

湖沼におけるレジームシフトとその予測の可能性

北海道大学・創成研究機構 加藤元海 (Motomi Genkai-Kato)
Creative Research Institution Sousei,
Hokkaido University

1. はじめに

近年、さまざまな生態系において、ある状態から全く異なった別の状態へ突然変化することがありうるようになってきた [1]。この突然の不連続な系の変化はレジームシフトとよばれている。特に湖沼においては、水の澄んだ状態から植物プランクトンの大発生による濁った状態へ、突然変化するレジームシフトに関して盛んに研究が行なわれている。レジームシフトを引き起こす要因として、人為的負荷の増大にともなう湖沼への過剰な栄養塩（リン）の供給・負荷があげられる。レジームシフトは、多くの場合、比較的水深の浅い湖で見られる現象であるが [2]、深い湖でも起こることが示唆されている [3]。

レジームシフトは湖沼生態系を管理するにあたり、次にあげる 2 つの点で非常に重要な問題となる。1 つ目は、前述のように、系の変化は徐々に進行するのではなく、突然不連続的に変化し、この予測は困難であり、さらに変化後は以前とは全く異なった状態になっている。2 つ目の点は、レジームシフトが起こった後、富栄養化の引き金となった湖沼へのリン負荷量を抑制することで以前の澄んだ状態を回復するにあたり、たとえリン負荷量を不連続変化が起こったレベルまで引き下げても、系は以前の状態に回復しないことがあげられる。水質を以前の澄んだ状態まで回復させるためには、さらなるリン負荷量の規制を必要とし、それまでに湖底でリンが蓄積されていることから時間的にも遅れをとらなければならないため、富栄養化後の湖沼生態系の回復管理は非常に困難となる。なお、このように富栄養化の要因であるリン負荷量の変化する方向（増加／減少）により系の反応が異なることは、履歴現象（ヒステリシス）とよばれている。また、リン負荷量の増加により、履歴現象をとらなうレジームシフトが全ての湖沼において起こるわけではない。リン負荷量を規制・減少させることに対する湖沼生態系の回復の反応には、(i) 履歴現象をとらなわずに回復が可能（リン負荷量の減少に直ちに反応して回復）、(ii) 回復は可能であるが履歴現象をとらなう、(iii) 回復不可能、の 3 つに分類される [4]。湖沼に流れ込む栄養塩量には、工場や農業からの排水を規制しても、人為的な管理では制御できない負荷がある。これらは、地域的な要因で決まっており、土壌の化学組成や降水などが例

としてあげられる。したがって、栄養塩規制のみでは回復不可能な湖沼においては、その他の方法も組み合わせて回復を試みる必要がある。

2. レジームシフトの起こる要因

湖沼において、リン負荷量の連続的増加が、レジームシフトを引き起こす要因にはいくつか考えられている。その中で主なものとしては、次の2つがあげられる。1つ目は深水層における無酸素化によるリンの湖底からの遊離で、2つ目は沿岸帯植物 (macrophytes) の影響である。深水層の無酸素化に関しては、無酸素化により湖底において鉄と結合していたリンが解離・浮上し植物プランクトンの分布する表水層へリンの回帰が起こる。深水層の無酸素化は、表水層で発生した植物プランクトンが沈降する際にバクテリアによる分解活動によって引き起こされる。貧栄養状態では、表水層での植物プランクトンの発生は小さく、ほとんどが動物プランクトンなどに消費され、沈降する量は少ない。そのため、深水層では十分酸素がある状態が保たれ、リンの湖底からの回帰も起こりにくい。一方、富栄養状態では、大発生した植物プランクトンは表水層にて十分消費されず、大部分が沈降する。この沈降が、深水層で分解され無酸素化を引き起こしてリンの浮上をまねき、表水層における植物プランクトンのさらなる発生に拍車をかける。このように、貧栄養と富栄養それぞれの状態を安定化させるフィードバックがそれぞれ存在する。

沿岸帯植物の影響に関しても、貧栄養と富栄養それぞれの状態を安定化させるフィードバックが存在する。これは、湖底に生える沿岸帯植物よりも水中に浮遊する植物プランクトンの方が光をめぐる競争において、有利であるためである。貧栄養状態の時には、光をさえぎる植物プランクトンが少ないため、沿岸帯植物は比較的深いところまで分布することができる。沿岸帯植物は、湖底に根を生やすため湖底を安定化させリンの浮上を抑えるほか、植物プランクトンを捕食する動物プランクトンにとって魚からの捕食から逃れる隠れ家としての働きがある。したがって、貧栄養状態の時には湖底からのリンの回帰が少なく、かつ、動物プランクトンによる捕食圧も高いため、植物プランクトン密度は低く抑えられる。一方、富栄養状態では、豊富な植物プランクトンの存在により、沿岸帯植物は比較的浅いところまでその分布が抑えられ、その結果、湖底からのリンの回帰が起こり、動物プランクトン密度も低いため、植物プランクトン密度は高いまま保たれる。

3. レジームシフトの可能性

米国ウィスコンシン大学のカーペンターらは、ウィスコンシン州の現在は富

栄養状態にあるメンドータ湖（面積 40 km^2 、平均水深 12.7 m 、最大水深 25.3 m ）における長期的かつ詳細なデータを基に、この湖でのレジームシフトの可能性を調べている [4]。それによると、レジームシフトが起こるかそうでないかは、水深に強く依存することが示唆されている。これは、深いほど深水層の体積も大きく、そのため無酸素化が起こりにくいと考えられる。また沿岸帯植物の影響に関しても、それらの分布は沿岸帯のみに限られるため、湖の大きさや形状にかかわってくると考えられる。

カーペンターらの解析は、メンドータ湖のデータを基にしているため、そこから推定されたパラメータ値はその湖固有のものが多く、水深や面積など形状の異なる琵琶湖など他の湖沼には直接応用できない。したがって、湖沼の形状の違いを考慮し、さまざまな湖沼において予測可能な汎用性の高いレジームシフトの予測に関する研究が望まれている。そこで我々は、レジームシフトの可能性を湖沼の形状、沿岸帯植物の優占度、水温と関連付けて調べている [5]。それによると、レジームシフトは平均水深が浅く、水温が高い湖沼ほど起こる可能性が高く、面積は大きな影響を与えない。また、沿岸帯植物の効果は浅い湖沼で特に顕著に見られ、レジームシフトを防ぐ。そのため、面白いことに水深に関しては、中程度の平均水深を持った湖沼においてレジームシフトが最も起こりやすく、湖沼を管理するにあたっては沿岸帯植物に覆われた浅い湖沼や希釈効果の高い深い湖よりもむしろ、中程度の水深を持った湖沼に対して最も注意を払うべきであると示唆している。我々の予測モデル [5] から、メンドータ湖は（夏期成層期の深水層の）水温を 12°C とすると、現在のリン負荷量（平均値： $0.18 \mu\text{g P}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ [6]）では、レジームシフト後の状態であり、湖へのリン負荷量を規制することによる貧栄養状態への回復は不可能と予測される。

我々のモデル [5] を琵琶湖（面積 670 km^2 、平均水深 41.2 m ）に応用すると、リンの負荷量の変化（ $0.02\sim 0.5 \mu\text{g P}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ の範囲）にともなってレジームシフトが起こる可能性は深水層の平均水温によって異なる。水温が 14°C 以上の場合、レジームシフトが起こると予測される。また、 16.5°C 以上では、リン負荷量を規制することによる水質の回復は不可能となる。リン負荷量の規制のみによって水質の回復が不可能な場合、それに加え付随的な対策を取る必要がある。その例としては、カスケード効果を期待した魚などの導入による食物網の操作；深水層への人工的な酸素供給；硫酸アルミニウムの添加によるリン遊離の防止；湖底のしゅんせつなど。しかし、これらの対策を施せば必ず回復するという保証はなく、しかも琵琶湖のような大きな湖では莫大な費用がかかると思われるため、現実的ではないかもしれない。

4. レジームシフトの可能性の予測

実際に湖沼を管理するにあたって、その湖において、レジームシフトは起こりうるだろうか？もし起こりうるならばそれが引き起こされる（リン負荷量などの）閾値はどこにあるのだろうか？の2点の問題があげられる。前述のとおり、レジームシフトが起こってしまった後に水質を回復することは非常に困難であり、また可能であったとしても莫大なコストと時間を費やすことになってしまう。したがって、富栄養化が起こることを事前に予測するかが重要となる。実際の湖沼管理にあたっては、生態学だけでなく経済学も絡んでくる問題となる。それは、湖から飲料水の供給や、漁業、釣りや水上スキーなどの娯楽といった恩恵を受けており、これらは一般に水質の良い湖ほどより高い恩恵が受けられるため、我々はリン負荷量を抑制することを望むことになる。一方では、湖沼の周りには農業や工業が存在し、それに従事する人たちはさらなる収益を試みるために、湖沼へのリン負荷量が増えることになる。湖沼管理においては、この間のトレードオフを考慮しながら進める必要がある。湖沼の水質とそこから受ける飲料水や娯楽といった経済上の恩恵に関しては、文献 [7] に詳しく記述されている（しかし、日本と米国とでは、湖沼に対する関り方が異なるので、直接そこで推定される金額は日本の湖沼には当てはまらないかもしれない）。

レジームシフトをただ単に防ぐという目的だけでは、リン負荷量を規制するという対策をとることが第一なのだが、それでは、レジームシフトの起こる閾値に関する情報は得られにくい。この閾値に関する情報を得る一番の方法は、実際にその湖でレジームシフトを起こすことである。湖沼における富栄養化に対して、考えうるいくつかの管理対策法を経済学的に比較した研究に関しては、文献 [8] に詳しく記述されている。しかしながら、用心深い湖沼管理方策と閾値に関する情報を得る方策は、相容れない。このような状況の中でカーペンターは、湖沼を実際に管理する上で以下の3点を提案している [3]。まず第1に、その湖において長期的な研究観測データがあることが必須である。しかしこれだけでは、富栄養化の連続性の判断すら困難であり、富栄養化後のリン負荷量の規制により水質を回復することができるかどうかの判断はできない。その理由として、かなり詳しく、かつ長期的に観測が行なわれてきた湖（たとえば、メンドータ湖）でさえも、多くのレジームシフト現象に大きく影響すると考えられるパラメータ値の推定において、大きな不確かさが存在するためである。

そこで第2に、これら不確かなパラメータ値に対して、他のいくつかの湖沼からのデータも参考にして、パラメータの不確かさを小さくする。しかし、湖沼のリン負荷量に対する富栄養化反応は、地域やその気候などによって異なるであろうし、流出河川の大きさや、集水面積や集水域の土壌特性、人口や農

業・工業活動の大きさにもよると思われる。そのため、管理対象とする湖沼と類似した湖沼を参照することが望ましい。

そして最後に、もし複数の湖沼を同時に管理している場合、富栄養化が起こってもその損害が小さく、富栄養化後の回復が可能であると見込まれる少数の（小規模）湖沼を実験湖沼とし、そこでは実験的にリン負荷量を増やし、実際に富栄養化させ、レジームシフトの閾値を明らかにする。そして残りの貴重だと考えられる（比較的大規模な）湖沼は、この実験湖沼から得られた知識を基に、富栄養化を引き起こさせない程度のリンの負荷量を許可するといった最適な管理方法を模索する。

これからますます活発になっていくであろう人間活動により、湖沼におけるレジームシフトの頻度は増加すると考えられ、また、これまで知られていない新しい不連続的な現象が出てくることも想定される。さいごに、このような状況下に対して最良の管理対策が行なわれるためには、新しい解決法の模索やそれらを取り入れていく柔軟な対応のできる機関の存在が必要である [3]。そのような機関とは、環境学や生態学などとともに政治学や経済学などが組み合わさった自然科学と社会科学が融合した研究組織であろう。

引用文献

- [1] Scheffer, M., S. Carpenter, J. A. Foley, C. Folke, and B. Walker. 2001. Catastrophic shifts in ecosystems. *Nature* 413: 591–596.
- [2] Scheffer, M. 1998. *Ecology of shallow lakes*. Chapman and Hall, New York, USA.
- [3] Carpenter, S. R. 2003. *Regime shifts in Lake Ecosystems: pattern and variation*. Volume 15 in the Excellence in Ecology Series, Ecology Institute, Oldendorf/Luhe, Germany.
- [4] Carpenter, S. R., D. Ludwig, and W. A. Brock. 1999. Management of eutrophication for lakes subject to potentially irreversible change. *Ecological Applications* 9: 751–771.
- [5] Genkai-Kato, M., and S. R. Carpenter. 2005. Eutrophication due to phosphorus recycling in relation to lake morphometry, temperature and macrophytes. *Ecology* 86: 210–219.
- [6] Lathrop, R. C., S. R. Carpenter, C. A. Stow, P. A. Soranno, and J. C. Panuska. 1998. Phosphorus loading reductions needed to control blue-green algal blooms in Lake Mendota. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 55: 1169–1178.
- [7] Wilson, M. A., and S. R. Carpenter. 1999. Economic valuation of freshwater ecosystem services in the United States: 1971–1997. *Ecological Applications* 9: 772–783.
- [8] Ludwig, D., S. Carpenter, and W. Brock. 2003. Optimal phosphorus loading for a

potentially eutrophic lake. *Ecological Applications* 13: 1135–1152.