

琵琶湖環境監視技術の高度化

滋賀県琵琶湖研究所 熊谷 道夫

水中ロボット、淡探誕生

淡探はロボットである。といっても、陸上を走り回るロボットではない。水中、つまり、琵琶湖の中を泳ぐロボットである。このロボットには、数知れない最先端の技術が詰め込まれている。指示された場所に行って、与えられた仕事をして帰ってくる。単純に言えばそれだけのことである。しかし、操り人形のようにケーブルがついているわけではない。脳の代わりに取り付けられたコンピューターが、次々と指令を出して使命を果たしていく。このようなロボットを、私達は、自律型潜水ロボットと呼んでいる。そう、淡探は、自律型潜水ロボットなのである。

2000年3月に誕生した淡探は、一年間、琵琶湖で基本的な教育を受けた。それは、ちょうど、母親が赤ん坊に教えるのに似ている。前進のしかた。後進のしかた。潜航のしかた。旋回のしかた。障害物からの退避のしかた。そして、調査のしかた。予期しない機器のトラブルが重なって、何回もくじけそうになる日々が続いた。携わるスタッフも、へとへとに疲れきっていた。でも、誰も止めようとは言わなかった。赤ん坊に教える母親が、疲れても愛情を失わないのと同じように。何回もの試験と、失敗と成功。淡探の真新しいペンキに、次

第に傷跡が目立つようになってきた。そして、傷の数が増えると共に、淡探は安定的に作動するようになってきた。

何故、私達は淡探を作ったのだろうか。全長が約2m、空気中の重さが約180kgの巨体をもつ淡探も、面積670km²の広大な琵琶湖に出れば、小さな蟻のようなものである。しかし、その蟻に託された使命は、とてつもなく大きい。淡探の誕生は、私達が琵琶湖へ寄せる大きな愛情の賜物である。忘れてはいけない。私達の琵琶湖が病んでいることを。深く、静かに、そして、確実に、病が進行していることを。事実に基づいた、正しい情報を得るために、淡探は作られた。「観察する」、「計測する」といった科学の基本に立ち戻って、もっとよく、琵琶湖の実態を知ること。なぜなら、今、それが一番欠けていることだと思われるからだ。

例えば、琵琶湖の調査は、昼間を中心に行なわれている。しかし、琵琶湖における生物の営みが最も活発になるのは、夜であることを知る人は少ない。湖には、水温が深さ方向に急に変化する層、つまり私達が水温躍層と呼ぶ層がある。昼はどこにいるのかわからないような生物たちが、夜になるとここにたくさん集まってくる。水温躍層は、琵琶湖の生物達の、夜の社交場とも戦場とも言える。こんな夜の調査を行なうのに、淡探は最適である。というのは、自律型潜水ロボットは、眠らなくてよいからである。

また、今、琵琶湖で一番問題となっているのは、深い場所での酸素濃度の減少である。1980年代に急激に減少した琵琶湖北湖深水層の酸素濃度が、1990年代初頭に回復したが、1994年頃から再び減少し始めてきている。この原因は定かではないが、80年代の酸素濃度の減少と、90年代の減少は、あきらかに傾向が異なっている。80年代の酸素濃度の減少は湖底付近で発生していたが、90年代の



写真1 水面を航行する淡探

琵琶湖環境監視技術の高度化

滋賀県琵琶湖研究所 熊谷 道夫

減少は、湖底から5~10m上の層で起こっているようである。

琵琶湖研究所では、1980年代後半から、様々な方法で湖底上でのビデオ撮影を行なってきた。これらを見ると、近年、明らかに湖底から数m上の層の間で、有機物起源の浮遊物質が多くなってきている。また、湖底に生息するヨコエビの数も増えてきている。さらには、沈んだ水草が深い湖底のあちこちに見られるようになってきた。

問題は、過剰になった深水層の有機物が大量の酸素を消費し、無酸素と言う嫌気的な状態が出現すれば、湖底付近の水質や生態系の環境が一気に悪化する可能性があるということである。淡探は、このような琵琶湖で起こっている様々な現象を、机の上だけで議論するのではなく、映像やデータを通してよく理解し、最善の解決方法を模索することを目的として建造された。

淡探、赤潮を計る

琵琶湖に発生した淡水赤潮（*Uroglena americana*：黄色鞭毛藻類）の調査を、自律型潜水ロボット淡探が行っている。赤潮を形成する植物プランクトンは、水面下数mに広く分布しており、物理的な水流の影響によって表面に出現する。

図1は、2001年4月に琵琶湖で発生した赤潮の3次元分布である。これは、淡探に搭載した水中顕微鏡でプランクトンの映像を1秒間に30コマ撮影し、それを画像解析によって計数した結果を、3次元補間したものである。1978年に初めて琵琶湖に発生した赤潮は、その後毎年のように見られ、現在はその発生域も拡大している。このように、立体構造がわかると、全体の現存量の推定が可能となるだけでなく、その発生水域の特定も可能となる。このことによって、赤潮発生の原因究明が可能となりつつある。

Uroglena americana on April 27, 2001

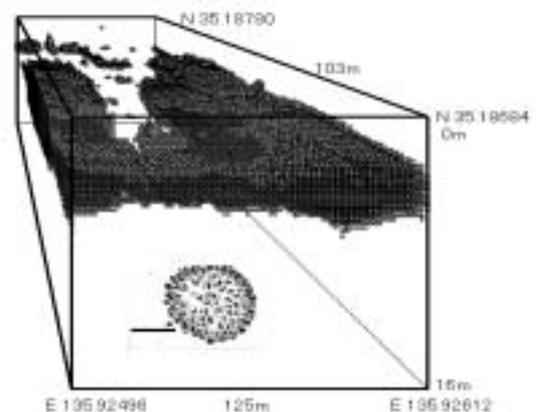


図1 琵琶湖に発生した淡水赤潮、ウログレナ・アメリカナの立体構造

淡探、湖底を観る

淡探は、湖底から0.9mの高さを保ちながら航行していく。腹部に取り付けた高画質デジタルスチルカメラによって、湖底の写真を連続的に撮影する。解像度は、約0.2mmである。このようにして撮影した画像から、湖底に生息する生物の個体数密度を調べている。

表1に示したように、ヨコエビの数が圧倒的に多く、その次にスジエビが占め、イサザはほとんど見られなかった。また、湖底の酸素濃度の低下によって湖底に生息する生物の数が激減することがわかった。

表1 淡探で撮影したデジタルスチル画像から計算した水深40m以深の底生生物個体密度の試算

	画像数	個体数/m ²
イサザ	370	0.01
ワカサギ	244	0.04
ゴリ	244	1.21
スジエビ	244	9.55
ヨコエビ	370	223.32
ウズムシ	244	1.13

湖底の酸素低下

地球の温暖化に伴って、冬季に琵琶湖の水が混合しにくくなってきている。このことは、水深70m以深の湖底付近に十分な酸素供給ができなくなり、近い将来、レマン湖のように恒常的な無酸素状態が形成される可能性を示唆している。そして、湖底付近に生息する生物は激減すると共に、底泥に含まれるリンや窒素、硫化物が溶出し、琵琶湖の深水層はそれらのプールと化す可能性がある。このように蓄積された栄養塩類や毒性物質が、湖の全体の水質や生態系にどのような影響を与えるかはまだ明らかではないが、基本的には望ましい状況とは言えないだろう。

湖の鉛直循環が低下し構造的に安定化することは、気候変動という大きなエネルギーに起因している現象なので、流入負荷量の削減だけを進めても解決できる問題ではない。このような巨大なエネルギーそのものを制御することは並大抵ではないが、わが国最大の淡水塊である琵琶湖において、より健全な環境を保持し、子々孫々に受け継いでゆくことは、滋賀県民のみならず、日本国民全体の共通な願いでもあるだろう。

琵琶湖研究所では、淡探だけでなく、さまざまな計測機器を駆使して、湖底の環境を監視している。図2に、最近3年間の琵琶湖湖底における水温の変化を示した。2001年から2002年にかけては、比較的暖冬で、春先の湖底水温は7℃前後であった。2002年4月上昇を開始し、2002年秋には7.5℃まで上昇した。

図3には、湖底上1mにおける溶存酸素飽和濃度を示した。2003年から2004年にかけての酸素飽和度は、あきらかに過去2ヵ年とは異なっており、80%程度までしか酸素が回復していない。つまり、2004年の冬は、琵琶湖で全循環が停止した年と考えられる。

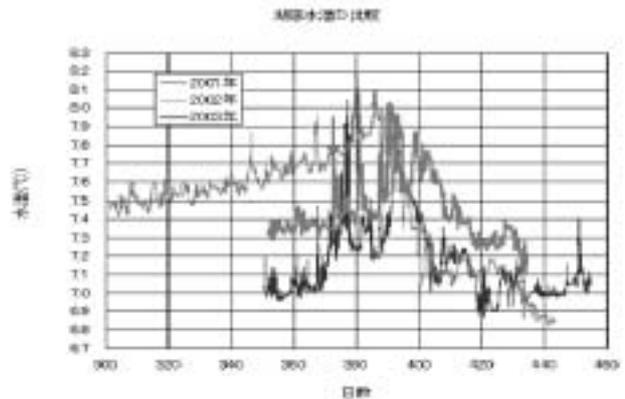


図2 2001年から2003年にかけての湖底水温の比較

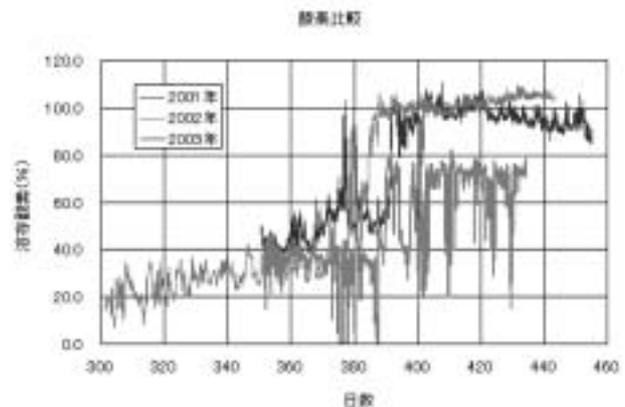


図3 2001年から2003年にかけての湖底酸素飽和度の比較

今後100年間で、日本の気温は約2℃上昇すると言われている。このことは、琵琶湖の混合がさらに弱まることを意味しており、湖底に十分な酸素が供給されないことが予測される。もし、今後、湖底付近に無酸素水塊が常駐するようになれば、生態系や水質に大きな変化が起こることが予測される。そのような危機に備えて、環境監視技術の高度化が必要である。