

博士論文 (理学, 2005年3月) 要旨

## 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—

石黒直子 Naoko ISHIGURO

本研究では、ヨーロッパのレマン湖において特に湖沼学研究上重要と思われる2テーマについて考察した。一つ目の軸は中緯度に位置する深水湖が長期的な気候変動の影響で近年どのような動態をしているのか、そして二つ目は融氷起源の高濁度河川水が湖内でどのような挙動をしているのかについての考察である。

本研究対象地域における近年の気候は温暖化傾向にある。レマン湖は水深が深いため、特に冬の寒さの厳しい年にしか全循環を起こさない。そして近年、この全循環が稀になってきていることが長期観測データから明らかになった。全循環がないと深層への大幅な酸素の供給システムが途絶えるため、深層水は低酸素状態のまま維持されることになる。低酸素状態は底泥からリン酸態リンやマンガンの溶出をもたらす、溶存酸素に限らず水質への影響が見られている。また、全循環が起こらないということは表層の冷たい水が深層まで到達しない状態を意味する。その現象を裏付けるかのように最深部付近の水温は、全循環が起こらない期間には上昇している。今後さらに冬季の気候の温暖化が進めば、レマン湖は全循環のまったく起こらない湖になる可能性も考えられる。

レマン湖のもうひとつの特異性は融氷起源の高濁度水が大量に流入する点である。本論文のメインテーマとして、ローヌ川の湖内での動態について、季節変化、広域分布、ミクロスケールでの挙動など様々な視点からデータ解析を行った。

季節変動としては、流量の多い夏季には躍層10mから30m深に定常的に貫入していることが認められたが、それ以外の季節に関しては流入深度が変動し、また複数深度に分岐することも認められた。

広域分布としては、2002年7月の観測により、躍層に貫入したローヌ起源の濁水はかなり北岸に沿った状態で河口から20km離れたローザンヌ沖

まで維持されていることが確かめられた。また、2004年9月の観測ではローザンヌよりさらに先のMorges沖まで濁水が見られた。躍層に貫入した濁水がみられた深度部分ではクロロフィルa濃度が低下していることが確かめられた。これは、ローヌ川の流入水がもともとあった湖水と混ざることなく貫入していることを示唆している。

レマン湖で見られるような、全循環がないにもかかわらず深層の溶存酸素が毎年一定濃度増加する現象に関しては、ローヌ川起源の流入河川水に起因するという仮定に基づいて考察した。その結果、深層の溶存酸素が増加する時期は毎年ある程度決まっており、冬から春にかけて、特に4月に頻度が多いことがわかった。さらに、4月にはレマン湖の深層水とローヌ川の水温がほぼ等温になる時期にあたり、かつローヌ川の流量が増え始める時期にあたることがわかった。以上のことから、ローヌ川起源の流入水がレマン湖の水温と比較して等温かそれ以下となったときに深層へ沈み込むと考えられ、なおかつ流入水の流量が増大する時期に湖中心部までその影響が現れると結論付けた。なお、季節は異なるが、2004年9月に行われた河口付近の観測結果により、高濁度高温水が下層に流入している現象が確認された。

ミクロスケールの挙動として興味深いのは、夏季のローヌ川起源の濁質と水温の相互作用である。夏季、レマン湖は成層しており表層水温は20℃を超える。一方融氷起源のローヌ川流入水は夏季でも11℃を超えることは稀で湖表層水と比べて大変低温である。さらに、夏季のローヌ川は流量が多く濁度も高い。このような高濁・低温な流量の多い水が湖内に流入したとき、河口付近では活発な鉛直方向の対流が起こっていたことが2004年9月の観測によって確かめられた。また、夏季のローヌ川は本来水温勾配のある躍層に流入していた。濁水流入部分では、濁質の沈降に伴って形

成されたと考えられる水温の階段状プロファイルが躍層内に認められた。この現象に関して、水温勾配と濁度の勾配から検討したところ、温度と濁度による二重拡散対流が起きている可能性があると考えた。そこで、観測結果をもとに、二重拡散対流に関する検証を行った。まず、温濁二重拡散対流のフィンガー領域はレイリー数によって定義することができることから、観測されたプロファイルによって得られた水温と濁度の勾配より熱・濃度レイリー数を求めたところ、検証した3勾配ともフィンガー領域にあることが分かった。さらに、熱・シルトの拡散と沈降と鉛直移流（対流）の方程式に基づいた二重拡散対流モデルを用いて観測で得られた水温と濁度の鉛直プロファイルを再現することを試みた。その結果、観測で得られた水温の階段状プロファイルは濁質の沈降とローヌ川の水温の影響として説明することが出来、また濁度の複数のシャープなピークは、単なる本二重拡散対流モデルでは説明できないことがわかった。実測されたシャープなピークに関しては、濁水と湖水の混合の初期段階に形成されたものとして説明できると考えた。濁水と湖水の混合が起る要因として、水平方向の相互貫入が考えられるが、この貫入が起る要因としては、内部波による躍層の層厚の変動や、水平方向の密度差によって引き起こされた補償流のような流れとして説明できると考えた。なお、躍層の層厚の変動は、2004年9月の観測によって、短期間（20分程度）の間にも変動が起っていることが確認された。

#### 本学位論文に関する業績

- (1) 石黒直子 (2002) レマン湖の湖底の溶存酸素の増加とその要因。お茶の水地理43号 pp.33-40.
- (2) Ishiguro, N., (2004) La pénétration du Rhône et la convection double-diffusive dans le Léman. Actes du 5ème Colloque International de Limnologie et Océanographie (5-CILO). 2002.9.9-12 Paris (France).167-169.
- (3) Ishiguro, N & Okubo, K. (2004) DOUBLE-DIFFUSIVE CONVECTION IN THE THERMOCLINE OF LAKE GENEVA. SIL 29th Congress. (Finland) 2004.8.
- (4) Ishiguro, N & Balvay, G (2004) 「l'Écoulement des eaux du Rhône dans le lac Léman」 Archives des sciences de Genève. 56 (3) : 117-126.
- (5) Ishiguro, N., Touchart, L., Barroin, G., Balvay, G., and

Kumagai, M. (2004) Lake Geneva : the role of the Rhône and the global warming. Viterbo Province. Proceedings of Bolsena Conference. 2002.9.29-10.4 Bolsena (Italy) pp.187-190.

- (6) 石黒直子 (2005) 2003年の欧州猛暑がローヌ川の流出特性に及ぼした影響。お茶の水地理45号。pp.87-90.
- (7) Ishiguro, N & OKUBO, K (印刷中) Double-diffusive convection in the thermocline of lake Geneva. Verh. Internat. Verein. Limnol.29.

#### その他の業績

1. 三上岳彦・石黒直子 (1998) 「諏訪湖結氷記録からみた過去550年間の気候変動」気象研究ノート。191号、p.73-83.
2. Touchart, L. et Ishiguro, N.(1999) : Les lacs japonais, Annales de géographie, ANNEE 1999, Mars-Avril. Numéro 606. p.115 - 133.
3. 石黒直子 (2001) 諏訪湖の御神渡り記録の気候復元資料としての均質性。地理学評論 74巻7号、p.415-423.
4. Ishiguro, N. et Touchart, L.(2001) Sur la trace de dieu du lac Suwa, Acta Geographica, N. 1500, p.27-34.
5. Ishiguro, N., Kajiwara, M., Fujita, T. Akiba, Y. and Touchart, L. (2002) Heterogeneity of the Omiwatari records of Lake Suwa as the database for winter temperature estimation. Verh. Internat. Verein. Limnol. 28. 1107-1110. Stuttgart, July 2002.
6. 石黒直子 (2004) 2003年に起きた諏訪湖の御神渡りについて。お茶の水地理44号。pp.39-42.

## Glacial water flow in deep lake: -Example of Upper Rhône River in Lake Geneva-

Naoko ISHIGURO

### **Abstract**

This thesis aims to study the effects of the climatic changes and the effects of the tributary on the limnological system.

The first part of the study is about the analyses of the relationships between the climatic changes and the winter thermal conditions of the lake. Earlier (in date of Forel), Lake Geneva, an example of semi-large scale deep lakes, would undergo a complete overturn at the end of every limnological winter. However, the extent of overturn has progressively reduced probably due to global warming. Serious consequences related to the water quality of the deeper part of the lakes, such as oxygen depletion, occur due to this fact.

The second part of the study is about understanding the movement of the Rhône inflow into Lake Geneva. On the basis of the analysis of extensive periodical records, it appears that the Rhône inflow attains the maximum point in the lake in spring. Further, the results of the field observations carried out in summer demonstrated that on one hand, the Rhône entered in the thermocline and passed around the north shore of the lake by Coriolis force. Further, we clearly noticed that it reached the central level of the main basin called the "Grand Lac" as well. On the other hand, due to the detailed observations of the conductivity-temperature-depth (CTD) probe (at 1 m intervals), we observed that the Rhône inflow was divided into two or more depths, connected with the thermal staircases in the thermocline. There is a possibility that the Upper Rhône's intrusion (cold and very turbid water) causes double-diffusive convection and appears to be formed by particle settling from the cold and turbid intrusion of the Upper Rhône River water. A model, using diffusive-advection equations with thermal diffusivity and silt sedimentation, calculated the silt finger formation process. This model confirms that the observed profiles were formed by double-diffusive convection. Internal waves affect the intrusion pattern, with single or twin peaks, by altering the thermocline thickness.