

<研究ノート>湯の湖の湖水の性質について

三瓶, 達成 / 新川, 幹郎 / SHINKAWA, Mikio / 小寺, 浩二 /
SANPEI, Tatsunari / KODERA, Koji

(出版者 / Publisher)

法政大学地理学会

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

JOURNAL of THE GEOGRAPHICAL SOCIETY OF HOSEI UNIVERSITY / 法政地理

(巻 / Volume)

27

(開始ページ / Start Page)

22

(終了ページ / End Page)

29

(発行年 / Year)

1998-03-21

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00025737>

湯の湖の湖水の性質について

三瓶達成・小寺浩二・新川幹郎

- | | |
|----------|-------------|
| I はじめに | IV 調査結果及び考際 |
| II 湯の湖概要 | V まとめ |
| III 調査方法 | VI おわりに |

キーワード：湯の湖，中禅寺湖，水質汚染，水温，電気伝導度，溶存酸素

I はじめに

奥日光中禅寺湖・湯の湖は、大谷川水系の上流に位置する湖である。湯の湖は最上流に位置するが、湖畔に温泉を湧出し古くから観光地となっているため、湖水の汚染が進んでいる。流出する水は湯川となり中禅寺湖へと流入しており、中禅寺湖に直接影響を与える湯の湖の富栄養化の問題はかつてから研究の対象とされてきた。

国包(1985)は、湯の湖からの流出口と中禅寺湖の流入口で調査を行った結果、中禅寺湖に至るまでのあいだに流量が2倍以上に増え、リンの値は3倍に増えると述べている。つまり、中禅寺湖の湖水の汚染の原因となるものは、湯の湖からの流出水に含まれるもののみではなく、戦場ヶ原を流下する間に増えるものについても考えなければならない。

そこで、中禅寺湖の汚染対策への基礎研究として、湯の湖から中禅寺湖にいたる全水域の調査を行っている。

ここでは、1997年5月から10月までに行った湯の湖、湯川、中禅寺湖の調査の中で、湯の湖において明らかになった点について報告する。

II 湯の湖概要

湯の湖は古くから多くの研究者達に注目され、調査・研究報告も多い。水温・湖盆形態などの研究としては、白石(1964)が、湯の湖における水産開発の基礎研究の中で湖盆の形態、風向と水温の関係と、湧水の分布、水温垂直分布などについて考察を行い、吹走流によって北と南で大きい時には3℃もの差があると述べている。

また、富栄養化についての研究としては、吉田(1964)が、生物に注目して動物プランクトンの量で諏訪湖以上の富栄養度であるとし、国包(1985)は、COD、T-P、T-Nなどから湯の湖への流入量、湯の湖からの流出量、中禅寺湖への流入量を昭和53年から58年まで調査した結果を示している。新井(1985)は、中禅寺湖から取水している上水道の異臭の原因となっている植物プランクトンである *Urogrena americana* が湯の湖起源の物であることを明らかにし、湯川からの流入水の中禅寺湖での動きから、上水道の異臭に対する対策を述べている。

中禅寺湖の集水面積は132.2km²で、そのうち18.2km²が湯の湖の集水面積となっている。湯の



図1 調査地域概略

湖から流出した水は湯滝となり湯川となって流れ、戦場ヶ原内を蛇行した後、竜頭の滝を通り中禅寺湖へと流入する。中禅寺湖の全流入量の中で湯川の占める割合は約28%と最大であり、COD・窒素・リンの含有量も最大の値を示す(新井1985)。

湯の湖では、湖の汚濁負荷量減少のために、下水道の高度処理施設を完備し、平成8年に湖底のヘドロの浚渫事業が終了したばかりである。その効果の程度も含め、過去の研究を参照しつつ、今回行った調査の結果を考察した上で、今後の湯の湖の水質汚染の可能性と対策を研究していくことは重要である。

III 調査方法

1996年の12月より予備調査としてのフィールドワークを開始し、5月下旬より本格的な定点観測と自記録計によるデータ収集を行った。

定点観測は、1/50000地形図および、1/12500の戦場ヶ原フィールドマップなどを使用し、フィールドの探索を行った上で、中禅寺湖湖上、湯川沿い、湯の湖湖上にポイントを定め、ほぼ月に一度のペースで観測を行った。

湯の湖における観測は、1997年5月25日、7月24日、8月8日、8月29日、9月20日、10月18日の6回行った。いずれも、各地点において、水温、電気伝導度の鉛直分布を測定し、9月からは、透明度、溶存酸素量の鉛直分布についても観測し

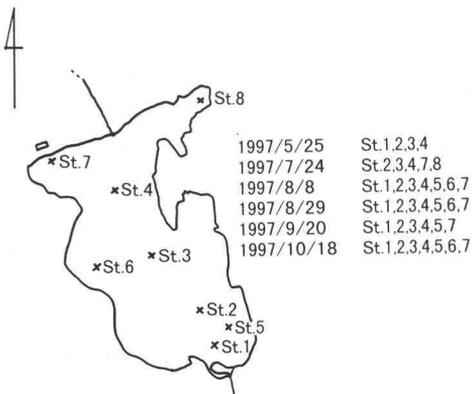


図2 観測地点及び観測日

た(図2)。なお、電気伝導度の値は全て25°C補正を行っている。また、湖水を持ち帰り水質の化学的分析も行った。

IV 調査結果及び考察

1. 水温と電気伝導度の観測結果

湯の湖の水温と電気伝導度の調査結果を鉛直プロフィールにして示す(図3)。まず湖水温について述べると、湯の湖は冬季ほぼ全面的に結氷する

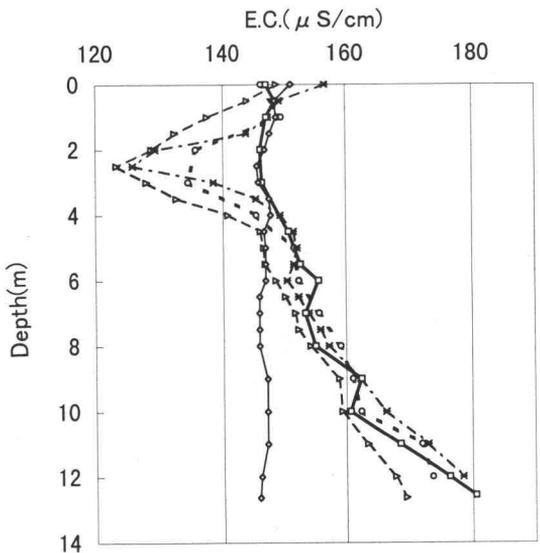
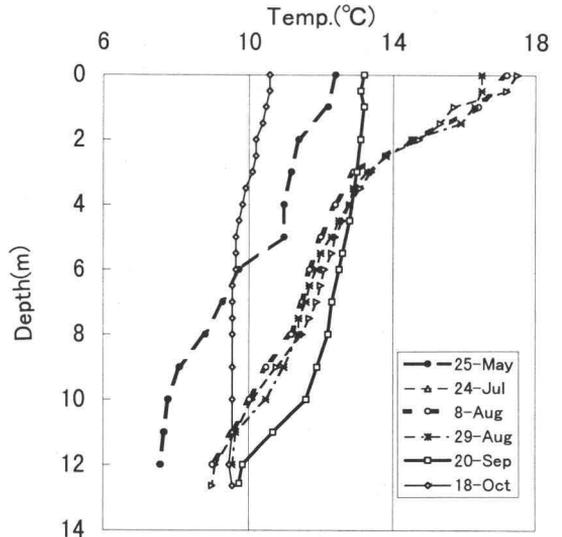


図3 水温と電気伝導度の鉛直分布 (St. 2)

が、湖岸近くで湧水の湧き出している場所は開水部となる。1997年2月にも、開水部の存在は確認できた。白石(1964)によると、3月~4月にこの水は解氷し、5月に入ると表面より成層し、7月末には完全な停滞期となり、表面水温は20°C前後になる。水深4mに大きな水温躍層ができる事が多く、10月中旬には完全に秋季循環期となるとされている。今回の調査においてもその傾向が見られる(図3)、St.2において、5月25日の時点ではまだはっきりしない水温躍層が、7月24日には1~2mの層に明らかに現れ、7月から8月までは同じような水温環境をなしている。その後、8月29日から9月20日、そして10月18日にかけて、水温躍層が消えていき、10月18日には10°C内外で全湖循環しているのが見てとれる。しかし、白石の述べる4m付近に見られていたはずの水温躍層は、今回の調査においては、さらに表面付近に見られた。水温躍層が上昇している原因としては、様々な事が考えられるが、電気伝導度の結果とあわせて後に述べたい。

次に電気伝導度の観測結果を述べる。電気伝導度のグラフからは、湯の湖の湖水の成層形態の特

異性が見られた(図4)。

まず、全ての観測ポイントにおいて、成層期の間、表層から水深4mの間に電気伝導度の低くなる層が見られる。

そして、水深が増すにつれて、電気伝導度は高くなっていく。この現象は、湖底にたまったヘドロの影響であると考えられる。一般に、栄養度の高い湖では湖底の溶存酸素量が不足しやすく、湖底にヘドロがたまりやすい。また、成層期には溶存酸素の不足から、酸素と結びついていた金属イオンや、硫化水素などが溶出するといわれている。そこで、8月28日に採水したSt.2における湖底の水と、表層水、そして処理場の排水口から20mほど離れた表層の水の化学的分析の結果を示す(表1、図5)。イオンバランスから見ると、湖内はほぼ等しくなるが、湖面よりも湖底のほうが硝酸態窒素の量は多くっており、その他のイオンの量も多くなっている。また、処理水が混ざっている処理場前の湖面では陰イオン陽イオンともに多く含む。湯の湖が全体的に SO_4^{2-} を多く含むのは、温泉地域の湖沼によく見られる特徴であり、特に温泉街からの排水の処理水に多く含まれ

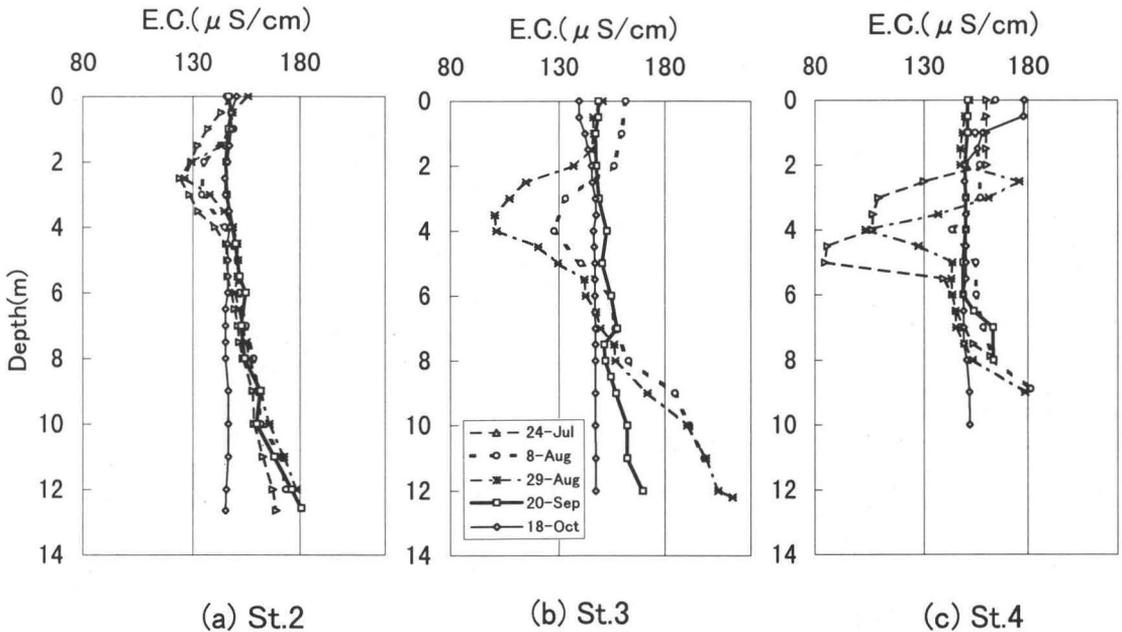


図4 電気伝導度の鉛直分布 (St. 2, 3, 4)

湯の湖の湖水の性質について

表 1 水質分析結果

単位：mg/l

	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
湯の湖 St. 2 湖面	10.40	1.45	12.65	1.95	34.06	3.30	0.23	30.99
湯の湖 St. 2 湖底	12.00	1.94	14.18	2.08	38.72	4.02	0.63	33.47
湯の湖 St. 7 (処理場沖20m湖面)	21.04	3.24	22.16	2.15	33.08	14.58	0.95	54.18

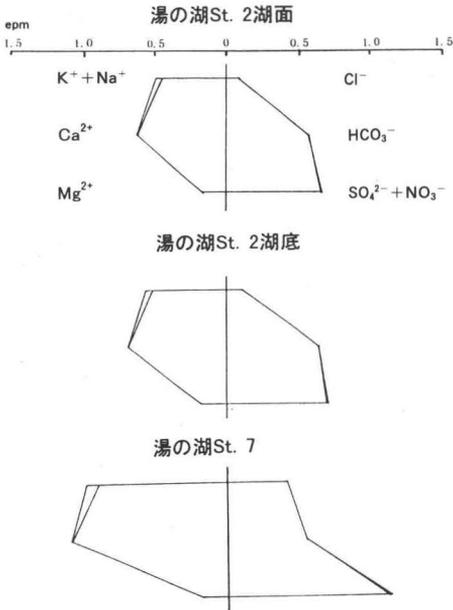


図 5 水質のバランス (ヘキサダイアグラム)

ていることからその影響が考えられる。

2. 水温と電気伝導度に関する考察

まず、湖内ほぼ全体に見られた低電気伝導度層について考察する。この現象については以前にはあまり注目されていないが、流入水の大半を湖岸近くから湧出している湧水が占めていることから、湧水の湖への影響について考えてみる必要がある。

7月24日の調査のとき St. 8 において得られたデータをもとにしたグラフ (図 6) を見ると、夏であるにもかかわらず水深 1m 以下に水温 10℃前後、電気伝導度が 100 μS/cm 以下の水が存在しているのがわかる。この水は明らかに湧水以外には考えられず、白石 (1964) も St. 8 付近においては、大量な湧水が存在することを確認している。

この St.8 での値を仮に全湖岸から湧出する湧水の代表として考えれば、夏でも 10℃前後で湧出した湧水が、表面の水温や日射の影響を受け温められ、13℃前後になり、水深 2m 付近へと層を作り広がっていると考えられる。そしてこの湧水の存在は、水温躍層の出来方にも影響を与えているのではないと思われる。1964年に白石が調査を行ったときよりも水温躍層が表層近くにあるのは、単純に湯の湖の汚染が進んだためと考えるのは危険であろう。透明度の比較ができれば明らかになるのだが、白石 (1964) の結果では、透明度については触れられておらず、今回の調査で測った透明度 4.5m という値も 9月20日の値であり、すでに植物プランクトンが減少して透明度が上がってきていると思われたときであるので、解釈は難しい。ただ、湯の湖で行われた浄化対策は功を奏していると思われ、かつては水の華が見られたが、現在ではそういった報告はないということ

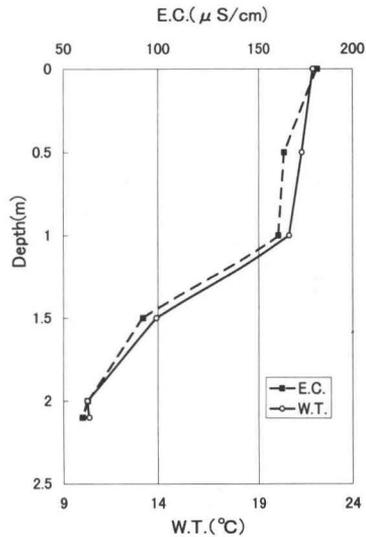


図 6 水温と電気伝導度の鉛直分布 (St. 8 1997. 7. 24)

からも、湯の湖の汚染が進んで水温躍層が上昇したとは考えにくい。そこで、今回確認できた電気伝導度の低い層の存在から、湧水が混入している湖水が存在する深さが何らかの理由で変わったのではないかと考えたが、現在までの調査では明らかな答えを出すには至っていない。

湧水の量は、湖岸ごとにかかなりの違いがあると白石(1964)は推測しており、今回の調査において、St. 2, St. 3, St. 4, それぞれのグラフに現れる低電気伝導度層の強さの違いは、湧水の量と湧出点からの距離による影響力の違いを表していると考えられる。9月、10月になると、この層が現れなくなるのは、部分循環期、完全循環期にはいり、湖水が全体的に混合し、層を成していた湧水起源の湖水も混合されるからであろう。

次に、湖の南にあるSt. 2と北にあるSt. 4における観測データをもとに作成した水温アイソプレスについて検討する(図7)。この図から、まず、両地点ともに7月24日には表層付近に水温躍層が見られ、8月、9月、10月と水温が下がるにつれて、徐々に水温躍層が消滅しているのがわかる。しかし、水温躍層の深度についてみると、湖の北にあるSt. 4のほうが、南のSt. 2よりも躍層深度

が深くなっており、しかも、St. 4の湖面に水温の高い水が存在している。この事については、1964年に白石も述べており、吹走流の影響であるとしている。しかし、単純に吹走流の影響と述べるだけでは適当ではないと考えられる結果が今回の電気伝導度の測定から得られた。今回の調査における電気伝導度のアイソプレス(図8)とあわせてみると、St. 4の表面水には、水温と電気伝導度の高い水が存在することがわかる。これは、処理場からの処理水が表面に広がっている影響が見られていると思われる。今回、吹走流の存在は、St. 1, St. 2において、ブイが風のあるときは常に北向きに流されようとしていたのを確認したにとどまるが、吹走流により運ばれた表面水と、吹走流により押しとどめられた処理場処理水が、湖の北部の表層にたまって地下水の混ざった湖水の層を押し下げていると考えられた。

電気伝導度のアイソプレスからは、低電気伝導度層の夏から秋にかけての季節的な動きがわかる。7月24日の夏季成層期には、St. 2, St. 4ともに表層水の下に低電気伝導度層が存在している。それが、水温躍層と同様秋に向けて徐々に消滅していく。また、St. 2よりSt. 4のほうが電気伝導

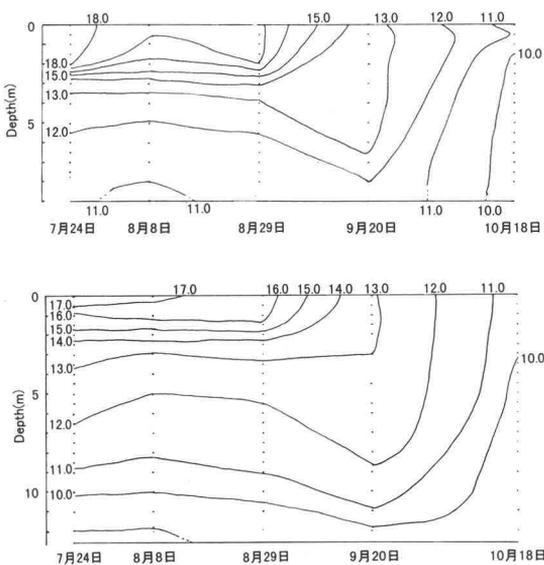


図7 水温のアイソプレス (上) St. 4 (下) St. 2

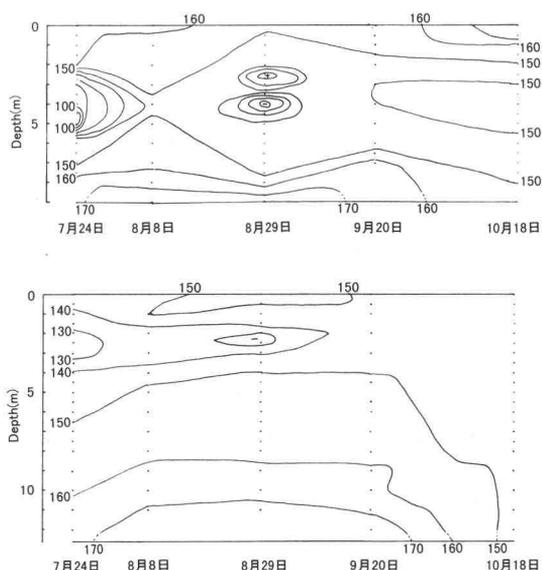


図8 電気伝導度のアイソプレス (上) St. 4 (下) St. 2

度が低くなり、低電気伝導度層の存在する水深も深い。先にも述べたように、St. 4の方が湧水の影響を強く受けていると考えられるためである。そしてSt. 4のグラフを見ると低電気伝導度層の上に電気伝導度の高い水が存在するのが分かる。この水は、処理場からの処理水以外には考えられない。

さらに、湯の湖を南北に切った断面の電気伝導度等値線図(図9)で見ると、やはり、北にあるSt. 4から南にあるSt. 1に向かって低電気伝導度層は上昇しており、これは水温躍層の傾きと一致している。また、この図からは、湖の中心線で見るとSt. 3でもっとも強く地下水の影響が現れ、湖の出口へと行くに従い湖水との混合が行われているとみられる。そして、最深部ともいえるSt. 3の湖底には電気伝導度の高い湖水がたまっている。これは先にも述べた溶存酸素の不足によるものであろう。

以上、水温と電気伝導度のグラフを見ただけでも湯の湖の夏季成層の状況は複雑であり、興味深い。

3. 溶存酸素量

湯の湖の溶存酸素量については、9月20日と10月18日の2度しか観測を行えなかったが、大変興味深い結果が出ているのでここで述べたい。

湯の湖の溶存酸素量については、以前からいくつかの観測報告例が存在する。その全てが、成層

期に湖底において溶存酸素の減少を報告しており、完全に0になるという報告もある。これは富栄養化した湖では起こりやすいことで、湯の湖でも例外ではない。湯の湖では、特に汚染の原因として湖底のヘドロの存在があげられているので、溶存酸素について考察することは不可欠である。

まず、St. 2における、9月20日と10月18日の観測結果をグラフ化したものを示す(図10)。

9月20日は、上層部では既に部分循環が始まりつつあるのがわかる。しかし、湖底においては、まだ電気伝導度が高くなっている現象が確認できた。そこで溶存酸素量を測ってみると、湖底へ行くにつれて急激に下がりはじめ、湖底では、0.6 mg/lという値を示した。夏季成層期の溶存酸素量についての観測が行えなかったのは惜しいが、この結果から、夏季成層期にはさらに浅い層まで、溶存酸素の量は少なくなっていることが想像できる。10月18日のグラフでは完全に湖水が全層にわたって循環しているために溶存酸素は湖底まで行き届いていることがわかる。それと同時に、湖底近くでも電気伝導度の値にはほとんど変化がない。

一般に栄養度の非常に高い湖では、夏季の成層期に大量に表層で造られる有機物を分解するために湖底の酸素が使われ、酸素が不足する。そうすると、湖底のヘドロから酸素と結びついていたリンその他の無機イオンが溶出する。この無機養分

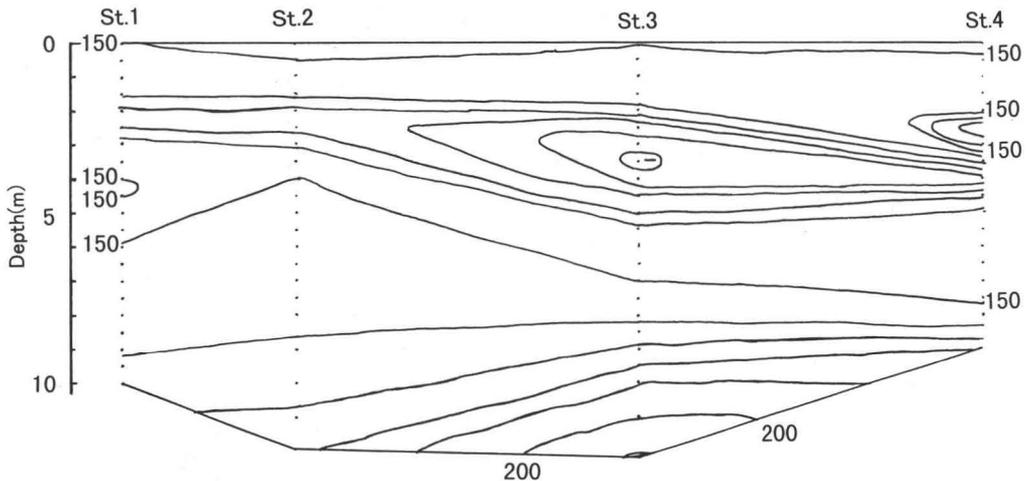


図9 湯の湖 St. 1~St. 4 にかけての断面の電気伝導度等値線図 1997. 8. 29

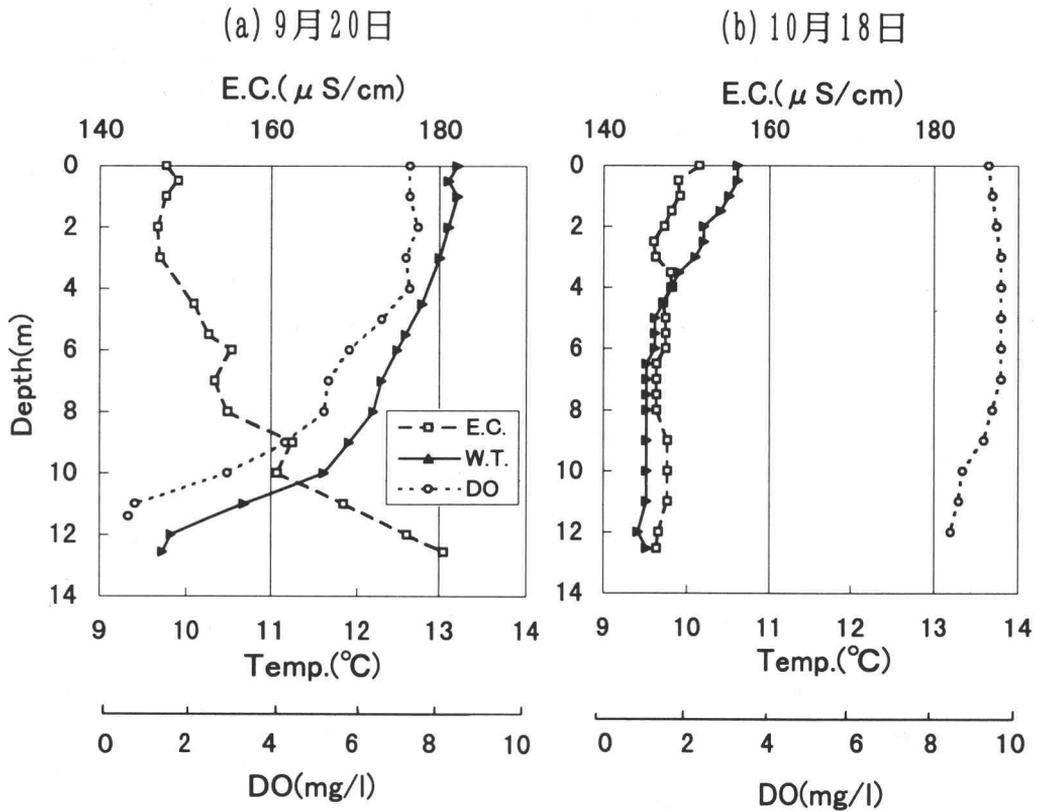


図10 水温・電気伝導度・溶存酸素の鉛直分布 (St. 2)

を使ってさらに植物プランクトンが有機物を作り出すということが起こり、酸欠のため分解しきれない有機物は、ヘドロとなり湖底に溜まる。その間に硫化水素やメタンガスなどが発生し、悪臭の原因にもなる。こうした悪循環を繰り返してしまうことになる。これと同様なことが湯の湖でも起こっているということがこのグラフからもうかがえる。循環期に入って湖底の電気伝導度が下がるのは、単純に全層で循環するからというだけではなく、湖底への溶存酸素の供給によりヘドロからの無機イオンの溶出がストップするためでもあるだろう。そうでなければ、湖底において電気伝導度が少しも上昇せず、表層と一定になるとは考えにくい。

V まとめ

今回の調査においては、以下のことが明らかに

なった。

(1) 以前から言われているように、湯の湖では湖の北側に温かい水塊が存在し、北へいくほど水温躍層の位置は深くなっている。この現象について、今回の電気伝導度の値をあわせて考慮すると、単純に吹走流により南から温かい表面水が吹き寄せられているだけではなく、湖の北岸にある下水処理場からの水温の高い処理水が表面に浮上した後、南からの表面の吹走流により、湖の北にとどめられやすくなっていると考えられる。湯の湖は北岸に温泉街と、そこからの下水を処理する処理場が存在するので、排水が北にたまりやすく、湖の北から湖水は汚染されやすい。

(2) 湖内に湧出する地下水の影響はあまり注目されてこなかったが、今回行った電気伝導度調査の結果から、湖岸から湧出してくる地下水の影響が推測できた。成層期には水深約2~5mのところ

に低電気伝導度層という形でほぼ湖全体に地下水

起源の湖水の層が広がっている。低電気伝導度層の深さは、北に行くほど深くなり、St.4においては、表層に処理水が乗るため、さらに押し下げられている。電気伝導度の低さは地点毎に差があり、湧出点からの距離と、湧出量の違いによると考えられる。

(3) 電気伝導度を湖面から垂直に見ていくと、低電気伝導度層より深くなると徐々に電気伝導度が高くなっていく現象が見られる。この現象は湖底での溶存酸素量の不足によるものと考えられ、溶存酸素量の調査を行った所、湖底において0.6 mg/lという値であった。これは湯の湖が明らかに富栄養湖の性質を持っていることを示している。

VI おわりに

以上のことから、湯の湖の水環境は、南北の風による吹走流と、流入水の大半を占める湧水の存在により他の湖とは異なる特異なものとなっている。湯の湖の富栄養化は中禅寺湖の直接の汚濁負荷になるというのは以前から言われていることであり、実際に湯の湖で問題になってきたのは、湖底のヘドロと湖岸から湧出する地下水、そして温泉街の排水からの無機養分の供給である。この問題に有効な解決法を考えるには、他の一般的な湖沼の型に当てはめて考えるのではなく、今回の研究をもとに、年間を通して湯の湖の湖水の性質を明らかにした上で考えていくことが必要である。今回の調査は、今後湯の湖の汚染の変遷を調査していく上での基盤となるものとなった。年間を通しての湖水の行動を把握することと、実際に湖水の富栄養化に対する有効な対策を示すことが今後

の課題である。

謝 辞

現地での調査に関しては、水産庁養殖研究所日光支所、中禅寺湖漁業組合の組合長をはじめ組合の方々、湯元ビジターセンター、全国内水面漁連の方々忙しい中多大なご協力をいただいた。また、湯元レスノハウスには、毎回調査のためにボートを快く貸していただいた。心からお礼申し上げます。

また、法政大学大学院博士課程の小林信彦氏をはじめ、法政大学文学部地理学科水文ゼミの方々及び、現地調査を手伝っていただいた二川目一氏、松本豪平、春日秀幸、谷山優子氏に感謝の意を表したい。

本稿は、1997年度法政大学文学部地理学科水文地理学ゼミに提出したゼミ論文の一部である。

参考文献

- 新井正 (1985) : 中禅寺湖の水質障害と湖流 . 地域研究 26, 2, 39~45.
- 市川当・田瀬則雄 (1982) : 中禅寺湖における流入河川・湯川の影響範囲 (1), 水温分布による考察 . 水温の研究 Vol.25, No.6, 29~3.
- 国包章一) 1985) : 中禅寺湖及び湯の湖における汚濁負荷収支の経年変化 . 用水と廃水 Vol.27, 9, 22~29.
- 白石芳一・島田武他 (1964) : 日光湯の湖における水産開発の為の基礎研究, 第一報 湯の湖の湖盆形態 . 淡水研報 14, 1, 37~44.
- 白石芳一 (1964) : 日光湯の湖における水産開発の為の基礎研究, 第二報 湯の湖の水温 . 淡水研報 14, 1, 45~53.
- 吉田能久 (1964) : 日光湯の湖における水産開発の為の基礎研究, 第三報 夏季における動植物プランクトンの分布と現存量 . 淡水研報 14, 1, 55~66.