中禅寺湖の淡水赤潮*

村 上 敬 吾

1. はじめに

中禅寺湖は、日光国立公園の南西部に位置し、その景観が美しいこと、湖水が碧く清浄であること等から景勝地として観光の中心的役割を果たしており、近時は内外からの来訪者が年間およそ500万人に及んでいる。

この湖は、標高1,268mにあり、湖面積12.1km²、最大水深163m、平均水深94.6m、湖容積1.14km³、湖水の平均滞留時間は6.13年の亜高山湖としての深い湖の特性を備えている。

元来、中禅寺湖は貧栄養湖として知られ、最近まで水質汚濁の問題について注意を引くことはなかったといつてよいほどであった。しかし、1981年6月に湖水を水源とする日光市の上水道に異臭味（生ぐさ臭）が発生し、同時期に淡水赤潮状態が確認¹⁾されることとなり、中禅寺湖もまた琵琶湖と類似の現象が生じた。

また、1983年秋には湖面に大量のアワが異常発生して景観を著しく損なう問題²⁾が起こるなど、最近その富栄養化の進行が懸念される状況となってきた。

中禅寺湖の水質汚濁に関しては、上流域に位置し、富栄養化の進んだ奥日光の湯の湖から流出する湯川の影響が大きい。

湯の湖は、標高1,478m、湖面積0.35km²、最大水深14m、平均水深7.4m、湖容積0.003km³、湖水の平均滞留時間は25～30日ほどの小湖沼である。湖岸に湯元温泉街があり、来訪者の増加に伴い水体の小さい湯の湖は汚染が進み、昭和初期にはすでに富栄養化しかけた湖と指摘され、昭和40年代には代表的な富栄養湖とし

て注目を浴びたところである。

栃木県においては、上水道に異臭味が発生した事態を契機として、水質悪化の機構解明と水質保全対策の立案を主眼とする「中禅寺湖細密調査」を行ったところである。その結果、その後も継続して異臭味の問題が生じており、また、透明度の異常低下と赤潮現象の発生がみられる場合があり、その原因は植物プランクトン *Uroglena americana* の大量発生によるものであること等が確認されてきた。この調査は、国立公害研究所を初めとする関係機関の多大な協力を得ながら実施したものであり、各種調査結果について、各専門分野の学識者による解析を行い報告書³⁾としてとりまとめたところである。

今回は、中禅寺湖の淡水赤潮の原因プランクトンである *U. americana* の最近の発生状況と大量発生を促す環境条件等これまで得られた知見についてその概要を紹介する。

2. 中禅寺湖、湯の湖の水質概要

中禅寺湖および湯の湖については、1971年から水質常時監視を行ってきており、現在は4～11月の期間月1回の調査を実施している。両湖の位置関係および水質調査地点は図1に示すとおりであり、環境基準地点（湖心C-6）の最近5カ年（1985～1989年）における年8回の平均水質⁴⁾の概況は表1のとおりである。

中禅寺湖はOECDが提案した湖沼の富栄養段階を決めるための基準値（OECD, 1982）から判断すると平均透明度6 m以上、T-Pについては平均10μg・l⁻¹以下、平均クロロフィルa濃度も8 μg・l⁻¹以下の貧栄養湖に相当している。栄養塩類の窒素およびリンに係わる環境基準（環境庁告示, 1982）から判断するとT-P濃度は0.005mg・l⁻¹以下の類型Iにほぼ相当するが、T-N濃度は0.2mg・l⁻¹以下の類型IIのレベルにもわずかに及ばない。

湯の湖は、OECDの基準値から判断すると平均透明度は1.5～3.0mの範囲に入り富栄養化段階、T-P濃度は10～35μg・l⁻¹の範囲に入るところから中栄養段階、平均クロロフィルa濃度は8～25μg・l⁻¹の富栄養レベルに位置していること等から総合的にみると湯の湖は富栄養段階にあるといえる。また、窒素およびリン

Keigo Murakami

昭和44年 茨城大学文理学部卒業
46年 栃木県商工労働部
平成2年 栃木県公害研究所部長
〔趣味〕 バドミントン 釣り

* Freshwater Red Tide in Lake Chuzenji-ko, 1991年3月4日受理

に係わる環境基準から判断すると、表層の T-N 濃度は $0.4\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 以下の類型Ⅲのレベルにわずかに及ばず、T-P 濃度も $0.03\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 以下の類型Ⅲのレベルにわずかに及ばない。参考項目であるクロロフィル a 濃度および透明度については、いずれも類型Ⅲのレベルに相当している。ちなみに、両湖の環境基準の類型指定は 1937 年 (COD 等) および 1985 年 (N および P) に行われており、中禅寺湖は AA-I (窒素を除く)、湯の湖は A-III があてはめられている。

中禅寺湖の水温成層は 5 月中旬から発生し、11 月下旬にはほぼ解消する。サーモクラインは 10~20m にあり、6~9 月の間によく発達する。冬には全層がほぼ等温となって結氷することはないが、冬にもわずかに成層を作っているのがみられる。

1985~1989 年の中禅寺湖における透明度の時期変化を図 2 に示す。中禅寺湖の透明度は初夏に低下し、初秋に向上した後、冬季に向かって平均的な値に戻るといふ時期変化で推移する。この傾向は水産庁養殖研究所日光支所等における年間を通しての観測データ¹⁾から

図 1 中禅寺湖、湯の湖の調査地点

表 1 中禅寺湖、湯の湖の水質概況

(湖心表層：4 月~11 月平均)

年	項目	透明度 (m)	NO ₃ -N (mg・l ⁻¹)	NH ₄ -N (mg・l ⁻¹)	T-N (mg・l ⁻¹)	PO ₄ -P (mg・l ⁻¹)	T-P (mg・l ⁻¹)	Chl-a (μg・l ⁻¹)	COD (mg・l ⁻¹)
中 禅 寺 湖	1985	9.0	0.068	0.031	0.15	0.001	0.003	1.3	0.9
	1986	10.0	0.070	0.037	0.22	0.001	0.005	1.8	1.4
	1987	10.3	0.061	0.018	0.22	0.001	0.004	3.0	1.2
	1988	9.2	0.084	0.012	0.18	0.002	0.004	2.0	1.3
	1989	8.1	0.087	0.026	0.21	0.001	0.006	3.5	1.2
湯 の 湖	1985	2.0	0.082	0.032	0.34	0.003	0.027	16	2.1
	1986	2.6	0.057	0.031	0.44	0.003	0.031	15	2.4
	1987	2.7	0.090	0.041	0.40	0.004	0.033	17	2.3
	1988	2.6	0.141	0.019	0.43	0.004	0.028	18	2.2
	1989	2.5	0.076	0.025	0.31	0.002	0.028	26	2.3

ら昭和 50 年代初期の頃からすでにみられるが、最近の初夏における透明度の低下時期と上水道の異臭味の発生時期とは一致している。

最近 5 年間の常時監視データにおいて、透明度の最低値は 1986 年 6 月 24 日の湖内北西部の調査地点 (C-1) で 2.5m の記録があり、この翌日には境界が不明瞭なものであったが広範囲に薄く着色した赤潮状態を筆者は確認しており、その時の透明度は約 1 m まで低下している状況がみられた。最高値は 1987 年 9 月 24 日の湖心における 17.0m であり、これは 1971 年に常時監視を始めて以来最高の記録である。

3. 中禅寺湖の植物プランクトン

1983 年の細密調査の一環で実施した中禅寺湖の植物プランクトン個体数の時期および鉛直変化を図 3 に、出現種のグループ別割合を図 4 に示す。

植物プランクトンは表層付近には比較的少なく、5~10m に多く出現する傾向がみられる。このことから中禅寺湖における植物プランクトンの調査は水深 5m に採取ポイントを設定して実施してきたところである。

出現種を珪藻、緑藻、その他に大別すると、春季および冬季に珪藻が最も多く、夏季には緑藻が多く占めていることが分る。

6 月に植物プランクトンの大増殖がみられたが、これは黄色鞭毛藻の *Uroglena americana* が大量出現したことによる。この時期、水深 20、30m では *U. americana* の割合が激減し、珪藻の割合が高かった。水深 20、30m の水温は 4~5°C となっており、この水温では *U. americana* は優占種にはなり得ず低温期に優占する珪藻が高い割合を示したものと推察される。

最近 5 年における中禅寺湖 (C-6 5 m) の植物プランクトン優占種の時期変化をみると、4~5 月は珪藻の *Melosira italica*, *Stephanodiscus spp.* あるいは黄

図 2 中禅寺湖 (C-6) の透明度の時期変化

色鞭毛藻の *U. americana*, 6～7月にはほぼ恒常的に *U. americana* が優占し, 8～9月は緑藻の *Quadrigula choatii*, *Crucigeenia rectangularis*, 10～11月は *Fragilaria crotonensis* あるいは *U. americana* が優占していた。すなわち, 珪藻を中心とする低温の環境条件を好むプランクトンから高温の環境条件を好むプランクトンに移行する端境期に *U. americana* が優占的に発生している。

植物プランクトンの全個体数は年によりまた時期により大きく変動し, 最大は1989年9月の16,700個体・ ml^{-1} , 最小は1986年7月の55個体・ ml^{-1} であった。*U. americana* の優占する6月に個体数が増大する傾向がみられ *U. americana* が中禅寺湖の植物プランクトンの消長に大きく関与していることが分かる。

4. 水道水の異臭味障害

U. americana は琵琶湖の淡水赤潮プランクトンとしてよく知られているが, 中禅寺湖でもこれの大量発生時には水道水の異臭味と浄水施設での汙過障害の問題が生じている。

日光市では丸山浄水場および二荒浄水場において中禅寺湖から水道原水を取っている。1981年6月中旬に住民から水道水の異臭味(魚臭, 生ぐさ臭)の苦情が相次ぎ, 市は6月19日～7月10日と7月23日～8月3日の期間応急対策として粉末活性炭を注入し脱臭処理を行ったが, これが中禅寺湖を水源とする上水道の異臭味発生の最初のケースであった。

この時の異臭が *U. americana* によるものであるこ

とは相崎ら¹⁾が同時期, 中禅寺湖で *U. americana* による淡水赤潮を認めたこと, その後, 当研究所において中禅寺湖の *U. americana* の群体数と臭気強度の関係に図5のような良い相関関係が認められたこと等から疑いの余地がないものとなった。

これ以後, 1987年を除いて毎年6月～7月の時期(1988年は6/9～8/2と9/7～10/5)に異臭味が恒常的に発生する事態となり, 浄水場では昭和62年度に臭気対策として「オゾン酸化～活性炭吸着」の恒久的な施設を整備したところである。

中禅寺湖における *U. americana* の出現が最初に報告されたのが1981年¹⁾であるが, それまでの植物プランクトン調査は断片的であり, したがって *U. americana* が同湖にいつ頃出現したかを明確にすることができない。透明度の経年変化をみると, 昭和50年代の初め頃から初夏に透明度の低下がみられるところから *U. americana* の出現との関連があったのかも知れない。

上流域に位置する湯の湖では, 栃木県が委託により1973～1982年の期間「湯の湖プランクトン調査」を行っているが, この調査報告書⁵⁾によると1976年9月および11月, 1977年11月に *Uroglenopsis* sp. として報告されており, また, 1979年の国立公害研究所の調査結果⁶⁾では同年8月～10月に *Uroglenopsis americana* が出現したと報告されている。湯の湖においては昭和50年代の初期にはすでに出現していたものと推察される。

5. 中禅寺湖, 湯の湖における *U. americana* の動態

湯の湖 (Y-5-0 m) および中禅寺湖 (C-6-5 m)

図3 中禅寺湖の植物プランクトン個体数の時期及び鉛直変化 (C-6)

図4 中禅寺湖の植物プランクトン個体数のグループ別割合 (C-6)

図5 中禅寺湖における *Uroglena americana* 群体数 (群体・100ml⁻¹) と臭気強度の関係

における植物プランクトン総個体数と *U. americana* 個体数の時期変化は図6のとおりである。湯の湖では平年的には100~200個体・ml⁻¹であるが、多量発生の年には3,000~6,000個体・ml⁻¹に達する値が計測される。5月上旬より増大し、5月下旬~6月中旬にピークがみられ、夏季に一旦減少するが9月下旬~10月中旬に再び増殖を示す。これら増大時期には琵琶湖の赤潮状態の目安である10,000個体・ml⁻¹¹⁰⁾を超える場合が多く、この期間の最大値は1988年9月の36,000個体・ml⁻¹であった。4~11月の調査期間を通して恒常的に高密度の出現がみられる。湖内での赤潮状態が確認されたことはこれまで無いが、湖尻の湯滝や流出河川の湯川において黄褐色を呈して異臭を放つ状況がたびたびみられ、観光資源としての価値を低下させている。

近年は、中禅寺湖においても4月に1,500~2,000個体・ml⁻¹の値が観測され、水温の上昇とともに増大し6月下旬~7月中旬にピークがみられる。以後、一時減少するが冬季に向かって再び増大し、ほぼ4月の個体数に戻る傾向を示していることから、中禅寺湖においても個体数が著しく減少する時期があるものの *U. americana* は周年出現しているものと推察される。

また、湯の湖と中禅寺湖の時期変動の形態はよく類似しているが、両湖の *U. americana* の大量発生時期が若干ずれていることが分かる。

中禅寺湖、湯の湖、湯川末流における *U. americana* 個体数と水温の時期変化は図7のとおりである。中禅寺湖と湯の湖の表層水温を比較すると、10℃を超えるのは湯の湖では4月下旬~5月上旬、中禅寺湖では5月下旬~6月上旬と約1カ月のずれがみられる。また、中禅寺湖の夏の表層水温は20~22℃と湯の湖よりも高温になるが、これらの現象は両湖の湖容積 (平均水深) と標高の差異によるものである。

図6 湯の湖および中禅寺湖における植物プランクトン総個体数と *Uroglena americana* 個体数の時期変化

図7 中禅寺湖、湯の湖、湯川における *Uroglena americana* 個体数および水温の時期変化

U. americana の個体数と水温の関係を図8に示す。中禅寺湖、湯の湖とも水温15℃付近にピークがみられ、20℃まで上昇すると急激に減少するところから両湖における *U. americana* の増殖の適温は15℃前後と考えられる。*U. americana* の個体数が最も多い時期は湯の湖では5~6月、中禅寺湖では6~7月であり、これは *U. americana* の増殖適温である水温15℃に達するそれぞれの時期と一致する。

湯の湖から流出し、中禅寺湖に流入する湯川の末流での *U. americana* 個体数の変動は湯の湖での変動と類似のパターンを示していることから、湯の湖で増殖した *U. americana* が湯川を介して中禅寺湖に供給されていることは明らかである。

図8 *Uroglana americana*と水温との関係

U. americana の増殖は湖内水温と密接な関連があり、湯の湖と中禅寺湖の表層水温の差および湯の湖で先駆的に大増殖した *U. americana* が湯川を通して中禅寺湖に供給されることが、中禅寺湖における *U. americana* の大量発生の要因として大きく関与しているとの知見は相崎ら⁹⁾が報告している。

報告では、現地予想される比増殖速度 $0.2 \cdot d^{-1}$ を用いて計算すると、1982年4月に観測された *U. americana* の密度 $14 \text{ 個} \cdot \text{mL}^{-1}$ を初期個体数にとると、33日で赤潮状態になり、湯川からの供給を受けて湖内表層に分散した場合の $200 \text{ 個} \cdot \text{mL}^{-1}$ を初期値とすれば約2週間で同じ状態になるとしている。

6. おわりに

中禅寺湖においては、淡水赤潮が確認されたのが1981年6月および1986年6月の2度であるが、地元漁協関係者からの聞き取りでは他の時期にも赤潮現象が発生したといわれる。中禅寺湖の場合いずれも1～2日間の短い期間のようであるから発現しても見逃している場合の方が多いものと思われる。しかし、これまでの知見から明らかなように、赤潮状態に成り得る *U. americana* の大量発生が近年たびたび観測されているところであり、赤潮が発生する潜在力を十分有しているものと思われる。

吉田ら⁹⁾は *U. americana* による淡水赤潮は、風の穏やかな晴天の日が続く、表層水温が上昇した水域に発生しやすく、曇天および雨天などの表層水温があまり

上昇しない時や荒天などにより表層水温が乱された時期にはほとんど形成されないと報告している。

U. americana の大量発生にもかかわらず、湯の湖、中禅寺湖では赤潮状態の発生が少ないのは、両湖の高い標高の気象特性とする気温、水温、風向、風力、降雨量、湖流等の諸要因が好条件に作用しているのかも知れない。

これまで考察してきたように、中禅寺湖の *U. americana* の発生状況、しいては赤潮状態を引き起こすかどうかの大きな要因は、富栄養化の著しい湯の湖での *U. americana* の消長に大きく関わっている。このことから中禅寺湖における *U. americana* の異常増殖を抑制するためには、湯の湖における *U. americana* の大量発生を防止することが最も効果的な方法と成り得るものと考えている。

栃木県および日光市では、湯の湖の水質浄化のための取り組みとして、これまで下水道の整備を中心とする対策を鋭意進めてきたが、今後は湖底に堆積した有機性汚泥の除去事業を実施するものとし、近々工事に着手することとしている。

最後に、この報文は筆者の所属する栃木県公害研究所のこれまでの調査研究成果に基づく知見をとりまとめたものである。諸先輩および同僚の方々の多大なご苦勞に敬意を表する。

文 献

- 1) 相崎守弘, 村岡浩爾, 平田健正, 福島武彦, 岩田敏, 海老瀬潜一, 大坪国順, 大槻晃(1983) 中禅寺湖の栄養塩収支, 第17回水質汚濁学会講演要旨集, 219-224.
- 2) 世取山守, 小山次朗, 池田浩三, 小林紀男(1987) 中禅寺湖のアワ発生機構(1) — アワ成分とその起源についての検討 —, 水質汚濁研究, 14, 31-38.
- 3) 栃木県(1984) 中禅寺湖・湯の湖水質保全対策調査結果報告書.
- 4) 栃木県衛生環境部(1986-1990) 栃木県水質年表, 各年版.
- 5) 栃木県衛生環境部(1974-1983) 栃木県水質年表, 各年版.
- 6) 細見正明, 岡田光正, 矢木修身, 山根敦子, 須藤隆一(1984) 陸水域の富栄養化防止に関する総合研究(Ⅳ) — 湯ノ湖における富栄養化とその防止対策 —, 国立公害研究所研究報告, 第56号, 175-184.
- 7) 吉田陽一, 三田村緒左武, 田中信彦, 門田元(1983) びわ湖の“淡水赤潮”に関する研究 I — 植物プランクトンおよび栄養塩類の分布変化 —, 陸水学雑誌, 44, 21-27.
- 8) 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, 第69号, 37-35.
- 9) 吉田陽一, 松本孝, 門田元(1983) びわ湖の“淡水赤潮”に関する研究 II — 赤潮発生と環境要因との関係 —, 陸水学雑誌, 44, 28-35.