

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 1 日現在

機関番号：16401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2015

課題番号：24770023

研究課題名(和文)生態系におけるレジームシフト現象の数理的解明

研究課題名(英文)Theoretical studies on regime shifts in ecosystems

## 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・講師

研究者番号：60403854

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：さまざまな生態系において、レジームシフトとみられる現象が起こっている。レジームシフトとは、系の状態が大きく変化したり、生態系が劣化した後の系状態の回復が困難であることから、生態学的に重大な問題となる。本研究では、湖沼形態などのさまざまな特徴をもった湖沼生態系に対して、レジームシフトに伴う湖沼全体の一次生産を正確に見積もる方法を開発した。湖沼以外では、生態系の劣化が進んでいる個々の系を取り上げ、生態系を保全する方法の検討を行なった。

研究成果の概要(英文)：Regime shifts are increasingly widespread and serious trends in natural ecosystems. Regime shifts have large ecosystem effects and restoration after the shifts is costly and difficult. First, in order to estimate whole-lake primary production theoretically in lake ecosystems with a variety of lake characteristics such as lake morphometry, I studied parameter sensitivity and calibration of phytoplankton productivity between nutrient- and light-based primary production models. Second, I studied restoration management for deteriorated ecosystems by focusing on local ecological problems.

研究分野：生態学

キーワード：生態系 レジームシフト 劣化 状態回復 保全

## 1. 研究開始当初の背景

自然界は日周や季節変化、天候など絶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、それまで自然界に備わっていた自己安定化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)を起こすことが報告されている(Scheffer et al. 2001; 加藤 2005, 2007; Genkai-Kato 2007)。

レジームシフトは、ある作用に対して反応に時間的遅れを生ずるヒステリシス(履歴現象)と呼ばれる効果を伴う。そのため、レジームシフトが起こった後に系の状態を回復させることが困難、もしくは不可能である場合が多い。こういったことから、レジームシフトは生態系を管理するにあたって重大な問題をもった生態学的な現象である。

## 2. 研究の目的

(1) 湖沼生態系は半閉鎖系であり、レジームシフト現象に関しても、モデル生態系として研究されてきた。富栄養化して植物プランクトンが突発的に増殖するレジームシフトが起こると、湖沼の生態系機能の1つである一次生産にも大きな変化が起こることが分かっている。しかし、一次生産量を算出するにあたっては複数の方法がある。本研究では、これらの算出方法を比較して統一化を行ない、湖沼全体の一次生産量の正確な評価ができる方法の開発を目的とした。

(2) 陸上生態系における大きな状態変化の例として、木本であるウリハダカエデの性転換に着目した。ウリハダカエデは同一個体でも、オス花をつける年やメス花をつける年、あるいはオス花とメス花の両方をつける年があるように性転換することが知られている。年によっては多くの個体が一斉に性転換する現象がみられ、その要因には気象条件が関係していることが示唆されている。本研究では、ウリハダカエデの性転換現象と個体数の変動との関係を明らかにする数理モデルの構築を目的とした。

(3) さまざまな人間活動により生態系の劣化が日本全国で起こっており、高知県も例外ではない。研究拠点が高知県であることから、県内で起こっている状態の回復が難しいさまざまな生態学的な現象を対象に、生態系の劣化を引き起こす仕組みの解明と対策や保全を行なう方法の開発を目的とした。

## 3. 研究の方法

(1) 湖沼全体の一次生産を理論的に見積もるには、2つの異なる方法がある。一つは、植物プランクトンの密度、水深に伴う光の減衰曲線、光強度 - 光合成曲線を組み合わせる算出する光環境に基づいた方法がある(光環境モデル)。もう一つは、栄養塩濃度に依存した植物プランクトンの個体群動態の微分

方程式において、増殖の項が炭素固定量を表していることから、一次生産量に相当する(栄養塩モデル)。湖沼全体の一次生産量を光環境モデルと栄養塩モデルからそれぞれ算出し、さまざまな湖沼の規模や湖盆形態を考慮して両モデルの比較を行なった。

(2) 鳥取県大山に自生するウリハダカエデ個体群を対象に、1986年から継続的に約300個体の性別や胸高直径が調べられている。本研究では、この長期的な観測に参加して、ウリハダカエデ個体群の性転換と気候などの環境、個体数の変化との関係を調べた。

(3) 高知県では特に人口の減少が他県と比べて深刻な問題となっており、その影響が生態系にも出始めている。本研究では、耕作放棄地の拡大、里山におけるニホンザルの食害、海岸におけるアカウミガメ卵の野生動物による食害に着目した。耕作放棄地の拡大を防ぐために草食動物であるヤギを大豊町怒田地区にある休耕田に導入してその除草効果を調べた。ニホンザルの食害に関しては、中土佐町にて柑橘類を中心とした植生とサルの行動圏の季節変化を調べた。海岸に産卵に来るアカウミガメの卵が野生動物に捕食される被害が高知県東洋町の生見海岸にて近年報告されるようになり、野生動物の特定と捕食から卵を保護する対策方法の検討を行なった。その他にも、河川生態系において、河川の源流域では底生動物群集は個体数においても生物量においても貧弱であるが、流程に沿って下ってくると底生動物群集は急激に豊富になる傾向にあるが、豊富になる要因を群集構造に着目して解析した。河川における底生動物群集の調査は、高知県内を流れる一級河川である四万十川と仁淀川の上流域において夏季に行なった。

## 4. 研究成果

(1) 湖沼全体の一次生産を推定するための光環境モデルと栄養塩モデルを構築して、それぞれのモデルで用いたパラメータは自然条件下で取りうる範囲で変化させて一次生産量を比較した。比較したほとんどのパラメータ値では、光環境モデルのほうが栄養塩モデルよりも高い一次生産量となった。しかし、平均水深が浅い湖や、植物プランクトンの沈降速度が速い、動物プランクトンによる植物プランクトンの摂食速度が速いといった条件となるパラメータ値では、両モデルとも類似した一次生産量となった。現在は、論文として投稿した際に査読者から両モデルを融合してはどうかとの示唆を受けたことから、湖沼形態や気象条件などを考慮しながらパラメータを補正して、両モデル間で一次生産量の推定値に大きな差異が出ないモデルの構築を目指している段階である。

(2) 寿命が長い樹木の現象をモデル化するにあたっては長期的な生態学的データが必要となる。本研究では鳥取県大山におけるウリハダカエデの調査は四半世紀を超え、調査

対象の約3分の1が枯死や攪乱によって死亡した。これまでの研究では、ウリハダカエデの性転換には前年の冬の降水量が大きな要因となっていることが分かっている (Nanami et al. 2004)。また、資源量と繁殖成功度の関係は一般にオスとメスとは異なり、ウリハダカエデでは個体の繁殖成功度を高めるために性転換を行なっていると考えられる (Ushimaru and Genkai-Kato 2011)。各調査個体の性別、胸高直径を基にした成長データ、個体数変動など数理モデル化するための基礎データが揃いつつある。前年の降水量とともに、前年の降雪量もウリハダカエデの性転換を引き起こす要因として明らかになりつつある。現在は、降水量や降雪量、日照条件などの気象条件と性転換の頻度、枯死などによる個体数の変化との関係を解析している段階である。

(3) 人口減少が続く山間部の耕作放棄地におけるヤギの除草効果については、草本は常に成長し続け、ヤギは好みの草本を中心に食べることから、ヤギ1頭あたり除草できる面積として評価することは非常に難しい。そのため、ヤギの体重変化と排泄量(糞と尿)を基に採草量を推定した結果、成熟した体重20-40 kgのヤギは1頭あたり湿重量で4-5 kgの草を食べることを明らかにした。また、ヤギは好みの草本を中心に食べることから、放牧されている耕作放棄地では、クズやススキなどがほぼなくなり、代わってワラビなど毒のあるものや匂いの強いシソ科の植物が増えていた。

ニホンザルの環境選択に関する研究では、中土佐町で捕獲されたオスザル1頭にGPS首輪を装着して行動を追跡した結果、利用する植生に関しては季節的な変動がみられなかったが、放棄果樹園に対する選好度が高かった。果樹園では、夏から初夏にはヤマモモやビワ、夏から秋にはカキやクリ、冬にかけては柑橘類が実るため、年間を通して里山におけるニホンザルの重要な採食場所であることが明らかになった。

東洋町におけるアカウミガメ卵については、産卵層に自動撮影装置を設置して調査を行なった結果、キツネが捕食していることが明らかになった(渡邊ほか 2016)。この結果を受けて、産卵層を約1.2 m × 2 mの溶接金網20枚を用いた防護柵で包囲したところ、キツネの姿は見られなくなったが、代わりにスナガニの一種であるツノメガニ(*Ocypode ceratophthalma*)による卵の捕食の可能性が示された。防護柵を溶接金網3枚の簡易柵に変更したところ、キツネは現れたが卵が捕食されることはなく、ツノメガニによる捕食の可能性もなかった。キツネはスナガニ類の捕食者であることから、キツネの存在はツノメガニの活動を抑える効果があることが示唆された。今後は、キツネとツノメガニの間の相互作用など生態系のバランスを考慮した防護柵の規模など設置方法を検討していく

必要がある。

河川の底生動物群集の構造に関して、四万十川と仁淀川の情牛息を対象に調査した。単位面積あたりの底生動物群集の個体数や生物量、優占する分類群を体長ごとに分けてみた結果、両河川とも大きい個体から小さい個体へと体長区分を累積した場合、個体数は直線的に増加し、生物量では増加が飽和する傾向がみられた。優占する分類群については、両河川に共通して、個体数でみた場合は小型個体が多いカゲロウ目や、生物量でみた場合には大型の個体が多いトビケラ目が優占していることが明らかになった。

#### <引用文献>

- Genkai-Kato M. 2007. Regime shifts: catastrophic responses of ecosystems to human impacts. *Ecological Research* 22: 214-219.
- 加藤元海. 2005. 生態系における突発的で不連続な系状態の変化 - 湖沼を例に -. *日本生態学会誌* 55: 199-206.
- 加藤元海. 2007. レジームシフトとは何か? - 自然は突然変化する -. *河川* 63(5): 63-65.
- Nanami S, Kawaguchi H, Yamakura T. 2004. Sex change towards female in Dying *Acer rufinerve* trees. *Annals of Botany* 93: 733-740.
- Scheffer M, Carpenter S, Foley JA, Folke C, Walker B. 2001. Catastrophic shifts in ecosystems. *Nature* 413: 591-596.
- Ushimaru A, Genkai-Kato M. 2011. A theoretical framework for resource translocation during sexual reproduction in modular organisms. *Evolutionary Ecology* 25: 885-898.
- 渡邊真子、谷地森秀二、斉藤知己、加藤元海. 2016. 高知県東洋町の生見海岸におけるアカウミガメの卵を狙う野生動物. *四国自然史科学研究*、投稿中。

#### 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14件)

- 三好智子、袖山修史、加藤元海. 分類群ごとにみた飼育動物の体重と摂取エネルギー量の関係. *Animal Behaviour and Management*, 印刷中, 2016(査読有). [http://www.jsaab.org/abm\\_b.html](http://www.jsaab.org/abm_b.html)
- 山中萌、井上光也、加藤元海. 夏季の仁淀川と四万十川の上流域における底生動物群集の体長、個体数、生物量の関係. *黒潮圏科学* 9: 124-136, 2016(査読有). <http://kuroshio.cc.kochi-u.ac.jp/repository/jp/index.html>

3. 伊藤裕子、加藤元海. 18歳以上の日本人に対する体脂肪率の推定式. 黒潮圏科学 9: 150-155, 2016 (査読有). <http://kuroshio.cc.kochi-u.ac.jp/repository/jp/index.html>
4. 柿真理、加藤元海. 耕作放棄地の植物に対するヤギの採食嗜好性. 黒潮圏科学 9: 156-163, 2016 (査読有). <http://kuroshio.cc.kochi-u.ac.jp/repository/jp/index.html>
5. 小牧祐里、谷地森秀二、斉藤知己、加藤元海. 高知県東洋町の生見海岸におけるアカウミガメ卵のキツネによる食害とその対策. 黒潮圏科学 9: 164-173, 2016 (査読有). <http://kuroshio.cc.kochi-u.ac.jp/repository/jp/index.html>
6. 加藤元海、見並由梨、井上光也. 水生昆虫食：河川底生動物の食料としての可能性. 日本生態学会誌 65: 77-85, 2015 (査読有). <http://www.esj.ne.jp/esj/JJE/index.html>
7. 井上光也、小原直子、加藤元海. 仁淀川源流域における河川環境と底生動物. 黒潮圏科学 8: 118-125, 2015 (査読有). <http://kuroshio.cc.kochi-u.ac.jp/repository/jp/index.html>
8. 渡邊礼雄、井上光也、比嘉基紀、加藤元海. 四国におけるイシツチサンショウウオの生息環境と生息適地の予測. 黒潮圏科学 8: 126-135, 2015 (査読有). <http://kuroshio.cc.kochi-u.ac.jp/repository/jp/index.html>
9. 浅風祥子、加藤元海. ヤギの体重変化と排泄量を基にした採草量の推定. 黒潮圏科学 8: 160-167, 2015 (査読有). <http://kuroshio.cc.kochi-u.ac.jp/repository/jp/index.html>
10. 江口葉月、石田一馬、井上光也、加藤元海. 四万十川上流域における河川環境と底生生物. 黒潮圏科学 7: 123-131, 2014 (査読有). <http://kuroshio.cc.kochi-u.ac.jp/repository/jp/index.html>
11. 大西由希子、加藤元海. 鏡川上流域における河川環境と底生動物. 黒潮圏科学 6: 208-216, 2013 (査読有). <http://kuroshio.cc.kochi-u.ac.jp/repository/jp/index.html>
12. 佐藤大紀、加藤元海. 高知県新荘川においてニホンカワウソの存続に影響を与えた要因. 黒潮圏科学 6: 218-228, 2013 (査読有). <http://kuroshio.cc.kochi-u.ac.jp/repository/jp/index.html>
13. 三好智子、加藤元海. 土佐湾のホエールウォッチングにおける鯨類の出現頻度と気象海洋条件との関係. 黒潮圏科学 6: 230-236, 2013 (査読有). <http://kuroshio.cc.kochi-u.ac.jp/repository/jp/index.html>
14. 内田朝子、大八木麻希、加藤元海、中西正己. 矢作川の生態系を支える付着藻類の栄養状態. 陸水学雑誌 74: 63-72, 2013 (査読有). <https://www.jstage.jst.go.jp/browse/rikusui/-char/ja/>
- [学会発表](計14件)
1. 浅風祥子、加藤元海. ヤギの体重変化と排泄量を基にした採草量の推定. 第63回日本生態学会、2016年3月21日、仙台国際センター(宮城県仙台市).
2. 井上光也、山中萌、加藤元海. 河川源流域における底生動物群集の流程による変化と河川環境. 第63回日本生態学会、2016年3月22日、仙台国際センター(宮城県仙台市).
3. 山中萌、井上光也、加藤元海. 夏季の仁淀川と四万十川の上流域における大型底生動物群集の体長、個体数、生物量の関係. 第63回日本生態学会、2016年3月22日、仙台国際センター(宮城県仙台市).
4. 寺山佳奈、金城芳典、加藤元海. 高知県中土佐町におけるニホンザルの環境選択と食性. 第63回日本生態学会、2016年3月22日、仙台国際センター(宮城県仙台市).
5. 加藤元海、見並由梨. 水生昆虫食：河川底生動物の食料としての可能性. 第62回日本生態学会、2015年3月19日、鹿児島大学(鹿児島県鹿児島市).
6. 寺山佳奈、金城芳典、加藤元海. 高知県中土佐町の植生とニホンザルの関係. 第20回植生学会、2015年10月11日、高知大学(高知県高知市).
7. 井上光也、小原直子、加藤元海. 仁淀川源流域における河川環境と底生生物. 第62回日本生態学会、2015年3月19日、鹿児島大学(鹿児島県鹿児島市).
8. 寺山佳奈、山田孝樹、葦田恵美子、金城芳典、加藤元海. 高知県中土佐町におけるニホンザルの環境選択. 第62回日本生態学会、2015年3月19日、鹿児島大学(鹿児島県鹿児島市).
9. 佐藤大紀、加藤元海. ニホンカワウソ. 第62回日本生態学会、2015年3月19日、鹿児島大学(鹿児島県鹿児島市).
10. 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. 第61回日本生態学会、2014年3月

18日、広島国際会議場（広島県広島市）。

11. 三好智子、加藤元海。土佐湾のホエールウォッチングにおける鯨類の出現頻度と気象海洋条件との関係。日本哺乳類学会 2014年度大会、2014年9月5-7日、京都大学（京都府京都市）。

12. 寺山佳奈、山田孝樹、葦田恵美子、金城芳典、加藤元海。高知県中土佐町におけるニホンザルの環境選択。日本哺乳類学会 2014年度大会、2014年9月5-7日、京都大学（京都府京都市）。

13. 三好智子、加藤元海。土佐湾のホエールウォッチングにおける鯨類の出現頻度と気象海洋条件との関係。第61回日本生態学会、2014年3月16日、広島国際会議場（広島県広島市）。

14. 加藤元海。簡単な数理モデルによるレジームシフトの説明。第60回日本生態学会、2013年3月7日、静岡県コンベンションアーツセンター（静岡県静岡市）。

〔図書〕（計0件）

〔産業財産権〕  
出願状況（計0件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況（計0件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等  
<http://science.cc.kochi-u.ac.jp/?course=4044>

## 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・講師  
研究者番号：60403854

### (2) 研究分担者

なし（ ）

研究者番号：

(3) 連携研究者  
なし（ ）  
研究者番号：