

レマン湖の湖底の溶存酸素の増加とその要因

石 黒 直 子

1. はじめに

レマン湖は、数年に一度しか全層混合しない湖であるが、湖底の溶存酸素は全層混合がない年でも一定量必ず増加するという、奇妙な現象が見られる。本論文では、その考えられうる要因を挙げ、それぞれの要因について検討した。

2. 対象地域の概要

フランスとスイスの国境に位置するレマン湖は、氷河の侵食により形成された凹地が湖盆になっており、多くの氷食湖がそうであるように、急傾斜な側面と、平たい湖底平原、深い水深を特徴としている。湖は大湖盆と小湖盆から形成され、大湖盆の最大水深（湖心；SHL2と呼ばれる）は309 mである。集水域（湖の面積を除く）は7395 km²で、そのうち約88%の6505 km²はスイス領に属する。レマン湖の湖面水位は標高372 mであるが、集水域には最高4634 m（Pointe Dufour）などの4000 m級の高峰を多く有し、集水域の平均標高は1670 mである（CIPEL, 1999: p.9）。集水域の9.4%を氷河が占める（CIPEL, 2001）。主要な流入河川はローヌ川で、その流入量は、レマン湖に流入する全量のうち68%を占める（1964～1980年平均値）（CIPEL, 1984: p.46）。

3. データ

溶存酸素のデータは、CIPEL（Commission internationale pour la protection des eaux du Léman contre la pollution：レマン湖水質保全対策委員会）による定期観測データを用いた。また、EDMZ、INRAによる流入河川データ、INRAによる多項目プロファイラーデータ、CIPEL、滋賀県環境政策課によるTP濃度のデータを用いた。CIPELによる定期観測データに関する説明は、補論として本論文の最後に記載する。このデータに関する詳細な説明を、本論の最後に加える。

4. 問題の所在

レマン湖は深度が深いため、鉛直混合が数年に1度しか起こらない、貧循環湖に細分できる（Forel, 1969a, b）（西條・三田村, 1995）¹⁾。全層混合の起こった年は、表層から湖底まで溶存成分がほぼ均質化される。全層混合があるかないかと言う議論において、特に問題となるのは溶存酸素である。というのは、湖底では、表層から沈殿してきた有機物の分解が行われており、常に酸素が消費される状態にある。その中で、全層混合（表層からの酸素の供給と言い換えることができる）が数年に一度しか起こらないと、湖底付近の溶存酸素は供給されることがなく、消費されていく一方になる。湖底付近の溶存酸素があまりに少なくなると、湖底で生活している生物の生存に支障をきたすといった湖沼内生態系に影響したり、貧酸素や無酸素の状態になると底土からのリン・鉄・マンガンなどが回帰されるといった湖水の溶存化学成分状態に変化を及ぼすことになる。

富栄養化と地球温暖化の二重打撃：底土中の有機物の量が多くなると、有機物の分解による時間あたりの酸素の消費量も増えるので、このような湖にとって、湖の富栄養化は深刻な問題である。また、地球が温暖化すると、全層混合することがより稀になるため、地球温暖化も、これらの湖には深刻な問題である。

図1は、レマン湖の湖心地点（SHL2）最深部（309 m深）における、CIPELによる観測開始以来の溶存酸素の経年変化を示したものである。溶存酸素が急激に増加している点は、全層混合、もしくはほぼそれに近いものが起こった時期であるといえる。最近では、1986年に酸素の供給があった後、実に13年ぶりの99年に大幅な酸素の増加が起こっている。13年ぶりというのは、温暖化の影響が確実に現われているようで、「どういう年に全層混合するのか？」という点は大変興味深く、実際筆者が取り組んでいるテーマであるが、本論文では、この図から読み取れるもうひとつの興味深い現象について考察してみたい。

図1からも見て取れるように、全層混合のない

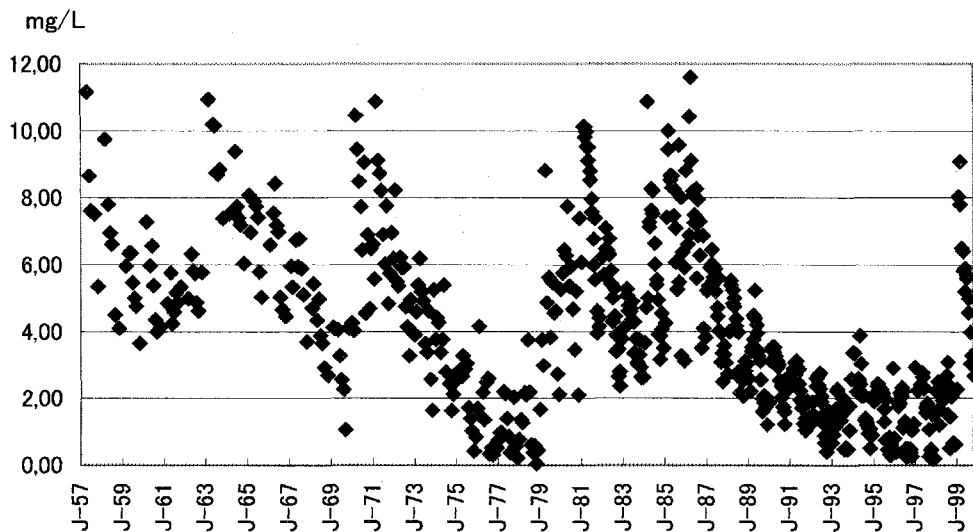


図1. レマン湖湖底の溶存酸素の経年変化 (CIPELデータにより作成)

Fig.1 Oxygen variation at maximum depth of lake Lemman (data from CIPEL)

年でも、必ず毎年、酸素濃度が上昇している。全層混合が起こった年の上昇率に比べるとわずかではあるが、それでも1~2 mg/L程度の上昇というのは、無視できない濃度であるといえる。この酸素の供給はいったいどこから来るのだろうか？

いくつかの可能性を提示し、それらについて今まで行われた観測結果を元に考察してみたい。

5. 考察

観測測器や、分析によるデータ自体の誤差も考えられる。しかしながら、必ず毎年しかもほぼ同濃度増加していることから、すべての濃度増加が測器や分析の誤差によるとは考えにくい。ここでは、データが正しい値を捕らえているという仮定のもとに議論を進めたい。以下に、この増加要因として考えられる4点についてそれぞれ考察する。

1) 流入河川の貫入：レマン湖の全流入河川中の、ほぼ7割の流入量を占めるローヌ川は、その集水域の16パーセントが氷河に覆われている。氷河の融雪時期である6、7月には、1年中で流量が最大になり他の流入河川と水温が比べ低い。また、レマン湖第2の流入河川であるドランス川は、集水域に氷河を抱かないが、急傾斜でレマン湖に落ち込む地形から、平野を流れるローヌ川と違い、冬の水温が低い(図2参照)。レマン湖の最近の深層水温は5.8℃で一定しているので(CIPEL,

2001)、特に冬季には、ローヌ川やドランス川のより冷たい、密度の大きな水塊が湖底を這って湖心の最深部まで到達する可能性があると考えられる。現在までに行われた観測結果によると(CIPEL, 1993)、ローヌ川の貫入と思われる電気伝導度の高い部分が、SHL2よりローザヌヌ寄り(コリオリ力によって湖心より北方にずれると考えられる)で観測されたことがあるが、その深度は200 m深であった。200 m以上の深さでローヌ川の貫入と思われる水塊の観測事実は現在までのところ認められていない。また冬季には、ローヌ川よりも冷たいドランス川が、SHL2に流入地点が近いことから、最深部まで到達する可能性がより大きいと考えられているが、観測によって認められたことはない。

2) 密度流：流入河川による貫入も、一種の密度流と考えることができるが、ここでいう密度流とは、夜間の放射冷却によって形成された湖岸付近の水温の低い水が湖底を這っていく現象²⁾をさす。Fer et al (2001)によると、12月の観測では約100 m深まで水温の低い水の流下が見られたが、それ以降は確認されなかった。LEMMIN(未発表)の電気伝導度の観測では、約120 m深までの流下が確認された。相当放射冷却が進んだ状況では、309 m深までの流下が可能かもしれないが、観測事実は存在しない。最大水深104 mの琵琶湖

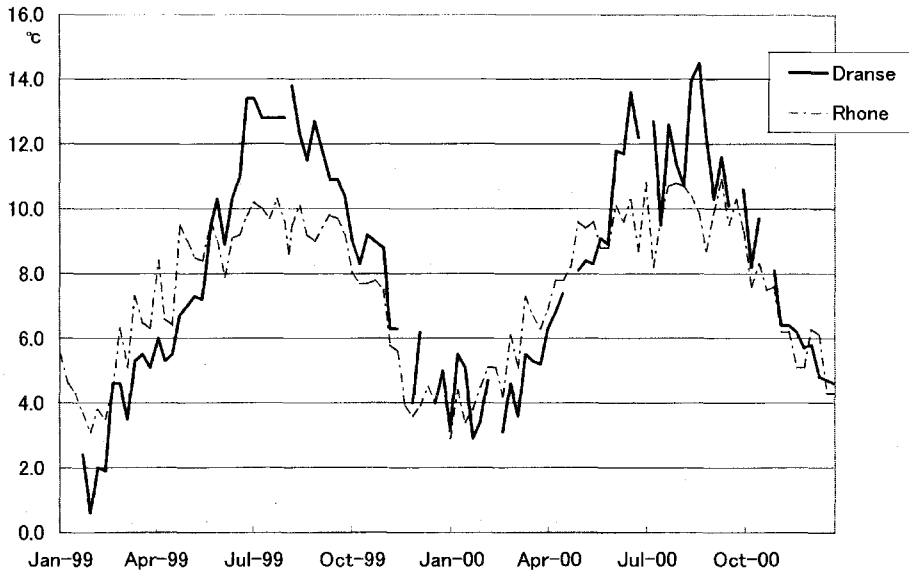


図2. ローヌ川とドランス川の水温の季節変動
データソースは、EDMZ (ローヌ川), INRA (ドランス川)。

Fig.2 Water temperature variation of Rhone river and Dranse river (data source EDMZ and INRA)

では、頻繁に密度流によると思われる酸素の増加がみられるようである。

また、レマン湖の副湖盆（最大水深76 m, 平均水深41 m）底層の、より冷えた水塊が、密度流となってより深い大湖盆に流れ込み最深部まで到達する可能性もある。

3) ミクロスケールでの鉛直混合：全層混合することがなくとも、何らかの外部エネルギー（例えば内部波・内部静振など）が与えられたときに、底層付近のみで、小さなスケールの鉛直混合が起こりうるを考える。実際、琵琶湖においては、この種類の混合と思われる内部サージが、観測によって確かめられている (Jiao & Kumagai, 1995)。琵琶湖の3倍の深さのあるレマン湖においても、同じ現象が起こりうるのかについては、今後検討の余地がある。

4) 底層での内部静振：内部静振が湖底付近でも起こっているとすれば、観測のタイミングによっては見かけ上、酸素濃度が上昇しているように見える可能性もあるのではないかと考える。

6. おわりに

レマン湖の底層の溶存酸素の増加について、考えられうる要因について列挙し、検討した。この

研究の困難な点は、これらの、わずかな酸素の移動を検出する観測が、きわめて困難なことから、CIPELの定期観測が湖心1地点のみで行われているため、平面的な広がりが見えられない、つまり、これらの酸素がどちらからやってくるのかがつかめないことにある。そのため、現段階においては、定性的な議論と仮説を抜け出すことが出来ないが、今後、モデルやシミュレーションなどによって検討することも可能であろう。もちろん、検出が難しいとはいえ観測を続けることは重要で、複数地点での観測結果も蓄積していきたい。また、同様な状況にある他の湖のデータとの比較検討も有効な手段であると考えられる。

補論：ヨーロッパアルプス湖沼の観測データ ——レマン湖CIPELデータを例に——

ヨーロッパアルプスには、多くの湖沼が点在するが、特にスイスを中心とした湖は、富栄養化の問題が顕著に表れている。これらのうちいくつかの湖沼では、それぞれの湖沼集水域ごとに水質管理対策委員会が設置され、湖の管理・集水域の富栄養化対策・湖沼の定期観測プログラムなどを管

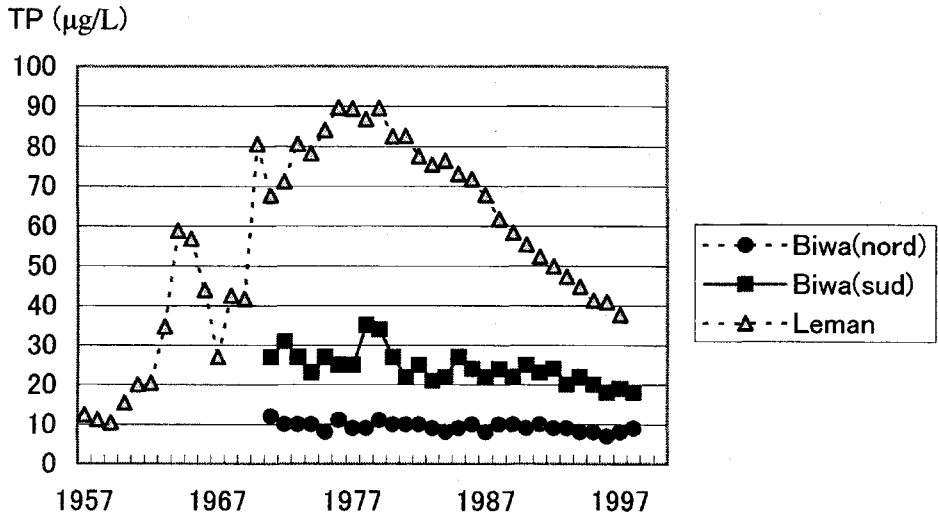


図3. レマン湖と琵琶湖の全リン濃度の経年変化

Fig.3 Interannual variation of concentration of T-P of Leman and Biwa.

轄している。また、スイスでは、OFEFP (Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage : スイス連邦環境・森林・景観保護局) が、スイスの主要な20湖のデータをまとめて報告書を出している (OFEFP, 1994)。この報告書では、各湖について4~5ページほどしか割かれていないので、詳しい内容について調べようとすると、やはりそれぞれの湖の対策委員会の発行するレポートなり、個々の研究成果を参照する必要がある。

それでは、個々の水質管理対策委員会がどのような研究・調査を行っているのか。これらの対策委員会は完全に独立しているので、それぞれの委員会ごとに活動内容が異なるが、その一例として、筆者の研究対象域としているレマン湖の委員会について、その活動、観測データの紹介と、それらのデータの持つ研究上の限界についての一考察をしようと思う。

1. CIPELの生い立ち

レマン湖の水質悪化は、特に1960年代から70年代にかけての著しいリン濃度の増加によって認められる (図3)。しかしながら、ローザンヌの衛生医学者 MESSERLI が、レマン湖周辺の研究者有志による水質保全委員会の結成を唱えたのはそれに遡ること20年、1949-50年である。非公認ではあったが、医学者・化学者・生物学者・微生物学者・技術者によって構成された学際的性質を

持つ委員会が結成された。そして、1957年以降この委員会による調査報告書が作成されている。しかしながら、その非公認という性質のため、会員の流動性や研究の持続性等の面でいくつかの問題があり、その後公認化の動きが起り始めた。1960年11月9日にローザンヌにおいて、レマン湖周辺の州 (カントン) による主唱のもとフランスとスイス間の外交上の会談が持たれ、レマン湖水質保全対策国際委員会の結成が2国の代表により決定された。それ以前の非公認の委員会の会員を多少修正した形で、委員会結成の取り決めが行われ、レマン湖水質保全対策国際委員会 (Commission Internationale pour la Protection des Eaux du Léman contre la pollution : CIPEL) が結成された。その後1962年11月にはフランス政府とスイス政府がレマン湖水質保全に関しての2国間協定を結び、1963年11月から現行化された。それ以来、両政府の資金援助のもと、富栄養化の現状調査や政府に対する勧告が行われるようになった。このあたりの経緯はCIPEL (1984) LE LÉMAN. Synthèse (CIPEL 結成25周年の総括報告集) に詳しい。

2. CIPELの活動

CIPEL 自体は調査・分析は行わず、レマン湖周辺に在る既存の湖沼研究所に調査、分析、毎年の報告書の作成を委託し、それに見合った調査費を払っている。調査を請け負っている研究所の主な

表1. 多項目プロファイラーによる観測データの例 (2000年5月23日の観測例)

Table 1 Example of the data from the multiparameter sonde.

Prof.	Press	Temp	pH	Chl a	O2	O2	Trans	Cond25
m	dbar	°C		mg/m3	mg/l	%	0-100 %	mS/cm
(水深)	(圧力)	(水温)	(PH)	(クロロフィル a)	(溶存酸素)	(溶存酸素)	(トランスミッション)	(電気伝導度)
0	0,3	16,61		1,03	8,65	89,1	83,4	0,276
1	1,1	16,55		1,28	8,68	89,3	82,0	0,276
2	2,1	16,49		1,55	8,70	89,4	81,4	0,276
3	3,0	16,33		1,70	8,78	89,9	79,6	0,277
4	4,1	15,93		2,39	8,98	91,2	77,8	0,279
5	5,1	15,68		2,57	9,11	92,0	77,6	0,281
6	6,1	15,41		2,80	9,25	92,9	75,7	0,283
7	7,2	15,33		2,99	9,30	93,2	76,5	0,283
8	8,3	14,59		3,12	9,70	95,8	77,1	0,287

注)この日、PHは欠測。

ものとして例えばフランス領トーン・レ・バン (Thonon les bains) にある INRA (Institut National de la Recherche Agronomique : フランス国立農業研究所) の Station d'Hydrobiologie lacustre (湖沼水生物学研究所) や、スイス領ジュネーブ州立水生物学局 (Service cantonal d'hydrobiologie de Genève)³⁾ が挙げられる。CIPEL の定期観測は、湖心 (309m 深) 1 地点 (SHL2 と呼ばれている)⁴⁾ で冬季には月 1 回、それ以外の季節は月に 2 回行われる。観測は INRA が行い、多項目プロファイラーで、1m 毎に水温・溶存酸素・電気伝導度・クロロフィル a・PH・トランスミッションを読み取り (表 1 参照)、手分析のための採水を各深度で行い、翌日分析を行う⁵⁾。これらの湖の観測データと、集水域の調査データをもとに、特に富栄養化の観点から毎年 200 ページ程度の報告書が作成され、公表されている⁶⁾ (表 2 参照) (ex. CIPEL, 1999, 2000 etc.)。

3. CIPEL の目的とデータの限界

レマン湖が、温暖一回貧循環湖という特異な性質を持つにもかかわらず、冬季の観測が月に 1 度しか行われず、混合の状態があまり詳細に観測されていないのは、非常に残念である。例えば、一番最近では、1999 年に、実に 13 年ぶりにほぼ全

層混合に近いものが起こったといわれており、その混合が認められた観測が 3 月 1 日に行われた。この観測は、1 月 11 日以来、50 日ぶりに行われたため⁷⁾、全層混合へ至るまでの経緯を考察するのに大変都合が悪い。

前述の問題に大きく関わってくるのが、CIPEL が何を目的に観測を行っているか、という点にある。冒頭でも述べたように、スイスの大部分の湖沼では、リン濃度をはじめとする富栄養化の問題が深刻で、レマン湖もその例にもれない。CIPEL の目的は、富栄養化をはじめとする水質汚染対策であるため、純粋な湖沼学研究目的、特に物理的な湖沼システムの研究のためのデータとは合致しない場合が多い。この、冬季の観測頻度がその端的な例である。湖沼物理学的な面からは、冬季の全層混合が大変興味深いので冬季の密な観測は重要であるが、富栄養化という観点に立つと、レマン湖では冬季ほとんど生物生産がないため、冬季の観測が疎であったとしてもあまり問題にならない。また、観測地点が湖心 1 地点というのも、湖全体としてのリンなどの栄養塩の全体的な収支を見るには足りるが、湖水、その他の物質の湖内での流れや振る舞いを見たい場合には非常に都合が悪い。例えば、本論で述べた湖底の溶存酸素がどこから供給されているのか、といった考察を行

表2. CIPEL レポートの例 2000年報告書 (CIPEL2001) (全295ページ)

Table 2 Example of the report by CIPEL.

目次
レマンとその集水域の概要
2000年の総括
総合的なまとめ
<u>レマン湖集水域で行われた研究報告</u>
1. 気象
2. レマン湖湖水中の理化学状況の変化
3. レマン湖中の植物プランクトンの再生産とバイオマスの動態
4. レマン湖の植物プランクトンの変化
5. 小湖盆中の植物プランクトン
6. レマン湖の動物プランクトン
7. レマン湖のバクテリア
8. レマン湖深層水中の coregone, gardon (魚の種類)の採食状況
9. レマン湖の魚介類中の重金属、微量物質汚染
10. 植物プランクトンの経年変化から見たレマン湖の健康状態の変化
11. レマン湖流入河川と流出河川の物質収支
<u>技術報告</u>
12. 下水処理場の管理状況
13. 帯状草地と農業起源の拡散汚染に対する努力
14. 塩化物によるレマン湖汚染の起源
15. 研究所間の分析値の比較

いたい場合に、湖心1地点の観測では、地理的な分布データがないために、考察の妨げとなる。このあたりが、今、筆者がぶつかっている問題である。そこで、このCIPEL定期観測とは別に、独自に観測を行う必要がでてくる。これは、筆者の現課題である。

以上、CIPELの観測データの紹介とその限界をあげてみたが、スイスの湖(レマン湖を含む)の中でも、CIPELレベルの定期観測を行っている湖はレマン湖とボーデン(コンスタンツ)湖ぐらい

で、チューリッヒ湖とヌシャテル湖が、定期観測とまでは行かないが比較的高頻度に観測されている程度である。湖の観測を定期的に行うには、研究者、技官などの人権費と、船、測器などの機材費に膨大なお金がかかるため、レマン湖のように、もともと研究所が集積している環境では委託観測というかたちでゼロからでなく始めることができる。筆者にとっても、CIPELのおかげである程度の基礎データがそろっている状態から考察をはじめられるので、それは大変ありがたい。

謝辞

データの提供にあたっては、CIPEL (レマン湖水質保全対策委員会) の M. Rapin, INRA (フランス国立農業研究所) Station hydrobiologie lacustre, de Thonon les bains の M. Balvay, M. Lazzarotto, M. Moille, DDAF (県立農業・森林局) d'Annecy に便宜を図っていただきました。また, Ecole polytechnique Fédéral Lausanne (ローザンヌ連邦工科大学) の Dr. Lemmin, 滋賀県琵琶湖研究所の熊谷道夫総括研究員, 元 INRA 研究員の M. Blanc, 筆者の指導教官である リモージュ大学 Dr. Touchart には研究を進めるにあたり多くの議論をしていただきました。また, 本研究のための留学を, フランス政府 (1997-98 年度フランス政府給費留学生) と吉田育英会 (2000~2002 年度海外派遣留学生) に, 支援していただきました。ここに記して感謝の意を表します。

注

- 1) 西條・三田村 (1995) によると, 緯度 20 数度から 50 数度までは (低標高の場合), 温暖 1 回循環になっているが, 筆者は, その中にもさらに貧循環湖が存在していると考え。レマン湖は 46°27'N, 6°32'E, 標高は 372 m である (CIPEL2000)。
- 2) 高地の凹地等で頻繁に見られる, 気候学でいう冷気流・冷気湖現象の水版と考えられる。
- 3) ジュネーブ州立水生物学局が, 小湖盆で定期観測を行い, CIPEL の報告書にも結果が載っているが, データはジュネーブ州立水生物学局に帰属する。
- 4) 1985 年までは SHL1 という地点でも観測が行われていたが, 1986 年以降 SHL2 のみになった。
- 5) 採水深度は, 0, 2.5, 5, 7.5, 10, 15, 20, 30, 50, 100, 200, 250, 275, 280, 285, 290, 295, 300, 305, 湖底直上 1 m で, 表層と深層の間隔が密で, 途中の深度はかなり間があいている。また, 手分析の項目は, O₂ (ウインクラール法), Ca, Mg, Na, K, NH₄, NO₂, NO₃, TAC (アルカリ度), SO₄, Cl, PO₄, T-P, 電気伝導度, SiO₂, PH, T-N, TOC, 懸濁態リン, イオンバランスと, 動物・植物プランクトンの分析が行われる。
- 6) これらの報告書 (フランス語版のみ) は, 購入可能である。(注文先: CIPEL 23, av. de Chailly Case postale 80 CH-1000 LAUSANNE 12 SUISSE. また, いくつかの年度の報告書はインターネット上での注文も可能: <http://www.cipel.org>)
- 7) 冬季は, 波が多く, 船を出せないことが多いので観測があとへずれ込むことがままある。

文献

- 西條八束・三田村緒佐武 (1995) 新編湖沼調査法. 講談社. 230p.
- CIPEL(1984). LE LEMAN. Synthèse 1957-1982. 650p.
- CIPEL(1999).Rapports sur les études et recherches entreprises dans le bassin lémanique. Campagne 1998. Lausanne. 240p.
- CIPEL(2000).Rapports sur les études et recherches entreprises dans le bassin lémanique. Campagne 1999. Lausanne. 184p.
- CIPEL(2001).Rapports sur les études et recherches entreprises dans le bassin lémanique. Campagne 2000. Lausanne. 295p
- Fer, I. et al(2001) Cascading of water down the sloping sides of a deep lake in winter. *Geophysical research letters*, vol.28, no.10, pp 2093-2096.
- Forel, F-A (1969a) LE LÉMAN. MONOGRAPHIE LIMNOLOGIQUE. Tome Premier. Slatkine reprints. Genève. 543p. (Réimpression de l'édition de Lausanne 1892)
- Forel, F-A (1969b) LE LÉMAN. MONOGRAPHIE LIMNOLOGIQUE. Tome Second. Slatkine reprints. Genève. 651p. (Réimpression de l'édition de Lausanne 1895)
- Jiao, C & Kumagai, M (1995) Large Amplitude Nonlinear Internal Surge in Lake Biwa. *The Japanese Journal of Limnology*, 56-4, pp. 279-289.
- OFEFP (1994) L'Etat des lac en Suisse. *Cahier de l'environnement*, No237. 159p.

いしぐろ・なおこ
リモージュ大学大学院生
Limoges University

Quelques hypothèses concernant l'alimentation d'oxygène au fond du lac Léman

Naoko ISHIGURO

La concentration d'oxygène au fond du lac Léman augmente tous les ans, même sans brassage complet (Fig.1). Trois hypothèses peuvent expliquer cette alimentation: 1) La pénétration des affluents, notamment du Rhône et de la Dranse, 2) Les courants de densité nocturne dus au refroidissement plus rapide sur les littoraux qu'au large. Il est possible que le petit lac, moins profond, se conduise à ce sujet comme un littoral. 3) le cumul possible d'ondes internes et de microbrassages, à différentes profondeurs.

Remerciement: Grand merci à M. BALVAY, M. LAZZAROTTO et M. MOILLE de l'INRA de Thonon-les-bains, à DDAF d'Annecy, à M. RAPIN de la CIPEL, pour les informations et des données. Dr. LEMMIN de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, Dr. KUMAGAI de l'Institut de recherche du lac Biwa, M. BLANC, ancien chercheur de l'INRA de Thonon, Dr. TOUCHART de l'Université de Limoges et mon directeur de recherche, m'ont données beaucoup de conseils pour mes études. A la fin, grand merci au Gouvernement français (1997-1998) et Yoshida scholarship foundation (2000- 2003) pour les financements à réaliser mes études.