

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20300293

研究課題名（和文） 周氷河気候指標の高精度化と国際標準の策定

研究課題名（英文） Establishing a global standard for high resolution indicators of periglacial climate

研究代表者

松岡 憲知 (MATSUOKA NORIKAZU)

筑波大学・大学院生命環境科学研究科・教授

研究者番号：10209512

研究成果の概要（和文）：

周氷河現象は古環境復元等において、気候指標として利用される。本研究では、世界各地での周氷河地形変動の調査・観測データとモデル実験結果を総合し、物理的根拠に基づく高精度の気候指標を策定することを試みた。周氷河現象が「動く時期や速度」と「動く環境・地盤要因」のデータに基づいて、永久凍土の地温・水文条件、岩石氷河の変動速度と地温の関係、ソリフラクションの発生境界条件、氷楔破壊の発生温度等について分析し、凍土と各周氷河現象の分布条件をモデル化した。

研究成果の概要（英文）：

Periglacial phenomena can be used as paleoclimatic indicators, but the conventional indicators have lacked physical basis. This study aims at establishing high resolution indicators of periglacial climate, based on comprehensive field observations of various periglacial processes in different frost conditions and on laboratory simulations of some processes. The observations and experiments permit understanding of the timing and rate of periglacial movements, as well as the environmental and material controls on these processes. Data analysis and modelling focus on the thermal and hydrological regimes of permafrost, thermal controls on solifluction and rock glacier dynamics and thresholds for ice-wedge cracking.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	5,900,000	1,770,000	7,670,000
2009年度	4,800,000	1,440,000	6,240,000
2010年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
年度			
年度			
総計	14,100,000	4,230,000	18,330,000

研究分野：地理学

科研費の分科・細目：地理学・地理学

キーワード：周氷河地形，寒冷圏，古気候，永久凍土，季節凍土，国際永久凍土学会，国際情報交換，イギリス：ノルウェー：スイス

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 地盤の凍結現象に関連して形成される周氷河地形（例えば、構造土、ビンゴ、岩石氷河）や周氷河現象（例えば、氷楔、インボリューション）は、形成時の気候・水文・植生等の環境条件を反映するため、現在または過去の気候指標として広く用いられてきた。しかし、従来の気候指標のほとんどは年平均気温やそれと気温の年較差や年降水量との組合せに基づく経験的な指標であり、古環境の復元にも広く使用されてきたが、精度が低く、使用には大きな制限があった。

(2) 申請者の研究グループは、周氷河環境下での凍土の分布条件、凍土の熱・水収支状況、周氷河現象や周氷河地形の形成メカニズムの研究を行ってきた。特に、最近では、国際永久凍土学会の「周氷河プロセスと気候変動」研究グループ（代表：松岡憲知、ジュリアン・マートン）の中心的活動として、凍土および周氷河地形変動の観測手法の標準化と地球規模観測網の構築を推進してきた。観測網は各国の凍土・周氷河研究者の協力を得て、北極圏、欧州アルプス、内陸アジア、南極等へ拡大を続けている。

(3) 2007年より、「周氷河プロセスと気候変動」研究グループでは、これまでの国際共同研究をさらに発展させ、世界各地の周氷河環境での観測と、現在および過去の周氷河環境に関する詳細な資料に基づき、「周氷河気候指標の国際標準の策定」を目標とする国際プロジェクトを立ち上げた。本研究は、この計画の中核となる。

## 2. 研究の目的

周氷河現象の気候指標としての使用法を標準化、そして実用化するために、世界各地に展開する周氷河地形変動の観測網から収集するデータとモデル実験結果を総合し、物理的な根拠に基づく高精度の気候指標を策定する。具体的には、周氷河現象（現成、化石）の分布・規模・形態・構造に関するデータと、野外観測・室内実験から得られる周氷河現象の「動く時期や速度」と「動く条件（環境・地盤要因）」のデータを組み合わせて、各周氷河現象ごとに、分布条件（地温・地中水分等で表される臨界値）を数値化し、変動モデル[変動速度=f(地温・地中水分・地盤物質・地形)]を作成する。

## 3. 研究の方法

### (1) コア観測地域での観測・調査

高緯度連続永久凍土帯の北極圏スバルバル諸島の内陸部において、以下の観測システムの設置と地形・地盤調査を行った。**総合気象**：自動気象観測システムによる気温・湿

度・積雪深・降水量の観測。**岩盤の凍結破砕**：亀裂変位計による破壊の観測、温度・水分の観測。**岩石氷河**：傾斜計による凍土の変形、測量による地表変位、地温の観測。**活動層の変形**：構造土・ソリフラクション斜面・活動層すべりを対象にひずみ計・変位計による凍上・物質移動の観測、地表の変位測量と三次元形状の計測、地温・土壌水分の観測。**氷楔破壊**：変位計・衝撃センサ・温度センサによる凍土の熱収縮破壊の観測。**地下構造**：表層掘削と物理探査（比抵抗映像、電磁波）による各地形の内部構造調査。

### (2) 観測網の拡大と現地調査

周氷河現象の種類・規模・形状の空間的変化を把握し、気候指標モデルに組み込むために、スバルバルとは対照的な中緯度高山の永久凍土帯～季節凍土帯、高緯度の寒冷度・内陸度の異なる周氷河環境に拡大し、以下に示す観測拠点を設置し、同質のデータを取得した。**スイスアルプス**：総合気象、岩盤の凍結破砕、岩石氷河、活動層・季節凍土層の変形、地盤・地下構造探査。**日本（日本アルプス、富士山、大雪山）**：総合気象、岩盤の凍結破砕、季節凍土層の変形、地盤調査。**モンゴル**（永久凍土変動）、**アラスカ**（岩石氷河の変形）。

### (3) 現地データの解析・分析

① 観測データの解析：地表の三次元形状の図示、無人観測データに基づく地形変化の発生状況と環境要素の関連の分析、物理探査結果から地下構造の推定を行った。

② 試料分析：土壌試料を採取し、地中の含水・含水率分布、粒度分布を調べた。データロガーによる観測値と直接測定値との比較から、含水率の更正曲線を得た。

### (3) 模型実験による検討

汎用性の高いモデルを得るために、現地観測データの統計解析による数値モデルに、力学モデルを組み込む必要がある。このため、低温実験室を利用した岩石の凍結破砕、構造土の変位、インボリューションの形成に関する実験に基づき、地形変化の力学条件や臨界条件を定量化した。

### (4) 地形変化速度のモデル化

観測・実験データを総括し、各周氷河現象の形成条件（臨界値）、形成（発達）速度と変位様式を気候環境（凍土状態、地温、地中水分）、地盤条件、初期地形条件の関数としてモデル化を行った。これらのモデルに基づいて、周氷河現象ごとに、規模・形態と気候条件の定量的な関係を確立し、気候指標を策定した。

#### 4. 研究成果

(1)平成 20 年度：スイスおよび日本アルプスの構造土とソリフラクション地形、アラスカの岩石氷河、北極圏スバルバールの構造土・ソリフラクション地形・岩石氷河を対象に、地形変動と環境条件（地温・水分・積雪等）や地盤条件の観測と地形の規模・形態・分布・内部構造の詳細な調査・観測を実施した。また、研究プロジェクトの構想について、アラスカ大学での国際永久凍土学会シンポジウムでの講演において発表し、海外研究協力者と今後の研究の進行について討論した。

(2)平成 21 年度：対象地域を拡大し、昨年度の対象地域に加えて、富士山、北海道中央高地、アラスカ、モンゴルの永久凍土、各種構造土・周氷河斜面・岩石氷河を対象として、地形変動、環境条件、地盤条件の観測と地形の規模・形態・分布・内部構造の詳細な調査・観測を実施した。その結果、岩石氷河の変動速度と地温の関係、ソリフラクションと泥流の発生境界条件、氷楔破壊の発生温度等に関する新知見を含めて、各周氷河現象の分布条件が次第に明確になってきた。欧州地球科学連合総会とフランス・カーン大学での周氷河地形変動に関する国際シンポジウムにおいて、成果の一部を発表した。

(3)平成 22 年度：各研究対象地域において、凍土や各種周氷河地形を対象として、観測と調査を継続した。また、室内実験によりソリフラクション・ローブの発達条件を調べた。収集したデータに基づいて、凍土や各地形の分布・規模・変動速度と温度条件の関係について解析した。その結果、永久凍土の地温・水文条件、岩石氷河の変動速度と地温の関係、ソリフラクションの発生境界条件、氷楔破壊の発生温度等に基づいて、凍土と各周氷河現象の分布条件をモデル化した。研究成果は、第 3 回欧州永久凍土会議（ノルウェー）での招待講演で発表するとともに、野外巡検で観測の概要を紹介した。

(4)総括：現在の永久凍土や地形変動の動態に関して、従来にない、広範囲かつ詳細な観測データが得られた。モンスーンアジアの永久凍土分布条件は降雨の影響を受けやすいこと、暖冬でも氷楔が効果的に破壊しうること、極地型岩石氷河の変形機構が判明したのは予想外の収穫であった。研究成果に基づいて、各周氷河現象の発生条件を総括した結果、特に、ソリフラクションと氷楔に関しては、従来よりも汎用性の高い高精度の指標が得られた。岩石氷河、凍結破碎、構造土に関してもデータの集積と解析を進めており、指標の高精度化を進めている。

(5)成果公表：第 3 回欧州永久凍土会議の招待講演として研究代表者が本研究の主要部分を発表するとともに、同会議の野外巡検で松岡と海外研究協力者ハンネ・クリスチャンセン教授が共同で野外実験地を案内し、世界の多くの周氷河研究者に観測手法や現地調査結果を紹介した。また第四紀学の代表的国際誌「*Quaternary Research*」に本研究のエッセンスを論文として公表するとともに、多数の国際誌の論文として研究成果を公表した（項目 5 参照）。異なる気候条件下での比較研究に基づくさらに汎用性の高いモデル化をめざして、欧州の研究者と共同で国際的な周氷河観測ネットワークを立ち上げた（Delaloye et al., 2008; Harris et al., 2009）。

#### 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 24 件）

- ①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, 印刷中. 査読有.
- ②岩花 剛・池田 敦・福井幸太郎・斉藤和之・末吉哲雄・原田鈺一郎・澤田結基 (2011). 富士山頂における 3 m 深地温測定 (2008–2010 年). 雪氷, 73, 119–131. 査読有.
- ③ Matsuoka, N. (2011). Climate and material controls on periglacial processes: Toward improving periglacial climate indicators. *Quaternary Research*, 75, 356–365. 査読有.
- ④ Matsuoka, N. (2010). Solifluction and mudflow on a limestone periglacial slope in the Swiss Alps: 14 years of monitoring. *Permafrost and Periglacial Processes*, 21, 219–240. 査読有.
- ⑤池田 敦・岩花 剛 (2010). 富士山頂の凍土融解過程の検討—永久凍土の長期変動に関する予察的研究—. 地学雑誌, 119, 917–923. 査読無.
- ⑥ Nishii, R. and Matsuoka, N. (2010). Monitoring rapid head scarp movement in an alpine rockslide. *Engineering Geology*, 115, 49–57. 査読有.
- ⑦Harris, C., Arenson, L.U., Christiansen, H.H., Etzelmüller, B., Frauenfelder, R., Gruber, S., Haeberli, W., Hauck, C., Hoelzle, M., Humlum, O., Isaksen, K., Kääb, A., Kern-Lütschg, M.A., Lehning, M., Matsuoka, N., Murton, J.B., Noetzli, J., Phillips, M., Ross, N., Seppälä, M., Springman, S.M. and Vonder Mühll, D. (2009). Permafrost and climate in

- Europe: Monitoring and modelling thermal, geomorphological and geotechnical responses. *Earth-Science Reviews*, 92, 117-171. 査読有.
- ⑧ Matsuoka, N., Ikeda, A., Sueyoshi, T. and Ishii, T. (2009). Permafrost and hydrology in the source area of the Yellow River. *Bulletin of the Geological Survey of Japan*, 60(1-2), 39-57. 査読無.
- ⑨ Hayakawa, Y.S. and Ikeda, A. (2009). Accuracy assessment of a topographic mapping method with laser range finder and differential global positioning system: A case study for a rock glacier in the Swiss Alps. *Transactions, Japanese Geomorphological Union*, 30, 29-38. 査読有.
- ⑩ Ikeda, A., Matsuoka, N. and Käab, A. (2008). Fast deformation of perennially frozen debris in a warm rock-glacier in the Swiss Alps: An effect of liquid water. *Journal of Geophysical Research*, 113, F01021. 査読有.
- ⑪ Matsuoka, N. and Murton, J. (2008). Frost weathering: Recent advances and future directions. *Permafrost and Periglacial Processes*, 19, 195-210. 査読有.
- ⑫ Matsuoka, N. (2008). Frost weathering and rockwall erosion in the eastern Swiss Alps: Long-term (1994-2006) observations. *Geomorphology*, 99, 353-368. 査読有.
- ⑬ Matsuoka, N. and Christiansen, H.H. (2008). Ice-wedge polygon dynamics in Svalbard: High resolution monitoring by multiple techniques. In: Kane, D.L. and Hinkel, K.M. (eds.), *Proceedings of Ninth International Conference on Permafrost*, 2, University of Alaska Fairbanks, 1149-1154. 査読有.
- ⑭ Ikeda, A. and Yoshikawa, K. (2008). Topographical controls on the distribution and size of rock glaciers in the central Brooks Range, Alaska. In Kane, D.L. and Hinkel, K.M. (eds.), *Proceedings of Ninth International Conference on Permafrost*, 1, University of Alaska Fairbanks, 767-772. 査読有.
- ⑮ Delaloye, R., Perruchoud, E., Avian, E., Kaufmann, V., Bodin, X., Hausmann, H., Ikeda, A., Käab, A., Kellerer-Pirklbauer, A., Krainer, K., Lambiel, C., Mihajlovic, D., Staub, B., Roer, I. and Thibert, E. (2008). Recent interannual variations of rock glacier creep in the European Alps. In Kane, D.L. and Hinkel, K.M. (eds.), *Proceedings of Ninth International Conference on Permafrost*, 1, University of Alaska Fairbanks, 343-348. 査読有.
- ⑯ Watanabe, T., Matsuoka, N., Christiansen, H.H. and Ikeda, A. (2008). Sounding ice and soil wedge structures with ground-penetrating radar. In: Kane, D.L. and Hinkel, K.M. (eds.), *Proceedings of Ninth International Conference on Permafrost*, 2, University of Alaska Fairbanks, 1933-1938. 査読有.
- ⑰ Nishii, R., Matsuoka, N. and Ikeda, A. (2008). Monitoring rock slope deformation following an alpine rock slide in the southern Japanese Alps. In *Proceedings of The First World Landslide Forum*, 18-21 November 2008, United Nations University, Tokyo, Japan, Parallel Session Volume, 435-438. 査読無.
- ⑱ Ishikawa, M., Iijima, Y., Zhang, Y., Kadota, T., Yabuki, H., Ohata, T., Dorjgotov, B. and Sharkhuu, N. (2008). Comparable energy balance measurements on the permafrost and immediately adjacent permafrost-free slopes at the southern boundary of Eurasian permafrost, Mongolia. *Proceedings of 9th International Conference on Permafrost*, University of Alaska, Fairbanks, 795-800. 査読有.
- ⑲ Iwahana, G., Sawada, Y., Ishikawa, M., Katamura, F., Sone, T., Sueyoshi, T. and Harada, K. (2008). Micrometeorological measurements on mountain permafrost in the Daisetsu Mountains, Hokkaido, Japan. *Proceedings of 9th International Conference on Permafrost*, University of Alaska, Fairbanks, 808-815. 査読有.
- ⑳ Zhang, Y., Ishikawa, M., Ohata T. and Oyunbaatar D. (2008). Sublimation from thin snow cover at the edge of the Eurasian cryosphere in Mongolia. *Hydrological Processes*, 22, 3564-3575. 査読有.

[学会発表] (計 37 件)

- ① 松岡憲知・渡邊達也：暖冬に激しく割れたアイスウェッジースバルパールの 2009～2010 年冬期の観測結果ー。日本地理学会 2011 年春季学術大会。明治大学，2011 年 3 月 30 日。ポスター発表。
- ② 池田 敦：周氷河地形研究の進展。日本地理学会 2011 年春季学術大会。明治大学，2011 年 3 月 30 日。口頭発表。
- ③ 池田 敦・岩花 剛・末吉哲雄・西井稜子・原田 敏一郎・新井秀典：富士山の永久凍土

- 調査—2年間の成果—。日本地理学会 2011 年春季学術大会。明治大学, 2011 年 3 月 30 日。ポスター発表。
- ④ 石川 守: モンゴル北部ダルハッド盆地の永久凍土環境。日本地理学会 2011 年春季学術大会。明治大学, 2011 年 3 月 29 日。口頭発表。
- ⑤ Matsuoka N., Christiansen H.H. and Watanabe T.: Monitoring permafrost and periglacial processes in Svalbard. 第 2 回北極研究国際シンポジウム (ISAR-2)。一橋記念会館 (東京), 2010 年 12 月 9 日。ポスター発表。
- ⑥ Ishikawa M.: Permafrost observatories over Mongolia. 第 2 回北極研究国際シンポジウム (ISAR-2)。一橋記念会館 (東京), 2010 年 12 月 9 日。ポスター発表。
- ⑦ Matsuoka N.: State of Periglacial Research at the End of IPY. 第 3 回ヨーロッパ永久凍土会議。ロングイヤーベン (ノルウェー), 2010 年 6 月 15 日。招待講演。
- ⑧ Matsuoka N., Ikeda A., Watanabe, T., Humlum, O., Christiansen, H.H. and Juliussen, H.: Thermal and Dynamic Characteristics of the Small Valley-Side Huset Rock Glacier in Longyeardalen, Svalbard. 第 3 回ヨーロッパ永久凍土会議。ロングイヤーベン (ノルウェー), 2010 年 6 月 14 日。ポスター発表。
- ⑨ Ishikawa M., Jambaljav Y., Avirmed D. Ohata T. and Sharkhuu N.: Permafrost dynamics over Mongolia: Initial results of new countrywide observatories. 国際極年オスロ科学会議。オスロ (ノルウェー), 2010 年 6 月 10 日。口頭発表。
- ⑩ 池田 敦: 岩石氷河の起源について—論争解決試案—。日本地理学会。法政大学, 2010 年 3 月 27 日。口頭発表。
- ⑪ 松岡憲知・原田 敏一郎: 世界の永久凍土の変動: 日本人研究者の成果。雪氷研究大会 2009 (企画セッション)。北海道大学, 2009 年 9 月 30 日。口頭発表。
- ⑫ 池田 敦: 富士山の永久凍土—わかっていることとわかっていないこと—。雪氷研究大会 2009 (企画セッション)。北海道大学, 2009 年 9 月 30 日。口頭発表。
- ⑬ Matsuoka N.: Combining visual and instrumental observations of periglacial soil movements. チャールズ・ハリス記念シンポジウム。カーン大学 (フランス), 2009 年 9 月 25 日。口頭発表。
- ⑭ Matsuoka N.: Dynamics of solifluction lobes in the Swiss Alps: A summary of 14-year monitoring. ヨーロッパ地球科学連合総会。ウィーン (オーストリア), 2009 年 4 月 21 日。口頭発表。
- ⑮ Ikeda A. and Yoshikawa, K.: Debris supply as a control on the development of rock glaciers in the central Brooks Range, Alaska. ヨーロッパ地球科学連合総会。ウィーン (オーストリア), 2009 年 4 月 21 日。口頭発表。
- ⑯ Ikeda A., Iwahana, G., Tamura, T., Fukui, K. and Watanabe, T.: Permafrost on Mt. Fuji: a project launched by young researchers. ヨーロッパ地球科学連合総会。ウィーン (オーストリア), 2009 年 4 月 21 日。ポスター発表。
- ⑰ 池田 敦・松岡憲知: 赤石山脈間ノ岳周辺の岩石氷河の発達期。日本地理学会。帝京大学, 2009 年 3 月 28 日。口頭発表。
- ⑱ 池田 敦: 山岳永久凍土モニタリング—温暖化する高山の地下でいま何が起こっているのか? 「信州フィールド科学賞」記念シンポジウム受賞記念講演。信州大学, 2008 年 11 月 8 日。招待講演。
- ⑲ Matsuoka N.: Climate and material controls on periglacial processes. ウォッシュバーン教授追悼ワークショップ「New Insights into Periglacial Processes, Landforms & Environments」。アラスカ大学 (アメリカ), 2008 年 7 月 4 日。口頭発表。
- ⑳ Matsuoka N. and Christiansen, H.H.: Ice-wedge polygon dynamics in Svalbard: High resolution monitoring by multiple techniques. 第 9 回国際永久凍土会議。アラスカ大学 (アメリカ), 2008 年 7 月 3 日。口頭発表。
- [図書] (計 6 件)
- ① 池田 敦・福井幸太郎 (2009). 現在の永久凍土環境と周氷河地形。日本第四紀学会 50 周年電子出版編集委員会編「デジタルブック 最新第四紀学」日本第四紀学会, CD-ROM. 査読無。
- ② 石川 守 (2009). モンゴル北部の永久凍土の変動と森林の衰退—気候変動と人為的影響を探る—。「温暖化と自然災害—世界の六つの現場から」古今書院, 109-128. 査読有。
- ③ Ikeda A. (2008). Reassessment of DC resistivity in rock glaciers by comparing with P-wave velocity: a case study in the Swiss Alps. In Hauck, C. and Kneisel, C. (eds.), Applied Geophysics in Periglacial Environments. Cambridge University Press, pp. 137-152. 査読有。
- ④ Ishikawa M. (2008). ERT imaging for frozen ground detection. In Hauck, C. and Kneisel, C. (eds.), Applied Geophysics in Periglacial Environments. Cambridge University Press, pp. 137-152. 査読有。

6. 研究組織

(1)研究代表者

松岡 憲知 (MATSUOKA NORIKAZU)  
筑波大学・大学院生命環境科学研究科・教授  
研究者番号：10209512

(2)研究分担者

石川 守 (ISHIKAWA MAMORU)  
北海道大学・大学院地球環境科学研究院・准教授  
研究者番号：50373452

池田 敦 (IKEDA ATSUSHI)  
筑波大学・大学院生命環境科学研究科・准教授  
研究者番号：60431657

(3)研究協力者

渡邊 達也 (WATANABE TATSUYA)  
筑波大学・大学院生命環境科学研究科・大学院生

吉川 謙二 (YOSHIKAWA KENJI)  
アラスカ大学フェアバンクス校 (米国)・水環境研究センター・教授

ハンネ・クリスチャンセン (HANNE CHRISTIANSEN)  
スバルバル大学 (ノルウェー)・北極地学研究室・教授

ジュリアン・マートン (JULIAN MURTON)  
サセックス大学 (英国)・地理学教室・教室主任