

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 4 月 10 日現在

機関番号：16401

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21770020

研究課題名（和文）湖沼生態系におけるレジームシフトと、  
それに伴う生態系機能の変化の予測研究課題名（英文）Theoretical studies on regime shifts  
and ecosystem function in lakes

研究代表者

加藤 元海 (KATO MOTOMI)

高知大学・教育研究部総合科学系・助教

研究者番号：60403854

研究成果の概要（和文）：湖沼では、レジームシフトとともに一次生産者の担い手が、沿岸帯の付着藻類から沖帯の植物プランクトンに移行する。実際の湖沼で得られたパラメータ値を基に構築した数理モデルを使って、レジームシフトの前後で、湖沼全体の一次生産量がどのように変化するかを解析した。その結果、1) レジームシフトの前では、栄養塩流入量が増加するにもかかわらず一次生産量に大きな変化がみられない傾向があり、2) レジームシフト後には、一次生産量の急激な上昇がみられ、そのほとんどが植物プランクトンによることが分かった。

研究成果の概要（英文）：I developed a model of benthic (periphyton) and planktonic (phytoplankton) primary production using parameters derived from a shallow macrophyte-free lake that shifted from a turbid to a clear-water state following fish removal. Scenarios incorporating a gradient of external P loading rates revealed that: 1) periphyton and phytoplankton both contributed substantially to whole-lake production over a broad range of external P loading in a clear-water state; 2) during the clear-water state, the loss of benthic production was gradually replaced by phytoplankton production, leaving whole-lake production largely unchanged. The model suggests a mechanism for the persistence of alternative states in shallow macrophyte-free lakes and demonstrates that regime shifts may trigger profound changes in ecosystem structure and function.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：生物学

科研費の分科・細目：基礎生物学、生態・環境

キーワード：環境、生態系、湖沼、レジームシフト

## 1. 研究開始当初の背景

自然界は日周や季節変化、天候などたえず変化しているため、生態系を含め自然界のすべての系はこれら変動に対して自己安定化機能を備えている。しかし、近年の急激な人

間活動の増加による強力な人為的攪乱が、それまで自然界の系に備わっている自己安定機能を上回る力として作用し始めており、生態系の状態が突然大変化（レジームシフト）を起こすことがしばしば報告されている。水

域生態系のうち、特に湖沼生態系では、流入河川など周水域からの栄養塩負荷の増大と沿岸帯植物群落の消失に起因する突発的な富栄養化（湖沼におけるレジームシフト）が起こっている。一般的に社会問題として知られているのは植物プランクトンの異常増殖、いわゆるアオコの大発生に代表される水質の悪化があげられる。栄養塩負荷と富栄養化は単純な線形関係ではなく、ある程度の栄養塩負荷までは生態系の自己浄化機能により比較的水質の澄んだ状態が維持されるが、ある臨界的な負荷量を超えると突然富栄養化が進行する、非線形で不連続な関係があることがわかってきている。私はそれ以前の研究で、栄養塩負荷に起因するレジームシフトの可能性は、湖沼形態と食物網構造に強く依存することを明らかにした。

## 2. 研究の目的

われわれ人間が生態系から享受するサービスの質は、生態系の機能と密接に関連している。突発的に系の状態が変化するレジームシフトの結果、生態系の機能がどう変化するかは一切分かっていない。本研究では、水域生態系、特に湖沼生態系に着目して、レジームシフトの前後で、生態系の機能がどう変化するかを予測することを目的とした。湖沼において水質を左右する植物プランクトンの多寡は一次生産と直接関連している。また、一次生産は生態系の基盤の生産である。本研究で特に着目する生態系の機能として、湖沼全体で行なわれる一次生産に焦点をあてた。

## 3. 研究の方法

生態系の機能である湖沼全体の一次生産を予測するモデルの構築にあたっては、私のこれまでの研究で得られたレジームシフト予測モデルを基に改良を行なった。湖沼全体の一次生産には、沖帯に浮遊する植物プランクトンによる一次生産と、沿岸帯の湖底に付着している底生藻類による一次生産の和で表される。沖帯の一次生産に関しては、植物プランクトンの光合成は主に栄養塩制限となっているため、植物プランクトンの個体群動態のうち、栄養塩に依存した増殖の項から計算することができる。沿岸帯の一次生産に関しては、底生藻類は主に光制限となっているため、光強度と光合成速度との関係式から一次生産を計算した。沖帯と沿岸帯の比率、植物プランクトンと底生藻類のバイオマス比や湖底の光環境などは、湖沼の規模や形に大きく依存する。そのため、モデルには湖沼形態を組み込んで、レジームシフト前後の湖沼全体の一次生産と、全生産のうち植物プランクトンと底生藻類がそれぞれ占める比率を予測した。

デンマーク国立環境研究所の Erik

Jeppesen 教授らや米国アイオワ州の Wright 州立大学の Yvonne Vadeboncoeur 博士と共同研究を行ない、デンマークにある Engelsholm 湖を数理モデル構築のためのモデル湖沼とした。数理モデルで用いたパラメータの推定には、Engelsholm 湖のデータを基に行ない、シミュレーションが実際の野外現象を再現できるようにパラメータ値の補正（キャリブレーション）を行なった。

## 4. 研究成果

これまでの湖沼におけるレジームシフト（突発的に起こる富栄養化）に関する研究は、沿岸帯に生息する大型の沈水植物群落（macrophytes）が存在する湖沼での研究例が大半を占めていた。本研究では、大型の沈水植物群落ではなく、湖沼の底面に生息する付着藻類（attached algae）においても同様にレジームシフトが起こりうるのかを数理モデルを用いて解析を行なった。Engelsholm 湖は水質を改善するためにプランクトン食の魚類を 1992 年に 11.5 トン、1994 年に 6.8 トン、1996 年に 3.9 トン除去する生物学的操作が行なわれた湖である。生物学的操作の結果、1989-1993 年と 1994-2004 年では水質が大幅に改善された。この生物学的操作が行なわれた Engelsholm 湖の陸水学的な湖沼データを基に数理モデルのパラメータ推定を行なった結果、実際に観測されたクロロフィル濃度（植物プランクトン密度の指標）とモデルの予測値に間でよい合致がみられた（図 1）。

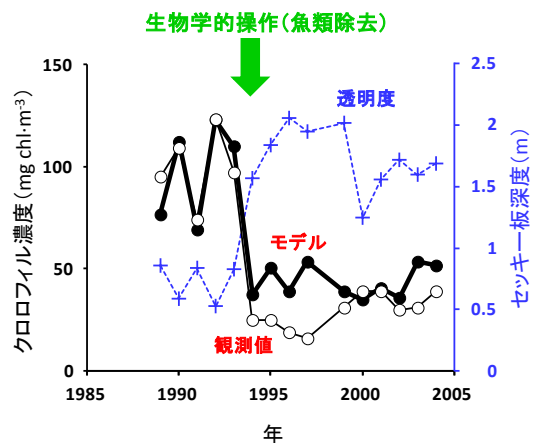


図 1. 1989 年から 2004 年における、クロロフィル濃度の観測値（○印）と数理モデルからの予測値（●印）。黒線は植物プランクトン密度の指標であるクロロフィル濃度の年変動（縦軸左側）、青線は透明度の指標であるセッキ板深度（縦軸右側）を表す。プランクトン食の魚類を除去する生物学的操作は、1992 年、1994 年、1996 年に行なわれた。

Engelsholm 湖のデータから構築された数理モデル基に、湖沼への栄養塩（リン）負荷量に対してレジームシフト（突発的な富栄養化）が起こるかを調べた。その結果、数理モデルが対象とした浅い湖沼（平均水深 1.6 ~ 3.6 m）では、いずれの湖沼でもレジームシフトが起こると予測された（図2）。レジームシフトを起こすリン負荷量の閾値は平均水深によって異なり、深い湖沼ほど閾値が低いことが明らかになった（図2）。

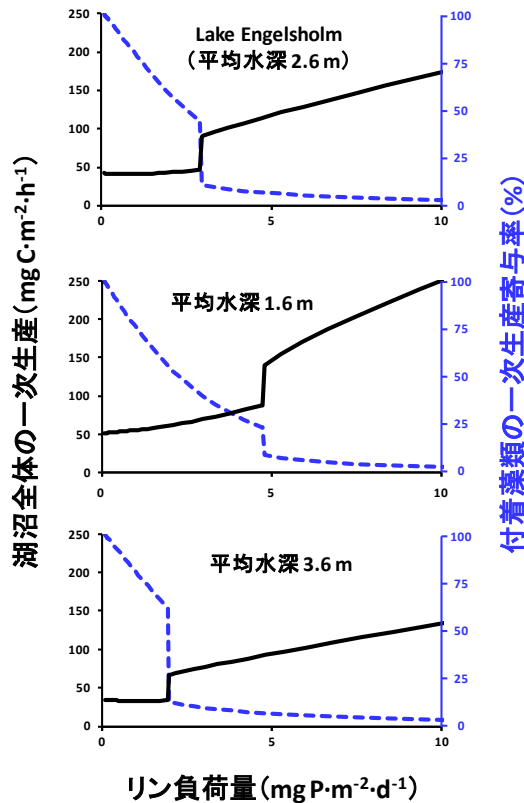


図2. リンの負荷量と湖沼全体の一次生産（黒実線、縦軸左側）と、湖沼全体の一次生産に対する付着藻類の寄与率（青破線、縦軸右側）との関係。上段は Engelsholm 湖と同じ平均水深（2.6メートル）、中段は平均水深 1.6メートルの湖沼、下段は平均水深 3.6メートルの湖沼。

レジームシフトが起こる前では、リン負荷量が増加しても湖沼全体の一次生産はほとんど変化しなかった（図2上段と下段の黒実線）。これは、付着藻類からの一次生産寄与分の減少が、植物プランクトンからの寄与分に置き換わっていたことが要因であった。レジームシフトが起こるとともに付着藻類からの一次生産の寄与率が減少するが、深い湖沼ほど顕著な減少がみられた（図2下段の青

破線）。レジームシフトが起こった後では、リン負荷量の増加とともに湖沼全体の一次生産も単調に増加した（図2の黒実線）。レジームシフト後は、付着藻類からの一次生産の寄与が低いことから（図2の青破線）、増加した一次生産のほとんどが植物プランクトンからの寄与によるものであった。

## 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計10件）

1. Genkai-Kato M., Vadeboncoeur Y., Liboriussen L. & Jeppesen E. Benthic-planktonic coupling, regime shifts, and whole-lake primary production in shallow lakes. *Ecology*, in press, 2012（査読有）
2. 卯城光, 加藤元海. 耕作放棄地における生後1年未満のヤギの放牧と除草効果. *黒潮圏科学* 5(2): 147-154, 2012.（査読有）
3. 渡邊礼雄, 加藤元海. 野外用自動販売機に集まる爬虫両生類と昆虫類. *黒潮圏科学* 5(2): 155-159, 2012.（査読有）
4. 岡拓矢, 加藤元海. ヒトにおける体重と体組成の変動パターンおよび体脂肪率に変化を与える要因. *黒潮圏科学* 5(2): 161-167, 2012.（査読有）
5. Ushimaru A. & Genkai-Kato M. A theoretical framework for resource translocation during sexual reproduction in modular organisms. *Evolutionary Ecology* 25: 885-898, 2011.（査読有）
6. Genkai-Kato M. Regime shifts in response to human impacts and management in ecosystems, 2011. *Kuroshio Science* 5(1): 33-37.（査読無）
7. Takahara T., Genkai-Kato M., Miyasaka H. & Kohmatsu Y. Preliminary study of food habits in the Japanese clawed salamander larvae (*Onychodactylus japonicus*) in a mountain brook of the Kiso River system, 2011. *Kuroshio Science* 4(2): 175-181.（査読有）
8. Genkai-Kato M. & Miyasaka H. On the coexistence of three predatory stonefly species in a central Japanese stream. *Ecological Research* 24: 705-709, 2009.（査読有）
9. Miyasaka H. & Genkai-Kato M. Seasonal change in the gut clearance rate of three stonefly species in a Japanese stream.

Ecological Research 24: 231-234, 2009.  
(査読有)

10. Miyasaka H. & Genkai-Kato M. Shift between carnivory and omnivory in stream stonefly predators. Ecological Research 24: 11-19, 2009. (査読有)

[学会発表] (計3件)

1. 加藤元海. レジームシフトが生態系機能に与える影響－湖沼の基礎生産に関して－. 第59回日本生態学会、2012年3月19日、龍谷大学瀬田キャンパス(滋賀県大津市).
2. 加藤元海. 絶滅危惧植物における全個体遺伝子情報と個体群存続解析. 第58回日本生態学会、2011年3月10日、札幌コンベンションセンター(北海道札幌市).
3. 加藤元海. 絶滅危惧植物における全個体遺伝子情報と個体群存続解析. 第20回日本数理生物学会、2010年9月15日、北海道大学札幌キャンパス(北海道札幌市).

[図書] (計3件)

1. 加藤元海. 湖沼のレジームシフト. 共立出版、淡水生態学のフロンティア(吉田丈人、鏡味麻衣子、加藤元海編集)、2012、175-183頁.
2. 加藤元海. マクロスケール:琵琶湖のレジームシフトの可能性. 京都大学出版会、流域環境学:流域ガバナンスの理論と実践(谷内茂雄、脇田健一、原雄一、中野孝教、陀安一郎、田中拓弥編集)、2009、92-98頁.
3. 加藤元海. 丸善、川の百科事典(高橋裕編集)、2009、用語を分担執筆.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

加藤元海 (KATO MOTOMI)  
高知大学・教育研究部総合科学系・助教  
研究者番号: 60403854

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

なし

### (4) 協力研究者

Erik JEPPESEN (Erik JEPPESEN)  
デンマーク国立環境研究所・生物科学部・  
研究部教授

Lone LIBORIUSSEN (Lone LIBORIUSSEN)  
デンマーク国立環境研究所・生物科学部・  
プロジェクト研究員

Yvonne VADEBONCOEUR (Yvonne  
VADEBONCOEUR)  
アメリカ合衆国オハイオ州立ライト大  
学・生物学科・准教授