

令和 元年 9月 10日現在

機関番号：30106

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2015～2018

課題番号：15K00524

研究課題名（和文）気候変動による急速な高山植生変化の検出とそのメカニズム解明のモデル構築データ解析

研究課題名（英文）A Model Analysis for the Regime Shift under climate change

研究代表者

矢吹 哲夫（YABUKI, TETSUO）

北星学園大学・経済学部・教授

研究者番号：50275484

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,700,000円

研究成果の概要（和文）：気候変動（地球温暖化）によって生じている可能性の高い大雪高山生態系の遷移（レジームシフト）のモデル解析をフィールド現場での測定及び生態系回復実験のデータと照合しつつ定量的なモデル解析を行なった。初期土壌水分量を積雪量で除した値等複数の無次元パラメータを用いて、ササ刈取りによる翌シーズンの初期土壌水分量の経年変化（上昇）を理論解析し、それに伴う高山植生の安定相の相構造変化をグラフを使ってシミュレーション解析することで、ササ刈取り前の土壌水分量とササ刈取り最中のシーズン最初の初期土壌水分量の測定値から、高山植生が安定的に回復するまでに必要なササ刈取りの継続年数を推定する方法論を見出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

数理モデルの中の定量的解析は、同じ量の比の形で無次元化したパラメータを使って行ない、空間スケールに依存しない条件で遂行するという方法論を確立できたことで、大雪山という具体的な場所に限られない、気候変動による高山植生遷移の一般的な解析手段として学術的意義をもつと考えられる。また「ササの刈取り」という方法論の具体的な条件設定（刈取り期間、間隔等）を変えたときの成果を、フィールドの測定データ（土壌水分量の時系列データ等）から推し量るための定量的なシミュレーションの方法を確立し、高山植生が安定的に回復するまでに必要なササ刈取りの継続年数を推定する方法論を見出すことが出来たことの社会的意義は大きい。

研究成果の概要（英文）：To propose how to recover already degraded alpine vegetation through the regime shift under climate change especially global warming, we have performed model analyzing based on the state structure quantitative analysis in terms of several dimensionless parameters, referring to field measurement data and recovery experiment data in our research field. It has been found that the plausible values of the parameters in our model can explain the degraded alpine vegetation in our field as a regime shift, and the initial soil water content increased by cutting dwarf bamboo on the ground can recover the favorable stable state structure, and as a result our degraded alpine vegetation can be recovered within a reasonable value of dimensionless parameters in our model.

研究分野：数理科学

キーワード：レジームシフト 高山植生遷移・回復 気候変動 数理モデル解析 相構造解析

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

## 1. 研究開始当初の背景

研究分担者の工藤を代表者とする科研費研究（基盤研究B：平成21～23）では、近年の雪解け時期の早まりが北海道大雪山系における急速な高山植生変化を引き起こしていることを明らかにした。特に、バイオマスが大きいチシマザサの分布拡大が、他の高山植生の存続を抑制している事実が判明し、ササの挙動が高山生態系に多大な影響を及ぼす可能性が示された。

本研究代表者である矢吹は、雪解け時期の早まりが土壌への融雪水の流入期間を短縮することにより、高山植生に「レジームシフト」が生じている可能性を検証する数理モデル（説明モデルとしての平均場モデル）を構築し、一定の成果を収めた。レジームシフトは以下の3条件が満たされるときに進行する（矢吹による整理）：

- 1) 系の急激な変化（生物群集中の種構成の急激な変化など）が短期間で生じる。
- 2) 系の変化を引き起こす原因である環境の変化は、突然ではなく緩慢に進行している。
- 3) 環境変数の閾値に履歴依存性、「ヒステリシス」が存在する。即ち、系が変化するときよりも回復するときのほうがより厳しい環境条件が必要になる。

レジームシフトの概念は R.May (1977; *Nature* 269, 471-477) によって提起され、Scheffer *et al.* (2001; *Nature* 413, 591-596) によってメカニズムの理解が進み、その根底にフィードバック機構の存在が示されている。気候変動が植生に与えるレジームシフトについては、(Sternberg 2001; *Glob.Ecol.Biogeography* 10,369-378) によって乾季降水量と植生比率の間のフィードバック機構により、所謂「緑のサハラ」と「砂漠のサハラ」の間で相転換が生じる可能性が“半定量的”に指摘されている。また、湖沼生態系に関しては Genkai-Kato & Carpenter (2005. *Ecology*, 86, 210-219 他) によって栄養塩濃度(リン)と植物プランクトン密度のフィードバックによって生じるレジームシフトが数理的に解析されていた。

## 2. 研究の目的

気候変動に伴う環境変化が急速な高山植生変化（劣化）を引き起こしている現状に基づき、その基本的なメカニズムと動向を数理モデルの構築と解析により解明し、現場での測定、修復実験（ササの刈取り実験）のデータを参照しつつその植生回復の可能性を理論的に解析することを目的とする。具体的には、急速なササの分布拡大や土壌乾燥化により高山植物群集の種多様性が急速に低下し、高山植生が衰退している現象を研究対象として、高山生態系に固有な植生変動メカニズムを解析する数理モデルの構築、解析を行う。申請者らはこれまでに、説明モデルの構築を行いその一部を公表していたが、本研究で更にフィールドでの観察・観測データに基づいた定量的な予測を可能にする分析モデルへの発展、展開を目指す。気候変動に伴う高山生態系の環境変化と植生変化が、様々な生態系変化の中で注目を集めている短期間で生じる準非可逆な変化としての「レジームシフト」である可能性を定量的に考察し、そのレジリエンス（回復力）の定量的な評価方法を確立することで、高山生態系保全政策に資する理論構築の確立を目的とする。

## 3. 研究の方法

数年・1年・1日単位という時間スケールの階層性を基本枠組みとする一般性の高いモデル構造を構築し、この基本構造に基づいて構築された分析モデルを用いて、温暖化等の地球環境の変化がレジームシフトのような植生変化を生じさせることを検証する。高山植生における融雪水、降雪量の水環境のダイナミクスを、日単位での微分方程式の定式化によって解析し、次に生態変数（チシマザサの被覆率）と、微分方程式から得た水環境変数（土壌水分等）を1年間の特徴的な時刻（日）における値で代表することで、両者の間のフィードバック作用に基づいて生態変数についての安定相の消長を定量的に解析し、レジームシフトが高山植生に生じ得るパラメータ領域を解析し、既に生じている場合は、“ゆらぎ”等の理論的解析の方法論を構築し、修復可能性についての検証を行った。最終的には、モデルの中での定量的解析は、同じ量の比の形で無次元化したパラメータを使って行ない、空間スケールに依存しない条件で遂行し、特に、予めその無次元パラメータ間の関係式（不等式）と実際のフィールドのデータ（土壌水分量の時系列データ等）の振舞いと対応関係を理論的に分類し、今回の対象現場である大雪で得られたフィールドデータから無次元パラメータ間の関係式（不等式）を同定するという方法を講じた。最後に、今後の植生回復のために「ササの刈取り」という方法論の具体的な条件設定（刈取り期間、間隔等）を変えたときの成果を、フィールドの測定データ（土壌水分量の時系列データ等）から推し量るために定量的なシミュレーションを行った。

## 4. 研究成果

### (1) 2015年度

研究分担者の工藤の研究成果である大雪山での継続的なササの刈取り実験とその後の貴重な植生回復(図1)という事実を照らしたモデル解析として2つのシナリオを整理して、各々のシナリオによるパラメータ解析を行なった。この後の研究期間内でその中から具体的なシナリオを絞ってより現実的な生態系管理の指針となる理論的提言をするための基礎を据えることが出来た。ここまでの研究成果を踏まえて、8月には酪農大で、研究協力者である神戸大の田中成典氏、蛭名邦禎氏、北大の原登志彦氏を招いて(公開)研究セミナーを開催した。また、3月には神戸大での公開セミナーを本科研費研究と合同企画し、参加してくれた神戸大の複数の研究者に上記の本研究の到達概要を紹介し、有益な助言を得ることができた。

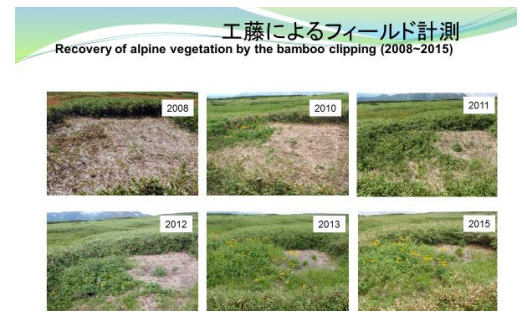


図1：現地フィールドでのササの刈取り実験

### (2) 2016年度

数理モデルの中でのパラメータ解析(図2)のために研究分担者の工藤が大雪山高山フィールドに土壤水分の自動定点観測装置を設置して、「①ササの刈取り前」と「②ササの刈取り後」の土壤水分の時系列データ(日単位)を収集した。そのデータ解析から土壤水分の時間変動の基本的な振る舞いが、数理モデルで事前に整理していた無次元パラメータ間の関係式(不等式)と整合していることを見出し(図3(a))、モデルの信頼性の一端を検証した。同時に①は融雪水の流入の前半で最小値を持ち、後半で最大値をもち(図3(b))、②では最大値を一つもつのみ(図3(c))という土壤水分の時間的振舞いの解析的な検証(数値解析による検証ではなく)から、刈取り効果を、モデルの無次元パラメータの大小関係で理論的に説明することに成功した。この成果は、2017年2月に名古屋大学で開催された国際学会で発表した。

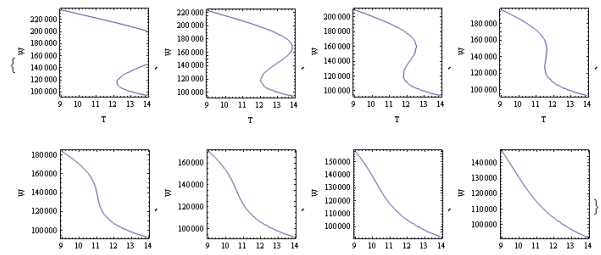


図2：パラメータ解析(ヒステリシス解析)の例

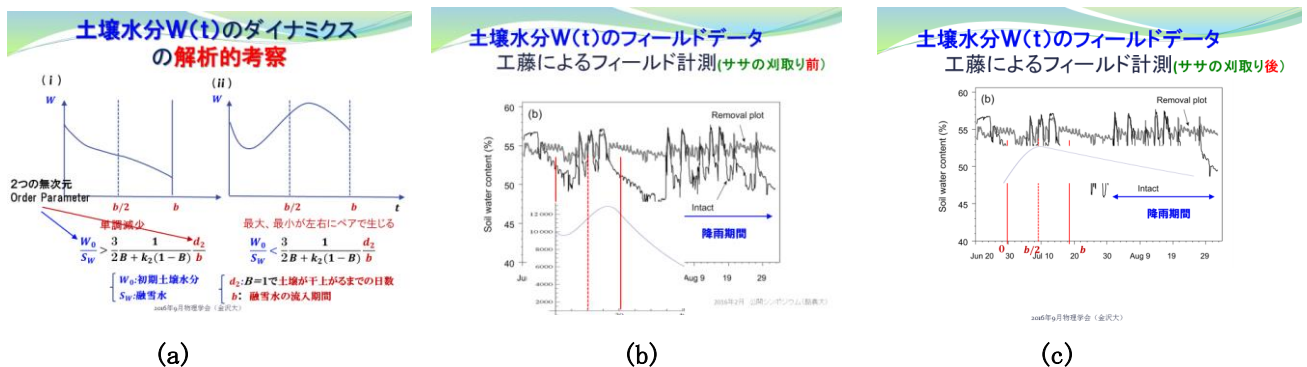


図3：無次元パラメータによる土壤水分の時間変化の解析

- (a) 無次元パラメータの大小関係に基づく土壤水分の時間的振舞いと2つの分類
- (b) ササの刈取り前の土壤水分の時系列データ(フィールド)の無次元パラメータによるモデル解析
- (c) ササの刈取り後の土壤水分の時系列データ(フィールド)の無次元パラメータによるモデル解析

### (3) 2017年度、2018年度

気候変動(地球温暖化)によって生じている可能性の高い大雪山高山生態系の遷移(レジームシフト)のモデル解析を、2105年度、2016年度の2年間の研究結果の基盤の上に、フィールド現場での測定及び生態系回復実験のデータと照合しつつ、更に現実的な形で行なった。具体的には、モデルに含まれるパラメータをフィールド現場での測定データから現実的な領域に絞り込み、また一部モデルの改良も加えて、説明モデルから分析モデルへ展開し、定量的な解析を行なった。特に最終年度のモデル定量解析は、同じ量の比の形で無次元化した数個のパラメータに集約した解析を行なうことで、フィールドのスケールに依存しない汎用性の高い数理モデル解析となった。

具体的には、以下のことが明らかとなった。

- 1) これまで数値解析で立証してきた本研究解析のメカニズムの中核をなす融雪水の流入期間の短縮による土壤水分の減少率の寄与の中で、「ササの蒸散率」と「それ以外の植物の蒸散率と自然蒸発率の和」の大小関係によって、土壤水分のササのバイオマスへの依存関

係が逆転することが解析的に導出された。

2) 初期土壌水分量を積雪量で除した無次元パラメータを用いて、ササ刈取りによる翌シーズンの初期土壌水分量の経年変化（上昇）を理論解析し、それに伴う高山植生の安定相の相構造変化をグラフを使ってシミュレーション解析を行なう方法を確認した（図4(a)）。この解析方法を用いて、ササの刈取り前の土壌水分量（初期条件）を変えたときの高山植物の安定相回復までの年数を解析し（図4(b)）、ササ刈取り前の土壌水分量とササ刈取り最中のシーズン最初の初期土壌水分量の測定値から、高山植生が安定的に回復するまでに必要なササの刈取りの継続年数を推定する方法論を見出すことに成功した。これらの結果は、2018年10月フランスのレンヌで開催されたエコロジーの国際学会で発表した。

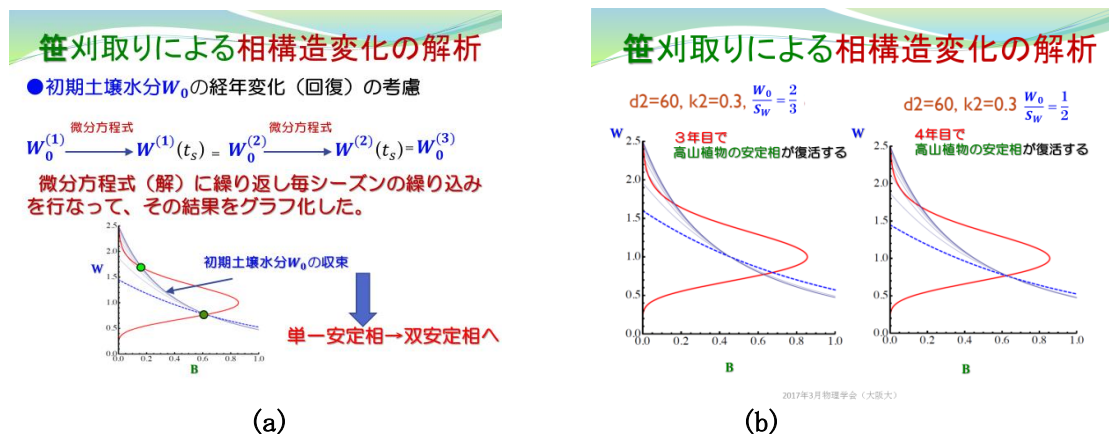


図4：ササ刈取りによる植生の相構造変化の解析

(a) ササ刈取り効果による初期土壌水分量の経年変化（上昇）とそれに伴う植生の相構造変化の解析

(b) ササ刈取り前の土壌水分量（初期条件）への高山植物の安定相回復までの年数の依存性解析

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計18件）

- ①前田展希、矢吹哲夫、飛田豊、石川健三、光合成系の励起エネルギー移動と「時間とエネルギーの不確定性関係」、素粒子論研究、27巻、2018、1-9
- ②Amagai Y., Kudo G. & Sato K., Changes in alpine plant communities under climate change: dynamics of snow-meadow vegetation in northern Japan over the last 40 years. , Applied Vegetation Science 2018 査読有: 1-11., doi: 10.1111/avsc.12387
- ③Kudo G., Aoshima Y., Miyata R. & Winkler D.E. Altered morphologies and physiological composition in a rapidly expanding dwarf bamboo in alpine ecosystems. Arctic, Antarctic, and Alpine Research 査読有、50巻、1-11、2018
- ④工藤岳、大雪山国立公園における気候変動と高山生態系の変化. 国立公園（一般財団法人自然公園財団）No. 176:11-13.、2018
- ⑤工藤岳・雨谷教弘、高山帯におけるササの分布拡大メカニズムと生態系への影響. 地球環境、査読有、Vol. 23: 2018、17-26
- ⑦T. Yabuki, G. Kudo, B. Hoshino, M. Kaneko, A Model Analysis for the Regime Shift in Alpine Vegetation, Conference paper, INTERNATIONAL CONFERENCE ON ECOLOGICAL 2018, 213374
- ⑧Yuki Sofue, Buho Hoshino, Yuta Demura, Kenji Kai, Kenji Baba, Eunice Nduati, Akihiko Kondoh and Troy Sternberg. Satellite Monitoring of Vegetation Response to Precipitation and Dust Storm Outbreaks in Gobi Desert Regions. *Land*, 7(19). 1-13. 2018. DOI: 10.3390/land7010019.
- ⑨ Kudo G., Kawai Y., Amagai Y. & Winkler D.E. 2017. Degradation and recovery of alpine plant community: experimental removal of an encroaching dwarf bamboo. *Alpine Botany* 127: 75-83. DOI: 10.1007/s00035-016-0178-2
- ⑩Yintai Na, Buho Hoshino\*, Shin'ya Kawamura, Tseveddorj Serod: Population changes behind grassland degradation in Horqin region of Inner Mongolia, China. *Research of One Health* (Jan. 2018). 1-17. 2018.
- ⑪Yuta Demura, Buho Hoshino, Kenji Baba, Christopher McCarthy, Yuki Sofue, Kenji Kai, Tsendendamba Purevsuren, Katsuro Hagiwara and Jun Noda. Determining the Frequency of Dry Lake Bed Formation in Semi-Arid Mongolia From Satellite Data. *Land*, 6(88). 1-9. 2018. DOI: 10.3390/land6040088.



- ⑫N. Maeda, T. Yabuki, Y. Tobita, K. Ishikawa, Finite-size corrections to the excitation energy transfer in a massless scalar interaction model, *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 査読有、2017(5)1-19, DOI:10.1093/ptep/ptx066
- ⑬Sofue, Y., Hoshino, B., Demura, Y., Nduati, E., and Kondoh, A.: The Interactions Between Precipitation, Vegetation and Dust Emission Over Semi-Arid Mongolia, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, doi:10.5194/acp-2017-83, in review, 2017.
- ⑭Buho Hoshino, Sara Morioka, et al., (2017): A New Methodology for the Evaluation of Ecological Characteristic of the Camel - A case Study of Climate Change and Breeding of Camel -. *Journal of Arid Land Studies*, 26(4), 203-207. Doi: 10.14976/jals.26.3\_203.
- ⑮Satomi Ishii, Buho Hoshino, Sabir T. Nurtazin (2017): Properties and Seasonal Variation of Milk Produced by One-humped Camels (*Camelus dromedarius*) and Two-humped camels (*C. bactrianus*) in the Republic of Kazakhstan. *Journal of Arid Land Studies*. 26(4) 219-222.
- ⑯Karina Manayeva, Buho Hoshino, Hiromasa Igota, Takashi Nakazawa and Ganzorig Sumiya, 2017. Seasonal migration and home ranges of Tibetan antelopes (*Pantholops hodgsonii*) based on satellite tracking. *Int. J. Zool. Res.*, 13: 26-37.
- ⑰Winkler D. E., Amagai Y., Huxman T. E., Kaneko M. & Kudo G. 2016. Seasonal dry-down rates and high stress tolerance promote bamboo invasion above and below treeline. *Plant Ecology* 217: 1219-1234. DOI: 10.1007/s11258-016-0649-y
- ⑱Buho Hoshino\*, Yuta Demura, Yuki Sofue, Kenji Kai, Ts. Purevsuren, Jun Noda (2016) Estimates of ground surface characteristics for outbreaks of the Asian Dust Storms in the sources region. *ProScience* 3(1). 21-30. DOI:10.14644/dust.2016.004.

### 〔学会発表〕(計 11 件)

- ①矢吹哲夫、工藤岳、星野仏方、金子正美、A Model Analysis for the Regime Shift in Alpine Vegetation、International Conference on Ecological Sciences (sfecologie2018)、2018年10月24日
- ②Buho Hoshino、Detection of Environmental Regime Shifting in Semi-Arid Region and Simulation of Dust Emission from Dry Land. 会議: International Conference of Desert technology (DT13). 2018年3月14日(Chennai, India) 招待講演
- ③矢吹哲夫、地球温暖化によって高山植生に生じる「レジームシフト」の数理モデル解析 = フィールド測定・実験との連携に向けて =、武蔵野大学数理工学シンポジウム 2017 (招待講演) 2017年11月21日
- ④矢吹哲夫、工藤岳、星野仏方、金子正美、A Model Analysis for the Regime Shift in Alpine Vegetation Under Climate Change、アジアダスト・バイオエアロゾル・環境レジームシフトに関する国際会議、2017年11月4日
- ⑤ Seasonal Dynamics for Vegetation Response to Precipitation and Detection of Environmental Regime Shifting in Semi-Arid Region. 演者: Buho Hoshino. 会議: International Workshop on Asian Dust, Bioaerosols and Environmental Regime Shift. 2017年11月3日 (名古屋大学)
- ⑥矢吹哲夫、工藤岳、地球温暖化によって高山生態系(植生)に生じる「レジームシフト」の数理モデル解析 5、日本物理学会 2017年秋季大会(物性) 2017年9月22日
- ⑦矢吹哲夫、地球温暖化によって高山生態系(植生)に生じる「レジームシフト」の数理モデル解析 4 = モデル解析とフィールド測定・実験との連携に向けて =、日本物理学会第 72 回年次大会(2017年)2017年3月18日
- ⑧星野仏方、環境レジームシフトとダストの発生、名古屋大学・大学院日本学術振興会(JSPS)公開セミナー 2017年2月23日(招待)
- ⑨工藤岳・大雪山国立公園における気候変動と生態系インパクト  
日本地球惑星科学連合 2016年大会、幕張メッセ国際会議場(千葉県、千葉市)  
2016年5月22-26日(招待講演)
- ⑩矢吹哲夫、地球温暖化によって高山生態系(植生)に生じる「レジームシフト」の数理モデル解析 3、日本物理学会 2016年9月14日
- ⑪矢吹哲夫、地球温暖化によって高山生態系(植生)に生じる「レジームシフト」の数理モデル解析 2、日本物理学会第 71 回年次大会 2016年3月19日

### 〔図書〕(計 0 件)

### 〔産業財産権〕

- 出願状況(計 0 件)
- 取得状況(計 0 件)

### 〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

- ・氏名：工藤岳 (Kudo Gaku)
- ・所属研究機関名：北海道大学
- ・部局名：地球環境科学研究 (研究院)
- ・職名：準教授
- ・研究者番号 (8桁)：30221930

- ・氏名：星野仏方 (Hoshino Buho)
- ・所属研究機関名：酪農学園大学
- ・部局名：農食環境学群
- ・職名：教授
- ・研究者番号 (8桁)：80438366

- ・氏名：金子正美 (Kaneko Masami)
- ・所属研究機関名：酪農学園大学
- ・部局名：農食環境学群
- ・職名：教授
- ・研究者番号 (8桁)：00347767

### (2) 研究協力者

- ・研究協力者氏名：原 登志彦 (Hara Toshihiko)
- ・研究協力者氏名：田中成典 (Tanaka Shigenori)
- ・研究協力者氏名：蛭名邦禎 (Ebina Kuniyoshi)
- ・研究協力者氏名：田中歩 (Tanaka Ayumi)

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。