

厚生労働科学研究費補助金

健康科学総合研究事業

地理情報システムを用いた  
水道原水の保全に関する研究

平成14～16年度 総合研究報告書

平成17年3月

主任研究者 国包章一（国立保健医療科学院）

## 目次

研究班の構成	1
I. 総括研究報告書	
地理情報システムを用いた水道原水の保全に関する研究	3
	国包章一
II. 研究成果の刊行に関する一覧表	11
III. 研究成果の刊行物・別刷	15

## 研究班の構成

### 主任研究者

国立保健医療科学院水道工学部長

国 包 章 一

### 分担研究者

京都大学大学院工学研究科教授

津 野 洋

(社) 海外環境協力センター企画部長

森 一 晃

国立保健医療科学院水道工学部施設工学室長

秋 葉 道 宏

国立保健医療科学院水道工学部水道計画室長

伊 藤 雅 喜

### 研究協力者

京都大学大学院工学研究科講師

永 禮 英 明

国立保健医療科学院水道工学部主任研究官

島 崎 大

### 委託機関

(株) 日水コン

厚生労働科学研究費補助金

健康科学総合研究事業

地理情報システムを用いた  
水道原水の保全に関する研究

平成14～16年度 総括研究報告書

平成17年3月

主任研究者 国包章一（国立保健医療科学院）

## 総括研究報告書

### 地理情報システムを用いた水道原水の保全に関する研究

主任研究者 国包章一 国立保健医療科学院水道工学部長

#### 研究要旨

地理情報システム (GIS) は、地図上に多種多様な位置情報や空間情報を付加・統合し得る非常に有効な情報管理ツールである。また、水道原水保全の観点からは、水源流域におけるあらゆる活動や事象はすべて、潜在的に水道原水の汚染の要因となり得るものである。これらのことから、本研究では、水道原水の保全における GIS の活用の可能性とその具体的方法につき検討するため、中長期的及び短期的な水質汚染リスクを念頭に置いて、整備すべき流域環境情報、求められる解析手法・付加価値機能等につき整理するとともに、荒川水系入間川流域を対象としたケーススタディーを実施した。このほか、短期的な水質汚染リスクに関して、GIS を用いて特定集団の水系感染症感染リスクを評価する新しい技術として、マルチエージェント・シミュレーションのプロトタイプモデルを作成し、これを埼玉県越生町で過去に発生したクリプトスポリジウム集団感染にあてはめて、その適用性につき検討した。これらを通じて、GIS は水道原水の保全のための非常に有効なツールとなり得ることを明らかにするとともに、今後さらに検討すべきいくつかの課題についても明らかにした。GIS は、水道原水の保全を図る上で単に有効というだけでなく、むしろそのための必須のツールとして、今後は水道行政や水道事業体において広く活用されることが望まれる。また、特に GIS の空間検索、最短距離検索、ネットワーク解析等の機能を取り入れた短期リスク対応システムの構築は、水質汚染事故時等の危機管理において大いに役立つものと期待される。

#### 分担研究者

津野 洋	京都大学大学院工学研究科教授
森 一晃	(社) 海外環境協力センター企画部長
秋葉道宏	国立保健医療科学院水道工学部施設工学室長
伊藤雅喜	国立保健医療科学院水道工学部水道計画室長

#### 研究協力者

永禮英明	京都大学大学院工学研究科講師
島崎 大	国立保健医療科学院水道工学部主任研究官

#### A. 研究目的

水域における水利用の中でも水道水源としての利用は、最も重要なものの一つとして位

置づけられている。しかしながら、水質事故や異臭味の発生に見られるような水道原水汚染の進行が危惧されている。水域の管理手法については、環境分野において、閉鎖性水域の流域の総合管理を目的とした、地理情報システム（GIS）を利用した研究が行われてきている。GIS は、地図上に多種多様な位置情報や空間情報を付加・統合することができるので、流域環境を総合的に把握し、水道原水保全のために活用することが期待される。そこで、GIS を水道原水保全のための流域水環境情報の把握や原水保全計画の策定に活用する際の技術上の課題を整理するとともに、特定の水域環境についてケーススタディーを行い、これらを通じて、GIS を用いた水道原水保全施策支援手法につき総合的に明らかにすることを目的として本研究を実施した。

## B. 研究方法

次の1) から3) までのテーマにつき3 ヶ年計画で研究を実施した。

- 1) GIS を用いた水道原水保全のために必要とされる流域環境情報のデータ構造及び属性データの調査・研究

水道原水保全のために必要とされる流域環境の属性情報の整理と分析を行った。

- 2) 水道原水保全のために必要と考えられる流域管理計画を策定する上での GIS に必要とされる解析手法・付加価値機能に関する調査・研究

水道原水保全のための流域管理計画支援上必要とされる情報につき調査、分析し、水道原水取水地点での水量・水質の予知、定常的なモニタリング位置の選定などにあたって、GIS に必要とされる解析手法・付加価値機能を検討した。

- 3) 特定の水域をケーススタディーとして、GIS を適用した水道原水保全のための流域管理計画を策定し、本手法の有効性を明らかにするための調査・研究

1)、2) の調査・研究と並行して GIS を作成してその有効性を確認するとともに、技術的な課題を検討するため特定の水域を選定し、本システムを活用して流域内の水環境特性把握や水質・水量予測・解析を行った。

水道原水の水質に関わる重大な問題としては、流域における大規模な土地利用の変化に伴う汚濁負荷の増大や流出機構の変化などによる水質の悪化（中長期的な水質汚染リスク）と、工場・事業場からの有害物質の流入や、水系感染症の発生に伴う病原性原虫の流入などの突発的な水質汚染事故（短期的な水質汚染リスク）がある。そのため、本研究ではこれらのことを考慮に入れて、GIS に関する基礎的検討を主として初年度に、中長期的な水質汚染リスクを対象とした研究を初年度と2 年度目に、短期的な水質汚染リスクを対象とした研究を2 年度目と3 年度目に行った。

このうち GIS に関する基礎的検討では、GIS を用いた水道原水保全のために必要とされる流域環境情報のデータ構造及び属性データの整理と分析を行った。中長期的な水質汚染リスクに関しては、GIS を用いて流域における水質汚濁機構をモデル化し、濁度やトリハロメタン濃度の予測につき検討した。さらに、短期的な水質汚染リスクに関しては、検討

課題並びに水道原水の水質汚染事故に関する過去の事例を整理した上で、GIS の活用方法とその有効性につき、ケーススタディーなどを通して具体的に検討した。

このほか、短期的な水質汚染リスクに関して、GIS を用いて特定集団の水系感染症の感染リスクを評価する技術について検討を行い、プロトタイプモデルの作成を行った。対象とする感染症は、主に水を媒介として発生し、現時点において国内で発生が報告されているものであるが、現在は報告のない未知の微生物による感染症発生にも対応できるよう、システムは柔軟な構造となるよう検討した。また、従来の感染性微生物に関するリスク評価は、ある閉鎖的な集団を想定し、その集団における感染患者数の増減を評価することで実施していた。この方法では集団と集団の交流、具体的にはヒトの移動に伴う感染症の拡散を考慮に入れることできないため、リスクを過小に評価していると考えられた。そこで、マルチエージェントと呼ばれるシミュレーション技術を適用し、ヒトの交流に伴う集団から集団への感染症の拡散を評価する技術のプロトタイプモデルを作成した。さらに、このモデルを埼玉県越生町で過去に発生したクリプトスポリジウム集団感染にあてはめ、その適用性につき検討した。

## C. 結果と考察

### 1. GIS に関する基礎的検討

水道原水保全のために必要なデータの種類、所在、管理形態などを調査し、各データの収集の容易性及び更新の頻度を確認した。データの種類については、ベクターフォーマット（ポイントデータ、ラインデータ及びポリゴンデータ）とラスターフォーマットに分類し、それぞれの特徴を明らかにした。次に、水道原水に影響を及ぼす要因について、有害化学物質、消毒副生成物などの汚染物質と、水質事故対策、富栄養化防止対策、浄水処理技術などの対策技術と関連づけて検討し、GIS を用いて解析・評価するために必要とされる水文解析手法や物質の移流解析手法を明らかにした。また、GIS の主要機能である①地図上への表示、②情報の重ね合わせ、及び、③グリッド内の属性を利用した計算・加工の機能に着目し、これらの活用方法を明らかにした。さらに、GIS の機能を活用して、「国勢調査地域メッシュ統計」などの基礎的な統計データと、廃棄物統計などの各種汚濁源情報を関連づけ、汚濁負荷量をメッシュごとに配分する手法を提案した。メッシュ分割に関しては、その程度とデータの精度との関係を比較検討し、目的とその求める精度との関係において、最適なメッシュ分割の大きさを決定する必要があることを明らかにした。

### 2. 中長期的な水質汚染リスクに関する検討

荒川水系入間川流域を対象として GIS を活用したケーススタディーを行い、雨天時流出に伴う水道水源への汚濁物質の時系列的な影響を予測する手法を検討した。荒川上流域における降水量、河川水位（流量）などの水文データの種類、所在及び管理形態を調査し、流出負荷予測のための時系列データとしての有効性を検討した。さらに、タンクモデルを用いて時系列的な水質（SS）予測解析を行い、晴天時の平均的な SS 及び降雨時における

SSの上昇の傾向、降雨時のSSの低下の傾向が再現できることを明らかにした。

### 3. 短期的水質汚染リスクに関する検討

#### 3. 1 水質汚染事故時における危機管理への適用

水道事業者が把握した過去における水質事故の状況を調査し、事故原因、事故情報の伝達経路及び取られた対策を分析して、GISの機能を活用した情報管理手法を検討した。

この結果を踏まえて、水質汚染事故に関して、以下のような機能を備えたGISを新たに構築した。

##### 1) 事故発生現場の特定

水質汚染事故発見の通報を受けて、その場所を地図上で確認することがまず第一に必要なことから、GISを用いて目標物(橋、構造物、堰、樋管等)を入力することにより、画面上にその場所が迅速に表示される機能を作成した。

##### 2) 汚染源の特定

水質異常が見つかった地点から上流の流域又は近傍(半径数km以内)の地理情報検索により、汚染源を迅速に発見できるようにするため、GISのネットワーク解析機能を用いて河川上流の特定事業場の検索を行う機能、及び、空間検索機能を用いて半径を指定して水質異常箇所の近傍の汚染源を検索する機能を作成した。

##### 3) 水道取水地点までの距離の算定

河川で水質汚染事故が発見された場合、水道事業者がその地点から取水地点までの距離を算定し、汚染物質が取水地点に到達するまで時間を把握し得るよう、GISの最短距離探索機能を用いて、水質異常箇所から取水地点までの距離算定機能を作成した。

なお、上記の河川ネットワーク解析を行うためには、河川を小区間に分割し、その上下流関係をデータ化(有向グラフ化)して入力することが必要となることから、ケーススタディー流域についてそのネットワークデータを作成した。

##### 4) 影響範囲の特定

水質汚染事故の影響が及ぶ範囲を迅速に把握できるようにするため、先に作成した河川ネットワークを活用した下流側の取水施設の検索機能、さらに、取水施設と給水区域のリンク情報に基づく給水区域の検索機能を作成した。

##### 5) 記録の作成

水質汚染事故が発生した際に迅速な対応が可能となるよう、過去における水質汚染事故の対応策等に関する水質事故データベースを作成し、さまざまな検索機能、音声入力機能、画像入力機能等を付加することで、マルチメディアに対応できるデータベースを構築した。

以上のことを通じて、中長期的な水道原水の汚染予測解析だけでなく、短期的な水道原水の水質汚染事故対応においても、GISの適用が有効であることが確認された。すなわち、GISとして汎用的に整備されている空間検索、最短距離検索及びネットワーク解析の各種機能解析が、水質汚染事故時の迅速で適切な対応を可能にすることが明らかとなった。GISと併せて汎用的なデータベースソフトを用いることにより、水質汚染事故記録を管理し、



必要に応じて過去の対応策等を参照・活用して、類似の水質汚染事故に対する対応策の検討支援を図ることも可能であることが示された。また、水質汚染事故データベースに画像や音声を記録するなど、マルチメディアで対応することによって、情報の多様化が図れ、記録を把握しやすいものとなることが示された。しかしながら、現状においては、正確な河川流速が把握できないため、汚染物質の流下時間を精度良く算定することが困難であることが、今後の課題として確認された。

### 3. 2 水系感染症リスク評価技術の開発

本研究で作成したマルチエージェント・シミュレーションのプロトタイプモデルでは、従来と同様に患者数の変化を推定するだけでなく、患者数の空間的な分布およびその時間変化を推定することも可能である。このモデルを埼玉県越生町のグリプトスポリジウム集団感染に適用したところ、麦原川流域から越生町全域へ感染が拡散していく様子、並びに、感染者数の変化が表現でき、従来のモデルでは得られない詳細な情報が得られる可能性が示された。

今回のモデルでは、水処理過程、河川流下過程でのオーシストの減少・不活化を考慮していない、年齢構成・行動様式の分類が不十分などの問題点があり、これらの点について今後改良する必要がある。これらの改良により、より現実に即したモデルが構築でき、越生町で実際に生じた現象をより詳細に把握し、さらには様々な想定の下で同様の事例について予見的検証が可能になると考えられる。このうち特に予見的検証では、年齢構成の違い（高齢化の進展による感染者数の増加）、行動様式による違い（外部との交流が及ぼす影響等）、処理過程の変更等について評価できることが期待される。

## D. 結論

GIS は、地図上に多種多様な位置情報や空間情報を付加・統合し得る非常に有効な情報管理ツールである。また、水道原水保全の観点からすれば、水源流域におけるあらゆる活動や事象はすべて、潜在的に水道原水の汚染の要因となり得るものである。本研究では中長期的及び短期的な汚染リスクを念頭に置いて、GIS を水道原水の保全に活用するための方法につきケーススタディーを含めて検討することにより、その有効性及び今後の検討課題を総合的に明らかにした。これらの研究成果に基づいて考えると、GIS は、水道原水の保全を図る上で単に有効というだけでなく、むしろそのための必須のツールとして、今後は水道行政や水道事業者において広く活用されることが望まれる。また、特に GIS の空間検索、最短距離検索、ネットワーク解析等の機能を取り入れた短期リスク対応システムの構築は、水質汚染事故時等の危機管理において大いに役立つものと期待される。

## E. 健康危険情報

なし

F. 研究発表

(別添一覧のとおり)

G. 知的所有権の取得状況

1. 特許取得

なし

2. 実用新案登録

なし

3. その他

なし

## 研究成果の刊行に関する一覧表

## 研究成果の刊行に関する一覧表

### 1. 論文発表

#### 平成15年度

- 1) 永礼英明, 藤井滋穂, 宗宮 功. 琵琶湖における窒素の水中内存在量と循環過程. 水環境学会誌, Vol.26, No.10, pp.663-669(2003).
- 2) 永礼英明, 藤井滋穂, 宗宮 功, 芹澤佐和子, 森林河川水質と集水域内地質・植生との関係の評価. 環境工学研究論文集, Vol.40, pp.501-506(2003).

#### 平成16年度

- 1) Hideaki NAGARE and Hiroshi TSUNO. Development of Waterborne Disease Transmission Model based on Multi Agent Simulation Technique. Proceedings of The 8th Seminar of JSPS-MOE Core University Program on Urban Environment, pp.27-32(2004).
- 2) 永禮英明. 水環境シミュレーション 水質汚濁機構の解明. 日本水環境学会関西支部支部設立20周年記念・第10回情報ネットワーク講演会, pp.5-8(2005).

### 2. 学会発表

#### 平成14年度

- 1) 藤井滋穂, 永礼英明, 宗宮 功. 琵琶湖水質データベースの構築とその活用システムの開発. 日本水環境学会年会講演集, Vol.37, p.247(2003).
- 2) 守谷将史, 藤井滋穂, 永礼英明, 井原啓貴. 晴天時河川流出負荷量に及ぼす土地利用・下水道処理方式の影響. 日本水環境学会年会講演集, Vol.37, pp.236(2003).

#### 平成15年度

- 1) Fujii, S., Nagare, H., Moriya, M., Ihara, H. and Shimizu, Y. Influence of basin properties on river pollutant loading in fine weather. Asian Waterqual'03, Proceedings CD(2003).
- 2) Fujii, S., Nagare, H., Kitpati, S. and Shimizu, Y. Development of a comprehensive water quality database system and its application in Lake Biwa. Asian Waterqual'03, Proceedings CD(2003).
- 3) 守谷将史, 藤井滋穂, 井原啓貴, P. Songprasert, 永礼英明, 清水芳久. 河川水質の年間変動に及ぼす流域特性の影響検討. 日本水環境学会年会講演集, Vol.38, p.278(2004).

#### 平成16年度

- 1) 森 一晃, 国包章一, 津野 洋, 水道原水保全における地理情報システム (GIS) の活用. 第55回全国水道研究発表会, pp.118-119(2004).

## 研究成果の刊行物・別刷

## 琵琶湖における窒素の水中内存在量と循環過程

永礼英明\* 藤井滋穂\* 宗宮 功\*\*

## Nitrogen Mass Change and Cycle in Lake Biwa

Hideaki NAGARE\*, Shigeo FUJII\* and Isao SOMIYA\*\*

- \* Research Center for Environmental Quality Control, Kyoto University, 1-2 Yumihama, Otsu, Shiga 520-0811, Japan
- \*\* Faculty of Science and Technology, Ryukoku University, 1-5 Yokoya, Seta Ohe-cho, Otsu, Shiga 520-2194, Japan

## Abstract

The mass change of nitrogen in Lake Biwa was shown, and its cycle was discussed and compared with the input/output loading. Nitrogen exists at  $10.5 \times 10^3$  ton in average, and its minimum and maximum mass are  $7.6 \times 10^3$  ton,  $13.4 \times 10^3$  ton, respectively. Its average mass is equivalent to 133% of the annual input loading, resulting in 1.6 months of residence time, which is shorter than 5.5 years of hydraulic retention time. This indicates that nitrogen in the lake is removed by settling onto the lake bottom or denitrification, and the removed mass is estimated to be 71% of the input loading. Phytoplanktons mainly utilize ammonium nitrogen in epilimnion whose mass is only 1% of the total mass in the lake, rather than other inorganic nitrogen amounting to more than ten-fold of ammonium nitrogen. During the stratification period, almost all decomposed nitrogen in the organic matter is oxidized into nitrate, and half of them is likely to be removed by denitrification.

**Key words:** Lake Biwa, nitrogen, mass, budget, cycle

## 1. はじめに

これまで比較的澄んな水質を維持してきた琵琶湖北湖において、CODの上昇<sup>1)</sup> やアオコの発生<sup>2)</sup> など水質悪化を懸念させる現象が報告がなされている。さらにピコプランクトンの大量発生<sup>3)</sup>、チオプロローカ<sup>4)</sup> の発見など生態系の変化を示す報告もある。琵琶湖が関西圏1,400万人に各種用水を供給し、農・漁業の場、観光の場としても重要な存在であることを考えると、琵琶湖の水質がどのような過程を経て形成され、どのような方向に変化しつつあるのかを把握することは非常に重要な課題であると考えられる。

湖沼の水質問題を考える際、対象湖沼に関する物質収支を評価することで湖沼水質形成過程に関し多くの知見を得ることができる。湖水中に存在する物質質量（以下、存在量）を推定することができれば、湖の流入/流出負荷量を併せて検討することで、湖底への物質の沈降量、あるいは流入負荷に対する水質変化の弾力性を評価することが可能になる。さらに、湖内での物質の季節的な移動に関しても量的評価が可能になる。

そこで、我々は物質収支の観点から琵琶湖の水質形成過程を把握することを目的に水質調査を実施し、その結果をもとに琵琶湖水中内の物質存在量推定を試みた。そ

の結果、期間中の平均で窒素 $11 \times 10^3$  tonN、リン230 tonP程度が湖水中に存在することを報告した<sup>5)</sup>。

本論文では、窒素の湖内存在量変化の詳細を示すとともに、湖への流入/流出負荷量と併せて考察することで、琵琶湖北湖内の窒素循環過程について考察する。

## 2. 方法

## 2.1 水質調査

1995年4月から2000年1月までの5年間に年4回（4, 7, 10, 1月）の頻度で、Fig. 1に示す琵琶湖内75地点において水質調査を実施し、ここで得た水質データを存在量計算に用いた。なお、調査水深は0.5, 10, 20, 30, 50 mと湖底より3 m上の6水深である。

## 2.2 存在量計算方法

2.1で得た水質データをもとに、水質濃度の3次元分布を三次元スプライン法（ $\sigma = 0.3$ ）<sup>6)</sup>にて推定し、濃度と容積の積として存在量を計算した。計算手順の概略は次の通りである。

- 琵琶湖を500 m×500 m×1 mのメッシュに分割する
- 75地点の水質データをもとに、三次元スプライン法にて水質分布を推定する
- 各メッシュごとに、容積と濃度の積としてメッ

\* 京都大学大学院工学研究科附属環境質制御研究センター 〒520-0811 滋賀県大津市山美浜1-2

\*\* 龍谷大学理工学部 〒520-2194 滋賀県大津市瀬田大江町横谷1-5

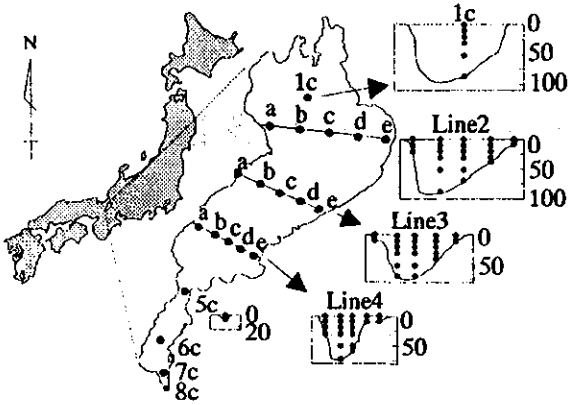


Fig. 1 Sampling points in the water quality survey in Lake Biwa.

シユ内存在量を計算する

iv) 水域ごとにメッシュ存在量を集計する

2.3 琵琶湖の流入/流出負荷量

琵琶湖の流入負荷量および流出負荷量を文献値より推定した。負荷の流入経路は河川, 大気からの降下(降水を含む), 地下水, 下水処理場からの放流を取り上げた。

3. 結果および考察

3.1 琵琶湖全域での物質収支

Table 1に本研究で用いた流入負荷量に関する文献値を示す。表中には, 単位を換算したものの, 文献値をもとに本研究で再計算したものも含まれる。

いずれの項目もばらつきが大きい。特に負荷量の大きな河川流入においては, 最大値と最小値の間に  $8.3 \times 10^4$  tonNの差がある。

集水域内の状況の変化に応じ流入負荷量も増減していると考えられるが, 報告されている値に経年的な変化を見出すことはできない。ここでは河川流入, 大気降水物(降水を含む), 地下水, 下水処理場からの直接流入の各項目ごとに全ての値を用いた平均値を算出し, 総流入量として窒素  $7.9 \times 10^4$  tonN $\cdot$ yr $^{-1}$ を得た。ただし, 前述のように文献値, 特に河川からの負荷量にばらつきが多いため, 本論文では河川流入負荷量の標準偏差に相当する  $2.6 \times 10^4$  tonN $\cdot$ yr $^{-1}$ の幅を設定し, 先の平均値とあわせ  $(7.9 \pm 2.6) \times 10^4$  tonN $\cdot$ yr $^{-1}$ として議論を進める。これ以降, 各種評価値は「平均値による値(範囲を考慮した値)」として表す。

全流入負荷に占める割合は河川からが最も多く75%(62~81%), 次いで大気からの供給が13%(10~19%), そして地下水としての流入7%(5~10%), 下水処理場からの流入6%(5~9%)であった。

琵琶湖からの流出負荷量としてTable 2に示されるような値が報告されている。琵琶湖からは瀬田川, 琵琶湖疏水, 宇治発電所の4経路を通じ湖水が流出し, 各経路の流量は常に把握されている。そのため, 前述の流入負荷量に比べ精度は高く, 値のばらつきは小さい。流入負荷量の場合と同様に, 流出負荷量平均値として  $2.3 \times 10^4$  tonN $\cdot$ yr $^{-1}$ を得た。

流出量は全流入量の29%(22~44%)と小さく, 71%

Table 1 Input nitrogen loading to Lake Biwa (tonN $\cdot$ yr $^{-1}$ ).

Research Area	River (dry)	River (storm)	River (total)	Atmospheric deposition	Ground water	Domestic wastes	Total	Evaluated period	Reference
whole lake	1.652			846	1,004			1965	7)
whole lake	1.694			846	1,004			1970	
whole lake (north basin)			4.793	860				1975	8)
(south basin)			3.760	787					
whole lake			1.033	72				1975~1977	9)
whole lake (north basin)			3.212	1,361	314			1974~1981	10)
(south basin)				1,024				1989~1993	
whole lake			5.424	898	339			1976~1981	11)
(north basin)			3.541	832	204				
(south basin)			1.883	66	135			1983~1984	12)
whole lake			5.366		260~586				
whole lake (north basin)			11.524					1990	13)
(south basin)			10,107						
whole lake			1.417						
whole lake (north basin)				1.074				1991	11)
(south basin)				1.016					
whole lake	2.483	2.484	5.038	58				1995	14)
(north basin)			4.347						
(south basin)			691						
whole lake	1.800							1996	15)
whole lake						486		1997	16)
max			11.524	1,361	1,004	486	14,376		
average			5.893	1,011	519	486	7,909		
min			3.212	846	260	486	4,804		

Table 2 Output loading from Lake Biwa.

Evaluated Period	Phosphorus	References
1968	86	8)
1975~1977	181	9)
1995~1997	106	17)
average	124	

(56~78%) が湖底へ沈降するか脱窒により系外へ排出されていることになる。Tezuka<sup>17)</sup>、國松<sup>18)</sup> も湖内残存率の高さを指摘している。

湖底への沈降フラックス  $F$  は式(1)で計算される<sup>16)</sup>。

$$F = (L_i - L_o) / A \quad (1)$$

ここで、 $L_i$ : 流入負荷量、 $L_o$ : 流出負荷量、 $A$ : 湖面積。

式(1)中の  $L_o$  に流出量  $2.3 \times 10^3 \text{ tonN} \cdot \text{yr}^{-1}$  を、 $L_i$  に流入量  $(7.9 \pm 2.6) \times 10^3 \text{ tonN} \cdot \text{yr}^{-1}$  を代入し窒素の沈降フラックスを計算すると  $23 (12 \sim 34) \text{ mgN} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$  となる。この値は実測された沈降フラックス  $14 \sim 44 \text{ mgN} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$  の範囲内であり、本研究で得た負荷量は妥当なものであるといえる。

### 3.2 存在量の変化

調査期間中の窒素の存在量変化を水域別に示したものを Fig. 2 に、形態別に示したものを Fig. 3 に示す。なお、水域は北湖内の 0~15 m、15~25 m、25~60 m、60 m~湖底

の4層および南湖に分割した。また、図中には季節平均値を併せて示し、Fig. 2、Fig. 3 の結果を整理したものを Table 3 として示す。

平均は  $10.5 \times 10^3 \text{ tonN}$ 、最小値、最大値はそれぞれ  $7.6 \times 10^3 \text{ tonN}$ 、 $13.4 \times 10^3 \text{ tonN}$  であった。また、変動係数 (= 標準偏差 / 平均値) は 10% であった。

成分では溶解性のものが 86% と大半を占めた。いずれの層においても硝酸態窒素が最も多く存在し、全湖で  $6.1 \times 10^3 \text{ tonN}$  (58%) であった。これに対し、植物プランクトンにとって利用しやすい形態であるアンモニア態窒素の存在量は  $0.3 \times 10^3 \text{ tonN}$  (3%)、うち表層内のもの  $0.1 \times 10^3 \text{ tonN}$  (1%) であった。

主な季節変化は4月から10月の間に表層(0~15 m層)で  $3.1 \times 10^3 \text{ tonN}$  から  $2.4 \times 10^3 \text{ tonN}$  へと  $0.7 \times 10^3 \text{ tonN}$  減少すること(硝酸態窒素の減少は  $0.8 \times 10^3 \text{ tonN}$ 、アンモニア態窒素・有機態窒素は  $0.2 \times 10^3 \text{ tonN}$  増加)、25~60 m の層で4月から7月の間に  $4.3 \times 10^3 \text{ tonN}$  から  $4.8 \times 10^3 \text{ tonN}$  へ増加することであった。

窒素存在量の変化について、年および季節を因子とした二元配置分散分析を行い、各因子が全変動に占める寄与率を計算した。Fig. 4 に結果を示す。溶解態窒素(DN)では季節の寄与が大きく、北湖の15 m以深の各層および南湖では有意水準5%で季節による影響があると判断された。一方、懸濁態窒素(PN)においては年の影響が大きく、北湖の15~25 m、25~60 m層にて同様に年による

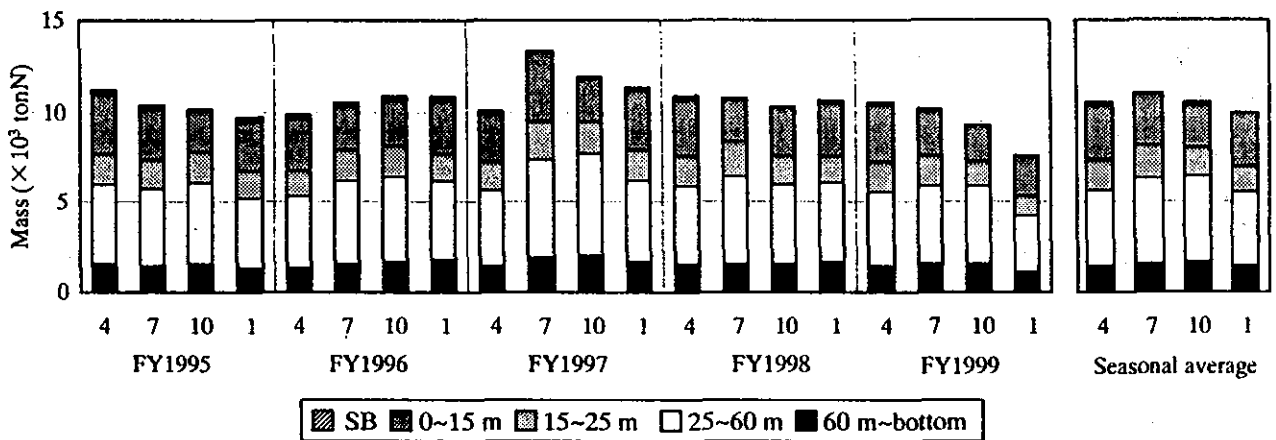


Fig. 2 Observed areal mass changes and seasonal average in total nitrogen.

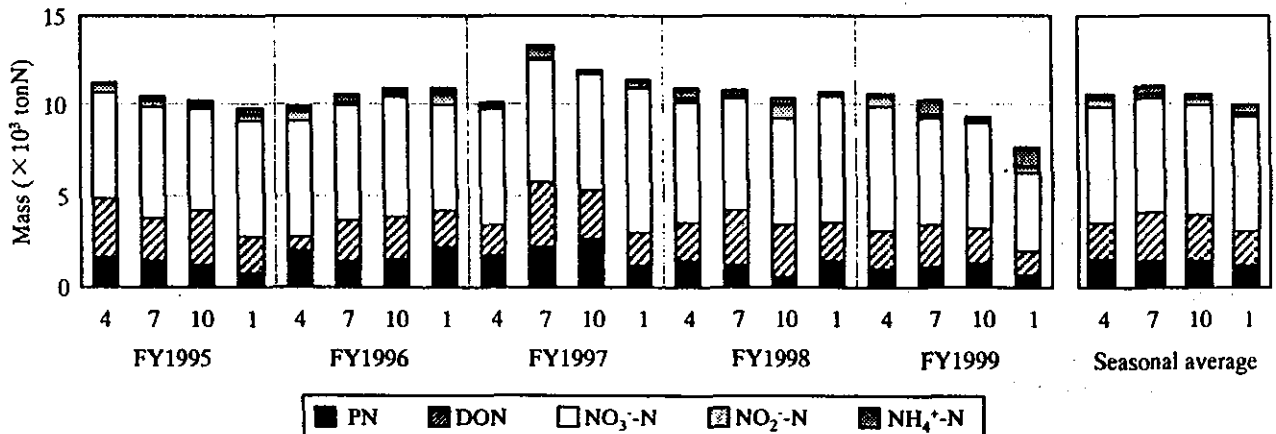
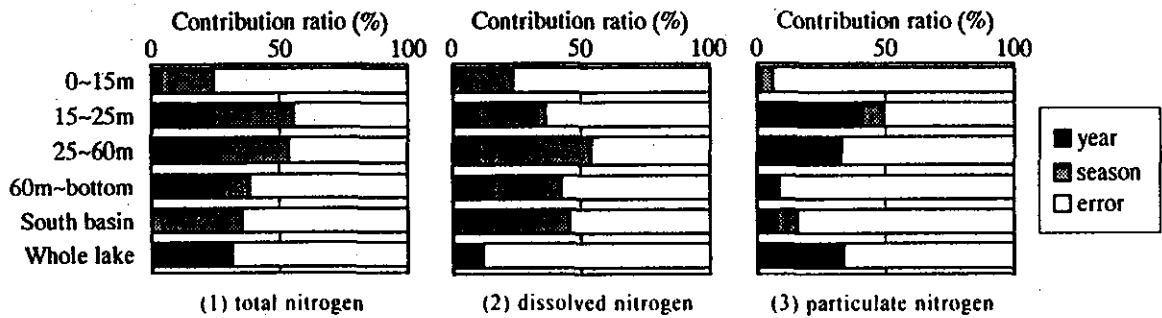


Fig. 3 Observed mass changes and seasonal average in five forms of nitrogen.



**Table 3** Averaged mass in each region. Values in parentheses mean percentage to the total mass in whole lake.

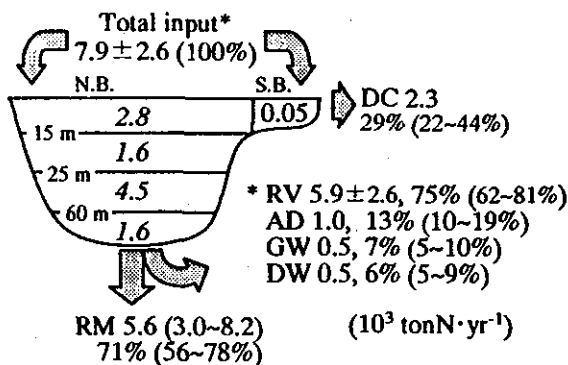
	Statistics in whole lake				Average in north basin				Averages in south basin	Unit
	Average (%)	Min.	Max.	S.D.	0-15 m	15-25 m	25-60 m	60 m~btm		
Water volume	275 (100)	271	277	2	80 (29)	43 (16)	112 (41)	39 (14)	1.4 (0.5)	$\times 10^8 \text{ m}^3$
TN	10.5 (100)	7.6	13.4	1.1	2.8 (26)	1.6 (16)	4.5 (43)	1.6 (15)	0.05 (0.5)	$\times 10^3 \text{ tonN}$
DN	9.0 (86)	7.0	11.1	0.9	2.2 (21)	1.4 (13)	4.0 (38)	1.4 (13)	0.04 (0.4)	
DIN	6.8 (64)	5.7	8.2	0.6	1.5 (14)	1.0 (10)	3.1 (30)	1.1 (11)	0.03 (0.3)	
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	0.35 (3)	0.08	1.06	0.24	0.12 (1)	0.06 (1)	0.13 (1)	0.04 (0)	0.00 (0.0)	
NO <sub>2</sub> -N	0.27 (3)	0.04	0.80	0.21	0.08 (1)	0.04 (0)	0.11 (1)	0.04 (0)	0.00 (0.0)	
NO <sub>3</sub> -N	6.1 (58)	4.3	7.8	0.7	1.3 (12)	0.9 (9)	2.9 (27)	1.0 (10)	0.02 (0.2)	
DON	2.3 (22)	0.8	3.5	0.6	0.8 (7)	0.4 (4)	0.9 (8)	0.3 (3)	0.02 (0.2)	
PN	1.5 (14)	0.5	2.7	0.6	0.5 (5)	0.2 (2)	0.5 (5)	0.2 (2)	0.01 (0.1)	



**Fig. 4** Contribution ratios for variance of year and season.

影響があると判断された。全湖での全窒素については年、季節ともに影響があるとは言えず、成分、水域によっては明らかに変化がみられるものの、全体としてはほぼ一定量が維持されている。

3.1 で得られた流入/流出負荷量および本節で得た湖内平均存在量を合わせ Fig. 5 に示す。図中の負荷流入を示す矢印は全湖への流入を意味している。湖内全存在量は1年間の流入負荷量の133% (100~199%) に相当し、滞留時間は16ヶ月 (12~24ヶ月) となる。琵琶湖の水理学的滞留時間5.5年<sup>21)</sup> に比べ非常に短い。3.1 にて湖内で沈降あるいは脱窒という形で除去されている量が多いことを示したが、水理学的滞留時間よりも短い窒素の滞留時間もまた、湖内に窒素を除去する機構があることを示している。



**Fig. 5** Annual nitrogen balance in Lake Biwa. Value in italic style means mass-quantity in water body, while that in normal style is transported quantity. (RV: Riverine input, AD: Atmospheric deposition, GW: Groundwater, DW: Discharge from wastewater treatment plants, DC: Discharge from the lake, RM: Removal including settlement and denitrification)

**3.3 成層期の物質循環**

(1) 一次生産量との比較

琵琶湖にて測定された一次生産量を Table 4 に示す。これによると、成層期には  $760 \text{ mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$  程度の一次生産があることになる。北湖の湖面面積  $616 \text{ km}^2$  を乗じ、北湖内での生産量を概算すると  $470 \text{ tonC} \cdot \text{day}^{-1}$  となる。ところで、懸濁性有機炭素 (POC) について0~15 m 層における存在量を計算したところ、4~10月の平均存在量は  $3,600 \text{ tonC}$  であった。先の一次生産量と比較すると、POCの回転率は7.7日と計算される。びわ湖生物資源調査団(1966)<sup>21)</sup> による調査でも、同様の計算から植物プランクトン群集が10日に1回の割合で交替している

**Table 4** Observed net primary production rate in Lake Biwa.

Year	Mon.	Points	Primary production	Reference
1986	5~10		450~790	23)
1987	5	North basin	450	24)
	6		780	
	7		1140	
	9		920	
1990	6	Chikubusima	394	25)
	7	-oki	183	
1992	6	Wani-oki	1288	26), 27)
	7		990	
	8		923	
	9		556	
	11		275	
1994	9	Wani-oki	140~700	28)
1996	7~11	Wani-oki	304~2,700	29)
1997	3~10		Yasugawa-oki	

( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ )

推定されている。

2.1の水質調査結果より求めた懸濁物中のC/N比  $6.4 \text{ gC} \cdot \text{gN}^{-1}$  から一次生産に用いられた窒素量を推定すると  $120 \text{ mgN} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$  程度となる。POCと同様に北湖内の生産量を概算すると  $73 \text{ tonN} \cdot \text{day}^{-1}$ , 4月から10月までの半年間では  $13 \times 10^3 \text{ tonN}$  となる。

生産層(ここでは0~15 mとする)内の全窒素(TN)存在量を先の生産量で割ることで計算される回転率は38日であった。プランクトン群集が7.7日に入れ替わっていたことから、窒素は5回の群集交替で表層内の全量が利用されることになる。

流入負荷量を単純に1年間の日数で割ることで得られる平均流入負荷量は  $22 \text{ tonN} \cdot \text{day}^{-1}$  であり、生産量  $73 \text{ tonN} \cdot \text{day}^{-1}$  の30%程度しかない。つまり、流入負荷だけで一次生産を支えることはできない。その一方、生産層には  $1.5 \times 10^3 \text{ tonN}$  の溶存態無機窒素(DIN)が存在し、この量は一時生産に利用される量の21日分に相当する。つまり、琵琶湖北湖の表層には3週間程度、湖外からの流入や無機化による回帰がなくても一次生産を維持しうる量の窒素が存在することになる。

Hama *et al.*<sup>32)</sup>, Takahashi *et al.*<sup>33)</sup> は、北湖竹生島付近にて窒素の循環について調査を実施し、3月から初夏にかけての期間に植物プランクトンが取り込んだ窒素の割合は硝酸態窒素が20%、残りはアンモニア態および尿素態窒素であった、つまりアンモニア態窒素を効率よく利用しつつ、不足分を硝酸態窒素で補うことで成長に必要な窒素を確保していると報告している。

4月から10月の間の表層において、硝酸態窒素量は  $0.8 \times 10^3 \text{ tonN}$  減少した。一次生産に利用される硝酸態窒素の割合が20%とすると、この期間の硝化量は多くて  $1.8 \times 10^3 \text{ tonN}$  となる。この量は植物プランクトンによる取り込み量  $13 \times 10^3 \text{ tonN}$  の14%に相当し、この期間の表層での硝化量は非常に小さいことになる。

#### (2) 躍層下での無機化

DINは4月から10月までの間に水深25 m以深で  $0.8 \times 10^3 \text{ tonN}$  増加する。躍層下での窒素量の増加はほとんどが硝酸態窒素によるものであり、表層から沈降した有機物の無機化に起因する。

この増加量から湖底面積  $1 \text{ m}^2$  当りの回帰量を計算すると  $11 \text{ mgN} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$  となる。ところで、琵琶湖の底泥を用いた窒素溶出実験ではTable 5のような値が報告されており、北湖においては  $0.7 \sim 10 \text{ mgN} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$  となっている。値にばらつきがあるが、概ね妥当な数値が得られている。

ところで、硝化および有機物の無機化は溶存酸素の消費を意味する。いま、有機物  $1 \text{ g}$  が躍層下で好氣的に分

解され、さらに有機物中の窒素成分が硝酸態窒素にまで酸化される時に消費される酸素量を考える。

有機物中の窒素は有機物分解過程でアンモニア態窒素として回帰すると想定した場合、 $1 \text{ g}$  の窒素が消費する酸素量は  $(72/14) \text{ gO}$  である。また、北湖躍層付近(水深15~25m)での懸濁物質中  $\text{COD}_m/\text{N}$  比は  $28 \text{ gO} \cdot \text{gN}^{-1}$  であった。したがって、 $1 \text{ g}$  の有機物が分解される時に消費される酸素量は次式で計算される。

$$1(\text{gO}) + 1/28(\text{gN} \cdot \text{gO}^{-1}) \times 72/14(\text{gO} \cdot \text{gN}^{-1}) = 1.2(\text{gO}) \quad (2)$$

ところで、4月から10月の間の躍層下(水深25 m以深と定義)における酸素減少量は  $49 \times 10^3 \text{ tonO}$  であった。つまり、

$$49 \times 10^3(\text{tonO}) / 1.2(\text{gO}) = 41 \times 10^3(\text{tonO}) \quad (3)$$

の有機物が分解されたと考えられる。

このとき、上記のような好氣的な有機物分解と窒素の酸化のみが生じたと仮定すると、硝酸態窒素量は

$$41 \times 10^3(\text{tonO}) / 28(\text{gO/gN}) = 1.5 \times 10^3(\text{tonN}) \quad (4)$$

増加するはずである。しかし、観測で得られた実際の増加量は  $0.6 \times 10^3 \text{ tonN}$  であった。予想される量の42%にすぎない。このことは分解された有機物中窒素の一部が脱窒により除去されている可能性を示している。

上記の計算は溶存有機態・アンモニア態窒素(以下、ケルダール窒素)の増加、脱窒による有機物の消費およびそれに伴う窒素のさらなる回帰を考慮していない。そこで、式(5)~(7)にもとづき、Fig. 6中の変化量  $x_1, x_2, x_3$  を計算した。

$$x_1 = -(1/28) \times [\Delta O + (72/14) \times x_2] + (2.86/28) \times x_3 \quad (5)$$

$$\Delta \text{NO}_x = x_2 - x_3 \quad (6)$$

$$\Delta K_j = x_1 - x_2 \quad (7)$$

ここで、 $\Delta$ は6ヶ月間の存在量の変化、 $\text{NO}_x$ は硝酸態・亜硝酸態窒素、 $K_j$ はケルダール窒素、 $O$ は酸素を表す。

計算の結果、ケルダール窒素は  $1.6 \times 10^3 \text{ tonN}$  生成され、うち  $1.4 \times 10^3 \text{ tonN}$  は酸化され硝酸・亜硝酸態窒素となる。硝酸・亜硝酸態窒素は  $0.6 \times 10^3 \text{ tonN}$  増加するが、 $0.7 \times 10^3 \text{ tonN}$  は脱窒により除去される結果となった。

Yamada *et al.*<sup>34)</sup> は安定同位体による評価で、琵琶湖北湖へ流入した窒素の50%が脱窒されていると推定した。今回の結果はYamada *et al.*の結果と同様に、琵琶湖の躍層下において脱窒が盛んに行われている可能性を示している。

ところで、琵琶湖北湖は中栄養の状態にあり、年間を通じ常に酸素が存在する。最も溶存酸素濃度が減少する

Table 5 Nitrogen flux from bottom mud derived in Lake Biwa

Year	Res. field	flux	References
1981	north basin	702~892	34)
	south basin	258~905	
1985	north basin	10,100	35)
	south basin	17,100	
1986	north basin	2,300	21)

( $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ )

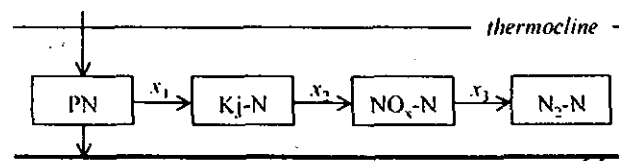


Fig. 6 Schematic diagram of nitrogen cycle under the thermocline. Kjeldahl-N (Kj-N) includes dissolved organic nitrogen and ammonium nitrogen, while  $\text{NO}_x\text{-N}$  consists of nitrite and nitrate nitrogen.

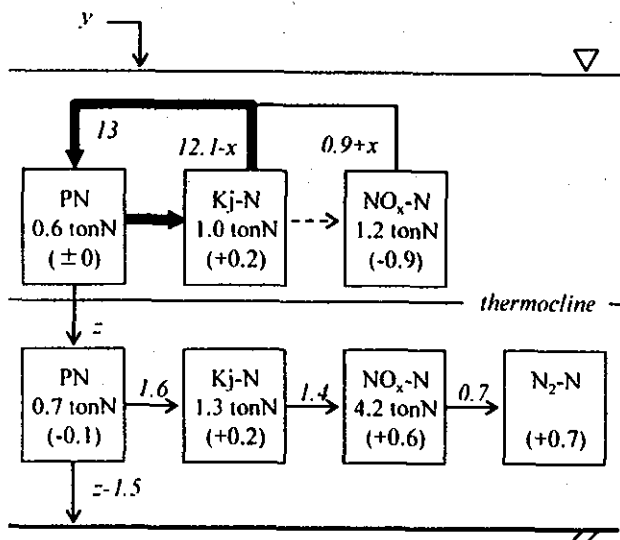


Fig. 7 Nitrogen cycle in north basin of Lake Biwa during stagnation period. Value in box without parentheses indicates nitrogen mass, and that in parentheses is increase during the period ( $\times 10^3$  tonN). Transfer rate is also shown as value in italic style ( $\times 10^3$  tonN/six-months). The letters  $x$ ,  $y$  and  $z$  mean unidentified transfer rates. The cycle within the thermocline is not shown in this figure.

最深部の湖底においても通常の年で  $4 \text{ mgO}_2/\text{l}$  程度、濃度減少の大きな年でも  $2.5 \text{ mgO}_2/\text{l}$  程度の酸素が存在し、脱窒が行われるような嫌気の状態にはならない。このような好氣的条件下での脱窒の可能性としては、好氣的脱窒菌の存在<sup>21)</sup>、デトリタスなど懸濁物質内の微小空間での脱窒<sup>22)</sup> が考えられる。

### (3) 成層期の窒素循環

以上の議論を整理し、成層期の北湖内窒素循環を Fig. 7 に示す。4 月から 10 月までの 6 ヶ月間における北湖内窒素循環はおおよそ次のようであろう。

北湖表層にて一次生産に利用される窒素量は約  $13 \times 10^3$  tonN、その多くはアンモニア態窒素による。また、生産されたものの多くは表層内で無機化されるが、硝化による硝酸態窒素の生成量は  $1.8 \times 10^3$  tonN 程度と考えられる。躍層下へ沈降したもののうち、 $1.6 \times 10^3$  tonN が分解を受け、さらに  $1.4 \times 10^3$  tonN は硝酸態窒素にまで酸化される。脱窒量は  $0.7 \times 10^3$  tonN に達する。

## 4. 結論

1) 琵琶湖全域への窒素流入量は  $7.9 \times 10^3$  tonN $\cdot$ yr<sup>-1</sup>、流出負荷量は  $2.3$  tonN $\cdot$ yr<sup>-1</sup>、湖底への沈降量および脱窒量は  $5.6$  tonN $\cdot$ yr<sup>-1</sup> と推定された。

2) 窒素は琵琶湖水中に平均して  $10.5 \times 10^3$  tonN 存在し、最小値、最大値はそれぞれ  $7.6 \times 10^3$  tonN、 $13.4 \times 10^3$  tonN であった。平均存在量は 1 年間の流入負荷量の約 136% に相当し、滞留時間は 16 ヶ月と計算された。

3) 一次生産は、全湖窒素量の 1% に相当する表層内アンモニア態窒素の利用により成立し、その他窒素の利用は少なく、かつ分解過程での硝化量も少ない。

4) 成層期、躍層下にて分解を受けた有機物中の窒素

のほとんどは硝酸態窒素にまで無機化され、さらにその半分程度は脱窒により除去されていると考えられる。

## 謝辞

本研究遂行にあたり(財)琵琶湖・淀川水質保全機構、国土交通省琵琶湖工事事務所、(財)日本生命財団、京都大学大学院 津野洋博士、岸本直之博士に多大なるご協力を賜りました。ここに記し深く感謝いたします。

(原稿受付 2003年2月3日)

(原稿受理 2003年8月14日)

## 参考文献

- 1) 滋賀県 (1998) 環境白書 平成 10 年版, 58-80.
- 2) 一瀬論, 若林徹哉, 山中直, 園正, 内藤幹滋, 川部浩市, 前畑佳代, 田中勝美, 野村潔 (1991) 琵琶湖におけるヒコブランクTONの異常増殖 -1989-1990-, 滋賀県環境セソ報, 26, 138-147.
- 3) 若林徹哉, 一瀬論, 山中直, 園正, 田中勝美, 野村潔 (1992) 琵琶湖におけるヒコブランクTONの異常増殖 (第2報), 滋賀県環境セソ報, 27, 70-76.
- 4) 高橋幹夫 (1999) 溶存有機物の動態, 琵琶湖研究所所報, 16, 49-52.
- 5) Nishino, M., Fukui, M. and Nakajima, T. (1998) Dense mats of *Thioploca*, gliding filamentous sulfur-oxidizing bacteria in Lake Biwa, central Japan. *Wat. Res.*, 32, 953-957.
- 6) 永礼英明, 宗宮功, 藤井滋徳 (2002) 琵琶湖の水中内栄養塩存在量の推定, 水環境学会誌, 25, 599-604.
- 7) 土木学会 (1978) 琵琶湖の将来水質に関する調査報告書 昭和 52 年度, 72-73.
- 8) 中西弘 (1980) 閉鎖性陸水域のリン収支 -琵琶湖をめぐって-, 用水と廃水, 22, 922-930.
- 9) 國松孝男 (1995) 琵琶湖の物質収支, 滋賀県琵琶湖研究所所報, 12, 68-73.
- 10) 國松孝男, 須戸幹 (1994) 大気降下物によるチッソ, リンの供給とその変動, 環境技術, 23, 710-713.
- 11) 建設省, 水資源開発公団, (財)ダム水源環境整備センター (1993) 琵琶湖水環境現況総合調査報告書 水文・水理・水質編.
- 12) 滋賀県琵琶湖研究所 琵琶湖集水域研究班 (1986) 滋賀県琵琶湖研究所プロジェクト研究記録集 No. 85 A2 琵琶湖集水域の現況と湖水への物質移動に関する総合研究.
- 13) 市木敦之, 大西敏之, 山田淳 (1996) 集水域における下水道整備進捗にともなう琵琶湖流入汚濁負荷量の変化, 水環境学会誌, 19, 109-120.
- 14) 高瀬瀬一, 國松孝男, 須戸幹 (1998) 琵琶湖への流入負荷量の算定, (財)日本生命財団助成研究 琵琶湖北湖の水質形成過程解明に関する研究 研究成果最終報告書, 1-12.
- 15) 藤井滋徳, 宗宮功, 古賀大輔, 田中英嗣 (1998) 琵琶湖における晴天時負荷量の地域特性解析, 日本水環境学会シンポジウム講演集, 1, 180-181.
- 16) 藤井滋徳 (2000) 琵琶湖の化学 - 物質収支 -, 琵琶湖, 宗宮功(編著), 技法堂出版, 149-171.
- 17) Tezuka, Y. (1992) Recent trend in the eutrophication of Lake Biwa. *Jpn. J. Limnol.*, 53, 139-144.
- 18) Vollenweider, R. A. (1975) Input-output models with special reference to the phosphorus loading concept in limnology. *Hydrologie*, 37, 53-84.
- 19) 前田広人, 三田村緒佐武, 児玉哲夫, 来田秀雄, 河合章 (1985) 湖の水温躍層と鉛直循環の関連性, 日本陸水学会講演要旨集, 50, 3.
- 20) 前田広人, 三田村緒佐武, 児玉哲夫, 江口充, 来田秀雄, 河合章 (1986) 琵琶湖北湖における栄養塩の鉛直輸送と生化学的

- 変化, 日本陸水学会講演要旨集, **51**, 134.
- 21) 前田広人, 三田村緒佐武, 児玉哲夫, 来田秀雄, 江口充, 河合章 (1987) 琵琶湖における水平ならびに鉛直輸送に関する研究 (8) - 物質の沈降・堆積・分解・溶出 -, 日本陸水学会講演要旨集, **52**, 158.
- 22) *Data book of world lake environments I. Asia and Oceania* (1993). ILEC, UNEP (ed.), Kusatsu, Japan.
- 23) 三田村緒佐武, 前田広人, 河合章 (1987) 琵琶湖における水平ならびに鉛直輸送に関する研究 (6) - 生産と分解 -, 日本陸水学会講演要旨集, **52**, 156.
- 24) Takahashi, M., Hama, T., Matsunaga, K. and Handa, N. (1995) Photosynthetic organic carbon production and respiratory organic carbon consumption in the trophogenic layer of Lake Biwa. *Journal of Plankton Res.*, **17**, 1017-1025.
- 25) 三田村緒佐武, 川嶋宗雄 (1991) 琵琶湖におけるヒコプランクトンについて 4. ヒコプランクトンの光合成特性, 日本陸水学会講演要旨集, **56**, 95.
- 26) 中西正己, 永田俊, 川幡佳一, 芳賀裕樹, 仲野伸一, 高井賢治, 楠岡泰, 二宮浩司, 占部城太郎 (1993) 琵琶湖における浮遊生物食物網動態の解析 I, 日本陸水学会講演要旨集, **58**, 72.
- 27) Urabe, J., Nakanishi, M. and Kawabata, K. (1995) Contribution of metazoan plankton to the cycling of nitrogen and phosphorus in Lake Biwa. *Limnol. Oceanogr.*, **40**, 232-241.
- 28) 三田村緒佐武, 中西正己, 津田良平 (1995) 琵琶湖北湖における基礎生産 - 躍層動態 '94 の観測結果から -, 日本陸水学会講演要旨集, **60**, 7.
- 29) 由水千景, 占部城太郎, 吉田丈人, 中西正己 (1998) 琵琶湖における物理・化学・生物過程の季節変化: VI 沈降粒子束に及ぼす動物プランクトンの影響, 日本陸水学会講演要旨集, **63**, 228.
- 30) 占部城太郎, 由水千景, 野崎健太郎, 中西正己, 杉山雅人, 杉山裕子, 中山英一郎, 丸尾雅啓, 紀本岳志 (1998) 琵琶湖における物理・化学・生物過程の季節変化 VIII. 炭素およびリン収支, 日本陸水学会講演要旨集, **63**, 230.
- 31) 建設省近畿地方建設局 (1966) びわ湖生物資源調査団 中間報告 (一般調査の部).
- 32) Hama, T., Matsunaga, K., Handa, N. and Takahashi, M. (1990) Nitrogen budget in the euphotic zone of Lake Biwa from spring to summer, 1996. *Journal of Plankton Research*, **12**(1), 125-131.
- 33) Takahashi, M., Hama, T., Matsunaga, K. and Handa, N. (1995) Nitrogenous nutrient uptake by phytoplankton and ammonium regeneration by microbial assemblage in Lake Biwa. *Journal of Plankton Research*, **17**(5), 1027-1037.
- 34) 前田広人 (1983) 湖とその集水域の物質動態 (6) 湖沼浄化作用を中心にして -, 滋賀県琵琶湖研究所所報, **1**, 55-66.
- 35) 市本繁和, マイケル H. ティンバリー (1986) 湖底泥と直上水の間での栄養塩の挙動について, 滋賀県衛環セ所報, **21**, 55-61.
- 36) Yamada, Y., Ueda, Y. and Wada, E. (1996) Distribution of carbon and nitrogen isotope ratios in the Yodo River watershed. *Jpn. J. Limnol.*, **57**, 467-477.
- 37) Colliver, B.B. and Stephenson, T. (2000) Production of nitrogen oxide and dinitrogen oxide by autotrophic nitrifiers. *Biotechnology Advances*, **18**, 219-232.