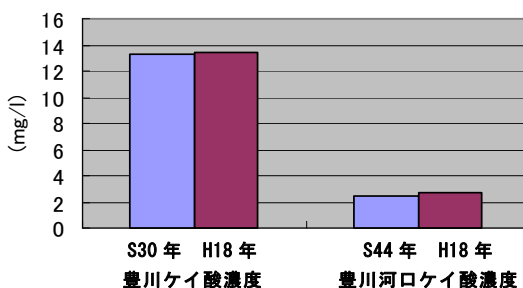
(図－5, 6 共に、左 2 本は水質調査結果をもとにした L-Q 関係式で算定、右は原単位法により算定した順流域の負荷量)

## (2) 陸域から海域へのシリカ供給量の経年変化<sup>1)</sup>

H19 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、ダム下流で上流に比べてケイ酸濃度は減少しているが、さらに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、沿岸海域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おらず、窒素等他物質と比べて相対的な量は低下したものの、濃度は高く、枯渇の可能性は低いことがわかった。



図－7 陸域から海域へのシリカ供給量の縦断変化 (豊川)

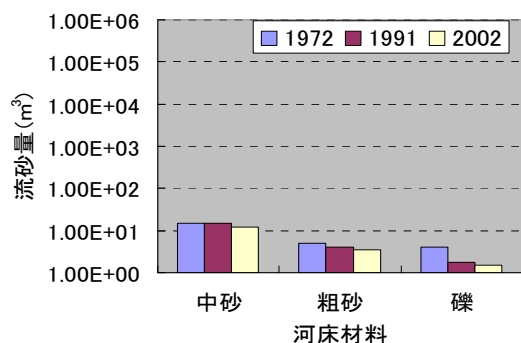


図－8 陸域から海域へのシリカ供給量の経年変化 (豊川)

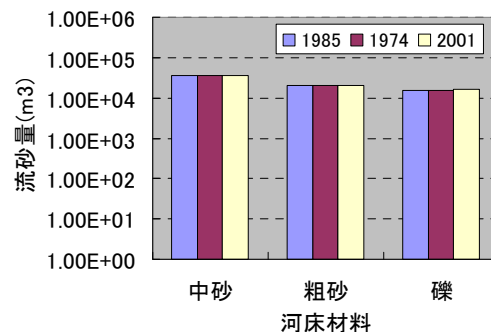
## (3) 土砂供給量の経年変化

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、河床勾配及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。(図－9, 10 参照)

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、それほど大きな変化は見られなかった。



図－9 海域に放出される土砂量の経年変化（矢作川）

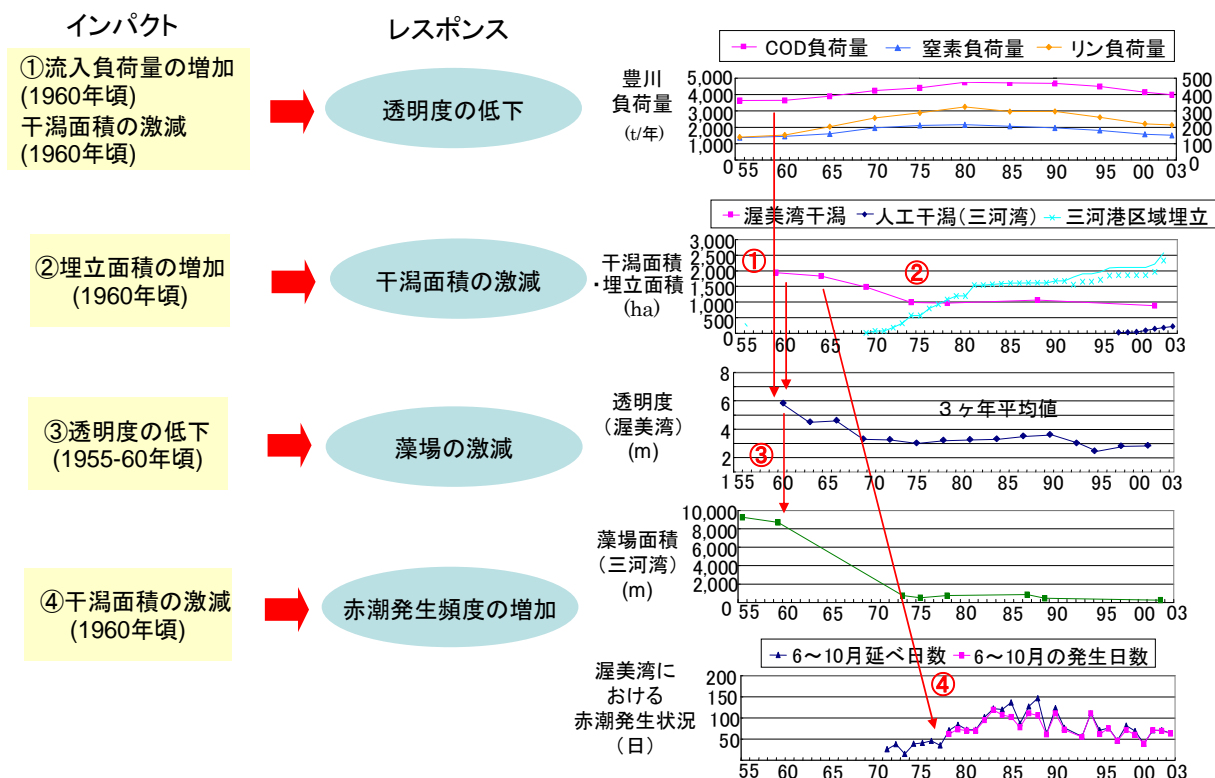


図－10 海域に放出される土砂量の経年変化（豊川）

## 4. インパクトとレスポンスに関する分析

### 4. 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<sup>2)3)4)</sup>

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 3.2 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。



9

図－11 三河湾の環境変化（水質・ハビタット・赤潮発生）



### 4. 3 環境劣化過程の分析

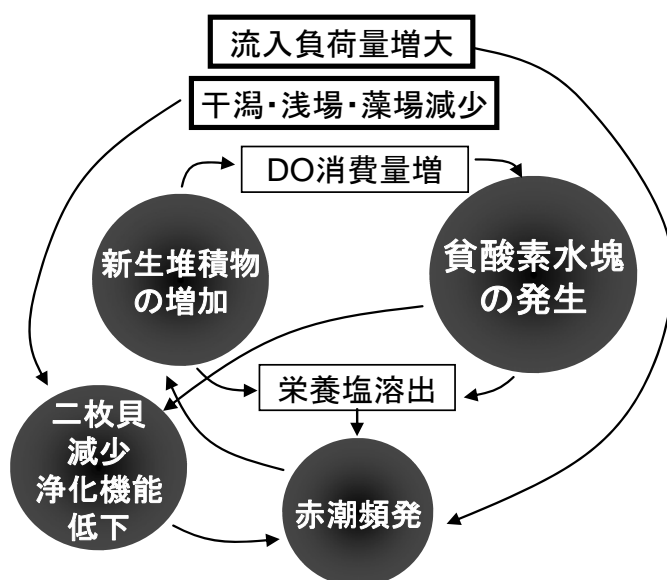
#### 4. 3. 1 環境劣化過程を説明する仮説の提示 <sup>5)6)7)</sup>

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。即ち、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-14 に示す 4 つのフェーズに区分した。

	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－14 三河湾環境劣化過程の仮説

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-15 示すような負のスパイラルに陥っている。



図－15 負のスパイラル



#### 4. 3. 2 水質シミュレーションによる仮説の妥当性の検討 <sup>8)</sup>

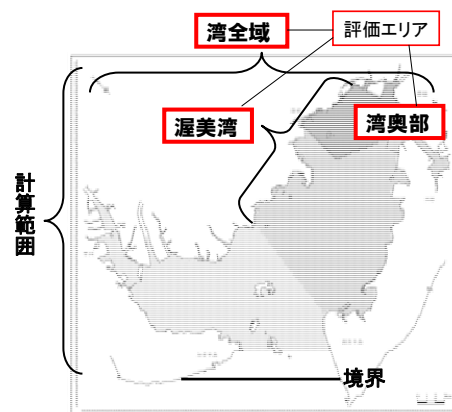
仮説の定量評価及びその不確実性に関する検討のために、水質モデルによって各フェーズにおける物質循環量を評価した。

##### (1) 水質モデルの構造と概要

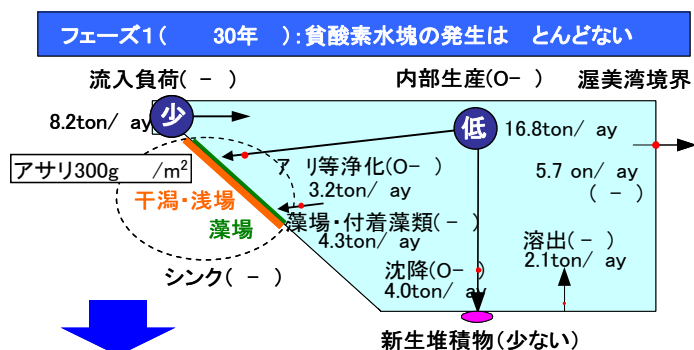
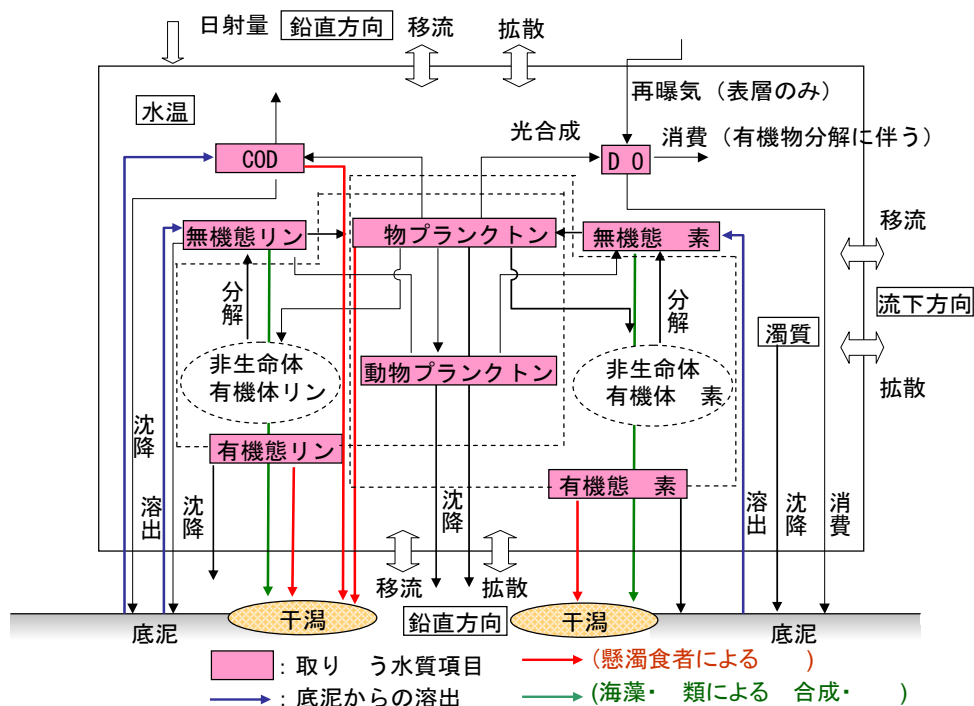
使用したモデルは、流動計算と水質計算から構成される。構築にあたっては、最低限の必要項目において物質循環像の変化が把握でき、施策の方向性を議論できるレベルになるように考慮した。シミュレーション計算の概要を表－1に、計算領域等について図－16に示す。

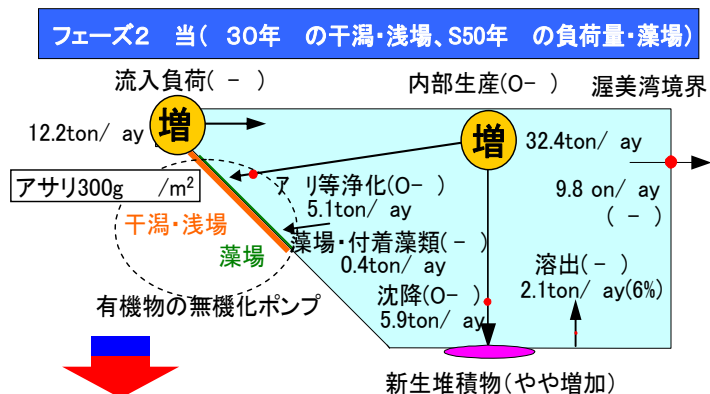
表－1 水質モデルの構造と概要

流動計算＋水質計算	
計算範囲	三河湾全域
計算格子	300m
鉛直層分割	最大3層（上層 0～5m, 中層 5～10m, 下層 10m～）
流動計算	
タイムステップ	5.0 秒
対象季節	夏季・冬季（計算開始から 150 日目）
淡水流入量	各年代の夏季・冬季平均流量
外海との境界条件	M2 分潮の振幅 (53.0cm)
水温・塩分の初期値、境界条件	公共用水域水質測定結果を用いた。境界値は、境界に近い地点の調査地点より設定
諸係数	既往計算事例より渦動粘性係数、渦拡散係数、摩擦係数を設定



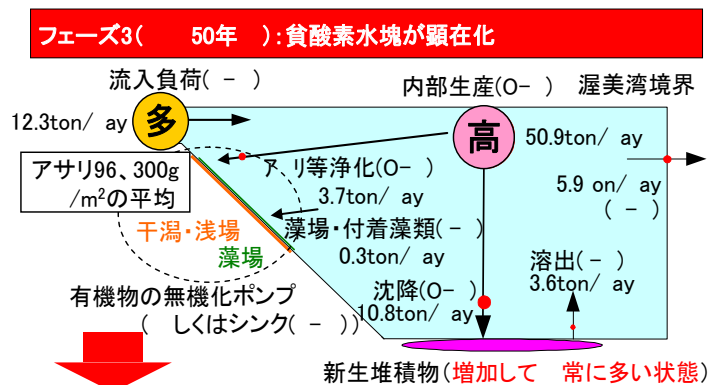
図－16 計算範囲、評価エリア、外界との境界設定位置





■ 流入負荷の増大による内部生産の増加

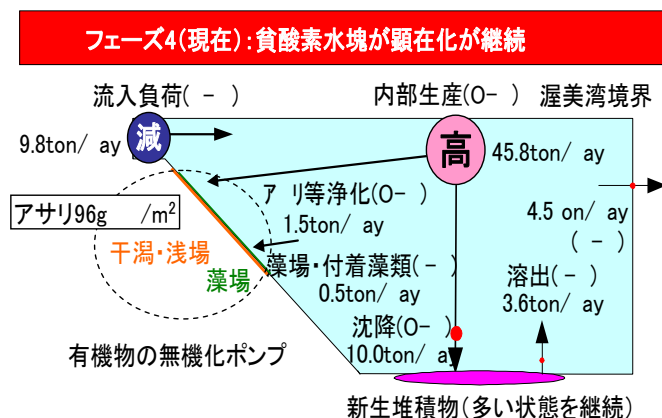
■ 内部生産が高くなっても、干潟・浅場が広いため、アサリ等二枚貝による有機物の除去量が多く、新生堆積物はそれほど多くない



■ 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



■ 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。

図－18 水質計算による物質循環量と物質循環像（渥美湾：夏期）

上記の検討結果より、フェーズ2からフェーズ3に移ることで、新生堆積物は顕著に増加しており、先の仮説を裏付ける結果が得られている。また、流入負荷量が多くても干潟・浅場におけるアサリ等二枚貝の浄化機能が高ければ、貧酸素水塊が顕在化しない物質循環を形成できる可能性があることがわかった。

## 5. 環境再生の基本的方向の検討

### 5. 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様々な要因は、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から、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-19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するDO(最低2mg/L)を取り上げ、その確保を目標とする。

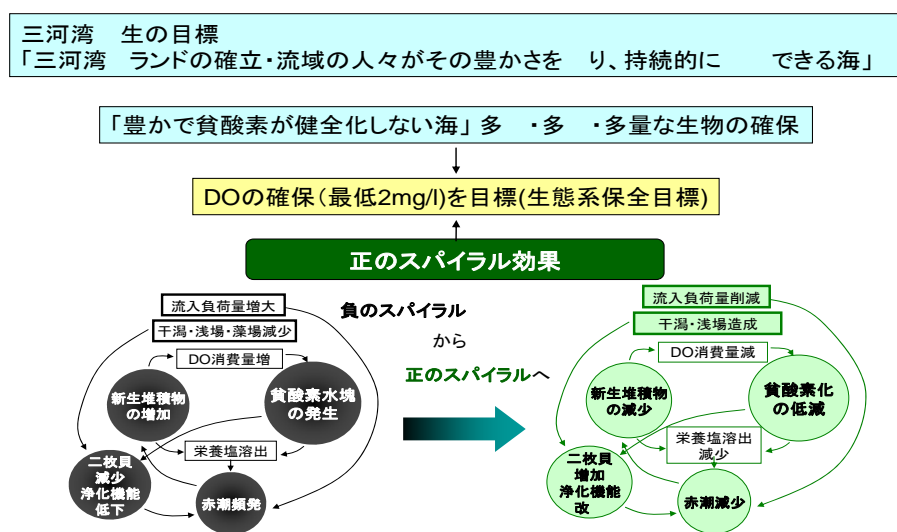


図-19 物質循環管理の目標

### 5. 2 物質循環管理の施策検討 組の検討 <sup>9)</sup>

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2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。

干潟・浅場の造成は、5mより深い箇所を浅くすることを想定して計算した。評価軸にはO-N沈降量及び内部生産量を用いた。O-N沈降量については、5m以深の海域に沈降する「悪

い沈降」を対象としている。干潟・浅場造成については、干潟・浅場が大きく消失した「渥美湾の湾奥エリア」（図-20 参照）において設定し、水質計算を実施した。

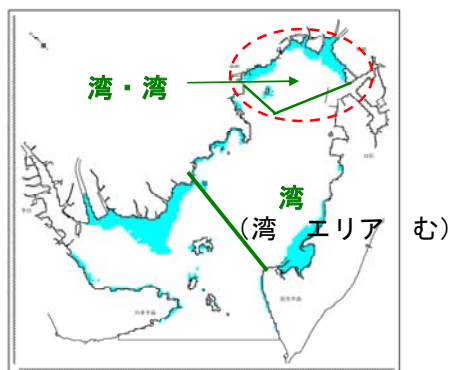


図-20 干潟・浅場造成位置図

評価軸には、新生堆積物の主要因である O-N 沈降量及び内部生産量を用いた。試算結果を図-21 に示す。本結果より、流入負荷削減は内部生産を制限し、O-N 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。

また図-22 に各施策の組み合わせによる O-N 沈降量を示しているが、これによれば有機物沈降量の削減効果について、干潟・浅場造成 1,000ha で対現況比-11%、流入負荷 40%削減で対現況比-12%の O-N 沈降量の削減効果が見込まれることが分かる

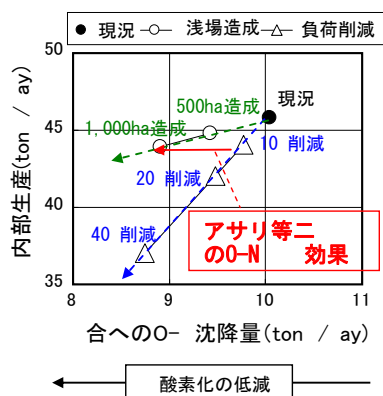


図-21 内部生産と O-N 沈降量の関係

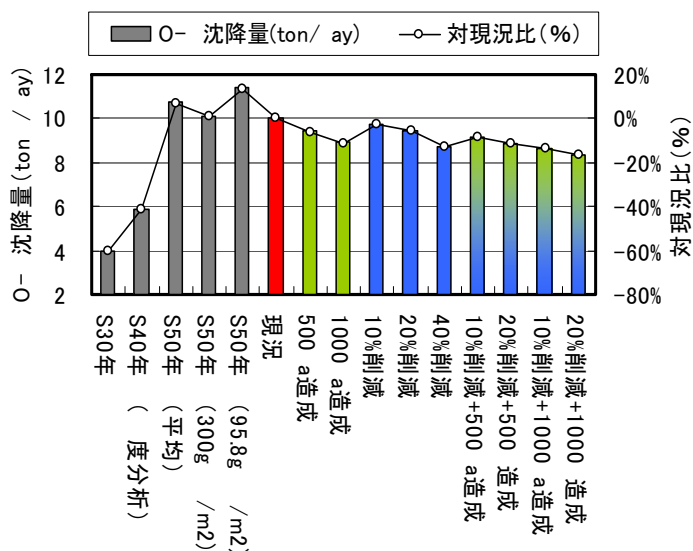


図-22 O-N 沈降量の経年変化と施策効果

本研究で用いた水質モデルは 3 層モデルであること、底泥での酸素消費速度は年代毎に一定値で与えていることから、施策による底層 D0 改善効果そのものの評価には至っていないが、貧酸素水塊の発生に直接的に影響する有機物沈降量及び内部生産量に着目することによって、各年代の物質循環量のバランスを把握し、施策の違いがもたらす物質循環形態

の違いを感度分析したことは、今後の環境再生方策に資するものと考えている。

マクロな物質循環という観点における、海域の貧酸素水塊抑制を通じた環境再生に向けては、栄養塩類の供給を減らす「流入負荷削減」、もしくは高次の生物量を増加させることによって消費を増やす「干潟・浅場の造成」が考えられる。水質モデルによる感度分析から、「流入負荷削減」は内部生産を制限することによって「悪い沈降」を減少させる効果、「干潟・浅場造成」は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って「悪い沈降」を減少させる効果を持っており、各施策が性質の異なる効果を持っていることが確認できた。これまでは、一次生産の消費に見合う量を大きく上回る栄養塩類が供給されており、流入負荷削減を中心に行われていた。現状でも供給量は多い状態であり、今後も当然その必要性は高い。その上で、ただ供給量を減らせば減らす程いいかというとそうではなく、さらに豊かな環境を目指すためには、一定の栄養塩の供給は必要であるという見方もある。したがって、これらの対策はどちらか一方のみを進めるのではなく、両者の効果による相乗効果を最大限に発揮できるように、バランス良く進めることが重要である。また、複数の施策の実施にあたっては、効果の発現時期・場所・内容を加味し、実施の時間的なタイミングについても検討を行っていく必要がある。

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る。

今後は機構のもつ不確実性をより確かなものにし、具体的な施策の方向性を明確にしていくために、機構解明および施策効果把握のためのモニタリングの実施と評価を行い、多様な視点に立ち、関係機関との連携を図りつつ、さらに統合的な検討を進めていくことが重要である。

## 6. 今後推進すべき方策の検討

### 6. 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、新たに明らかにな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。

#### 6. 1. 1 施策効果把握のためのモニタリング<sup>10)</sup>

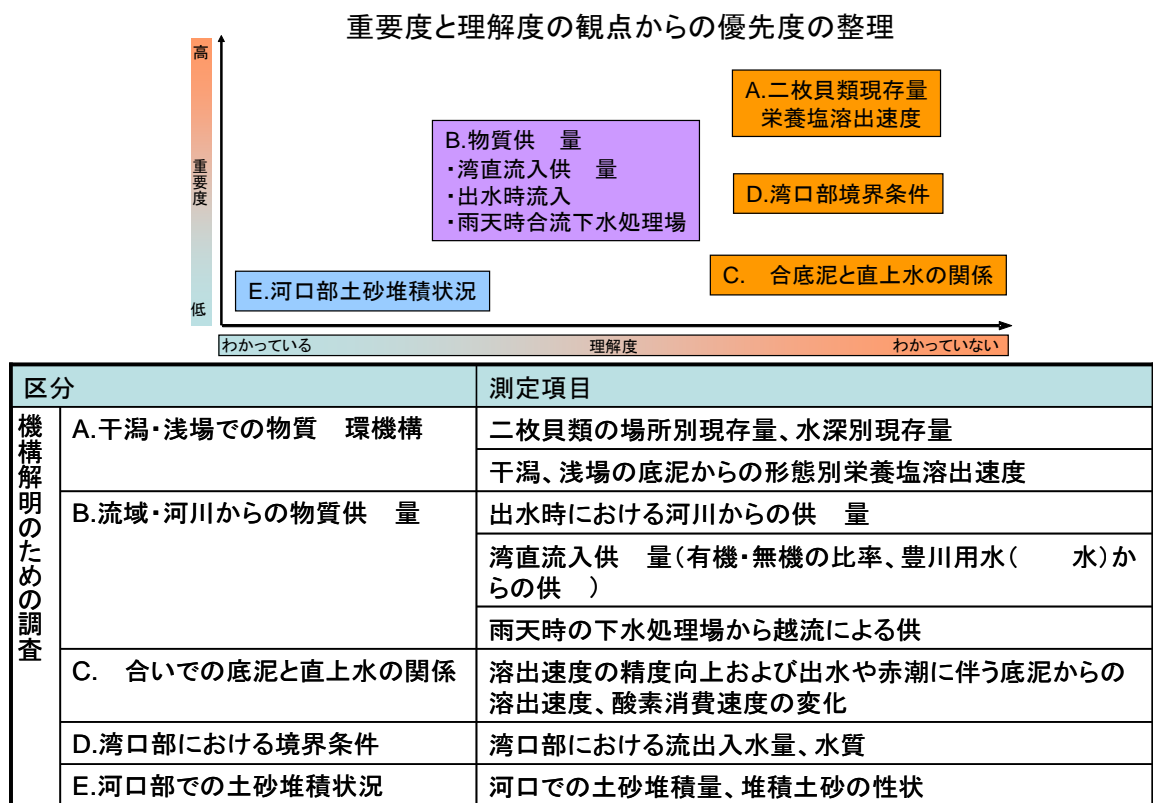
最終目標となる貧酸素水塊発生の抑制の主要因である底層 D0 濃度の向上やそれに伴う生物生息量の増大と、その手前の事象として新生堆積物の減少、赤潮発生を重要項目として取り上げ、既存調査の活用を念頭におきながら、モニタリング項目を図-23 に示すように再編・整理を行った。

区分		モニタリング指標	想定ア 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(月一回平、水時)
		順流 端の流入負荷量	流入負荷量の減少	多波長の 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 性の向上	項目は 類数・個体数・ 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 性の向上 浄化機能の向上	
		藻場の面積・ 度	生物多 性の向上 浄化機能の向上	(年1回以上春季、夏季)
全体効果の把握	懸濁態有機物	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)
		透明度	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	赤潮発生の低減	月1回以上の観測 々な通報情報を利用
	新生堆積物沈降量	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 機 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 生物	類等の生 、生 量 合の底生生物の生 、生 量	生物の多 性の向上	採取計測(月1回以上、春季)

図－ 2 3 施策効果把握のためのモニタリング

#### 6. 1. 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-24に示すように整理した。



図－ 2 4 機構解明のためのモニタリング



## 6. 2 研究プラットフォームの検討

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-25に示す。

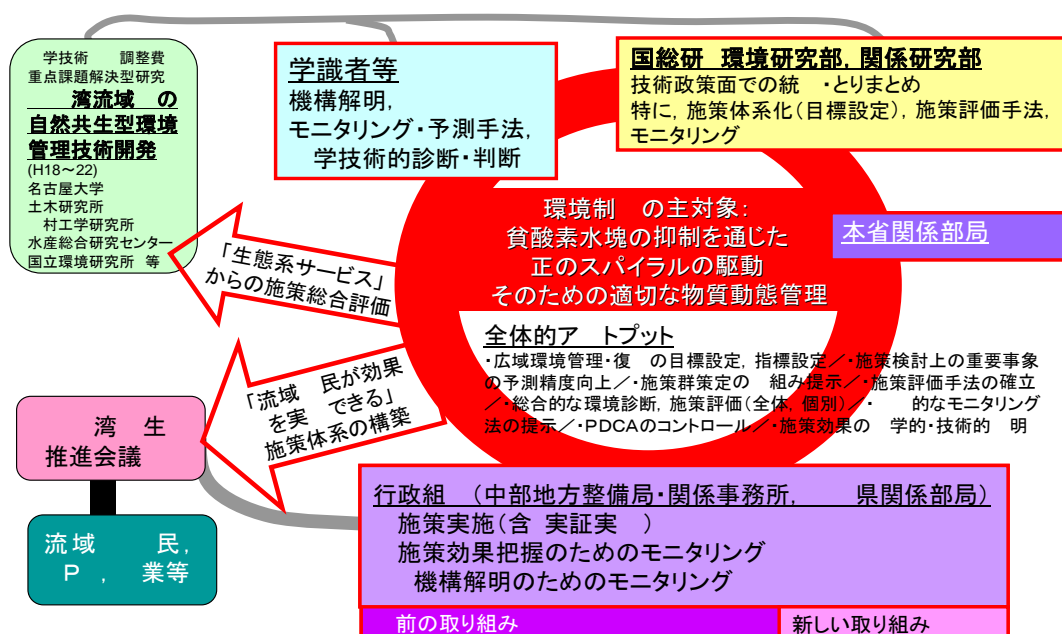


図-25 研究プラットフォーム（案）

## 7. おわりに

本研究においては、閉鎖性水域における環境再生の実現に向けて、三河湾流域をモデルにして、陸域と海域における様々なデータ分析と数値計算等を行い、目指すべき方向性と推進すべき方策について調査・検討した。

水環境や沿岸生態系は複雑系の問題であるために、不確実性が非常に高い。しかし本研究のように仮説を立てながら、実現象の分析を行い、少しでも確実なものとしていくアプローチが必要になってきている。

今後は、森・川・海のつながりをより強く意識して、流域住民・NPO・関係行政機関・研究機関等がより連携し、より効果的な方策について推進していきたいと考えている。

特に地球環境問題に直面している今日、それは喫緊の課題であるということを強く認識している。

最後に、本研究のWGに御参加頂き、陸域から沿岸海域にわたる広域かつ多要素が複雑に関係する本検討に対して、専門的な分野から様々な御助言を下さった関係各位に感謝の意を表します。また、本研究の基礎となる情報の提供をして頂いた中部地方整備局および各関連事務所の方々に感謝を申し上げます。



## 参考文献

- 1) 天野邦彦・時岡和利(2007)：ダム貯水池における珪藻類によるケイ酸捕捉量の評価, 環境工学研究論文集, 第 44 巻
- 2) 中村元彦 (2005)：伊勢・三河湾における漁業の推移. 愛知大学総合郷土研究紀要, 第 50 輯, 239-252.
- 3) 鈴木輝明・青山裕晃・中尾和正(2000)：マクロベントスによる水産機能を指標として底質基準試案－三河湾浅海部における事例研究－, 水産海洋研究, 64(2), pp. 85-93.
- 4) 武田一也(2005)：三河湾の漁場環境の推移, 愛知大学総合郷土研究紀要, 第 50 輯, 231-238.
- 5) 黒田伸郎・藤田光一(2006)：伊勢湾と三河湾の貧酸素水塊の短期変動及び長期変動の比較, 愛知県水産試験場報告, 第 12 号, pp. 5-12
- 6) 石田基雄・原保(1996)：伊勢・三河湾における水質変動と富栄養化について, 愛知水試験報 3 号
- 7) 青山裕晃、石田基雄、木村仁美(2002)：海況自動観測ブイ 10 ヶ年観測結果(1991～2000 年)からみられる三河湾の赤潮と貧酸素. 愛知水試研報 9 号.
- 8) 畑恭子・青山裕晃・鈴木輝明(2007)：メソコスムによる干潟生態系モデルの検証と三河湾一式干潟域の物質循環解析, 水産工学, Vol. 44, No. 1, pp. 53-58.
- 9) 服部克也(2007)：伊勢・三河湾におけるノリ養殖の現状と課題, 第 3 甲斐
- 10) 阿部徹・裴義光・本橋建(2007)：涸沼への流入負荷及び底泥からの溶出負荷の把握精度向上に関する研究, 河川環境総合研究所報告第 13 号