

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 5 日現在

機関番号：12102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24700943

研究課題名(和文) 富士山の永久凍土 その特性・分布・地形変化への影響

研究課題名(英文) Permafrost properties and its potential role for geomorphological change on Mt. Fuji

研究代表者

池田 敦 (IKEDA, Atsushi)

筑波大学・生命環境系・准教授

研究者番号：60431657

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：温暖湿潤な日本において富士山の永久凍土をモニタリングし、温暖化にともなうその変動と永久凍土の変化に伴う周辺環境の変化を明らかにしたく、研究を実施した。2012年から2014年まで山頂部の2カ所で永久凍土の連続観測に成功した。また、富士山の南北断面に設置した表層地温の観測結果から、富士山全体の表層地温分布をGISを用いて推定した。永久凍土の下限は北面で3050-3150 m、南面で3450-3600 mと推定できた。一方、山頂部でも永久凍土が存在しない場所が多いことも明らかになった。地盤の透水性がよいところでは、降雨による熱輸送が凍土を越年させないため、富士山の永久凍土分布は点在的となっていた。

研究成果の概要(英文)：We started a research project to understand permafrost on Mt. Fuji (3776 m asl.) in warm humid maritime Japan to monitor its change and to evaluate the impact from changes of climate and volcanic activity. From 2012, permafrost temperatures in two deep boreholes were successfully monitored until 2014. According to the measured relationships between the surface temperatures and altitudes both on the north- and south-facing slopes, the monitored ground surface temperatures were spatially extrapolated for whole area of Mt. Fuji using a GIS software. The potential lower boundary of permafrost lies at 3050-3150 m asl. on the north-facing slope and at 3450-3600 m asl. on the south-facing. Contrary to the assumption of the previous studies, permafrost absence was confirmed in another two shallow boreholes near the summit, where the highly permeable debris allows heat transportation by rain-water infiltration. This indicates quite irregular permafrost distribution on Mt. Fuji.

研究分野：地形学，雪氷学

キーワード：永久凍土 微気象 地形 気候変動 火山

1. 研究開始当初の背景

永久凍土とは年間を通じて融点以下にある地盤(堆積物だけでなく岩盤も含む)のことである。近年の温暖化に伴う永久凍土の昇温・融解と、それによって水循環、地形、生態系が変化しているかどうかが国際的に注目されている。

国内随一の寒冷環境(年平均気温が -6°C 前後)である富士山山頂部において、永久凍土が存在することが知られたのはそれほど古くなく、その発見は、中緯度・活火山という発見の「場」の特殊性が評価され 1971 年に Nature に掲載された。同時に当時の研究水準における永久凍土環境の詳細な検討がなされた。しかし、その後、研究は進展せず、永久凍土研究の現在の水準に照らせば、富士山の永久凍土、とくにその分布に関しては未解明だったと言ってよい。そこで 2008 年から研究代表者が中心になって国内の若手凍土研究者と富士山の永久凍土環境を解明するための研究を開始した。深さ 3 m の観測孔 2 本と 20 地点における表層部($<1.2\text{ m}$)の地温の通年観測、物理探査、地温の高度変化の数値実験(感度実験)を行い、さらに 2010 年 8 月には深さ 10 m の地温観測孔(H サイト)の掘削に成功した。風衝地の溶結凝灰岩内 10 m 深の地温は -3°C 前後とかなり低温であり、その凍土は(火山活動に大きな変化がないかぎり)長期的に維持されることが確実視されたのに対し、近傍の風衝地あるいは風背地の砂礫層の 3 m 観測孔では、秋季に全層が融点を上回り、その地点に永久凍土が存在しないことが示唆されている。このような極端な地温分布をもたらす富士山の凍土環境は、世界的にみて非常に特徴的で、そのことに関連させて富士山において研究を進める意義が大きく深まった。

2. 研究の目的

(A) 富士山の永久凍土分布を、気温・日射(斜面方位・傾斜と積雪分布で異なる)・地盤物性の空間的差異から推定する。

(B) 富士山における凍結風化による崩壊地の拡大プロセスを明らかにし、温暖化による凍結融解状況の変化によって崩壊地がより不安定化するかどうかを考察する。

3. 研究の方法

富士山の凍結現象、とくに(A)永久凍土分布と(B)永久凍土環境下の崩壊地拡大を評価するために、2年間(2冬3夏)、地温と多岐にわたる気象・地質・地形要素を観測し、各要素間の関係式を作成するとともに、GISを用いて空間的に拡張する。そのためにフィールドでは、データロガーを用いた地温と関連する気象要素の通年観測、走査型レーザー測量器を用いた繰り返し測量(地形変化観測)、ERTを用いた凍土分布の調査を行う。また、地温観測孔(I サイト)の新設も行った。

4. 研究成果

(1) 地温の推移

永久凍土の地温変動を示すデータについては、H サイトの3年間分(観測初年度はデータ取れず)とIサイトの2年間分のものが得られた。また、その他のデータも概ね無事に回収することができ、2~6年間の観測データから、年々変動が大きいものの各観測地点の特性に変化はないことが確認できた。H・Iサイトの年平均地表面温度は、年平均気温より2ほど高く、いずれも -4.5°C 前後であった。季節的な融解層(活動層)の厚さは、H サイトが約1 m、Iサイトが0.7 mであり、後者の非常に薄い活動層は特徴的である。3.5 m 深の地温は、H サイトでは約 -3°C 、Iサイトでは約 -2.5°C であり、いずれの地点も表層に大きな地温勾配をもつことが明らかになった。活動層は凍結時と融解時で熱伝導率が異なるため、高緯度では一般に地表面より活動層内の年平均地温が低くなる(サーマルオフセットという)。しかし、富士山ではサーマルオフセットをキャンセルする働き(後述)が生じており、活動層の地温勾配が大きかった。

一方、H・Iサイトと同じく風衝地にある3 m 深観測孔(K サイト)では、2008 年以降、秋季に必ず全層が融点を上回った。すでに論文等で報告したとおり、9~10月の大雨(台風等)に伴って深部で地温が急激に上昇することが観測され、年によっては地温が 0°C を大きく上回ることから、その地点には永久凍土が存在しないと考えられた。風背地にあり積雪が吹きだまる3 m 深観測孔(T サイト)では、冬季の冷却が進まず、永久凍土が存在しないと予想された。

(2) 地盤の特性

地温観測孔の周囲で原位置透水試験を行った結果、Tサイトの砂礫は著しく透水性が高く、細粒物で充填されたIサイト表層の透水性は他地点に比べ低いことが判明した。両者の中間の値を示したH・Kサイトでは、Hサイトの透水性がやや低かった。また、地表面に置いた雨量計のデータ比較によって、風当たりの強いHサイトにおいては、地表に到達する雨量がKサイトの $2/3$ であることも明らかになった。富士山では、降雨のもたらす熱によって表層の地温が押し上げられており、K・Tサイトのように降雨が多く浸透するところで永久凍土の発達が妨げられていた。

Hサイト周辺の深さ20 mまでの電気探査結果(比抵抗分布)から、地下構造の異方性は水平距離50 m以内でも著しく大きいことが判明した。そのことは、富士山頂ではあいにく地表面の形態・構成物の類似性によって地下構造を類推できないこと、つまり永久凍土の平面分布の推定が難しいことを意味していた。

(3) 永久凍土分布

北斜面 10 地点、南斜面 5 地点の風衝地の地温データは、各方位において地表面温度の高度遞減率が気温の遞減率と概ね等しいことを示した。また、南斜面と北斜面の地表面温度を比較すると、同一標高の年平均地表面温度が北斜面で -2.5℃ 低かった。その温度差は日射量の差に起因すると考えられ、地表面の方位と傾斜から日射量の年間ポテンシャルを計算することで、積雪がほとんど無視できる場合の地表面温度の空間分布は推定できた(図1)。また、風背地は山頂直下でも永久凍土の存在に適さないと見込まれ、非永久凍土分布域に区分けが可能であった。その理由として、T サイトを含む風背地 3 地点のいずれにおいても、初夏には相対的に遅くまで残る積雪によって地温上昇が抑制されていたが、冬季の積雪によって地温低下がそれ以上に抑制されていたことが挙げられる。つまり、風背地となる北東向きから東向きの斜面と、吹きだまりとなる顕著な凹状地には、おそらく標高によらず永久凍土がほぼ存在しない。

風衝地の地温分布の計算結果によると、0.5 m 深の年平均値が 0℃ を下回る標高が、北斜面において 3100 m にあり、対応する年平均地表面温度 -1 ~ -2℃ の場所が永久凍土帯下限のひとつの目安になると考えられた(富士山のように、地表付近の温度勾配が深部に向かって正の場合、浅層の年平均地温が 0℃ を上回る場所に永久凍土が存在する可能性は低い)。南斜面ではその温度帯が標高 3450 ~ 3600 m にある。また、永久凍土帯の下限は、降雨の下方浸透が生じにくい(=昇温しにくい)地盤で構成されるはずであり、その下限の変動は気温変動に線形に応答すると予想される。測候所の気温記録から算出される積算暖度(夏季融解深の指標)は、1966~1997 年が 480 ± 60 days (平均値 ± 1) であったが、1998~2012 年の最近 15 年間は 580 ± 50 days となり、90 年代後半を境に顕著な

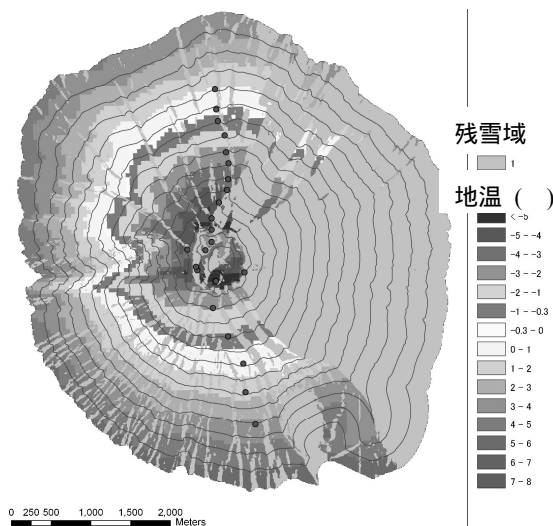


図1 残雪分布と無積雪部の地温分布

標高 2400 m 以上を图示。等高線間隔 100 m。

温暖化を示している。同じ期間の年平均気温の平均値を比較すると 0.7℃ の昇温であり、それによって永久凍土帯下限は標高差 100 m 程度上昇する(現在,上昇中)と見込まれた。

(4) 地形変化

詳細な測量を 2012 年と 2014 年に実施し、山頂火口壁や周辺の亀裂に大きな地形変化はなかった。ただし、データの詳細な検討は今後の課題である。

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 1 件)

池田 敦, 岩花 剛, 末吉 哲雄, 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, 査読有, Vol. 121, 2012, 306-331.

<http://doi.org/10.5026/jgeography.121.306>

[学会発表](計 7 件)

Ikeda, A.: Permafrost monitoring on the summit of Mt. Fuji, Japan. Final Symposium on the Evolution of Mountain Permafrost in Switzerland, Sion, Switzerland, 2015.2.4.

Ikeda, A., Iwahana, G. and Sueyoshi, T.: Permafrost mapping and monitoring on Mt. Fuji, Japan. Fourth European Conference on Permafrost, Evora, Portugal, 2014.6.21.

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(千葉県千葉市), 2013.5.24.

池田 敦・岩花 剛・末吉哲雄・西井稜子・Mironov, Vasiliy A.: 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, 立正大学(埼玉県熊谷市), 2013.3.29.

池田 敦・岩花 剛・福井幸太郎・末吉哲雄・斉藤和之・原田鉦一郎・澤田結基: 富士山頂の凍土観測(2010~2012 年), 雪氷研究大会(2012・福山), 福山市立大学(広島県福山市), 2012.9.26.

Iwahana, G., Ikeda, A., Fukui, K. and Sueyoshi, T.: Investigation of permafrost on the summit area of Mt. Fuji. Tenth International Conference of Permafrost, Salekhard, Russia,

2012.6.27.

池田 敦・岩花 剛・末吉哲雄・福井幸太郎・斉藤和之・原田鉦一郎・澤田結基：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（千葉県千葉市），2012.5.20.

〔図書〕（計 1 件）

池田 敦，岩花 剛，永久凍土の直接観測，土器屋由紀子・佐々木一哉 編「よみがえる富士山測候所 2005～2011」，成山堂書店，2012，152-153.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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