

中禅寺湖に流入する湯川の潜入地点

Plunge Point of Inflowing River Water in Lake Chuzenji

市川 当*・田瀬 則雄**・高山 茂美**

Ataru ICHIKAWA, Norio TASE, and Shigemi TAKAYAMA

I はじめに

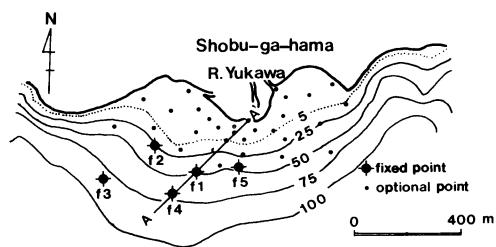
河川水が湖水にどのように流れ込んで、どのように拡散し、混り合って湖水自体へ変化していくかという問題は、現象が複雑であるために現在においても明確な解答が得られていない。しかしながら、湖水と河川水の間には明らかな水質の差異が認められる。たとえば、水温差はその典型的な事象であると言える。このような河川水は湖水と意外に混りあわないと考えられる現象が見られる。Bell (1942) は、河川水の密度流現象を、3つの基本パターン——underflow, interflow, overflow——に分類したが、山間の温帯湖に流入する河川水は、この基本流入パターンを1年間にある1つのサイクルをもって湖に流入していると考えられる。市川他 (1984) は、中禅寺湖に流入する湯川の流入パターンから、山間の温帯湖の場合、春季から冬季にわたって、underflow——overflow——interflow——underflow——overflow の一定のサイクルをもつことを提案している。

本研究では、河川水が湖水にて沈み込みを生ずる (interflow および underflow) 期間において、河口から流したトレーサー (白色溶液) の移動拡散状況の簡易空中写真による時系列的観測結果と水質観測結果との比較から、温帯湖における河川水の沈み込み地点、つまり潜入地点 (plunge point) の変動が、何による影響を強く受けるかを検討したので報告する。

II 調査地域・観測方法

山間の温帯湖で、流入河川を有する湖として、奥日光、男体山の麓に位置する中禅寺湖とそれに流入する湯川を調査地域に選定した。中禅寺湖は東西 6.5 km、南北 1.8 km と東西に細長く、表面積 12.1 km²、平均水深 94.7 m、総貯水量 1.14×10^9 m³ の山間の深い堰止湖である。また、湯川は湯ノ湖を水源とし、戦場ヶ原の湿地帯を流下し、中禅寺湖北岸の菖蒲ヶ浜にて湖に流入している。流量は夏季に多く、冬季に少ない特徴を有し、平均 2.0 m³/sec である (市川・田瀬 1983)。

この湯川河口付近に、5カ所の固定点 (f1 から f5) および 30カ所の任意点を観測点として選定し (第1図)、その各観測点において、Inter Ocean Monitor System Model — 500 CSTD を用いて、表面から 1 m 間隔で湖底まで水質測定を実施した。測定項目は水温、pH、濁度、電気伝導度である。



第1図 湯川河口付近の水深と観測地点

* 筑波大学地球科学系研究生 ** 筑波大学地球科学系

(1985年7月20日受理)

また、河口からトレーサーとして白色溶液を約 2ℓ 流し、その移動と拡散の状況を時系列的に観測するために、気球を用いた簡易空中写真撮影により、10 秒から 60 秒のインターバルで、高度約 150m から撮影した。写真撮影の基測点として、水質観測点とは別に、湖岸から約 80m にわたり、5 m（または 10m）間隔にブイを取付けた間縄を湖面に設置した。簡易空中写真撮影の方法は田瀬・市川（1984）を参照した。

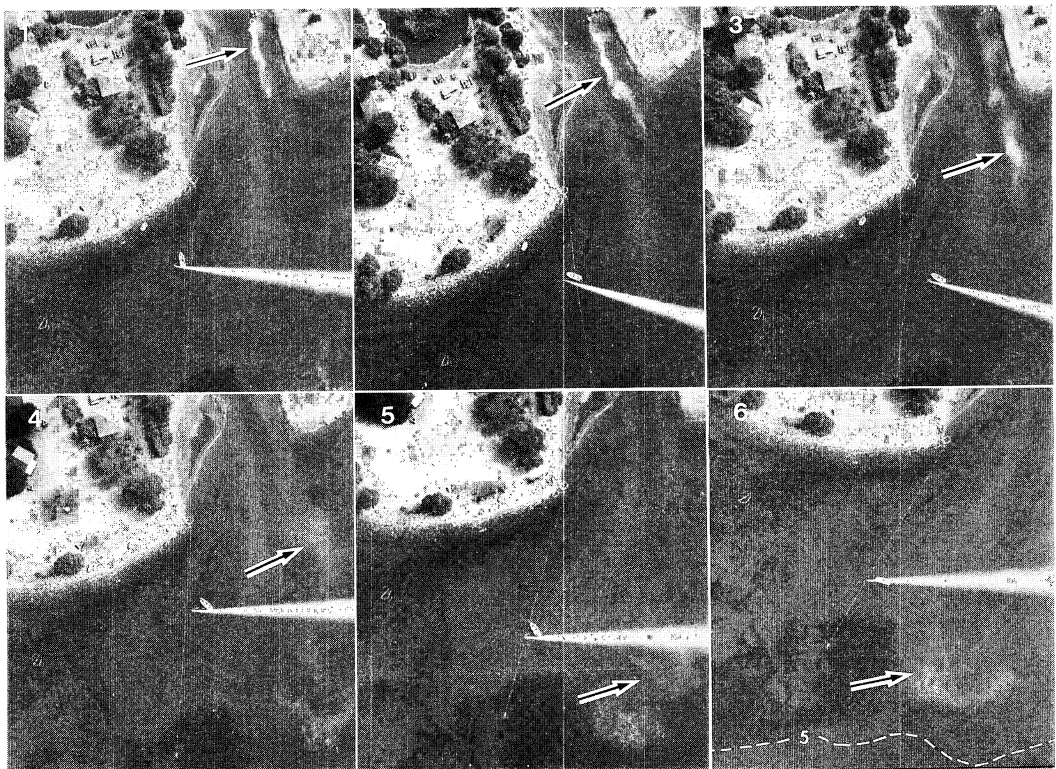
測定時間帯は、風が弱く、湖面に波立ちがない早朝 4 時から 8 時の間である。観測は 1984 年 8 月 11 日および 11 月 9 日の二度実施したが、前者は夏季完全停滞期に相当し、後者は秋季部分循環期に相当する。

III 観測結果および考察

8 月 11 日の湯川の流量は $2.98 \text{ m}^3/\text{sec}$ であり、

単位幅流量は $0.244 \text{ m}^3/\text{m} \cdot \text{sec}$ であった。平均流速は 0.31 m/sec である。

第 2 図は、河口より流したトレーサーの移動拡散状況の時系列写真であり、スタート時、20 秒後、60 秒後、120 秒後、300 秒後、最終の写真を示した。トレーサーはスタートから数十秒間、初期コア（高濃度部）をたもちつつ流下する。この時のトレーサー移動速度は約 0.40 m/sec となる。一方、平均流速（ 0.31 m/sec ）から、湯川の表面流速を換算すると 0.39 m/sec となり、トレーサー移動速度に等しい値となる。このことは、トレーサーの移動が湯川の河川水を代表していることを示すと考えられる。初期コアが保たれる範囲は、写真結果から判断すると、河口より数十メートル沖合の地点までであると考えられる。また、60 秒後、トレーサーは全体的な拡散が生じ、コア部分がくずれていることが認められる。120 秒後

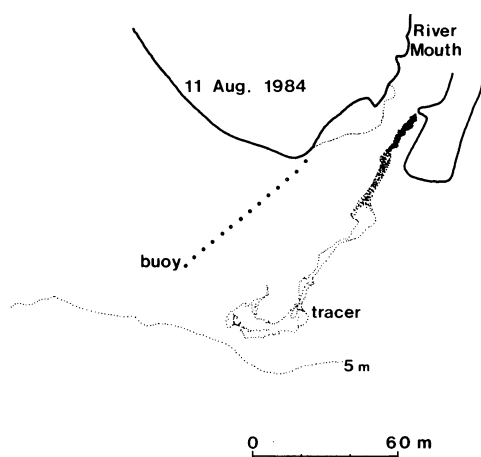


第 2 図 1984 年 8 月 11 日のトレーサー移動拡散の時系列写真（撮影高度約 150m）、矢印はトレーサー位置。
(1) スタート、(2) 20 秒、(3) 60 秒、(4) 120 秒、(5) 300 秒、(6) 最終

には、ほぼ全体的な混合がなされたと考えられる。300秒後、トレーサーの先端部は浮遊物が停滞している水域に達している。さらに、最終時点（15分後）において、トレーサーは、浮遊物停滞水域にあり、300秒後の状態から大きな変化はなく、停滞したことを示している。この水域の浮遊物は、明らかに河川からの流入物であると考えられる。トレーサー停滞水域は、まだ湖底状態が写真から判断できる水域であり、田瀬・市川(1985)の空中写真による水中到達限界の結果から考えると5m以浅の水域であると推定される。

これら時系列写真を1枚にトレースした図を第3図に示した。湖沼図および写真による水中到達限界とから考慮すると、写真中の水域部にみられる湖底確認限界（写真濃度による判断）は水深5m前後であると考えられる。トレーサーは5m水深よりも浅い水域に停滞しており、河口からの距離は約85m沖合である。

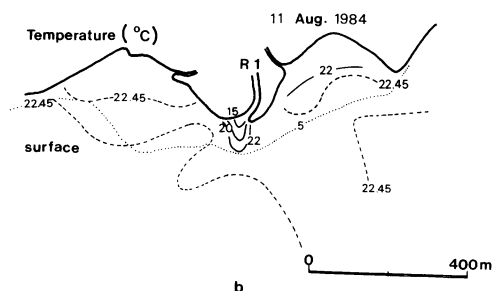
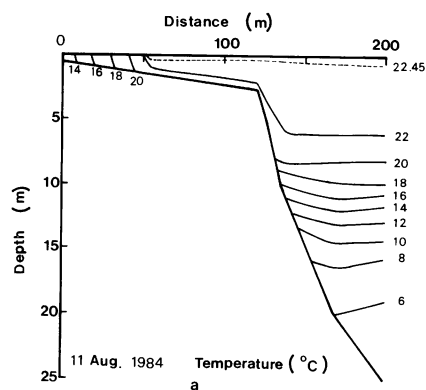
一方、水質観測結果から、湖表面水温は22.47°Cであり、約10m深度に躍層が存在する。躍層上部水温は約18°Cである。また、河川水温は12.93°Cと湖表面水温に比べ低い水温である。さらに、濁度測定から、湖水と河川水との間の密度差は小さく1ppm以下であり、密度差は水温の関



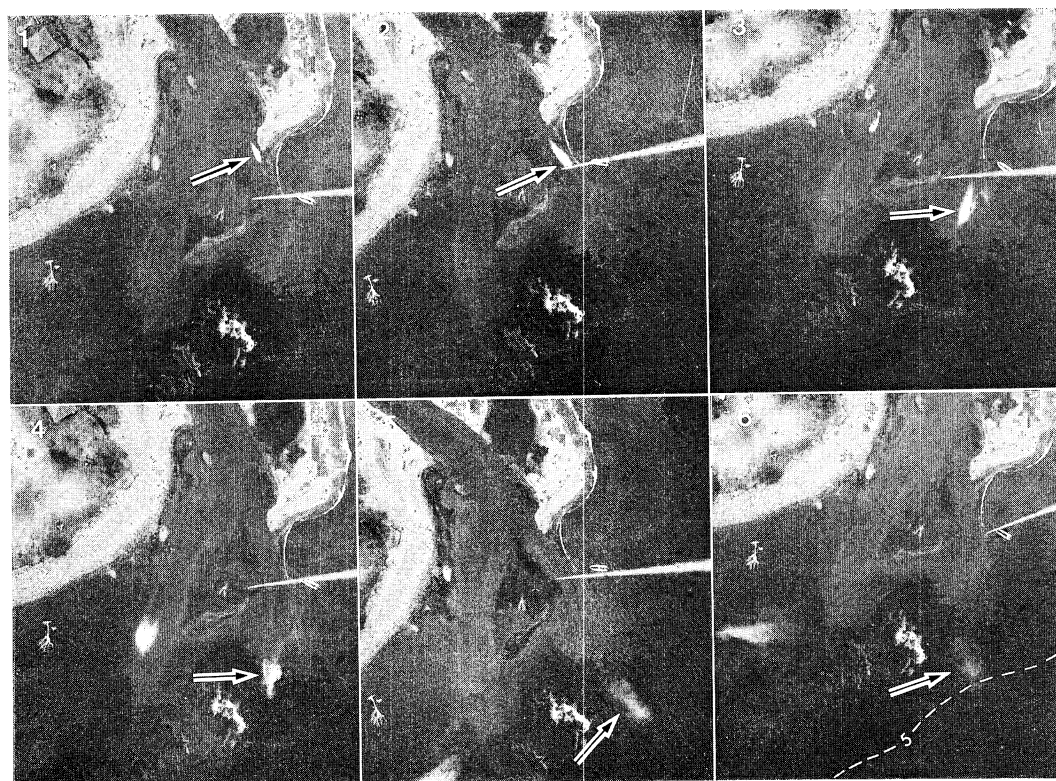
第3図 1984年8月11日のトレーサー移動拡散の時系列写真群のトレース図

数と考えられる。

水温の表面水平分布（第4—b図）には、河口を中心とした舌状分布が認められ、その主方向はトレーサー移動方向と同一である。また、22°C等値線が河川水と湖水との境を示すと予想される。第4—a図に示された、A—A'断面（第1図）での水温鉛直分布における22°C等値線は、河川水を湖水が堰止める形態を示しており、深度5m付近にて湖面に水平となるまで、湖底に沿った形をなしている。潜入地点は、この場合、22°C等値線が湖面と接する地点より河口側に位置すると考えられる。鉛直断面は測定の関係上舌状分布主方向に取っていない点を考慮すると、潜入地点は多少河口より表現されたと考えられる。しかし、トレーサー結果および水質観測結果から、潜入地点は水深約2mの水域に存在すると推定される。



第4図 1984年8月11日の水温の鉛直分布(a)と表面水平分布(b)。



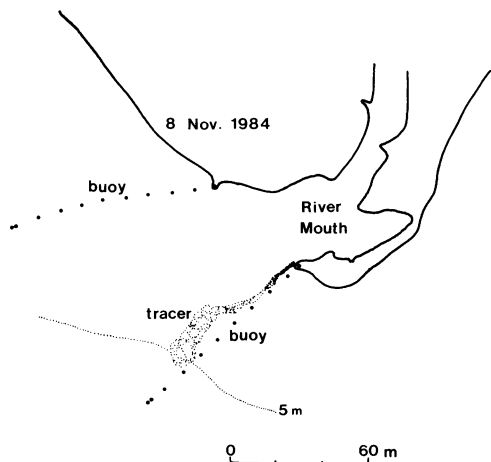
第5図 1984年11月9日のトレーサー移動拡散の時系列写真（撮影高度約150m），矢印はトレーサー位置。
 (1) スタート、(2) 20秒、(3) 60秒、(4) 120秒、(5) 300秒、(6) 最終

一方、秋季部分循環期に相当する11月9日の湯川の流量は $1.57\text{m}^3/\text{sec}$ と夏季に比べ少ないが、単位幅流量は $0.242\text{m}^3/\text{m}\cdot\text{sec}$ であり、夏季の値にはほぼ等しい。また、平均流速も夏季の場合に近い値を示し $0.39\text{m}/\text{sec}$ である。

第5図は、トレーサー移動拡散の時系列写真（スタート時、20秒後、60秒後、120秒後、300秒後、最終）である。1984年度は夏季以降の降雨が非常に少なかったため、湖水水位低下が約1.5mと大きく、河口付近においては、流入水が沿岸に沿う流れと沖合への流れに二分された。トレーサー実験では両者の流れについて実施したが、夏季の場合と比較するために、沖合への流れに主眼を置いた。初期コアは数分間保たれつつ流下した。この時のトレーサー移動速度は約 $0.43\text{m}/\text{sec}$ であり、河川の平均流速から換算された表面流速値

$0.45\text{m}/\text{sec}$ に近い値を示している。この結果は夏季の場合と同じであり、トレーサーの移動が河川水の移動を示していると考えられる。また、300秒後には、トレーサーはほぼ全体的に拡散し、その先端部は湖底状態が確認できる限界点まで到達している。さらに、最終の写真において、トレーサーは完全に拡散混合した状態にあるが、その地点は、300秒後の場合と同じであり、トレーサーが停滞していると判断される。これらの時系列写真を1枚にトレースすると第6図になる。図に示したように湖底状態が確認できる限界を湖沼図と比較すれば水深約5mの水域であると考えられる。トレーサーは明らかにこの限界水域付近にまで到達している。つまり、トレーサー停滞地点の水深は5m前後であると推定される。

また、水質観測結果から、水温の表面水平分布

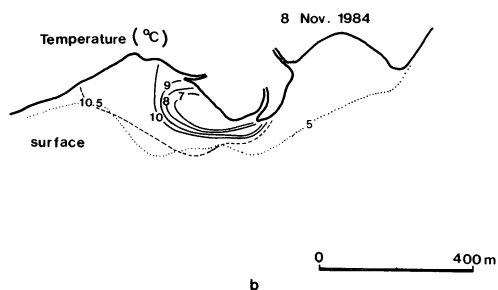
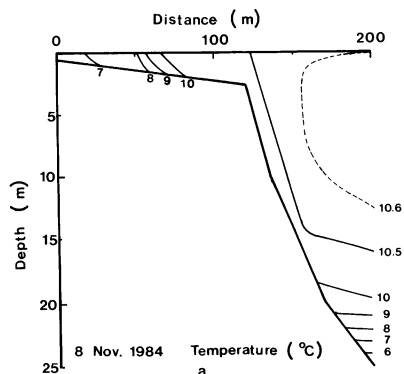


第6図 1984年11月9日のトレーサー移動拡散の時系列写真群のトレース図

およびA—A'断面の鉛直分布を第7図に示した。表面水平分布(第7—b図)において、河口から右岸側の湖岸に沿って広がる舌状分布が認められ、河川水の流入影響が沿岸に沿って強く表われていることを示している。また、10.5°C等値線が舌状分布の外縁の水温である。鉛直分布(第7—a図)における10.5°C等値線は夏季の場合と同様に、湖水が河川水を堰止める様な形態を示し、深度15m付近から湖面に平行になるまで、ほぼ湖底に沿った形態を示している。この時の潜入地点は、10.5°C等値線が湖面と接する地点よりも河口側に位置すると考えられる。この結果とトレーサーによる結果とを考慮すると、潜入地点は、水深約5mの水域に存在すると推定される。

以上のように、秋季の潜入地点は夏季に比べ、水深が深い地点に存在する結果となった。この両時期の間は、単位幅流量および平均流速がほぼ等しいが、河川水と湖水との密度差に大きな相異がある。つまり、秋季の密度差は 3.028×10^{-4} 、夏季の密度差は 2.1173×10^{-3} と、秋季は夏季の七分の一の密度差である。

一般的に、潜入地点は浮力(密度)と慣性力(流量)とが釣り合った地点に存在し、その地点において、流れの形態が急変する。Hebbert *et al.*



第7図 1984年11月9日の水温の鉛直分布(a)と表面水平分布(b)。

(1979)は三角断面で近似した場合の潜入地点水深の算定式を提案し、実測値と比較している。また、江頭・芦田(1978)は潜入地点での圧力差にもとづいて、潜入地点水深(H_P)が流量の $2/3$ 乗($q_0^{2/3}$)と密度差の $-1/3$ 乗($\varepsilon_0^{-1/3}$)に比例することを示した。中禅寺湖について、両者の算定式を応用すると次式の形となる。

$$H_P = 0.742 (q_0^2 / \varepsilon_0)^{1/3}$$

$$\varepsilon_0 = (\rho_R - \rho_S) / \rho_S$$

ここで、 q_0 : 単位幅流量 ($\text{m}^3/\text{m} \cdot \text{sec}$)、 ρ_R 、 ρ_S : 河川水および湖水表面の密度 (Mg/m^3) である。上式によって算定した夏季および秋季の潜入地点水深は2.3mおよび4.3mであり、トレーサーおよび水質観測による結果に近い値を示している。

この結果をもとに、過去の水質観測結果と算定結果とを比較すると、中禅寺湖に流入する湯川の潜入地点水深は、夏季において浅く、春季および

秋季において深いことが認められた。中禅寺湖に流入する湯川の流量は、台風等の大降雨時を除いて、変動は少なく、流入形態が underflow と interflow である期間での、流量の最小と最大の比は 1 対 1.5 である。一方、その期間内での密度差の変動は大きく、数百倍以上となる。この様に、春季や秋季のように河川水と湖水表面水との密度差が小さい場合には、潜水地点は沖合いまでのび、水深の深い水域にて潜り込むが、夏季のように、密度差が大きい場合には、潜入地点は河口に近い水深の浅い水域に生ずると考えられる。つまり、密度差による影響が大きく作用していると考えられる。

IV お わ り に

潜入地点の水深は密度差が小さいほど深くなることを、トレーサー実験、水質観測および算定結果から示したが、結局 underflow から overflow へ、または、overflow から interflow へ流入形態が移行する時期（春季・秋季）に潜入地点水深が深くなることを意味している。つまり、underflow から overflow へ、または、overflow から interflow への移行が 潜入地点移動を介してスムーズになされていることを示すものであり、河川水の流入形態の年サイクルを考える場合大きな意味を有していると考えられる。今後は、各流入形態における混合量と河川水の影響範囲について解明してゆきたいと考えている。

謝 辞

本研究には、財団法人トヨタ財団研究助成「環境調査における簡易空中写真の利用に関する予備的研究」の補助を受けた。記して感謝いたします。

文 献

- 市川 当・田瀬則雄 (1983) : 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, **25**(6), 29—34.
- 江頭進治・芦田和男 (1978) : 貯水池密度流の潜入地点の推定. 第15回自然災害科学総合シンポジウム, 481—482.
- 田瀬則雄・市川 当 (1984) : 気球による簡易空中写真撮影について. 筑波大学水理実験センター報告, **8**, 113—117.
- 田瀬則雄・市川 当 (1985) : 簡易空中写真による水域調査について. 筑波の環境, 筑波大学, **9**, 81—87.
- Bell, H. S. (1942) : Stratified flow in reservoirs and its use in prevention of silting. *U. S. Dept. of Agr. Misc. Bull.*, 491 p.
- Ichikawa, A., N. Tase, and S. Takayama (1984) : Seasonal inflow patterns of river water into a temperate deep lake. *Ann. Rep., Inst. Geosci., Univ. Tsukuba*, **10**, 29—31.
- Hebbert, B., J. Imberger, I. Loh, and J. Patterson (1979) : Collie river underflow into the Wellington Reservoir. *J. Hydraul. Div. Am. Soc. Civil Eng.* **105**, 533—545.