

山間地湖沼の負荷特性と水質特性の 長期消長過程に関する研究

Relation Between Pollution Load and the Long-Term Metabolism in a Mountainous Lake

小川 裕正¹・長林 久夫²・Van-Thanh-Van Nguyen³

By Yasutada OGAWA, Hisao NAGABAYASHI and Van-Thanh-Van Nguyen

¹ 学生員 工修 日本大学工学研究科 土木工学専攻 (〒963-1165 福島県郡山市田村町徳定字中河原1)

² 正会員 工博 日本大学教授 土木工学科 (〒963-1165 福島県郡山市田村町徳定字中河原1)

³ Ph.D, Professor, McGill University (817 Sherbrooke Street West Montreal, PQ, Canada, H3A2K6)

Long-term metabolism of water quality is investigated based on the field data of Lake Onogawa for the case where is larger than prevailed than the reservoir capacity. In spite of circulation flow rate of the lake strong thermal stratification is formed in every summer. This phenomenon is caused by huge inflow flux from upper Lake Hibara, and water temperature and water quality of the epilimnion is dominated by the flux. Hence, in this study, the water balance in a lake is investigated from a viewpoint of the heat balance. An increase in the acid nitrogen at the bottom of the lake is caused by high rainfall in this summer. The variability of acid nitrogen due to rainfall is modeled. As a result, de-nitrification rate can be estimated at the bottom of the lake.

Key Words : mountainous lake, pollution load, water quality, hypolimnion, stratification period, rainfall, de-nitrification rate, the heat balance, advective heat

1. はじめに

清廉な水質を有する山間地湖沼においても、数十年前の水質と比較した場合には、多くの湖沼で汚濁の進行が認められている。これらの湖沼における水質保全は、高い汚濁負荷を有する都市近郊域の湖沼の水質保全と同様に、かけがえのない水環境を維持保全する上で着目すべき事項である。山間地湖沼の汚濁負荷削減対策は流域下水道等の整備進展により点源負荷は抑制傾向に転じているものの、山地や農耕地などの土地利用の変遷による非点源負荷の推移に強く関係しており、水質は目に見えて改善しない現状にある。一般に湖沼の水環境は周辺環境によって異なるものの、水質の消長過程には多くの類似点も認められており、より多くの検討を必要としている。

本論文は福島県、長瀬川流域における裏磐梯三湖の中間に位置する小野川湖の長期的水質の推移とその要因を検討している。本湖については、これまでに流入河川及び湖内水質を1991年より観測^{1)~4)}している。ここでは裏磐梯三湖の表層水質の推移と小野川湖における負荷特性との関係、流域周辺の開発による負荷と自然回復過程について検討している。さらに、流域からの移流熱が本湖

の水温構造と水質特性に強く影響することを示した。

2. 小野川湖概要

小野川湖は磐梯山の噴火によって形成された山間地の堰き止め湖であり、図-1の概要図に示すように上流に松原湖、下流域に秋元湖が位置している。小野川湖は水面標高797m、最大長3.5km、平均水面積1.4km²、最大水深22m、貯水容量1364万m³と比較的小規模な湖である。また山間部の堰き止め湖の特徴として、湖岸は屈曲に富み、山腹斜面がそのまま水中に没する所が多い。主な流入河川は、自然流域河川である小野川・中ノ沢川と、また、松原湖を源とし流量調整されている松原川・新川である。主な流出口は湖のほぼ中央部に位置する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。小野川湖の湖水の回転率は21.9回/年程度と高い値を有しており、一般には水温成層が形成されにくい流れダム湖に分類される。しかし夏期において水温成層が形成され冬期には寒冷山間地のため湖面が結氷し逆成層が形成されることから完全な二季成層型に分類される寒冷地の山間地湖沼の特徴を有している。

3. 裏磐梯湖沼の水質特性の推移に関する検討

図-2 に福島県水質年報による裏磐梯三湖の表層における16年間の推移を示す。図中の値は年間の平均値を示す。CODは昭和60年以降増加にあり、秋元湖においては平成元年に水質環境基準値である3mg/lに達し、秋元湖と小野川湖において淡水赤潮が確認されている。富栄養化の代表的指標である全窒素、全リンの年平均値の推移は平成2年以降わずかに増加の傾向にある。全窒素は、大きな差異はなく三湖沼とも0.15mg/l前後と横ばいの状況である。秋元湖の全リンは水質環境基準値の0.01mg/lを上回る年があり、特にリン濃度の変動が大きな湖といえる。また近年は、特に桧原湖と小野川湖の水質は、ほぼ同程度の値を示している。湖沼・貯水池の栄養状態を示すOECDの評価基準⁵⁾は、全リン濃度が0.01mg/l未満を貧栄養、0.01~0.35mg/lを中栄養、0.35mg/l以上を富栄養と区分している。したがってこれらの湖は貧栄養から中栄養の状態にあることが分かる。また、一般にN/P比が10以上ならば、その湖沼・貯水池の藻類繁殖はリン制限状態にあるとされており、三湖沼いずれも10以上となっており、特にリンの調査が重要であると考えられる。

4. 小野川湖における水質経年変化特性の検討

図-3 に最深部における水温、DO、ORP、ECの経時変化の特性を示す。水位変動は年によって異なるものの、水質の変化は例年類似した傾向が見られる。水温については7月から10月にかけて水深10m付近にかけて等値線が密となっており水温成層が形成されている。この水温成層の形成により、この時期において鉛直方向の混合は抑制され、深水層において栄養塩の溶出等により表層ではDOが飽和状態にあるのに対し、深水層においては無酸素状態になる。また、水温成層の崩壊と同時にDOが回復することが確認できる。また9月頃になるとORPは湖底付近において負の値を取り始める。一般にORP値が-200mV以下のときは嫌気状態であり、+200mV以上で好気状態と言われる。1991年に湖底付近において-400mVを示したが、その後は回復され減少傾向にある。このORPが減少し還元傾向となると、ECの値が増加してくる。これは湖底付近が無酸素状態になることで、アンモニア、リン、鉄等の栄養塩が溶出するためである。また、湖底付近が無酸素状態になりORPが負の値になるのは約1ヶ月後であり、これが硝化状態から脱窒状態へ要する時間と考えられる。また図-4に最深部におけるT-N、T-Pと無機態窒素のNH₄-NとNO₃-Nの経時変化を示す。アンモニアはEC同様、湖底から濃度が高くなっている。1996年、1997年の10月の湖底側において、硝酸性窒素は明確に発現しており、これに反してアンモニア態窒素は減少することから、成層崩壊に伴い湖水の循環が生じ硝化作用が起きたことが分かる。

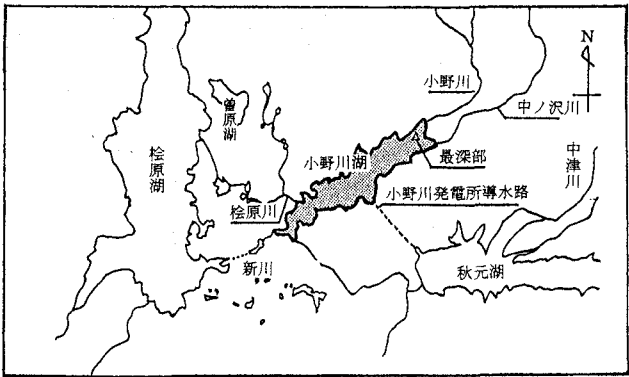


図-1 小野川湖概要図

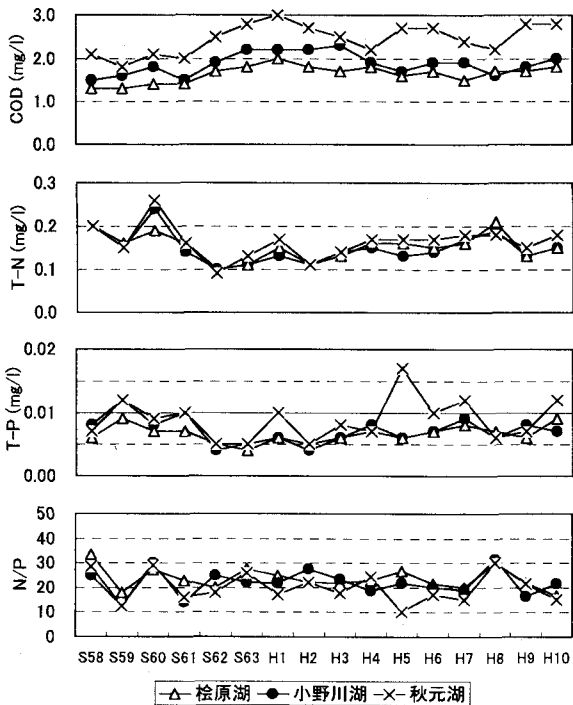


図-2 三湖沼における水質の推移

5. 負荷量の推移に関する検討

図-5 に過去5年間の年平均流入負荷量の推移を示す。ここでの負荷量は、小野川流域と上流の桧原湖の年平均流入量に、調査した平均濃度を乗じて算出している。NH₄-Nの負荷は桧原湖からのものが卓越しており近年は増加の傾向を示している。また、NO₃-Nの負荷量は1993年に小野川流域からの負荷が多かったが、1994年以降からは桧原湖からの負荷が高くなっている。この一時的な増加を示す背景には小野川流域上流部におけるスキー場完成が同時期にあることがあげられる。これに伴う流域からの負荷が増加したものと推察される。T-Nの負荷量は、1995年まで増加していたがその後、減少傾向にあり、NH₄-N同様桧原湖からの負荷が多いことが認められた。

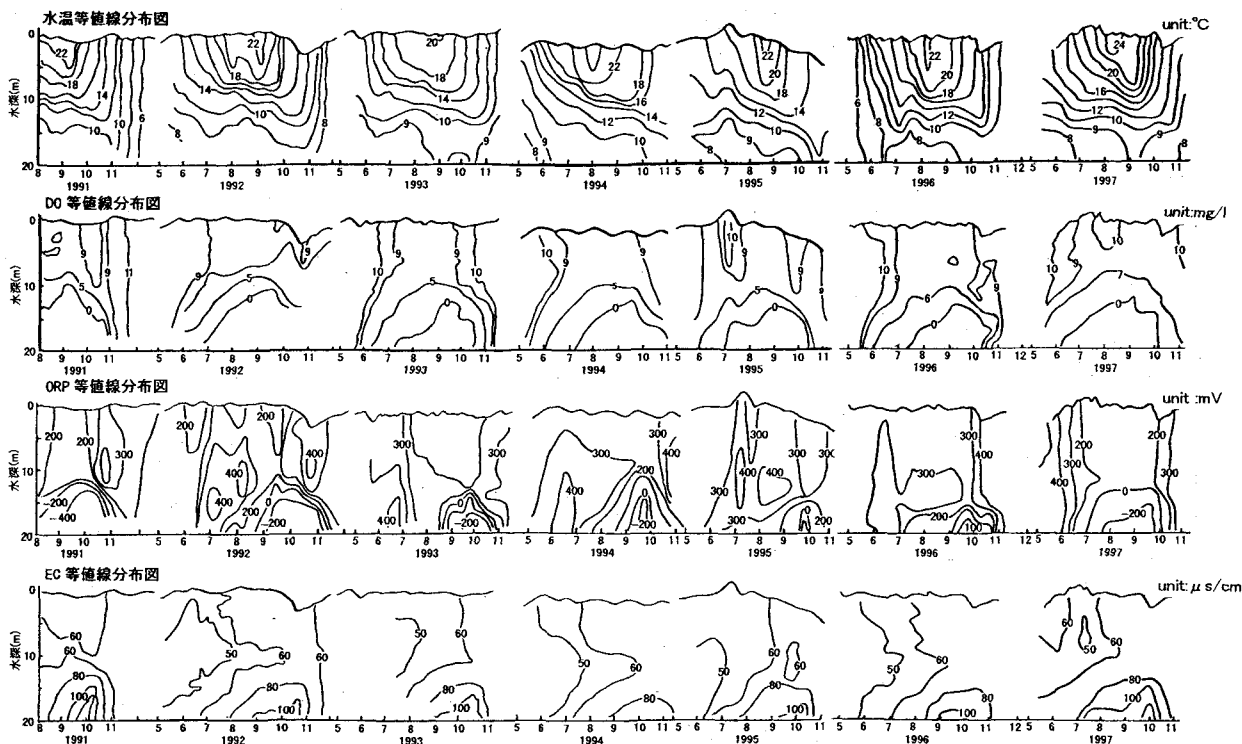


図-3 最深部における水温・DO・ORP・EC の経時変化

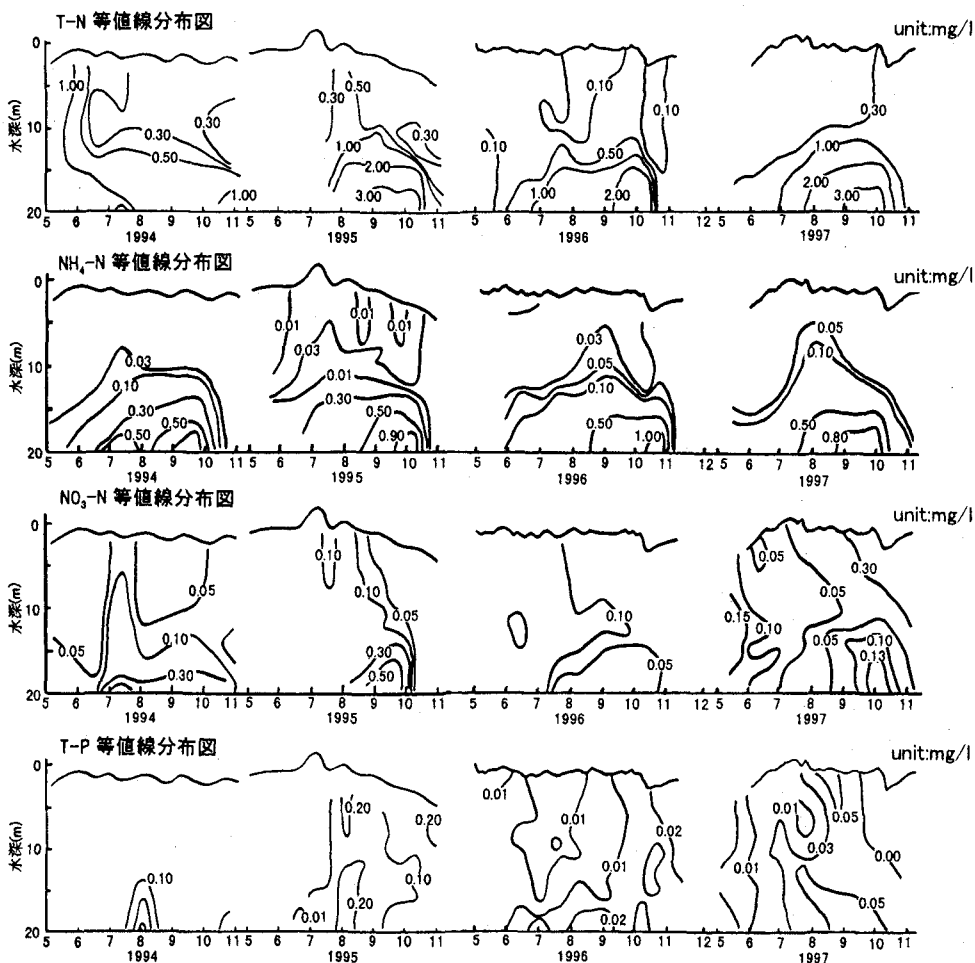


図-4 最深部における T-N・T-P・無機態窒素の経時変化

次に表層と深水層における湖内の無機態窒素負荷量の経年変化特性を図-6、図-7に示す。一般に湖沼の深水層では水温成層が形成され嫌気状態になると硝酸が減少し脱窒現象が生じる。まず全体的な $\text{NO}_3\text{-N}$ の推移において特筆すべきは、93年の表層と深水層における $\text{NO}_3\text{-N}$ の負荷が顕著である。このことは先に述べたスキー場開発による影響と考えられる。一方深水層の $\text{NO}_3\text{-N}$ の推移は95年と96年を境に変化している。95年までに見られた夏期の高い負荷発現は減少しており、松原湖などで報告される深水層の栄養状態に移行していると推測される。季節毎の推移は、毎年水温成層が形成される時期に深水層において $\text{NH}_4\text{-N}$ の内部生成が行われていることが分る。それに伴う $\text{NO}_3\text{-N}$ の減少も96年以降は明確であり、夏期の深水層において脱窒現象が行われていることが認められる。また小野川湖の深水層においては春から夏にかけて $\text{NH}_4\text{-N}$ が増加し、他方 $\text{NO}_3\text{-N}$ はこの時期減少することが佐藤ら⁶⁾によっても報告されており、脱窒が示唆されている。また冬期は循環により負荷量は減少する。

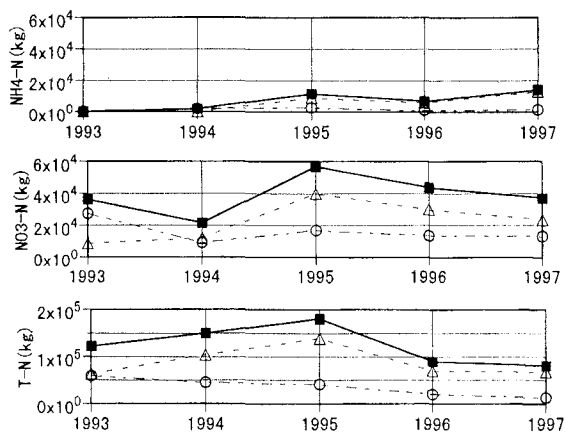


図-5 年平均負荷量の推移
(○流域, △松原湖, ■総流入量)

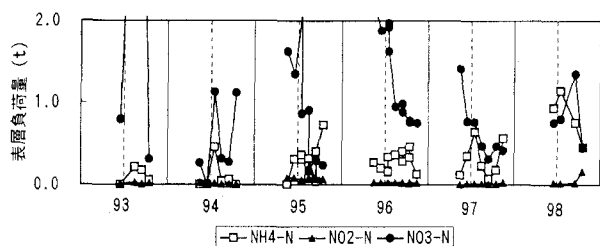


図-6 表層における三態窒素負荷量の推移

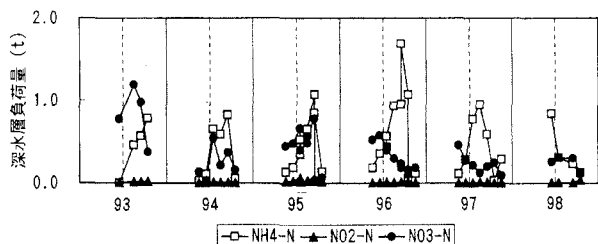


図-7 深水層における三態窒素負荷量の推移

6. 湖底付近における物質濃度の推移に関する検討

ここでは上記の検討結果をもとに深水層における無機態窒素に影響を及ぼす要因について考察を加える。湖底付近における無機態窒素濃度の経年的な推移を図-8示す。ここで○印は実測値で、●印はECに対するT-N、 $\text{NH}_4\text{-N}$ の相関式からの推定値³⁾である。この図より湖底側のT-N、 $\text{NH}_4\text{-N}$ は、ともに増加傾向にある。 $\text{NO}_3\text{-N}$ は夏期の湖底では脱窒作用により減少するものであるが、しかし93年から95年の夏期において一時的に増加が認められ、この時期に何らかの負荷があったと思われる。また日降雨量の推移と $\text{NO}_3\text{-N}$ の推移の関係を図-9に示す。93年から95年の夏期の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度が高いものは、それ以前の100mm程度の降雨に関係するものと推定される。96年以降は降雨との関係は明確ではない。また95年夏期の出水末期の調査⁴⁾によると成層の安定期の湖底において高濃度の濁度が検出されており、出水による沈降性物質の流下が推定される。これより降雨による土砂が湖内に流送・沈降して、 $\text{NO}_3\text{-N}$ が発現したものと推定される。以下では、降雨による $\text{NO}_3\text{-N}$ の発現量について検討を行う。

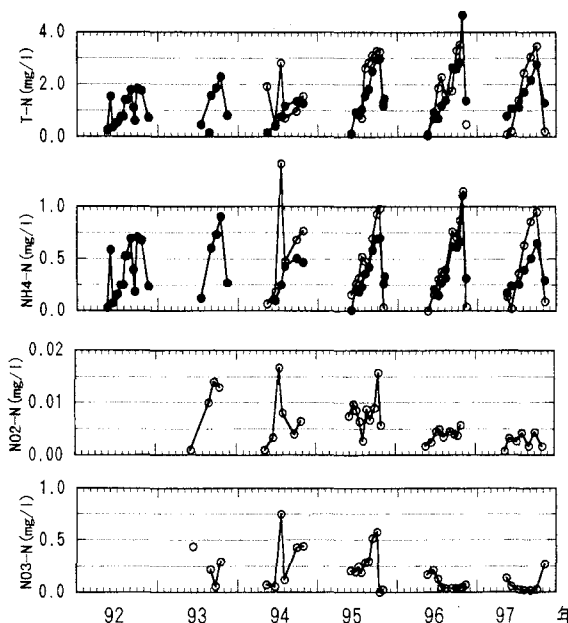


図-8 湖底付近における無機態窒素の推移

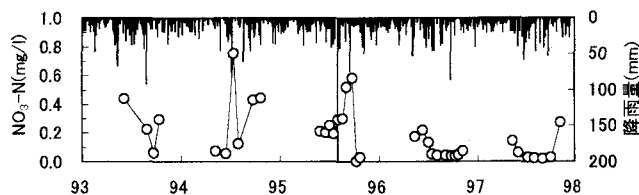


図-9 日降雨量と $\text{NO}_3\text{-N}$ の推移図

7. 深水層の $\text{NO}_3\text{-N}$ と2日累加降水量に関する検討

成層期の湖底付近における $\text{NO}_3\text{-N}$ と調査日から逆のぼった2日累加降水量の最大値の関係を図-10示す。図中の

波線は循環期における $\text{NO}_3\text{-N}$ の平均濃度であり、この波線より上部に着目する。2 日前の相関は見られないが、14 日前以前では、降雨に相関関係が見られている。 $\text{NO}_3\text{-N}$ の発現が降雨によるものであれば、相関を上回る値は生じないことから、31 日前の関係を最適降雨とした。これより下式を導いた。

$$f_{\text{NO}_3} = 0.0322(W_{2\text{day}})^{0.731} \quad (1)$$

ここで f_{NO_3} :湖底における $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度、 $W_{2\text{day}}$:調査日から 31 日前までの 2 日累計降雨量の最大値である。この直線を下回る値は経過日数に依存しており、降雨によって発現したものが、その後の脱窒により減少したことによる減衰量として考えられる。計測日の濃度と最適量との割合を $\text{NO}_3\text{-N}$ 残存率とした。図-11 に 31 日以前の $\text{NO}_3\text{-N}$ 残存率と経過日数の関係を示す。図中の実線は降雨日からの経過日数が残存率に対して有意な関係があるものとして式(2)を与えた。

$$\frac{f_{\text{NO}_3}}{(f_{\text{NO}_3})_0} = e^{-0.0391d} \quad (2)$$

ここで f_{NO_3} :湖底における $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度、 $(f_{\text{NO}_3})_0$:最適降雨(式(1))から求めた $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度、 d :降雨日からの経過日数である。成層期において降雨によって湖底付近に $\text{NO}_3\text{-N}$ が流入し時間を経て脱窒作用により $\text{NO}_3\text{-N}$ が減衰したとすれば、式(2)における減衰係数はこの湖における脱窒速度であると考えられる。図-12 に(2)式より算出した推定値と実測値の比較を示す。95 年以降は計算値が過大評価となっており、開発後の植生回復により降雨に伴う夏期の湖底への硝酸負荷が減少したことが推定される。

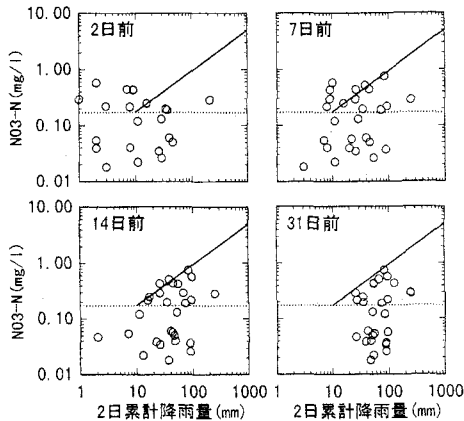


図-10 $\text{NO}_3\text{-N}$ と 2 日累加降水量の関係

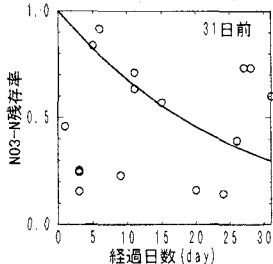


図-11 $\text{NO}_3\text{-N}$ 残存率と経過日数の関係

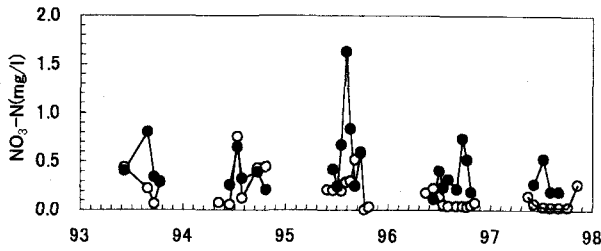


図-12 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の推定値と実測値の比較

8. 小野川湖における熱収支の検討

これまで述べたように、小野川湖の深水層に負荷特性の変化が認められたが、表層においては例年特に大きな差異は見られてない。また水温構造は例年同様である。以下では熱収支の観点から検討を加える。1998 年 6 月から 12 月までの水面における各推定熱量を図-13 に示す。水面における熱収支量は(3)式で与えられる⁶⁾。

$$Q_T' = Q_S + Q_R + Q_H + Q_{LE} \quad (3)$$

ここで Q_S :短波放射による有効日射量、 Q_R :長波放射量、 Q_H :顕熱輸送量、 Q_{LE} :潜熱輸送量である。

この図より、顕熱量、潜熱量は季節を通じてみても非常に小さな値であり、ほぼ同程度の熱量を有している。また、短波放射量の多い夏期において熱収支量は増加しており、水温成層の崩壊が始まる 10 月頃から有効短波放射量の減少と共に熱収支量は負の値を示している。水面における熱収支量においては有効短波放射による加熱と長波放射量が支配的な要因となっている。

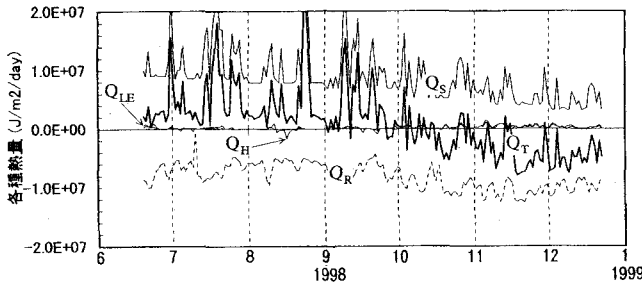


図-13 水面における各推定熱量

また、小野川湖においては貯水容量に対して流入・流出量が非常に多いことから、これにともなって移流が生じる。この移流熱は大変大きいことが予想される。移流熱⁷⁾を(4)式によって求める。

$$Q_A = C \cdot \rho \frac{(T_w \cdot Q)_{in} - (T_w \cdot Q)_{out}}{S_0} \quad (4)$$

ここで、 T_w :水温、 Q :流量、 S_0 :表面積、括弧の添字 in, out は流入・流出を示す。

移流熱がある湖の熱収支式⁷⁾は(5)式ようになる。

$$Q_T = Q_S + Q_R + Q_H + Q_{LE} + Q_A \quad (5)$$

対象時期の流入河川の水温は測定していないために、94年に行った流入河川の水温と気温のデータを用いて相関式を求めて、気温から水温を算定して流入熱量を求めた^{8)~9)}。流入熱量と湖内の熱量との関係を図-14に示す。松原湖からのものを細い実線で小野川・中ノ沢川を波線でまた湖内熱量を太線で示す。この図より自然流域河川からの熱量は負の値を示し非常に小さいことがわかる。また松原湖の湖水を流下する松原川・新川は大きな熱量を有している。この時期、松原川・新川は松原湖に貯留された水が流下するために自然河川である小野川・中ノ沢川に比べ水温が高いことと流入量が多いことによって。また移流熱と湖内の熱量及び水面熱収支の関係を図-15に示す。この図より、この時期における湖内熱量の約7割程度が移流熱によってもたらされている。また8月の平均移流熱は 2.5×10^6 (J/m²/day)であり平均水面熱収支量 4.4×10^6 (J/m²/day)の約半分の熱量を有している。これより湖内の熱量は流入・流出に伴う移流熱の効果が大きく、夏期においては松原湖からの流入熱量が大きく表層の水質は松原湖の水質が強く関係しており、また深水層においては自然流域河川からの負荷が水質の決定的な要因となっている。このことによって、回転率の大きな小野川湖においても例年、明瞭な水温成層を形成することを示した。以上のことにより、水温構造と水質予測モデルを構築するためには移流熱を加味する必要がある。

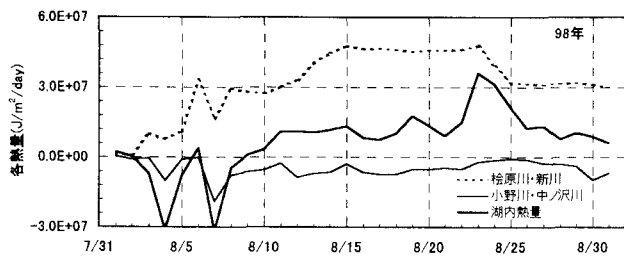


図-14 流入河川熱量と湖内熱量の関係

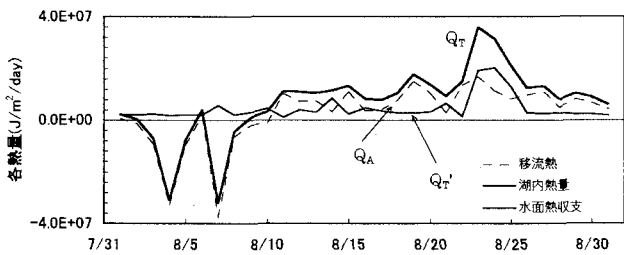


図-15 移流熱量と湖内熱量及び水面熱収支の関係

9. おわりに

本研究における主要な結論を以下に要約する。

- (1) 裏磐梯三湖の表層水質は窒素とリンにおいて平成2以降漸増傾向にある。最上流の松原湖とその下流の小野川湖の水質は、ほぼ同様な推移を示す。CODはリン濃度に依存して変化しており最下流の秋元湖はリン濃度が高く、N/P比の変化が大きくその値が低い時、CODは大きく増加する。
- (2) 小野川湖最深部における水温と水質の長期観測により、流動層の水温は例年同様な推移を示すものの、最深部においては過去10年間に於いて負荷特性が変化したことを示した。流域の開発による負荷の影響は植生が回復する間、5年程度を要する。またこの間、流域からの深水層への負荷は硝酸として供給された。
- (3) 降雨による湖底付近の硝酸の最適発現量を求めて、経過日数に対応した減衰量を求めて脱窒速度に関する減衰係数を算出した。
- (4) 小野川湖の水温成層は上流の松原湖からの移流熱によって促進され荒天に伴う擾乱にも早い回復をうながす。一方、成層期の深水層の水質は自然流域からの流入に依存している。
- (5) これらのことにより、本湖における水質予測モデルには移流熱を考慮した検討が必須である。

謝辞：本研究の遂行にあたっては平成13年度工学部海外学術交流資金及び日本大学国際総合研究の援助を受けた。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 若狭・長林・木村：小野川湖における負荷特性と水質特性の検討，水工学論文集，第40巻，pp.39-44，1996。
- 2) 若狭・長林・木村：小野川湖における内部負荷特性の検討，東北災害科学研究，第32巻，pp.177-181，1996。
- 3) 長林・木村・藤木：小野川湖における水質特性の推移に関する検討，東北地域災害科学研究，第34巻，pp.89-95，1998。
- 4) 榎本・長林・木村：小野川湖における流動パターンと出水末期の水質特性に関する検討，水工学論文集，第40巻，pp.45-50，1996。
- 5) 岩佐 義郎：湖沼工学，山海堂，p224，1992。
- 6) Y. SATOH, S. NAKAMURA, K. KATO & H. SAGISAKA: Distribution of Some Physicochemical parameters and Trophic Status of Lake Onogawa, THE JAPANESE JOURNAL OF LIMNOLOGY. Vol. 57, No. 2, pp. 145-152, 1996
- 7) 新井 正・西沢 利栄：水温論，共立出版，pp.154-155，1974。
- 8) 小川・長林：小野川湖における熱収支に関する検討，第54回学術講演会，第54巻，pp.714-715，1999。
- 8) 小川・長林：平成10年8月集中豪雨による小野川湖の水温成層の崩壊・回復過程の検討，東北災害科学研究，第36巻，pp.173-176，1999。

(2001. 10. 1受付)