

猪苗代湖における pH の長期的推移に関する検討

LONG TERM pH TRANSITION IN THE LAKE INAWASHIRO

長林久夫¹, 平山和雄², 山田泰正³

Hisao NAGABAYASHI, Kazuo HIRAYAMA and Yasumasa YAMADA

¹正会員 博士(工学) 日本大学教授 工学部土木工学科 (〒963-8642 郡山市田村町徳定字中河原1)

²非会員 工博 日本大学教授 工学部物質化学工学科 (〒963-8642 郡山市田村町徳定字中河原1)

³正会員 博士(工学) 日本大学 PD 研究員 工学部土木工学科 (〒963-8642 郡山市田村町徳定字中河原1)

The scenario of the long term pH transition in the Lake Inawashiro was discussed from the field observations and simulated analysis. The complete mixing model on mass conservation based on ion balance of the lake was build by the field data. From the analysis on thirty-five years, it was concluded that the increase of pH was caused by two categories: the first one is the former period until 1998 that was affected by increase of precipitation due to the climatic change in the basin; the second is the period after 1998 that caused rapid neutralization, affected by the imbalance phenomenon of the total hydrogen ions (H^+) which decreased by 8% in sulfuric ions (SO_4^{2-}) from the basin.

Key Words: climate change, long term transition, increased of pH, The Lake Inawashiro

1. はじめに

猪苗代湖は磐梯朝日国立公園に位置し、長瀬川水系上流の桧原湖、小野川湖、秋元湖及び湖周辺流域からの中性河川の流入と、長瀬川左支川、酸川上流の硫黄川から発生する強酸性水の流入により、通年 pH5 前後の硫酸酸性の栄養状態となっていた。1936 年の吉村の観測によれば夏季水温成層時の表層で 4.7 の pH が報告¹⁾されている。しかし、近年の 20 年間に於いて pH の上昇が見られ、1993 年からは湖岸付近において植物性の黒色浮遊物の発生が報告²⁾され、また、2000 年以降には pH の急激な上昇が見られ、現在 pH は 6.5 程度³⁾まで上昇している。湖水の水質は酸栄養のために化学的酸素要求量 (COD) の値が低く、平成 17 年度まで 4 年間連続で水質日本一であった。しかし、平成 18 年度調査において湖心で一時的に大腸菌群数が基準値を超過したために、環境省発表の COD 濃度の順位がランク外⁴⁾となった。このまま湖の中性化が進行した場合、化学的・生物学的な環境変化が水質へ悪影響を及ぼすことが危惧されており、その原因究明と対策は急務である。また、屈斜路湖においても 1988 年から 1992 年にかけて pH が約 5.0 から 6.5 に上昇し、また過去においても中性化したことが報告⁵⁾されており、酸収支の解明が急がれている。

本研究は猪苗代湖における pH の長期的推移の機

構を検討するために、現地調査と福島県による調査結果をもとに猪苗代流域における水収支と各種イオン負荷量との関係を検討し、さらに、水収支とイオン収支に基づく pH の計算モデルを作成して 35 年間にわたる pH の推移を推定し、pH 上昇に及ぼす要因の検討と近年の pH の急激な上昇に関するシナリオの検討を行った。

2. 流域の概要及び現地調査

(1) 流域及び湖沼の概要

猪苗代湖は最大水深 93.5m、水面積 103.3km²であり、日本 4 位の水面積を有し、流域面積は約 820.2km²である。図-1 に猪苗代湖の流域概要図を示す。猪苗代湖に流入する主な河川は 7 河川あり、年間の総流入量はおよそ 12 億 m³である。そのうち長瀬川は猪苗代湖の総流入量の約 50%を占めており、他の主な河川は流域面積約 300km²の周辺流域の 6 河川である。流出は北西部の小石浜水門から通じる日橋川と北東部の安積疏水及び郡山市の水道用水の取水口であり、安積疏水の許可取水量は灌漑期で約 15.67 m³/s、非灌漑期では 1.28m³/s⁶⁾である。

猪苗代湖は、旧硫黄鉱山⁷⁾の廃鉱口からの強酸性の温泉水と地下水が長瀬川を通じて流入するために、通年 pH5 程度の酸性を示していた。また、鉄イオン

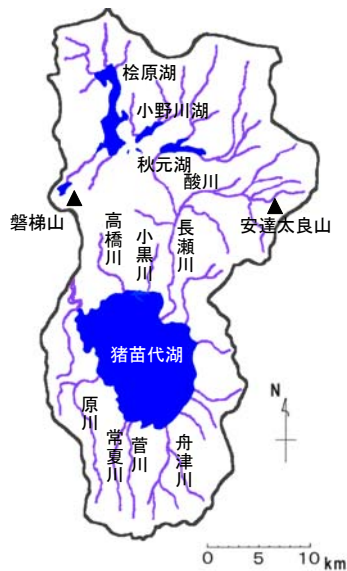


図-1 猪苗代湖流域概要図

やアルミニウムイオンの濃度が高いことから、長瀬川からの流入水が猪苗代湖で中和される過程でこれらのイオンと有機性汚濁成分やリンが吸着、結合して湖底に沈殿する自然の浄化機構となっている⁴⁾。

(2) 現地調査

猪苗代湖におけるイオンバランスを検討するために採水による各種イオン濃度と金属元素及び流量観測を行った。現地調査は2000年から2006年の間に実施し、計測地点は強酸性水が流出する安達太良山中腹の硫黄川の源泉部と下流の酸川（湯川橋、酸川野橋）、酸川合流後の長瀬川下流においては沼の倉橋、長瀬橋、猪苗代大橋、小金橋の計7地点及び猪苗代湖内である。さらに猪苗代湖への主要な流入河川である船津川、菅川、常夏川、原川、高橋川、小黒川においても実施している。

採水は高感度イオンクロマトグラフィ（日立製作所）から陰イオン、陽イオンを、ホリバ D24 から pH を測定した。さらに、資料水に含有される金属元素濃度を誘導結合プラズマ発光分光分析装置（ICP-AES Optima4300DV Perkin Elmer）により分析している。

3. 猪苗代流域における水収支及び各種イオン負荷収支検討

(1) 水収支の検討

猪苗代湖の pH の推移を検討するために流域における水収支について検討する。図-2 に猪苗代湖の pH の年平均値の推移^{3),9)}を示す。1985年から1995年の間は pH が4.8から5.2程度と漸増している。しかし、1996年より急激な pH の上昇が認められており、特に2000年以降の pH 上昇は顕著である。本流域における年降水量の推移を図-3に示す。関係する雨量観測点は桧原、猪苗代、吾妻山、

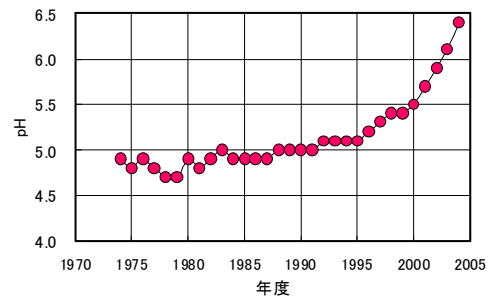


図-2 猪苗代湖湖心における pH の推移

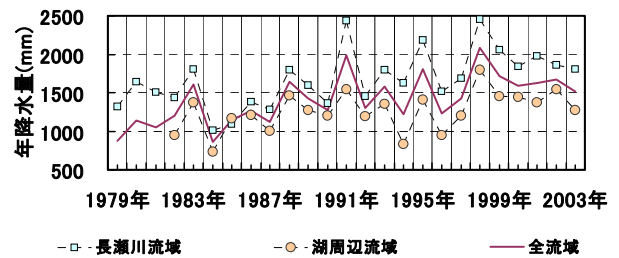


図-3 猪苗代流域における降水量の推移

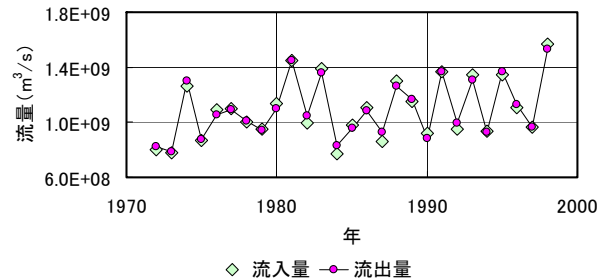


図-4 猪苗代湖における流入流出量の推移

鷲倉、湖南、長沼、若松の7観測所であり、対象流域における流域面積と支配率をテューセン法により算出し、流域の降水量を求めている。ちなみに全流域に対する各観測所の支配率はそれぞれの観測所においてそれぞれ0.1985, 0.3217, 0.0227, 0.1672, 0.2806, 0.0047, 0.0047であり、猪苗代観測所と鷲倉観測所における降雨の影響が強い。長瀬川流域は湖周辺流域を除いた流域における降水量であり、湖周辺流域の約1.5倍程度降水量が多い。各流域ともに1980年から1997年までは降水量が漸増傾向にあり、この期間の増加量は約1.6倍である。また、図-4は猪苗代湖における年間の総流入、流出量の推移であり、年間変動はあるものの、降水量と同様に漸増傾向にある。また、福島県の酸性雨は18年度、19年度でそれぞれ4.8, 4.9と報告⁹⁾されているが、降水量増加による上流湖沼群の pH の変化は報告されていないことから、流域の pH の緩衝作用が期待され、降水量増大は猪苗代湖の pH への希釈効果をもたらすことが予測される。

(2) 流域におけるイオン負荷量の検討

水収支と同様に猪苗代湖に流下する河川のイオン負荷量を把握することは、湖内のイオンバランスを検討する

上で重要である。

図-5 に猪苗代湖流域における主要河川のイオンの負荷流量 (L - Q) 関係の一例を示す。図より、ナトリウムイオン (Na^{2+}) を除いて、源流部 (源泉①, ②, 沢, 源泉下流), 酸川・長瀬川 (湯川橋, 酸川野, 西館橋, 小金橋), 湖周辺流域 (小黒川, 高橋川, 船津川, 菅川, 常夏川, 原川) において、それぞれの流域の特性が明確に区分されている。源流部は流量は少ないものの各イオンは高い負荷量を示しており、温泉水に含有されるイオン負荷量は多い。源流からの流下に伴い、中性の河川水と混合希釈されて、沢と酸川・長瀬川で一つの L - Q 関係を示している。さらに、湖周辺の河川では流量が小さい場合の各種イオン負荷量は低いが、流量増加につれて急増する関係が得られており、中性河川と酸性河川の違いが認められる。硫酸イオンの特性は他のイオンとは異なっており、負荷量が $1000g/s$ 程度になると、流量に対するイオンの増加傾向は見られなくなり、ほぼ一定量となっている。図-6 に長瀬川本川の酸川野、河口部付近の小金橋、その中間点の沼ノ倉における硫酸イオン負荷量と流量の関係を示す。上流から下流に向う L - Q 関係が平行に移動しており、この間、流域からの大きな硫酸負荷の流入はなく、

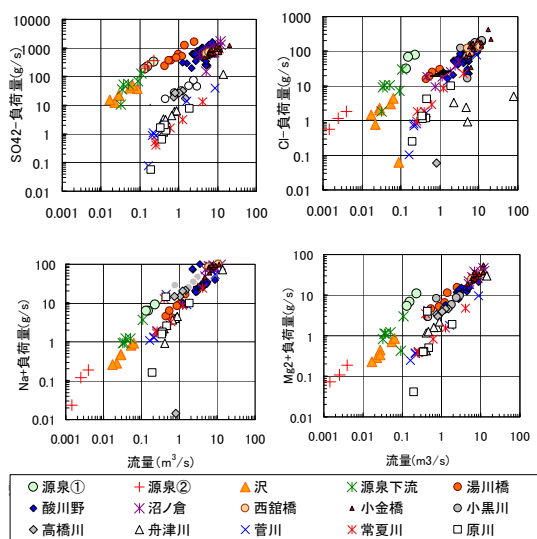


図-5 流域の主要河川におけるイオン負荷量の検討

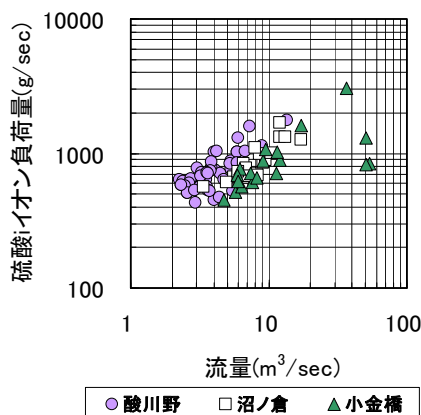


図-6 長瀬川における硫酸イオン負荷量の検討

同日においては同じ負荷量が下流へ輸送されることを示している。さらに、負荷量が $1000g/s$ を超えると、その値はほぼ一定となる。

4. 長瀬川及び猪苗代湖におけるイオンバランスの検討

(1) 長瀬川及び猪苗代湖におけるイオン負荷モデルの検討

図-5 に示すように湖内 pH に影響を及ぼすイオンとしては強酸としての硫酸イオンと塩素イオンの負荷が大きく、陽イオンとしてはカルシウム、ナトリウム、マグネシウム、カリウムの順に負荷が低くなる。以下では、猪苗代湖内におけるイオンバランスの検討をもとに湖内 pH 負荷モデルの検討を行う。

図-7 に本測定^{10),11)}と福島県の測定^{8),13)}による長瀬川、猪苗代湖内の硫酸イオンに対する各種イオンの濃度比率の関係を示す。可能な限り多くのデータを収録したために測定日は不定期である。横軸に硫酸イオン濃度を示している。硫酸イオン濃度が $40mg/l$ 以下は猪苗代湖内の値であり、各イオン共に硫酸イオン濃度の低下に伴うなめらかな増加関係を示している。図中の関数式は湖内のイオンバランスに主眼を置いており $40mg/l$ 以下の濃度比率が表現可能となる様に与えている。これにより、硫酸濃度に対する各種イオン濃度比率の関数化が可能となる。

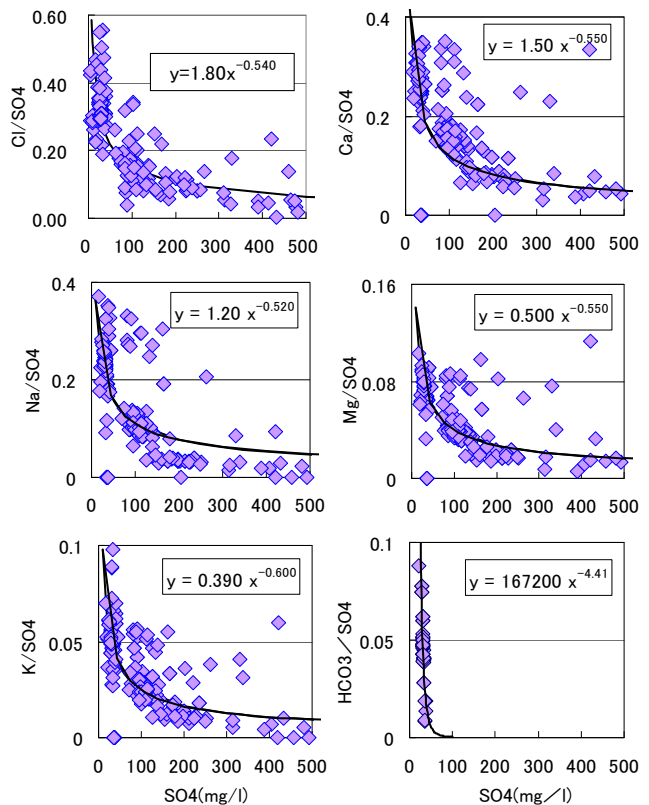


図-7 長瀬川及び湖内における硫酸イオンに対する各種イオン濃度の検討

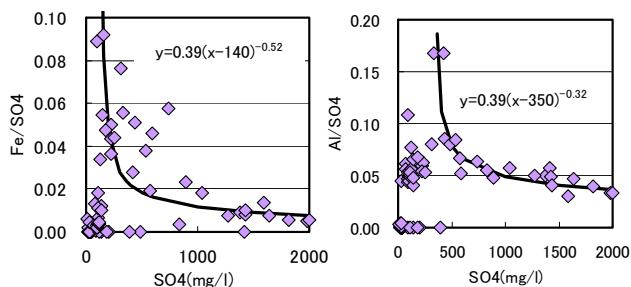


図-8 硫酸イオンに対するFeイオンとAlイオンの関係

一方、強酸性区間においては河床礫等からの鉄 (Fe) やアルミニウム (Al) の溶出が確認¹⁴⁾されている。図-8に硫酸イオンに対するFeイオンとAlイオンの比率を示す。これらのイオンは強酸性水中においては礫からの溶出が大きく、藤田・中村¹⁵⁾によればAlは約 $0.8\text{g/m}^2 \cdot \text{日}$ 、Feは約 $0.5\text{g/m}^2 \cdot \text{日}$ 、Caは約 $0.4\text{g/m}^2 \cdot \text{日}$ であることが指摘されている。硫酸濃度の高い範囲においてAl濃度の比率がFe濃度の比率に比べて高いことはこの溶出速度の差によっている。また、流下とともに硫酸イオンが中性の河川水によって希釈され、相対的に増加したイオン比率は、Alは 350mg/l 程度、Feは 140mg/l 程度から急激に減少している。このことは、pHの上昇に伴う長瀬川におけるリン除去機構に関係する凝集塊(フロック)の生成に依存している。硫黄川の強酸性水を検水として水酸化ナトリウム液によるpH調整を行った結果、pH値が4～6において凝集塊の生成¹⁵⁾が認められている。この凝集塊成分中のイオン濃度はFeが71.4%、Alが10.8%、Sが10.2%、Siが4.0%であった。さらに、析出したFeはpHが4程度の酸川野下流の河床礫に酸化第2鉄として付着しており、流下にとまらう硫酸イオンの減少に対して鉄イオンの減少率が大きい。

(2) 硫酸イオンに対する各種イオンのイオンバランスの検討

硫酸イオンの定量による試料水のpHの推定を試みる。実測値によると $[\text{SO}_4^{2-}] = 100\text{mg/l}$ のとき、2004年6月26日長瀬川のpHは3.56程度である。このとき硫酸イオンのモル濃度はモル質量が 96g/mol であるので、 $\text{SO}_4^{2-} = 1.04 \times 10^{-3}\text{mol/l}$ となる。 H_2SO_4 が 2H^+ と SO_4^{2-} の完全解離とすると、 $[\text{H}^+] = 2[\text{SO}_4^{2-}] = 2.08 \times 10^{-3}\text{mol/l}$ であり、 $\text{pH} = -\log [\text{H}^+] = 2.68$ と算定できる。同様に硫酸イオンに対して各種イオンが完全解離した場合の中和式によるpHの推定式を式(1)に示す。

$$\text{pH} = -\log \left(\frac{2[\text{SO}_4^{2-}]}{96} + \frac{[\text{Cl}^-]}{35.5} + \frac{[\text{HCO}_3^-]}{61} - \frac{2[\text{Ca}_2^+]}{40} - \frac{[\text{Na}^+]}{23} - \frac{2[\text{Mg}_2^+]}{24} - \frac{[\text{K}^+]}{39} \right) \times 10^{-3} \quad (1)$$

式(1)に図-7に示す、硫酸イオン濃度に対する各種イオンの関係式を代入することによって、硫酸イオンとpHと

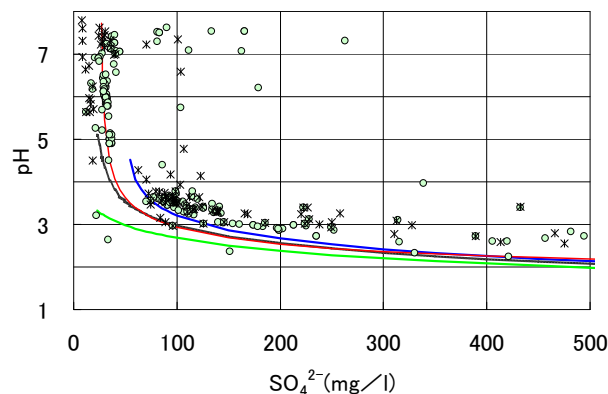


図-9 イオン収支にもとづく長瀬川、猪苗代湖のpH推定式

の関係式が得られる。図-9に硫酸イオンに対するpHの関係を示す。図中の実線は各種イオンを考慮した場合の計算値である。中和線(SO_4)は硫酸イオン H_2SO_4 が 2H^+ と SO_4^{2-} に完全解離した場合の推定式であり、硫酸イオンが 20mg/l でpHは3.7程度となる。さらに、 SO_4 、Ca、Na、K、Mgイオンまでを考慮した場合は硫酸イオンが 65mg/l でpHは4.7程度となり、この値より低い硫酸濃度についての計算値は負となりpHが計算不能となる。さらに、塩素イオンと重炭酸イオンまで考慮したものは、硫酸イオン濃度が 40mg/l 以下の湖内の実測地の値に近づいている。pHに対する重炭酸イオンの寄与は硫酸濃度 30mg/l 以下で塩素イオンより大きくなるのが計算から求められた。しかし、これらの計算値と実測値の間には系統的な差異が認められるが、この点に関してはイオン収支の検討をさらに進める必要がある。従って、以下の検討では湖内分布を表現できる推定式(2)を与えて硫酸イオン濃度からpHを算定した。

$$\text{pH} = 6.19(\text{SO}_4^{2-} - 26.5)^{-0.283} + 1.1 \quad (2)$$

5. 湖内pH推定モデルの検討

(1) 湖内のpH特性の検討

猪苗代湖におけるpH計算モデル構築には水収支に加えてイオン流入出負荷量の算定と湖内におけるイオンの混合モデルの検討が必要となる。図-10に福島県による湖内を網羅した10計測点の2002年のpH鉛直分布¹²⁾を示す。湖の南部をNo.1として反時計まわりに測点を与えた。図中のNo.5は湖心であり、最大水深 90m である。No.9は長瀬川河口部付近の延長上の計測点で水深は約 50m である。また、No.10より北東部は浅瀬が広がっており、水深数メートルとなっている。7月の計測においては、表層付近においてpHは6.5であり、水深 10m のpHは5.5程度となっている。この時期は水温成層の形成期であり表層付近において河川水との混合希釈が見られ、酸性水が流

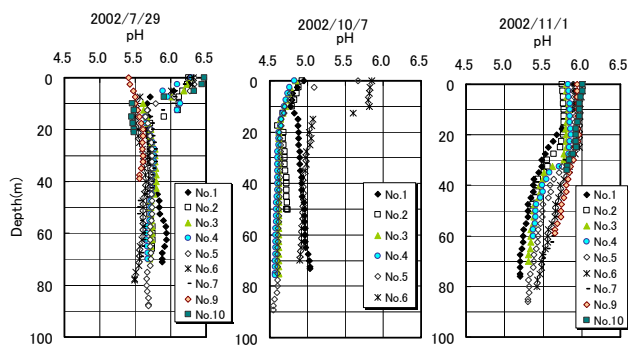


図-10 pHの湖内空間分布

入する長瀬川河口付近の No.9 の計測点の表層 pH は 5.3 と低い。11 月の計測では各測点の分布は類似しており、表層から深度 30m まで pH は一様であり、それ以深 60m 程度まで pH5.3 に向かって低下している。長瀬川河口に近い測線の表層付近は異なる鉛直分布をとることが多いが、他の測線の分布は比較的類似しており、卓越した水平混合が示唆される。猪苗代湖の流動に関して宮村・文屋ら¹⁶⁾は有限要素メッシュを持つ浅水流方程式による計算モデルを開発して、猪苗代湖に適用して水温成層のない場合の解析を行い、河川流に比べて吹送流の湖流への寄与は大きく、平均風速 2m/s 程度の風でも 30 日程度で湖内全面に渡る循環流が形成されることを示した。さらに、宮村・長林ら¹⁷⁾は猪苗代湖の 4 月と 10 月における湖流の実測値と吹送流の計算値との比較を行い、3m/s の北西の吹送流を継続的に与えた場合、水温成層の有無によって循環流のセル構造が異なること。さらに、この循環流は 20 日程度で形成することを示した。

(2) 湖内 pH 計算モデルの検討

猪苗代湖の pH を水収支とイオンバランスによって決まるものと考え、各種イオンは水温成層上部の混合層において完全混合するものと仮定した。福島県の計測⁸⁾による湖心 pH の深度 10m, 20m, 50m に対応した 10 年間の分布は、12 月から 5 月までは深度による pH の値に大きな差異はなく、ほぼ一様に混合しており、水温成層期には深度による差異が生じる。これより、7 月から 10 月までは表層から 20m までを一応混合層とし、12 月から 6 月までは 50m まで混合^{10),11)}するものとした。水温成層の形成期と循環期の間はこれらの期間を直線的に変化させた。

pH 計算モデルを式(3)、(4)に示す。式(3)是水収支式であり、式(4)は湖内における硫酸イオン負荷の収支式である。これらは交換層内において日単位で収支するものと仮定している。式(4)の右辺第 1 項は長瀬川からの流入負荷であり、負荷量を日量一定として与えている。右辺第 2 項は湖への酸性雨の直接降雨による負荷量である。また、交換層以深の硫酸濃度は変化しないものとしている。さらに、式(2)から硫酸濃度に対する pH を求めることができる。なお計算に使用した湖の流入流出流量は 1998 年ま

では東京電力の運用データを、それ以降は福島県によるものを使用している。これらは利水流量と湖面水位から換算されており、蒸発散量は除かれている。これより、湖への硫酸負荷量を仮定して、酸性雨による湖への負荷を与えれば湖の pH が算出される。

$$\frac{dV}{dt} = Q_{in} + RA_s - Q_{out} \quad (3)$$

$$\frac{dVS}{dt} = Q_{Nin}S_{in} + L_R - Q_{out}S \quad (4)$$

ここで、V: 混合層の体積、S: 湖内硫酸イオン濃度、 Q_{Nin} : 長瀬川流入流量、 Q_{out} : 流出負荷量、 S_{in} : 流入硫酸イオン濃度、 L_R : 湖への酸性雨負荷量、 Q_{in} : 流入水量、 R : 湖への直接降雨、 A_s : 湖表面積である。

(3) 猪苗代湖における pH 上昇のシナリオ

計算時間間隔を 1 日単位とし、流域からの硫酸イオンの負荷量を実測値の pH 分布に適合するように日量 1080g/s とした計算結果の一例を図-11 に示す。結果は実測値を 2000 年あたりまでは表現しているが、水収支のみでは 2000 年以降の pH の急激な上昇は再現されていない。また、降雨時には pH 値が 6.0 を超えるケースが多くなっており、実測値との乖離が大きくなっている。この計算では酸性雨の効果は加味していない。図-12 に酸性雨の pH を 4.8 の一定値とし、さらに、1998 年頃から源泉の水温が 10℃程度増加¹³⁾していることを受けて硫酸負荷量にも何らかの変化があるものとして、実測に合うように硫酸負荷量を 1998 年から年間 8% 減少させた結果を示す。このときの硫酸負荷量は 942g/s であり、実測の平均負荷量の 980g/s に近い値であった。結果は 10m と 50m を表示

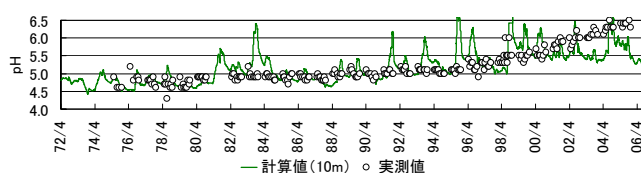


図-11 湖内 pH の長期的推移の検討（酸性雨考慮せず、硫酸負荷量 1080g/s）

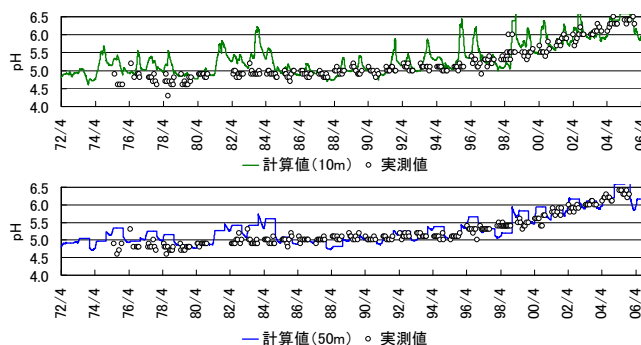


図-12 湖内 pH の長期的推移の検討（酸性雨 pH=4.8、硫酸負荷量 942g/s、1998 年以降 8%硫酸負荷量減少）

しており、長期的な推移によく対応している。

温泉源泉の温度上昇と硫酸イオンやその他イオンの変化及び長瀬川における pH の変化について県は検討^{13),18)}を行い、長瀬川の酸川野と小金橋の低水時における pH の上昇を 1995 年から確認している。さらに、酸川における 1980 年からの 3 年間と 2001 年、2006 年の 2 年間の測定値を比較し、Fe イオンの負荷量は 15%、Al イオンの負荷量は約 35%減少したとしている。また、猪苗代湖の硫酸イオン濃度を 2001 年から 2006 年の酸川野における L-Q 式により推定した結果、2000 年以前の湖の硫酸イオン濃度は L-Q 式を 5%増加することにより再現できる¹⁸⁾ことを示した。さらに、源流部における硫酸イオン負荷量の減少と湖内の硫酸濃度変化に差異があるため、源流部における負荷減少だけでなく、鉍酸酸度の減少や流程における中和反応の変化等の要因を考慮する必要性¹⁸⁾を指摘している。本モデルでは湖のイオン収支として各種イオンを硫酸イオンに換算して pH 推定式を用いて、硫酸負荷を日量一定とした計算としている。しかし、環境変化に伴う各種イオンの負荷量の変化や鉍酸酸度の変化を加味するためには、各河川における負荷流量関係の詳細な検討が必要であり、さらなる検討を要する。そして、1998 年以降の pH の急激な上昇は水収支からのみでは説明できず、流域におけるイオン収支の変化に加えて水生植物の繁茂による水酸イオンの増加を含むその他の環境変化の要因についてもさらに検討を行う必要がある。

6. おわりに

猪苗代湖の pH 上昇に関して、流域のイオン負荷モデルの検討と、水温成層を考慮した簡易的な pH 計算モデルをもとに、pH 上昇の要因の検討を行った。本研究における主要な成果を要約する。

- (1) 流域におけるイオン負荷収支の検討を行い、流量酸イオン濃度に対する湖の pH 推定式を得た。
- (2) 硫酸イオン負荷量を日量一定として、湖内混合層内において日単位で完全混合する仮定により、35 年間に渡る pH の長期的推移を検討した。その結果、1980 年以降、1998 年までの pH 上昇は流域の降水量の増大に伴う湖の流入出量の増加による希釈効果が第 1 の要因であることを示した。
- (3) 1998 年以降の急激な pH の上昇は硫酸負荷量をこの期間から一律に 8%減少することで説明され、源泉の水温上昇に代表される自然起源の環境変化の要因の影響が大きいことを明らかにした。

湖における流入イオン負荷量を一定値とし、混合層内での完全混合を仮定したマクロモデルにおいては pH の短期的な変動に対する計算の応答が十分ではなかった。今後、さらに流入イオンの負荷変動及び湖内の物理的、生物学的、化学的機構を加味したモデルによる検討を必

要とする。

謝辞：研究の実施に当たり、福島県生活環境部及び福島県環境センター、(株)東京電力には、貴重なデータを提供して頂いた。また、本研究は日本大学工学部文部科学省学術フロンティア推進事業の一環として実施されたものである。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 吉村信吉：湖沼学(増補版)，p.428，生産技術センター新社（1976 年）（原本：昭和 1936 年）。
- 2) 福島県生活環境部：美しい猪苗代湖の将来に向けて（パンフレット）。
- 3) 猪苗代湖・裏磐梯湖沼群水環境保全対策促進協議会ホームページ，<http://www.ht-net21.ne.jp/~kosuikyo/>。
- 4) 猪苗代湖・裏磐梯湖沼群水環境保全対策促進協議会：湖未来通信，No.11，2008。
- 5) 田中 敦：屈斜路湖が自然に中性化した原因を探る，国立環境研究所ニュース 23（4）<http://www.nies.go.jp/kanko/news/23/23-4/23-4-03.html>。
- 6) 安積疎水土地改良区ホームページ，<http://asakasosui.jp/>。
- 7) 日本硫黄株式会社沼尻工業所：沼尻の思いで（昭和 40 年代）。
- 8) 福島県：福島県水質年報/昭和 55 年度～平成 18 年度，福島県生活環境部。
- 9) 福島県生活環境部：平成 19 年度酸性雨モニタリング調査結果，p.4，2008。
- 10) 長林・藤田：猪苗代湖における pH の推移に関する検討，東北地域災害研究第 36 巻，pp.135-140，2000。
- 11) H.NAGABAYASHI, et al: Simulated Analysis of Water Quality Transition in a Sulfuric-acid Lake, Proc. 13th IAHP-APD, Singapore, pp.931-935, 2006..
- 12) 福島県：平成 14 年から平成 18 年度猪苗代湖等水環境保全対策調査事業報告書。
- 13) 福島県：猪苗代湖水環境保全対策調査報告書，2007。
- 14) 藤田豊・中村玄正：猪苗代湖の水質制御に寄与する酸性河川長瀬川の凝集塊によるリン除去効果，水環境学会誌，Vol.30，No.4，pp.197-203，2007。
- 15) 藤田豊・中村玄正：猪苗代湖のリン除去に寄与する酸性河川長瀬川の凝集塊生成機構，水環境学会誌，Vol.30，No.4，pp.205-212，2007。
- 16) 宮村倫司，文屋信太郎，中林靖，吉村忍：猪苗代湖の吹送流及び河川流シミュレーション，日本シミュレーション学会誌，Vol.25，No.2，pp.48-57，2006。
- 17) 宮村倫司，長林久夫，山田隆盛，中嶋千穂子，菊池克彦：浅水長波方程式による猪苗代湖の吹送流シミュレーションと観測結果の比較，計算工学講演論文集，Vol.13，2008。
- 18) 福島県生活環境部環境保全領域水環境グループ：第 1 章猪苗代湖の水環境の現状と将来予測，「清らかな湖，美しい猪苗代湖の秘密を探る水環境研究誌」，pp.1-14，2008。

(2008. 9. 30 受付)