

成層湖における濁水貫入層の形成機構

Generation of Turbidity Intrusion in Stratified Lakes

森 川 浩*・大久保賢治**・村本嘉雄***・江 副 哲****

By Hiroshi MORIKAWA, Kenji OKUBO,
Yoshio MURAMOTO and Satoru EZOE

Several layers with high turbidity were observed in the seasonal thermocline of Lake Biwa. These layers were generated by the turbidity intrusion following the boundary mixing and the resuspension of sediments on the shore slope. The process should contribute to the vertical mixing, diffusion and redistribution of matters in stratified lakes. An intermediate nepheloid layer was found to be generated within one day, and moved vertically by the internal seiche. To investigate the mixing phenomena near a sloping boundary and turbidity intrusion into a stratified fluid, laboratory experiments were conducted using a stirring rotor and a two layer stratified water tank with a partial slope at one side. After a mixing region was developed, mixed fluid intruded horizontally into the thermocline. The behavior was discussed referring to the density difference of two layers.

Keywords: stratified lake, boundary mixing, resuspension, turbidity intrusion, intermediate nepheloid layer

1. はじめに

湖底付近の乱れによって起こされる混合現象と底泥の再浮上現象は湖水を懸濁させるだけでなく、そこに含まれる水質諸因子の湖中への溶出の支配的機構と考えられる。成層がない場合、浮上した底泥は通常の流れと拡散過程により湖内に輸送される。一方、成層した湖では巻上げは抑制されるがひとたび浮上すれば周囲流体と混合して濁水塊となり、その密度に対応した深度に層を形成して水平貫入していく。そのため、懸濁物の浮遊距離、滞留時間は、非成層の場合と比較して長くなる¹⁾。その形態は河川から濁水が流入した場合と同様に、水温躍層付近に中間高濁度層を形成する。その貫入速度は密度差とともに大きくなるため、湖中への濁水流入は成層の強い夏季ほど迅速であるといえる。また、中間高濁度層では生物・化学現象も特異であって、環境水理学見地からも重要である。

本研究では 1996 年の 9 月と 10 月に琵琶湖北湖で行った観測結果に基づいて成層湖における水温の変動機構と濁水貫入過程について明らかになったところを述べる。一連の観測で水温・濁度の同時鉛直分布を

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

観測したが、貫入の速度、幅、向き等についてはなお不明な点もある。これらについては水理実験を行い、特に、画像処理によって周囲流体との混合特性及び、濁水貫入の形成機構を検討している。

2. 成層期の琵琶湖における水温・濁度の変動機構

季節的条件や日周の変動によって頻繁に非成層状態に遷移する浅水湖においては、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、深水湖の湖岸付近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の内部波に起因する濁度変動が発生する。また、摩擦に起因する成層流体の斜面上での混合現象は境界混合と呼ばれ、成層を有する湖沼や貯水池等においては、それが鉛直混合を発生させる支配的機構である。その混合流体は密度バランスを保つ深度に水平貫入していく。貫入する混合流体はほぼ等温、等密度と考えられ、躍層付近で水温の鉛直分布はステップ状になり、この傾向は沖側で顕著である。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増大して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。しかし、通常の濁水貫入では、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、ピーク以浅の水温分布はほぼ中立状態で、濁度が安定分布を示すことが多い²⁾。

2.1 観測の概要

観測は 1996 年の 9 月 9、10 日と 10 月 2、3 日に琵琶湖北湖、和邇川および野洲川沖の水深 10～30m 地点において行った。測定項目は水温と濁度であり、RS232C 出力型水温・濁度計（アレック電子㈱、ATU-40）に水深計を取り付け観測点を移動しながら水温・濁度の鉛直分布測定を行った。鉛直分布の測定間隔は 10cm 程度であり、およそ 5 分で 1 プロファイルの測定を完了した。明瞭な貫入層が見出された場合には船を固定して分布測定を繰り返した。また、10 月の観測ではメモリー式水温計のチェーンを水深 22m 地点に設置し、躍層面の上下変動をモニタリングした。

2.2 中間濁水層の形成

図-1 は 9 月 10 日に水深 18m 地点から沖方向に船を移動させて観測した水温 (T) および濁度 (C) の鉛直分布である。(a)～(d) 図の間、水深は 18m～24m に変化している。9 月初旬の表層水温は約 25℃、躍層上端の深度はおよそ 12m であり、躍層厚は 10m 以上ある。(c)、(d) 図では躍層直上に 4～5mg/l 程度の中間高濁度層が存在しており、(a) 図にも弱いながら存在する。また、いずれの図においても躍層内の水深 16m 付近に複数の中間濁水層が形成されている。躍層と湖底斜面の交会する深度において境界混合と底泥の再浮上が発生し、形成された濁水が沖方向に貫入している現象と考えられる。貫入層は水温ステップと対応しており水温鉛直分布のみでも境界混合を検討することは可能であるが³⁾、濁度の鉛直分布の実測によって貫入層がより明確に把握できる。

図-2 は 10 月 2 日の水深 26m 地点における定点連続観測の水温・濁度鉛直分布を約 10 分間隔で示したものであって、水温、濁度についてそれぞれ 2mg/l、10℃のオフセット表示としている。湖面から湖底まで濁度値は低く、躍層直上の高濁度層は明瞭ではない。躍層内部の濁度値も高くないが、

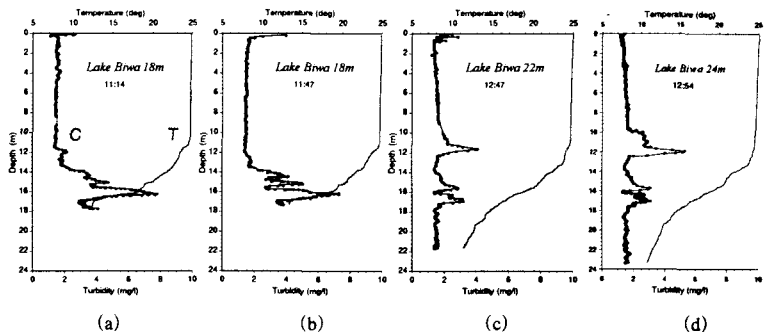


図-1 水温・濁度の鉛直分布 (1996 年 9 月 10 日)

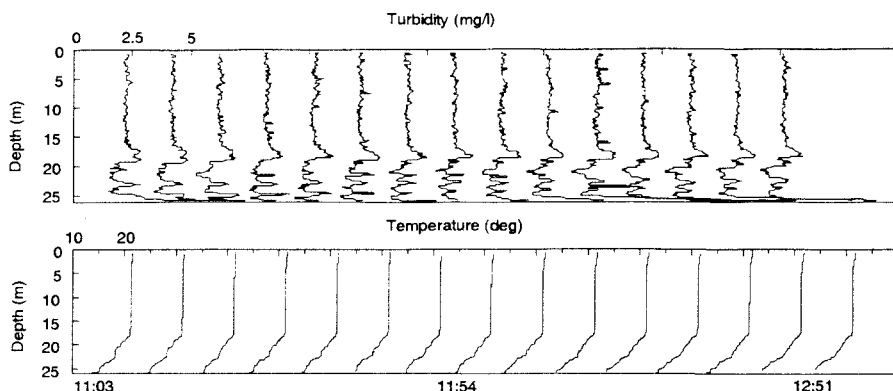


図-2 水温・濁度の連続鉛直分布 (10月2日, 水深26m)

複数の濁水層が長時間持続されており、水温分布にもステップ状の形態がみられる。これら2つの観測結果が示すように、躍層が厚い場合には境界混合によって濁水貫入層が複数発生し、湖水の混合現象が徐々に進行していくといえる。このような状況での底泥の再浮上による濁水貫入と水温・濁度の鉛直分布を模式的に表すと図-3のようになると考えられる。

2.3 躍層の上下変動に伴う濁水層の挙動

深い成層湖において、最も大規模な湖水流動を引き起こすのは内部静振であって、秋になって成層強度が弱まるとその振幅・周期とも大きくなる。図-4は、10月の観測において琵琶湖北湖水深22m地点の湖底上40cm～160cmに設置したメモリー式水温計による測定結果である。2,3日の各観測終了時に水温が高く、3日午後では躍層の下降を捉えていたことになる。3日の4時から8時頃にかけては激しい水温変動がみられ、斜面上で混合が進行していると考えられる。

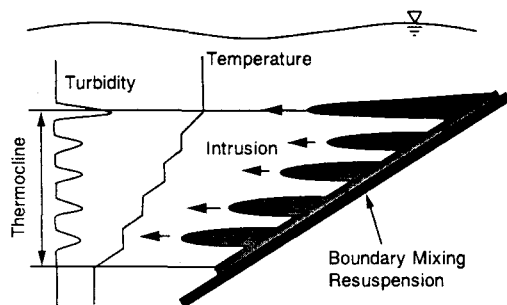


図-3 躍層が厚い場合の濁水貫入層の模式図

内部静振によると思われるこうした躍層の大規模な上下動によりその直上の濁水層も変動する。図-5は10月3日の9:59～13:31に水深26m地点において得られた水温・濁度の鉛直プロファイルであり、約3.5時間の測定時間内におよそ4m水温分布の躍層上面が低下している。また、濁度分布には前日にはみられなかった躍層直上の中間高濁度層の存在が明確に認められる。この中間高濁度層は躍層の動きにあわせてそ

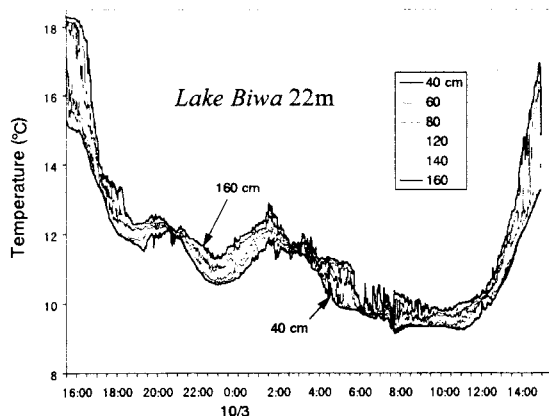


図-4 水温変動記録 (水深22m, 10月2日～3日)

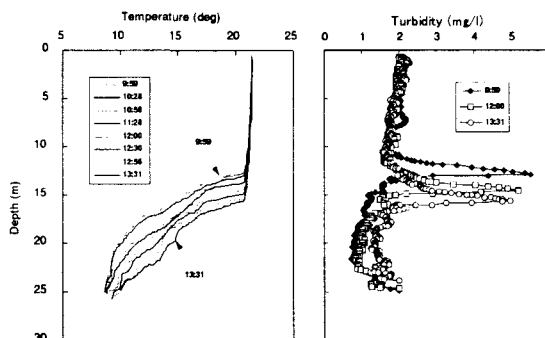


図-5 躍層下降時の水温・濁度分布 (水深26m, 10月3日)

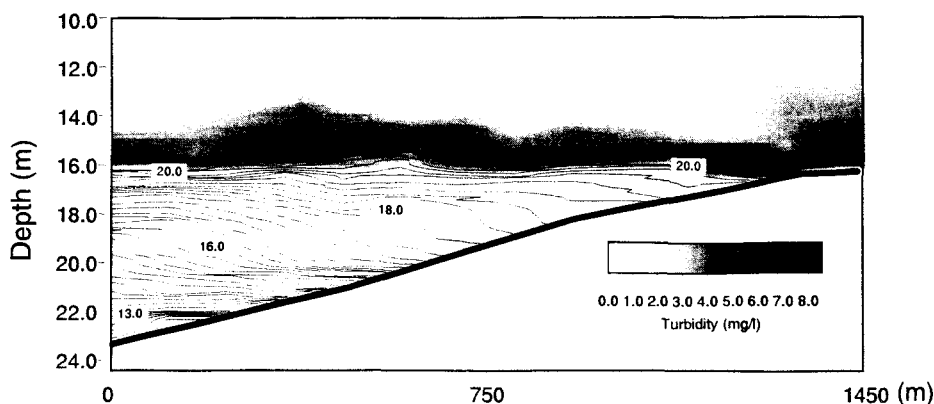


図-6 水温・濁度の空間分布 (10月3日)

の深度を大きく変化させており、緩やかな躍層の動きが濁水層を破壊することなく存続させているといえる。この時点で躍層が下降していることは確実に判断されたので、中間高濁度層の空間的構造を捉えるべく、迅速に移動観測を行い、約30分で測定した結果を図-6に示す。ここには、0.5℃毎の水温コンターと濃淡で表現した濁度値とを同時に示した。斜面上の水温分布をみると躍層下降時に特有の水温勾配の緩い部分が存在しており、躍層内の定温層（ステップ）が形成されたことに対応していると考えられる。また、明瞭な中間高濁度層が躍層直上に横たわっており、図中500m地点にみられる弱い内部波の動きに呼応して変動している様子も確認できる。前日の結果（図-2）から考えてこの中間高濁度層は1日足らずで形成されたものである。また、数時間前に同様の観測を行っていただければより浅い12m地点に同じ濁水層が存在していたはずである。このように濁水貫入層は極めて動的な挙動を示し、その形状も図-3で模式的に示したほど単純でないことがわかる。図-7は10月の観測中、水深26m地点で採取した底泥の粒度分布を示すが、粒径の分布範囲が非常に大きい。濁水貫入層内の粒度分布とは同様ではないが、これに伴う沈降速度の分布や水温構造によって底泥の浮上特性が大きく変化すること⁴⁾も考慮に入れて湖中の懸濁質の輸送過程を検討する必要がある。また濁水層の発生・維持・消散機構を解明するためにはさらに詳細な観測が必要であると考えられる。

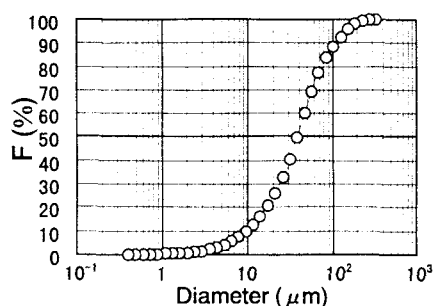


図-7 水深26m地点における底泥の粒度分布

3. 成層流体中における濁水混合域の形成に関する水理実験

3.1 実験の概要

成層した湖の斜面上で発生する底泥の再浮上と濁水の形成過程、さらに濁水形成後の水平貫入過程について今回は以下のような室内実験を行った。濁水貫入の発生方法は Schooley ら⁹⁾や Amen ら⁶⁾が成層流体中における混合域の形成機構とその崩壊過程の解析に用いた実験方法を

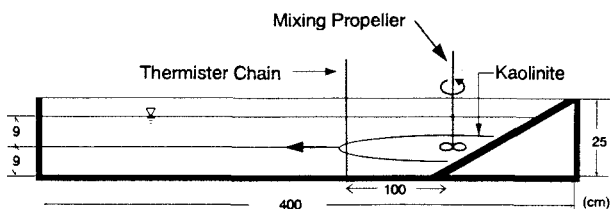


図-8 実験装置の模式図

応用した。すなわち、予め作成した成層流体中において回転式プロペラによって斜面上のカオリンを浮上させ、続いて生じる濁水貫入の形状と貫入速度及びその深度等について検討した。実験に用いた水槽は図-8に示すように有効長4m、幅10cm、高さ25cmの透明アクリル製であり、水路下流端に勾配1/5の斜面

を設置し、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 80%にしたカオリンを厚さ 5mm 程度に敷き詰めた。実験は 2 層状態から開始するが、密度差を水温と塩分によって与え、その層厚は上下ともに 9 cm とした。実験は 5 ケース行い、初期温度差はいずれも 20℃であり、T1～T5 までの塩分濃度差はそれぞれ 0, 5, 10, 20, 30g/l である。塩分濃度を上げたのは大きな密度差を得るためであり、T5 の場合は夏季の汽水湖の過安定状態に相当している。

水温測定には、5mm 間隔 32 層のサーミスタチェインを貫入距離測定の基準面から 1m の地点に設置した。また、水路側面より市販のデジタルビデオカメラにより濁水貫入の様子を撮影した。このデジタルカメラは静止画入力端子を備え付けており、静止画をパソコンに取り込むことにより、濁水貫入の発達機構を一定間隔で把握できる。その取り込んだ静止画をグレースケール 256 階調に変換し、その輝度（白さレベル）と予め行った検定により濁度に変換して解析を進めた⁷⁾。

3.2 実験結果

昨年度行った実験¹⁾では、造波機によって生じた波が湖底を叩くことで底泥が浮上し、波による物質輸送と共に濁水貫入が発生した。このとき生じた貫入は躍層直上でみられるものが卓越した。今回の実験においては、プロペラ攪拌子の回転により生じる水流が成層流体を混合させると同時に底泥を再浮上させ、混合領域が発達した後、濁水がその密度に対応した水深に貫入していく様子が観察された。水深が浅いために貫入層は 1 本しか発生しなかったが混合濁水の発生機構は現地の躍層内において発達する斜面起源の貫入層に近いと考えられる。

図-9 は塩分を加えていない実験 T1 のプロペラ始動 16 秒後から 2 秒間隔で静止画を取り込み、それを画像処理することにより、濁度に変換した図である。プロペラの回転により鉛直方向に厚い濁水混合域が発生し、徐々に層厚を減少させて水平方向に進行していく。貫入層内部

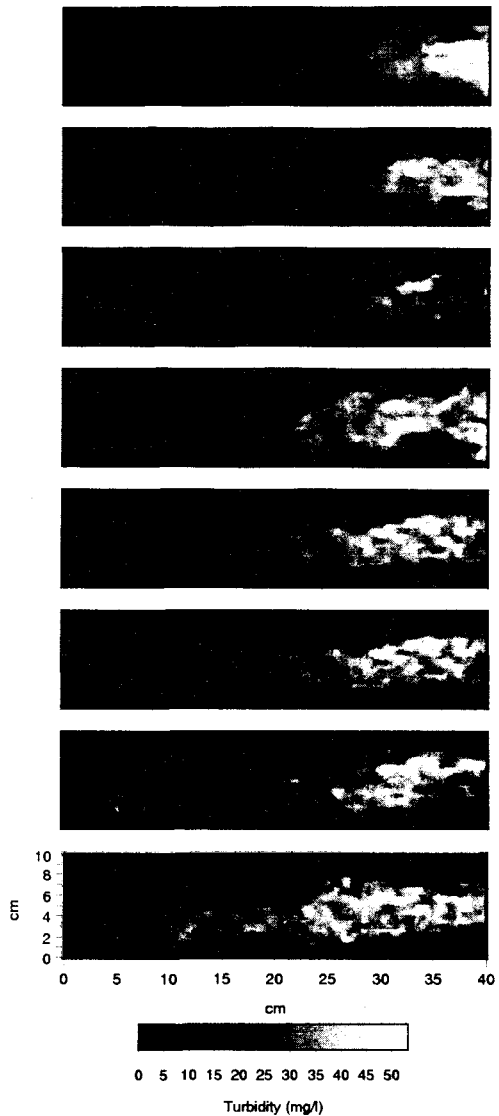


図-9 濁水貫入の形成過程 (RUN T1)

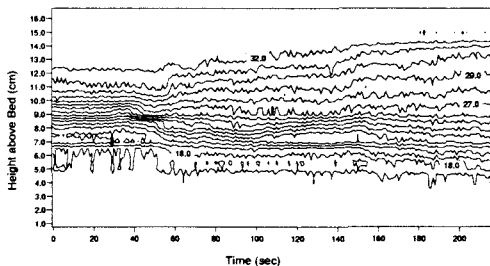


図-10 水温鉛直分布の連続記録 (RUN T1)

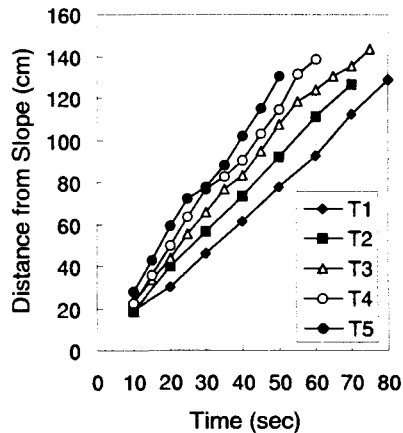


図-11 濁水貫入の先端位置の変動

はプルーム的な形態を持ち、濁度にばらつきがある。実際の成層湖においても初期の混合域は均一ではなく、貫入の進行につれて混合が促進され、さらに、貫入層上下面の連行・拡散過程によって中間深度にピークを持つ濁水層が形成されると考えられる。図-10 にサーミスタチェーンによって測定した水温の鉛直分布を示す。プロペラ始動 60 秒後に貫入の先端が到着し、躍層内部の貫入層下方に弱いステップを成す定温層の形成が認められる。

貫入の流入速度については従来数多くの研究がなされており、2 成層状態⁸⁾、線形成層^{9),10)}を対象とした研究がある。流入流量が一定、濁水形状が等しい場合には上下間の密度差が大きいほど貫入速度は大きくなる。本実験においても密度差によって 2 倍近く貫入速度は変化し、ほぼ線形に進行した。図-11 は斜面中央部を基準にして濁水貫入層の先端位置の移動を示した図であって、密度差が大きいほど貫入速度は大きくなる。成層強度による貫入速度の変化を現地においても検討する必要がある。

4. おわりに

琵琶湖での観測結果に基づいて成層した湖の斜面上における境界混合と再浮上現象、続いて生じる濁水貫入現象、さらに内部静振による躍層の上下動に伴う躍層上部の濁水層の大規模な変動過程について考察した。また、濁水貫入の形成過程を検討するために基礎的な水理実験を行った。本研究において得られた知見をまとめると以下のようである。

- 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の水平貫入現象が生じる。躍層厚が大きいときには複数の濁水貫入が発生する。
- ② 躍層直上の中間高濁度層は表水（上部混合）層内の沿岸部で発生し、内部静振による躍層の動きと呼応し大きく変動する。
- ③ 今回の実験では斜面上の境界混合により濁水が形成された後、躍層内部に濁水の水平貫入が発生し、その進行速度は密度差に依存した。

今後、室内実験を継続させ、密度界面の連行特性、濁水貫入層内部の流動特性を画像解析によって解明していきたいと考えており、一方、冬季の観測も継続して行っている。

謝辞：琵琶湖での観測、室内実験、図面作成を通して熱心に協力して頂いた京都大学工学部土木工学科 4 回生、浜口一郎君に感謝いたします。

参考文献

- 1) 森川 浩・大久保賢治・村本嘉雄：成層湖斜面上の底泥の再浮上に伴う濁水の貫入現象，水工学論文集，第 40 巻，pp.607-612，1996。
- 2) 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 38 号 B-2，pp.407-422，1995。
- 3) Caldwell, D. R., Brubaker, J. M. Neal, V. T.: Thermal microstructure on a lake slope, J. Limn. Oceanog., Vol. 23, pp.372-374, 1978.
- 4) Ariathrai, R. and Arulanandan, K.: Erosion rates of cohesive soils, ASCE., Vol.104, pp. 279-283, 1978.
- 5) Schooley, A. H., Hughes, B. A. : An experimental and theoretical study of internal waves generated by the collapse of a two-dimensional mixed region in a density gradient. J. Fluid Mech., 51, pp.159-175, 1972.
- 6) Amen, R., Maxworthy, T.: The gravitational collapse of a mixed region into a linearly stratified fluid. J. Fluid Mech., 96, pp.65-80, 1980.
- 7) 森川 浩・大久保賢治・村本嘉雄：成層湖の斜面上における底泥の再浮上および濁水貫入に関する研究，土木学会第 51 回年次学術講演会講演概要集，pp.508-509，1996。
- 8) Kao, T. W., Park, C., Pao, H.: Inflows, density currents, and fronts. Phys. Fluids, 21, pp.1912-1922, 1978.
- 9) Lemckert, C. J., Imberger, J. : Axisymmetric intrusive gravity current in linearly stratified fluids. J. Hydraulic Engrg., ASCE, 119(6), pp.662-679, 1993.
- 10) Imberger, J., Thompson, R. O. R. Y., Fandry, C.: Selective withdrawal from a finite rectangular tank. J. Fluid Mech., 78, pp.489-512, 1976.