

琵琶湖環境の長期変動と近年の漁場環境問題

滋賀県水産試験場 環境病理担当
主任技師 幡野真隆

はじめに

琵琶湖は日本最大の湖であり、その面積は約 670km²にも及ぶ。琵琶湖の起源は約 400 万年前とされ、世界でもカスピ海、バイカル湖の次に、タンガニーカ湖とならんで 3~4 番目に古い湖である。当初三重県の上野盆地付近にあったが、次第に北上し、現在とほぼ同じ位置になったのは約 50 万年前とされている。その長い歴史から、琵琶湖には多種多様な生物が生息し、固有種の数も多い。生息する魚類はアユやニゴロブナ、ホンモロコなど 50 種余りが確認され、それらを対象とした独自の漁業が営まれている。しかし、戦後の近代化に伴う富栄養化の進行など、人間活動の影響を受けてその姿は変化している。

滋賀県水産試験場では漁場としての観点から琵琶湖の環境を把握することを目的として、琵琶湖の北湖において定期観測を行なっている。そこで観測から得られた琵琶湖水質の長期変動を述べるとともに、漁獲量や生物に及ぼす影響について考察したい。また、近年の漁場環境問題として、水産的な観点から農業排水の問題等についても紹介する。

1. 琵琶湖環境の長期変動

琵琶湖定点定期観測は 1915 年（大正 4 年）から調査が始められ、現在は琵琶湖東岸の彦根沖から西岸の安曇川沖にかけての 5 定点で調査を行っている（図 1）。当初は

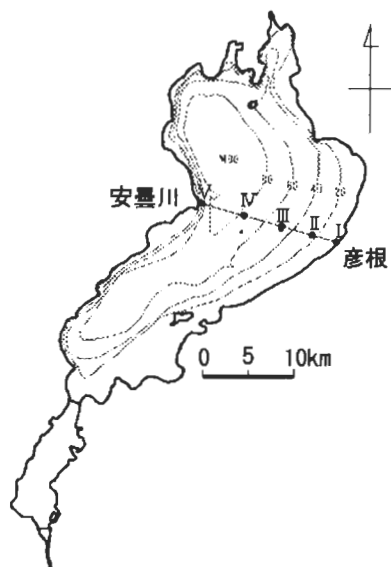


図 1 琵琶湖定点定期観測の地点図. 現在の定点による調査は 1950 年から行われている。

水温のみの観測であったが、その後、透明度や溶存酸素濃度、プランクトン沈殿量、栄養塩類等の項目が追加されてきた。これらの水質動向を表層と底層（約 80m）に分

けて述べる。

かつて琵琶湖の北湖は透明度が 16m (1926 年) を記録するほど清澄な貧栄養湖であった。まず、図 2 に透明度の経年変化を示す。琵琶湖北湖沖帯の透明度は 1922 年から観測されており、その変化を見ると 1930 年代までは年間平均値は 9m 前後と高く、年間最高値も 10m 以上を観測する年が多かった。しかし、1950 年頃には年間平均が 6m 前後まで低下しており、それからしばらく安定していたが、1990 年代からは再び上昇傾向にある。

一方、表層 0-10m 層のネットプランクトン量 (目合 95 μ m のプランクトンネットサンプルの沈殿量) の年間平均値では戦前の値が不連続で十分に比較できないものの、

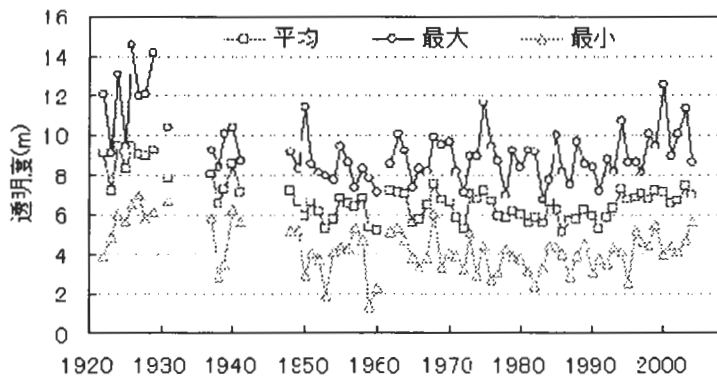


図 2 透明度の経年変化

1950 年代まではかなり低く 5ml m⁻³ 以下で推移していたが、1960 年ごろから急増し、1970 年代後半には約 15 ml m⁻³ まで増加した。プランクトン沈殿量と同様に、表層水の pH の年間最高値が、1970 年代末に最も高くなっていたことから、表層水では 1970 年代末が最も富栄養化した状態にあったと考えることができる。

透明度が低下する要因としては、プランクトン量の増加やプランクトンの小型化が考えられるが、1950 年までの透明度の低下はネットプランクトン量では説明できない。プランクトンが透明度に影響を与えていると考えれば、推測に過ぎないが、透明度が低下した 1950 年ごろまでにプランクトンの小型化など、琵琶湖のプランクトン群集に変化が始まっていた可能性が考えられる。

1950 年以降のプランクトンの発生状況は、富栄養化に従って 1960 年頃からプランクトンの大きなブルームが見られるようになり、その主要な原因生物である緑藻のクロステリウム等によって、水道のろ過障害などの問題が発生した。そのほか植物プランクトンの発生状況としては、1970 年代からはウログレナによる赤潮が発生して大きな社会問題となった。1989 年にはピコプランクトンの大発生、1994 年からは琵琶湖北湖でもミクロキスチスによるアオコの発生など、種組成は変化しつつある。発生時期も 1960 年頃からの琵琶湖北湖のプランクトンブルームは 6 月と 11 月頃の 2 峰型であったが、年間平均ネットプランクトン量の減少した 1990 年ごろから 6 月のブルームは次第により早い時期に移行しつつあるように思われる。11 月には明確なブルームが見られない年も多い。

定点間の水質の動向を比較すると、彦根側の Stn. I と他の 4 地点の二つにグループ

分けされる。1980 年頃までは地点間の水質には大きな差がみられなかったが、1990 年代後半には硝酸態窒素や COD の値に差が顕著になった (図 3)。これは、Stn. I は市街地の近傍であることから人間生活の影響を受けやすいものと考えられる。さらに

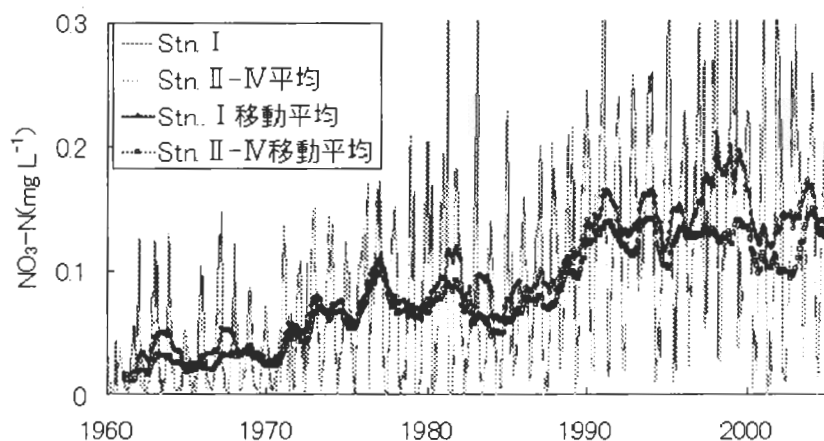


図 3 表層の硝酸態窒素濃度の経年変化

1991 年からは東北部下水処理場が供用開始され、処理水が付近に流入するようになった。下水道の普及により処理水量は年々増加している。処理水も高度処理が施されているものの、琵琶湖へ流出させる処理水の栄養塩濃度は湖水よりはやや高いレベルにあるため、局地的な負荷と Stn. I での硝酸態窒素濃度などの上昇との関連も推測される。下水処理水中にはエストロゲン物質や難分解性有機物が多く含まれているという報告もあり、今後周辺環境への影響を注視していく必要がある。

次に、底層水質の動向をみると、まず Stn. IV の水深 80m 層での水温は、1984 年までは年間最低水温が数年の周期で徐々に上昇し、急激に低下して元に戻るサイクルを繰り返していた (図 4)。しかし、1984 年から 1990 年にかけて水温が急激に上昇し、

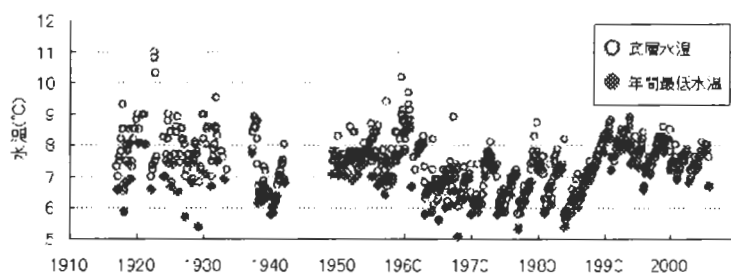


図 4 底層水温の経年変化

以後高い水準で推移している。琵琶湖の底層部の水温は全循環期の混合や融雪水の流入によって冷却される。琵琶湖周辺の気温も過去 20 年の間でも 1°C 以上高くなっており、冷却効果が低下していると考えられる。熊谷ら (2006) は、湖面における熱フラックスの積算値を求め、1986 年から 1990 年にかけては湖に熱が蓄積され、1978 年から 2002 年までの 25 年間の熱収支からも琵琶湖は暖まりつつあることが示されている。

底層の溶存酸素濃度は 1950 年代には年間最低値が 8mg L^{-1} 以上であったが、1972 年には 3.4mg L^{-1} まで低下した (図 5)。このころは経済社会の高度成長期に伴い琵琶湖周辺でも栄養塩負荷が増大し、富栄養化が進行した。中 (1973) は急激な溶存酸素量の低下を報告し、さらなる底層環境の悪化が懸念されたが、以後 1990 年代は横ばい傾

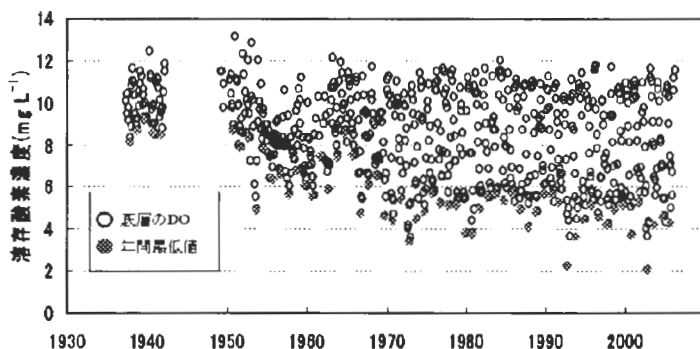


図 5 底層溶存酸素濃度の経年変化

向であった。1980 年には琵琶湖富栄養化防止条例が施行されるなど、富栄養化抑止の努力が続けられてきたが、1992 年には 2.3mg L^{-1} 、2002 年には 2.1mg L^{-1} と大きく低下してきている。また、図 5 の溶存酸素濃度をプロットの分布に注目すると、1980 年ごろから、 8mg L^{-1} あたりの中間値が減少し、濃度が低下している時期が長期化している傾向が伺える。溶存酸素濃度の低下要因として、底層での水温上昇によって酸素消費速度が増加するのではないかと考え、検討したが、両者の間に関係は認められなかった。溶存酸素濃度とプランクトン沈殿量を比較すると、1992 年までは大きなブルームが発生した年に溶存酸素濃度が前年よりも低下しており、プランクトンの底層への沈降による有機物供給量の増加が一因ではないかと考えられた。しかし、2002 年の極端な DO の低下は沈殿量とは関係が見られず、他の要因についてさらなる検討が必要である。

底層の溶存酸素濃度は底層を利用する生物の生息環境として最も重要であり、そこを利用する生物に多大な影響を与えると考えられる。たとえば、イサザは早春産卵のために湖岸に接岸する時以外は、沖合で生息している。日周鉛直運動をすることでも知られており、夜は水温躍層付近まで浮上するが、昼間は湖底上で生活している (高橋 1981)。底層に依存した生活史を持つことから、底層での溶存酸素濃度の低下の影響を非常に強く受けるという (熊谷ら 2006)。また、ニゴロブナやホンモロコなど多くの魚類も冬には沖合の底層で越冬しており、無関係ではないだろう。

そして栄養塩濃度においては、表層では近年富栄養化の進行は収まっているとされているが、底層では硝酸態窒素やリン酸態リンの蓄積が進行している。特に硝酸態窒素濃度の上昇は水温の上昇した 1980 年代後半と同時期に観察され、水温上昇に伴う鉛直混合の滞りが原因の一つと考えられる。底層の底泥にも栄養塩が蓄積しており、底層の貧酸素化による溶出の可能性がある。

このように琵琶湖の深層部の環境は大きく変化しており、ベントス群集にも様々な変化が起きてきている。1991 年にはチオプロローカという硫化水素を利用する糸状細菌が、琵琶湖で初めて発見された。このチオプロローカは貧酸素化する過程で出現すると

されている。また、2002年にはメタロゲニウムというマンガン構造体が出現した。メタロゲニウムはマンガニオンが存在する環境、つまり嫌気的環境で発生すると考えられており、底泥表面が嫌気的になってきている可能性を示している。他にも近年の底層水温上昇や溶存酸素の低下によってベントス群集にも多くの変化が生じていることが報告されている。

琵琶湖環境の変化は1980年頃までの富栄養化による変化の他に、1980年代から急激に進んでいる気温の上昇にともなう温暖化による変化が拍車をかけている。アフリカのタンガニーカ湖では温暖化による影響で漁獲量が激減したという(O' Reilly et al. 2003)。温暖化の進行はこれまでの琵琶湖生態系の姿を一変させ、そこに暮らす生物たちに甚大な影響を与える可能性がある。熱帯にあるタンガニーカ湖と温帯にある琵琶湖では環境条件等は大きく異なるが、琵琶湖においても生産力の低下が起きる可能性もあり、今後、琵琶湖の生態系を維持するために対策が必要である。

2. 近年の漁場環境問題

琵琶湖の周辺には40,000haを越える水田地帯が広がり、昔は、それら農地の多くは区画面積が小さく不整形であった。しかし、農業生産の効率化を目的に1963年以降、農地区画の拡大・整形と用排水路の整備等の圃場整備事業が進められ、2006年には88%が竣工している。圃場整備事業前は、水耕時に上の水田の排水を隣接する下の水田が用水として反復利用する「田越しかんがい」が主流であった。しかし、同事業により用水と排水が完全に分離され、近年では、排水（農業濁水）は河川を介して直接、琵琶湖へ流出するようになってきた（写真）。農業濁水は琵琶湖の汚濁負荷の一因となっているほかにも、懸濁物質や農薬などの成分が生態系に及ぼす影響が懸念されている。そこで、水産振興という観点から農業濁水の漁場環境への影響を検討するため、発生状況や魚類等への影響について考える。

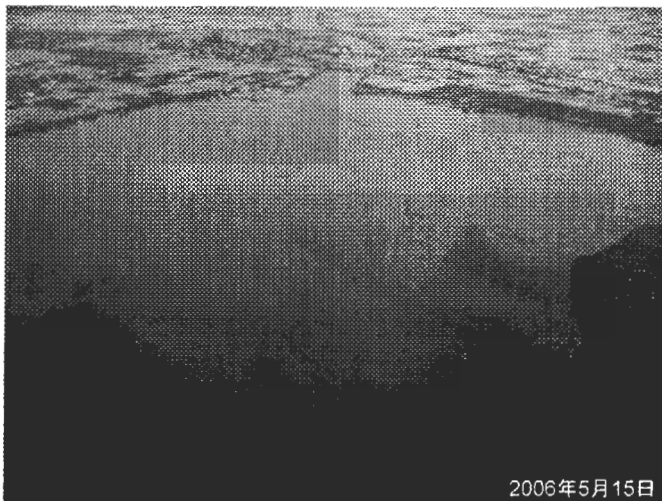


写真 琵琶湖に流入する農業濁水
に覆い尽くされるエリ
東近江市 大同川河口

滋賀県東部を流れる宇曾川は県内でも農業濁水の発生が顕著な河川として知られている。例年、宇曾川の河口部では4月下旬から5月の中旬にかけて濁水の発生が観察されている（図6）。透視度50cm以下を濁水発生と定義した場合、過去17年間の濁水発生時期の動向は、1989年には4月上旬に発生が始まっていたのが近年には4月

の下旬になり、全体的には5月の連休を中心とした時期へと移行してきているようである。これは農家の兼業化の進行等、営農スケジュールの変化が影響していると考えられる。しかし、発生日数には25～30日前後で変化は認められなかった。

琵琶湖全体への汚濁負荷として考える場合、宇曾川のように水量の多い河川の影響が大きい。しかし、琵琶湖には多くの農業排水路等の水路が直接流入しており、このような小さな水路は水量は少ないものの、水田からの排水が河川水で十分に希釈されることなく、琵琶湖に流入する。産卵繁殖の場として重要なヨシ帯に直接流れ込むことも多く、沿岸域のミクロの環境への影響を無視できない。近江八幡市牧町にはヨシ帯があり、水産資源保護法に基づくフナ・モロコの産卵保護水面にも指定されている。そこで、2005年にヨシ帯内に流入する承水溝（農業排水路）で調査を行ったところ（図7）、高濃度の濁水が発生し（図6）、5月上旬には周辺のヨシ帯の沖合まで覆い尽くす様子が観察された（図7）。

濁水の発生よりもやや遅れて、排水中には農薬も含まれるようになる。この時期はほとんどが水稲用除草剤であり、5月下旬から6月上旬に最も濃度が高くなる。近江八幡市での調査結果では5月上旬には発生初期であるため、検出される成分は少なく、大量の濁水の発生と同様の傾向を示して低濃度ながら、広範囲に拡散していた。6月上旬には農薬が多く検出される時期で、種類も多く高濃度であるが、水量が少ないため、岸近くに集中する傾向が見られた。

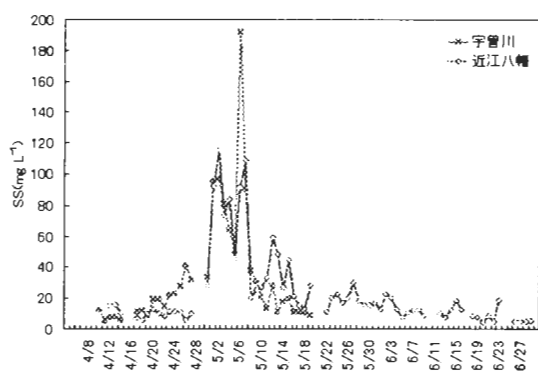


図6 平成17年度の宇曾川河口と近江八幡市牧町地先の排水路における濁水発生状況

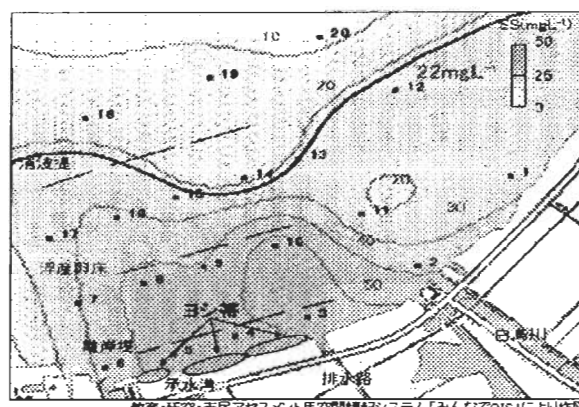


図7 近江八幡市牧町地先の排水路における濁水拡散状況

前述の通り農業濁水は4月～5月に最も顕著になるが、この時期はまた沿岸での漁業も盛んに行われている。琵琶湖で最も重要な漁獲魚種であるアユはこの時期湖岸ではエリや追いさで網により、流入河川ではヤナによって漁獲されている。追いさで網漁は接岸したアユを網に追い込むという漁法であるため、濁り自体によって操業に障害がでるほか、アユは濁りに敏感な魚であり、濁水を忌避するといわれてきた。そこで、濁水がアユの行動に及ぼす影響を明らかにするため、模擬濁水を用いて「二者択一水路」による実験を行ったところ、アユは22 mg L⁻¹以上の濁りを忌避すると推定された。また、農業濁水には栄養塩類も多く含まれているため、水田に散布される肥料（表示成分：NH₄-N 14%、P 14%、K 14%）を溶した水について同様に実験を行

ったところ、肥料として 1 mg L^{-1} 含まれた水を忌避することも判明し、これは 40 mg L^{-1} の濁水と同じレベルの忌避率であった。肥料中のどの成分が忌避に影響を及ぼしているかはまだ明らかではないが、例えば $\text{NH}_4\text{-N}$ や、P であった場合は現場で検出される濃度である。また、 22 mg L^{-1} 以上の濁水は例えば宇曾川では例年 4 月から 5 月の濁水発生期間中に、約 20 日間継続して発生している。牧地先での調査では 5 月上旬には 22 mg L^{-1} 以上の範囲は沖合数百メートルまで達した（図 7）。

かつて琵琶湖で農薬による水産生物への被害としては 1960 年に PCP によるセタシジミの斃死事故があり、その被害は 4 億円に上った。最近では魚毒性の低い農薬が主流を占めるようになり、県内での斃死事故は見られないものの、琵琶湖では検出される主な成分が除草剤であることから、植物プランクトンに及ぼす影響が依然として懸念される。春は多くの魚類の繁殖時期であり、仔稚魚の餌料環境への影響を評価する一環として、一次生産への影響を評価した。2005 年に濁水調査を行った近江八幡市牧町地先の湖水を用いて緑藻 *Pseudokirchneriella subcapitata* よるバイオアッセイをおこなったところ、5 月下旬から 6 月上旬にかけてプランクトンの増殖阻害が観察された。同時期に行った農薬のモニタリング調査の結果と毒性データから除草剤のプレチラクロールが原因であったと推測された（図 8）。さらに 2006 年 5 月 9 日に行った周辺水域への拡散調査でのプレチラクロールの濃度分布から、沖合約 500m まで増殖阻害の影響が及んでいると推察された。植物プランクトンの農薬の感受性は種類によって大きく異なることがあり、1 種類だけの実験では十分な評価ではないため、今後、現場での基礎生産への影響を明らかにするとともに産卵繁殖の場であるヨシ帯内部での濁水および農薬の動向についても調査する必要がある。

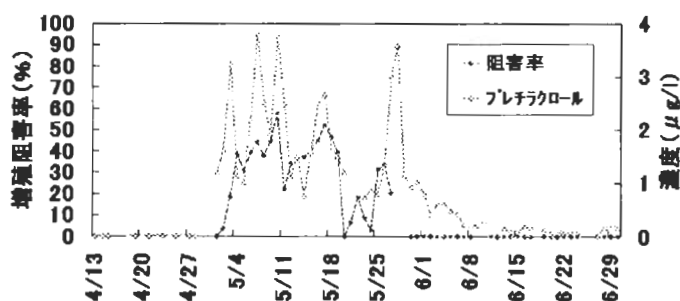


図 8 植物プランクトンによるバイオアッセイの結果と除草剤プレチラクロールの動向

このように農業排水問題は依然として残る中、滋賀県では新たな汚濁負荷対策を始めている。平成 15 年に制定された「滋賀県環境こだわり農業推進条例」では、農薬および化学肥料の使用を従来から半減し、農業排水の適正管理等を行った農産物への認証と環境農業直接支払い制度を行っている。環境こだわり農業に取り組んでいる面積は年々増加しており、今後、農業排水問題が解消されていくことを期待したい。

おわりに

現在、琵琶湖が受けている環境変動は温暖化による地球環境的な問題から、生活由来の直接的な汚濁負荷など広範囲にわたっている。今後、琵琶湖の環境保全を進め、水産資源を維持していくためには、環境変化がもたらす生態系への影響を一つ一つ明らかにし、その解決策を講じていく必要がある。