

夏季のレマン湖内ローヌ川河口付近での湖水と河川水の混合状態について

—2004年と2005年の観測報告—

長谷川(石黒) 直子・大久保 賢治

はじめに

スイス西部に位置するレマン湖には融氷起源のローヌ川が流入する。ローヌ川の水は夏季でも水温が低く、濁度が非常に高い。この河川水は河口で流入すると大きな渦を生じて湖水と混合し(写真1に河川水流入直後の湖水との混合状態を示す)、大きな粒径の砂は即座に沈降し、残った流入水はやがて勢いを失って貫入すると考えられている。この高濁度水は河口付近で二層に分岐することが以前から指摘されていたが(Giovanoli: 1990)、観測データに基づいて報告された例はなく、詳細はあまりよくわかっていない。

筆者らは湖が成層し湖表層水と河川水の水温差が大きい夏季のローヌ河口域での混合状態について詳しく把握するために、2004年9月と2005年9

月に現地観測を行った。本論文ではそれらの観測から得られたいくつかの新しい知見について考察する。

観測方法

観測は図1に示すローヌ川河口付近にあたる地点で2004年9月6日と2005年9月13日に行った。写真1に示した部分の混合状態は常に激しく変動している。今回観測した河口観測地点は写真1に示す混合域から沖方向へ100mほど進み、白濁した高濁水がすでに下方へ沈み込み、表面からは見えなくなっている地点にあたる。

2004年9月6日の観測では、河口に自記水温計(ホボ社製Tidbit)10個を水深15mから19.5mまで0.5m間隔で取り付け(以降この装置をサーミスタチェーンと呼ぶ)、9:30(現地時間)から15:50時まで30秒間隔で連続観測した。サーミスタチェーンの設置時(9:20)と回収時(15:35)にはCTD(多項目水質計:YSI-6600)を用いて表層から深層の水温と濁度の分布を測定した。

2005年9月13日の観測は同じく河口において午前10:20から同日18:14までの約8時間行われた。2004年の自記水温計による観測は15mから19.5m層しか測定していなかったため、2005年は自記水温計32個を表層から深層32mまで1m間隔で鉛直方向にロープで係留した。また、2005年は水温計のResponse timeである2分間隔で連続観測した。なお、6m深に設置した水温計が紛失したため、解析においては5mと7mのデータで6mの値を補間した。水温計の設置時には、CTDを用いて表層から深層までの水温と濁度プロファイルを測定した。

湖流入前のローヌ川の流量や水温のデータはOFEGによる自動計測データを使用した。観測地点は図1に白丸で示す。

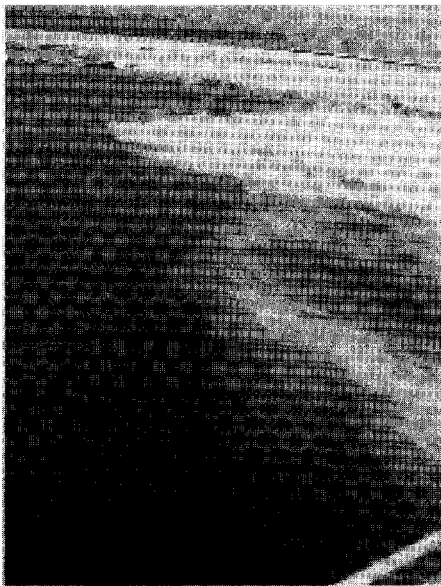


写真1: ローヌ河口における湖水(写真左側黒色の水)とローヌ河川水(写真右側白濁の水)の混合部分

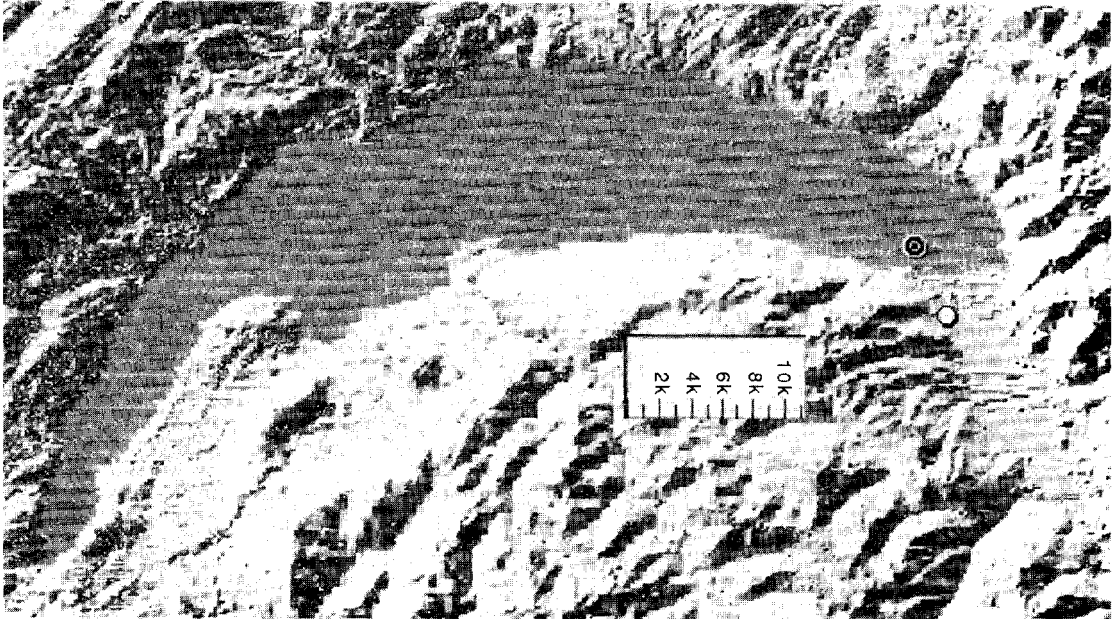


図1：河口観測地点（黒点）とローヌ川計測地点（白点）

結果・考察

2004年9月6日に河口に設置したサーミスタチオンによって測定された水温の時間変化の一部を図2に示す。この結果によると、高温水と低温水が縦方向に交互に現れるスパイク状変動が見られた。この観測結果から、このデータが測定された深度において活発な対流が存在し、上層の高温水の沈み込みと下層の低温水の上昇が起こっている可能性が考えられる。また別の可能性として、サーミスタチオンや濁水流入部自体が水平方向にゆれることで、同深度に存在するが水平方向に異なる局所的な高温部（例えば湖水と河川水との混合した高温高濁な流入水）と低温部（例えば比較的低温な深層の湖水）を行き来し、図のような結果が得られたことも考えられる。

2004年9月6日の水温計の設置時（午前9:20）と回収時（午後15:35）にCTDを用いて観測した水温の鉛直プロファイルと比較すると（図3）、午前には23m以深の水温は約7℃で湖底まで等温になっており、この層の水は湖水であると考えられる。一方午後の観測では、25～30m深は午前中と同じ7℃であるのに対し、32mから湖底まで

は12～14℃で水温が上昇している。この解釈としては、25～30m深はももとの湖水であるのに対して、32mから湖底まではそれより暖かい河川水が密度流となって流入してきていることが考えられる。この午後の水温プロファイルと、同時にCTDで計測された濁度の鉛直プロファイルと比較すると（図4）、深層で水温が上昇している深度（約32m）以深で濁度が急激に増加していることがわかる。この濁度の鉛直プロファイルから、午後にはローヌ川起源の濁水が表層と深層に分岐して流入していることがわかった。午前と午後でこのように濁水流入深度が変化した主因としては、ローヌ川の水温と流量の変化が考えられる。

図5に河口観測時の湖流入前のローヌ川の水温と流量の時間変化を示す。図中の太線に示すのが河口において連続観測を行っていた時間帯である。水温変動で、黒点表示を大きくしデータを数値で示しているのがCTDでプロファイルを観測した午前と午後に対応する時刻のローヌ川の水温である。同様に、流量も白抜きの棒で示している。このデータによると、午前には水温が10.8℃であったのが午後には水温が1.5℃低下したうえに、流量は増加した。このときの流入水の水質の観測値はないが、流量と濁質量には正の相関があり（石

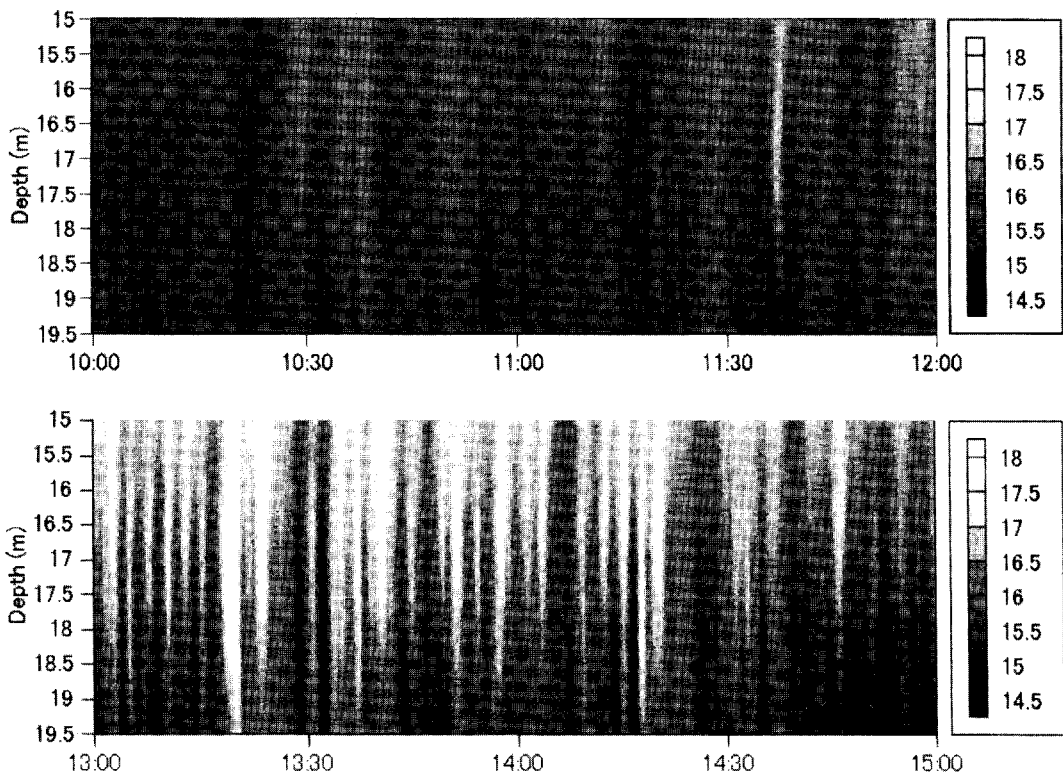


図2：2004年9月6日にローヌ川河口で観測された水温の変動（上段：午前、下段：午後）

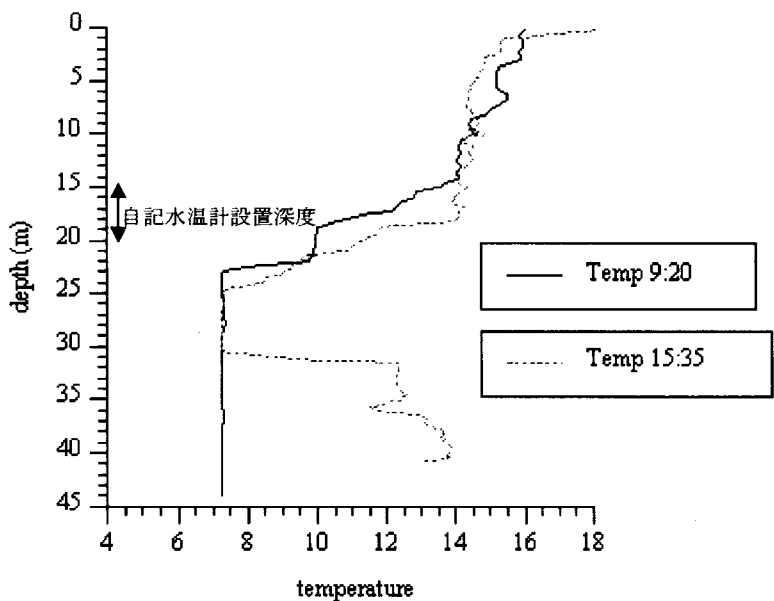


図3：2004年9月6日の午前と午後ローヌ川河口でCTDにより観測された水温の比較

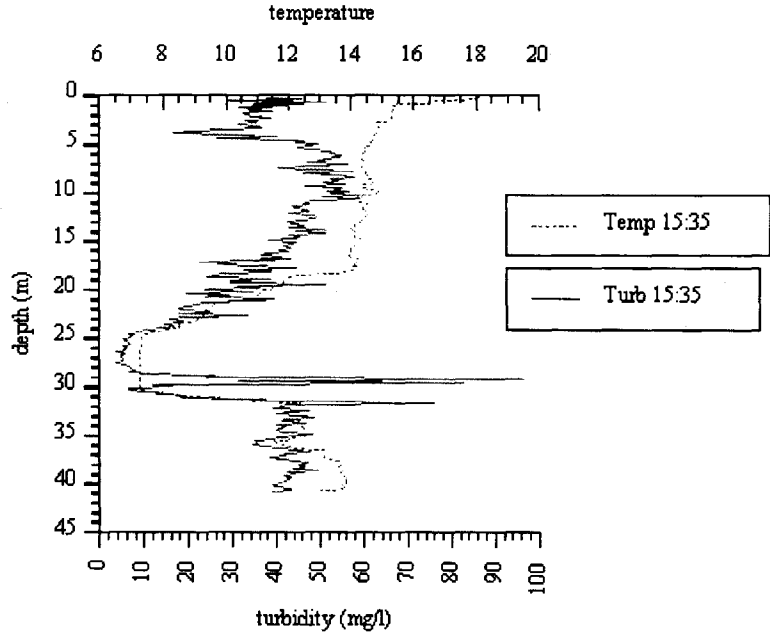


図4：2004年9月6日午後CTDによって観測された水温と濁度の鉛直プロファイル

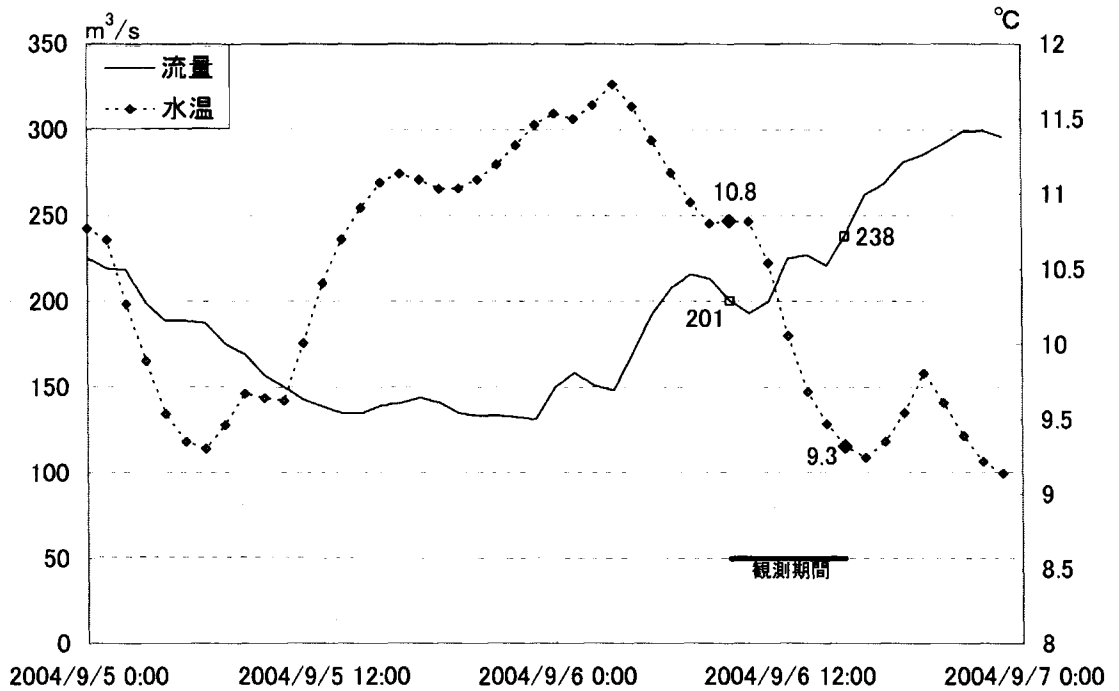


図5：2004年9月6日観測時のローヌ川の流量と水温の時間変化（河口観測期間を横線で示す）

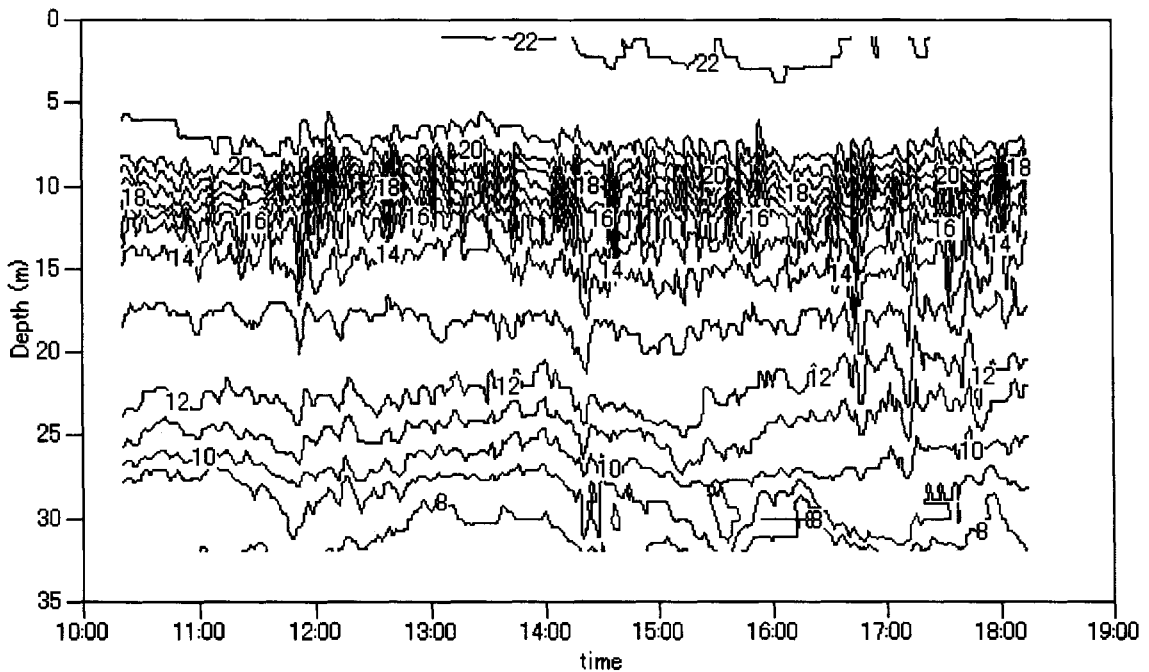


図6：水温の時系列変動（2005年9月13日）

黒:2005)、流量が増えれば濁度も増加していることが推測される。つまり、午後のほうが流入河川水は低温・高濁となり午前より流入水塊密度が高くなっていると推察されることから、密度の大きな一部の水塊が深層へ沈み込んだと考えられる。

いっぽう、2層分岐の状態はどの程度定常的に存在するのかわからない。河口付近での流入水が同じ方向に貫入するかどうかもわかっていないため、午前中でも観測場所が少しずれば2層分岐（深層への沈み込み）が存在する可能性もある。午後の観測時、表層から約20m深までの水温はほぼ等温となっており、この層では鉛直方向の混合がおこっていることがわかる。深層水温は12～14℃で変化しており、流入するローヌ川の水温（このとき9.3℃）より高くなっているが、これはローヌ河川水が湖内に流入したときに湖表層の水と混合しその結果水温が上昇したためと考えられる。図3によると、サーミスタチェーンを係留した深度である15～19.5mの水温は、午前中のCTD観測時には大きな水温勾配を持っているが、午後には表層からほぼ等温となっていた。このような鉛直方向の対流が起こる深度は、流入水の水温と流量、濁度に大きく左右されると考えら

れる。図2で考察した短いスパンのスパイク状の水温変動は、写真1に示したような激しい混合のため水塊が揺らぎ、サーミスタチェーン自体が横揺れしたり濁水の流入域が変動している可能性も考えられる。が、それに対して9時台と15時台での対極的な水温の変化（これは図3に示すCTDの結果でも示されている）は、ローヌ川の湖内での混合・流入状態自体が変化したことによるものと解釈できる。

2005年9月13日の観測では、自記水温計を1m間隔で係留し表層から深層まで全層にわたって水温の時間変化を観測した。その結果を図6に示す。この日の結果によると、表層0～7mはほぼ等温になっており、その直下約7～15m深で水温勾配の大きな躍層が現れている。また、CTDによって計測された濁度の鉛直プロファイル（図7）を見ると、ローヌ川起源と考えられる高濁度水は躍層直下の14～16mに流入していることがわかった。観測期間（10～18時）を通して、長周期の水温の大幅な変動はなかった。この期間に流入河川水自体の流量の変化は60 m³/s増加しているのに対して、水温は0.5℃程度の振幅で変動しており（図8）、2004年の観測と比較すると大きな水

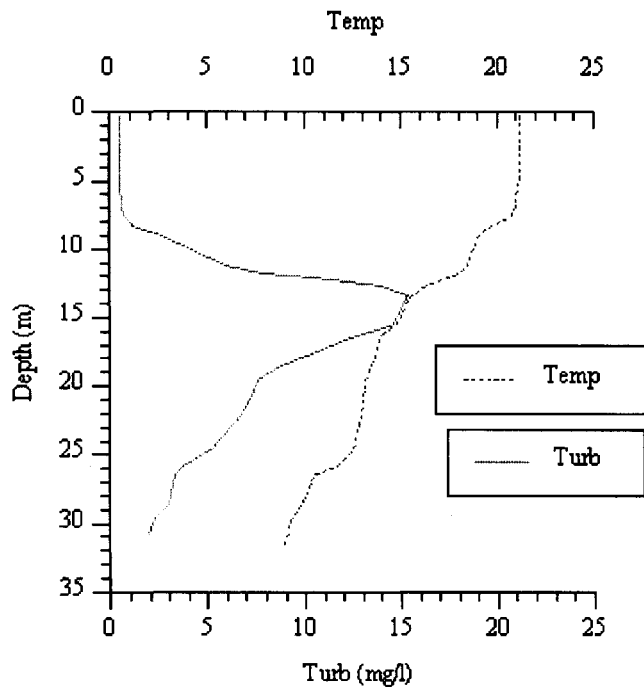


図7：2005年9月13日の自記水温計設置時にCTDで観測した水温と濁度の鉛直プロファイル

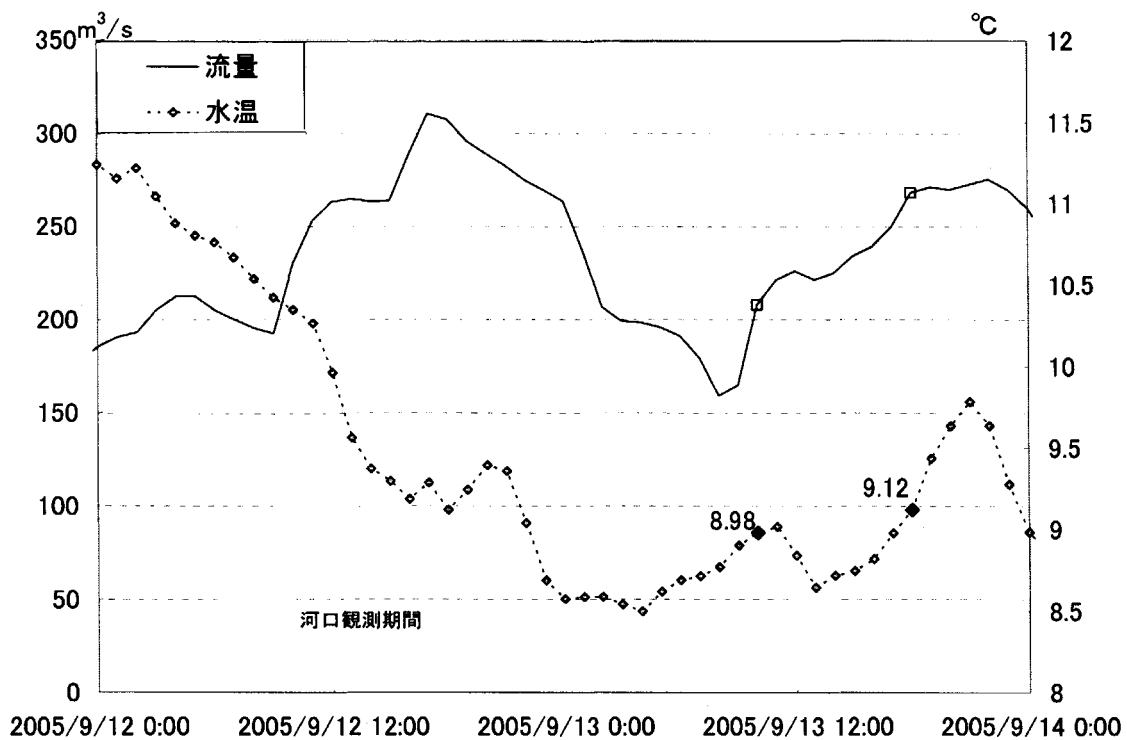


図8：2005年9月13日観測前後のローヌ川の流量・水温の時間変化

温の変動はなかったことから、ローヌ河川水の流入深度の大きな変化がなかったことが推測される。

まとめ

夏季のレマン湖へ流入する融氷起源河川水（ローヌ川）の河口での湖水との混合と流入の状態を把握するため、2004,2005年9月にレマン湖で定点観測を行った。その結果、一日の中でもローヌ起源の高濁度水は流入深度を変え、一層（表層）に流入したり二層（表層と底層）に分岐して流入することがあることがわかった。このような日内変化の大きな要因として、流入するローヌ川自体の水温が一日の中で大きく変化（今回の2004年観測結果の場合1.5℃）変化していたことが考えられる。一方、2005年の観測時には、ローヌ川の水温は0.5℃程度の変動をしており、長周期の大きな水温変動は観測されなかった。

本論文で示した2回の観測では、河口の定点において日内でも大きな流入深度の変化が起こることが捉えられた。が、2004年9月6日午前のプロファイルでは上層のみにローヌ起源河川水が流入していたが、水平流入方向の変動の結果、別の地点では二層に分岐して流入していた可能性も考えられる。2004年の濁度（約40mg/l）と2005年の濁度（約15mg/l）に差が見られたとも考えられる。今回は水平方向に流入方向が変化するかどうかを捉える観測までは行うことができなかった。今後はこのような空間方向の広がり時間が追って変化するかどうかを捉えられる観測を行うことが課題であろう。

謝辞

観測日前後のローヌ川の水温・流量の時間データをOFEGから提供していただきました。2004年の観測は日仏笹川財団（「レマン湖の二重拡散対流に関する日仏共同研究」代表者大久保賢治）によって、2005年の観測は日本学術振興会科学研究費補助金（特別研究員奨励費：「流域に氷河を有する深水湖の躍層内の二重拡散対流と深層の酸素供給に関する研究」石黒直子）により経済的な支援をしていただきました。観測にあたり2004年度は岡山大学学生の村上甲氏、2005年度は岡山大学学生の岩本裕平氏、片山雄一朗氏に手伝っていただきました。両年にわたり、Mr.

Albert LEUENBERGER氏に船を操縦していただきました。

文献

- Giovanoli F (1990) Horizontal Transport and Sedimentation by Interflows and Turbidity Currents in Lake Geneva. in Tilzer, MM, and Serruya, C., eds., Large lakes: pp175-195.
石黒直子 (2005) 「深水湖における融氷起源河川水の挙動に関する考察—レマン湖におけるローヌ川の例—」お茶の水女子大学学位論文.137p

はせがわ(いしぐろ)・なおこ 滋賀県立大学環境科学部

おおくぼ・けんじ 岡山大学環境学研究所

Mixing process of Rhône interflow and Lake's water in the Lake Geneva in summer 2004 and 2005

Naoko HASEGAWA-ISHIGURO and Kenji OKUBO

Mélange des eaux du Rhône dans le Léman en été (campagnes 2004 et 2005)

Naoko HASEGAWA-ISHIGURO et Kenji OKUBO

Pour connaître en détail la pénétration de l'eau du Rhône dans le lac, nous avons réalisé deux campagnes à son embouchure durant les étés 2004 et 2005. Le panache rhodanien pénètre à différents profondeurs, en une seule couche ou bien en deux couches, et ce dans une seule journée. La raison de cette variation est due soit à un changement de la température (en 2004 : 1,5 °C et en 2005 : 0,5 °C), soit à une variation du débit du Rhône.

D'après les deux campagnes réalisées, la profondeur de pénétration de l'eau du Rhône varie dans un seul jour à un point fixe à son embouchure. Comme ces mesures ont été effectuées en un seul point, il n'est donc pas possible de mettre en évidence, en même temps, la pénétration en d'autres points de l'embouchure. Dans les prochaines campagnes il faudra prendre en compte la dimension horizontale de l'embouchure.