

## 中禅寺湖の水質障害と湖流\*

新井 正\*\*・岡田浩美\*\*\*・植田芳明\*\*\*

### I. はじめに

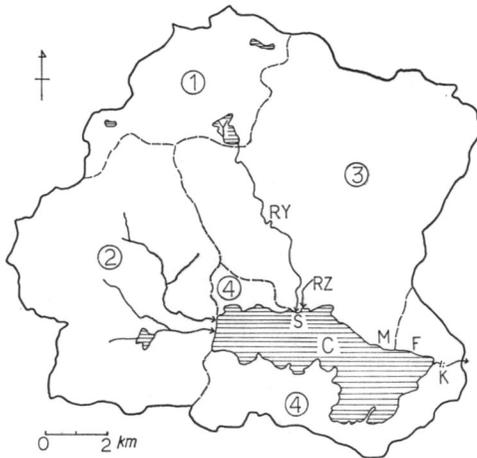
日光中禅寺湖は湖面標高 1,269m, 最大水深 163m, 平均水深 95m, 水面積 11.5km<sup>2</sup>, 流域面積 132km<sup>2</sup> の諸元を持ち, 水質的には比較的良好な貧栄養湖と考えられてきた。しかし, 1981年夏には中禅寺湖の北岸より取水する上水道に異臭が発生し<sup>1)</sup>, 本湖においても汚染問題の追跡が必要とされるに至った。

本湖の上流に位置する湯の湖も(第1図), かつては貧栄養湖とされていた。しかし, 1970年代に行なわれたIBP 総合研究では, 湯の湖は相当に汚染が進行した富栄養湖であることが明かにされた<sup>2)</sup>。湯

の湖の汚染原因は, 湯元温泉街からの排水である。湯の湖は水面積 0.35km<sup>2</sup>, 平均水深約 8m の小湖にすぎないが, 年間 延 170~180 万人の観光客が訪ずれる<sup>3)</sup>。温泉街よりの排水の多くは, 下水処理場を経由して湯の湖に放流される。処理下水量は約 2,700 m<sup>3</sup>・day<sup>-1</sup>(0.03m<sup>3</sup>・s<sup>-1</sup>) であるが, その他の無処理の排水を加えて(通称, 大ドブ), 約 0.1m<sup>3</sup>・s<sup>-1</sup> が湯の湖に放流されている<sup>4)</sup>。この水量は, 湯の湖の流出量 0.8~1.0m<sup>3</sup>・s<sup>-1</sup> と比較すれば少ないが, 湖盆の容積が小さいため湖の汚染をひき起す原因になっている。湯の湖においては試験的な3次処理も行なわれているが, 現在のところ急速な水質の回復は望めない。

中禅寺湖への観光客数は, 年間 400 万人と推定されている<sup>5)</sup>。しかし, 湖岸の宿泊施設・商店などの大部分に下水道が設備され, その排水は華厳流下流へ放流されている。したがって, 中禅寺湖の汚染を考える場合, 湖岸地区よりの直接的な負荷は大きくないと推定される。本湖においては, 湯川を経由して流入する湯の湖からの水塊の負荷が相対的に大きな比重を持っている。国包(1984)によれば, 中禅寺湖への流入 COD 負荷量 531kg・day<sup>-1</sup> のうち, 381kg・day<sup>-1</sup> が湯川によるものである<sup>6)</sup>。中禅寺湖の水質は, 湯の湖と湯川に注目して検討しなければならない。

本報告は, 湯川よりの流入水塊の中禅寺湖における行動を推定したものである。原論文は中禅寺湖の水質汚染に対応した「栃木県湖沼水質保全対策委員



第1図 中禅寺湖流域

①: 湯の湖収水域, ②: 千手5河川, ③: 湯川・男体山収水域, ④: その他小河川, Y: 湯の湖, C: 中禅寺湖, S: 菖蒲浜, M: 丸山, F: 二荒山神社, K: 華厳滝, RY: 湯川, RZ: 地獄川

\* 1984年日本陸水学会において発表

\*\* 立正大学, \*\*\* 立正大学 院

会」の作業の一部で、本報はこの委員会に参加した新井の調査報告を書き改めたものである。

## II 中禅寺湖の水収支

中禅寺湖流出点（大尻川ダム）における流域面積は  $132.3\text{km}^2$  で、このうち湯の湖と男体山西側斜面を含む湯川流域が  $61.8\text{km}^2$ 、千手5河川のうち外山沢川流域が  $16.0\text{km}^2$ 、柳沢川流域が  $20.0\text{km}^2$ 、湖面および湖岸に接する小流域が  $34.5\text{km}^2$  である。湯川流域の細区分は困難であるが、湯滝上流の湯の湖流域が  $18.2\text{km}^2$ 、男体山西側斜面と湯川・戦場ヶ原流域が  $45.8\text{km}^2$  である。

降水量は中宮祠、錫ヶ岳、金精峠で測定されているが、通年資料が得られるのは中宮祠（日光測候所）のみである。中宮祠の1951～1980年の平均年降水量は  $2,089\text{mm}$  である。気温は8月の平均が  $18.3^\circ\text{C}$ 、1月の平均が  $-4.3^\circ\text{C}$ 、年平均が  $6.7^\circ\text{C}$  である。中宮祠の標高は  $1,292\text{m}$ 、流域の平均標高は  $1,670\text{m}$  である。

流域水収支の算定にあたって、降水量は上記の中宮祠の値を利用し、蒸発散量は流域平均高度により流域平均気温を算定し、Thorntnwaite法で求めた<sup>6)</sup>。なお、気温は中宮祠の値を基準とし、減率を  $0.5^\circ\text{C}/100\text{m}$  として計算した。また、月平均気温  $0^\circ\text{C}$  以下の場合には、蒸発散量をゼロとした。

1951～1980年の30年間の平均では、年降水量  $2,089\text{mm}$ 、蒸発散量  $485\text{mm}$ 、年間余剰水量  $1.604\text{mm}$  である。これによれば、中禅寺湖地点の年平均流出量は  $6.67\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$  で、佐藤(1983)の  $5.28\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$  より多く<sup>7)</sup>、栃木県(1983)の  $6.86\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$  より少ない<sup>8)</sup>。いずれにせよ、中禅寺湖の流量はおおよそ  $6\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$  とみなすことができる。流入量の内訳は湯川28%、千手5河川26%、地獄川20%、その他水系が26%である。この値の一部は、上述の流域面積比と類似している。各水系の流出量は、観測年、算定方法によって若干の差異を示すが<sup>3)7)8)9)</sup>、

それぞれの算定方法の間の差は小さい。

湯川とならんで、単一の河川として大きな比重を占めるのは、菖蒲ヶ浜に流入する地獄川である。この川は、男体山山麓の湧水を集めた小河川である。中禅寺湖に面する男体山の南麓には、地獄川と華厳滝下流左岸を除くと、湧水はほとんど見られない。男体山南麓には、竜頭滝付近の高山から丸山へと続く東西方向の小突起列がみられるが、これは新期火山噴出物に埋積された古い山地と考えられる。山崎(1958)によれば、これは男体山の基盤となる花崗岩の山体の一部である<sup>10)</sup>。これらの点を考慮すると、地獄川は男体山の西側と南側の一部からの地下水を集めていると考えられる。佐藤(1983)によると、地獄川のトリチウム濃度は千手5河川とほぼ同じで、他の湧水よりは低い。このことから、地獄川は比較的に滞留時間が短い地下水を水源とすると推定されている。

地獄川の水質の特徴として、チッソ・リンの濃度が高いことがあげられる<sup>5)</sup>。地獄川のCOD負荷量は湯川の  $381\text{kg}\cdot\text{day}^{-1}$  に対して  $18\text{kg}\cdot\text{day}^{-1}$  にすぎないが、全チッソは湯川  $59.9\text{kg}\cdot\text{day}^{-1}$ 、地獄川  $61.5\text{kg}\cdot\text{day}^{-1}$ 、(全流入負荷は  $176.4\text{kg}\cdot\text{day}^{-1}$ )、全リンはそれぞれ  $5.5\text{kg}\cdot\text{day}^{-1}$ 、 $8.2\text{kg}\cdot\text{day}^{-1}$  ( $15.5\text{kg}\cdot\text{day}^{-1}$ ) である。地獄川のチッソ・リンの原因としては人為的なものは考えがたく、自然によるものと推定されている。

以上のように、中禅寺湖の水質問題には、湯川と

第1表 中禅寺湖の平均水収支 単位： $\text{m}^3\cdot\text{S}$

流 入		流 出	
湯 川	1.94	丸山取水	0.0191
地獄川	1.46	二荒取水	0.0074
千手五川	約 1.7	大尻川	1～2
その他流域	約 1～1.7	漏 水**	4.6～4.7
湖面水収支	0.54		
温泉*	0.0015		

\* 湯元温泉より引湯、大部分は下水道に入るが、一部は中禅寺湖に入る。

\*\* 華厳滝付近の地下より大谷川への漏水。

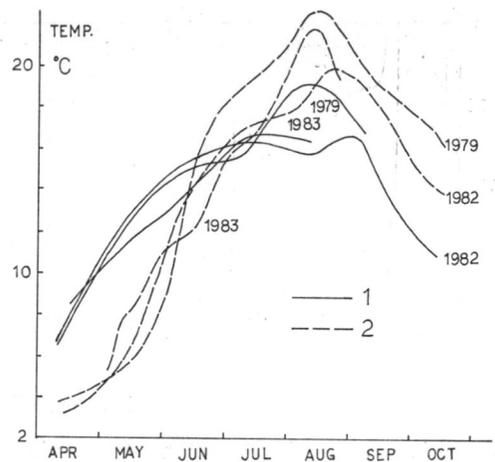
地獄川が関与している。なお、第1表には中禅寺湖の水収支を要約した<sup>8)</sup>。

### III 中禅寺湖の水質障害

中禅寺湖の水道の異臭は、*Uroglena americana* が原因であることが判明している<sup>11)</sup>。*Uroglena* は琵琶湖などで淡水赤潮をひき起しているペン毛藻類であるが、中禅寺湖においても近年は冬を除き常に出現している<sup>12)13)</sup>。*Uroglena* は水温10°C以上で増殖し、水温15°C前後で日射が弱い状態が最適の増殖条件になる<sup>12)</sup>。

中禅寺湖では6月から7月にかけて、10m層付近で*Uroglena*の増加がみられる<sup>11)</sup>。中禅寺湖の*Uroglena*は、湯の湖から湯川を經由して流入したものと考えられている。湯の湖は中禅寺湖よりも標高が高い位置にあるが、水深が浅いために初夏にはより早く昇温する。湯の湖の解氷は4月であるが、5月上旬には表面水温は10°Cになり、6月上旬には13~15°C、8月には20°C弱に達する。湯の湖では*Uroglena*の生育に好条件となる15°Cの温度は、5月中旬にみられ、5月中旬から6月にかけての*Uroglena*の個体数は100,000cells/mlになる<sup>11)</sup>。その後、湯の湖においては*Uroglena*の個体数は減少する。湯川・竜頭滝における*Uroglena*の個体数もこれと平行して変化しており、湯の湖からの流出を裏付けている。

中禅寺湖は水深が大きいため初夏の水温上昇が遅れ、表面水温が15°Cに達するのは6月上旬である。第2図は湯の湖と中禅寺湖の表面水温の変化を比較した図であるが、特に初夏の水温の差が顕著であることがわかる。これにより、中禅寺湖における*Uroglena*の増加が6月以降になることが推定される。中禅寺湖における個体数は、6月下旬から7月にかけて年間最大の1,000cells/mlのレベルになる<sup>11)</sup>。この時期は水道の異臭発生とも一致し、本湖の水質障害の主な原因が*Uroglena*であることを確定的にしている。

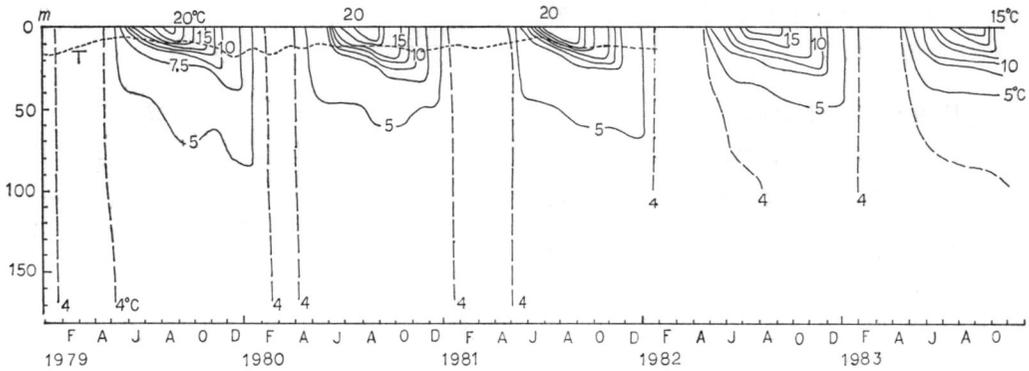


第2図 湯の湖と中禅寺湖の表面水温の比較  
1 湯の湖, 2 中禅寺湖

### IV 流入水の行動

河川より湖沼・貯水池へ流入する水塊は、拡散により若干の温度変化を受けるが、河川水温とほぼ等しい水温を有する湖沼・貯水池の層に流入する<sup>14)</sup>。流入水が湖沼表面より高温であれば表面に拡散するが、その他の場合には一定深度に潜入する密度流が形成される。市川・田瀬(1982)は、中禅寺湖と湯川の水温の比較および湯川流入点付近(菖蒲浜沖)の湖中の水温分布観測により、湯川よりの流入水の行動を推定した<sup>15)</sup>。それによれば、4月より6月までの間は湯川が表面水より高温で、流入水塊は表面に拡散する。それ以降は中禅寺湖表層の昇温にともない、流入水は密度流を形成するようになる。その結果、流入水は一定の深度にとじ込められる。これにより、流入水塊に与えられる光量が少なくなり、*Uroglena*の増殖に好条件が備わるようになる。

第3図は農水省養殖研究所<sup>16)</sup>、国立公害研究所<sup>17)</sup>の資料より作成した中禅寺湖の水温インプレットである。図に示されているように、中禅寺湖の夏季成層は6月に急速に発達する。変温層部分の温度勾配はかなり大きく、安定成層となり、そのため密度流で流入した水塊をも含めて、水塊の上下方向の拡散



第3図 中禅寺湖の水溫 (Tは透明度)

は制約される。したがって、湯川より流入した水塊も垂直拡散をあまり受けずに、一定の深度を保ちつつ湖中に水平拡散するであろうと推定できる。

第2表は国立公害研究所などの資料<sup>17)</sup>から推定した、中禅寺湖における湯川水塊の潜入深度である。ここでは、河川水溫と等しい水溫の層を流入深度と仮定した。現実的には、河口付近の垂直混合を考えると、この深度は若干浅くなる。流入水は6~8月には5~10m深に潜入する 경우가多いが、秋には20m以深に移行する。したがって、初夏の水質障害を対象として湯川流入水の行動を追跡する場合には、5~10m(最大でも15m)を中心に検討すればよいことになる。

第2表 湯川流入水の流入深度

年 月 日	湯川水溫	中禅寺湖水深
1981・8・19	15.0°C	11m
9・17	12.2	16
10・16	8.5	25
1982・6・17	12.4	9
7・20	14.0	10
8・10	16.2	6
10・27	9.5	23
1983・7・12	14.3	5
8・9	15.9	11

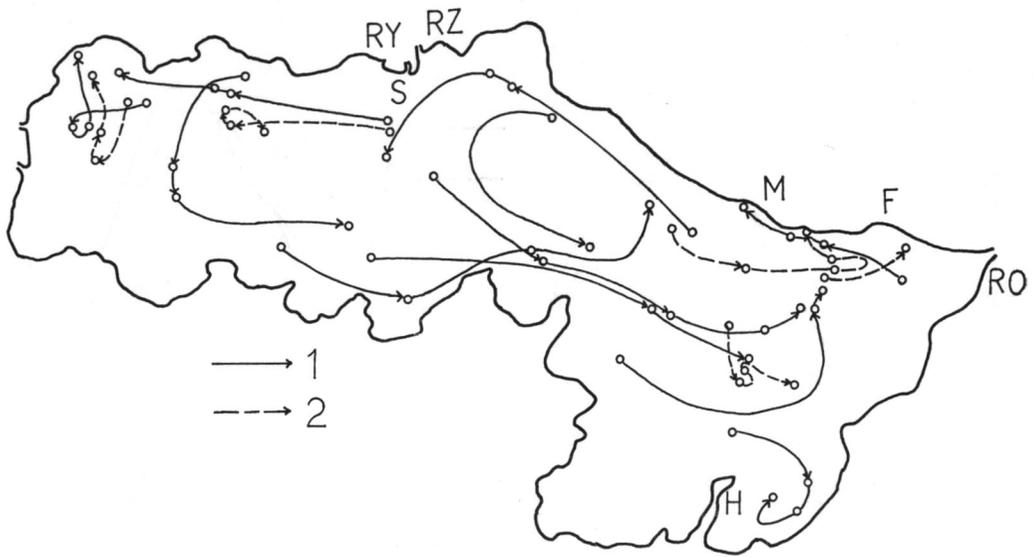
第3図の一部には透明度も記入した。本湖では透明度は10m前後の場合が多く、問題となる層には弱い光が入射している。これも *Uroglena* の増殖に有利な条件である。

## V 湖 流

流入水の水平的拡散を検討するために、1983年6月と7月に湖流調査を実施した。調査方法は湖流板(十字板)の追跡によるもので、使用した湖流板は一片が50×50cm、あるいは40×60cmであった。湖流板の下部には安定のために鍾りを吊し、ポリエチレンピンを浮子とした。6月には丸山、二荒山下の水道取水口付近のみを対象水域としたため、浮子の位置は岸よりトランシット(ポケットコンパスを含む)により追跡した。7月は全湖域の湖流を対象としたので、浮子は船により追跡し、適時六分儀で地物を目標として位置を決定した。位置は現場で三稜分度器により地図上にプロットし、見通し法と比較した。浮子は7月19日に投入し、20日、21日の午前と午後に位置を測定した。湖上では浮子を発見することが困難な場合もあり、1日以上測定間隔となったこともあった。

1983年7月の調査深度は、5~6mと15~16mであった。前者は湯川よりの流入水の影響がある層の上端、後者はその下端とみなしうる。なお、浮子のうち岸に到着したものは、引きあげて再投入した。7月の調査結果は第4図に示されているが、前述のごとく定性的なものである。

7月はすでに安定した水溫成層が形成されており(第3図参照)、密度分布による地衡流が定常的な



第4図 1983年7月の湖流観測結果  
(1: 5~6m層, 2: 15~16m層, H: 八丁出岬, RO: 大尻川, 丸印は位置を確認した地点.)

湖流を形成していると考えられる。図に示されているように、湖全体にわたって反時計廻りの環流がみられるが、部分的には八丁出岬東の入江にみられるような時計廻りの小環流も存在する。なお、観測期間中の中宮祠の風は、W~WSが多く、風速は4m/s以下であった。この風向は、夏期中禅寺湖では、最も卓越している。

前述のように観測前が必ずしも連続していないため、流速などの定量的検討を行なうことは困難である。しかし、湖流の速さは予想以上に早いものであったといえる。図に示されるように、浮子は2~3日で湖の1/4~1/3を移動しているから、全湖を循環するためには10日弱で充分であろう。このことから、湯川よりの流入水塊は、かなりの速さで湖中に水平拡散するとみられる。流入物質もこの流れにのり、全湖域に拡散することになる。図に得られた環流の形態は、平田・村岡(1984)による中禅寺湖の模型実験のうち、西風を与えた場合と類似していることも注目すべきである<sup>18)</sup>。

1983年6月12~15日の沿岸域調査では、悪天候の

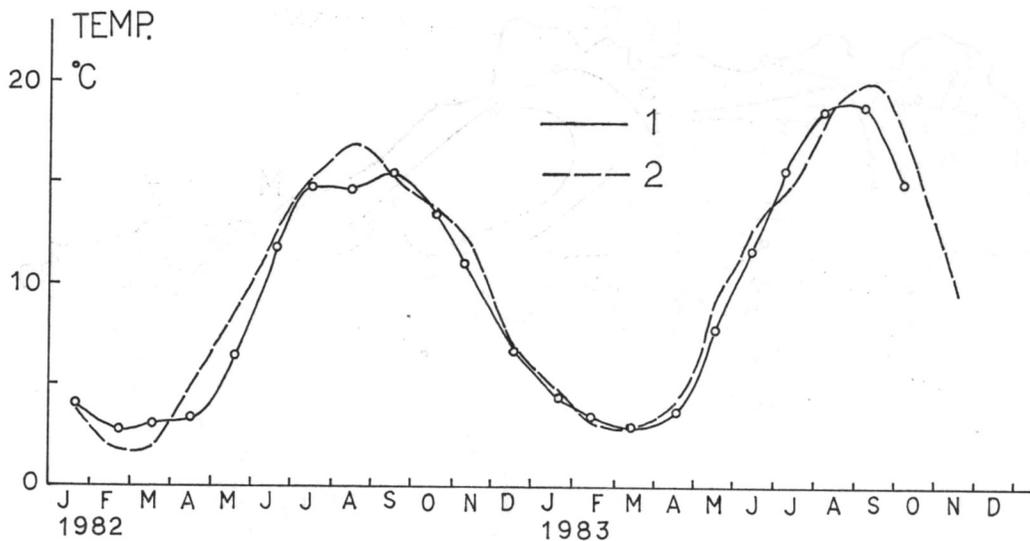
ために満足すべき結果が得られなかった。しかし、北東岸の丸山取水所沖と二荒山取水所沖で、岸に沿う流れが得られた。流速は0m層で1~12m $\cdot$ min<sup>-1</sup>、15m層で1~5m $\cdot$ min<sup>-1</sup>、30m層で0.3~3m $\cdot$ min<sup>-1</sup>であった。また、入江の部分では小環流もみられた。

今回の調査では各方面の制約から、水温水平分布を同時測定することができなかった。したがって、湖流に関する定量的な検討は行いえない。

## VI 結論と水質改善のための提案

以上を要約すると、次のようになる。中禅寺湖の水質障害の原因は *Uroglena* にあり、その起源は湯の湖に発生するものである。中禅寺湖では適温になる6月~7月に増殖するが、そのとき湯川よりの流入水は5~10m層に潜入する密度流となる。成層により垂直方向の拡散が制約され、湖全体に環流が形成されるため、流入物質は比較的短時間内に全湖域に分布する。これが水道によって取水される。

湖岸に水を供給している上水道の取水所は、丸山と二荒山下の2ヶ所であり、いずれも水中にパイプ



第5図 中禅寺湖10m層水温と二荒取水所取水水温との比較  
1: 中禅寺湖10m層, 2: 取水温

を出し引きしている。このうち、二荒山取水所では従来5m深の取水であったが、異臭発生後10mに改造したいきさつがある。ところが、この深度は前述のように、むしろ条件の悪い位置であった。したがって、水質改良のためには、さしあたって取水深をより深くする必要がある。

第5図は二荒山取水所の取水温と、中禅寺湖の10m層の水温を比較したものである。図より、取水温と10m水温との一致は良く、取水口はその深度の水を中心に取水していることが確認しうる。それ故、取水口を20m以深にすれば、上水道における異臭問題は解決されると判断しうる。しかし、基本的には、本湖に汚染水が入らないような対策を講ずる必要がある。特に、自然水である地獄川のチッソ・リンの濃度が高く、これが中禅寺湖の水質の弱点になっているので、人工的汚染は極力排除すべきである。その対策としては、現在下水道がない菖蒲浜地区に下水を導入し、排水を華厳滝下流に落すこと、湯元地区の排水を中禅寺地区の下水道に接続することが考えられる。これらの対策は簡単には実現でき

ないが、日光の湖沼の保全のためには、いずれ必要となるであろう。

本調査は前述のように「栃木県湖沼水質保全対策委員会」の作業の一部として実施した。お世話していただいた栃木県環境衛生部公害課の皆様、資料を提供していただいた国立公害研究所、養殖研究所、栃木県、および平山光衛氏(宇都宮大学教授)ほかの委員の皆様にお礼申し上げます。

(1985年6月26日受付)

(1985年10月7日受理)

#### 参考文献

- 1) 平山光衛・新井 正・星隈保夫・国包章一・相崎守弘 (1984): 『中禅寺湖・湯の湖水質保全対策調査報告書』 栃木県, 161ページ。
- 2) JIBP-PF Research Group of Lake Yunoko (1975): Productivity of the community in Lake Yunoko. *JIBP Synthesis*, Vol. 10, 52~105.
- 3) 栃木県環境衛生部 (1983): 『中禅寺湖・湯の湖水質調査報告書(1)』 栃木県, 127ページ。
- 4) 新井 正, 森 和紀 (1972): 湯の湖の水収支・熱収支について(第2報), 調和型湖沼の生物群集の生産力に関する研究——湯の湖生物群集の生産力に関する研究。(JIBP. 湯の湖グループ, 昭和46年度報告) ——, 121~129.
- 5) 国包章一(1984): 物質収支. 『中禅寺湖・湯の湖水質

- 保全対策調査結果報告書』31～69.
- 6) Thornthwaite, C.W. (1948) : An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, Vol. 38, 55～94.
  - 7) 佐藤芳徳 (1983) : 中禅寺湖における湖水の混合とトリチウム収支. *地理学評論*, Vol. 45, 667～678.
  - 8) 新井 正 (1984) : 水収支. 中禅寺湖・湯の湖の水質保全対策調査報告書』17～30.
  - 9) 新井 正 (1970) : 日光湯の湖における水温・泥温の観測結果. 立正大学人文科学研究年報, No. 8, 84～87.
  - 10) 山崎正男 (1958) : 日光火山群. *地球科学*, No. 36, 28～35.
  - 11) 国包章一・相崎守弘 (1984) : 水質障害, 中禅寺湖・湯の湖水質保全対策調査結果報告書, 112～125.
  - 12) 相崎守弘・大槻 晃 (1984) : 中禅寺湖の水質特性. 国立公害研究所研究報告, No. 69, 37～51.
  - 13) 小山次朗・福田嗣真 (1984) : 中禅寺湖における植物プランクトン及び動物プランクトンの季節変化, 国立公害研究所研究報告, No. 69, 69～76.
  - 14) 新井 正 (1967) : 田子倉貯水池の水温構造について (第2報). *地理学評論*, Vol. 40, 476～487.
  - 15) 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, 29～34.
  - 16) 水産庁養殖研究所 (1983) : 中禅寺湖及び湯の湖の観測結果報告(1972～1981年) : 養殖研究所, 40ページ.
  - 17) 国立公害研究所 (1984) : 資料. 国立公害研究所研究報告, No. 69, 119～143.
  - 18) 平田健正・村岡浩爾 (1984) : 中禅寺湖の水温成層と内部波. 国立公害研究所研究報告, No. 69, 5～85.

# Drawback of Water Quality and Lake Current in Lake Chūzenji

**Tadashi ARAI\***, **Hiromi OKADA\*\*** and **Yoshiaki UEDA\*\***

Lake Chuzenji in Nikko National Park has been considered as a clear oligotrophic lake.

In recent years, some drawbacks of water quality have been reported even in this lake. The drawback was brought by the bloom of *Uroglena americana*, a kind of plankton which brought freshwater red-tide in several lakes in Japan. In the case of this district, bloom of *Uroglena* is first observed in Lake Yunoko in May. Lake Yunoko is a small and shallow polluted lake in the upper reaches. Then the plankton flows into Lake Chuzenji through River Yukawa and brings the bloom in June and July in this lake.

In early summer, the lake is thermally stratified and the inflowing water mass submerges below the surface as density current. As the vertical diffusion of the lake water in this season is limited by thermal stratification, and thermal and optical conditions favorable for the growth of *Uroglena* are also limited, the bloom is observed in a narrow water layer between 5 and 15 m below the surface.

Observation of lake current was made in June and July, 1983, to search the diffusion of inflowing materials from the river into the whole lake areas. The result is shown in Fig. 4, where evident anti-clockwise current is obtained. The observation was made by use of current cross (drag) and tracing the movement of buoy connected to the cross at each half day interval. The result shows that the water mass from the river may be distributed to the whole lake area in several days.

The local waterworks intake the water from 10m depth in the lake which is regarded as an unfavorable site for water quality. Our committee recommended to change the depth more deeper layer.

---

\* Rissho University, \*\* Graduate student, Rissho University