

成層湖斜面上の底泥の再浮上に伴う濁水の貫入現象

Intrusion of Turbid Water in Stratified Lakes Driven by Resuspension of Sediments on Sloping Boundaries

森 川 浩*・大久保賢治**・村本嘉雄***

By Hiroshi MORIKAWA, Kenji OKUBO and Yoshio MURAMOTO

The thermal 'staircase', a layer of constant temperature, was observed in seasonal thermoclines following the resuspension of cohesive sediments resuspension on the shore slope of Lake Biwa. When a moderate onshore wind blew, the bed materials were resuspended up to the mid thermocline with height of 2.5 m above the bottom, and settled down forming the staircase above the intrusion. As the consequence, the thermocline was divided into two layers by the staircase with a thickness of 0.7 m. To investigate the resuspension and settling process due to surface and internal waves in stratified lakes, laboratory experiments were conducted using a tank with a partial slope at one side. When the internal waves generated as the barotropic waves in the tank, the resuspension phenomena occurred frequently. Both surface and internal waves are essential for the resuspension process. In the stratified fluid, the distance and duration of suspended sediment transport are very long compared to that in the non-stratified one due to occurring of the intrusion into the stratified layer.

Keywords thermal staircase, boundary mixing, resuspension, intrusion of turbid water, internal wave

1. はじめに

一般に、湖沼には高含水比の底泥が堆積しており、その底泥の巻上げは湖水への栄養塩類の溶出の主な原因であると考えられている。水温成層が存在しない場合、巻上げは吹送流や風波等により発生するが、成層した湖においては密度差の存在のため底泥の巻上げ機構も複雑になる。例えば、湖の大規模運動である内部静振や短周期内部波の碎波により浮上した底泥は周囲の流体と混合し密度流的挙動を示し、その密度に対応した深度に層を形成して貫入していく。そのため、浮上懸濁物質の浮遊距離・浮遊時間は、非成層の場合と比較してはるかに長くなると考えられる。河川から流入した濁水と同様に、再浮上に伴って形成された濁水も水温躍層付近に中間高濁度層を形成し、長期にわたって滞留する現象がみられる。この中間高濁度層付近では生物・化学的現象も特異であって、環境水理の側面からも注目されている。

底泥の巻上げに関しては、従来より、多くの研究者が取り組んでおり、通常の流れ¹⁾²⁾、波³⁾⁴⁾、流れと波の共存場⁵⁾での底泥の浮上量や限界掃流力を扱った研究がある。一方、沿岸浅水部での摩擦過程に起因する成層流体の混合現象は境界混合 (boundary mixing) と呼ばれ、振動格子を用いた実験⁶⁾⁷⁾や内部波を発生させた研究⁸⁾、また、湖における観測例⁹⁾もある。これらは境界での流体混合量に主眼を置いているが、工学

* 学生員 京都大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (〒606-01 京都市左京区吉田本町)

** 正会員 工博 岡山大学助教授 環境理工学部環境デザイン工学科 (〒700 岡山市津島中 2-1-1)

*** 正会員 工博 京都大学教授 工学部土木工学教室 (〒606-01 京都市左京区吉田本町)

的には境界混合に伴う浮上量の評価と形成される濁水が貫入する機構が重要であると考えられる。本研究では以上の観点から、成層した湖の湖底斜面上における底泥の再浮上および輸送現象を扱う。まず、1994年の琵琶湖北湖の湖岸付近で実測された特徴的な水温・濁度変動について考察した後、成層した流体中での底泥の再浮上に関する室内実験の検討結果について述べる。

2. 底泥の再浮上に伴う一定温度層の形成

琵琶湖南湖のような浅水湖においては、日周または季節的な変動によってしばしば非成層状態となり、風応力の影響が湖底まで達し、底泥の巻上げによる湖水の濁りが生じる。一方、北湖でも上述のようなプロセスに加え、数秒の界面波から40数時間の内部静振に至るまでの広い周期帯で濁度変動が発生する。図-1は、そうした状況の模式図であり、再浮上で形成された濁水は躍層内を水平方向に貫入していく。貫入流体はほぼ等温、等密度であると考えられるため、水温の鉛直分布は躍層付近でステップ状になり、この傾向は沖側で顕著である。また、底泥の浮上量が大きい場合には懸濁質による密度変化が水温差による密度差を補償するため、形成された水温逆転層が長期間持続することもある。

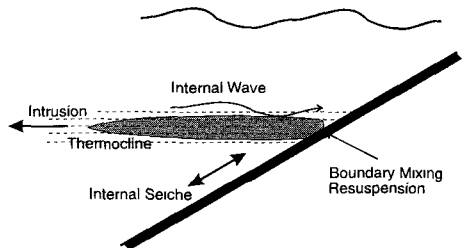


図-1 底泥の再浮上に伴う濁水の貫入現象

さて、琵琶湖北湖の観測を行った1994年の夏は渇水であったため、測定された濁度の起源は河川流入水ではなく明らかに湖底の底泥であると考えられた。境界混合による再浮上現象を捉えるため、9月の水位低下時に琵琶湖北湖の観測点を移動しながら観測を行った。13日は野洲川沖水深18m地点で湖底上50cmの高さに光学式濁度計(MA212D: (株) 北斗理研)を固定し、出力は船上のFFTアナライザ(R9211A/E・デジタル・スペクトラムアナライザ, (株) アドバンテスト)によって周波数スペクトルをモニターした。

図-2は4回の測定を行った後、それらの記録をつないで表示したもので、縦軸は出力電圧を表し、横軸の時間1目盛は1分である。これらの波形はハイパスフィルターにより濁度レベルの緩やかな増減(トレンド)の除去された相対的な表示であるが、FFTアナライザの出力電圧が50mV以上になって振り切る場合の濁度計の表示は70~100 mg/lの濃度ピークに対応していた。図-2をみると、約180秒の周期で濁度変動が間欠的に発生しており、それが活発になるときは2秒程度のかかなり激しい濁度変動が存在する。この年は水温躍層の密度勾配が例年の2倍程度も強かったが、最大浮力振動数に対応する周期は45秒程度であって、むしろ濁度の高周波変動は風波や界面波の周期成分に近いと考えられた。また、小規模な内部波による巻上げに伴う濁度変動にも、いくつかの周波数成分が重なっていることがわかる。

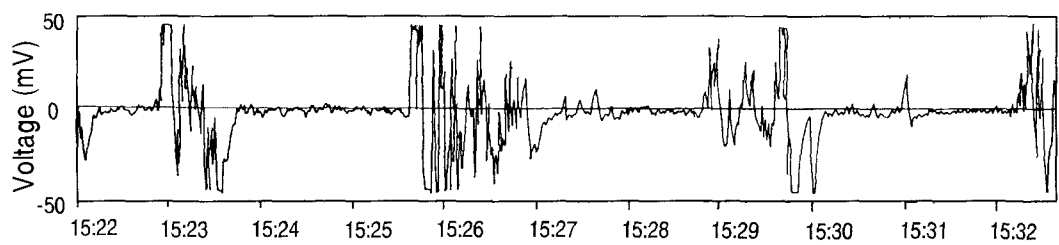


図-2 濁度(電圧)変動記録(1994年9月13日, 琵琶湖北湖水深18m)

このとき濁度計直上に、10cm 間隔40層のサーミスタチェーンを取り付けて断続的に水温測定も行っている。縦軸にサーミスタの水深、横軸に時間をとり、上述の濁度測定前後の水温記録を0.5℃ごとコンタで示したものを図-3に示す。ただし、(a),(c)図のデータ間隔はともに1秒間隔であるが、(b)図では10秒間隔で

ある。(a)図では 15.5 m 付近の躍層中間部に温度勾配の弱い層が見られるが、(b)図の時間帯で発生した巻上げにより、この層の温度勾配はほとんどなくなって、(c)図では一定温度層と変温層が交互に並ぶステップ構造が形成されている。この約 22.8 °C の一定温度層は、18 °C 層にピークを有する同日の中間高濁度層の直上に形成されたもので、その厚さは約 70 cm であった。また、(b)図の前半部分には巻上げの影響による周期的な水温変動がみられる。今回用いた 40 層水温計では一定温度層に 6~7 点のサーミスタが入っており、海洋でみられるもの¹⁰⁾よりスケールは小さいが確かに存在することがわかる。また、1 時間程度で形成されることをみると、その時間的な変化も相当著しいと推察される。

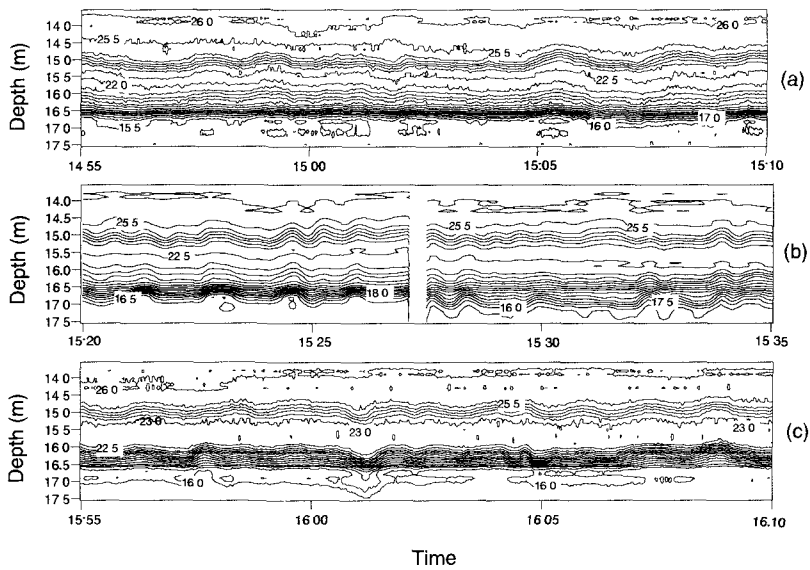


図-3 水温変動記録 (1994 年 9 月 13 日、琵琶湖北湖水深 18m)

このように湖水に流入した濁水は河川流入濁水とともに、躍層近傍に貫入し、高濁度層を形成する。中間深度で濁度がピークをとる特性を考えると、ピーク以深は水温が安定で、濁度は不安定成層を形成する二重拡散現象のフィンガー領域であるのに対し、ピーク以浅は、水温分布はほぼ中立状態で、濁度が安定分布を示す¹¹⁾。濁水近傍の水理現象を Maxworthy ら¹²⁾に倣って描くと図-4 のようになる。T は水温、C は濁度を表すが、彼らの図では濁度の代わりに塩分濃度が用いられている。貫入濁水の上部界面では分子拡散が、下部界面ではフィンガーが卓越することになる。

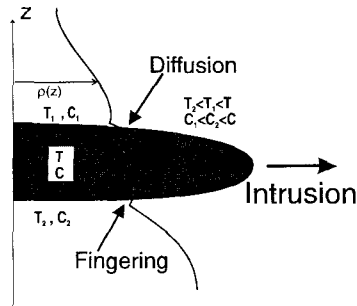


図-4 貫入層近傍の諸量の鉛直分布形

3. 成層流体中における底泥の巻上げに起因する濁水の貫入実験

3 1 実験の概要

成層した湖の湖岸付近で発生する底泥の再浮上とそれに伴う濁水の水平貫入過程を検討するために室内実験を行った。実験に用いた水槽は図-5 に示すように有効長 4 m、幅 10 cm、高さ 25 cm の透明アクリル製である。水路下流端には起振部が上下する造波機が設置してあり、振幅および周期はいずれも可変である。水路下流端には勾配 2/5 の斜面を設置しており、表面は粒径 2 mm の砂を密に糊着させた粗面である。その粗

面上に含水比 100%にしたカオリンを厚さ 2 mm 程度に敷き詰めた。ただし、表面波によって上層内で巻き上げられる懸濁質の混入を抑えるため、斜面上の水深 3 cm 以浅部分にはカオリンは置かれていない。実験は 2 層状態から開始するが、今回は密度差を水温差のみで与え、その層厚は上下ともに 9 cm とした。密度差を水温で発生させた場合、実験室の規模では密度界面のみが上下する内部波 (baroclinic wave) は生じにくく、さらに、底泥を再浮上させるには底面せん断力が不十分と考えられたため、本研究では自由水面とともに上下する内部波 (barotropic wave) により実験を進めた。したがって、浮上の限界条件や初期過程は均質振動流中で行われた巻き上げ実験と類似であると考えられるが、浮上後の過程は成層の存在のために大きく異なると思われる。実験は造波機の振幅と周期を変化させて進めており、表-1 に今回行った実験条件を示した。初期温度差はいずれも 20℃ に設定して 2 層状態をつくったが、この際、冷却されて温度が変化することもあった。また、図-5 のように 5mm 間隔、32 層のサーミスタチェーンと 2 次元電磁流速計 (VM-801H, VMT2-200-04P : (株) ケネック)、およびカオリン検定を行った 2 組の透過式濁度計 (PC-106-2, PCT-2503 : (株) 東京計測) を設置した。流速計は斜面鉛直上 1.5cm にあり、濁度計 NO.1 は流速計と同じ位置に、濁度計 NO.2 はさらにその鉛直上方 4cm に設置している。

3. 2 底泥の再浮上・濁水貫入過程

斜面上を伝播する内部波の挙動に関しては室田ら¹³⁾による研究があり、内部波の碎波に伴う上・下層の混合現象は界面付近での希釈が主体であるとしている。一方、barotropic 波を用いた本実験では、密度界面が斜面上を往復する際に、斜面上での境界混合とともに底泥の再浮上現象がみられる。底泥表層部は表面波の周期で往復運動するが、やがて波の進行方向に再浮上していく。浮上した底泥は境界混合で形成された中間密度流体に混入し、濁水が水平方向に貫入していく状況が確認され、目視においては波の遡上時より後退時の方がより多くの巻き上げが観測された。写真-1 は今回行った実験の中では最も多くの浮上量みられた A9 の連続写真を 20 秒ごとに並べたものである。濁水貫入部は図-1 および図-2 で示したような形状をもち、その先端部は時間とともにほぼ線形的に進行している。波の遡上時には 80 秒後の写真のように先端部が斜面岸方向に押し戻されることもあった。

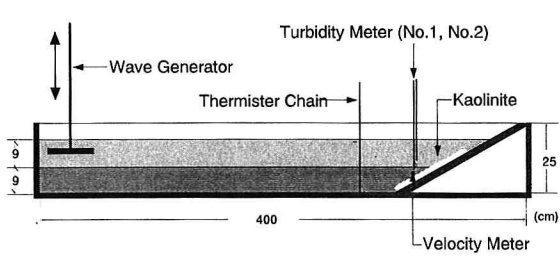


図-5 実験装置

表-1 実験条件

RUN	造波機振幅 A (cm)	造波機周期 T (sec)	初期温度差 Δt
A1	2	8.63	20
A2	2	3.98	
A3	2	2.65	
A4	3	8.63	
A5	3	3.98	
A6	3	2.65	
A7	4	8.63	
A8	4	3.98	
A9	4	2.65	

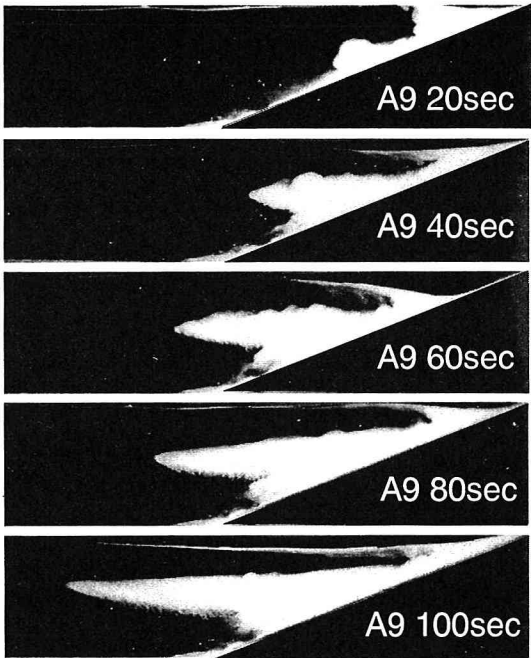


写真-1 再浮上後の濁水貫入過程 (A9)

波の進行方向に再浮上していく。浮上した底泥は境界混合で形成された中間密度流体に混入し、濁水が水平方向に貫入していく状況が確認され、目視においては波の遡上時より後退時の方がより多くの巻き上げが観測された。写真-1 は今回行った実験の中では最も多くの浮上量みられた A9 の連続写真を 20 秒ごとに並べたものである。濁水貫入部は図-1 および図-2 で示したような形状をもち、その先端部は時間とともにほぼ線形的に進行している。波の遡上時には 80 秒後の写真のように先端部が斜面岸方向に押し戻されることもあった。

3 3 実験結果

造波機の振幅および周期を変えることにより斜面上での流速や波の波高を変化させることができる。実験では、斜面上で計測された最大流速は概ね造波機の振幅と角振動数の積に比例した。その結果、計測された水温変動や濁水貫入過程は各実験により大きな違いがみられた。図-6、図-7はそれぞれ実験 A2 および A9 の水平流速、流速ベクトル、濁度、水温分布の時間変動記録であり、記録開始と同時に造波機を起動させている。ただし、水平流速は斜面岸方向が正であり、ベクトル図は紙面向かって右側に斜面があるとしたときの図である。

図-6 の水平流速図をみると記録開始と同時に振動流速が発生しているが、その中に波連が存在している。高周波の造波成分を除外してみると、周期約 20 秒の水槽固有の振動が存在している。2. の琵琶湖の例では、風波が減衰したのに対し実験では強制外力が継続的にかかっていることになるので、成層破壊が進行する。そのため、次第に連続成層へと移行していき、完全に定温ではないが、温度勾配の緩い中間層が形成されていくのが水温分布図よりわかる。濁度の最大値は濁度計 NO.1 では 3.1mg/l であり、実験前半部においてピークをとる。これに対し、NO.2 の濁度計では実験後半にピークをとり、その値は 4.25mg/l である。これは、実験前半部では下層付近で再浮上が発生しており NO.2 の濁度計までは濁水が到達していないが、成層が破壊されるにつれて濁水が持ち上がり、濁度計 NO.2 が大きく変動したと考えられる。また、この程度の流速では（最大流速 5.48cm/s）、連続的に巻上げが生じることはなく、実験初期にのみ巻上げがみられた。これは、従来の研究でも指摘されているように、底泥の初期の含水比は深さ方向に変化していることなど、底泥の内部特性に関係していると考えられる。

図-7は先ほど写真で示した A9 の実験結果である。ベクトル図をみると斜面に沿った流れが卓越

しており、とくに、後退時に流速が大きい。これは目視において観察されたように、後退時に浮上量が多いという事実と一致する。2 つの濁度計はいずれも大きく変動しておりその値は 40mg/l に達し、A2 と比較して 10 倍程度大きい。水温分布は A2 に比べ実験開始直後より激しく変動しており、とくに濁水貫入の先端部がサーミスタチェーンに到達した 70 秒後には最も複雑な水温変動がみられる。

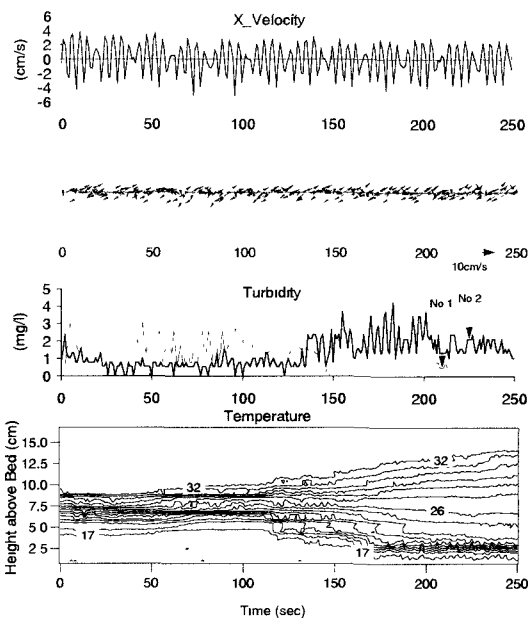


図-6 流速、濁度および水温変動記録 (A2)

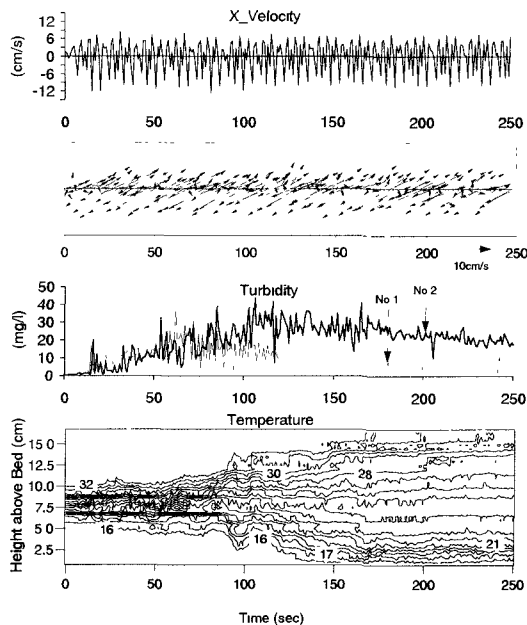


図-7 流速、濁度および水温変動記録 (A9)

4. おわりに

成層した湖の斜面上における再浮上現象と、それらに続いて生じる濁水貫入現象について、琵琶湖での観測結果に基づいて考察した。また、現地では測定が困難な濁水貫入の詳細過程を明らかにするため水理実験を試み、水温構造の変化と濁水の挙動について検討を行った。本研究において得られた知見をまとめると以下のである。

- ① 成層湖の斜面上における境界混合および底泥の再浮上により濁水貫入現象が形成が発生する。このとき一定温度層が形成されてステップ状の水温分布が形成されることがある。これは懸濁質の沈降に伴い熱が下向きに輸送されたことを裏付けるものと考えられる。
- ② 室内実験においても同様の現象が確認されたが、今回行った密度差では、表面波が湖底を叩くことで、底泥表層部が浮上可能となり、とくに波の後退時に底泥が浮上する状況が実験で認められた。
- ③ 実験初期に底泥の浮上量が大きく、継続的な外力により再浮上が連続的に発生する条件では、水平貫入が発達し、浮遊距離は非成層の場合と比べて大きい。

参考文献

- 1) 大坪国順・村岡浩爾・底泥の物性および限界掃流力に関する実験的研究, 土木学会論文集, 第 363 号/II-4, pp.225-234, 1985.
- 2) 大坪国順・村岡浩爾: 流れによる底泥の飛び出し率, 土木学会論文集, 第 375 号/II-6, pp.43-52, 1986.
- 3) 柴山知也・中西雅明・石原 肇・佐藤慎司・波による底泥の浮遊機構に関する研究, 第 34 回海岸工学講演会論文集, pp.271-275, 1987.
- 4) 三村信男・田口 智・加藤 始: 波による底泥の巻き上げ・沈降フラックス, 第 36 回海岸工学講演会論文集, pp.309-313, 1989.
- 5) 鶴谷広一・江口秀二・鷹濱 潤: 流れと波による底泥の巻き上げに関する実験的研究, 第 35 回海岸工学講演会論文集, pp.357-361, 1988.
- 6) Ivey, G. N., Corcos, G. M.: Boundary mixing in a stratified fluid, J. Fluid Mech., Vol. 121, pp. 1-26, 1982.
- 7) Phillips, O. M., Shyu, J-H., Salmun, H.: An experiment on boundary mixing: mean circulation and transport rates, J. Fluid Mech., Vol. 173, pp. 473-499, 1986.
- 8) Ivey, G. N., Nokes, R. I.: Vertical mixing due to the breaking of critical internal waves on sloping boundaries, J. Fluid Mech., Vol. 204, pp. 479-500, 1989.
- 9) Caldwell, D. R., Brubaker, J. M. Neal, V. T.: Thermal microstructure on a lake slope, J. Limn. Oceanog., Vol. 23, pp.372-374, 1978.
- 10) Marmorino, G. O., Brawn, W. K., Morris, W. D.: Two-dimensional temperature structure in the C-SALT thermohaline staircase, Deep-sea Res., Vol.34, pp.1697-1676, 1987.
- 11) 大久保賢治・村本嘉雄・森川 浩・江副 哲: 琵琶湖における水温・濁度の変動過程, 京都大学防災研究所年報, 第 35 号 B-2, 1995. (印刷中)
- 12) Maxworthy, T., Browand, F.K.: Experiments in rotating and stratified flows: oceanographic application, Ann. Rev. Fluid Mech., Vol. 6, pp. 273-305, 1974.
- 13) 室田 明・平田健正・道奥康治: 内部重力波の斜面上における砕波現象について, 土木学会論文報告集, 第 301 号, pp61-70, 1980.