

湖底の酸素はいま

- びわ湖における酸素の動態をさぐる -

岡本 巖

ある日曜日、近所の高校生 2 人が老先生宅を訪ねてきた。老先生は大正生まれの今年 84 才。退職後は、たまに頼まれて原稿を書くぐらいで、毎日々々大いにひまである。現職時代は滋賀大の小さい調査艇で、学生たちとよくびわ湖の湖流観測などに出かけたものだが、いまは時折湖岸から眺めるだけ。今日は久しぶりの若者たちの来訪で嬉しいらしい。

生徒（以下 Q とする）おはようございます。

先生（以下 A とする）やあ、おはよう。

Q 先生が最近出された本を少しずつ読んでいます。

A そうかい。それは有難う。

Q 近年、湖底の酸素がずいぶん減ってきたようですね。

A そうだよ。減ってしまった。図 1 を見てごらん。

Q ほんとだ！

A この図を見ると、戦前の 1930 年代から 70 年ほどの間に、10mg/L から 7mg/L まで、およそ 3 割ほど減っている。1940 年代の欠測は戦争のためだろう。

Q この図のもとになったデータは、びわ湖のどこで得られたものですか。

A 図 2 はびわ湖の地図。湖の中央を東西に横断する測線がある。

Q 東岸の彦根は何度も行ったことがあります。とくに昨年は国宝彦根城四百年祭で賑やかでした。

A 西岸の安曇川町は川と同じ名前。安曇川はびわ湖へ流入する 3 大川の一つだ。

Q 他のふたつは湖北の姉川と湖南の野洲川ですね。

A うん。びわ湖には大小 200 本ほどの川が流入しているが、びわ湖の水質はこれらの川によって形成されている。川が汚れるとびわ湖も汚れる。

Q そうですね。

A 図 1 は滋賀県水産試験場（彦根市）によるもので、古くから水質やプランクトンの調査を継続実施している。びわ湖の水質の歴史を見るには、同試験場のデータをおいて他にはない。きわめて貴重なデータだ。

Q 湖点 5 個（ ~ ）のうち、図 1 のデータは測点 のデータですね。

A そうだ。ここが一番深い（水深 80m）からね。

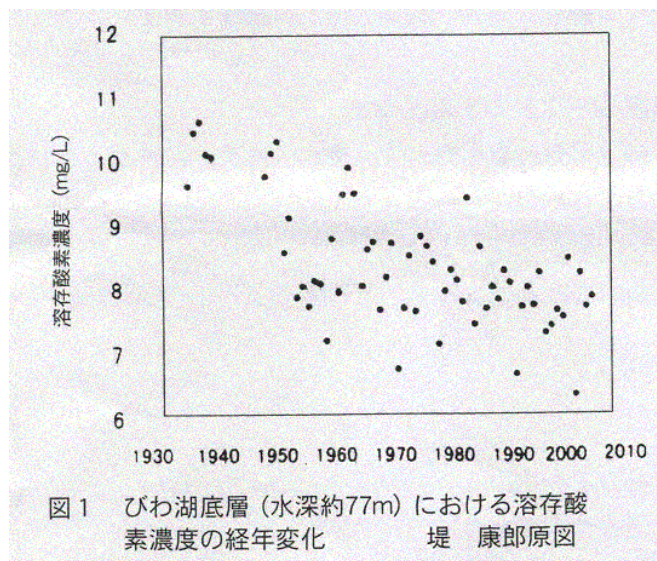


図 1 びわ湖底層（水深約77m）における溶存酸素濃度の経年変化 堤 康郎原図

§ 1 水と空気

Q どうして酸素は減ったのか。やはりびわ湖が汚れてきたからですね。

A そのとおり、一口で言えばね。汚れた話をする前に、先ず、酸素と水との関係を考えてみよう。

Q びわ湖の酸素とはびわ湖の水に溶けている酸素のことですね。

A そうだ。溶存酸素と呼んでいるが、ここでは「溶存」を省略して、単に「酸素」と呼ぶことにする。

Q 水にはさまざまな物が溶けますね。

A そうね。例えば砂糖が溶けると砂糖水、食塩が溶けると食塩水。どう違う？

Q 一方は甘く、他方は辛い。

A 他には？

Q ？

A 砂糖は有機物、食塩は無機物。水はどちらをも溶かす。

Q 水は酸素という気体を溶かします。気体も溶かすのですね。

A 君らもよく知っているだろう。亜硫酸ガスという気体を溶かすと硫酸になる。

Q そうだ！

A 朝顔によく水をやるだろう。

Q はい、毎朝の日課です。

A 地下へしみこんだ水は、土のなかに含まれているいろいろの栄養分（これには有機物も無機物もあるが）を溶かして、朝顔の根に吸収されやすくしているわけだ。

Q 草や木が育つのも水のおかげ。

A しかも水はどこにでもある。

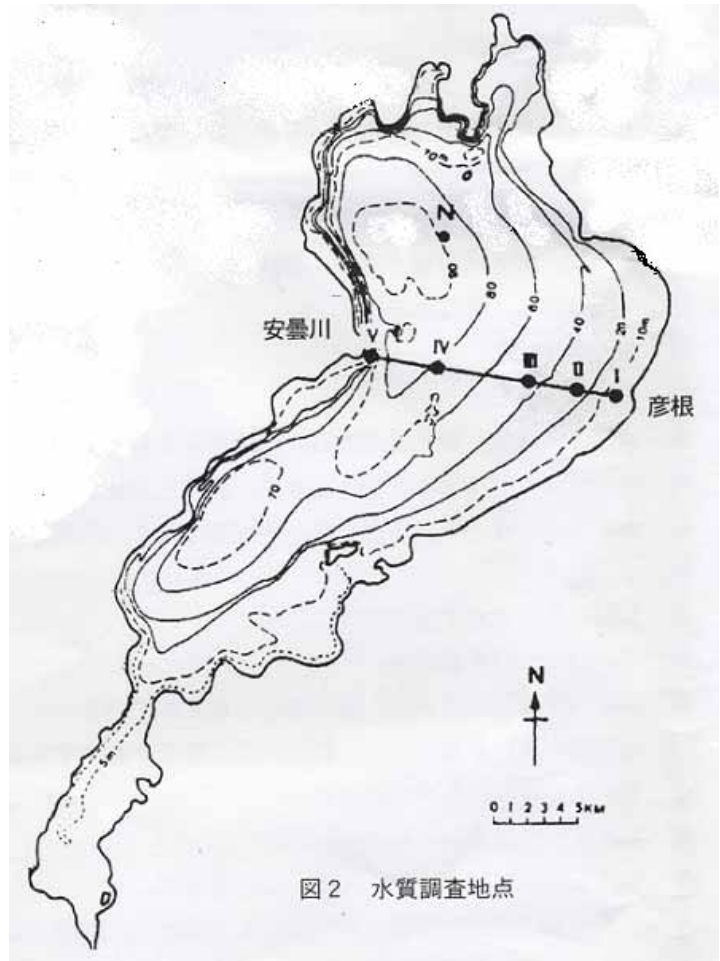
Q しかし、月には水はないと聞いていますが。

A そう、水はない。木星にも土星にも水はない。惑星のなかで水があるのは地球だけ。だから「水の惑星」と呼ばれる。

Q 水がなければ植物はいない。植物がなければ動物も生きてゆけない。だから、水のない惑星には植物も動物もいない。生きもののいない死の世界だ。

A ここで注意点をひとつ。水はなんでもよく溶かすが、裏を返せば水は汚れやすいということだ。

Q なるほど、そうですね。



§ 2 湖面は常に酸素で飽和

Q 飽和？

A 酸素が水に溶ける話にもどらう。溶けるといっても、いくらでも無限に溶けるわけではない。その限界を飽和という。

Q ご飯を腹一杯食べたようなものですね。

A そうだ。そして湖面はいつも酸素で飽和している。

Q ？

A 大気中には酸素はいくらでもある。そしてその大気はいつも湖面に接している。だから、もし湖水中の酸素が不足すると、酸素はどんどん湖水に吸収される。そして遂に飽和に達する。

Q その飽和量は何によって決まるのですか。

A いい質問だ。それは、水温で決まる。水温が低いほど飽和量は大きい。表 1 がそれを示している。

Q かなり変化しますね。

表 1 溶存酸素 (DO) 飽和量

A びわ湖では夏の表面水温は 28 前後だから、酸素は 8mg/L ほどだが、冬になると水温は 8 ほどになるから、酸素は 11mg/L ほどになる。約 1.4 倍だね。

水温	DO 飽和量 mg/L
5	12.37
10	10.93
15	9.76
20	8.84
25	8.11
30	7.53

Q すると、湖面の酸素量は季節によって変化するわけですね。

A そうだ、それを示したのが図 3。
実測値と飽和値とを併せて示してある。

Q 少しズレがあります。

A ズレも大切だが、もっと大切なことは、両者の季節変化のパターンがみごとに一致していることだ。この図の飽和値は、水温の測定値を用いて表 1 から飽和値を求めたものだ。つまり、酸素量を測定しなくても、水温を測定しさえすれば、表面の酸素量は知ることができるわけだ。

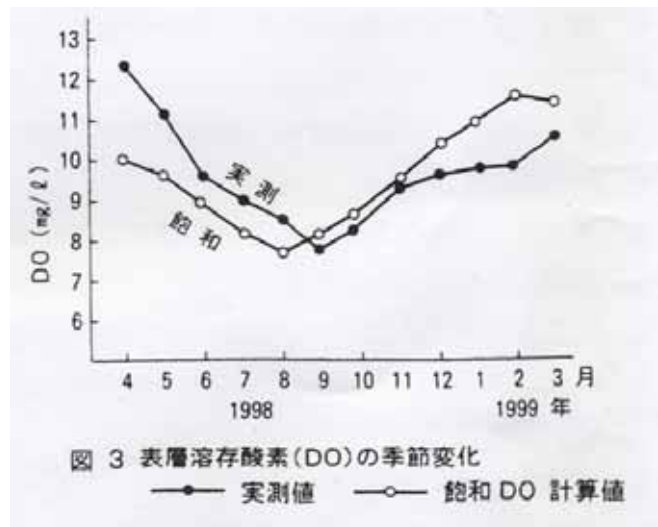


図 3 表層溶存酸素 (DO) の季節変化
● 実測値 ○ 飽和 DO 計算値

Q 両者のズレは何故ですか。

A ズレの理由はこうだ。先ず春から夏にかけては実測値のほうが大きい。この原因は、この季節は植物プランクトンの光合成活動がとくに活発だ。この活動で湖水中に酸素が生産されるからだ。

Q では秋から冬を経て早春のころには、今度は逆に実測値のほうが小さい。

A この季節は湖面冷却に伴う対流によって、富酸素の表層水が沈み、代わりに酸素量のやや少ない深層水が表層へ浮上してくるからだ。

Q なるほど、前者はプランクトン、後者は対流ですね。

- A くり返しになるが、重要なことはズレではなくて、ほぼ一致しているということだよ。
- Q 力点はよくわかりました。ところで過飽和というのは？
- A 飽和よりも多いものを過飽和というが、この状態は通常不安定で、何かの拍子でたちまち飽和に返ってしまう。ただ、プランクトンが次から次と酸素を生産するから過飽和になる。
- Q 湖面の酸素のことはよくわかりました。いよいよ重大な湖底酸欠ですね。

§ 3 底層の酸素は晩秋に急減する

- A 底層酸素の季節変化は図4に示してある。が、その前にデータがどこでどうして得られたかを説明しなければなるまい。

- Q データの出どころですね。

- A 図4(実は図3も)のデータは測点N(図2参照)で得られたものだ。

- Q 竹生島の近く、水深90mほどですね。

- A ここに水質常時観測施設が設置されている。

- Q 常時？

- A そうだ。1日2回、9時と21時に水質・水温を自動的に測定する。

- Q ほう。普通の定期観測は月1回ですね。

- A そう。日に2回と月1回とでは60倍も頻度が異なる。したがって、図3、

4の測定値はいずれも60回の平均値だから、重みがある。精度が高いのだ。

- Q 取れたデータは？

- A データは現地記録されると同時に、テレメーターによって滋賀県立衛生環境センター(大津市)へ電送され、ここでもデータファイルに保存される。

- Q 先生たちが用いたデータはそのデータですね。

- A われわれはセンターへ出向いて、数年分のデータについて検討した結果、1998年度のものを選択した。

- Q 1998年を選んだ？

- A 冬はどの調査研究機関も難渋する。冬のびわ湖は寒風が吹きすさび、波のしぶきは高く舞い上がって欠測しがちになる。

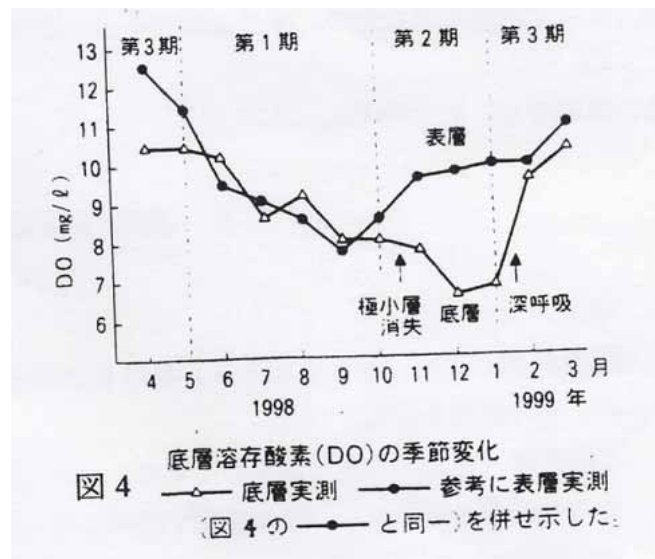
- Q わかります。

- A 湖水中の酸素の挙動を見るのに、とくに真冬のデータは重要なのだ。ところが、幸いにして1998年度のものにはほとんど欠測がなかった。

- Q よいデータがありましたね。

- A 実は、酸素のことを調べようと思いついたのは、このすばらしいデータの存在を知っていたからだった。

- Q センターではデータをどう利用しているのですか。



- A センターではいつもデータを監視していて、何か異変が起これば直ちに出勤する仕組みになっている。そして、取得して蓄積されたものは大切に保管される。
- Q 監視が終われば役目も終わり。
- A センターの所長さんにわれわれの計画を説明したところ、所長さんは興味を示し、データの提供を快諾された。
- Q よかったですね。データを持ち帰った後は？
- A それからが大変だった。
- Q データは多いのでしょうか。
- A そう。流入河川のものを含めて総量 10 万余。とても 2 人や 3 人の手には負えない。そこで「酸素の会」を作ろうと考えた。
- Q 会員が集まりましたか。
- A 呼びかけに応じて「びわ湖の会」の会員をはじめ 22 名が集まってくださり、2002 年 6 月に設立集会を開いたのであった。
- Q わかりました。データのほうへすみませう。
- A 図 4 をご覧。主題は底層だが、参考に表層も示してある。表層の図は図 3 そのもの。
- Q 第 1、2、3 期とあります。
- A 理解しやすいように 3 期に区分してある。先ず第 1 期。
- Q 底層も表層も減っています。
- A 通説では底層で減少することは主張するが、表層のことは語らない。片手落ちだ。両層ともに減少しているが、減少の機構は全く異なる。
- Q 表層の減少は水温上昇に伴う酸素飽和量の減少によるものでした。
- A 底層の減少は湖底にプランクトンの死骸などが蓄積していくからだ。
- Q 次は第 2 期だ。
- A 第 2 期の底層に注目！急激に低下している。60 個の平均値だから偶然などではない。しかるべき理由があってこそその激変である。
- Q 佳境に入ってきました。
- A 実はこの時「酸素極小層」が消失したのだ。

§ 4 酸素極小層は湖底酸欠の防波堤

- Q 酸素極小層という言葉は初めてです。
- A 酸素極小層（以下単に極小層）が見つかったのには二つの理由がある。その一つは前に話したように、データが精細であったこと。すなわち空間的には水面から水深 30m までは 1m ごと、時間的には 12 時間ごと。時間的にも空間的にも実に精細であったことだ。
- Q 二つ目は？
- A 二つ目は堤康郎会員が原データを巧みに再編成して、見やすく、取扱いやすく、解析しやすいように再配列したからだ。
- Q 図 5 に極小層が見えます。
- A この図は 1998 年 9 月中旬における酸素の分布を示したものだ。湖面から水深 30m までを示

してあるが、10mより浅い層も20mより深い層も7mg/L以上だが、それらの中間水深15m付近には5mg/L以下の層があるだろう。これが極小層だ。

Q 極小層が防波堤とは？

A その前に、どうして極小層が形成されるかを考えてみよう。

Q 湖水中の酸素が減るのは消費されるからですね。

A そうだ。プランクトンの死骸などがバクテリアによって分解されるときに、酸素が消費されるんだ。

Q 湖水中にもバクテリアが？

A バクテリアは大気中にも地中にも、水中にもどこにでもいて、動物や植物の死骸をせっせと分解している。もし、バクテリアがいなければ、地球上は動植物の死骸だらけになってしまうだろう。

Q わぁ！

A バクテリアは死骸などの有機物を分解して無機物にしてしまう。

Q 死骸が多ければ多いほど酸素は減るわけですね。

A そうだ。ところが死骸がたまる場所があるのだ。

Q ？

A 死骸の沈降速度が遅くなると、そこに溜まることになる。

Q 沈降速度は一定ではないのですね。だから、溜まる場所もあれば、溜まらないところもあるわけですね。

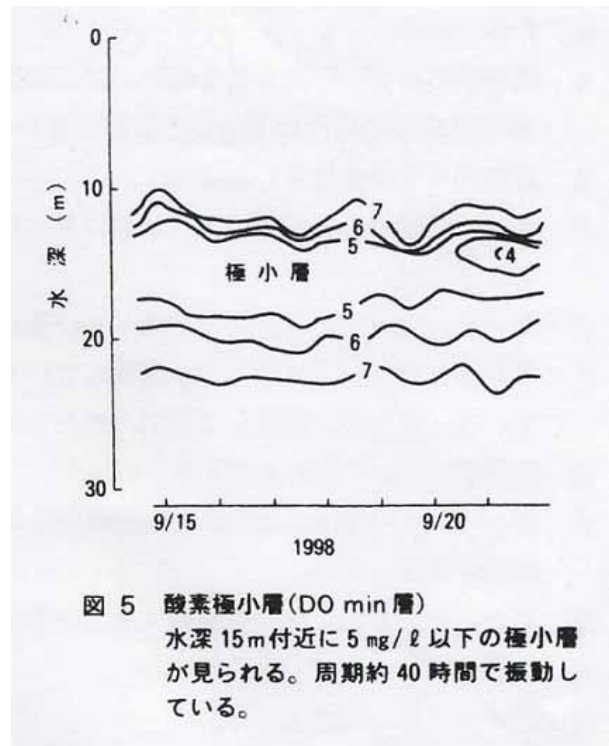


図5 酸素極小層(DO min層)
水深15m付近に5mg/L以下の極小層が見られる。周期約40時間で振動している。

§5 ブランクトン死骸の沈降速度

A そのとおり。では沈降速度はどうか。ここにStokesの式がある。

この式の右辺について考えよう。

Q gは重力の加速度だから一定です。

A 他に一定のものは？

Q 1個の死骸についてはその大きさは一定ですが、死骸の半径(r)とありますが。

A 死骸はさまざまな形だろうが、ここでは、死骸と同じ体積をもつ球の半径だ。

Q 何だかヘンですね。

Stokesの式

$$V = \frac{2(\rho_p - \rho_n)r^2}{9\mu}$$

V: 沈降速度

ρ_p : ブランクトン死骸の密度

ρ_n : 水の密度

g: 重力加速度

μ : 水の粘性係数

r: 死骸の半径

表2 水の比重(密度)と粘性係数

水温 °C	密度 ρ_n g/cm ³	粘性係数 μ ×10 ⁻¹ g/cm·sec
30	0.99568	8.08
20	0.99823	10.09
10	0.99973	13.10

$$V_{20}/V_{10}=8.5$$

A 窮余の一策だ。他に方法はない。

Q r^2 は？

A 死骸は重力と浮力とまさつ力とが釣り合った状態で静かに沈むが、まさつは死骸の表面に働く。表面積は半径の2乗に比例するからだ。

Q すると、式の右辺で変化するのは水の密度 w と粘性係数 μ だけですね。

A これら両者はいずれも水温で決まる。表2はそれを示している。

Q すると、水温が下がると w も μ も大きくなるから、右辺の分子は小さくなり、分母は大きくなるから、 V は小さくなる。つまり、沈降速度は深くなるほど小さくなる。遅くなる。

A そうだ、おみごと！だから死骸が水温躍層まで沈んでくると、沈降速度は急速に低下する。

Q どれほど低下しますか？

A 20 と 10 における沈降速度をそれぞれ V_{20} 、 V_{10} とすれば 8.5 倍も違う。

Q そんなに！

A 水温躍層の上端はおよそ 20、下端は 10。だから、死骸が躍層に入るときの速さは出るときの 8.5 倍。したがって躍層の中は渋滞する。

ところで水温躍層は知っているよね。

Q 水温が急に低くなる層でしょう。

A だから、死骸の速度は急に落ちるから、車の渋滞が起こるようなものだ。

Q ははあ、渋滞するから、水温躍層のなかでは酸素が多量に消費され、ここに酸素極小層が形成されるわけですね。

A 全くそのとおり。その実例が図6に示してある。

この図のデータは 1998 年 9 月 1 日、定点 N におけるものだが、極小層が水温躍層に形成されることがよくわかる。

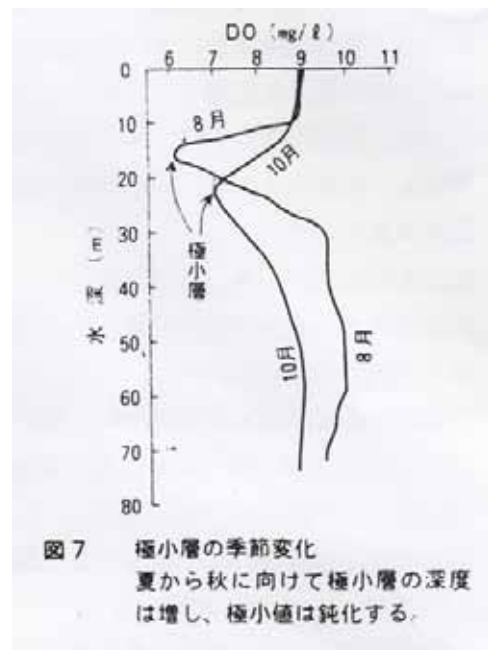
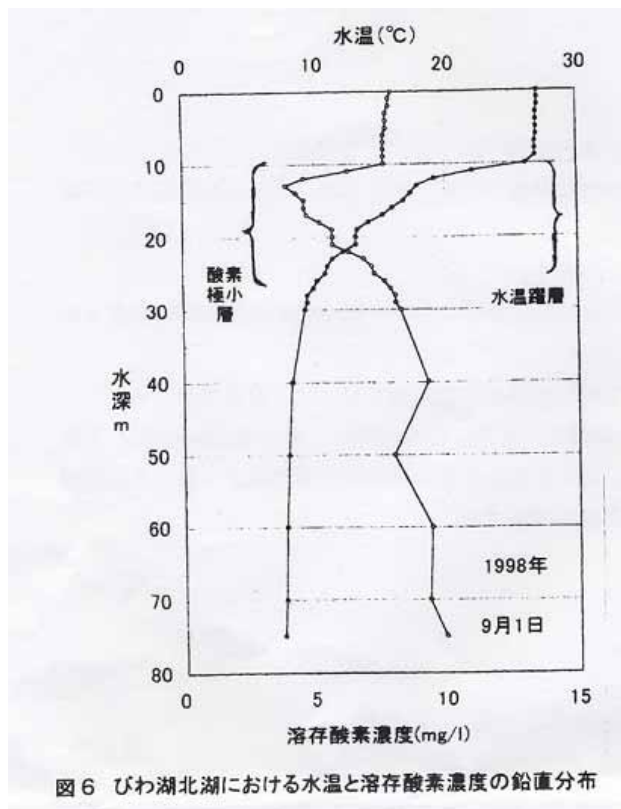
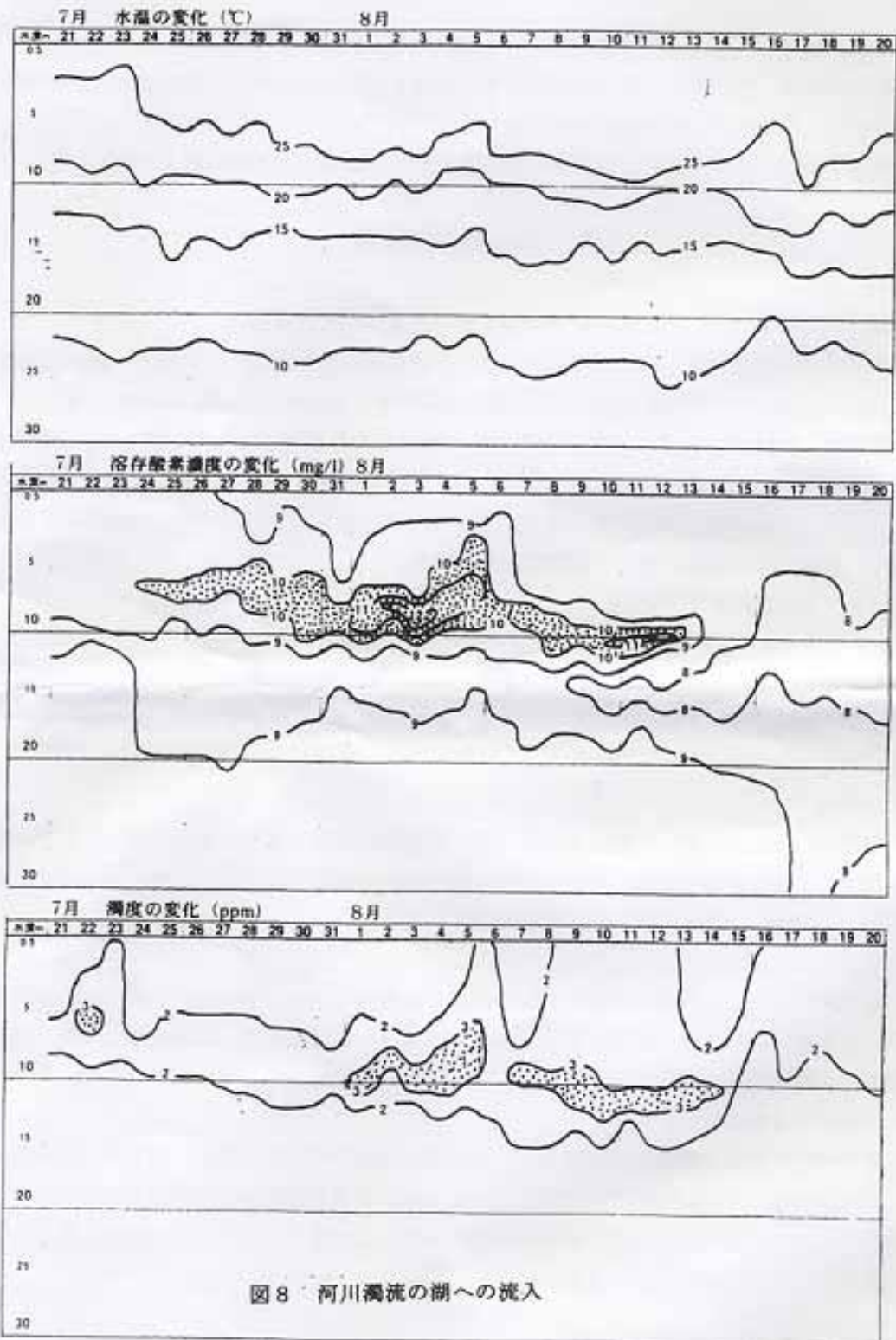


図7 極小層の季節変化
夏から秋に向けて極小層の深度は増し、極小値は鈍化する。

- Q 水温躍層の深さは一定ではなく、夏から秋にかけて次第に深くなっていきます。
- A だから、極小層も深くなる。図7はその例だ。8月には水深16m、極小値6.2mg/L。それが10月には水深23m、極小値6.8mg/L。深くなるとともに少しずつボヤけてくる。そして晩秋～初冬には水温躍層が消滅すると極小層も消滅する。
- これが図4の第2期に当たる。
- Q 底層の酸素が急激に減少しました。
- A 極小層という防波堤が消滅したからだ。

§ 6 河川水はどこへ流入するか

- Q 川の話ですか。
- A 川の水は汚濁物質を湖へ持ち込むが、酸素も供給してくれる。びわ湖の水質を考えると、川が存在はゆるがせにはできない。一体、川の水は湖のどこに流入すると思う？
- Q 夏の日中は川のほうが高温だから、湖面に拡がりましょう。
- A 川の水温はその日の天気や時刻によって、かなり変化する。いま、晴れた日の河口付近の状況を考えてみると、川の水は昼間は湖面に拡がり、夜間は湖底へ潜るだろう。びわ湖のほうは図体が大きいから、水温の季節変化はあっても、日変化はほとんどない。
- Q 大雨が降ったらどうなりますか。
- A そうだ。大雨のときが重要だ。そのとき川の流量は平常の数十倍、数百倍になる。
- びわ湖の周りから200本の河川濁水が流入してくる。河口付近で湖底に潜る。
- Q 湖底に沿って湖心まで進みますか。
- A 進まない。濁水は河口付近で土砂を落としながら、湖底に沿って沖合いへ向かうか、やがて自分と等温の層に達すると、その等温の層へ流入する。
- Q 川の水は自分と等温の層を探すわけですね。
- A そのとおり。ところが、水温躍層はさまざまな水温を取り揃えている。それらのなかには必ず川の水温と同一のものがあるはずだ。したがって、川の水は離陸してそこへ貫入する。
- Q 大量の河川水が水温躍層に貫入しました。
- A 河川水は陸地を離れるとき絶えず上下混合して、どの水も大気に接するから、川の水全体が酸素飽和の状態です。
- Q その流入先が酸素極小層（水温躍層）だから、まさに干天の慈雨ですね。
- A 慈雨の例を図8に示す。
- この図は定点Nにおけるデータだが、水温（上段）は当時、躍層が水深14m付近にあったことを示している。まさにここに酸素量が10mg/L以上の極大層（中段）が形成されていたのだ。
- Q なるほど、濁度（下段）もそこで大きいですね。
- A 大きい。つまり、河川濁水は湖の酸素極小層に酸素を補給したわけだ。ただ濁水には有機物も多いから、やがて極小層が復活することになるだろうが。
- また春の彼岸頃には雪解け水が湖底へ酸素を供給することもよく知られている。



§ 7 びわ湖の深呼吸

- Q 深呼吸というのは、深い湖底まで酸素が届くという意味でしょうね。
- A わかりやすいだろう。昔、私が「湖沼学」という授業科目を担当していたとき、講義のなかでこの言葉を使った。「昨夜の寒波でびわ湖は深呼吸をしたはずだ」とね。間もなくマスコミが「深呼吸」「深呼吸」と言い出し、たちまち一種のはやり言葉になってしまった。
- Q ところで、深呼吸が起こる仕組みです。寒くなって湖面が冷えると重くなって沈み、代わりに下の方からやや酸素量の少ない水が浮上してきて大気に接する。対流ですね。これをくり返すうち、対流は遂に湖底に達し、深呼吸となります。
- A そのとおりだ。他にもあるかい。
- Q ?
- A 二つほどある。その一つは「密度流」。冷却期になると浅い沿岸のほうがよく冷えて密度が大きくなり、湖底に潜って湖底斜面を流れ下る。密度差によって生ずるので、密度流と呼んでいる。
- Q もう一つは？
- A 鉛直循環流。ちょっと難しいが、こうだ。冬の季節風は北西～西風。水は東岸へ吹き寄せられて水位が上昇、水圧が増す。すると東から西へ向かう水圧勾配が形成されて、下のほうでは東から西へ向かう流れが生じる。表層と逆向きだ。
- Q 西岸では？
- A 逆に水が減り水圧が下がる。しかも表層では水がもち去られるので、それを補うために湖底に溜まった水が湧昇する。整理すると、表層では西から東へ吹送流、東岸では沈降流。底層では東から西へ反流（補償流）、西岸では下から上へ湧昇流。
- Q よくは分かりません。
- A びわ湖の東西の断面を南側から眺めると、水の流れは上では左から右へ、右手では上から下へ、下では右から左へ、左手では下から上へとなる。つまり鉛直面で循環しているわけだ。
- Q いろいろの流れが合わさって、びわ湖が深呼吸をしていることが少しわかりました。
- A 疲れたろう。君らも深呼吸をしなさい。

そこへ奥さんがコーヒーを運んできた。

奥さん「皆さんお疲れさまでした。どうぞ召し上がってください。」

北京オリンピックや地球温暖化など雑談の後、2人は機嫌よく帰っていった。