

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 3 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23300334

研究課題名(和文)周氷河地形プロセス学の体系化

研究課題名(英文)Proposing a systematic framework of dynamic periglacial geomorphology

研究代表者

松岡 憲知(Matsuoka, Norikazu)

筑波大学・生命環境系・教授

研究者番号：10209512

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,600,000円、(間接経費) 4,380,000円

研究成果の概要(和文)：周氷河地形の発生・規模・形態・形成速度を決める要因、および気候変動の影響を解明し、最終的に周氷河地形プロセスを体系化するために、異なる周氷河環境(北極圏スバルパール、欧州アルプス、中部山岳地域)を対象に、長期無人観測、精密地形測量、周氷河現象の分布・形態・構造に関する現地調査を総合的に行った。既存データを加えて観測データを分析した結果、落石・ソリフラクション・リル侵食等の発生条件、岩盤変形や岩石氷河の進行速度、氷楔破壊発生の年々変動とその原因が詳しく判明した。また、霜柱による礫と土の淘汰プロセスに関する室内実験を実施した結果、世界で初めて淘汰構造土の初期地形を再現することに成功した。

研究成果の概要(英文)：We compiled data from long-term field monitoring of various periglacial processes and their controls, as well as data on the distribution, morphology and structure of resulting periglacial landforms. These data were used to analyze factors controlling the periglacial processes and landforms, to evaluate their climatic significances, and finally to propose a systematic framework of dynamic periglacial geomorphology. The data analyses revealed the thresholds for the generation of rockfall, solifluction and rill erosion, the dynamics of rock creep and rock glaciers, and the inter-annual variation and triggers of ice-wedge cracking. Full-scale laboratory simulations of frost sorting processes successfully produced incipient forms of sorted patterned ground.

研究分野：地形学・凍土学

科研費の分科・細目：地理学

キーワード：周氷河地形 地球観測 寒冷圏 永久凍土 凍結融解 気候変動 北極

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 地盤の凍結に関連して生じる「周氷河現象」(構造土・ピング・岩石氷河など地表に見られる周氷河地形や氷楔・インポリーションなど地下に発達する周氷河構造全般を指す)は、その場所の気候条件を反映するために、地球科学の諸分野で気候指標として利用されるとともに、気候変動に伴うその変化が注目されている。しかし、周氷河現象の研究では形態・構成物など視覚的要素を出発点とすることが多いため、形成プロセスや形成条件に関して混乱や誤解が生じている。例えば、「構造土」には凍結攪拌や熱収縮破壊という異なる成因を持つものがあるし、「ロープ」地形にも表土の移動と地中の永久凍土の変形によるものがあるが、多くの地球科学の教科書では形成条件が明確に区別されておらず、気候指標としての誤用が生じている。混乱を避けるには、形成プロセスに基づいて、周氷河現象の種類・形態・規模・構造・形成速度等を統一的に理解する必要がある。

(2) 研究代表者は、1998年以來、国際永久凍土学会(IPA)「周氷河プロセスと気候変動」研究グループの代表として、周氷河プロセス・地形の統一的な理解に向けた国際共同研究に関わってきた。最近15年間で周氷河プロセスに関する理解は格段に進んだが、まだ形成条件に未解決の点は多い。また、凍結攪拌や凍結淘汰のプロセスに関しては、基礎データが決定的に不足している。条件の異なる周氷河環境での現地観測や室内実験によるデータの集積が望まれる。

### 2. 研究の目的

周氷河プロセスに起因する地形や地下構造については、成因や気候条件が個別に論じられてきたが、形成プロセスに基づいた統一的な理解はなされていない。本研究では、寒冷永久凍土地域から季節凍土地域にかけての異なる周氷河環境下での各種の周氷河地形プロセスの長期野外観測、ならびに低温室内でのモデル実験に基づいて、個々の周氷河現象の発生条件、形成速度、規模や形態を決める要因について解明をめざす。周氷河プロセスの動態に基づいて周氷河現象を統一的に理解することにより、従来と異なる視点に立つ新しい周氷河地形学を体系化する。

具体的には、周氷河プロセスの野外観測・室内実験・理論に基づいて、周氷河現象を整理・再定義し、各現象の形態・規模・構造・形成速度の規定要因を定量化する。そして、「周氷河地形プロセス学」の体系化の基礎として、周氷河プロセスを凍結融解作用、永久凍土作用、凍土遷移作用の3種類に分け、各プロセスと地盤構成物質を組み合わせた区分を提唱する。

### 3. 研究の方法

(1) 種々の周氷河現象を対象に、凍土条件の

異なる世界3地域で形成プロセスとその支配因子(気候・地盤条件)に関する総合的な長期自動観測を行う。

(2) 実験室で再現可能な小規模現象や現地観測が困難な現象(例:淘汰構造土)を対象に、低温恒温室を利用して、気象・水文・地形・地盤条件を制御した室内実験を実施する。

(3) 現地観測、室内実験データに加えて、世界各地での既存の調査・観測データを収集し、データベースを作成するとともに、物理的過程を基礎とした各周氷河現象の形成条件の数値モデル化を行う。

(4) 以上の解析結果に基づいて、「周氷河地形プロセス学」の新しい枠組みを提唱する。

### 4. 研究成果

(1) 概要:周氷河地形の発生条件・形成速度・規模・形態を決める要因、および気候変動の影響を解明し、最終的に周氷河地形の形成プロセスを体系化するために、異なる周氷河環境での長期野外観測と既存データ収集、条件を単純化した室内実験を実施した。北極圏スバルバル、欧州アルプス、中部山岳(富士山、南アルプス)を対象に、各地に設置した観測システムからのデータ回収、精密地形測量、周氷河現象の分布・形態・構成物質・内部構造に関する調査を重点的に行った。また、淘汰構造土に関する室内実験を開始した

(2) 野外観測:「中緯度の温暖永久凍土環境および季節凍土環境」に属するスイス・ベルニナ山地、富士山、南アルプスでは、岩盤の凍結破碎、崩壊壁の岩盤変形、ソリフラクション・ロープでの表層土の移動、岩石氷河の変形の各地形プロセス、およびそれらを支配する環境要素(気温・湿度・積雪深・降水量・風向風速・地温・土壌水分)に関する既存の観測網を更新・強化するとともに、新規の観測を開始した(図1)。観測はできる限り自動化して、通年の連続データを取得した。平行して、面的な精密地形測量(レーザスキャナ、GPS、トータルステーション)や落石計測に関しては、年数回の有人観測を行った。

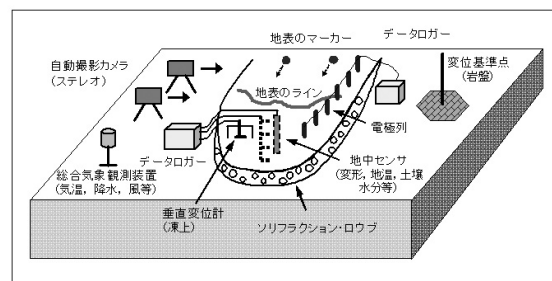


図1 ソリフラクションの総合的観測

その結果、永久凍土分布の高精度での把握、岩盤変形、凍結破碎、表層土壌移動の年々変動とその原因の解明、視覚的観測技術の改良

が進んだ。特に、南アルプスでは地形変化の発生期と発生要因が詳しく判明する(図2)とともに、岩盤変形の加速化が進行し岩盤崩壊が迫っていることがわかった。

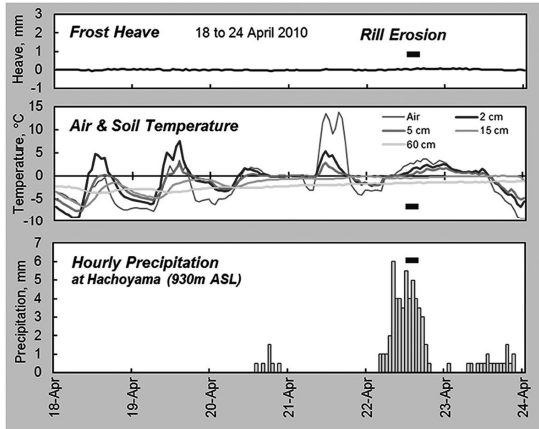


図2 リル侵食の発生条件

「高緯度の寒冷永久凍土環境」に属する北極圏スバルバル諸島では、ノルウェーの研究協力者とともに総合気象、岩石氷河の変形、構造土の垂直変位、氷楔破壊、およびそれらを支配する環境要素に関する観測を実施した。また有人観測として、岩盤や地表面の精密測量および物理探査(非抵抗映像、地震波、電磁波)による地下構造解析を実施した。観測結果を分析し、地形プロセスを制御する条件について検討した結果、岩石氷河の変形速度と氷楔破壊発生年の年々変動とその原因が詳しく判明した。また、研究成果を今後火星表面の周氷河地形に適用するために、スウェーデンの惑星地形研究者とともに、野外調査と研究計画の立案を行った。

(3) 室内実験：現地観測データに基づく観測結果を検証し、より普遍的な地形変化モデルを得るために、野外と同スケールの実験装置を作成した。そして、筑波大学の低温恒温室を利用して、平坦地及び傾斜地での霜柱による淘汰構造土の形成機構を探る実験を行った。礫と土の比率、礫径、地表面傾斜(0~15°)を変数として、凍上-沈下に伴う礫と土の分離プロセスと構造土の形成過程について詳細に調べた。その結果、世界で初めてストーン・アイランド(図3)淘汰円形土お

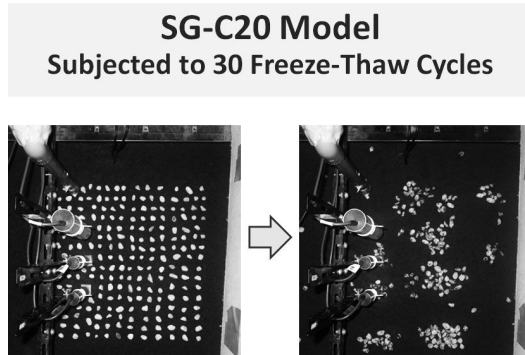


図3 ストーン・アイランドをつくる実験(実験前と凍結融解サイクル30回後)

よび条線土の初期地形を実験室で再現することに成功した。

#### (4) 研究成果の公表

2011年度：国際第四紀研究学会で本研究計画を紹介し、世界各地の周氷河研究者に観測網への参加と情報の提供を呼びかけた。また、気候指標に関するデータベースを作成して問題点を整理した論文を Quaternary Research 誌に、スイスアルプスでの15年間の長期観測結果を総括する論文を地学雑誌に公表した。

2012年度：周氷河地形学の現状と今後を展望する地学雑誌の特集号「地球寒冷圏の地表変動」を代表編集者として出版した。本号には、執筆予定の教科書のベースとなる総説「周氷河プロセス研究の最前線」と富士山の永久凍土の新データに関する論説を掲載した。スバルバルの構造土の動態および南アルプスの岩盤クリープに関する最新の観測結果をまとめた論説を国際誌に公表した。また、一般向け講演(岐阜県高山市)や科学番組への取材協力を行った。

2013年度：地学雑誌の特集号「中部山岳地域の自然環境変動」を代表編集者として出版し、山岳周氷河環境下の地形プロセスを総括する総説を公表した。雪氷の凍土特集号には、岩石氷河に関する最新の研究成果を総括する2編の総説を公表し、地理学評論の総説「日本の寒冷地形研究」では寒冷地形研究の現状の解説と将来展望について総括した。これらの総説の内容は、執筆予定の教科書の各章の骨組みとなる。また、視覚的観測結果を加えたソリフラクション発生機構の最新成果を Permafrost and Periglacial Processes 誌に公表し、世界初となる構造土の形成実験結果については、欧州地球科学会で発表するとともに、国際誌に投稿した。

研究期間終了後：本研究でめざす「周氷河プロセス学の体系化」の最終成果として、以下の構成で英語の教科書を執筆し、新しい学問体系を世界に発信する予定である。

#### Dynamic periglacial geomorphology

1. Periglacial environments: Classification & environmental significance.
2. Dynamics of ground freezing: Ground thermal regimes, permafrost vs. seasonal frost, freeze-thaw cycles, frost heave.
3. Periglacial weathering: Frost weathering, alpine rockwall erosion, cryogenic weathering & landforms.
4. Periglacial slopes: Solifluction, rapid mass movements, permafrost creep, climatic significance & slope evolution.
5. Patterned ground: Cryoturbation & frost sorting, frost cracking & ice wedges, effects of vegetation, morphology & environments.
6. Frost mounds: Active layer heave, subpermafrost heave, bedrock heave.
7. Cold deserts: Dry frost processes, from Antarctica to Mars
8. Extrazonal periglaciation: Periglacial environments in Japan, Glacial/ interglacial/ paraglacial.

## 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 20 件)

Matsuoka, N. (2014). Combining time-lapse photography and multisensor monitoring to understand frost creep dynamics in the Japanese Alps. *Permafrost and Periglacial Processes*, DOI: 10.1002/ppp.1806. (査読有)

松岡憲知・今泉文寿・西井稜子 (2013). 南アルプスにおける地形変動と土砂収支 - 最近の研究動向と展望 - . 地学雑誌, 122(4), 591-614. DOI: 10.5026/jgeography.122.591. (査読有)

西井 稜子・池田 敦 (2013). 二次元電気探査による重力性変形地形浅層部の可視化の試み. 地学雑誌, 122(4), 755-767. (査読有)

池田 敦 (2013). 岩石氷河の成因. 雪氷, 75, 325-342. (査読有)

池田 敦 (2013). 岩石氷河のかたち. 雪氷, 75, 315-324. (査読有)

Matsuoka, N. (2013). Cold region geomorphology in Japan. *Geographical Review of Japan*, 86B, 22-32. DOI: 10.4157/geogrevjapanb.86.22. (査読有)

Watanabe, T., Matsuoka, N. and Christiansen, H.H. (2013). Ice- and soil-wedge dynamics in the Kapp Linné area, Svalbard, investigated by two and three dimensional ground-penetrating radar and ground thermal and acceleration regimes. *Permafrost and Periglacial Processes*, 24, 39-55. DOI: 10.1002/ppp.1767. (査読有)

Nishii, R., Matsuoka, N., Daimaru, H. and Yasuda, M. (2013). Precursors and triggers of an alpine rockslide in Japan: the 2004 partial collapse during a snow-melting period. *Landslides*, 10, 75-82. DOI: 10.1007/s10346-012-0353-5. (査読有)

Nishii, R. and Matsuoka, N. (2012). Kinematics of an alpine retrogressive rockslide in the Japanese Alps. *Earth Surface Processes and Landforms*, 37, 1641-1650. DOI: 10.1002/esp.3298. (査読有)

Watanabe, T., Matsuoka, N. and Christiansen, H.H. (2012). Mudboil and ice-wedge dynamics investigated by electrical resistivity tomography, ground temperatures and surface movements in Svalbard. *Geografiska Annaler*, 94, 445-457. DOI: 10.1111/j.1468-0459.2012.00470.x. (査読有)

松岡憲知・池田 敦 (2012). 周氷河地形プロセス研究最前線. 地学雑誌, 121(2), 269-305. (査読有)

池田 敦・岩花 剛・末吉哲雄 (2012). 富士山高標高域における浅部地温の通年観測 - 永久凍土急激融解説の評価も含めて - . 地学雑誌, 121(2), 306-331. (査読有)

Matsuoka, N. (2011). Climate and material

controls on periglacial processes: Toward improving periglacial climate indicators. *Quaternary Research*, 75, 356-365. (査読有)

松岡憲知・池田 敦 (2011). スイスアルプスの周氷河環境と地形変動 - 15 年間の観測の総括と展望 - . 地学雑誌, 120(3), 502-535. (査読有)

池田 敦・西井稜子 (2011). 赤石山脈三峰岳周辺の岩石氷河の14C年代 第四紀研究, 50, 309-317. (査読有)

[学会発表](計 34 件)

松岡憲知: インターバルカメラと多種センサーによるデータロギングを併用した南アルプス山頂部での斜面変動の観測. 日本地球惑星科学連合 2014 年大会. パシフィコ横浜会議センター, 2014/4/28.

松岡憲知: 火星の周氷河的地形 - 地球の類似地形との比較 - . 第 16 回凍土のモニタリングと変動に関する研究集会. 北海道大学, 2014/2/21.

足達健人・池田 敦他 1 名: スイスアルプスにおける解氷後の露岩表面の風化. 日本地球惑星科学連合 2013 年大会. 幕張メッセ国際会議場, 2013/5/21.

池田 敦・岩花 剛: 富士山の永久凍土分布とその変遷 予察的検討 . 日本地球惑星科学連合 2013 年大会. 幕張メッセ国際会議場, 2013/5/24.

Yamagishi, C. and Matsuoka, N.: Laboratory-produced sorted patterned ground by repeated frost heaving. ヨーロッパ地球科学連合総会 2013. ウィーン (オーストリア), 2013/4/12.

池田 敦他 4 名: 富士山の永久凍土分布について. 日本地理学会 2013 年春季学術大会, 立教大学, 2013/3/29.

池田 敦他 6 名: 富士山頂の凍土観測(2010 ~ 2012 年). 雪氷研究大会, 福山大学, 2012/9/26.

松岡憲知: Periglacial landforms on Mars and Earth. 惑星地形・地層の成因と発達機構に関する研究集会. 北海道大学, 2012/7/8.

Watanabe, T., Matsuoka, N. 他 1 名: Controls on patterned ground variability at a continuous permafrost site, Central Spitsbergen. 第 10 回国際永久凍土学会, サレハルド (ロシア), 2012/6/27.

Iwahana, G., Ikeda, A. 他 2 名: Investigation of permafrost on the summit area of Mt. Fuji. 第 10 回国際永久凍土学会, サレハルド (ロシア), 2012/6/26.

松岡憲知他 2 名: 南アルプス高山域における岩盤破碎・土砂移動の観測. 日本地球惑星科学連合 2012 年大会. 幕張メッセ国際会議場, 2012/5/20.

池田 敦他 6 名: 富士山における永久凍土の直接観測開始. 日本地球惑星科学連合 2012 年大会. 幕張メッセ国際会議場, 2012/5/20.

松岡憲知：南アルプスにおけるフロストク  
リーブの動態観測．日本地形学連合 2011  
年秋季大会．金沢大学，2011/9/2．

Matsuoka, N.: Frost wedges as a periglacial  
climate indicator: reevaluation based on  
physical processes．第 18 回国際第四紀研究  
学会．ベルン（スイス），2011/7/23．

〔図書〕（計 1 件）

松岡憲知・池田 敦（2014）：地形の辞典  
（寒冷地形に関する諸項目を分担執筆）．  
朝倉書店（印刷中）．

## 6．研究組織

### (1) 研究代表者

松岡 憲知（MATSUOKA, Norikazu）  
筑波大学・生命環境系・教授  
研究者番号：10209512

### (2) 研究分担者

池田 敦（IKEDA, Atsushi）  
筑波大学・生命環境系・准教授  
研究者番号：60431657

### (3) 研究協力者

ハンネ・クリスチャンセン  
（CHRISTIANSEN, Hanne H.）  
スバルバール大学（ノルウェー）・北極地  
学教室・教授

オーレ・フムルム（HUMLUM, Ole）  
オスロ大学（ノルウェー）・地理学教室・  
教授

西井 稜子（NISHII Ryoko）  
筑波大学・生命環境系・研究員

渡邊 達也（WATANABE Tatsuya）  
北海道立総合研究機構・地質研究所・研究  
職員

山岸 千鶴（YAMAGISHI Chizuru）  
筑波大学・生命環境科学研究科・大学院生

猪股 泰広（INOMATA, Yasuhiro）  
筑波大学・生命環境学群地球学類・学生