

0-1 アジアにおける水資源域の水質汚濁評価と有毒アオコ発生モニタリング手法の開発に関する研究

(1) アジアにおける水資源域の水質汚濁評価手法の開発に関する研究

① 汚濁負荷特性の変化が湖沼など水資源域水質に及ぼす影響の評価に関する研究

独立行政法人港湾空港技術研究所

海洋・水工部 沿岸生態研究室

中村由行・細川真也・井上徹教\*

\*(平成13年度九州大学大学院工学研究科)

東海大学海洋学部

中田喜三郎

平成13～15年度合計予算額	26,289 千円
(うち、平成15年度予算額	8,121 千円)

[要旨] 宍道湖・中海水系を対象とし、時間スケールに応じた複数の解析手法を用いて、外部負荷の変動や環境条件の変動に対する湖沼水質・生態系の応答を調べた。

まず、ボックスモデルによって、過去20年間にわたって蓄積された宍道湖水質データを解析し、気象の変動が湖沼水質に及ぼす影響を抽出した。この期間は、リンの外部負荷が顕著に減少傾向にあり、COD、窒素についてもやや減少傾向にあるのに対して、同じ期間の水質は明確な変化を示しておらず、むしろ気象の影響を大きく受けて変動している事がわかった。リンについては、湖底からの内部負荷量の寄与が大きいものと推定された。さらに、大きな負荷の変動があった過去約50年間にわたる負荷変動と湖沼水質の応答を調べるため、宍道湖・中海系で、原単位法に基づく窒素の外部負荷量解析を行った。窒素負荷について、1970年前後に負荷のピークがあったこと、肥料のリサイクル率の減少と農地の減少が湖沼への負荷を増大させたことが推定された。

内部負荷(底泥からの栄養塩の溶出)に関して、連続培養系を用いた室内実験を実施し、無酸素条件下で、流速が溶出速度に及ぼす影響を検討し、あわせてその機構を説明するモデルを構築した。実験の結果、巻き上げが生じない条件下では、流速の増加に伴ってアンモニアの溶出速度は増加したが、巻き上げが生じた速度では、溶出速度が減少した。リン酸態リンについては流速の増加に伴って単調に溶出速度が増加した。

以上の知見を総合し、季節的な水質・生態系の変動を解析するために低次生態系モデルを開発した。基礎データの揃った1998年度の1年間を対象とした解析を行ったところ、植物プランクトンについては、宍道湖では藍藻類、中海では珪藻類が優占している様子がうまく表現でき、塩分環境の違いによる植物プランクトンの優占種の変動を再現できた。両湖沼において、二枚貝(宍道湖のヤマトシジミ、中海のホトトギス貝)が物質循環に大きな影響を与えている事が示された。

[キーワード] 湖沼水質、植物プランクトン、流域負荷特性、溶出、底泥

## 1. はじめに

湖沼水質や生態系は、水温・塩分などの環境条件や栄養塩負荷の変動によって、敏感に影響を受け、アオコの有毒化などの水質障害を生じている。湖沼の水質や生態系は、外部からの負荷量の変化やそれに対する下水道の整備などの対策によって、比較的長い時間スケールで変遷を受けてきている一方、季節毎にほぼ周期的な変動を繰り返している。また、一日から数日程度の気象因子の変動によっても、大きな攪乱を受けている。本研究では、宍道湖・中海水系を対象として、第二次大戦後に生じたと考えられる外部からの負荷の増大によって湖沼水質・生態系が変遷した過程を解析するとともに、塩分などの環境が気象条件によって大きく変動し、それに応じて湖沼水質・生態系が応答する機構について考察する。気象要素の変動は、湖沼堆積物からの内部負荷量（栄養塩類の溶出量）を変化させる事によって、間接的に植物プランクトンの優占種の交替など、水質・生態系に影響が及ぶと考えられる。また、内部負荷は外部負荷の削減効果を減殺させる効果を持ち、湖沼改善策の効果を将来予測する上できわめて重要である。

宍道湖・中海は、日本海側に位置する連結した汽水湖であり、宍道湖には一級河川の斐伊川が注ぎ、大橋川が二つの湖をつないでいる。中海は境水道を通じて日本海に通じている。二つの湖沼の面積及び平均水深は、宍道湖が81.8 km<sup>2</sup>と4.5 m、中海が86.8 km<sup>2</sup>と5.4 mであり、ほぼ同規模の面積及び容積を有しているが、表層塩分は宍道湖が海水の約1/10、中海が約1/2であり、塩分環境は大きく異なる。また、宍道湖の塩分は気象要素によって大きく変動することが知られている。そのため、宍道湖では淡水系プランクトンが優占することが多いが、塩分によっては海水性のプランクトンが優先する場合もあるのに対して、中海では海水系プランクトンが常時優占している。アオコについては、塩分環境の変動に応じて宍道湖で間欠的に発生することが知られている。また、宍道湖・中海では、それぞれヤマトシジミ・ホトトギズカイという二枚貝が塩分環境に適応して大量に生息しており、それぞれ漁獲対象として、あるいはトリに捕食されることで系外に栄養が除去されるため、水質の維持に役立っているのではないかと指摘されている。特に宍道湖はヤマトシジミや魚介類の漁獲量が多いため系外の栄養塩排出が高いこと、また二枚貝を中心とした食物連鎖が機能しており、外部負荷の多さにかかわらず水質が比較的良好に維持されているといわれている。その定量的な検討についても本解析で行い、サブサブテーマ②「食物連鎖の強化による湖沼等水資源域の水質改善手法に関する研究」において、水質・生態系の保全・回復を図るための手法を考察する事につなげる。

なお、本研究では、近年の急速な流域の開発によって富栄養化が急激に進行している中国横池においても、負荷の増加と水質・生態系の応答を調べるために資料収集や堆積物の採取を行ったが、十分な資料が収集できなかったため水質や生態系の解析を行うまでには至らなかった。従って、本報告書においては、宍道湖・中海水系を対象とした解析の成果についてとりまとめる。

## 2. 研究目的

本研究の目標は、流域からの負荷変動や環境条件の変動に対する湖沼水質・生態系の応答を調べる手法を確立し、実湖沼での応答を解析することである。しかしながら、一般に負荷の変動は数年から数十年以上のスケールで生じるのに対して、気象条件などの環境条件の変動は、地球温暖化のスケールを除いて、数日あるいは季節的な変動にとどまる。そのために、両者の影響を同一の解析的手法で評価することは困難である。

そこで本研究においては、時間のスケールに応じて解析手法を使い分けることとした。まず、1984年以降蓄積されている詳細な水質データをもとに、最近20年程度の水質変動特性をボックスモデルによって解析し、気象条件や内部負荷が水質・生態系に及ぼす影響を抽出する。CODなどで判断する限り、近年の宍道湖・中海の水質は経年的にほぼ横ばいであるが、季節的あるいは気象の攪乱によって大きく変動する場合があるからである。次に、過去50年程度にわたる湖沼水質・生態系の変動や湖沼への外部負荷の変動を、汚濁負荷原単位に基づく負荷量解析等によって解析する。さらに、植物プランクトンの優占種の変動を再現する低次生態系モデルを開発し、季節的な水質・生態系の変動特性を総合的に把握する。具体的には、Nakataら<sup>1)</sup>のモデルをベースとして植物プランクトンの優占群落の変動を再現する低次生態系モデルを開発することを目的とする。

本研究では、さらに、生態系モデルの重要な境界条件となる、底泥からの栄養塩溶出に関する検討も行った。高い溶出速度が観察されている無酸素条件下での底泥直上水の流速と溶出速度の関係を室内実験によって求めるとともに、リン酸態リンの溶出速度と流速の関係を説明する数理モデルを構築する事を目的とする。

図-1に、本サブサブテーマにおける役割分担を示す。

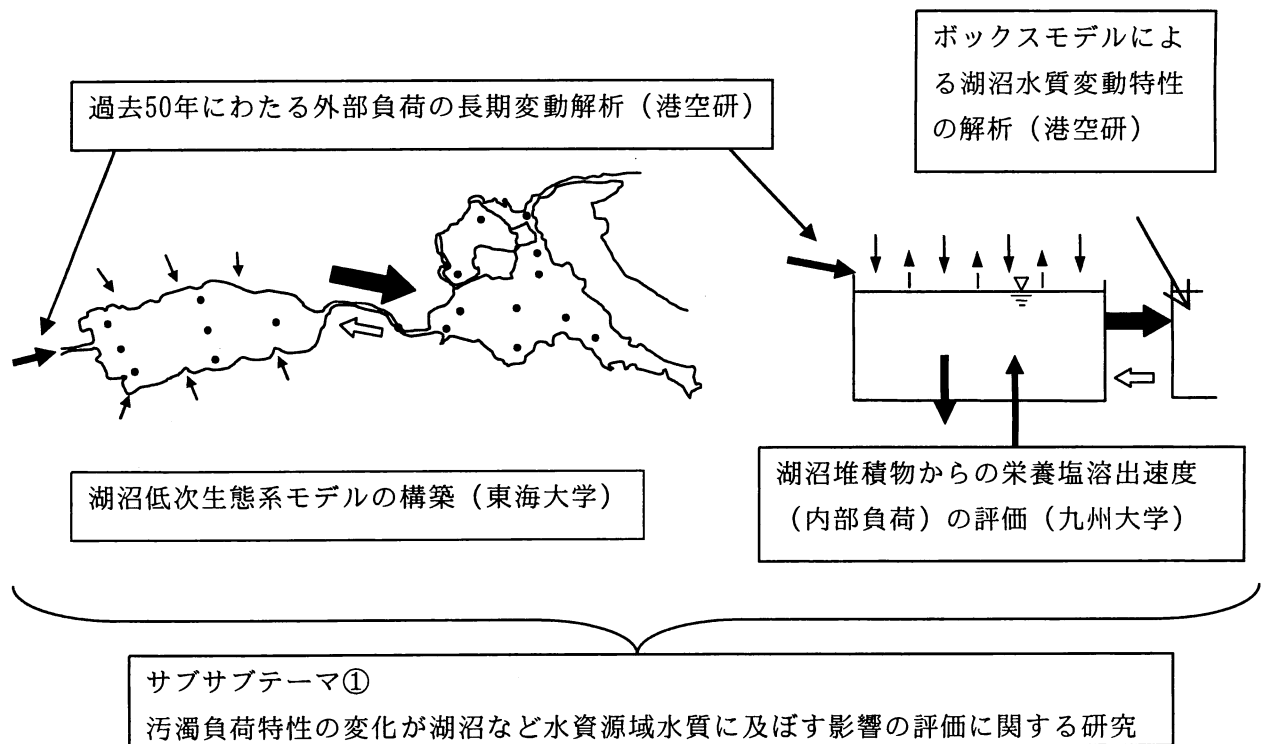


図-1. 宍道湖・中海水系と本サブサブテーマにおける役割分担

### 3. 研究方法

#### (1) 宍道湖・中海の水質変動特性の解析

##### ①ボックスモデルによる宍道湖水質変動特性の解析

島根県保健環境研究所<sup>2)</sup>は、1984年以降、宍道湖・中海の多数の測点において月一回の割合で

定期的に水質調査を行っている。本研究では、宍道湖・中海のうち、上流側に位置する宍道湖のみに着目し、定期水質調査の結果を用いて現状の水質変動機構を解析する。宍道湖における水質には、外部負荷や内部負荷の変動、気象要素の変動が固有の時間スケールを持って影響を及ぼしていると考えられる。これらのうち、気象要素の変動が水質に及ぼす影響を抽出するため、気象要素が多雨で日照が少なかった1993年、渇水で日射量が多かった1994年、さらにほぼ平年的な気象条件であった1996年における水質データを比較した。

次にBOXモデル解析を行い、現在の宍道湖における窒素・リンの収支を解析する。宍道湖を一つのボックスと仮定し、収支解析を行う。ボックス内の物質濃度は、各観測点における濃度を加重平均することにより求める。宍道湖と中海の物質交換は大橋川のみで行われるため、境界条件は、大橋川における物質濃度と中海の大橋川河口付近における上層の物質濃度を加重平均した物質濃度を用いる。ただし、下層は1mの層で構成されているものと仮定する。大橋川における交流量は、水の収支と保存性の強い塩分の収支の2つの方程式から求める事ができる。収支式は差分化し、連立して交流量を求めた。計算の時間ステップは調査日から次の調査日までの期間とした。

宍道湖における全窒素・全リンの収支は、大橋川を通じた中海からの物質輸送に加え、河川からの外部流入負荷、湖内における底泥への沈降や溶出、および生物による同化・排泄・分解や系外排出などのプロセスの考慮が必要となる。河川からの外部流入負荷に関しては、L-Q式を用いて算出する方法や原単位積み上げ法などがあるが、ここでは国土交通省出雲河川事務所が1994年の観測結果を基に提案している、斐伊川と船川のL-Q式を用いた。底泥への沈降や溶出および生物による同化・排泄・分解や系外排出などのプロセスに関しては、(生物体を含む)湖底への見かけの沈降量 $W$  (負の場合には見かけの溶出量)として一括してまとめ、全窒素・全リンの収支を解析した。

## ②過去50年程度にわたる湖沼への外部負荷の変動解析

原単位積み上げ法を用いて戦前から現在に至る長期の窒素排出負荷量を算出し、その変遷について考察する。宍道湖に流入する斐伊川水系の統計データを解析し、外部負荷の変遷を解析した。なお、得られた基本データには限度があり、外部負荷に大きな影響を及ぼす人口、水稲や畑の作付け面積、家畜頭数を基本フレームとし、原単位法を基礎として負荷量を求めた。

## (2)湖沼低次生態系モデルの構築

### ①生態系モデルの改良

Nakataら<sup>1)</sup>が開発した生態系モデルを改良し、植物プランクトン優占群落の季節変動と種の交替を再現し、さらにはグレーディング食物網と微生物食物網の季節的な遷移の可能性を調べるためにモデル開発を行った。数値モデルの基本構造は、動植物プランクトンやデトリタス、栄養塩、酸素等で構成される沿岸域の低次生態系モデルとし、これに宍道湖ではヤマトシジミ、中海ではホトトギスガイを付加して貝類による懸濁物濾過や栄養塩排出、呼吸のプロセスを考慮した。富栄養化した水域においては、最近、微少な植物プランクトン(ピコプランクトンや微少渦鞭毛藻)や微少渦鞭毛虫の優占が報告されるようになってきた。さらに、細菌を起点とする食物網の重要性についても指摘されている。従って、本研究においては、これらの微小生物を介した物質循環

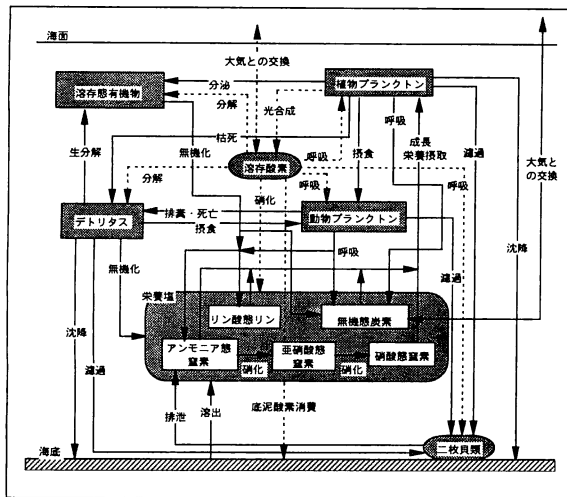


図-2. 生態系モデルの基本構造

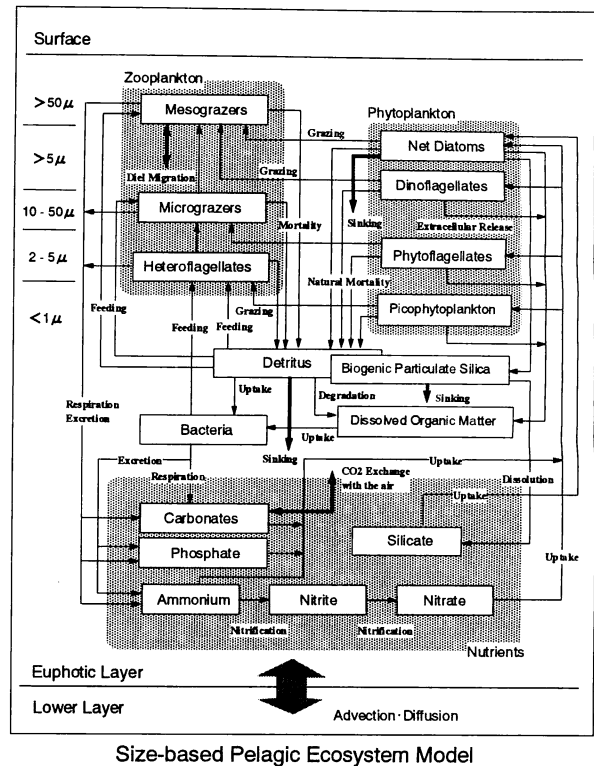


図-3. マイクロバイアルループを含んだ浮遊生態系の模式図

機構をも解析できるようにモデルを改良した。図-2にモデルの基本構造を示す。実際には、図-3に示された微生物ループの過程がモデルに組み込まれている。

プランクトンや栄養塩等の水中浮遊物質の多くは力学的に受動的であり、その分布は流れによる輸送や乱流混合の流体力学過程に大きく支配されている。従って、浮遊物質の局所的な現存量変化を評価する場合には、物理過程と生物化学過程の相互作用の取り扱いが必要となる。これが生態系モデルの基本的な考え方であり、相互作用を輸送方程式で表した次式が基礎式となる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -(\mathbf{v} \cdot \nabla)C - (w + w_p) \frac{\partial C}{\partial t} + [\nabla \cdot (K_H \nabla)]C + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \pm \sum B_i + q \quad (1)$$

ここで、 $C$ はプランクトンや栄養塩等の生態系構成要素の現存量、 $\mathbf{v}$ ,  $w$ は流れの水平及び鉛直速度成分、 $w_p$ は懸濁態有機物の沈降速度、 $\nabla$ は水平傾度、 $K_H$ ,  $K_z$ は水平及び鉛直渦拡散係数、 $\pm \sum B_i$ は生物化学過程、 $q$ は系外からの供給（流入汚濁負荷、底泥溶出等）である。生物化学過程は、実験や経験法則に基づいて定式化した。

モデルでは植物プランクトンの成長速度を、Epply<sup>3)</sup>によって調べられた植物プランクトンの成長と温度 ( $T$ ) との関係に基づき、既往の研究例を参考にして群集の最大可能成長速度  $v_1$  ( $\text{day}^{-1}$ ) を指数関数型の温度・塩分の応答式、

$$v_1 = \alpha_1 \cdot \exp(\beta_1 \cdot T + \beta_2 \cdot S) \quad (2)$$

で表した。ここで、 $\alpha_1$ は0°Cにおける最大可能成長速度 ( $\text{day}^{-1}$ )、 $\beta_1$ は温度係数 ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ )、 $\beta_2$ は塩分に関する応答係数である。当該海域は塩分の勾配が大きく、出現植物プランクトン種も淡水種から汽水種そして海洋に出現する種類という遷移が見られる。このような遷移を、塩分にたいする応答関数をモデルに組み込む事で表現した。

従来のモデル解析では、秋季から冬季の植物プランクトン現存量が再現できていなかった。その理由として低温期に有利な植物群落の出現や、摂餌する動物プランクトン種の交代などが挙げられる。こうした種間の競合が、プランクトンの現存量再現と湖内の水質変動にとって重要であると考えられることから、本年度は捕食・被食の関係や種間の競合を考慮できるようにモデルを開発し、マイクロバイアルループを含んだ浮遊生態系を表現した。

当該海域で微生物食物網が重要であるかどうかについてはまだよくわかっていない。しかし、東京湾や伊勢湾では植物プランクトンの優占種として、不明な微小鞭毛藻と言う記述が調査報告書に見られる。実体は独立栄養微小鞭毛藻(Autotrophic NanoFlagellate:ANF)と従属栄養微小鞭毛虫(Heterotrophic NanoFlagellate:HNF)の混合群集と思われる。これらは珪藻や渦鞭毛藻が優占する時期の間に現れる。本モデルでは低次栄養段階でのこのような食物網変化が解析できるようにした。しかし中海ではまだこのような調査が行われていないので、モデルでの結果が次の調査にとって有用であることを期待している。モデルでは植物プランクトンには藍藻類と珪藻類の他、ピコプランクトン ( $< 1 \mu\text{m}$ )、微小鞭毛藻類 ( $2\sim 5 \mu\text{m}$ ) および渦鞭毛藻類 ( $> 5 \mu\text{m}$ ) の5カテゴリー、動物プランクトンには従属栄養性微小鞭毛虫類 ( $2\sim 5 \mu\text{m}$ )、小型植食者 ( $10\sim 50 \mu\text{m}$ ) および大型植食者 ( $> 50 \mu\text{m}$ ) の3カテゴリーを定義し、これらに細菌(バクテリア)を加え食物連鎖に従って定式化した。

生態系解析を実施するために必要な宍道湖・中海における流れ場は、昨年度と同様1998年度を対象とした流動の年間解析結果を利用した。計算範囲は宍道湖から美保湾に至る南北26.5 km×東西44.25 kmの海域で、この対象海域を最小250 m～最大500 mの格子で分割した。一方、鉛直方向には1.5 mピッチで6層の区分を設けた。再現期間は1998年4月1日0時～1999年3月31日24時とした。美保湾潮位や斐伊川流量および気象要素等の入力条件は、すべて実測データを使用し、計算期間中の日々の変動を設定した。

生態系解析において、対象海域をはじめ格子分割、鉛直層区分、再現期間など基本条件は流動解析の設定と同じである。

## ②生態系モデル構成要素の季節変動解析

改良したモデルにより、宍道湖と中海水系における植物プランクトンの優占群落の変動特性を考察するため、1998年を対象とした計算を行った。現地観測による実測データとの比較を行った。また、宍道湖におけるヤマトシジミ、中海におけるホトトギス貝がそれぞれの湖沼における物質循環に及ぼす効果を解析した。

### (3) 湖沼堆積物からの栄養塩溶出速度の評価

湖沼堆積物からの栄養塩の溶出は、特に貧酸素や無酸素の条件において顕著になることが知られている。また、溶出速度は様々な水質の環境条件に依存するため、実験期間中に環境

条件が極力変わらない実験手法が必要である。そこで、本研究においては、環境条件をコントロールできる連続培養型の室内実験系を構築し、無酸素条件を保ちながら実験を行った。直上水はプロペラにより常時攪拌され、その回転速度を変えることで流動を変化させた。

リンの溶出は、溶存酸素濃度依存性が強いと言われている。酸化条件下では第二鉄に吸着することで溶出が抑制されるが、貧酸素条件下では第二鉄の生成が減少するため、溶出が増加すると考えられている。この現象を説明できる数理モデルを作成するため、リン酸態リン・第二鉄・溶存酸素をモデル変数とした数理モデルを構築した。

#### 4. 結果及び考察

##### (1) 宍道湖・中海の水質変動特性の解析

過去20年間の水質データを調べたところ、宍道湖の水質には明瞭な経年変動はみられなかった。一方で、季節的には規則的あるいは不規則な変動がみられた。多雨で日照が少なかった1993年、渇水で日射量が多かった1994年、さらに平年的な気象条件であった1996年における宍道湖の水質データを、過去10年間の平均的な水質の季節変化と比較解析することによって、気象の変動にあまり依存しない水質の特性と、気象要素が宍道湖における水質に及ぼす影響度を抽出した。

過去10年間の平均的な季節変動をみると、CODは夏季に緩やかな極大、冬季に極小となるがその差は2 mg/l以下であり、年較差は少ない。TNについては、例年5-6月及び11-12月に極小となり、その前後で極大値をとるなど、複雑な季節変動パターンをとっている。極小をとる時期は無機態窒素の主要な構成要素が $\text{NO}_3^-$ -Nと $\text{NH}_4^+$ -Nの間で交替する時期にあたることから、脱窒の影響が推定される。一方、TPについては8月から10月に明確な極大をとる。この時期は底層水が貧酸素化する時期にあたることから、内部負荷（リン酸の溶出）の影響であると考えられる。

栄養塩類の変動をみながら、気象要素が水質に及ぼす影響を考察する。 $\text{NO}_3^-$ -Nは、例年、1月から4月に濃度が高くなっている。冬季における下層DO濃度の上昇によって底泥表面や水中の密度界面近傍において硝化が促進されるためであると考えられる。また、1993年および1996年においては6月の降雨後に濃度が上昇しており、河川水から $\text{NO}_3^-$ -Nが供給されている事が示唆される。一方、 $\text{NH}_4^+$ -Nは渇水年の1994年の夏季における下層濃度が顕著に上昇した。気温の上昇と降雨の少なさによる底層の貧酸素化によって、底泥からの溶出が促進され、かつ、硝化過程が阻害されたためであると推定される。出水時における濃度上昇がみられる点は $\text{NO}_3^-$ -Nの場合と同様である。上層濃度と下層濃度を比べると、 $\text{NO}_3^-$ -Nの場合は両者がほぼ同濃度をとりながら推移しているのに対して、 $\text{NH}_4^+$ -Nの場合は上層濃度に対して下層濃度が非常に高いケースと、両者がほぼ同濃度のケースの2つに分類できる。このように分類される理由は、湖内における季節的な密度成層構造の違いが原因であると考えられる。すなわち、冬季においては鉛直混合が促進され、底層が貧酸素化することもなく $\text{NO}_3^-$ -Nおよび $\text{NH}_4^+$ -N濃度はほぼ均一であるが、夏季においては成層が生じて底層が貧酸素化し、底泥から $\text{NH}_4^+$ -Nが溶出しやすい状態となる上に、いったん溶出した $\text{NH}_4^+$ -Nが下層に閉じ込められて高濃度化する。このような季節変動は、下層 $\text{PO}_4^{3-}$ -P濃度において、より顕著である。ただし、宍道湖湖心における下層 $\text{PO}_4^{3-}$ -P濃度は、気温と非常によい相関関係があった。相関解析の結果、気温は、水質測定日の過去5日間の平均と定義した。下層 $\text{PO}_4^{3-}$ -P濃度は気温が20度より高くなると指数関数的に上昇し、気温に強く依存している事が分かった。

##### ①ボックスモデルによる宍道湖水質変動特性の解析

流域から宍道湖へ流入する河川流量とWとの関係を全窒素・全リンについてそれぞれ調べると、いずれの場合も、河川流量Qが大きくなるに従ってWが大きくなっている。特に全リンに関しては、出水時において懸濁態の割合が多くなる事が指摘されており、出水時には底泥へ多くのリンが堆積する事が考えられる。L-Q式から算出される湖内への流入負荷量と湖底への見かけの流入量Wの合計を湖内における正味の増加量とすると、窒素については、湖内へ正味蓄積する傾向にある事が明らかとなった。一方、リンに関しては、夏季における溶出量が大きく、正味の量としても溶出する事が明らかとなった。

## ②過去50年程度にわたる湖沼への外部負荷の変動解析

基本フレームの変遷を概観すると、以下のようになる。まず、斐伊川水系における人口の推移は、昭和初期から現在に至るまで首都圏内におけるような顕著な人口増加は見られず、微増傾向にある。ただし戦時中においては疎開により人口増加しており、その後においては緩やかな人口減少が見られる。斐伊川水系における人からの負荷排出は最も大きな要因の一つである。次に農地系であるが、まず水稲作付面積は、1960年前後から漸減している。高度経済成長期における農業離れを契機に、1970年代の減反政策や松江や出雲の都市化による農地の減少が漸減の原因であると考えられる。190年前後と比較すると、現在は3割程度にまで減少している。また、畑作付面積に関して、麦畑の作付面積については戦後すぐに急増現象が見られたが、1960年から70年にかけて激減しており、70年以降の作付面積は数百ha程度となっている。一方、麦以外の畑作付面積に関しては、戦後から現在に至るまで6割程度への減少がみられ、麦畑の作付面積ほど極端な変化は示していない。戦前におけるデータは今のところ得られていない。畜産について、まず牛は戦中において急減が見られたが、その他の期間においては家畜頭数に極端な変化は見られない。ただし、1965年から70年にかけて頭数増加が2割程度あった後、現在に至るまで漸減傾向にある。また豚については、1975年をピークとした凸型の分布となっており、ピーク時の75年と比較して現在の家畜頭数は1割弱である。

負荷原単位には発生源単位と排出原単位の二つに分類される。発生源単位は、人間や家畜からの排泄物の量であり、時代に関係なくほぼ一定値を取るものと考えられる。一方、排出原単位は実際に湖内へ流入する負荷に対する原単位であり、人間活動による排出原単位は下水処理の進化によって変化する。

負荷量とは、原単位に数量を乗じて算出される一日当たりの全窒素量・全リン量の事である。発生負荷量は、前述の通り原単位に時間的変化がないとすれば、過去の発生負荷量に関しても統計データから容易に算出される。しかしながら、下水道普及率の上昇や下水処理施設能力の向上などによって排出原単位は変化するため、過去の排出負荷量を単純に算出する事はできず、なんらかの解析上の仮定が必要となる。

本研究においては産業系の資料収集がほとんどできなかった事から、産業系の寄与率が高いリン負荷の算出は行わなかった。窒素負荷量の算定に関して、産業系の負荷量寄与率は大きくないため、考慮しなくても問題ないものと仮定した。また、自然系（山林面積・市街地面積）の数量の情報収集は困難であるため、自然系以外の負荷量についてのみ算出する。常住系からの排出負荷量は、全国の下水道普及率の推移に基づいて、同様な経年的変化をすると仮定した。

戦前における麦以外の畑の統計データが不足しているため、戦後における作付面積推移の傾向



が類似している水稲作付面積から、水稲作付面積と麦以外の畑作物の作付面積が線形であると仮定して、戦前における麦以外の畑作物作付面積を推定した。

本解析においては、窒素について、常住系・畜産系・農地系は、戦前においてはそれぞれが糞尿のリサイクルによって密接に関連していた事に着目して、川島<sup>4)</sup>の方法にならって排出負荷量の算定を行った。戦前や戦後間もない時代までは農地に使用する化学肥料はほとんど普及しておらず、人や畜産から排泄された負荷のほとんどが農地へ還元されていたものと考えられる。還元された負荷は農作物へ同化され、余剰分のみが農業廃水として河川・湖沼へ排出する事から、これらは1つの閉鎖系（クローズ系）として考える事ができる。このクローズ系の発生負荷量は式（3）のように算出される。一方、近年のようにリサイクルがなく、常住系・畜産系・農地系がそれぞれ独立して負荷を発生した場合の発生負荷量（独立系）は、式（4）のように算出される。

$$\left. \begin{array}{l} 0 \leq S - A_u \quad N = S - A_u + O + A_e \\ 0 > S - A_u \quad N = O + A_e \end{array} \right\} \quad (3)$$

$$N = S + O + A_e \quad (4)$$

ここに、 $N$ : クローズ系の窒素発生負荷量、 $S$ : 人・牛・豚によるし尿の発生負荷量、 $A_u$ : 農作物による窒素消費量（水田 $10\text{g}/\text{m}^2/\text{year}$ 、畑 $20\text{g}/\text{m}^2/\text{year}$ <sup>4)</sup>）、 $O$ : 常住系雑排水による発生負荷量、 $A_e$ : 農地系からの発生負荷量である。図-4に、発生負荷と排出負荷の流れを示す。

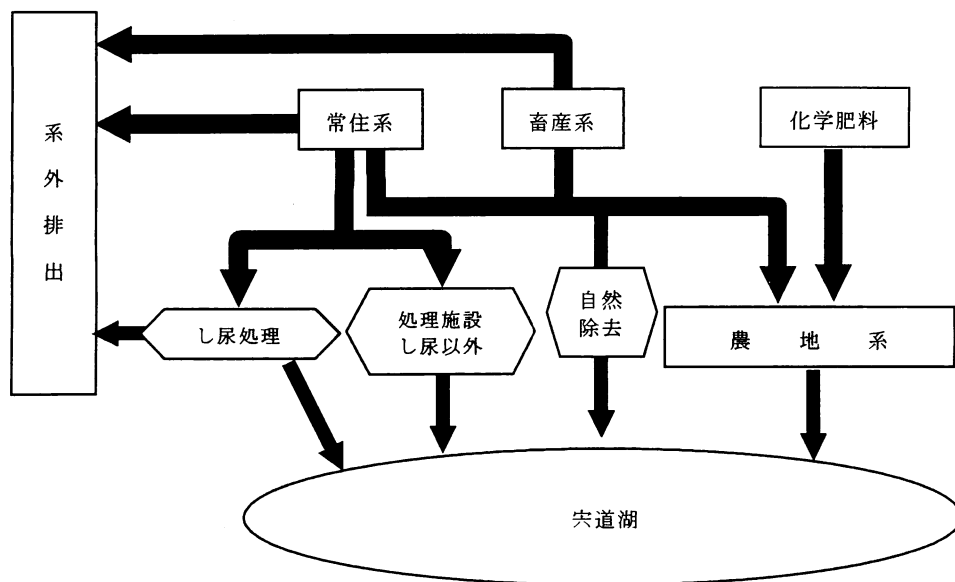
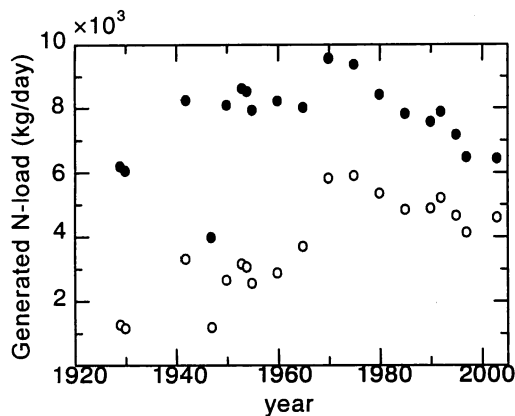


図-4. 発生負荷と排出負荷の流れ

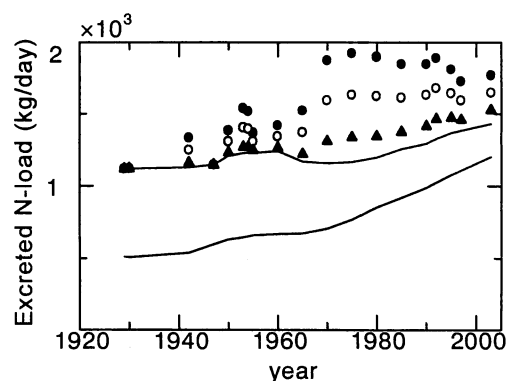
本研究では、クローズ系におけるリサイクルが現在でも行われていると仮定した場合の発生負荷量、および、独立系における発生負荷量の推移を算出した。結果を図-5に示す。クローズ系の発生負荷量は1960年代において急増した事が分かった。これは、牛や豚の家畜頭数増加に加え、麦作付面積の衰退を主とした農地作付面積の減少による系内負荷消費量の低下が原因である。また、戦前から近年にかけて長期に比較した場合においても発生負荷量に大きな変化が見られた。すなわち、系内発生負荷量は、戦前から1960年にかけての微増時期と、1960年代における急増期を経過しており、近年の発生負荷量は戦前に対して4, 5倍程度にまで増加していると推定された。

独立系の発生負荷量が戦前と近年の比較においてそれほど顕著な差は見られないことから、クローズ系におけるリサイクル、すなわち農地による消費量の低下が発生負荷量の増加の原因である事が理解できる。

現実には、リサイクルの割合が戦後に大きく変動したと考えられるが、そのことを示すデータはない。そのため、リサイクル率をパラメータとし、前述の方法を用いて窒素排出負荷量を推定した。ただし、常住系の排出負荷量に関しては次のように推定した。すなわち、直接排出は過去に行われていないとし、処理排出については平成13年度における各自治区の汚濁処理施設整備率<sup>5)</sup>と、全国下水道普及率<sup>6)</sup>を用いて過去の施設整備率を推定し、排出負荷量を算定した。次に、常住系および畜産系のし尿排出負荷に関しては、仮定したリサイクル率によって負荷排出されるものとし、常住系のし尿は任意の除去率を差し引いた量だけが負荷として排出されるものとした。結果を図一6に示す。1960年から1970年にかけて窒素の負荷量が急増し、1980年以後はほぼ横ばいであることが推定された。



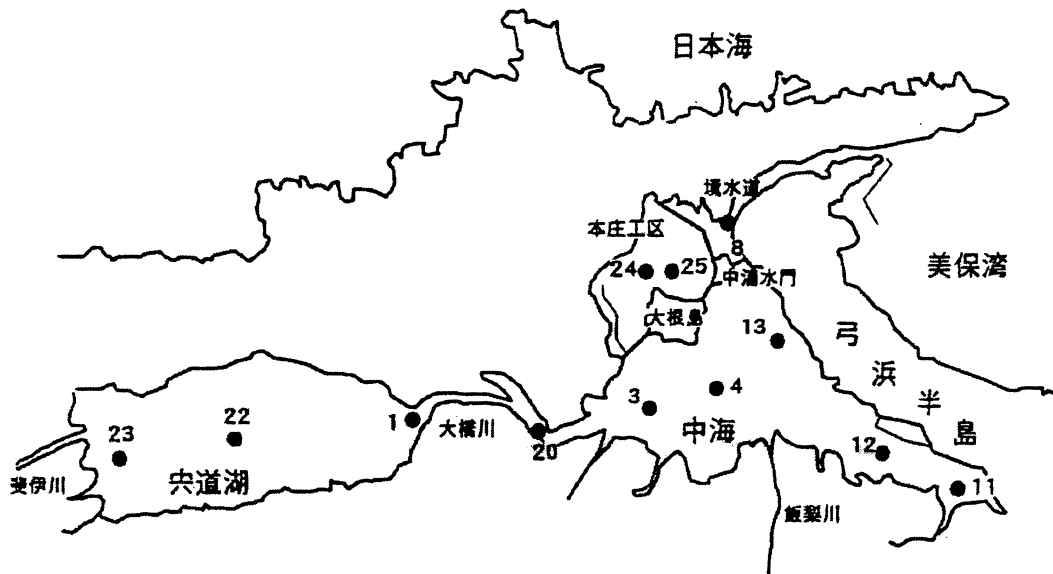
図一5 宍道湖流域における発生負荷量  
○クローズ系の発生負荷量  
●それぞれが独立した発生負荷量



図一6 宍道湖流域における排出負荷量  
リサイクル率●0%、○50%、  
▲90%の結果

## (2) 湖沼低次生態系モデルの構築と植物プランクトン優占群落の遷移過程の解析

1998年を対象とした生態系モデル計算を実施した。物理モデルと同様に、流入負荷量や気象要素等の入力条件は、すべて実測データを使用し、計算結果は観測データに基づいて整合性を確認した。冬季における植物プランクトンや夏季における底層 $PO_4-P$ などの不一致が認められたが、概ね観測値の季節変化の傾向をとらえることができた。D0については、表層では若干の相違が認められたものの、成層期底層の貧酸素水塊は合理的に再現された。観測によると、宍道湖から中海～境水道へと、淡水から海水への塩分の傾斜と同様に、植物プランクトンも淡水種から汽水種、そして海産種へと移行し、宍道湖では藍藻類、中海では珪藻類が優占していた。計算結果は宍道湖では藍藻類、中海では珪藻類が優占している様子がうまく表現でき、塩分環境の違いによる植物プランクトンの優占群落の変動を再現できた。しかしながら、渦鞭毛藻を中心とした冬期のクロロフィル増大現象は再現できなかった。また、解析により、汽水域の栄養塩（特にリン）溶出速度の変動が、植物プランクトン群集の変動に大きな影響を与えている事が示唆された。



図－7．宍道湖・中海水質月報（島根大学）調査地点

#### ① 各水質項目の再現性

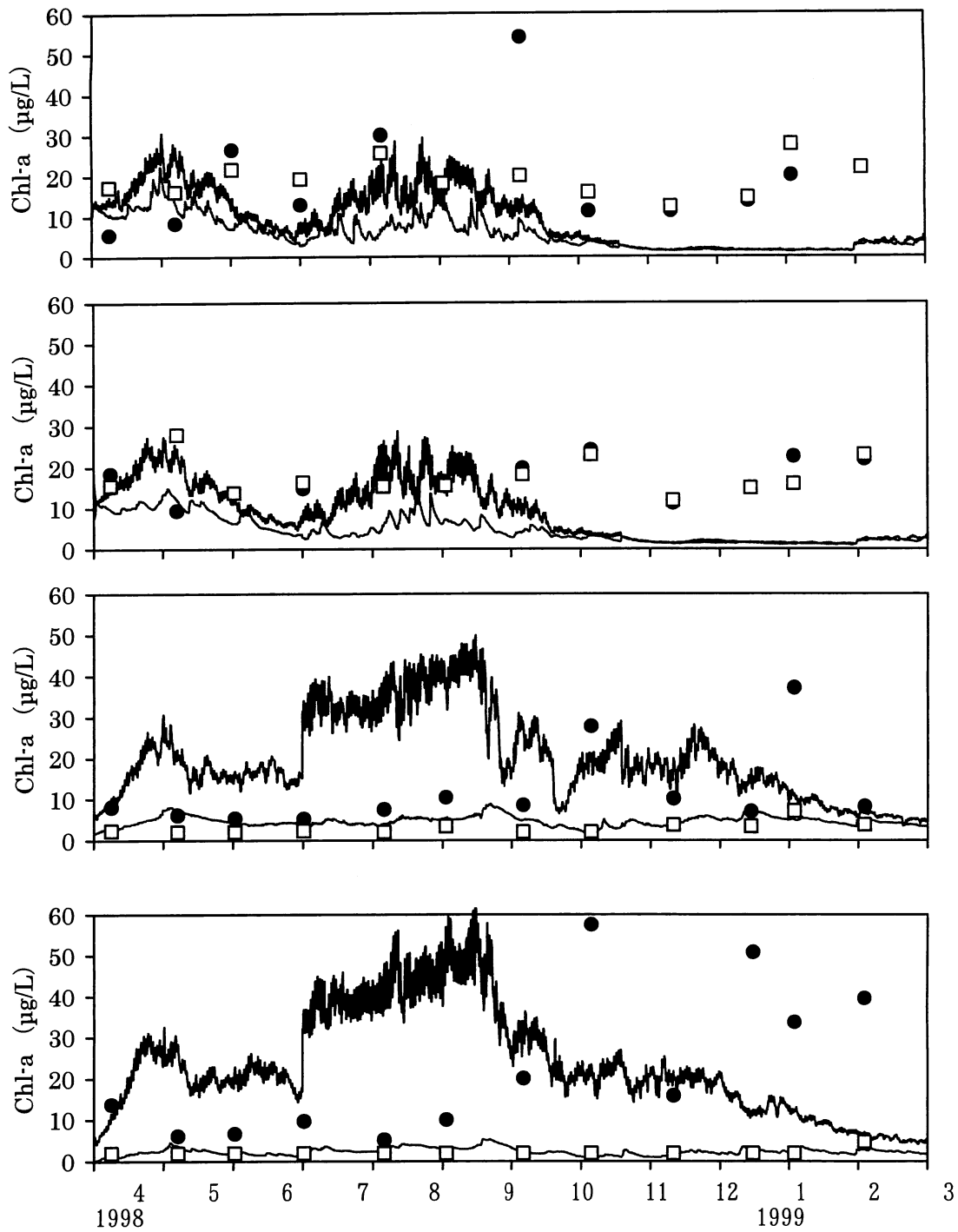
植物プランクトンや栄養塩、溶存酸素を中心とする水質項目については、島根大学の宍道湖・中海水質月報を利用して、水質モデルの再現性を検討した（調査地点については図－7を参照）。各地点で観測値の時空間変動が激しく、まだ十分な再現結果には至っていない。特に再現するのが困難だった点は、冬季における植物プランクトンの増殖と夏季における底層 $PO_4\text{-P}$ の溶出が挙げられ、特に、中海のリンの溶出量については、実際にはかなりの量があるものと考えられる。

D0についてみると、表層では若干の相違が認められたが、底層の濃度変化、とりわけ成層期底層の貧酸素水塊は合理的に再現されている。冬季の宍道湖底層において、観測との不一致が顕著であったが、塩分と同様に中海から宍道湖への逆流の再現が不十分であったと思われる。

#### ② 植物プランクトン分布

植物プランクトンについては、Chl-aとして再現性をみてきたが、ここでは藍藻類と珪藻類それぞれの時間変化を検討した。改良したモデルにより、宍道湖については藍藻類、中海については珪藻類が優占している様子がうまく表現でき、塩分環境の違いによる植物プランクトンの優占群落の遷移を再現できたものと考えられる（図－8参照）。

また、藍藻類や珪藻類をはじめ渦鞭毛藻類、微小渦鞭毛藻類およびピコプランクトンの水平的な分布の特徴をとらえるため、モデル結果から各月における表層の月平均分布を検討した。結果は観測結果と比較されてはじめて検証されたモデルとなるが、当該海域では植物プランクトンや動物プランクトン種について細かな現存量調査はなされていない。個体数調査から炭素量に変換してはじめて本モデルとの比較が可能となる。ただし、ピコプランクトンやANF, HNFについてはデータが存在するかどうかはまだわからない。しかし本モデル結果から示唆される対象海域の特性は、今後の観測計画の作成には大いに資するものがあると期待される。



図一 8 a . 調査地点におけるクロロフィルaの計算値と観測値との比較(上からst.23, st.22. st.4, st.12について示した)。図中の太線は表層、細線は底層のモデル結果。  
●は表層□は底層クロロフィル実測値を示す。

### (3) 湖沼堆積物からの栄養塩溶出速度の評価

巻き上げが生じない比較的低流速の条件においては、攪拌速度の増加に伴ってアンモニア態窒素の溶出速度は増加した。これは、流速の増加に伴って水・堆積物界面における濃度勾配が増加し、拡散フラックスが増加したために生じたものと考えられる。しかしながら、さらに速度を増加させ巻き上げを生じさせた場合には、溶出速度がかえって減少した。これは、巻き上げ粒子へのアンモニアの吸着によるものと推察された。また、リン酸態リンについては流速の増加に伴って単調に溶出速度が増加し、巻き上げが生じてもこの傾向は維持された。これは、一般に堆積物へのリンの吸着は水酸化第二鉄に対して生じるものであり、本実験のような還元的な条件下では巻き上げられた粒子への吸着はほとんど生じなかったものと考えられる。さらに、リン酸態リンと流速の関係を説明するための数理モデルを構築し、定量的に実験結果を説明することができた。本実験の範囲内において、流速の変動によって、流動がない場合に比べて最大3倍程度も溶出の増加が見られた。今後、内部負荷量の精度良い推定のためには、現地における流動特性の把握が必須であると考えられる。

## 5. 本研究により得られた成果

宍道湖・中海水系を対象とし、時間スケールに応じた複数の解析手法を用いて、外部負荷の変動や環境条件の変動に対する湖沼水質・生態系の応答を調べた。

まず、過去20年間にわたって蓄積された宍道湖水質データを、原単位解析を基礎とした負荷量のデータとともに解析した。リンの外部負荷は顕著に減少傾向にあり、COD、窒素についてもやや減少傾向にあった。同じ期間の湖沼水質は、宍道湖・中海共に、COD・TN・TP・クロロフィルのいずれの指標についても明確な変化を示しておらず、むしろ気象の影響を大きく受けて変動している事が見いだされた。リンについては、ほぼ例年、夏季において湖底からの内部負荷量の寄与が顕著に大きくなると推定された。高温・渇水年には宍道湖の塩分が上昇し、底層水の貧酸素化にともなって内部負荷が増大（特にリンの溶出）し、また海産性の植物プランクトンが優占すること、低温・豊水年には淡水性の植物プランクトンが優占するが、アオコの成長にはつながらないことが示された。さらに、大きな負荷の変動があった過去約50年間にわたる負荷変動と湖沼水質の応答を調べるため、宍道湖・中海系で、原単位法に基づく窒素の外部負荷量解析を行った。窒素負荷について、1970年前後に負荷のピークがあったこと、肥料のリサイクル率の減少と農地の減少が湖沼への負荷を増大させたことが推定された。

湖沼など、閉鎖性水域の重要な内部負荷である栄養塩の溶出に対して、連続培養系を用いた室内実験を行い、無酸素の条件のもとで、流速が溶出速度に及ぼす影響を検討し、あわせてその機構を説明するモデルを構築した。実験の結果、巻き上げが生じない条件下では、流速の増加に伴ってアンモニアの溶出速度は増加したが、巻き上げが生じた速度では、かえって溶出速度が減少した。これは、巻き上げ粒子へのアンモニアの吸着によるものと推察された。また、リン酸態リンについては流速の増加に伴って単調に溶出速度が増加した。リンと流速の関係を説明するための数理モデルを構築し、定量的に実験結果を説明することができた。

負荷の変動や環境条件の変化が水質や生態系に与える影響を解析するためのツールとして、低次生態系モデルを開発した。湖内の塩分環境や負荷変動、気象条件の変動によって植物プランクトンの優占種（珪藻類と藍藻類）の変化が再現できるように、藍藻類および珪藻類の成長速度の

水温・塩分依存性が異なるようにモデル化した。改良したモデルにより、1998年を対象とした生態系モデル計算を実施した。植物プランクトンについては、宍道湖では藍藻類、中海では珪藻類が優占している様子がうまく表現でき、塩分環境の違いによる植物プランクトンの優占種の違いを再現できた。また、二枚貝（宍道湖ではヤマトシジミ、中海ではホトトギス貝が対象）の寄与については、それらが植物プランクトンを捕食する作用や取り上げの作用によって水質に影響していることが示された。

## 6. 引用文献

### 参考文献

- 1) Nakata, K., F. Horiguchi and M. Yamamuro (2000) Model study of Lake Shinji and Nakaumi - a coupled coastal lagoon system. J. Marine Systems, 26, 145-169.
- 2) 神谷宏・神門利之・和久利浩幸・嘉藤健二・芦矢亮・石飛裕（1994）宍道湖・中海水質調査結果（平成6年度），島根県衛生公害研究所報，36，101-103.
- 3) Eppley, W.E. (1972) Temperature and phytoplankton growth in the sea, Fisheries Bulletin, 70, 1063-1085.
- 4) 川島博之（1996）我が国における食糧供給と窒素循環，環境科学会誌，9，27-33.
- 5) 島根県土木部下水道推進課ホームページ：<http://www.pref.shimane.jp/section/gesuido/index.html>
- 6) 社）日本下水道協会ホームページ：[http://www.alpha-web.ne.jp/jswa/05\\_arekore/07\\_fukyu/index.html](http://www.alpha-web.ne.jp/jswa/05_arekore/07_fukyu/index.html)

## 7. 国際共同研究等の状況

中国水生生物研究所、雲南省環境科学院の研究者等と情報交換し、負荷の変遷およびそれに対する湖沼水質の応答に関する知見を得た。

## 8. 研究成果の発表状況

### （1）誌上発表（学術誌・書籍）

#### <学術誌（査読あり）>

- ① 井上徹教、中村由行：海岸工学論文集、49，1001-1005（2002）  
「流速が堆積物からの栄養塩溶出速度に及ぼす影響」
- ② Inoue, T. and Y. Nakamura: Proc. 8<sup>th</sup> International Symposium on Flow Modeling and Turbulence Measurements, 801-808, (2002)  
“Diel variation of resuspension and effect of resuspension on phosphate release rate from the sediment”

#### <学術誌（査読なし）>

なし

#### <報告書類等>

なし

(2) 口頭発表

- ① Nakamura, Y.: Proceedings of an International Workshop on the Restoration and Management of Eutrophicated Lakes, 112-113. (2001)

“Importance of nocturnal cooling on the material cycling in a lagoon dominated by filter-feeding bivalves”

(3) 出願特許

なし

(4) 受賞等

なし

(5) 一般への公表・報道等

なし

9. 成果の政策的な寄与・貢献について

サブテーマ代表者は、環境省湖沼水質保全総合レビュー調査における「宍道湖・中海」の解析グループに所属し、両湖沼における水質・生態系の評価手法や遷移過程に関する調査検討業務に参画している。本研究の成果は、同業務における過去の水環境対策の評価や今後の水質保全計画のありかたに対する提言に活かされる。

また、今後、湖沼や沿岸域の環境修復技術を確立するために、国土交通省の政策決定機関との連携を通じ、成果の広報・普及に努める。