

## 小野川湖における負荷特性と水質特性の検討

### Pollution Load and Water Quality Conditions of Lake Onogawa

若狭 司\*・長林久夫\*\*・木村喜代治\*\*\*

By Tsukasa WAKASA, Hisao NAGABAYASI and Kiyozaki KIMURA

Field observation on how the characteristics of pollution load and the conditions of water quality of mountainous Lake Onogawa change as time progresses is investigated. The process of nutrient release from bottom deposit is discussed from the data on batch test of and field observation. In the hypolimnion, nitrogen metabolism is controlled by the process of nutrient elution and diffusion process. In the epilimnion, the water quality of the lake is between olig- and mesotrophic condition because the lake is used for hydropower generation.

Keyword : mountainous lake, polluted load, water quality condition, hypolimnetic nutrient release

#### 1. はじめに

近年、河川環境における水質保全への関心は高まっており、河川や湖沼における親水性の向上や景観に親しむことなどが強く求められている。水質を低下させる要因は工場や生活系からの排水による外部負荷と、河床堆積物からの栄養塩の溶出などによる内部負荷に区分される。河川の水質は汚濁物質の量により決定されるが、内部負荷により影響を受けることが知られている。これは湖沼においても同様であり、湖底に堆積している底泥からの栄養塩の溶出の影響は大きいものと思われる。特に閉鎖性水域では流入河川の水質と底泥からの溶出機構、湖内での流動特性が大きく水質に関与している。河川環境の保全対策を策定するにはより多くの河川・湖沼における水質特性の事例を把握する必要がある。本研究では福島県裏磐梯地区の長瀬川水系に位置する小野川湖を対象とし流入河川及び湖最深部と湖全域における水質特性の観測を 1992 年より実施して、その特性を報告している<sup>2)~5)</sup>。本論文においては微流動層における栄養塩の鉛直方向分布に着目して、その水質の経時的な変化特性を検討し、ついで底泥からの溶出特性を室内実験により再現して溶出機構に関して検討を加えた。

---

\* 学生会員 日本大学大学院工学研究科土木工学専攻

\*\* 正会員 工修 日本大学助教授 工学部土木工学科

\*\*\* 正会員 工博 日本大学教授 同上

(〒963 福島県郡山市田村町徳定字中河原 1)

2. 現地観測及び室内実験概要

小野川湖の概略図を図-1に示す。主な流入河川は北東部に位置する小野川と不動川、南西部に位置し桧原湖から流入する桧原川と剣ヶ峰水路である。流出口は下流の秋元湖との落差を利用した小野川発電所に通じる導水路である。

小野川湖は全貯水容量が 1364 万  $m^3$  であり流入量は年間約 2 億  $m^3$  と推定され、面積 1.4 $km^2$ 、周囲 9.8 km、最大長 3.5 $km$ 、最大幅 1.0 $km$ 、最大水深 21.8 $m$ 、交換率は 20(回/年)以上となるが、夏期には水温成層が形成されること、躍層より下層は停滞性が強く、表層との水質濃度差が著しく異なることなどが指摘されている<sup>3)</sup>。冬期は標高が 797 $m$  ある寒冷山間地のため結氷し逆成層が形成することから、完全な「二季成層型」に分類される典型的な寒冷地の山間地湖沼の特徴を有している湖である。

観測データは1993年～1995年のものを使用した。93年、95年は最深部 (A6) における定点観測及び流入河川の観測で、5月～10月の間におよそ月に2回の割合で実施した。94年は湖全域 (剣ヶ峰を起点とした A1～A6、発電所取水口からの B1～B4、A4 を中心とした C1、C3) 及び流入河川における測定を 5 月～10 月の間に月 1 回行った。測定は、島津理科社製 CTIS-P1008N 総合水質計により、1 $m$  間隔毎の水深、水温、DO、EC、pH、ORP 等について行った。また 93 年、94 年は A6 測線 (水深 4、8、12、16 $m$ 、湖底) と流入 4 河川、そして小野川湖各測点の表層水について、95 年には A6 測線(4、7、8、10、11、13、16 $m$ )において採水をし、アンモニウムイオン( $NH_4^+$ )、硝酸イオン( $NO_3^-$ )、磷酸イオン( $PO_4^{3-}$ )、全窒素(T-N)、全磷(T-P)を測定した。93 年と 94 年は下水道試験法により、95 年は HACH 社 DR2000 (セントラル科学) により水質分析を行った。

室内実験では底泥からの溶出実験を

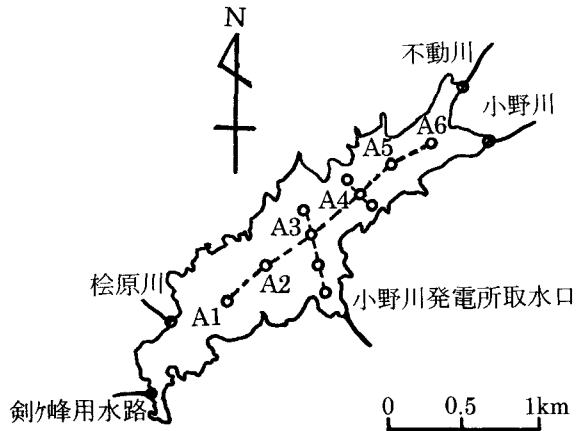


図-1 小野川湖概略図

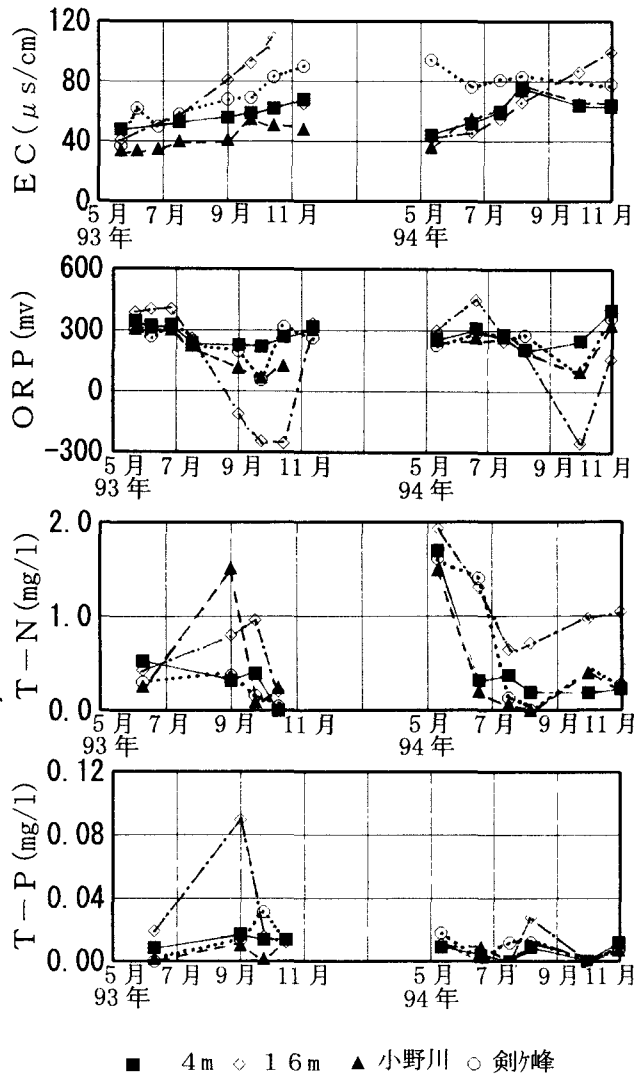


図-2 流入河川と湖内の水質経時変化

行った。底泥は 1994 年 6 月 17 日に小野川湖最深部より採取した。採取した底泥は 210 mm×150 mm×58 mm の容器に 100g と 200g に分けて入れ、小野川湖の表水を加え密封状態にし、水温 9℃ の一定の状態に維持し、保管した。その後 2,4,8 日から 116 日まで DO、EC、pH、ORP、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、T-N 等の測定を行った。

### 3. 水質諸量の経時変化特性の検討

#### 3.1 湖内・流入河川の水質の経時変化特性

93 年～94 年にかけての流入河川（小野川、剣ヶ峰）と A6 測線（4m、16m）における水質の経時変化特性を図-2 に示す。小野川と剣ヶ峰の流入河川と表層に近い 4m における水質は類似した変化特性を示している。ただし 94 年 5 月の剣ヶ峰の EC が高いことが例外である。また 94 年 5 月上旬の T-N は雪解けの流入により高めであり、この時期 T-N、T-P は湖全体では循環期であることより水深 16m まで影響しているが、その後しだいに減少している。7 月から 10 月にかけて 16m は EC が増加し、ORP が極端な減少傾向を示し、そして T-N も 7 月から 9 月にかけて増加傾向にあるのがわかる。これは夏期の水温成層の形成によるものであり、このことから躍層の上下層での水質濃度差が著しいことがわかる。T-P については 4m、16m そして流入河川は共に値が低く水質への影響は少ないものと思われる。

#### 3.2 小野川湖全域における水質状況

ここでは流入河川の負荷がどのように湖内へ移流・拡散するのか、躍層下層での水質悪化の影響がどのように表層に効果を及ぼすのかを検討するために、T-N、T-P の表層での状況を検討した。図-3 に 94 年における水質状況を示した。先に述べたように、5 月の雪解け時と 7 月の梅雨時における T-N の流入負荷は高いが湖内では比較的微量である。10 月下旬になると、気温低下による循

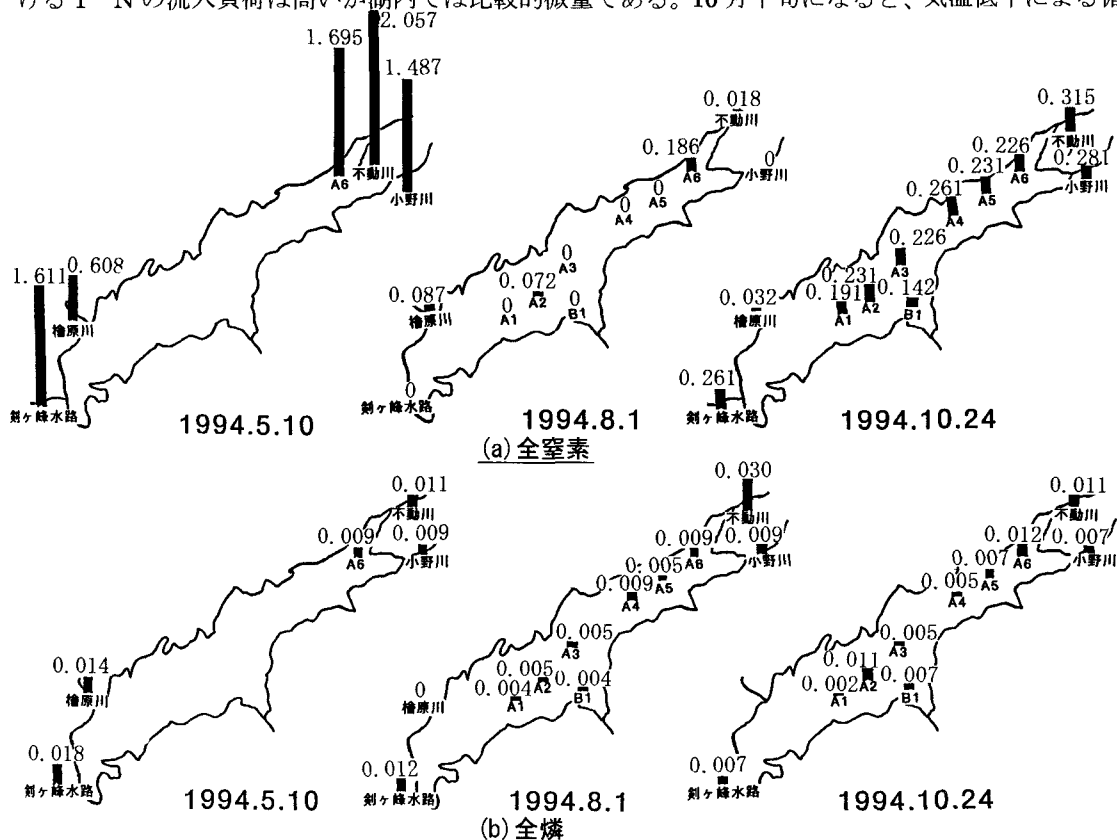


図-3 1994 年小野川湖全域における水質状況

環に伴い、躍層部の栄養塩類が表層まで上昇するために、湖全域で値が上昇することが特徴である。T-Pの流入負荷は小さく、湖内でも微量値しか検出されなかった。以上から雪解けによる流入負荷の増大や成層の崩壊・混合による表層でのT-Nの一時的な上昇はあるものの急激な水質変化はみられず、湖底部での水質悪化による表層水への影響もほとんどないものと考えられる。以下では水質悪化が激しい躍層より下層での水質特性を最深部における水質諸量に着目して検討を行う。深水層における水質の悪化は藤田・高橋・長林による裏磐梯の湖沼群における計測<sup>2)</sup>及び桧原湖におけるY.SATOU<sup>6)</sup>の計測において指摘されており、解明すべき重要な課題の一つである。

### 3.3 水質諸量の鉛直方向特性の検討

95年の水質計による水質項目のA6での鉛直分布図特性を図-4 (a)～(c)に示す。DOは月日の経過とともに9m～11mの躍層付近から減少傾向となり、7月～8月にかけて躍層以深で無酸素状態となる。ECは躍層付近から下方へ増加傾向となっている。ORPは5月、6月は下方に向かって緩やかに増加しているのに対し、7月～8月にかけては緩やかに減少し、9月には躍層付

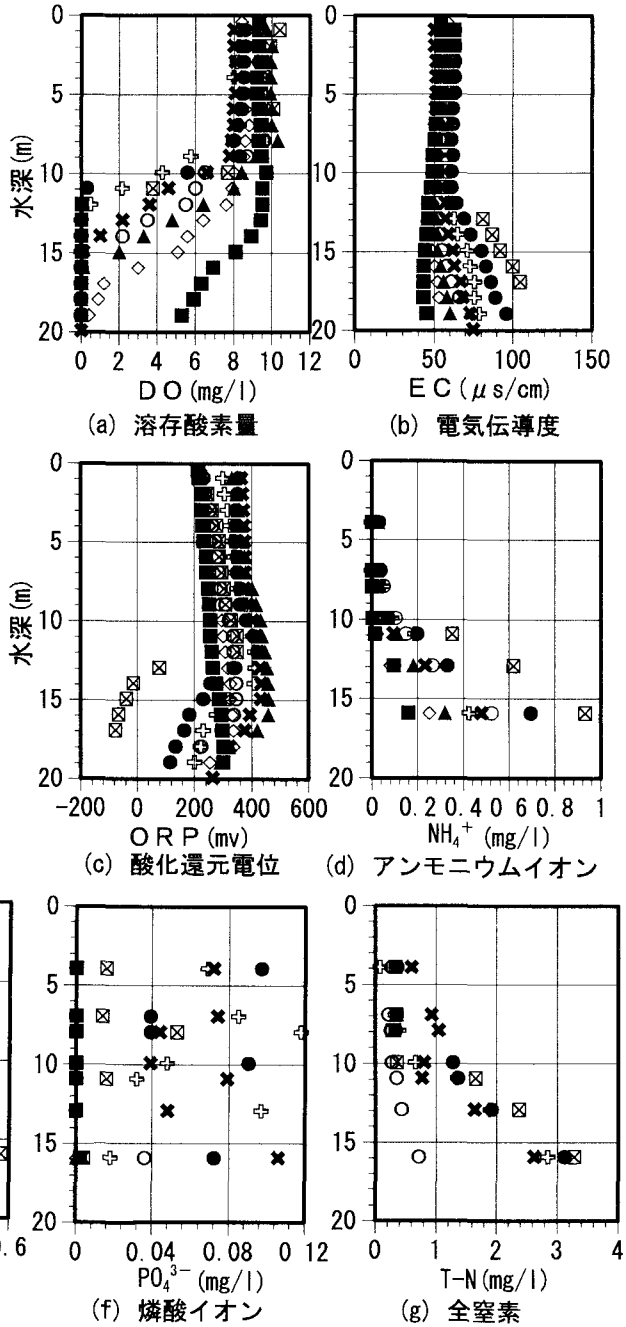


図-4 1995年最深部鉛直分布特性

近からマイナス傾向となる。これらは数年来同様な変化過程を示しており、躍層部より上層が流動層、下層が微流動層となる。成層形成期(7月)にDOの減少が始まり、成層安定期(8～9月)に微流動層では無酸素状態となり、底泥からの栄養塩の溶出、鉄分の還元作用等によりECが増加し、ORPの減少が起こる機構が推定される。

$\text{NH}_4^+$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{PO}_4^{3-}$ 、 $\text{T-N}$  の鉛直分布特性を図-4 (d)～(f)に示す。 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{T-N}$  は表層から8mまで経目的な変化は見られないが、10m以下では深度の増加とともに経目的に増加傾向にあり、 $\text{NO}_3^-$ も経目的に増加傾向にある。表層においては8月3日にかなりの降雨があり、表層での $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{T-N}$ の増加、 $\text{PO}_4^{3-}$ の若干の増加がみてとられることから流入河川による負荷によるものである。また小野川湖における $\text{PO}_4^{3-}$ はかなり低く、N/P比でみると1:100と窒素が大きいことがわかる。河川上流域はスキー場に付随した観光施設があるものの、その他の負荷が少ないためにリンの流入負荷はかなり低い値である。よってリンは富栄養化の主要な要因の一つであるが、小野川湖に関しては制限因子になると思われる。小野川湖の湖底は枯木や枯草の流入や固形分の堆積物が多く微流動層における $\text{NH}_4^+$ と $\text{T-N}$ の濃度変化が他の水質指標に比べて顕著である。このことより成層期における底泥からの溶出機構と $\text{NH}_4^+$ を中心とする拡散過程を検討することが必要である。

#### 4. 底泥溶出機構の検討

##### 4.1 底泥溶出の検討

以下では現地水を用いた底泥溶出に関するバッチテストを実施した。DO、EC、pH、ORP 及び  $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{T-N}$  について検討する。また DO、EC、pH、ORP には補足として91年～93年度の湖底のデータを掲載した。ここで深水域の水温が上昇し始める5月10日前後を開始日とした。DOは湖底が40日～50日でゼロとなり、室内実験は開始から30日位で1～2mg/lに減少する。ECは湖底が増加しているのに対し、室内実験のほうは増減しているのがわかる。またpHは6前後の状態で嫌気状態となることが報告されており<sup>5)</sup>ばらつきはあるものの室内実験において同程度、湖底においても6.2付近に多く示されている。湖底のORPは100日までに強い嫌気状態を示すが、室内実験では開始から60日まで減少過程は示しているものの100mv程度と強い嫌気状態は得られなかった。

$\text{NH}_4^+$ 、 $\text{T-N}$  は室内実験において20日目まで連続的に増加が認められ、初期段階における溶出状況を把握すること

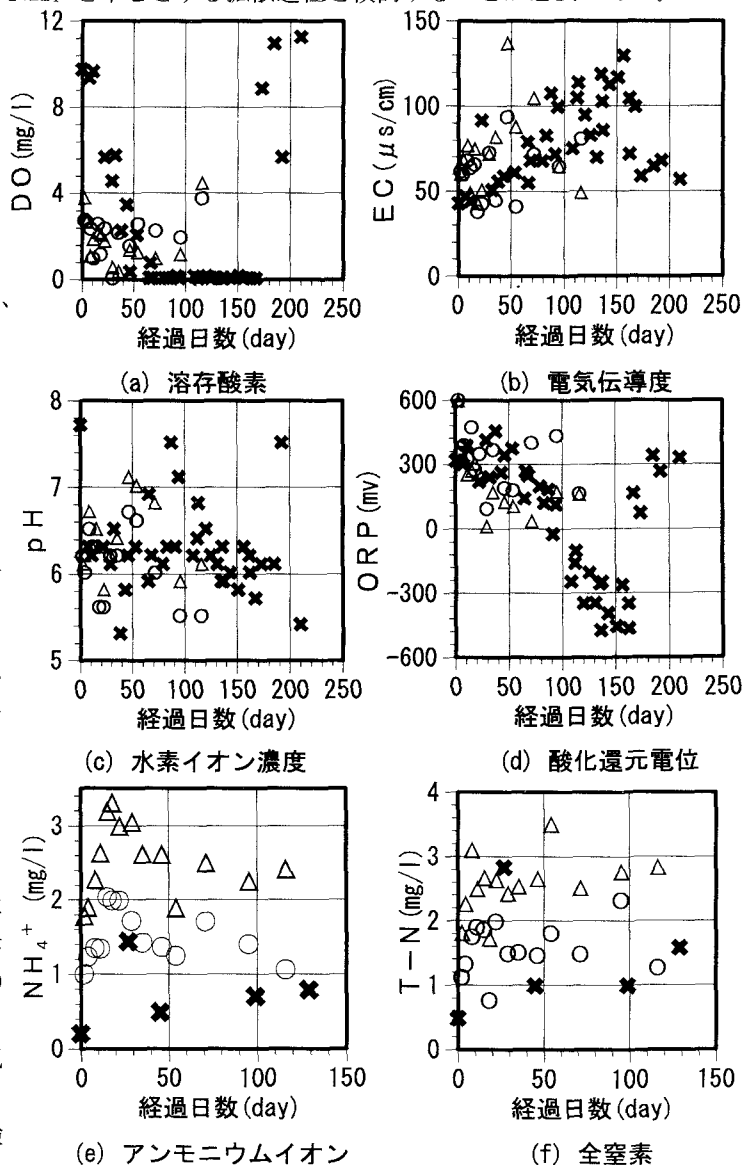


図-5 底泥溶出実験

ができた。初期段階での  $\text{NH}_4^+$  の 1 日当たりの溶出速度は 100g 実験で 0.06mg/l/day、200g 実験で 1.03mg/l/day、1 m<sup>2</sup> 当たりの溶出速度は 100g で 6.67mg/m<sup>2</sup>/day、200g で 10.00 mg/ m<sup>2</sup>/day となった。ちなみに富栄養状態の好気条件下での湖沼でもほぼ 10 mg/m<sup>2</sup>/day 程度の溶出があると言われており<sup>8)</sup>、これより小野川湖の湖底付近の水質状態は  $\text{NH}_4^+$  の溶出が支配要因の一つとなっていると思われる。室内実験における溶出は  $\text{NH}_4^+$  が減少傾向、T-N が一定濃度となる 20 日以降で終了したものと推測される。これより密封状態にあるために脱窒による窒素の放出や外部からの酸素吸収による硝化作用がほとんど行われず、無機態窒素の機構が保たれたものと思われる。

## 4.2 拡散係数 $K_z$ の検討

$\text{NH}_4^+$  の溶出過程を 95 年の現地データをもとにフィックの拡散法則により検討を行った。ここにフィックの拡散法則の式を示す。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = K_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2}$$

ここで、C：物質濃度、z：水深、t：時間 (day)、 $K_z$ ：拡散係数である。

本研究は、微流動層を対象としており、横からの移流項はきわめて少ないものとし<sup>9)</sup>、鉛直方向の拡散について検討を行った。そのため躍層より上部の拡散は対象としていない。

$\partial C / \partial t$  及び  $\partial^2 C / \partial z^2$  は図-4 (d) の実測値より、 $\partial C / \partial t$  はある水深位置での単位時間における輸送量(g/m<sup>2</sup>/day)、 $\partial^2 C / \partial z^2$  は同じ観測日の水深方向での濃度勾配より求めた。その結果を図-6 に示す。図よりデータのばらつきはあるが、平均的には  $K_z$  が 0.3(m<sup>2</sup>/day)程度の係数となることがわかった。

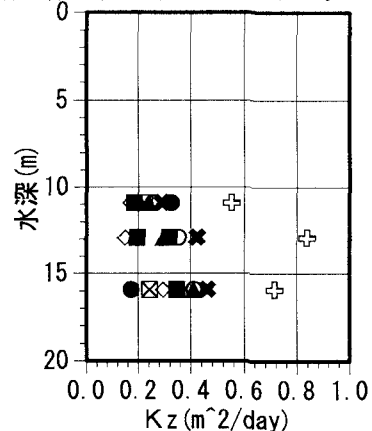


図-6 拡散係数  $K_z$

## 5. おわりに

小野川湖における負荷特性と湖内水質特性及び底泥溶出機構について検討を行った。

- (1) N/P 比は 100 以上で圧倒的な T-N の超過となり、リン制限の湖であることが言える。
- (2) 深水層は富栄養の水質であるが、表層は貧栄養から中栄養と水平混合の卓越した状況を示した。
- (3) 深水層の水温が上昇し始めてから 50 日間で無酸素状態となり、EC が上昇する。ORP は 30 日まで pH 低下に対して上昇するが、100 日で還元状態となり、150 日程度まで嫌気状態が続いた。
- (4) 湖底の  $\text{NH}_4^+$  は 100 日以降まで増加傾向を示し、溶出が続く過程を示していることが示された。
- (5) バッチテストでは  $\text{NH}_4^+$  の溶出は 20 日まで増加して、その後減少していること、また T-N も 20 日以降ほぼ一定値を保っていることから 20 日程度で初期溶出が終了したと言える。
- (6) 現地での  $\text{NH}_4^+$  について拡散過程を適用して拡散係数を検討し 0.3(m<sup>2</sup>/day)程度の値を得た。

### <参考文献>

- 1) 佐藤敦久：水環境工学 技報堂出版
- 2) 高橋・長林ら：水工学論文集、第 36 巻、1992 年 2 月 pp205-210
- 3) 長林・藤田・高橋・安田・木村：日本大学紀要、第 34 巻 A、1993 年 5 月
- 4) 長林・木村・塩月：水工学論文集、第 38 巻、1994 年 2 月 pp289-294
- 5) 塩月・木村・長林：水工学論文集、第 38 巻、1994 年 2 月 pp301-306
- 6) Y.SATOU：The Japanese Journal of Limnology, Vol.54, No.1 p.49-58, January 1993
- 7) 若狭・長林・木村：第 50 回学術講演会 2-B、1995 年 9 月 pp1272-1278
- 8) 岩佐義朗：湖沼工学 山海堂