

## 6. 重点プロジェクト

琵琶湖における生態系レジームシフトに関する先導的研究(平成 18~20 年度(2006~2008 年度)):結果報告

# 琵琶湖における生態系レジームシフトに関する先導的研究

石川俊之・中島久男<sup>1)</sup>・北澤大輔<sup>2)</sup>・石川可奈子・熊谷道夫

## 要約

海洋や湖沼生態系で注目されているレジームシフトについて、琵琶湖を想定した 2 種競争の数理モデルや三次元流動場-生態系モデルによる解析や検証に必要な観測を行った。水温や成層の季節変化を組み入れた数理モデルを解析した結果、栄養塩負荷や水温変化によって、植物プランクトンの優占種交替にレジームシフトがおりうる可能性が示された。このことは、琵琶湖の植物プランクトン種を解析していく上で、履歴効果(ヒステリシス)を考慮に入れる必要性を示唆している。また、流動場-生態系モデルのシミュレーションを行った結果、琵琶湖の富栄養化とその後の富栄養化対策による栄養塩削減がプランクトン量や湖底の溶存酸素濃度といった水質に与える影響は、水温変化に起因する影響に比べて大きかったと示された。一方で、冬季の混合について水温変化の影響を示唆するシミュレーション結果が得られており、冬季混合が遅れることや将来止まってしまった場合について適切に評価するための知見の集積が必要であるといえる。一方、植物プランクトンの鉛直分布や湖底環境の変化について、多波長蛍光光度計や自律型潜水ロボットといった先端技術を用いた観測を行いその有用性を確認することができた。

## 1. はじめに

湖沼は攪乱を常に受けている系の一つである。攪乱のなかでも人為的なもの(人的攪乱)には、栄養塩負荷の増加にともなう富栄養化、浚渫や埋め立てなどの地形改変、温排水にともなう水温上昇など様々なものがある。このような人為攪乱に対する保全策として多く活用されているのが、Vollenweider モデル(OECD 1982)に代表される富栄養化モデルであろう。一般的な富栄養化モデルは、Sakamoto(1966)等で示された全りん(全窒素)ークロロフィルの回帰直線をもとにしている。しかしながら、攪乱に対する系の反応は必ずしも直線的なものに限らない。近年、海洋や湖沼で注目されている「レジームシフト」とは何か、琵琶湖ではどのようなものが想定されるのか知見を整理し解析を行うことが本プロジェクトの大きな目的である。

レジームシフトの研究は、海洋における漁獲量の変動の解析からはじまるとされる。レジームシフト研究の先駆けといわれる Kawasaki(1983)では、太平洋の遠く離れた極東マイワシ、カリフォルニア・マイワシ、チリ・マイワシの 3 つの資源の大変動が一致することを指摘し、太平洋規模の海洋変動や気候変動を考慮に入れる必要性を指摘した。その後現在にいたるまで、数多くの研究者が気候や海流に対する海洋生態系の関係を解析し、海面水温の不連続な変化とそれに対応した生物資源の変動に

ついて明らかにしてきた(例えば川崎ほか 2007)。外洋域では、生態系への栄養塩供給は深層からの流れによって規定されており、水温が生態系の特徴を決める大きな要因になるのであろう。

湖沼でのレジームシフトの研究が注目されるようになったのは Scheffer et al.(2001)による Nature に掲載された論文が一つの契機であろう。この研究では、栄養塩の外部負荷に対する水草と植物プランクトンの現存量について解析を行い、水草の繁茂する貧栄養湖が負荷量の増加にともない富栄養化すると植物プランクトンの優占する湖に突然変化すること、栄養塩の負荷量を減少しても水草の優占する湖に戻るには、水草優占から植物プランクトン優占の交替がおきた負荷量よりも低い負荷量が必要であることを示した。浅い湖における優占植物の交替が湖沼のレジームシフトの例としてよく知られている。しかし、レジームシフトと考えられる現象はこれだけではない。例えば、Scheffer & van Nes(2004)では、海洋と湖沼のレジームシフトとして次の現象を挙げている。湖沼では、(1)沈水植物(水草)と植物プランクトンの優占の交替(2)貧酸素化によるりんの回帰(3)浮葉植物の優占(4)湖底堆積物の安定性(巻き上げ)(5)藍藻の優占(6)トロフィックカスケード(上位捕食者の存在量の変化が食物網を通じて下位の生物量を変化させる現象)における閾値の存在(7)先住者効果などによる他

1) 立命館大学理工学部 2) 東京大学生産技術研究所

種共存系での多重安定性（外来種の侵入も含む）を上げている。さらに、海洋では（1）捕食者（ウニ）の乱獲に伴う珊瑚礁での海藻の繁茂（2）大型海藻林（kelp forest）の面積の変化（3）崩壊した水産資源がなかなか回復しないこと（4）カタクチイワシ資源とイワシ資源の循環性（5）太平洋における生物群集構造の変化（6）海洋循環の変化（7）貧酸素化現象、の7つを上げている。なお、ここで変化と訳した語は原文の記述は shift であって change でないことに注意する必要がある。すなわち、ここで上げられている変化は、複数の安定的な状態の間の変化である。実はこの複数の安定的な状態の間での変化は、レジームシフトのひとつの定義となっている。

さて、本題である琵琶湖におけるレジームシフトについて考えていこう。レジームシフトのいろいろな例を Scheffer & van Nes (2004) に従ってあげてみたが、実際琵琶湖で起きている現象との関連性を覗くことができる。

（1）沈水植物（水草）と植物プランクトンの優占の交替は、琵琶湖の南湖における水草の繁茂に類似した状況である。（2）貧酸素化によるりんの回帰は、北湖今津沖で貧酸素化（低酸素化）が起きており、溶存酸素濃度が低いときに全りん濃度の増加が観測されている。（3）浮葉植物の優占については、港湾部でのハスやホテイアオイの群落形成と共通点が考えられる。（4）湖底堆積物の安定性（巻き上げ）は、湖底の泥質化と関連があるかもしれない。（5）藍藻の優占については、1980年半ばから北湖南湖ともに全りんの増加はみられず、減少に向かっているにもかかわらず南湖では1980年代、北湖では1990年代にアオコが発生したと関連が考えられる。（6）トロフィックカスケード（上位捕食者の存在量の変化が食物網を通じて下位の生物量を変化させる現象）における閾値の存在については琵琶湖について具体例は思い浮かばないが、（7）先住者効果などによる他種共存系での多重安定性（外来種の侵入も含む）については、オオクチバスやブルーギルが移入されたと考えられる時期と湖内で爆発的に増加したとされる時期が異なることと関連が覗われる。このように、琵琶湖におきている様々な現象が、レジームシフトと関連している可能性がある。これらを適切に解析する方法論を探ることが本プロジェクトの大きな目的である。

とはいうものの、琵琶湖においてレジームシフトの可能性のある現象は上に列挙したように、複数存在する。それぞれについて検討が必要であるが、観測データに基づく解析ができる現象は限られている。また、個々の現象に関わる生物の特性についての知見も十分とはいえない。そこで、本プロジェクトでは、レジームシフトを駆動する攪乱として、栄養塩負荷と水温上昇に着目し、それに対応する現象として植物の優占交替と湖底の溶存

酸素の低下を対象とすることとした。

## 2. 方法

本プロジェクトでは、植物プランクトンの優占種の交替に対する栄養塩負荷と水温上昇の効果についての数理モデルの解析と、栄養塩負荷と水温上昇が琵琶湖の栄養塩やクロロフィル量や湖底の溶存酸素濃度に与える影響についての三次元流動場-生態系モデルの解析の2通りの解析を行った。また、これらの解析の対照データとして、湖内での植物プランクトンの鉛直分布と密接に関連する、多波長蛍光光度計による観測や、湖底の溶存酸素濃度の分布や生物影響を観測するための自律型潜水ロボットによる観測などを実施した。

個々の方法については誌面の都合で割愛するが、詳しくはプロジェクトの総合報告書を参照いただきたい。なお、取り組んだ内容の概要は次章の結果と考察で触れながら説明する。

## 3. 結果と考察

### 3.1 琵琶湖水質データからみる長期変化

まず、本プロジェクトで注目した、水温変化や栄養塩の変化について基礎データを検討した結果からみていくこととする。琵琶湖の水温の変動を解析した結果、表層水温の年平均値と、彦根地方気象台で観測された年平均気

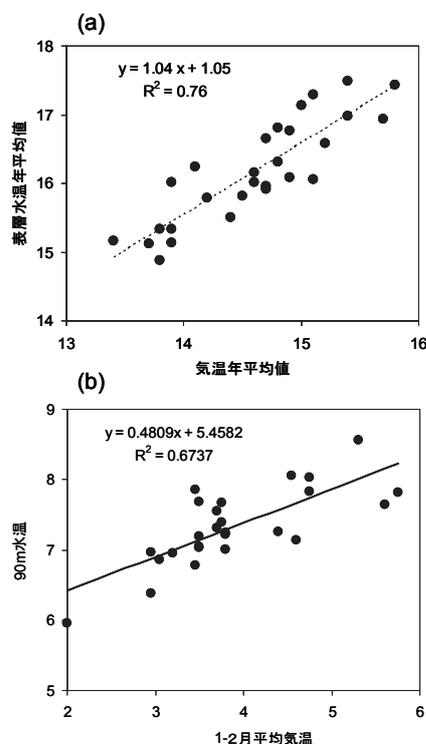


図1 琵琶湖の水温と気温の相関（1979年から2008年）  
 (a) 0.5m水温と年平均気温、(b) 90m水温と1-2月平均気温

温と強い相関がみられた（図1a）。一方、深水層の水温と相関が高かったのは、1～2月の平均気温であった（図1b）。深水層の水温は1～2月の平均気温と相関が高いことは、速水（1999）によってすでに報告されているが、速水（1999）の説明のとおり、深水層の水温は冬季に生じる全循環で決定されていると考えて良いだろう。これに従えば、仮に冬季全循環が停止すると、深水層の水温と冬季の気温の関係が崩れるものと予測される。深水層の水温について精度の高い観測を継続していく必要があるだろう。

琵琶湖の水温を定期的に測定する取り組みは水産試験場が1914年に開始した定期観測までさかのぼれるが、気温の変化は彦根地方気象台による観測の1894年までさかのぼることができる。1894年度から2008年度末までの気温変化の線形トレンドを月別に求めたところ、図2のように、5月、10月の順に気温上昇率が高かった。気温と水温の相関から、琵琶湖の水温の季節変化についても5月、10月の上昇が高いことが期待される。実際、1979年から2005年までのデータ（滋賀県琵琶湖環境科学研究センター）を用いて、成層の強さ（ここでは10mと90mの水温に起因する水の密度差と定義した）を計算すると、同様に5月、10月の成層強度の増加が顕著であることが明らかになった（図3）。

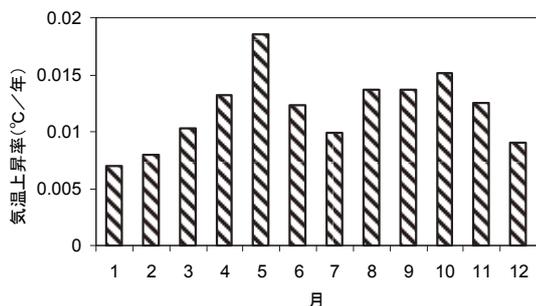


図2 彦根地方気象台による観測値（1894～2007）を元にした各月の気温上昇率（線形トレンド）

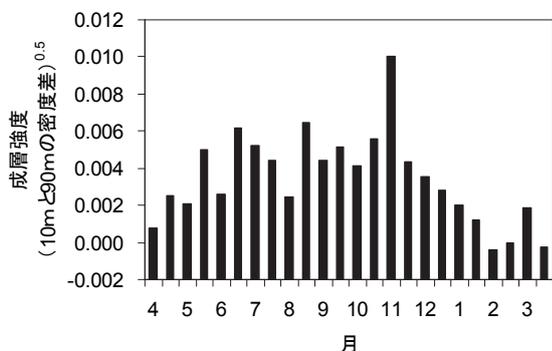


図3 今津沖中央（17B）の成層強度 ここでは、10m水温、90m水温から推定された水の密度差の平方根

次に、湖の栄養状態の指標のひとつである全りん濃度についてみてみることにする。これまで、全りん濃度の推移は、旧衛生環境センターが1979年に開始した公共用水域の監視によるもので議論されることが多かった。しかしながら、1979年以前も、いくつかの機関・研究者によって観測されている事実もある。これらの中で、比較的まとまっているものは藤永（1982）に掲載されているデータである。地点の差異、分析やその前処理の方法に若干の違いがあるが、藤永（1982）と滋賀県環境白書のデータを並べたところ、1960年代と1970年代までは琵琶湖の全りんが増加した時期にあたり、1980年代以降は全りんが横ばいもしくは漸減の時期と判断された。

### 3.2 植物プランクトンの競争におけるレジームシフトの数理モデルによる解析

前項で示したように、琵琶湖の環境変化として、(1) 栄養塩の増加から減少、(2) 水温の増加という二つの長期変化について、実際のデータからも確認ができた。そこで、この2つの長期変化が植物プランクトンに与える影響を解析するために、植物プランクトン2種が競争する系を考え、数理モデルの手法で解析を行うこととした。数理モデルは、表水層と深水層の2ボックスモデルで構成した。この数理モデルの特徴は、琵琶湖における季節成層を念頭に、2ボックス間の物質交換に季節性をもたせたこと、水温や光についても季節性をもたせたことである。また、モデルにおいて競争させる2種の植物プランクトンは、プランクトンのサイズの大小と増殖に適した水温の高低を設定した。これは、比較的高温を好み細胞サイズが小さい藍藻類（藍藻型）と、比較的低温を好み、細胞サイズが大きい珪藻類（珪藻型）を念頭においたものであるが、モデルの実装上の問題で、ケイ素をパラメータに設定しなかった。琵琶湖と対応させて考えると、細胞サイズが大きい藻類は大型緑藻も含んだものと考えてよいだろう。

数理モデルの解析の結果、植物プランクトン2種の競争において、栄養塩負荷の増加によって藍藻型が優占すること、栄養塩負荷を減少させる場合、増加の時に優占した栄養塩負荷よりも低い栄養塩負荷で藍藻型の優占が解消される、履歴効果（ヒステリシス）が見られた（図4）。

このように、単純な2種の生物系において、水界の鉛直構造を考慮すること、光と栄養塩という2種類の資源を考慮するとレジームシフトが起こる可能性を示すことができたのは、本研究の成果の一つである。

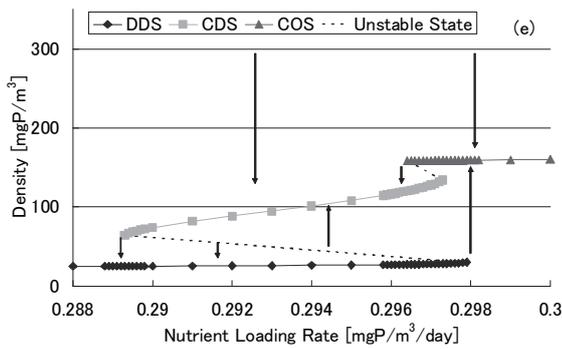


図4 栄養塩負荷量に対する藍藻型と珪藻型の年間最大密度の変化。藍藻型寡占(COS)、藍藻型優占(CDS)、珪藻型優占(DDS)の3つの安定状態の間でレジームシフトが起こりうる(グラビア10頁参照)

また、解析の結果、次の3つの安定状態が存在し、その間でのレジームシフトが起こりうることを示された。

(A) 栄養塩負荷量が多く鉛直混合率が小さいと、藍藻型が優勢となり珪藻型は極端に低密度となる(あるいは絶滅する)。

(B) 栄養塩負荷量が少なく鉛直混合率が小さいと、珪藻型が優勢となり藍藻型は極端に低密度となる(あるいは絶滅する)。

(C) 栄養塩負荷量が多く鉛直混合率が大きいと、藍藻型と珪藻型は共存する。

これら3つの状態がそれぞれ安定であるときには、その状態において強い正のフィードバックが存在しているものと考えられた。

このように、数理モデルでは栄養塩負荷量や水温の変化(ここでは鉛直混合率)が植物プランクトンの競争関係においてレジームシフトをおこしうることを示すことができた。

ここでの数理モデルは、あくまでも琵琶湖の物理条件などを参考にした仮想実験ではあるが、どのような条件でどのようなタイプの生物が有利になるかを、フラスコの大さきで(培養系)はなく、鉛直混合がある湖を想定して解析したことに意義がある。実際の植物プランクトンの種構成の変化は、ここでの解析に比べて遙かに複雑である。しかし、どのような特性を持った種が有利になるかという解析結果は、実際のデータの理解に貢献していくものと期待される。

### 3.3 数値シミュレーションによる再現計算

このように数理モデルの上では、琵琶湖の植物プランクトンに関してレジームシフトの可能性を指摘できた。そこで、実際に琵琶湖の植物プランクトンの種組成の変化においてレジームシフトがおきているか検討する必要がある。残念ながら、琵琶湖の植物プランクトンは

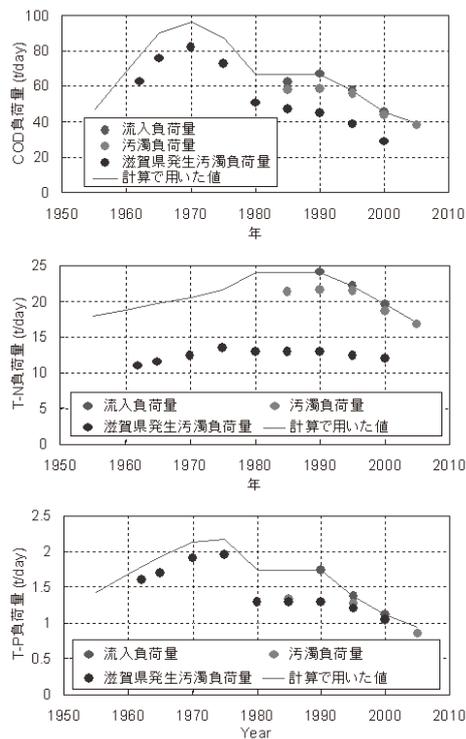


図5 化学的酸素要求量(COD)、全窒素(T-N)、全りん(T-P)の汚濁負荷量の経年変化(文献値)と計算に用いた値(線)

数理モデルで示したような2種類の優占種の競争で成り立っているわけではない。また、数理モデルでパラメータとして使用した、水温の違いによる成長効率の違いといった個々の種の特性について十分にデータが揃っているわけではない。

このため、本研究ではレジームシフトを起こす要因となりうる栄養塩負荷量の変化と水温の変化に対し、植物プランクトンの「全体量」に与える影響についてシミュレーションを実施することとした。また、植物プランクトン量の変化に影響を受け、同時に水温変化も影響を及ぼすと考えられる湖底の溶存酸素濃度変化についてもシミュレーションによる解析の対象とした。

数値シミュレーションによる再現計算を行う上で、重要になるのが琵琶湖への栄養塩流入負荷の変化をどのように与えるかである。本研究では、滋賀県による流入負荷量の推定値を線形補間し、各年の流入負荷として与えている(図5)。

まず、1955年から2005年の気象データや補間した流入負荷量をもとにしたシミュレーションをおこなった結果を述べる。ここでは、実測値が存在するパラメータのうち、クロロフィルa濃度(図6)、と溶存酸素濃度(図7)を図示する。その他の計算結果については、総合報告書に掲載している。

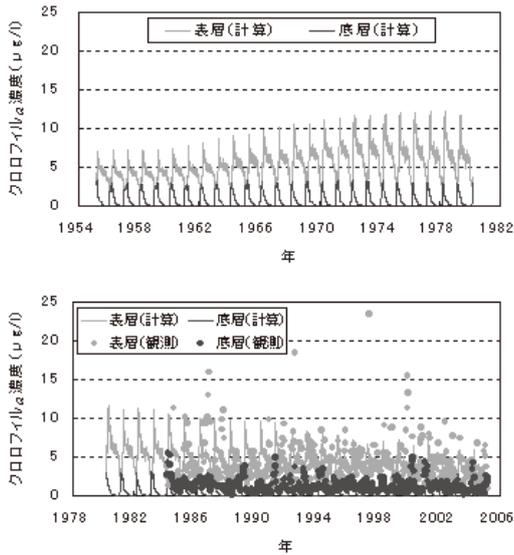


図6 1955年～1980年（上段）と1980年～2005年（下段）の今津沖表層と底層のクロロフィルa濃度の計算結果（観測結果は1984年より）

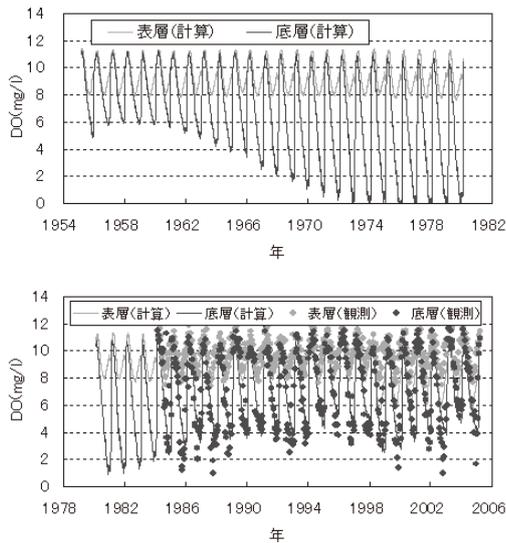


図7 1955年～1980年（上段）と1980年～2005年（下段）の今津沖表層と底層の溶存酸素濃度変動（観測結果は1984年より）

シミュレーションの結果は、栄養塩の流入負荷の変遷と同じ傾向を示した。すなわち、1950年代から1970年代にかけて湖内の栄養塩濃度やクロロフィル量、有機物量が増加し、1980年ごろから現在に至るまで減少するというパターンである。また、湖底近くの溶存酸素濃度も同じようなパターンを示した。これは、本シミュレーションでは湖底への有機物負荷は表層の生物生産とほぼ比例した形になっていることや、湖底近傍での溶存酸素の消費は供給さ

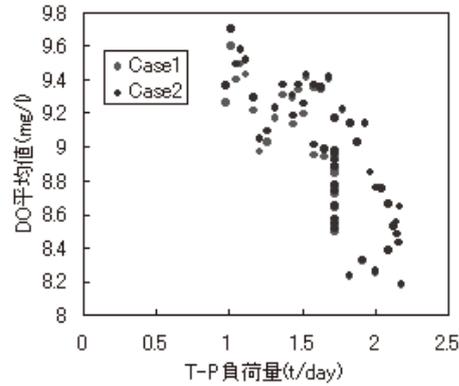
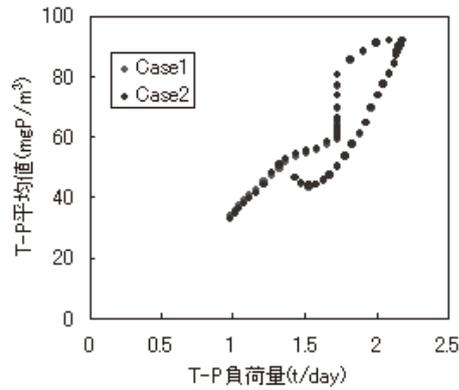


図8 全りん濃度の平均値（上段）、溶存酸素濃度の平均値（下段）と全りん負荷量との関係（グラビア10頁参照）

れた有機物が速やかに消費される形でモデル化されていることが要因と考えられる。

次に、水温変化が琵琶湖の水質に与えた影響を計算するため、条件を変えた二通りのシミュレーション計算の比較を行った。1つめは、これまで示した計算そのもの、つまり実際の気温データを用いたものである（Case 1）。2つめは実際の気温ではなく、1955年から2005年までの長期トレンド（二次関数）を除去した仮想データを使用したものである（Case 2）。

この二つのシミュレーション結果を比較すると、Case 1で溶存酸素濃度が若干低くなっているのを除けば、濃度の値、変動パターンともに両者でほとんど差が見られなかった。化学的酸素要求量、全りん、全窒素に関しては、1990年代前半までは、Case 1の方がCase 2よりも小さな値となっており、Case 2では水温が若干低いために、有機物の分解速度が小さくなり、有機物の濃度が高くなった可能性が考えられる。一方、1990年代後半以降は、逆にCase 1の値の方が大きくなった。これは、Case 1の方が冬季の鉛直循環がやや弱く、北湖から南湖への物質輸送量が減少する効果が現れ始めるためであると考えられる。いずれの場合もCase 1とCase 2との差は、2～3%程度の範囲内であり、設定した境界条件の範囲内では、気温の変化が琵琶

湖の水質に及ぼす影響は軽微であった。全体的な傾向として、栄養塩や有機物の負荷量が大きい領域では Case 1 と Case 2 の差が小さく、栄養塩や有機物量の小さな領域では、Case 1 と Case 2 の差が大きくなることを示すことができた (図 8)。

なお、シミュレーションの結果を「よく再現できている」と捉えるか、「あまり再現できていない」と捉えるかは、意見の分かれるところであるが、このように 50 年以上のシミュレーション計算を行うことが可能なモデルを構築したことの重要性を強調しておきたい。長期計算を視野に入れずに作られたモデルでは、再現時間が長くなると計算結果が発散してしまい、極端な値を取りやすくなるためである。

シミュレーションによる取り組みをまとめると

- ・ 50 年にわたる再現計算に耐えられるモデル計算手法を確立した。
- ・ 栄養塩や水温の変化の効果を計算できるようになった。
- ・ 水温変化の効果は栄養塩が低いレベルで効果が現れやすいことが示された。
- ・ 定量的な再現性は完全なレベルには達していないが、今後様々なメカニズムについてパラメータや式の見直しを行うことで対応できると期待される。

### 3.4 観測手法の開発と観測の実施

#### 多波長蛍光光度計による観測

実際にレジームシフトを検証するためには、何よりも観測データが存在することが重要となる。しかしながら、観測データを取得する契機はたいてい何か問題がおきてからという場合が多い。3.1 で示したように、琵琶湖沖帯の

水質のデータを公的機関が定期的に取り出したのは、実は富栄養化の対策を講じてからである。1. で示したような現象について、仮に問題が顕在化し社会問題になりうるならば、可能な限り観測手法を構築し、定期的な観測を行い、適切な対応を講じる必要がある。ある現象がレジームシフトであった場合、現象が起ってから検証を試みても観測データがなければ十分な検証はできないのである。

これまでみてきたように、植物プランクトン量の変化はレジームシフトの可能性が考えられるが、数理モデルの解析では水中での光を巡る競争や細胞サイズに起因する沈降速度の違いが重要な要素であることがわかってきた。ここから導き出されることは、水中での植物プランクトンの鉛直分布が重要であり、可能であれば植物プランクトンを種など分類群、細胞のサイズで分けた形で鉛直分布を観測できることが望ましい。

近年開発された多波長蛍光光度計は、植物プランクトンの分類群 (網レベル) によって、葉緑体に含まれる光合成色素が異なることを利用した観測機器である。光合成色素の違いは、光合成に使われる光の波長のピークの違いとして認識することができる。これを利用したのが蛍光光度計による測定である。従来、様々な波長を作り出すにはプリズムなどを用いるか、単波長光源であるレーザーなどの大がかりな装置を使う必要があったが、近年発展がめまぐるしい発光ダイオード (LED) を使うと、単波長の光を小さな装置で発生することができるようになった。実際、LED 方式の携帯型クロロフィル計は既に広く利用されている。複数の LED を使った携帯型クロロフィル計を用いて光合成色素別に測定できるように作られたのが、今回用いた多波長蛍光光度計である。

図 9 に多波長蛍光光度計での観測結果の一例を示す。

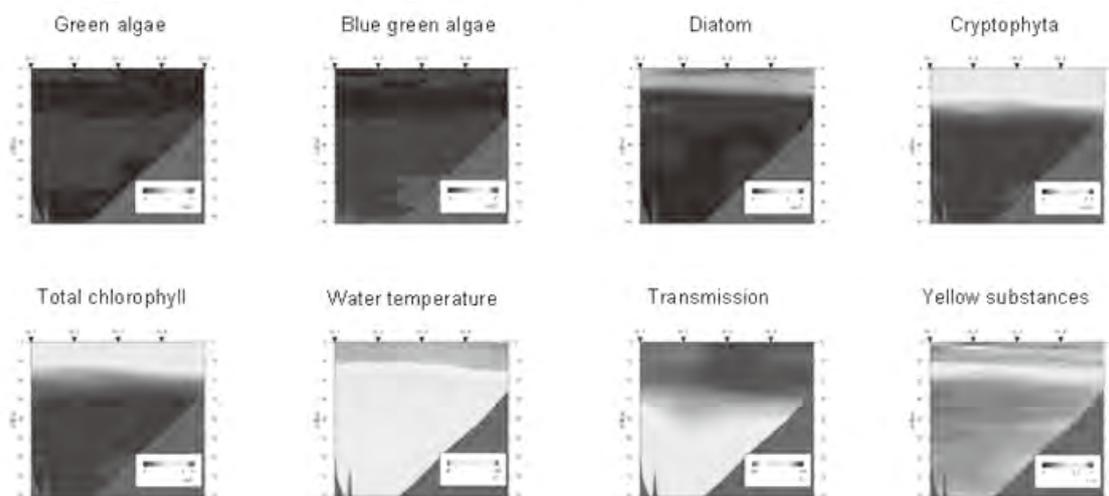


図 9 琵琶湖環境観測データカタログより多波長蛍光光度計による植物プランクトン分類群鉛直分布の例 (2007 年 9 月 12 日) (グラビア 10 頁参照)

多波長蛍光光度計を用いることにより、光合成色素の違いに基づいたグループごとに植物プランクトンの鉛直分布を測定できることを示すことができた。この観測結果は成層構造や光の透過などと比較検証することにより、植物プランクトンの集積メカニズムを推測することに大きく貢献することが期待される。

一方で、多波長蛍光光度計の弱点も明らかになった。琵琶湖の植物プランクトンのうち、「やっかいもの」とされる淡水赤潮（黄色鞭毛藻）は、光合成色素によるグループ分けでは、珪藻類や渦鞭毛藻類との区別ができない。また、表面に集積しやすいアオコ（主に藍藻類）の場合、機械の特性上表面の薄い層の観測が困難である。これらの弱点はあるものの、グループごとの鉛直プロファイルを測定できるという利点は非常に有益であると考えており、今後も継続的に観測を行っていく方針である。

### 自律型潜水ロボットの観測技術の向上

次に、本プロジェクトで、植物プランクトンの変遷と共に注目した湖底の環境変化についての観測に関して説明する。

琵琶湖環境科学研究センターが2001年に建造した自律型潜水ロボット（Autonomous Underwater Vehicle: AUV）、通称「淡探」は、湖底の観測が建造の目的の一つとなっている。AUVを湖底の観測に使う利点として、AUV自身が、等速度、湖底からの等距離を保つ機能を持つことが上げられる。この特徴は、AUVに装着されたビデオカメラ・スチルカメラの映像・画像が定量性をもつことを保証している。

一方、AUVの弱点として、水中での位置情報の取得が難しいことが上げられる。GPSによる測位は現在では一般的な位置情報の取得手段であるが、GPSの電波は水中ではほとんど受信できない。このため、AUVは自身の船速や湖底との相対速度をもとに位置を推定しながら航行する。残念ながら、この推定の精度が航行に十分でなくなる場合があり、AUVがプログラムされた航路を少し外れてしまい浮上時に発見が遅れることがあった。

そこで、AUVとの間で音響通信のひとつであるSSBLを用いて水中測位を行ったところ、AUVにプログラムされた予定航路と実際の航路のずれを記録することに成功した（図10）。

2005年10月にAUVが行方不明になる事故が生じたが、今回導入したSSBLを用いることで、AUVの回収を着実に行うことができると期待される。

### 自律型潜水ロボットによる湖底の異常の発見

さて、そのAUVによる観測であるが、2001年に建造以

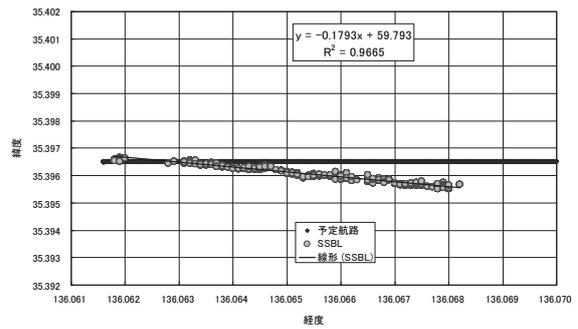


図10 AUVを西から東へ移動させた時の予定航路とSSBLによる計測位置



図11 AUVによる調査を実施した場所。図中点線上が魚類等の異常と推察される画像が記録された調査進路

降、湖底の観測を継続してきたが、2007年にわれわれにショックを与える映像を記録した。すなわち、イサザやスジエビと思われる生物の複数の遺骸の写真である。もちろん、このような映像を逃さず記録することがAUVの使命であるとはいえ、琵琶湖とそこに暮らす生物が平穏であることを願う私たちにとっては、AUVの映像は「異常なし」であったほうがよいのは言うまでもない。

イサザやスジエビと思われる生物の遺骸は2007年12月のAUV航行にて撮影された。このときのAUV航行は、海津大崎近辺から水深90mの第一湖盆を縦断して南下する経路であった（図11）。

調査は5日間、初日は機材のテストを行ったため実質4日間の調査を行った。12月3日には、水深73mの地点で調査を開始し、二回の潜行で水深90mの地点までを撮影した。12月4日は、3日の調査終了地点から南下し、今津沖の第一湖盆の90m以深にあたる場所を縦断した。12月5日は90m等深線の南端から104mの最深点に向かって南下した。12月6日は、一回目の潜行で最深点からの南下ラインを行い、2回目は南北ラインではなく、2006年にイサザと思われる魚影が写った白髭神社沖（水深77mから水深62m）の観測を行った。

魚やエビと推測される斃死個体が撮影されたのは、主に12月4日と5日の観測であった(熊谷2008)。AUVの航行速度と湖底からの距離から算出したデジタルカメラの視野面積を元に計算すると、魚の死骸と判断された被写体は0.87匹/m<sup>2</sup>、エビ類の死骸と判断された被写体は0.99匹/m<sup>2</sup>の頻度で撮影されたものと推測された。

後日、死骸が撮影された水域で底引き網や有索式ロボット(ROV)によって死骸の回収を試みたところ、イサザやスジエビの死骸が回収された。このため、AUVによる観測で撮影された被写体はイサザやスジエビであったと結論づけて間違いないだろう。

それでは、これらの死骸の死因は何であろうか。AUVに設置されたセンサーによる水質観測の結果と比較したところ、死骸の撮影された頻度の高かった場所は、他の場所に比べて溶存酸素濃度が低かった。実際、この場所はAUVによる観測の他に、F-Probe(高精度鉛直プロファイラー)による観測でも、第一湖盆の水深90m周辺の溶存酸素濃度が周辺に比べて低いことを確認している。

その他の水質について検討すると、死骸が撮影された頻度の高い場所では濁度が高かったことが上げられる。ただし、濁度が高いといっても表層や中層でみられるいわゆる高濁度層でも観測する値であり、濁度が死因と結論づけることは困難であろう。

これらのことから、死骸の死因は溶存酸素の低下あるいは溶存酸素の低下に伴う何らかの環境変化の可能性が高いと推察される。今後は、溶存酸素の低下を中心に死因の特定を行うとともに、同様の現象が起きた場合の生物の個体群への影響の定量化を行う必要がある。

なお、従来から琵琶湖北湖での湖底の酸素低下について懸念をされてきたが、実際に酸素の低下する水域を特定したのは本プロジェクトの取り組みの成果であることを付け加えておく。

#### 4. 結論

本プロジェクトでは、「琵琶湖でおきている諸現象はレジームシフトといえるか」という大目標をもとに、「レジームシフトの可能性の検討方法」、「レジームシフトを起こす要因の検討」、「レジームシフトと関連する(しそうな)現象を観測する手法」について研究をすすめた。3年間の研究で新たに得られた研究成果は次のものといえる。

(1) レジームシフト現象の数理モデルによる解析は従来定常状態を想定したものだったが、新たに定常振動状態(例:季節変化)のレジームシフトについてモデルを使って存在を示すことができた。(2) 水温変化による藻類の増殖速度の変化や鉛直混合の強さが、レジームシフトの起こ

りやすさに影響を与えることを示した。(3) 琵琶湖を想定した長期シミュレーションプログラムを構築し、過去の再現計算を行った。(4) シミュレーションの結果、栄養塩濃度が低くなると水温上昇の効果が出やすくなることが示された。(5) レジームシフトに密接に関わる、「植物プランクトンの鉛直分布」や「湖底環境の変化」に関する新たな観測技術の有用性が示された。

今後の課題として、3年間の取り組みで示された「可能性」を実証し、「有用なプログラムや観測技術」を有効的に活用していくことが上げられるだろう。後者については、観測にかかるコストの問題という大きな壁があるが、創意工夫を行い、琵琶湖を理解する上で必須といえる情報を取り逃さないようにしていくことが重要である。

#### 5. まとめ

本プロジェクトの題目は、「先導的研究」となっているが、文字通り琵琶湖におけるレジームシフトについて、解析ができたのはほんの一部であるといえる。冒頭で説明したとおり、琵琶湖の中でレジームシフトとしてとらえられる現象の候補は複数あり、今後様々な形で検討していく必要がある。また、観測手法の高度化や観測すべき地点の特定など、表層のプランクトンの種構成の変化や湖底の環境変化の観測については一定の成果が得られた。

#### 6. 引用文献

- 速水祐一・藤原建紀(1999):琵琶湖深層水の温暖化. 海の研究, 8: 197-202.
- 藤永太郎・堀智孝(1982):琵琶湖の環境化学. 日本学術振興会.
- 川崎健・花輪公雄・谷口旭・二平章(編著)(2007):レジームシフト-気候変動と生物資源管理. 成山道書店.
- Kawaski T(1983):FAO Fish. Rep. 201, FAO 1065-1080.
- 熊谷道夫(2008):地球温暖化が琵琶湖に与える影響. 環境技術, 36: 407-413.
- OECD(1982):Eutrophication of waters - monitoring, assessment and control -.
- Sakamoto M(1966):Primary production by phytoplankton community in some Japanese lakes and its dependence on lake depth. Arch. Hydrobiol., 62: 1-28.
- Scheffer M, Carpenter S, Foley J A, Folke C & Walker B(2001):Nature, 413: 591-596.
- Scheffer M & van Nes E H(2004):Mechanisms for marine regime shifts: Can we use lakes as microcosms for oceans? Progress in Oceanography, 60: 303-319.