

## レジームシフト解析による霞ヶ浦での水質生態系変動要因の分析

高津 文人<sup>1</sup>, 松崎 慎一郎<sup>2</sup>, 小室 俊輔<sup>3</sup>, 松本 俊一<sup>3</sup>, 小松 一弘<sup>2</sup>, 高村 典子<sup>4</sup>, 中川 恵<sup>2</sup>, 今井 章雄<sup>4</sup>,  
福島 武彦<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 国立環境研究所地域環境研究センター, <sup>2</sup> 国立環境研究所生物・生態系環境研究センター, <sup>3</sup> 茨城県霞ヶ浦環境科学センター, <sup>4</sup> 国立環境研究所琵琶湖分室

キーワード: 時系列変動解析, レジームシフト解析, 気象パラメータ, 湖内水質パラメータ

## 抄録

環境分野で時系列変動解析は環境変動要因を分析する上で重要である。レジームシフト解析もその一つだが、水質や生物群集を対象としたレジームシフト解析により「水質・生態系がある安定な状態から他の安定な状態へ、安定状態の持続時間よりはるかに短い時間で遷移すること」の有無と遷移したタイミングとその内容を比較検討することができる。レジームシフトの起きるタイミングが各パラメータ間で同期していれば因果関係が強いと考える根拠となる。気象、河川水質、湖内水質に関する 1970 年代から 2010 年代までの連続環境パラメータの年平均値を用いてレジームシフト解析を行った。その結果、西浦では透明度が大きく低下した時期のはじまりと終わりに同調するように湖内の化学、生物、物理パラメータでもレジームシフトが生じていた。一方、北浦では、湖内水質パラメータで 4 回のレジームシフトが見られ、うち 2 回のシフトタイミングは流入河川の水質パラメータのそれとおおよそ一致していた。

## 1. はじめに

近年、時系列変動解析に用いられる統計手法は深化し、多様になってきている<sup>[1], [2]</sup>。古くからある方法としてはフーリエ解析や移動平均を用いて、時系列変動を短期から長期までの個々の時間周期をもった時間変動成分の足しあわされたものとみなし、各時間変動成分を分離・抽出し、環境要因との関係性を議論されてきた<sup>[3]</sup>。また、一見して単調増加や単調減少している時系列データの場合でも、変動成分に分離せず、時間軸に対して単に線形回帰等を行い、増加、減少傾向を議論することは統計学的には支持されないことが明らかとなっている<sup>[4]</sup>。その理由としては、データ値が増加方向にも減少方向にもランダムに変動する場合でも、過去の値の変動を蓄積する時系列データでは、多くの場合、増加傾向か減少傾向のいずれかを示すことになるからである。このように、直感的に時系列変動を議論することのリスクを認識し、時系列変動解析にかけることで、統計学的根拠を担保しつつ変動要因の解析を進めることが本分野のグランドトゥールズになりつつある。

時系列変動解析は株価の変動に代表されるような経済指標の予測や環境分野では大気や海洋といった気候変動予測の分野で注目され、その解析手法も多岐にわたっている<sup>[1]</sup>。状態関数を用いて、観測誤差や観測時の異常性の影響を排除することで真の変動傾向を解

析する方法や、ウェーブレットや STARS 等によるレジームシフト解析もその一つである<sup>[5]</sup>。レジームシフト解析はその名のとおりレジームがシフトしているか否かとその発生タイミングを検出する解析手法である。水質におけるレジームシフトを解析する場合、

「水質がある安定な状態から他の安定な状態へ、それぞれの安定状態の持続時間よりはるかに短い時間で遷移すること」

の有無と遷移したタイミングを解析することになる<sup>[6]</sup>。すべての水質でどの場所においてもレジームシフトが生じている保証はないことから、レジームシフト解析が、すべての水質変動機構の解明に資するか否かは現時点では不明である。しかしながら、長期間の時系列データであればあるほど、レジームシフトの起きている可能性は高く、そのタイミングが各パラメータ間で同期していれば因果関係が強いと考える根拠となる<sup>[5]</sup>。

湖沼環境の分野でレジームシフトの研究が脚光を浴びるきっかけとなったのは Scheffer et al. (2001)による研究成果である<sup>[6]</sup>。この研究では、湖沼への栄養塩負荷に対する水草と植物プランクトンの現存量の変化をもとに、富栄養化すると突然植物プランクトンの優占する湖沼に変化すること、逆に水草の優占する湖沼に戻るには、植物プランクトンの優占するようになった栄養塩レベルよりも低い負荷量が必要であることを示した。この現象以外

にも、湖沼環境ではレジームシフトは下記の系で見られることを Scheffer and van Nes (2004)は報告している<sup>[7]</sup>。1) 貧酸素化による底泥からのリン回帰、2) 浮葉植物の優占、3) 湖底堆積物の安定性、4) ラン藻の優占。

石川ら(2006)は琵琶湖南湖で2000年以降急速に水草の優占するようになった点や港湾部でのハスやホテイアオイの群落の急激な消長はレジームシフトと考えられるとした<sup>[8]</sup>。霞ヶ浦においても、植物プランクトンの季節変化のパターンが1993年以前は夏季のラン藻と冬季の珪藻と緑藻の繰り返しパターンであったのに対し、1994年から2000年までは年間を通してラン藻が優占するようになり、2001年以降は年間を通して珪藻がみられるパターンへと変化しており、レジームシフト様の変化を示している<sup>[9], [10]</sup>。

こうした事実から、日本の湖沼の生物・水質環境の変化の有無とその変動要因を解析する上で、レジームシフト解析は有効な分析手法の一つと考えられ、今回霞ヶ浦の長期モニタリングデータを対象に解析を行った。

## 2. 方法

レジームシフト解析に用いるデータソースは、以下の6つのカテゴリーごとに分けて解析した。1) 気象パラメータ群（気象庁および気象研究所の公開データ）、2) 河川水質パラメータ群（国土交通省の公共用水域データ）、3) 湖内物理パラメータ群（国土交通省の公共用水域データ）、4) 湖内化学パラメータ群（国立環境研究所の霞ヶ浦モニタリングデータと国土交通省の公共用水域データ）、5) 湖内生物パラメータ群（国立環境研究所の霞ヶ浦モニタリングデータ）、6) 底質パラメータ群（国土交通省霞ヶ浦河川事務所のデータ）。

レジームシフトの同期性を議論する際に、より上位の環境因子で起こったレジームシフトが下位の環境因子に影響を及ぼす際の影響の強さによって、レジームシフトの発生の有無やそのタイミングが異なってくる可能性のあることも考慮した。湖沼の環境パラメータを物理と化学と生物の3種類のパラメータ群に分けた場合、水温や水深といった物理パラメータは化学パラメータや生物パラメータに大きな影響を与えるが、その逆は稀である。その意味で、湖内の物理パラメータ群は湖内の生物や化学パラメータより上位にくると言える（図1）。同様に、気象パラメータや流入河川の水質パラメータは湖内パラメータ群に大きな影響を与える一方、その逆は小さいことから、湖沼パラメータ群の上位に気象や流入河

川水質のパラメータを配置した（図1）。

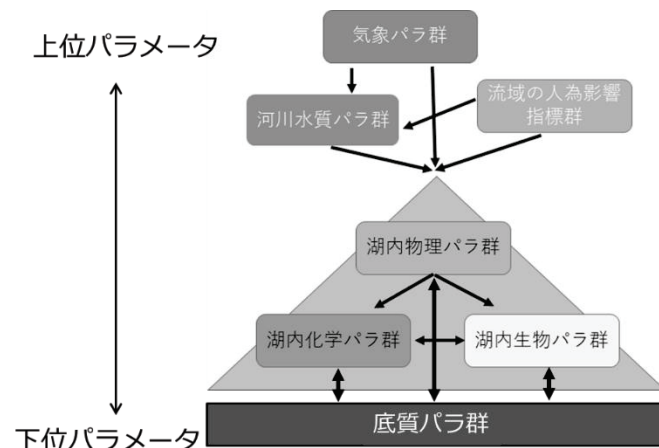


図1 解析したパラメータ群の階層構造

レジームシフト解析はRによるパラメータ群ごとに主成分分析を行い、各主成分スコアの時系列データを用いて、Excelのマクロ機能（STARS）によりレジームシフトの有無とそのタイミングを決定した。5%の有意確率で、Cut-off Lengthは10年とし、Red noise estimationはIP4を選択した。詳細はMöllmann and Diekmann (2011)に従った<sup>[2]</sup>。

もう一つのレジームシフト解析として、Rソフトウェア上でChronological Clusteringを読み出し、VeganとriojaというRパッケージを読み込ませ、時系列クラスタリング解析を行った。本手法はDNA解析等でも多用されている通常のクラスタリング解析（似た配列を近い枝になるように配置する樹形図として出力される）の一種であるが、水質が似通った2つの年がある場合でも、それらの年が離れている場合には、樹形図で近い枝として配置されない等の工夫がなされている。

上記2種類のレジームシフトの解析結果を、霞ヶ浦の西浦と北浦別々に、水質に関連する上位パラメータ群から湖内パラメータ群まで、同一の時間軸上に整理しなおし、最長で過去44年間におけるレジームシフトの有無とその発生タイミングとその大きさ、内容に関する結果を比較検討した。

## 3. 結果

霞ヶ浦の西浦での上位パラメータ群から湖内パラメータ群までのレジームシフト解析結果を図2に示す。西浦と北浦でのレジームシフト解析により明らかとなった点は

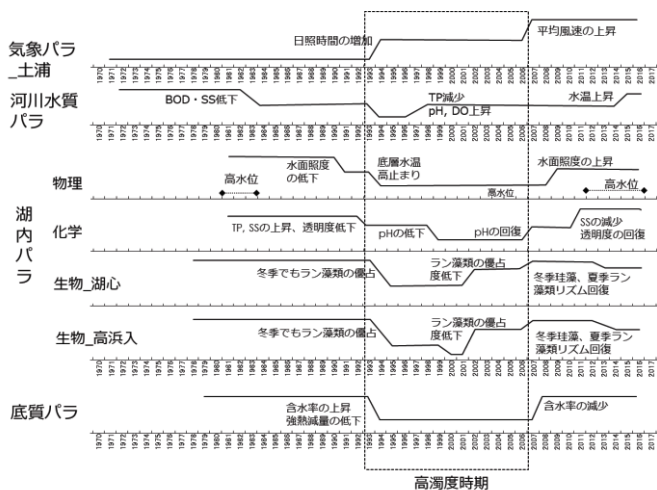


図2 西浦での各種パラメータ群におけるレジームシフト発生状況の概略図

以下の4点である。

1) 1993～1994 年を境に日照時間が増加した気象変化は、浚渫等による無機質な濁質成分の増加の時期と重なっていたが、ほぼ同時期に水質パラメータ群や生物パラメータ群においても大きなレジームシフトが起きていた(図2)。

2) 西浦の湖内水質・底質と植物プランクトン相では高濁度時期(先述した無機質な濁質成分の増加時期)の開始時期、最盛期、終了時期とほぼ一致する3つのレジームシフトが検出された(図2)。

3) 2010～2011 年を境に西浦ではSS濃度の減少や透明度の回復が見られており、夏季のアオコの発生や冬季の珪藻優占状態が観察されるようになった。

4) 北浦では、1980年代前半に流入河川水質のTPが低下した。湖内水質では2003～2004年を境にpHと底層DOの上昇がみられ、2010～2011年を境に透明度の回復が見られた。

#### 4. 考察

得られたレジームシフトの結果をまとめた図2からも分かる通り、多くのレジームシフトは重大な環境要因の変化がその直前にある事が多く、またそうでないときには、どうしてシフトのタイミングが同期しなかったの原因を考察することができ、新たな発見や要因を見つけるきっかけにもなった。本レジームシフト解析結果で明らかとなった点は以下の3点である。

1) 1993～1994 年を境に日照時間が増加した気象変化は、植物プランクトンの生産量や易分解性有機物濃度の増加を引き起こし、北浦ではpHやDOの上昇につながった可能性が考えられた。一方、西浦では同時期に浚渫等による無機質な濁質成分の増加の影響が強く

現れ、気象変化の影響を抽出することは難しかった。

2) 西浦の高濁度時期は湖内水質・底質と植物プランクトン相に大きな影響を与えたと考えられ、その変化内容も濁質成分の増減で整合的に説明できるものであった。

3) 日照時間が高止まりした2000年代後半には高濁度時期も脱し、西浦ではSS濃度の減少や透明度の回復が見られており、西浦では、アオコの発生をはじめ、新しい安定状態へとシフトしたと考えられた。

#### 5. 結論

今回の霞ヶ浦のレジームシフト解析結果から、日本の湖沼の生物・水質環境の変化の有無とその変動要因を解析する上で、レジームシフト解析は有効であることが分かった。今後、気象変動影響や流域改変の影響評価をする上で有効な解析手法となりうる。しかしながら、ほぼ同時期に複数の外的要因に大きな変化が複数生じた際には、どの要因がより強く影響したかについて要因分離をおこなうことが困難な場合もあることが分かった。

#### 引用文献

- [1] R.H. Shumway, D.S. Stoffer: Time series analysis and its applications with R examples. Springer, New York, 2006.
- [2] C. Möllmann, R. Diekmann: Marine ecosystem regime shifts induced by climate and overfishing: a review for the northern hemisphere. *Advances in Ecological Research* 47, pp.303-347, 2011.
- [3] 三浦真吾, 高津文人, 今井章雄, 小松一弘: 10年間の月例水質調査における栄養塩等流出特性の降雨時出水を中心とした短期変動要因の解析. *水環境学会誌*, 40(1), pp.1-9, 2017.
- [4] 久保拓弥: 時系列データ解析でよく見る『あぶない』モデリング. 道総研 統計学講義資料, 2015.
- [5] P.C. Reid, R.E. Hart, G. Beaugrand, D.M. Livingstone et al.: Global impacts of the 1980s regime shift. *Global Change Biology* 22, pp.682-703, 2016.
- [6] M. Scheffer, S. Carpenter, J.A. Foley, C. Folke, B. Walker: Catastrophic shifts in ecosystems. *Nature* 413, pp.591-596, 2001.
- [7] M. Scheffer, E.H. van Nes: Mechanisms for marine regime shifts: Can we use lakes as microcosms for oceans? *Progress in Oceanogr.* 60, pp.303-319, 2004.
- [8] 石川俊之, 中島久男, 北澤大輔, 石川可奈子, 熊谷道夫: 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. 滋賀県琵琶湖環境科学研究センター研究報告書, 5, pp.86-93, 2006.
- [9] 霞ヶ浦環境科学センター: III 霞ヶ浦の生物. 霞ヶ浦への招待ファイル 13, 2013.
- [10] T. Fukushima, H. Arai: Regime shifts observed in Lake Kasumigaura, a large shallow lake in Japan: Analysis of a 40-year limnological record. *Lakes and Reservoirs: Research and Management* 20, pp.54-68, 2015.