



ト（秒速 1m）である。水深 150m まで潜航できるので、琵琶湖の最大水深(104m)まで十分に調査が可能である。水質を計測するために多項目水質計(表1)と、映像撮影として前方ビデオカメラ(SONY EVI-370、38 万画素)、水中ビデオ顕微鏡(25 万画素、66~445 倍)、下方デジタルカメラ(NIKON Coolpix5000、500 万画素)を装備している。

調査を行う前に、計画書に基づいて緯度・経度・水深(もしくは湖底からの高度)からなる一連の座標(ウェイポイント)を入力する。また、それぞれの航路で測定する項目や撮影する画像の選択も入力する。

淡探は 2001 年 3 月に竣工し、ほぼ 1 年間テスト航行を行い、その後、本格的な調査に着手した。図 2 にこれまで調査を行った調査水域を示す。

表 1 「淡探」に搭載した環境センサーの諸元

センサー	型番	レンジ	反応時間	精度	分解能
伝導度	AQCO-7C60	0~1mS/cm	20 msec	±0.006 mS/cm	0.003mS/cm
水温	AQTE-PT100	-2~38℃	100 msec	±0.02 ℃	0.01℃
深度	AQDE-IC154	0~140dbar	20 msec	±0.2 dbar	0.04dbar
溶存酸素	AGOX-GAL15	0~20mg/L	10~30 sec.	±2.0 %sat.(±0.2mg/l)	0.04%
chl-a	WS-3	0~100 μg/L	100 msec	±0.1 μg/L	0.03 μg/L
透過率	AGTU-660NM	0~100 %	20 msec	±0.1 %	0.01%
pH	AQPH-E1B1Z	2~12	10 sec	±0.02	0.003
redox	AQRE-E1F0Z	-2~+2 Volt	10 sec	±0.02 Volt	0.001 Volt

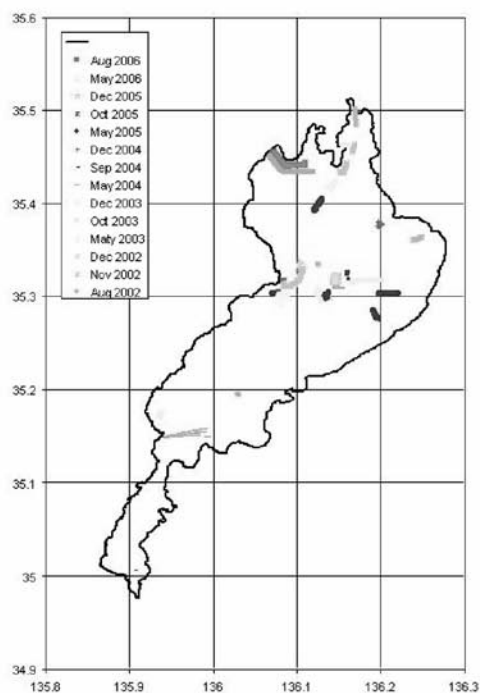


図 2 2002 年から 2006 年にかけて実施した「淡探」の調査水域(グラビア 12 頁参照)

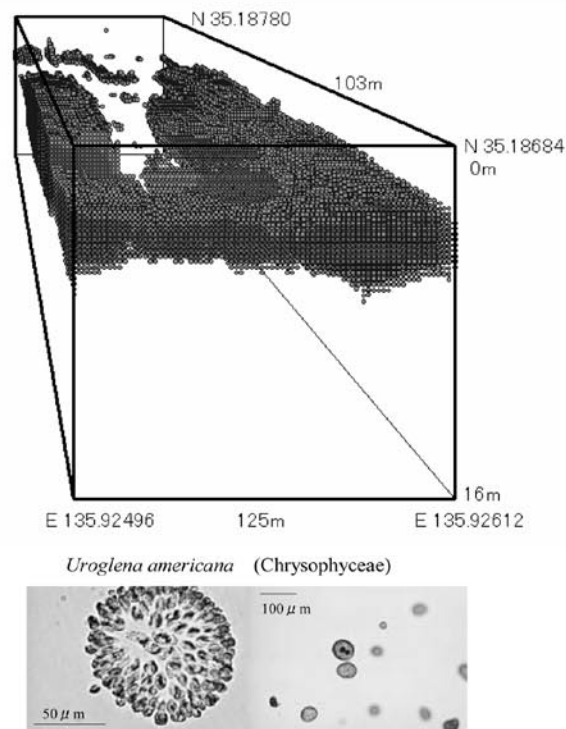


図 3 淡水赤潮を形成するウログレナ・アメリカーナの 3 次元分布(上)と群体の顕微鏡写真(下)(グラビア 12 頁参照)

淡探のミッションは、表面から水深 20m くらいの領域におけるプランクトン調査と、湖底付近の生物や水質調査である。

### 3. 植物プランクトンの調査

水中の植物プランクトンは、種類によって分布構造が異なる。1977 年に琵琶湖で大量に発生した淡水赤潮を形成する植物プランクトン「ウログレナ・アメリカーナ」は、黄色鞭毛藻類に属し、群体を作って上下に移動することができる。我々は、「淡探」に取り付けた水中顕微鏡を用いて、この藻類を 1 秒間に 30 コマのデジタルビデオ画像に記録し、画像処理を行って同定および計数することによって、「ウログレナ・アメリカーナ」の水中 3 次元分布を画像化することに世界で初めて成功した(Ishikawa, K. et al, 2005)。

一口に植物プランクトンの 3 次元構造といっても、その計測は容易ではない。何物にも束縛されない自律型潜水ロボットだからこそできる調査である。我々は、深さ 16m と水平方向 125m×103m の立体空間において「淡探」をジグザグに航行さ

せ、連続的に水中の微小生物を撮影した。測定誤差を少なくするために、1秒間30コマで撮影された群体数を平均して単位体積あたりの密度に直し、毎秒ごとの数値とした。水中顕微鏡で撮影している空間は、4mm四方で奥行きが1mmの微小空間である。このようにして計測した密度を、IDW法を用いて3次元空間に補間したのが図3である。赤い部分が特に群体密度が高い層である。

ウログレナ・アメリカーナが湖面に現れた場合は、赤潮として認知されるが、実際はこのように水面下に薄く広がる場合が多い。これは、ウログレナ・アメリカーナには、光合成を行うために水面近くに浮上する習性があるが、あまり湖面近くだと光が強いため強光障害を起こすからだと考えられている。空間的に30mから40mくらいのスケールで粗密があるのは、水の上昇流と下降流によるものと思われる。つまり、浮遊性の強い植物プランクトンは、下降流のある場所に集積しやすい特徴がある。このような空間的に非一様性を作り出す現象としては、物理的な要因が大きく、風波に伴うラングミュア循環流などが考えられる。

同様な調査については、アオコを形成する植物プランクトンであるミクロキスティスについても行っているが、鮮明な画像が得られない場合が多く、成功にいたっていない。今後、水中顕微鏡の画像をさらに鮮明にすることが必要である。

#### 4. 湖底の調査

湖底の調査は、「淡探」が最も得意とする領域である。それは、「淡探」には、湖底からの高度を一定に保って走行できる機能がついているからである。観測船で湖上から計測機器を降ろして実施する方法では、決してできない調査である。この機能を活用することによって、我々はいくつかの画期的な成果を上げることができた。

##### 4. 1 メタンガスの発生

これまで、琵琶湖の湖底からメタンガスが発生しているらしいことは指摘されてきたが、場所の特定を含めて明確に実証されたことはなかった。湖底からメタンガスが出るということは、底泥の

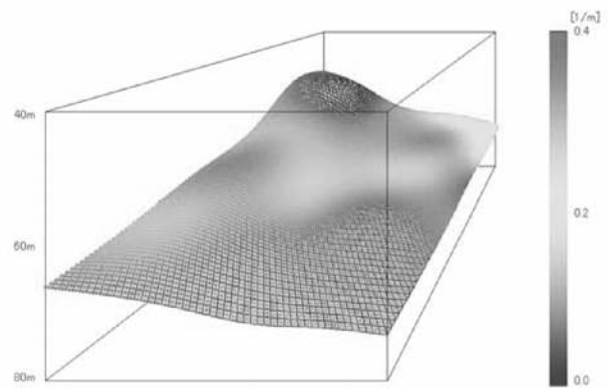


図4 「淡探」によって計測された安曇川沖の湖底上に広がる高濁度層 (グラビア12頁参照)

嫌気化が進行している証拠でもある。

我々は、「淡探」を用いて安曇川沖の湖底調査を行っている時に、偶然、水深70mの湖底から気泡が出ている様子を撮影することに成功した。その後、気泡を採取して分析した結果、メタンガスであることを確認した。湖底から発生するメタンガスの調査は、深水層が完全に嫌気化しているキンネレット湖において報告されており、魚群探査機を用いた調査方法が報告されている (Ostrovsky, 2003)。その後、「はっけん号」に搭載した2周波計量科学魚探でも、多くの場所でメタンガスが発生していることを確認している。現在、このようにメタンガスが発生しやすい場所の特定作業を行っており、湖底地形や底泥の嫌気化との関連が明らかになりつつある。

図4には、安曇川沖で発見された微小な粒子によって形成された高濁度層を示している。この図の作成には、「淡探」を湖底に沿ってメッシュ状に航行させて測定したデータを用いた。このような高濁度層の形成は、秋から冬にかけての全循環期に顕著であり、5月以降になると濁りは少なくなる。気泡が湖底から噴出する映像は、2004年5月に撮影したものであり、季節による湖底環境の劇的な変化を表現しているものと思われる。

##### 4. 2 アナンデールヨコエビの浮上

アナンデールヨコエビ (以下ヨコエビ) は、昼

は湖底上にいるが、夜になると湖底を離れ深水層全体に広がるということが知られている (Trevorrow and Tanaka, 1997, Ishikawa and Urabe, 2005)。我々は、その実態を明らかにするために、2004年5月12日から13日にかけて「淡探」を用いたヨコエビの調査を行った。メタンガスの調査の場合と同様に、水深68mの地点で、「淡探」を湖底上1mの高度に保ちながらメッシュ状に移動させ、下部に取り付けたデジタルカメラで湖底の写真を撮り、撮影されたヨコエビを数えた。デジタルカメラの視野面積と高度との関係は、事前に水槽で検定を行い、以下の関係式を得た。

$$S = 0.4166 \times H^2 - 0.6426 \times H + 0.2948$$

$$R^2 = 0.9833, n=30, p<0.001$$

ここで、Sは面積 (m<sup>2</sup>)、Hは高度 (m) である。この式を用いて高度1mの視野面積を計算すると、0.0688m<sup>2</sup>である。

ヨコエビは、日が落ちてから浮上を開始するが、日が完全に落ちて30分くらいして完全に浮上するようである(日没18時50分、暗闇19時30分)。また、図5に示したように、深夜でも10%くらいの個体が湖底に留まっていることがわかった。早朝は、日の出後に(日の出4時55分)に着底し始めているようである。光が届かない水深68mの深さで、なぜ浮上のタイミングがわかるのかについてはよくわからなかった。

#### 4. 3 湖底直上の水温と酸素の変化

琵琶湖における深刻な問題の一つに、深水層に

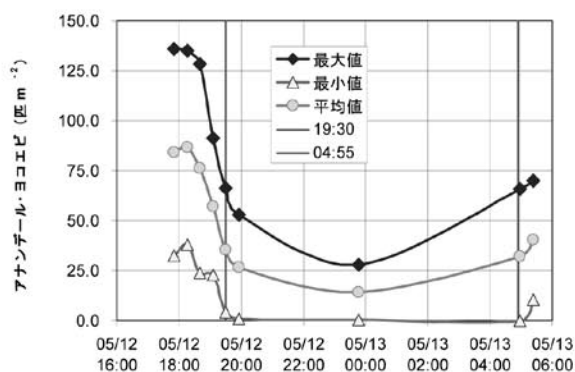


図5 「淡探」で計測した、ヨコエビの湖底密度の時間変化 (2004年5月12-13日)

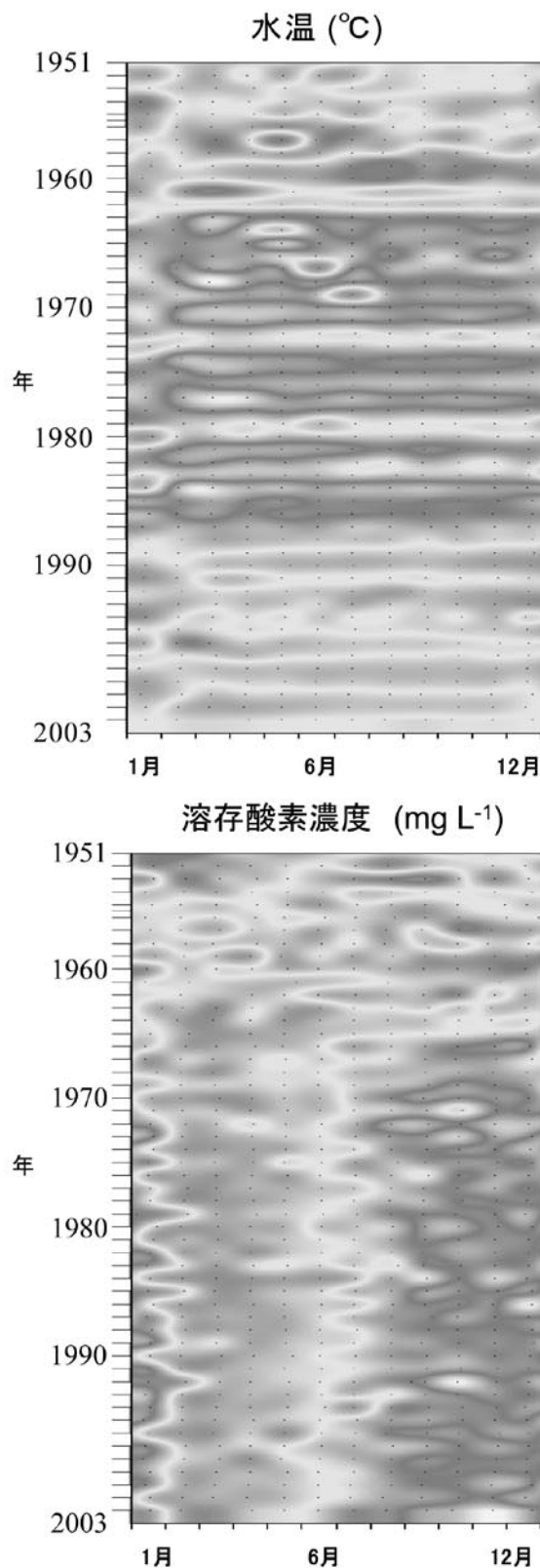


図6 琵琶湖湖底付近の水温 (上段) と溶存酸素濃度 (下段) の変化 (滋賀県水産試験場の定期観測データを加工した)。

(グラビア13頁参照)

おける溶存酸素濃度の低下がある。これは、湖底に生息する生物（底生生物）にとって深刻な問題であると同時に、将来の水質汚染の引き金になりかねない重要な課題でもある。

このように深い湖沼の低酸素化もしくは無酸素化は、池田湖や撫仙湖などで報告されており、富栄養化による酸素消費の増大だけでなく、地球温暖化による鉛直混合の低下が原因となっている場合が多い（熊谷・石川，2006）。

長期にわたる深水層の環境変動を調べる上で、滋賀県水産試験場の定期観測のデータが役に立つ。図6の上段に水温を、下段に溶存酸素濃度の変化を示した。いずれも水深80m付近の値で、赤い色は数値が高く、青い色は数値が低いことを示している。季節変化をわかりやすくするために、横軸には月をとっている。ここで強調したいことは、1960年頃から1985年頃まで、琵琶湖の深い場所は冷たかったが、1985年以降水温が上昇している点である。1960年以前の水温については、深層から水をくみ上げて測定しているため、信頼性は小さいものとも思われる。この寒い時期（1960–1985年）と暖かい時期（1985年以降）の大きな違いは、3月に十分冷たかったかどうか、ということである。3月に水温が低ければ、その年はずっと冷たいようである。ところが、1985年以降は、3月に水温が低下しない状況が続いている。

下段の溶存酸素濃度の変化からは、水温のようにははっきりとした変化を見ることはできないが、1985年以降に、酸素濃度の低くなる傾向が増している。このことは、水温が気象変化を直接的に反映するのに対して、酸素は有機物分解による消費とも関連して、蓄積的に影響することが原因であると思われる。いずれにしても、少しずつではあるが、湖底付近の酸素は減少傾向にあると言える。

我々は、湖底付近の水温と酸素の詳細な変化を調べるために、SBE-16という、自記式の溶存酸素計を、水深95mの湖底上1mの地点に設置して、2001年1月から現在まで水温と酸素の連続観測を行っている。彦根気象台で測定した日平均気温と、湖底の水温および溶存酸素濃度の変化を図7に示し

た。なお、水温と溶存酸素の連続計測は循環期（冬期）だけ行っているため、成層期（夏期）の数値は最深部における定期観測の数値を用いて補間している。

2002年の冬は暖かく、日平均気温は零下になっていない。この年、湖底の水温は前年末の水温より下がることはなく、全循環が不完全であったことを示している。結果として、2002年の秋には溶存酸素濃度は $2\text{mgL}^{-1}$ 以下となった。

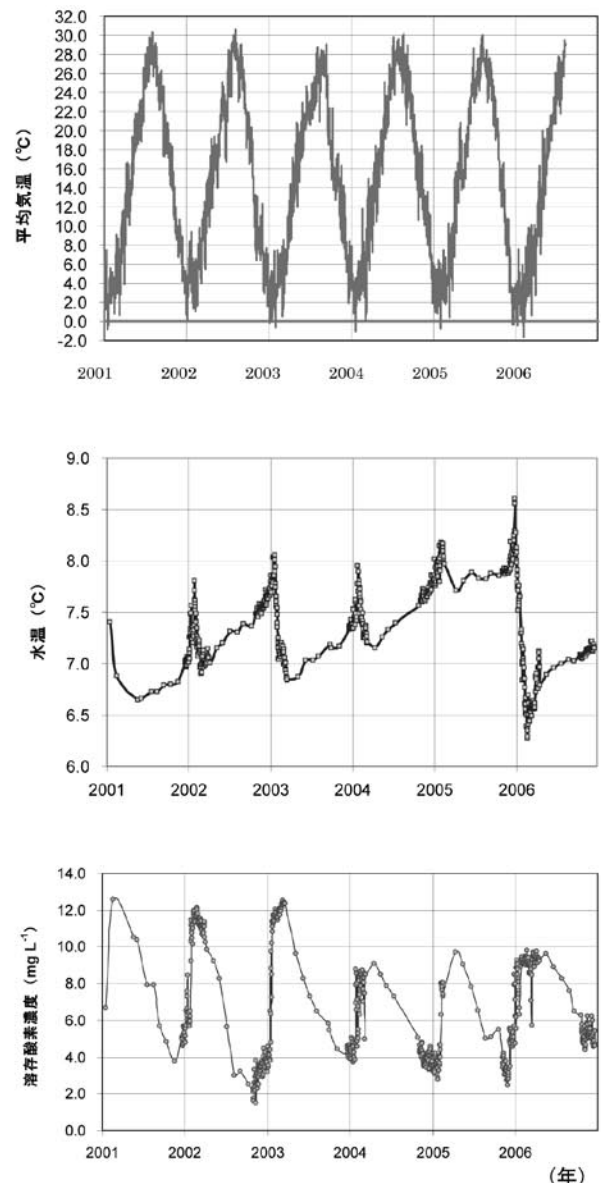


図7 彦根気象台の日平均気温（上段）、琵琶湖北湖水深95mの湖底上1mにおける水温(中段)と溶存酸素濃度（下段）の連続観測の結果

その後、比較的寒い冬を迎えたことによって酸素濃度は回復に向かったが、水温の上昇傾向は止まらなかった。このことは、気温が低下すると琵琶湖の深層水が上下に混合されるため、下の低い水が上の水と混ざって温まり、酸素濃度が回復することを意味している。ただ、琵琶湖にとってはこれだけでは十分ではなく、このあと2月から4月にかけて冷却水の貫入がなければ、湖底は十分に冷えない。

顕著な事例が2005年から2006年にかけての冬である。2005年12月上旬の急激な寒波によって強い上下混合が起り、湖底付近の水温は上昇し、溶存酸素濃度も回復した。その後、冷却水の貫入によって水温は低下し、2月23日に6.3℃の最低水温を記録した。溶存酸素濃度の回復はその後も続き、5月18日まで9.6mgL<sup>-1</sup>の高い数値を保っていた。その後、水温は徐々に上昇したが、酸素濃度の減少は小さく、年最低値で4.4mgL<sup>-1</sup>であった。これは近年にない高い数値であり、湖底環境に好影響を与えたと思われる。

#### 4.4 深層層における蓄積

先にも述べたが、冬期における琵琶湖の全循環の低下は、深層層に物質を蓄積させる効果を持っている。琵琶湖の滞留時間は約5.5年と言われているが、夏期には成層するので、実際に湖底近くの水が交換するまでに18年から19年かかる。ただしこれは、冬期に100%混合するという前提である。もし混合が不十分ならば、さらに多くの時間を要し、栄養塩が深層層に蓄積して濃度は上昇することになる。底泥からの溶出や、外部負荷の増加、湖水の蒸発による濃縮などが起こらなければ、湖内の濃度は流入濃度と平衡した濃度で一定となる。評価が難しいのは、硝酸態窒素や反応性無機リンのように、酸素濃度が低下すると底泥から溶出してくる成分である。

我々は、負荷源が流入だけで決まる塩素イオンに着目してモデル計算を行っている。これによると、河川からの塩素イオン負荷量の増加と、湖水の流出量の減少（滞留時間の増加）が、湖内の塩素イオン濃度増加の主な原因となっているようで

ある。蒸発による濃縮の効果もあるようだが、はっきりしてはいない(Aota *et al.* 2002, Rimmer *et al.* 2005, 2006)。

水産試験場のデータによると、深層層で硝酸態窒素やリン酸態リン濃度の増加も見られる。これらの増加は、外部からの負荷より、低酸素化に伴う湖底泥からの溶出の方が大きいようである。今後、さらに監視する必要がある。

#### 4.5 「淡探」で計測した水温と酸素の関係

「淡探」には、表1で示した環境センサーが搭載されている。これらは、従来の観測船による調査とは異なり淡探の運行にあわせて連続的に計測されるので、湖底に沿った水平的な空間分布を測定することが可能である。

図8に、「淡探」で計測した水温（青色）と溶存酸素濃度（オレンジ色）の変化を示す。深層層における変化をみるために水深80m以深のデータのみを抽出した。この図からわかるように、水温が高いと溶存酸素濃度は低く、水温が低いと溶存酸素濃度は高い傾向がある。このような逆比例の関係は、湖底の環境に水温が重要な役割を果たしていることを物語っている。では、湖底は場所によって、どの程度環境が異なるのだろうか。先にも述べたが、「淡探」の特徴として、湖底上を一定の高さを保って潜航できるので、このように空間的な非一様性を測定するのに好都合である。

そこで、過去の潜航で、直線的に長距離を進んだ場合の環境センサーの結果について考察する。

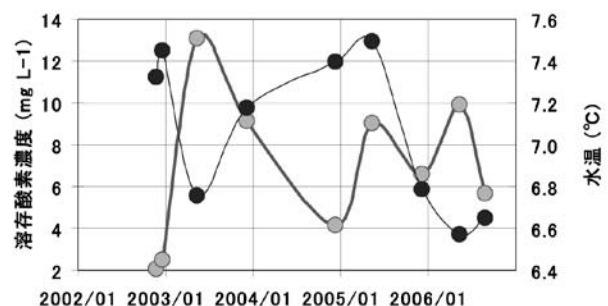


図8 「淡探」で計測した水深80m以深における水温と溶存酸素濃度の変化

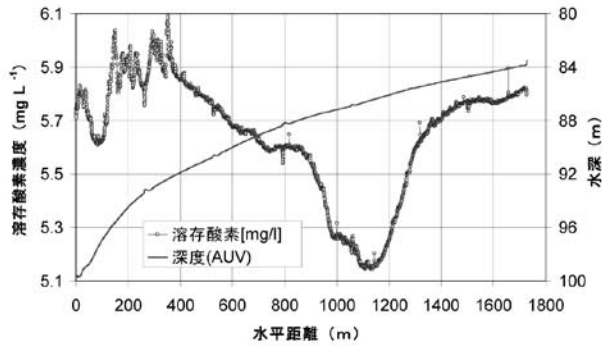


図9 「淡探」で湖底上を直線的に潜航した場合の溶存酸素濃度の変化（2006年8月測定）

図9にその結果を示す。横軸に進んだ距離、左側の軸は溶存酸素濃度、右側の軸は水温を表している。一般的に考えると、水深が深いほど酸素濃度は小さくなると思われるが、この場合は水深86mから88mの狭い領域で水平距離約200mにわたって酸素が急に減少する水塊が存在している。水深92mから100mの間で $5.8\text{mgL}^{-1}$ から $6.1\text{mgL}^{-1}$ の溶存酸素濃度であるのに対して、この領域では、 $5.2\text{mgL}^{-1}$ まで低下していることから、有意な現象と考えてもよいだろう。このような帯状に溶存酸素濃度が低い領域が湖底に沿って存在することも初めてわかったことである。

この低酸素帯において、何が起きているのかは明らかではないが、比較のために10msecと応答速度が速いpHとORP（酸化還元電位）を図10に示した。それによると、水平距離1,000mから1200mの低溶存酸素帯において、pHの低下とORPのばらつきが見られた。このことは、底泥と湖水の混合を示唆するが、詳細は不明である。

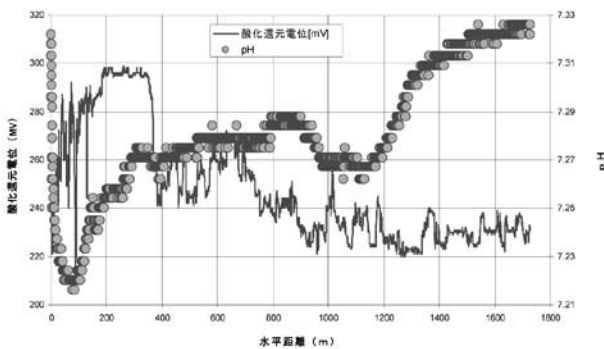


図10 「淡探」で直線状に潜航した場合の酸化還元電位とpHの変化（2006年8月測定）

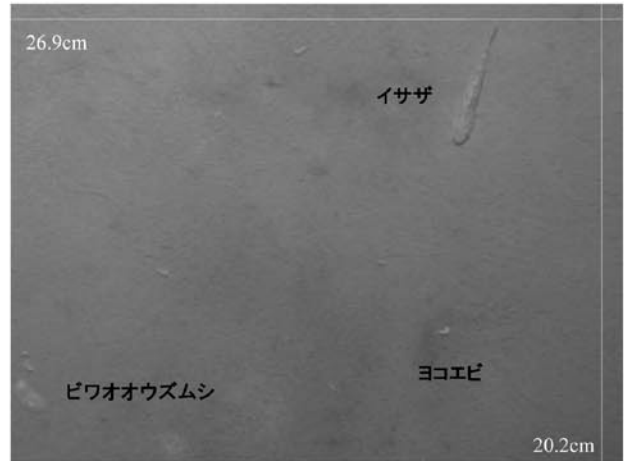


図11 「淡探」で撮影したイサザ（右上）、ヨコエビ（右下）、ビワオオウズムシ（左下）（グラビア13頁参照）

一方、水深が92mから96m付近の溶存酸素濃度が高い水域において酸化還元電位が高いのはもっともらしいが、水深98m近くでpHが低くなるのは、溶存酸素濃度の低下と関連して興味深い現象である。酸化還元電位が大きく変動することから、ここでも何らかの上下混合が起こっている可能性がある。なお、この計測ライン上における、「淡探」と湖底との距離（高度）は、 $+0.995 \pm 0.035\text{m}$ で、ほぼ一定であったので、「淡探」による湖底のかく乱は考えなくてもよい。

#### 4.6 底生生物への影響

さて、近年の急激な地球温暖化が、琵琶湖の湖底に生息する底生生物に対してどのような影響を与えるのかを明らかにすることは、重要なことである。我々は、2002年の8月からデジタルカメラを用いて、深い湖底にすむ底生生物の観察を行ってきた。特に我々が着目しているのは、琵琶湖の固有種であるイサザとヨコエビである（図11）。両者は捕食関係にあり（イサザはヨコエビを食べる）、共に夜になると水温躍層付近まで上昇するという習性がある。特にイサザは、固有種で有用魚種でもあることから、その保全には大きな関心が寄せられている。ところが、1985年頃からイサザが急激に取れなくなった。この原因は明らかではないが、理由のひとつに湖底環境の悪化が考えられている。最近の研究では、冬期（特に3月）

の気温が低いとイサザの漁獲量が多く、反対に暖冬だとイサザの漁獲量が少ないことがわかってきている（酒井，未発表）。

水温と底生生物の関係がどの程度クリティカルであるかを議論するために、2002年8月に測定したアナンデール・ヨコエビと水深の関係を図12に示す。水温が約12℃以下にならないとヨコエビは出現しないことがわかる。また、水深が60mより深くなると急に密度が増えるようである。つまり、ヨコエビにとって水温は非常に重要な因子であると思われる。図7からもわかるように、琵琶湖の深水層の水温は6℃から8℃の間にあり、年によって大きく変化することはない。ただ、今後温暖化が進行して湖底の水温が12℃を越えるようになれば、ヨコエビにとって居心地のよくない環境になると思われる。

1985年以降のイサザの急激な減少は、湖底におけるヨコエビの増加をもたらした（Ishikawa, T. 2002, 2004）。ヨコエビは、8月から9月頃に交尾し産卵する。孵化した個体は、2月頃まで水中を浮遊し、春になると湖底に着底する。一方、イサザは3月頃から浅い場所に移り、5月頃に水深2mから3mの礫帯で産卵する。8月頃には湖底に移動し、12月から3月頃にもっとも個体サイズが大きくなり、沖引きによって漁獲される。ただ、イサザは2年生なので、小型のものと大型のものが混合して生息している。

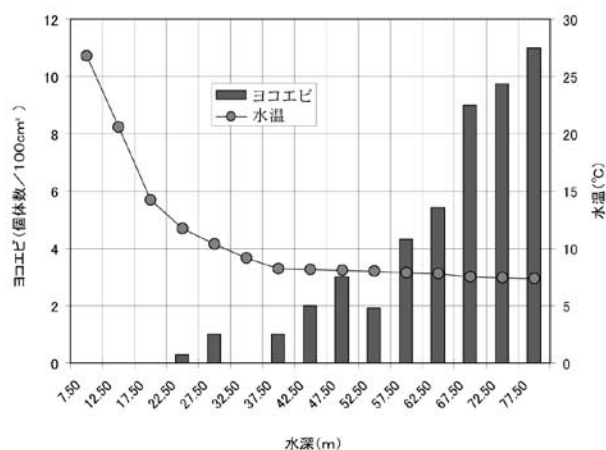


図12 「淡探」で計測した水深に対するヨコエビの個体数密度と水温の関係

図13に、これまで「淡探」で計測したヨコエビとイサザの湖底における個体数密度の経年変化を示す。これによると冬季になるとイサザの個体数密度が高くなる。一方、ここ数年ヨコエビの個体数密度が小さくなってきている。これは、図7で示したように、湖底の水温が高くなってきていたことに起因するのかもしれない。

2005年から2006年の冬にかけて大雪が降り、寒かったため水温が急激に低下した。このことはイサザの個体数密度を急激に増やす結果となった。ヨコエビについても増えているが、数が多すぎてまだ計数が終わっていないのでこの図には示せなかった。これらのことから、具体的な原因は明らかではないが、深水層の水温が低ければ、イサザもヨコエビも多くなる傾向があると言える。

問題は、今後、地球温暖化が進行した場合、湖底環境はどうなるのか、そして、琵琶湖の湖底に生息する底生生物はどうなるのか、ということである。IPCCの予測によれば、今後100年間で約1℃～4℃気温が上昇すると言われている。このことは、冬期における琵琶湖の全循環を抑制し、暖冬期の中途半端な混合によって、湖底付近の水温がさらに上昇するとともに、溶存酸素濃度は低下することが考えられる。

溶存酸素濃度の低下は、溶存態の窒素やリンの湖底泥からの溶出を加速させ、琵琶湖北湖の深水層は栄養塩のプールとなる可能性を増大させる。

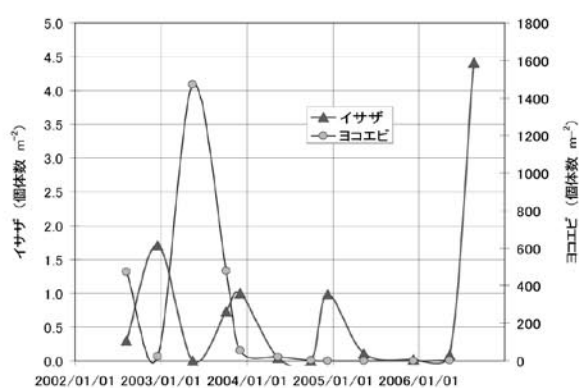


図13 「淡探」で計測した湖底上のイサザとヨコエビの個体数密度の経年変化



当然、底生生物にも何らかの深刻な影響が出ると思われる。我々は、悲観も楽観もしていないが、たとえば、タンガニーカ湖で見られるような漁獲量の減少が、琵琶湖でも少しずつ現実化して来ているし、それに対する警告は可能な限り発信すべきだと考えている (O'Reilly *et al.*, 2003)。

## 5. まとめ

我々が急激な富栄養化現象と向き合った 1960 年代から 1970 年代は、日本中が少しでも生産をあげるために、多くのものを犠牲にしながら駆け抜けてきた時代でもあった。確かに収入は増え、生活は豊かになったが、失ったものも多くあった。それが自然の喪失なのかもしれない。

自然現象には、必ず因果関係がある。原因があるから結果があるのである。ところが、原因が何であるかをはっきり示すことは、必ずしも容易ではない。しかし、複雑な自然現象を解き明かす努力をし、可能な限り簡便な言葉で後世に語り伝えることが、地球という自然を研究対象とする者の務めであると思われる。そこで、我々は今、膨大な過去のデータを紐解きながら一つ一つの事項を検証している。それを「Lake Story (湖の履歴書)」と呼んでいる。

湖において富栄養化問題が一段落した今、少しずつ忍び寄っている地球温暖化という現象は、ここ数十年の間に発生している巨大なエネルギーの歪みでもある。それは、琵琶湖という地球規模から見てとても小さな湖にも、深刻な影をもたらし

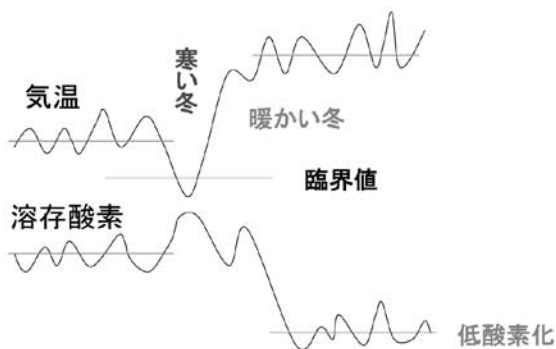


図 14 地球温暖化の過程で急激な低酸素化を引き起こすシナリオ

ている。この現象を克服する有効な手立ては残されているのだろうか。

我々は、数値計算によって、春先の植物プランクトンの増殖が、表水層から深水層へ有機物の直接的な輸送経路になっていることに気がついている。それは、図 14 に示すようなプロセスを経て、深刻な低酸素化をもたらす可能性が高い。

つまり、次のようなシナリオが考えられる。慢性的に温暖化傾向にある琵琶湖で、ある年にひどく寒い冬が来たと仮定しよう。気温も低く、積雪も多い年には、湖が十分に上下に混合されるはずだ。ところが、温暖化の進行は、1980 年代頃より少しずつ深水層に溶存態の窒素やリンを蓄えてきている。それらが湖全体に再配分されることになる。冬から秋にかけて十分に混合された湖では、比較的生産効率のよい珪藻や緑藻が優占し、十分な栄養を使って急激に増殖するだろう。

春になり水がぬるむようになると、湖には水温の成層が形成され始める。ちょうど 4 月末から 5 月にかけての季節である。水中の乱れがなくなると、自分自身で遊泳する能力をもたない珪藻や緑藻の一部は、とどまることができずに深水層へと沈んでいく。行き先は、深い湖底である。新生堆積物となった植物プランクトンは、湖底でゆっくりと分解され酸素を消費する。深い水の中にも内部波による乱れがあるから、拡散によって水温は少しずつ上昇する。分解した有機物からでてくる窒素やリンは、この拡散によって少しずつ深水層全体に広がっていく。

一方、表水層は、沈降した植物プランクトンによって栄養塩が下方に輸送され、一次生産が下がり、透明度が高くなる。湖は一見、きれいに回復したように思われるが、水温躍層より下では、徐々に栄養塩濃度が蓄積されていく。

やがて次の年の冬を迎える。この冬が暖かければ、深水層は十分に混合されないまま新しい年を迎えてしまう。深水層では、水温と栄養塩濃度が高く、酸素濃度が低くなるプロセスが卓越する。このような暖かい冬の年が、2 年から 3 年続けば、湖底の酸素は急激に減少し始める。これが琵琶湖深水層で起こるレジームシフトのきっかけである。

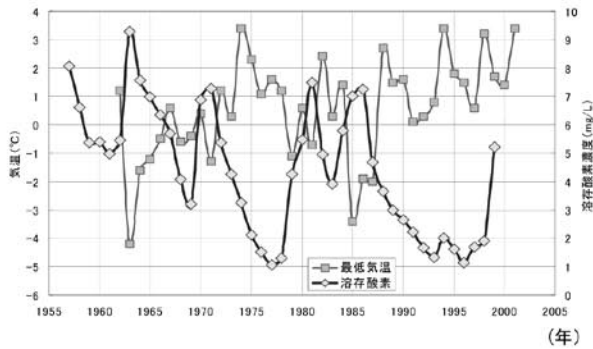


図 15 ジュネーブにおける最低気温と  
レマン湖の水深 300mにおける溶  
存酸素濃度の経年変化

これによく似た傾向は、湖沼学発祥の地レマン湖で見られる(長谷川, 2006)。レマン湖は深い湖で、最大水深が 300m もある。したがって、なかなか混じりにくい。図 15 で示したのは、レマン湖畔にあるジュネーブでの最低気温と、レマン湖の水深 300m における溶存酸素濃度の経年変化である。注意深く見ると、急激な溶存酸素濃度低下の数年前に、最低気温が急に下がっていることに気がつくだろう。冬期の急激な気温低下の後に暖冬が続くことが、深水層での急激な酸素低下をもたらす。それは、単純に温暖化による酸素の供給が減ることだけが原因なのではなく、伏線として、寒い冬に発生する植物プランクトンのブルームが遠因となっているのではないかと、推測している。もしそうだとすると、温暖化による上下混合の低下は、深水層に栄養塩がたまり、表水層で栄養が枯渇し、生物生産が減少するシナリオになるのだろう。これは、まさにタンガニーカ湖で起こっている現象に他ならない。十分な注意が必要である。

## 謝 辞

本研究を推進する上で、資料提供をいただいた滋賀県水産試験場の幡野真隆さん、モデル解析を手伝っていただいた東京大学生産技術研究所の北沢大輔さんと立命館大学工学部の中島久男さん、原稿の確認をいただいたセンターの石川俊之さんに感謝します。また、観測を手伝っていただいたはっけん号の乗組員、観測員にも合わせて謝意を表します。

## 引用・参考文献

- Aota, Y., M.Kumagai, and K. Ishikawa (2004): Over 20 years trend of chloride ion concentration in Lake Biwa, *J. Limnol.*,62,42-48.
- 長谷川直子 (2006):レマン湖の低酸素化. 熊谷道夫・石川可奈子(編)「世界の湖沼と地球環境」,59-72,古今書院.
- Ishikawa,K.,M.Kumagai,and R.F.Ross(2005):Application of autonomous underwater vehicle and image analysis for detecting 3D distribution of freshwater red-tide *Uroglena americana* (Chrysophyceae).*J.Plankton Res.*, 27, ;129-133.
- Ishikawa,T.,T.Narita and J. Urabe (2004): Long-term changes in the abundance of *Jesogammarus annandalei* (TATTERSALL) in Lake Biwa. *Limnol Oceanogr.* 49,:1840-1847.
- Ishikawa,T.and J.Urabe(2002):Population dynamics and production of *Jesogammarus annandalei*, an endemic amphipod, in Lake Biwa, Japan. *Freshwater Biology* 47,:1935-1943.
- Ishikawa T. and J. Urabe (2005): Ontogenetic changes in vertical distribution of an endemic amphipod, *Jesogammarus annandalei*, in Lake Biwa, Japan. *Archiv für Hydrobiologie*,164, 465-478.
- 熊谷道夫, 石川可奈子, 焦春萌, ロス・ウォーカー (2005): 自律型潜水ロボット「淡探」を用いた琵琶湖研究の高度化と展望. *日本造船学会誌*,883,52-56.
- 熊谷道夫, 石川可奈子(2006):世界の湖沼と地球環境(編),古今書院.
- O'Reilly, C.M., S.R. Alin, and P. Plisnier (2003):Climate change decreases aquatic ecosystem productivity of *Lake Tanganyika, Africa*. *Nature*.424,766-768.
- Ostrovsky,I.(2003):Methane bubbles in Lake Kinneret: Quantification and temporal and spatial heterogeneity. *Limnol. Oceanogr.*,48,1030-1036.
- Rimmer A., Y. Aota, M. Kumagai, W. Eckert (2005): Chemical stratification in thermally stratified lakes:A chloride mass balance model. *Limnol. Oceanogr.*,50,147-157.
- Rimmer,A., M. Boger, Y. Aota , M. Kumagai (2006): A lake as a natural integrator of linear processes: Application to Lake Kinneret (Israel) and Lake Biwa (Japan), *J. Hydrology*, 319,163-175.
- Trevorrow, M. V., and Y. Tanaka. (1997): Acoustic and in situ measurements of freshwater amphipods(*Jesogammarus anandalei*) in Lake Biwa, Japan. *Limnol. Oceanogr.*,42,:121-132.