

水物質循環の健全化を軸とした環境再生

環 境 研 究 部 長

福 田 晴 耕

水物質循環の健全化を軸にした環境再生

環境研究部長 福田 晴耕

1. はじめに

様々な人間活動が引き起こす流域水物質循環システムの変質は、水環境の悪化、生物多様性の低下等となって現れる。これに対応するため様々な政策や事業が実施され、効果を上げてきているが、閉鎖性水域を抱える流域については未だ根本的な解決に至っていないケースが少なくない。一方、住民等による自然環境の保全・再生等のための地域活動が活発になっている他、水環境の一層の改善を図るため、地域住民を含む関係者が参画し、流域水物質循環の再生を目指す試みも始められている^{1), 2)}。

人間活動が高度に進んだ今日においては、流域における水物質循環系と人間とは相互に深く影響し合う関係にある。それゆえに、水物質循環の健全化のためには、人間の側からの幅広い貢献を前提にした総合的取組みが不可欠であるとの認識は、一般論のレベルでは広く共有されつつあるところであろう。しかし、その具体的実行の段になると、解決すべき課題が少なくない。中でも、関係者全員が複雑な水物質循環現象の構造と問題の構図を理解した上で、行政による施策や事業、各主体による活動等の効果・影響を評価し、互いの利害関係を調整し、対策の全体的方向性を探り、総合的な取り組みにつなげていくための手法を見出すことは容易ではない。また、複雑な現象を構成する各パーツについての現象解明や研究開発がそれなりに進む中で、それらの成果を有機的に連携させ、課題解決に役立つよう再統合していく手法をいかに確立・定着させていくかも重要な課題である。

流域における、ひいては流域から閉鎖性水域や沿岸海域にわたる水と物質の流れの健全化をはかっていくことは、様々なスケールを持つシステムが階層的に存在する地域の環境再生を統合的にはかっていくという難題に対する突破口になると期待される。本講演では、広域的な水物質循環の健全化を支えるための研究開発の現状とその成果の実践へのつながりを、霞ヶ浦流域と東京湾流域を対象とした検討事例を紹介しつつ^{3), 4)}、地域の水環境再生の今後の展開を俯瞰する。

2. 水物質循環の健全化に向けた検討プロセス

今日、都市における水環境等環境の悪化は、特定の活動や汚濁源によるものというよりも、個々人の生活や産業活動等社会総体による水、エネルギー、資源等の大量消費・排出や、市街化に伴う植生分布や地表面構造の変化等、都市や社会の存在自体に係わるものであり、根本的な問題解決のためには、行政や市民団体等による国土・都市構造の変革とともに、人々のライフスタイルや社会システムについても

改善していく必要がある⁵⁾。

そこで、水物質循環の健全化を軸にした環境再生を進めるためのビジョンやプロセスの提示によって、各地域にあったビジョンが地域の主体により実行されることが必要である。これにより多大な環境負荷となっている人の生活や社会システムが、物質的な豊かさ、利便性・快適性等を享受しつつ環境負荷を軽減し、自然システムが健全化されることで、自然が人や社会にもたらす様々な機能・恩恵を増進させることができる。またそのような自然との触れ合いに、安らぎ、喜び、生き甲斐等の新たな価値を見出すことにより、さらに満足度の高い生活の実現を図るとともに、そのための社会的な好循環が形成されていくことを目指している。

上記を踏まえ、ここでは水物質循環の健全化の一般的なプロセスを図-1のように提案する。このプロセスは人の生活という視点から、できる限り実感しやすい将来ビジョン案を複数作成し、これらをもとに地域の関係主体が現在の生活とも比較しながら、望ましい国土・社会のあり方を思考し、実現させていくというものである。

プロセスの第1段階は、「問題の把握・掘り起こし」であり、その地域の人々が本質的な問題点を認識することである。人々が共感し、真にその改善を願う問題の掘

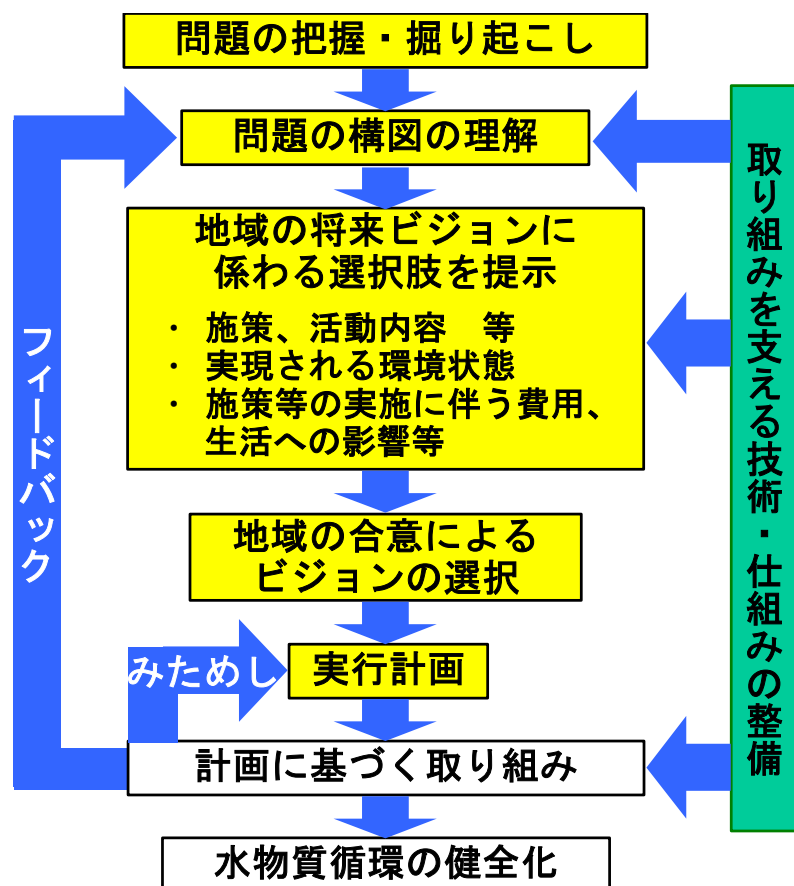


図-1 水物質循環の健全化に向けた検討プロセス

り起こしが、「再生」へのエネルギーとなる。

次の段階は「問題の構造の理解」であり、その問題を生じている構造や因果関係を明らかにすることである。この段階においては、種々の環境状況を水循環、物質循環等のシステムとして捉え、このシステムを物理・化学的な法則から解釈・再現するシミュレーションモデルの活用が有効となる。

これにより、「問題の構造」が明らかになれば、続いて問題解決のための施策等の立案を行うとともに、それらを総合的に組み合わせて実施した場合に、どのような環境、社会、生活が実現されるかの検討を行う。ただし、現在の国土・社会の有り様がおおよそ戦後の 50 年程度の時間スケールで形成されたことを振り返れば、水物質循環における環境再生も数十年の時間スケールで取り組むべきものであり、検討のベースも段階を踏みながら数十年先の将来条件も考慮に入れる必要がある。このような将来条件には、地球温暖化に伴う気象変化、人口減少と年齢構造の変化、経済規模・産業構造等現在直面しつつある問題が関わってくるであろうし、またこれらを将来シナリオに織り込むことにより、これらの問題に対して、国土マネジメントの面からどう対応していくかを具体的に検討することができる。

ここでは、水環境改善施策について、様々な施策やそれらの組み合わせにより、「現システム維持型」を含めたいくつかのビジョンを、自然との触れ合いに係わる新たな価値観、新たなライフスタイルの提案とともに、できるだけ分かりやすく、実感できるような形で提示し、関係主体間の議論に提供していくこととしている。各ビジョンの検討においては、具体的な施策・活動等の内容だけでなく、それらにより実現される環境条件、それに伴う費用や生活上の制約等を考慮して評価することが必要である。これらの情報をもとに関係主体間の利害調整や、将来像の選択が行われるが、必要な情報に対しては、常に議論から検討へのフィードバックが必要である。

関係主体の総意として水物質循環の健全化に向けたビジョンが選択されれば、それに基づき、目標の明確化、目標達成に向けた具体的な実行方策の検討等が行われ、「実行計画」が策定される。あわせて、それまでの協働活動により、関係主体において、地域社会やライフスタイルの変化に対するモチベーションが形成されていく。

「実行計画」が策定されれば、様々な施策や地域住民の自発的活動をいわゆる「みためし」・「アダプティブマネジメント」を行いながら実施する段階となるが、水循環の健全化に向けたモチベーションや活力を失わず、持続的な取り組みができるための仕組みづくりが重要になる。

3. 霞ヶ浦と東京湾における現状と統合型水物質循環モデル

水物質循環の健全化プロセスの合意形成にはその構造を的確に表現するモデルが必要である。霞ヶ浦と東京湾の水環境の課題を踏まえて開発した陸域・水域統合型モデルの概要を紹介する。

3. 1 霞ヶ浦とその流域圏

3. 1. 1 霞ヶ浦における課題の概要

霞ヶ浦では、昭和 30 年代始めまでは概ね良好な水環境が保たれていたが⁶⁾、昭和 40 年代に水質悪化が明確になり、昭和 50 年代半ばに湖心の COD（化学的酸素要求量）が 10mg/L を超えた。昭和 60 年 12 月には、湖沼水質保全特別措置法に基づく指定湖沼に指定され、3 期 15 年間にわたって湖沼水質保全計画が策定されてきた。現在も、第 4 期湖沼水質保全計画(平成 13～17 年度)⁷⁾に基づき、流域対策(下水道整備、面源負荷対策等)、湖沼内対策(浚渫による底泥溶出負荷削減、浄化用水の導入等)といった水質保全対策が行われているが、昭和 60 年代以降、目立った水質の改善は全体的には見られておらず、COD、T-N（全窒素）は横這いで、T-P（全リン）は増加傾向にある(図-2 の「実測値」)。

このように霞ヶ浦は、陸域（流域）～閉鎖性水域にわたる水物質循環の変質がもたらす問題の難しさをよく表しており、陸域モデルと湖沼モデルを一体化した本モデルの適用性を検討するのに適したフィールドと言える。

また過去から現在に至る流域の実態と課題の理解を容易にする生物を指標とした流域診断も重要なアプローチである。流域環境の変遷をより具体的に理解することを通じて、流域が目指すべき再生ビジョンを明確にすることに役立つ。その一例として昭和 35 年当時と平成元年の霞ヶ浦の水生植物の分布図－3,4 に示す。

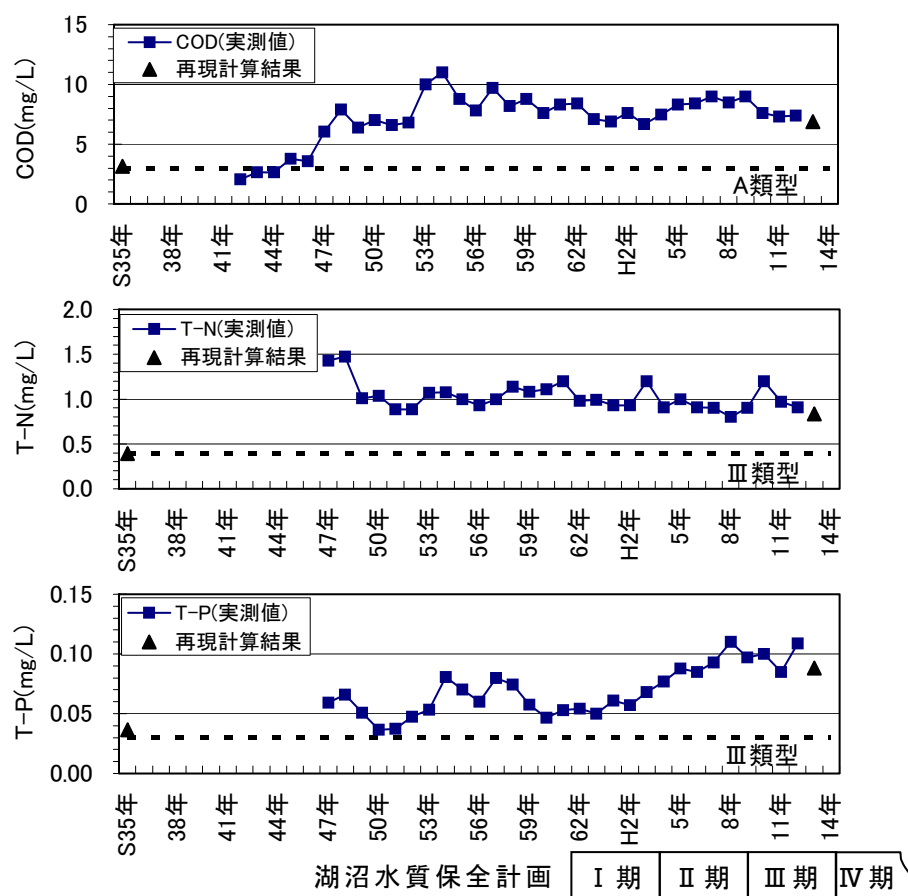


図-2 霞ヶ浦における水質の変遷(湖心)

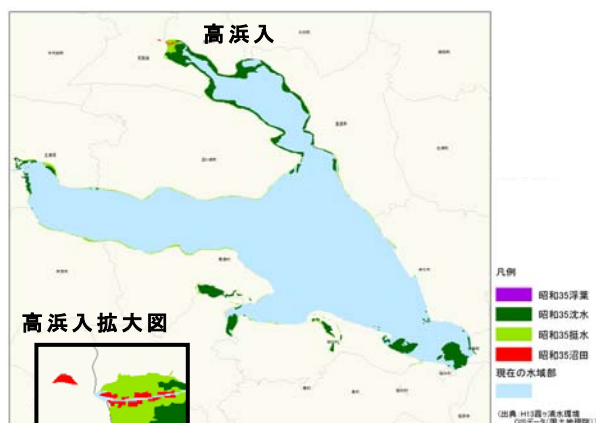


図-3 昭和 35 年当時の霞ヶ浦の植生分布

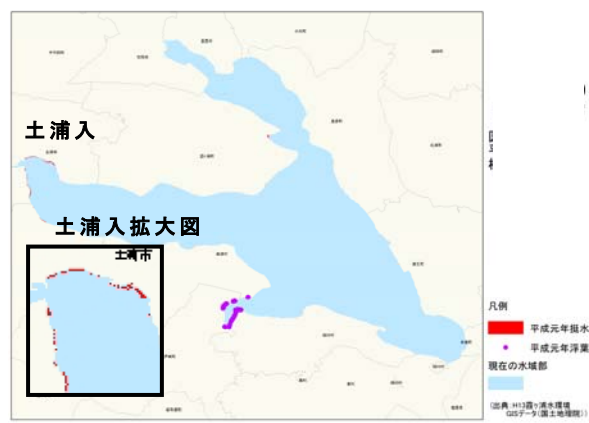


図-4 平成元年の霞ヶ浦の植生分布

3. 1. 2 水・物質循環モデル

利用した霞ヶ浦水物質循環モデルは陸域モデルと湖沼モデルから構成されている。モデルの構成を表-1 に示す。このモデルの特長は、陸域モデルと湖沼モデルが結合され、陸域と水域に関する施策を組み合わせた検討ができることにある。本モデルで追跡対象とする主な物質は、陸域モデルでは COD, T-N, T-P, 湖沼モデルでは COD, T-N, T-P, Chl-a (クロロフィル a) である。

このモデルは GIS と連動しており、計算に必要な流域の面的情報は GIS データから受け渡される。すなわち、検討対象の流域が 500m のメッシュに分割され、必要な流域情報(地形、土地利用、人口、家畜飼養頭数等)が GIS データとして格納されており、流域水物質循環モデルの入力データとして接続することにより、シミュレーションが実行される。したがって、流域が異なっても、同様の GIS データが整理されれば、流域情報のモデルへのインプットを行うことができる。また GIS をプラットフォームとしたユーザーインターフェースの整備により、シミュレーションの実行に必要な水環境改善に係る施策の選択と条件入力、モデルの実行、結果の可視化などの一連の操作を 1 つのインターフェースの中で行うことができる。

	水循環モデル	物質循環モデル
蒸発散モデル	降雨は土地利用に応じて蒸発散・地下浸透・表面流出に分配させる。 蒸発散は Thornthwaite 式	雨水に含まれる負荷は、地下浸透量、表面流出量に応じて、地下水モデル及び地表流モデルに与える。
地下水モデル	水の挙動(水位、流速)の基礎式: 平面 2 次元多層浸透流。 地表への湧出(湧水量): 地下水水位と地表面標高との水位差に透水係数を乗じる。	物質の挙動(移動、拡散)の基礎式: 平面 2 次元移流拡散方程式(土壌への吸着を考慮)。
地表面流モデル	水の挙動(水位、流速)の基礎式: 平面 2 次元不定流(Dynamic-wave 式)。 メッシュ内で発生する表面流出量、地下水湧出量、人工系発生汚水量が連続式の増分として与えられる。 水田の表面流出は降雨時には一時田面に貯留された後、水田の欠口部から流出(基礎式は水田に対する連続式)。	物質の挙動(移動、拡散)の基礎式: 人工系排出負荷と自然系排出負荷、湧水負荷を入力条件としたメッシュ単位での収支式。 流域の浄化機能の基礎式: Streeter-Phelps 式 自然系排出負荷は負荷量堆積を考慮した雨天時流出負荷量算定モデルを用いる(降雨時のみ流出)。 ただし、農地については地下浸透も考慮(灌漑期の水田は非降雨時も浸透)。
河道モデル	水の挙動(水位、流速)の基礎式: 1 次元 Kinematic-wave モデル	物質の挙動(移動、拡散)の基礎式: 1 次元移流方程式(河川の浄化機能は Streeter-Phelps 式)
人工系モデル	上水、工業用水、農業用水は、当該メッシュの地下水、河道、湖沼から取水。 排水(生活系、工業系)は、当該メッシュの地表面流モデルに与える。 ただし、下水処理、し尿処理の排水は処理場から川湖に地表面流または湖沼モデルに与える。	生活系・畜産系・産業系の排出負荷量はメッシュごとに GIS を用いて原単位法により計算し地表面流モデルの入力条件とする。 ただし、下水処理、し尿処理については処理場から地表面流又は湖沼モデルに与える。
湖沼モデル	水域分割: 7 つの Box に分割した 1 層モデル。 水収支: Box 毎に流入流量、取排水量から容積変化を計算し、過不足分を下流 Box から調整する。	流入流出過程と移流拡散過程と当該物質の反応過程を表現する物質収支式

表-1 霞ヶ浦水物質循環モデルの概要

3. 1. 3 水・物質循環モデルによる現況再現

水環境改善の取り組みの将来への方向性を描く場合、過去の良好な水質が保たれていた時代から水質が悪化して固定化した現在までの変遷を、大局的に理解することが重要である。本論では水質が良好であった頃と現況の二時点の再現から、水物質循環モデルを通じて環境変遷の構図を理解することを試みる。

はじめに、現況の霞ヶ浦における水質レベルの再現性を調べた。現況の再現にあたっては、第4期湖沼水質保全計画⁷⁾に係る資料等をもとに流域条件、汚濁負荷原単位等を設定し(表-2の「現況」)、平成11～15年の5年間の気象条件(降雨量、気温等)を入力することでシミュレーションを実施した。地下水位、地下水質の初期値は、年間雨量程度の降雨を定常で与えて長期間計算を行い、地下水位がほぼ収束した時点の値を設定した。昭和35年当時の霞ヶ浦流域の土地利用については、(財)茨城県科学技術振興財団が行っている霞ヶ浦水質浄化プロジェクト⁸⁾が推計した過去の土地利用面積から、さらに遡って推計した。また、底質条件(溶出速度)については、表層底質の観測値、溶出速度試験結果^{9), 10)}等を考慮して設定した。さらに、植生やシジミによる効果については、田畑¹¹⁾や田中等¹²⁾の実験結果により設定した。河川流出量・流出負荷量、湖沼水質の再現結果を、降雨量が平均的であった平成13年(以後、「現況」)を中心に図-5、図-6に示す。これより、現況の霞ヶ浦における水質の年平均レベルでの再現性は得られたと考えられる。

表-2 霞ヶ浦流域に係わる設定条件

条件項目	過去(昭和35年)	現況(平成13年)
①流域人口(人)	60万	96万
②生活排水処理形態(%)		
下水道	0	40
農業集落排水	0	4
合併処理浄化槽	0	18
単独処理浄化槽	0	19
し尿処理場	30	19
自家処理	70	0.02
③生活用水(L/人・日)	104	270
④家畜頭数		
牛・馬(頭)	71,294	40,700
豚(頭)	96,183	332,700
⑤土地利用	トレンドから推定	国土数値情報(H9)
⑥湖岸植生帯(ha)	1493.2	12.8
⑦コイ養殖(t)	0	5,001
⑧シジミ漁獲量(t)	3,000	0
⑨底質条件(溶出速度)	(湖心値)	(湖心値)
COD(mg/m ² /day)	35	71
N(mg/m ² /day)	23.2	46.3
P(mg/m ² /day)	0.23	0.47

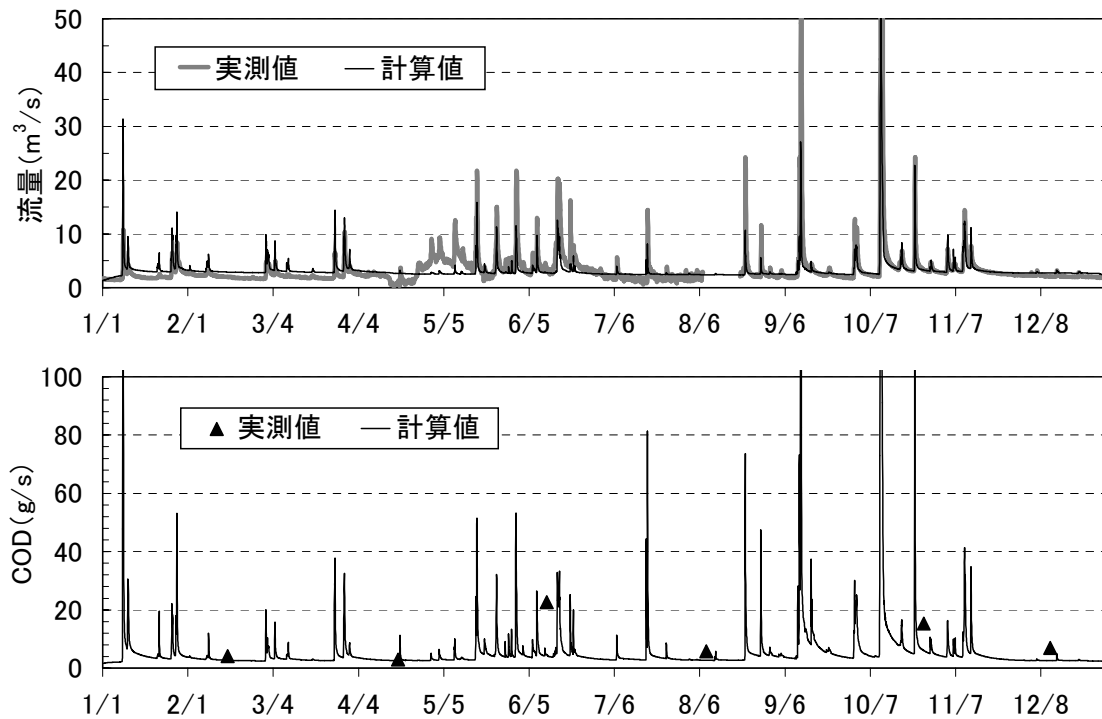


図-5 流量・負荷量の再現結果（恋瀬川：平成 13 年）

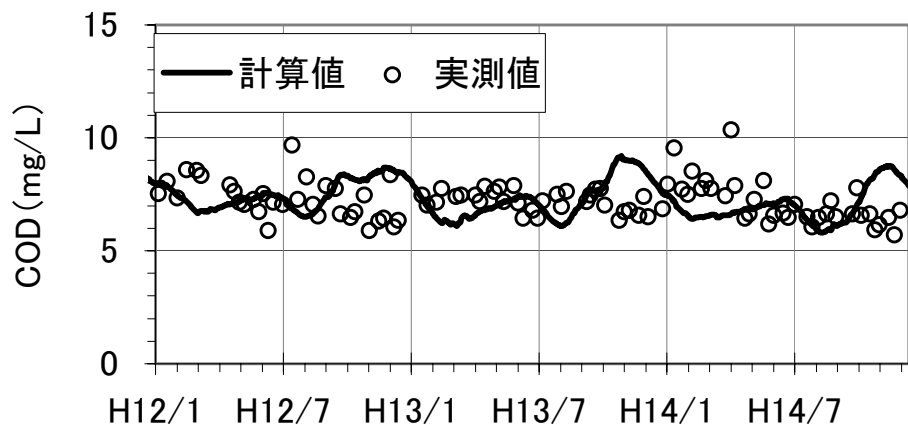


図-6 霞ヶ浦の水質再現結果（湖心：平成 12～14 年）

次に、過去の霞ヶ浦における水質の再現を検討した。汚濁が進んでいなかった昭和 35 年(以後、「過去」)を対象とし、表-2 の「過去」に示す流域条件及び水域条件のもとで¹³⁾、第 4 期湖沼水質保全計画の汚濁負荷原単位を用いて計算を行った。計算は、陸域モデルは平成 13 年の 1 年間の気象条件で、それをうけた湖沼モデルは平成 11～15 年の 5 年間の気象条件で行い、5 年分の計算値を平均することで評価した。なお、当時の知見がない条件については、水物質循環へ与える影響が大きいと考えられる項目については現況と同じ値を与える等の方法で設定したが、底質条件(水温 20℃における溶出速度)については、当時の水質の状況から、現況の溶出速度の 5 割に設定した。

3. 2 東京湾とその流域圏

3. 2. 1 東京湾における課題の概要

東京湾流域圏においては、高度経済成長期以降、首都郊外の土地開発が活発に進められることにより、生物の生息生育環境が大きく変質してきた。水環境については、図-7 に示すとおり東京湾の水質悪化が河川と同様に 1950 年代後半から顕著になり、1970 年頃にピークに達した。東京湾に対しては、流域からのインパクトに加えて、干潟の埋め立てを中心とする直接改変のインパクトも作用しているが、東京湾の水質改善には流域から発生する負荷量の削減の取り組みが不可欠である。

そこで流域からの汚濁負荷量の削減を目指して、1978 年には COD の総量規制制度が導入された。現在は、2009 年度を目標とする第 6 次総量規制のための汚濁負荷量の総量の削減に関する基本的な事項を定める総量削減基本方針の策定が環境省により進められている¹⁵⁾。また公共用水域の水質環境基準を達成維持するための下水道整備を効果的に実施することを目的として、東京湾流域下水道整備総合計画が平成 24 年を目標年次として平成 9 年に策定されている¹⁶⁾。このような法的な規制や計画は水質改善に大きな役割を果たしてきたが、栄養塩である窒素、リンの流入による植物プランクトンの増殖による有機物の増加による赤潮や青潮の発生が定常化する状況が続いている。

このように、東京湾流域圏には、流域の自然システムに負担をかけながら都市的活動様式を拡大させていくという流域圏に関わる問題の構図が端的に現れており、施策群検討に最も適した対象の 1 つである。

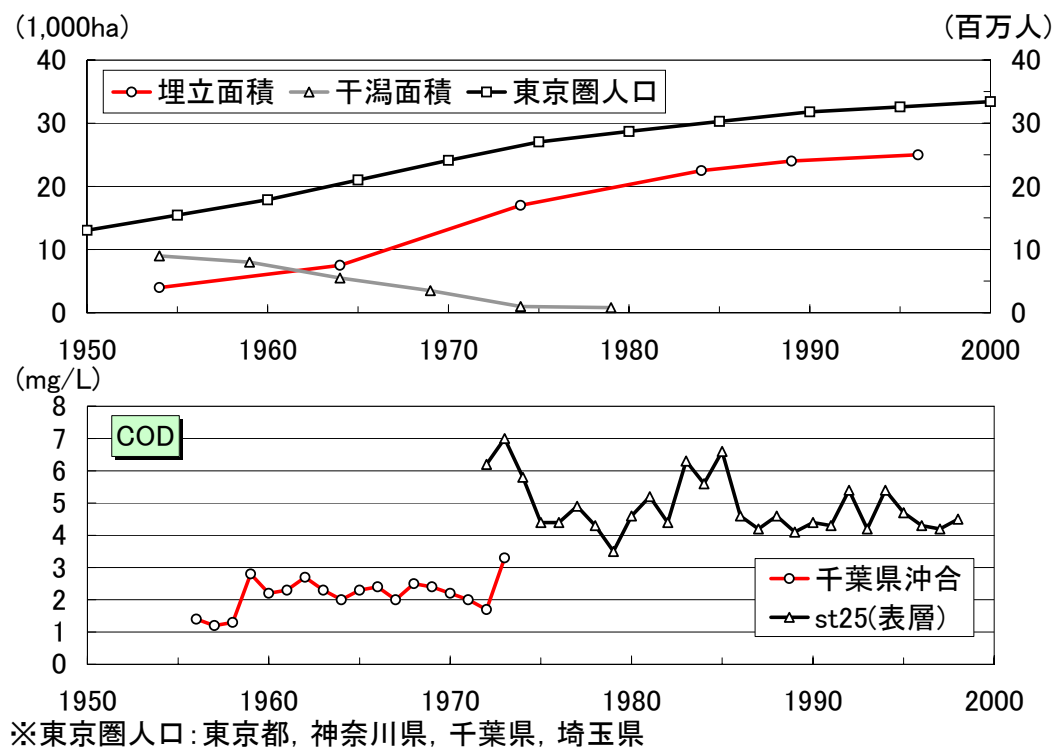


図-7 東京湾流域の人口,干潟面積,埋立及び水質の経年変化¹⁴⁾

3. 2. 2 水・物質循環モデル

水・物質循環モデルは、表-3にモデルの内容を示す。自然系水循環の流出過程を表現する分布型流出モデル¹⁷⁾をもとに、農業・工業・生活等の用水・排水といった人工系水循環を組み込み¹⁸⁾、さらにその水を介して流動する栄養塩等の物質循環を表現するモデルを組み込んだもの¹⁹⁾である。モデルの構造は、東京湾流域を約1km×1km（国土数値情報の3次メッシュ）の15,558メッシュに分割し、図-8に示す6分類の土地利用条件をメッシュ毎に与え、鉛直方向に表層・不飽和層・地下水層の3層に重ねたタンクモデルを用いるというものである。計算対象物質は、窒素、リン、COD、BOD（生物化学的酸素要求量）である。

表-3 東京湾流域水物質循環モデルの概要

	水循環モデル	物質循環モデル
表層モデル	降雨を表面流、早い中間流、地下浸透流に分離。 表面流はManning則が成り立つものとして基礎式を決定。 早い中間流出量、地下浸透量は浸透能(タンク水位と流出孔との差に比例)に比例。 水平方向へは落水線に沿って流下(不飽和帯、地下水モデルも同様)。 蒸発散はPenman式。	降雨負荷、面源負荷の地表面への堆積による汚濁負荷は表層流(表面流+早い中間流)の掃流力によって流出。 堆積物の流出負荷量は流量のべき乗に比例。 不飽和タンクへは表層流と同じ水質で浸透。
不飽和帯モデル	遅い中間流は不飽和透水係数(水分量に比例)に比例し、動水勾配が近似的に地形勾配に等しいとして流出量を計算。 地中浸透量は不飽和透水係数に比例し、動水勾配を1として計算。	地中浸透した汚濁負荷は土壤内に蓄積し、蓄積物に吸脱着する過程を考慮。 蓄積物から溶脱した汚濁負荷は中間流により流出。 地下水タンクへは中間流と同じ水質で浸透。
地下水モデル	被圧地下水はタンク水位に比例し、不圧地下水はタンク水位と不圧地下水発生高の差の2乗に比例。	地中浸透した汚濁負荷は土壤内に蓄積し、蓄積物に吸脱着する過程を考慮。 蓄積物から溶脱した汚濁負荷は基底流により流出。
人工系モデル	上水、工業用水、農業用水は、当該メッシュの地下水もしくは河道から取水。 排水(生活系、農業系、工業系)は、当該メッシュの表層モデルに与える。ただし、下水処理の排水については処理場から表層または湾モデルに与える。	生活系・畜産系・産業系の排出負荷量はメッシュごとにGISを用いて原単位法により計算し、表層モデルの入力条件とする。 ただし、下水処理の負荷については処理場から表層又は湾モデルに与える。
河道モデル	水の挙動(水位、流速)の基礎式：1次元Kinematic-waveモデル。 (対象河川：利根川(江戸川分派点まで)、江戸川、荒川、中川、隅田川、多摩川、鶴見川等26河川)	各タンクから河道に流出した汚濁負荷について河床への沈降・吸着を考慮。

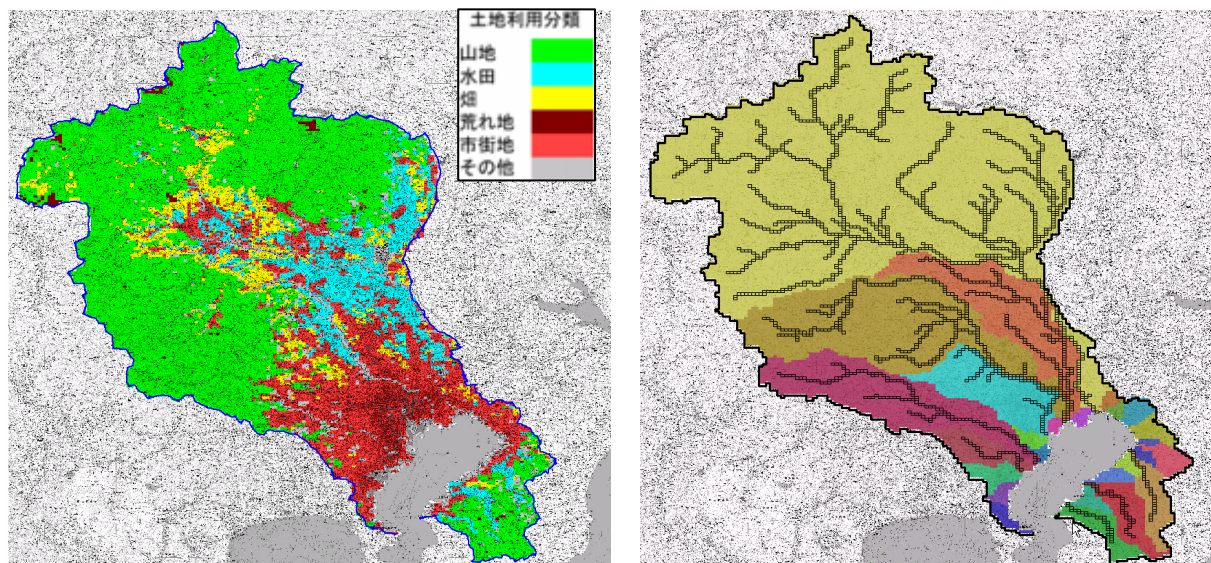


図-8 対象となる東京湾流域(左：土地利用，右：流域分割と河道網)

3. 2. 3 水・物質循環モデルによる現況再現

現況の水量と水質のモデルによる再現性を調べるため、土地利用、水利用、排出負荷に関するデータを収集し、2001年の年間計算を行い、河川流量10地点、河川水質8地点、東京湾水質5地点について計算値と実測値を比較した。その結果を、代表地点の河川流量・水質について図-9に示す。これらに表されるように、モデルによる計算は、河川流量・水質の時間変化特性を大局的に再現しており、施策群の効果の把握が可能と判断した。

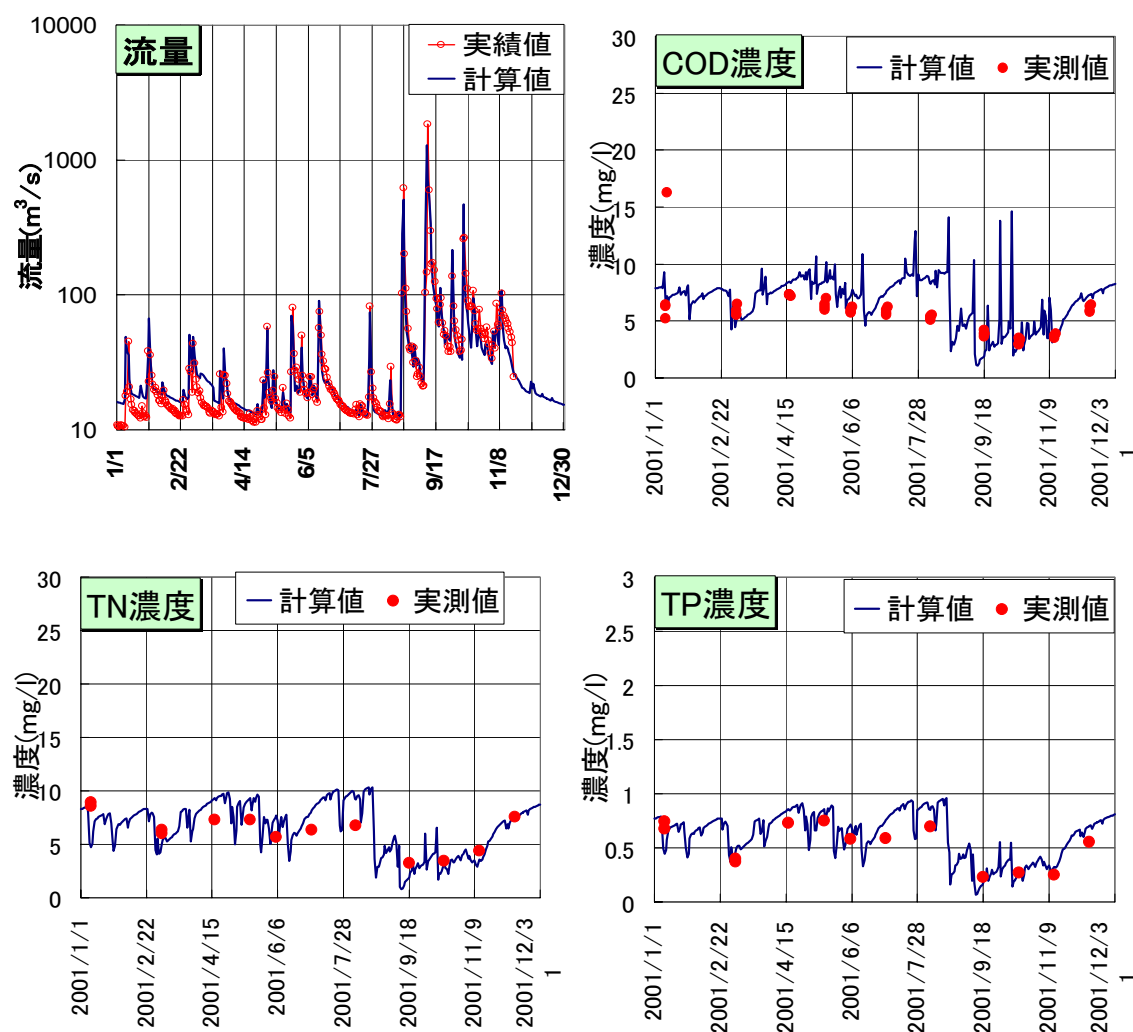


図-9 河川流量・水質の実測値と計算値（多摩川・石原地点）

4. 水環境改善の総合取り組みに向けた施策の感度分析

4. 1 計算の前提条件

霞ヶ浦や東京湾のような閉鎖性水域における水質改善効果の施策評価において、数多くある施策の効果を体系的に把握するために、同じ指向をもった施策同士でグルーピングし、各グループの中にある個々の施策の効果把握、次いで、同一グループに属する全ての施策（以後、施策群と呼ぶ）を実行した場合の効果把握、さらに、異なる施策群を組み合わせた場合の効果把握を順次行うというような階層的検討が有用と考えた。このグルーピングの指向軸として、本論では、図-10 に示すとおり、実施手法にかかわる質の違いに着目して、施策群1；社会資本整備による環境負荷の削減、施策群2；流域の住民等による自発的または誘導的な環境行動の実践、施策群3；面的な土地利用の改変や自然環境の保全・再生、の3つを設定し、各施策群について個別にその効果を評価するとともに、各施策群を組み合わせた場合の効果の検討を行った。

各施策をモデル上で表現するための条件やパラメータ設定に際しては、既往の文献を極力参考にした。ただし、明確な根拠を持って与えることが現時点では難しく、割り切って設定しているものもある。また、前述のように、モデルの実現象再現能力に関しても向上させるべき点を残している。これらの意味で、以下に述べる結果は、種々の環境改善施策に概ね対応するようにパラメータや条件を変えて、モデルの感度分析を行ったものであり、したがって個々の施策の評価に直接資する熟度はまだ有していない。

なお、本計算では、気象（気温、降水など）、人口については、現在(2001 年)と同一の条件を与えた。土地利用、産業などの社会経済活動にかかわる条件については、施策と連動させて与えることとし、対象とする施策がその条件の制御を直接含んでいない場合は、現況（2001 年時点）を与えて計算した。また、施策が機能するまでの経過時間(事業期間)は考慮していない。

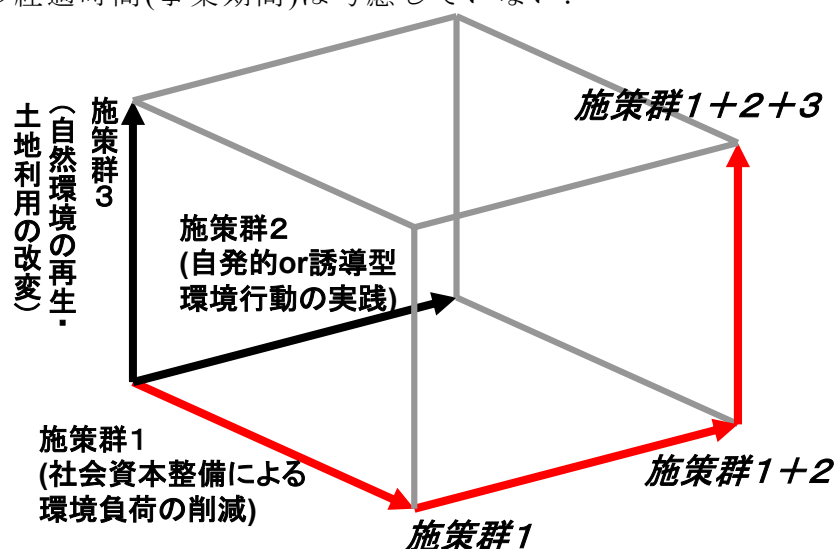


図-10 施策群設定の概念図

4. 2 霞ヶ浦とその流域圏における施策群の実施効果

霞ヶ浦において、水物質循環モデルを適用して、各種施策検討について水環境の改善効果を検討した。表-4 が対象にした湖内対策と流域対策である。これらの施策のうち、那珂川からの浄化用水の導入は水資源確保の目的と併せて既に事業が進んでいる。また、植生浄化は初期投資が必要であるが、湖岸植生帯の再生による生態系の保全・再生の効果も期待できる。一方、シジミ浄化は、塩分濃度低下の問題はあるが、種苗生産による養殖試験も行われており²⁰⁾、漁業振興との相乗効果も期待できる。

重点再生エリアは、囲い込み水域内に導水することで、その内側のみではあるがCOD2.1mg/L の良好な水域が速やかに形成される。この水域を水道取水、希少動植物の再生等に利用することで、水質改善の効果が実感でき、住民の水質問題への関心につながる。

各施策を個々に実施した場合の湖心水質(COD)の変化を図-11に示す。ここで、図中の Δ CODは、陸域モデルについては平成13年の1年間の気象条件で、それをうけた湖沼モデルについては平成11～15年の5年間の気象条件で計算を行い、5年分の平均値に関する無対策値との差分を表したものである。図から、流域対策（黒棒）、湖内対策（白棒）のそれぞれが、一定の水質改善の効果を示しており、前述のように流域対策、湖内対策を総合的に行っていくことの重要性がうかがえる。

表-4 霞ヶ浦水物質循環モデルでの設定内容

	水環境施策	対策
施策群 1	下水道の整備：流域内の下水道処理人口比率を46%から100%まで向上	流域
	高度処理型合併処理浄化槽の整備：下水道未整備の全人口に対して100%整備	流域
	透水性舗装：流域内の全道路に透水系数 1.0×10^{-2} cm/sの透水性舗装を整備することで表面流出を抑える設定とした	流域
	下水処理水の再利用：全下水処理水を生活用水として再利用することで生活用水取水量と下水処理場からの排水量を削減する設定とした	流域
	浄化用水の導入：那珂川(COD 2.0mg/L, T-N 1.44mg/L, T-P 0.038mg/L)からの浄化用水を土浦に15m ³ /s導水	湖内
	溶出量削減：湖内全域にわたって、底質からの溶出速度を現況設定値からさらにCOD75%, T-N50%, T-P60%削減	湖内
施策群 2	各戸雨水貯留浸透の整備：全家庭の屋根全体に貯留高さ10mmの貯留浸透施設を設置することで表面流出を抑える設定とした	流域
	環境保全型ライフスタイルへの転換：全住民が環境保全型ライフスタイルを実行することで排水量が36%削減されると設定した。また、生活雑排水未処理人口の生活雑排水からCOD 28%, T-N 30%, T-P 20%が削減されると設定した	流域
	環境保全型農業：環境保全型農業推進により田畑への施肥量を削減し、作物の生長に必要な分以外を100%削減する設定とした	流域
	家畜し尿の農地還元：全家庭し尿を農地に還元することで家畜由来の負荷量を100%削減する設定とした	流域
施策群 3	植生浄化：昭和35年時の植生面積14.932km ² を再生することで植生による浄化(COD 0.08g/m ² /日, T-N 0.07g/m ² /日, T-P 0.006g/m ² /日)の回復を図る	湖内
	シジミ浄化：昭和35年時の漁獲量3,000tを再生することで、シジミによる浄化(シジミ湿重量に対する物質重量比率で、COD 10.158%, T-N 0.575%, T-P 0.0359%)の回復を図る	湖内
	湿地浄化：主要10河川の河口部に1km ² の湿地を確保することで植生・土壌・生態系等の機能を活用した浄化を図る	流域
	水産負荷対策：コイ養殖からの水産負荷を0にする	湖内
	重点再生エリア：透過堤によって0.09km ² の範囲を囲い込み、那珂川から0.1m ³ /sを導水する	湖内

さらに図-11 には、施策の組み合わせ効果についても示している（組み合わせられる施策を包含する灰色の棒により表示し、さらにそれらを組み合わせたものを点線により表示）。まず、組合せ 1 はインフラ整備が主体となるもので、下水道の整備や浄化用水の導水など、公共事業を中心とした汚濁負荷削減のためのハード的な施策を集中的に組み合わせたものである。組合せ 2 は、流域住民参加型とも呼べるもので、各戸雨水貯留浸透施設の整備、環境保全型ライフスタイルの推進等、住民の生活スタイルの転換をはかるソフト的な施策を組み合わせたものである。組合せ 3 は、自然機能の回復を中心とするもので、湖岸植生帯の再生、湿地浄化等、自然の浄化機能を回復することで汚濁負荷を削減する施策を組み合わせている。

図より、ハード的な施策の集中実施、自然機能の回復、ソフト的施策を含めた循環型社会の構築のいずれについても、各施策単独よりも相当程度効果が増大すること、しかしそれでも、1つの組み合わせだけで劇的な水質改善が図られるわけではなく、さらに施策群を組み合わせることで効果が増大することがわかる。このことは、複数の施策群を組み合わせることの重要性を示している。その際には、各組み合わせの効果やコスト（初期と維持管理段階）の比較とともに、水質の改善度だけでは表現できない流域住民が持つ感覚的な評価にも留意すべきであろう。これには、施策実行面での確実性・信頼性・迅速性、地域住民への波及・浸透効果と活動持続効果、自然とのふれ合い増進や教育の効果、地域づくりにかかわる効果など様々なものが考えられ、これらを含めた多面的な評価も施策やその組み合わせの選択において欠かすことができない。

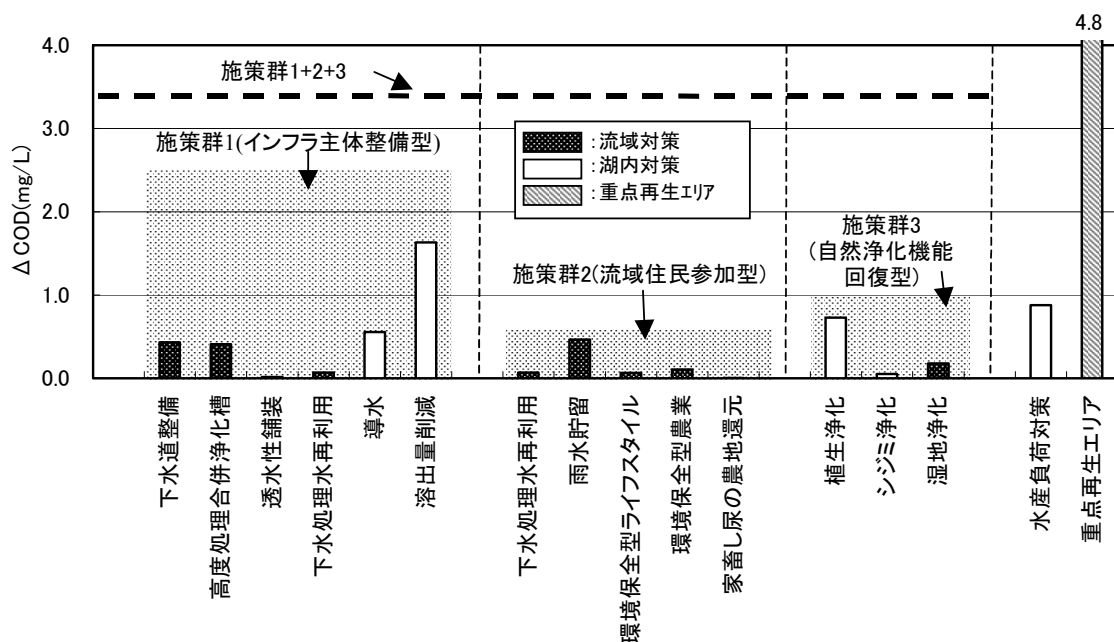


図-11 湖心の平均水質における種々の施策条件による感度分析結果
(現況(計算値: COD 6.9 mg/l)との差分)

4. 3 東京湾流域における施策群の実施効果

表-5に基づき東京湾流域水物質循環モデルを用いて計算を行った。計算結果から、東京湾に流入する全河川を対象に流量で重み付け平均した水質を求め（以後、「平均水質」と呼ぶ）、各施策（群）の実施による現況からの改善効果として図-12にまとめた。

排出負荷量の6割を生活排水で占める東京湾流域では、合流改善や下水の高度処理化、高度処理合併浄化槽の整備など生活排水対策の効果が相対的に大きい傾向にあることが把握できる。生活排水対策につながる非ハード的対策（下水処理場への負担を減らすことを含む）、すなわち排水量や排出負荷量の削減を流域住民自らが実践することの重要性も計算結果に現れている。

施策(群)の組合せ効果（各施策を包含する施策群単位の棒グラフにより表示）を見ると、複数の施策の実施により、効果が着実に増大することが確認できる。このことは、異なる施策群を重ねることについても言える（図-12では、施策群1と2を合わせて実施した場合、施策群1、2、3を合わせて実施した場合も効果の計算値が示されている）。以上のことは、単独の施策(群)では目的に達しない場合に、施策(群)の組み合わせ実施を進めることの重要性を改めて示すものである。

表-5 東京湾水物質循環モデルでの設定内容

	水環境政策
施策群 1	下水道の整備: 下水処理計画区域の全域に下水道整備を行う
	合流改善: 日雨量25mm(現況5mm)以下までは処理排水を排出
	下水の高度処理化: 処理場からの排出負荷量をBOD,COD,TNは8.0(mg/l), TPは0.4(mg/l)と設定
	単独浄化槽の合併処理化: 下水道整備予定外の地域全体について、単独浄化人口を全て合併浄化人口に転換
施策群 2	高度処理合併浄化槽整備: 下水道整備予定外の地域全域に高度処理合併浄化槽を整備(排出負荷量はBOD,COD,TNは2.5g/人日, TPは0.25g/人日)
	透水性・保水性舗装整備: 市街地メッシュのうち幹線道路面積について表層タンクのパラメータを畑・荒地の値を設定する
	環境保全型ライフスタイルの実践: 全住民が環境保全型ライフスタイルを実行することにより排水量が36%削減されると設定。また生活雑排水未処理人口の生活雑排水からBOD,CODは28%, TNは30%, TPは20%の削減
	環境保全型農業: 環境保全型農業の推進により田畑への施肥量を削減し、作物の生長に必要な分以外を100%削減すると設定
	下水処理水の再利用: 全下水処理水の10%を生活用水として再利用することで生活用水取水量と排水量を削減
施策群 3	家畜し尿の農地還元: 全家畜し尿を農地に還元することで家畜由来の負荷量を100%削減すると設定
	各戸雨水貯留・浸透: 全家庭の屋根全体(建坪率)に貯留浸透施設を設置し表面流出を抑制(市街地メッシュのうち宅地用地面積について表層タンクのパラメータを畑・荒地の値を設定)
	市街地の緑地化: 市街地メッシュの3割と荒川、多摩川の河道メッシュを緑地化(土地利用を「森林」に設定)
	調整池の整備: 市街地メッシュのうち公共施設、中高層住宅地について雨水の流出を一時貯留させる調整池を設定(600m ³ /ha)

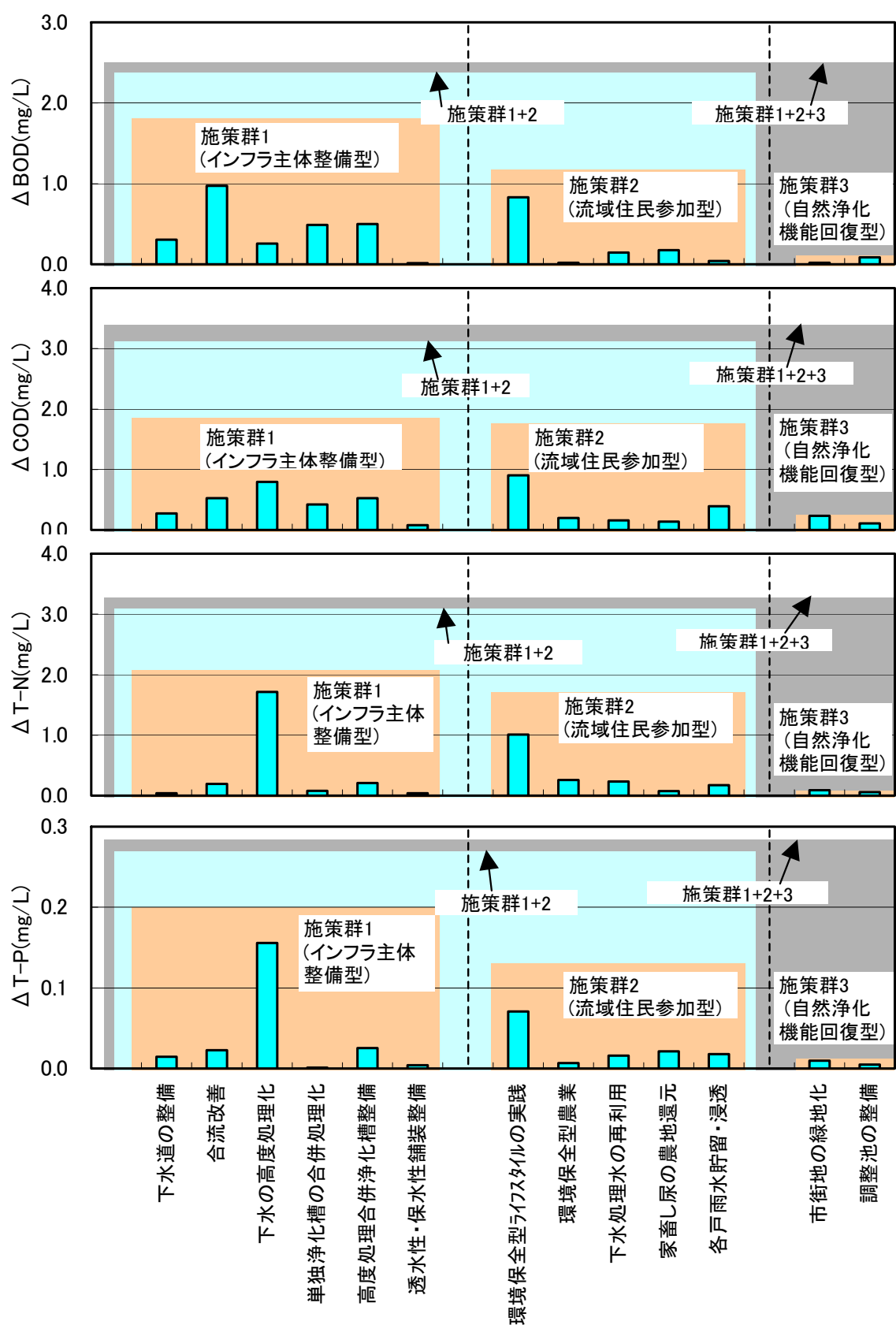


図-12 東京湾流入河川の平均水質に関する施策(群)の実施効果 (現況との差分)
 (現況(計算値)) : BOD 4.3 mg/l, COD 6.9 mg/l, T-N 5.8 mg/l, T-P 0.46 mg/l)

5. モデルを活用した次なる研究展開

5. 1 モデル適用の利点と課題

陸域（流域）と水域を統合した水物質循環モデルの効用は、全体状況の把握が容易になることである。その代表例は図-11・12 であり、それぞれの施策やそれらの組み合わせの効果を横並びで検討できることから、目標達成の観点からの各施策の重要性がわかりやすくなる。

また、流域条件の変更や種々の施策の設定が比較的容易であるという本モデルおよびソフトの特徴を活かすことで、様々な条件下での計算や表示、比較を機動的に行い、問題の構図や各施策の特長の理解増進に役立てるという使い方も可能である。このことは、冒頭に述べた多様な主体による総合的な取り組みに向けた合意形成や結集を促す際の支援になると期待される。

一方、モデルの精度や信頼性に関する限界をどう扱うかが大きな課題として依然残っている。閉鎖性水域の水質形成機構は複雑であり、例えば、霞ヶ浦では、湖水の白濁化と水質の関係や底泥溶出メカニズム等、新たな現象が注目されている²¹⁾。22)。現象解明に基づくモデル自体の精度向上を図ることの重要性は言うまでもないが、ここで扱っているような多くの過程と支配要因が入り組んだ環境問題特有の複雑な現象については、より適切な施策実行への支援という観点から、その時々で実用性のあるモデルを合理的に使いこなすというアプローチも同時に重視されるべきであろう。

たとえば、構造の異なるモデルを用いて施策効果を検証し、これにより施策効果の幅を織り込んだ（大きなはずれの無い）施策を選択するという現実的な戦略に役立てることも考えられる。また、施策効果の計算結果に大きな違いをもたらすパラメータや条件を見出すことで、目標達成戦略を立てる上で特に重要な現象解明、モデル化、モニタリングなどのターゲットを客観的に絞ることができる。

さらに、モデルから算出される結果の意味を表現する部分も今後重要になっていく。本論のモデルで言えば、COD 削減値などの水質改善度が評価に用いる代表的な出力であるが、水環境の改善や生物多様性の回復、水物質循環系の改善は、それだけで評価できるものではない。また、それは地域住民にとっても必ずしも理解しやすい指標とは言えない。どの程度水質が向上すればどういう環境が現出されるのかを身近に感じられるように表現することが重要である。

また、長期にわたる環境変遷をモデルでどのように表現していくかも重要な課題であろう。湖沼等の水環境変化は、その“蓄積性”から、改善プロセスも含め長期にわたることが一般的である。大局的に大きな誤りのないよう施策群を方向付けしていくという観点からは、水環境の悪化以前から現在に至る変化を再現するシミュレーションモデルが必要である。しかし、現状の水物質循環モデルは比較的短期の事象を対象にしており、物質のストックについて十分表現できるものになっていない。また、水質－低次生態系モデルについても数十年前の現象が扱えるのかという

課題がある．本論では便宜的なやり方で過去と現在を比較したが，その妥当性も含め，長期的な環境変化の分析・予測に対するモデル適用のあり方を検討することも重要と考えられる．

5. 2 今後の展開

水物質循環モデルの開発により閉鎖性水域とその流域圏の水環境を改善するための活動・施策と，その再生像（水量・水質として）を提示することが可能になった．しかし，水物質循環の健全化に向けた取り組みを進める過程において，施策実施のための合意形成を円滑に行い，様々な主体の環境施策・環境活動を行っていくことが，公的負担を少なくしつつ効果的な環境再生を行う手法といえる．しかし，多様な関係主体が，それぞれの価値観で行動を起こすには，なおいくつかのハードルがある．

例えば，①有機汚濁の減少などの水質指標の変化と，それぞれの主体が積極的に行動する契機となる事象（例えば水質の改善が水域生態系の回復にどのように貢献するかなど）とが直接どう結びつくのか明示されにくいいため，自発的な行動に繋がらない，②環境再生の目標を過去に求めても，世代間の意識の違いや，実現性の問題から，共感できる目標になりにくい，③その施策の意義は認めるが，なるべく自分は経済的や物理的な負担はしたくない，少なくとも不公平に自分が負担する手法では賛成できない，などの問題である．このような問題を解決するには，一つの施

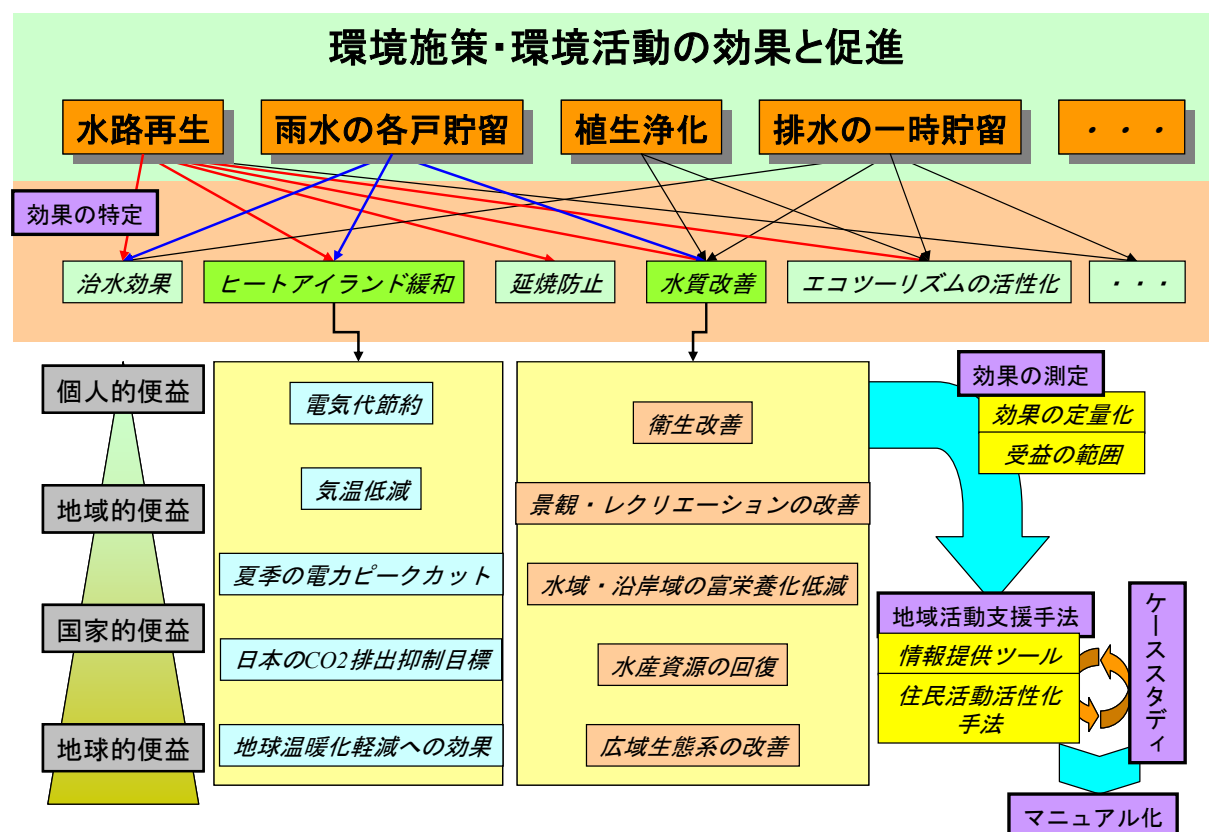
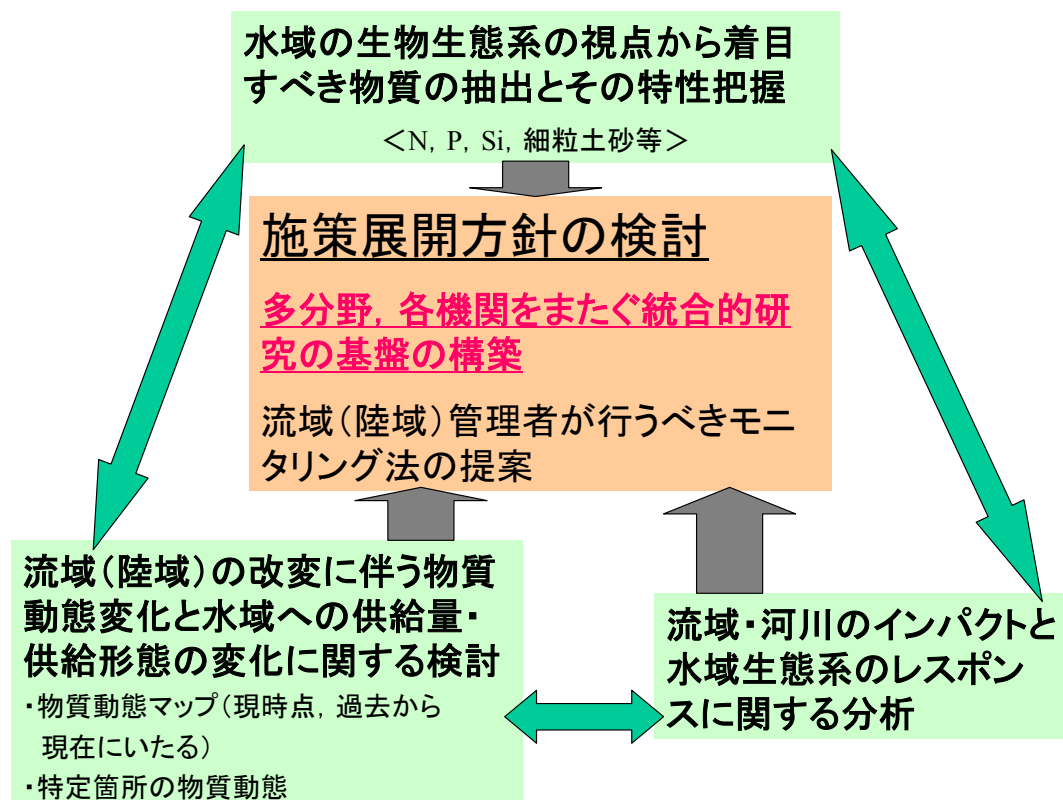


図-13 地域活動と協働した環境再生

策や地域の活動がいくつもの環境改善効果を有し、さらに個人規模から地球規模までの様々なレベルの効果があることを分かりやすく表現することが求められる。またそのための経済的、物理的負担も的確に提示し、それらを踏まえた合意形成をはかる必要がある。この具体の地域活動・施策を活性化し、行政施策と協働して効率的に持続していくための仕組みの研究を進めることが水環境の改善に向けた実践において必要である（図－13）。

一方、近年顕在化している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（水産資源の減少、赤潮、磯焼けなど）が指摘されている。その主要な原因の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動態の変化にあり、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²³⁾。このため、従来十分調査されて来なかったシリカ、微細土砂等に焦点を当て、流域から沿岸域にわたる全体的な物質動態を観測・分析し、林相の変化・都市化・農地整備などの土地利用変化やダム・下水道等の施設設置、水利用の高度化などが物質動態に与える影響とそのメカニズムを解明しようとする研究への取り組みを、広範な分野にわたる研究者とともに始めたところである（図－14）。海に囲まれ、多くの閉鎖性水域を持つ我が国にとって水域の生態系の保全は重要であり、これに大きく関わる物質動態についてさらに研究を推進し、国土管理施策に反映させていきたい。



図－14 流域変化が水域に与える影響

参考文献

- 1) 千葉県：印旛沼流域水循環健全化緊急行動計画書，印旛沼再生～恵みの沼をふたたび～，2004.
- 2) 鶴見川とその流域の再生－流域水マスタープラン策定に向けた提言－，2002.
- 3) 福田晴耕，藤田光一，伊藤弘之，長野幸司，小路剛志，安間智之：自然共生型流域圏再生のための東京湾とその流域における政策シナリオの検討，第33回環境システム研究発表会講演集，2005 (印刷中).
- 4) 藤田光一，伊藤弘之，小路剛志，安間智之：水環境問題解決への水物質循環モデル適用の試みとその課題，土木学会水工学委員会河川部会，河川技術論文集，vol.11，pp59-64，2005.
- 5) 藤田光一：自然共生型の流域圏再生－その実行に向けて，雑誌「河川」，No.697，pp11-14，2004.
- 6) 水資源開発公団霞ヶ浦開発事業建設部：霞ヶ浦開発事業誌，pp.73-74，98-102，105，596-597，1996.
- 7) 茨城県生活環境部霞ヶ浦対策課：第4期の霞ヶ浦に係る湖沼水質保全計画策定関係資料集，2004.
- 8) (財) 茨城県科学技術振興財団：霞ヶ浦水質浄化プロジェクト，<http://www.i-step.org/kasumi/>.
- 9) 国土交通省 霞ヶ浦河川事務所：霞ヶ浦底質調査業務報告書，2003.
- 10) 国土交通省 霞ヶ浦河川事務所：北浦，常陸利根川底質調査業務報告書，2003.
- 11) 田畑真佐子，加藤聡子，川村晶，鈴木潤三，鈴木静夫：ヨシ植栽水路における河川水中の窒素・リンの除去効果，水環境学会誌19(4)，pp.331-338，1996.
- 12) 田中弥太郎：内湾底泥をめぐる物質収支の動態解明に関する研究：5年間の研究成果，東海区水研，南西海区水研，養殖研，水産大学校，pp.299，1983.
- 13) 藤田光一，伊藤弘之，小路剛志，安間智之：GIS，流域水物質循環モデルを活用した水政策検討，土木技術資料，46-7，pp.20-25，2004.
- 14) 国土交通省港湾局，環境省自然環境局編：干潟ネットワークの再生に向けて～東京湾の干潟等の生態系再生研究会報告書～，pp22-23，2004.
- 15) 中央環境審議会：第6次水質総量規制の在り方について(答申)，2005.
<http://www.env.go.jp/council/toshin/t097-h1703.html>
- 16) 建設省関東地方整備局，東京湾流域別下水道整備総合計画検討委員会：東京湾流域別下水道整備総合計画に関する基本方針策定調査報告書，1997.
- 17) 吉野文雄，吉谷純一，堀内輝亮：分布型流出モデルの開発と実流域への適用，土木技術資料，Vol.32-10，pp54-59，1990.
- 18) 安陪和雄，大八木豊，辻倉裕喜，安田佳哉：分布型流出モデルの広域的適用，水工学論文集，第46巻，pp247-252，2002.

- 19) 辻倉裕喜，安陪和雄，大八木豊，田中伸治：湖沼流域管理のための総合的な水循環・物質流動モデルの構築，水工学論文集，第47巻，pp217-222，2003.
- 20) 高島葉二，坂本正義：霞ヶ浦湖水によるヤマトシジミの飼育，茨城県内水面水産試験場調査研究報告第38号，pp.42-55，2003.
- 21) 関智弥，福島武彦，今井章雄，松重一夫：霞ヶ浦における濁度上昇要因，第39回 日本水環境学会年会講演集，pp.466，2005.
- 22) 松重一夫，今井章雄，小松一弘：霞ヶ浦長期モニタリングにおける水質変動，第39回 日本水環境学会年会講演集，pp.469，2005.
- 23) (財) 河川環境管理財団：栄養塩類濃度が河川水質環境に及ぼす影響に関する研究， pp.7-10，2003.