凍結・融解サイクルによる地表面物質移動の実験的研究

瀬 戸 真 之* 須 江 彬 人** 澤 田 結 基*** 曽 根 敏 雄**** 田 村 俊 和*

キーワード: 凍結融解サイクル、物質移動プロセス、地温、土壌水分

ともに考察の一部についても言及する。

1. はじめに

森林限界を超える高山の斜面では、凍結・融解プロセスによる物質移動プロセスについて、国内に限っても、これまで多くの報告があった(岩田、1980;檜垣、1990;鈴木、1992;苅谷ほか、1997;福井・小泉、2001;高橋・長谷川、2003など)。

一方、森林限界以下の低標高の山地斜面では周氷河性 物質移動が十分に起こりうるポテンシャルを持ちつつも、 植生によって地表が覆われているために通常は周氷河性 の物質移動プロセスが活発に起こることは少ない。しか しながら、澤口 (1987) が北上山地で報告したように、 低標高の斜面であっても何らかの原因で植生が失われて 地表面が裸地化し、周氷河性物質移動が起きることがあ る。また、郡山・猪苗代両盆地の分水界に位置する御霊 櫃峠 (海抜約900m) には尾根上に裸地が広がり、そこ には一種の構造土が発達している (鈴木ほか1985)。こ れまで、その微地形・構成物質や地表面物質移動の特徴 については田村ほか (2004)、瀬戸ほか (2005)、Seto et. al. (2006)、瀬戸ほか (2008) が報告している。こ のような斜面では森林限界を超える斜面と同様な凍結・ 融解に起因する物質移動プロセスが発現し、高山とよく 似た景観を呈するようになる。

しかしながら、標高が低いこともあり、非周氷河作用による物質移動も無視できない。すなわち、周氷河作用と非周氷河作用の両作用が複合して斜面上の物質移動を引き起こすという、他の高度帯とは異なる特徴を持った物質移動プロセスの発現が期待できる。そこで本研究では、実験斜面に礫を置いて凍結融解を繰り返し、どのようなプロセスで礫が移動しているのを明らかにする。本報告では全ての実験結果を報告して今後の資料にすると

2. 実験方法

実験は北海道大学低温科学研究所の実験室で行った。 この実験室は気温をコントロールすることで、地表面の 凍結・融解を再現することができる。2007年~2009年に Ex1から Ex23の実験を行った。なお、Ex1は試験的 に箱を凍らせるだけにとどめたため、実験結果からは除 外した。実験は発砲スチロール製の箱に厚さ約10cm の 土壌を入れた Box A と Box B を用意した。傾斜は10度 から15度とし、御霊櫃峠の砂礫地で採取した長径15cm、 厚さ2cm程度の扁平礫を1つの箱につき、3個から8 個置いた (写真1)。各礫の表面には×印を2カ所付け、 この交点の座標を計測した。礫の位置測定には専用定規 とノギスを用いた。この方法では、測定者が慣れれば± 1 mm 程度の精度で測定できると考えられる。 さらに 実験斜面の土層中には - 1 、 - 3 、 - 5 、 - 8 cm にそ れぞれ地温センサーを設置し、 - 2 、 - 5 、 - 8 cm 深 に土壌水分計を設置した。箱の傾斜、土壌水分、室温の 変化については実験ごとに設定した (表1、表2)。

凍結・融解サイクルおよび計測は次の手順で行った。まず、箱の中での水分の偏りを防ぐため、傾斜なしで凍結させた。次に礫の上に置いた×印の上にある座標を計測した。凍結後、箱を傾斜して融解させた。この際、実験によっては雪で表面を礫が見えなくなるくらいの厚さで覆った。雪には低温科学研究所に用意されているザラメ状の氷を用いた。融解後、礫の上の座標を再計測して移動量を算出した。礫の座標は Box の傾斜方向を Y、傾斜方向に直交する方向を X とした。この時、 Box の上端を Y軸の 0、右端を X軸の 0 とした。また、深さ方

^{*} 立正大学地球環境科学部

^{**} 立正大学大学院地球環境科学研究科大学院生

^{***} 産業総合技術研究所地質標本館

^{****} 北海道大学低温科学研究所



写真 1 Ex18での Box B

表 1 Box Aの実験条件

実験 No	設定温度()	傾斜(度)	水分供給(cc)	雪(g)
2	- 5	15	霧吹き	0
3	- 10	15	霧吹き	0
4	- 5	15	霧吹き	0
5	- 5	15	霧吹き	0
6	- 5	15	霧吹き	0
7	- 10	0	霧吹き	0
8	- 10	15	霧吹き	0
9	- 10	15	1800	0
10	- 10	15	0	0
11	- 10	15	1000	0
12	- 10	15	0	0
13	- 10	15	1200	0
14	- 10	15	400	不明
15	- 15	10	1800	0
16	- 25	10	1900	0
17	- 25	10	0	0
18	- 25	10	900	0
19	- 25	10	1000	0
20	- 25	10	1050	0
21	- 25	10	1900	0
22	- 25	10	650	0
23	- 25	10	0	0

向には Box の縁の部分から礫表面までの距離をはかり、この値を Z とした。 Y 軸の値は Ex 2 から Ex 6 までは 斜距離を計測し、Ex 7 から Ex23までは直線距離を計測した。これは実際の斜面では傾斜が一様ではないため、筆者らのこれまでの研究(瀬戸ほか、2005; Seto et al., 2006) で直線距離を計測しているためである。

3. 実験結果

実験では霜柱が形成され、実験斜面が凍上した。凍結時には礫は霜柱によって持ち上げられた。融解時には斜面下方へ移動した。実験によっては礫が回転したり、斜面上方へ移動した(図1~図27)。

実験における座標の動き方はかなり複雑である。多くの座標は霜柱クリープの動きを反映して、鉛直方向へ持ち上がった後、沈下しつつ斜面下方に移動した(図7、図13、図22など)。しかしながら、このような動きを見せない座標も多く見られ、それは以下の5パターンに大別される。

(1) 鉛直方向に沈下しつつ、斜面下方へ移動 (図1、 図2、図3、図6B)

表 2 Box Bの実験条件

実験 No	設定温度()	傾斜(度)	水分供給(cc)	雪(g)
2	- 5	15	霧吹き	0
3	- 10	10	霧吹き	0
4	- 5	10	霧吹き	0
5	- 5	10	霧吹き	0
6	- 5	10	霧吹き	0
7	- 10	0	霧吹き	0
8	- 10	15	霧吹き	0
9	- 10	15	1800	0
10	- 10	15	0	0
11	- 10	15	1000	0
12	- 10	15	0	0
13	- 10	15	1200	0
14	- 10	15	400	不明
15	- 15	10	1800	0
16	- 25	10	800	1300
17	- 25	10	0	1800
18	- 25	10	250	2300
19	- 25	10	0	1200
20	- 25	10	100	0
21	- 25	10	950	1200
22	- 25	10	50	1200
23	- 25	10	0	2100

- (2) 鉛直方向に沈下したのち、持ち上がりつつ斜面下 方へ移動 (図 5 A の座標 AB7B)
- (3) 鉛直方向に持ち上がり、そのまま斜面下方へ移動 (図7Bの座標 AB2B)
- (4) 鉛直方向にのみ動き、水平方向には移動しない (図11)
- (5) 鉛直方向にも水平方向にも移動しない (図8D、 図8F)

また、計測ミスと思われるイレギュラーな動きもある (図 1 F の AB6R、図 3 A の CD5R)。

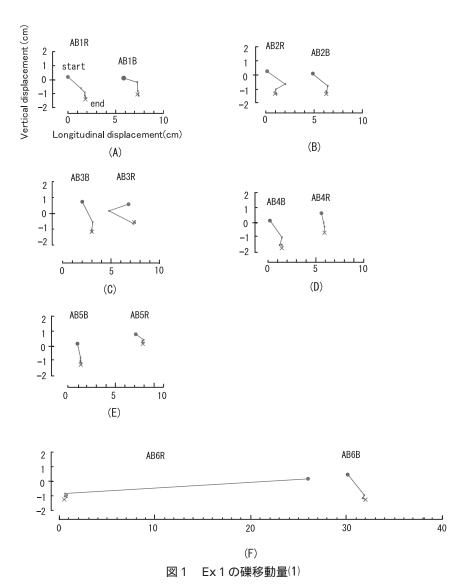
典型的な霜柱クリープの動きを見せた Ex 3 の実験結果を報告する (図 7)。Ex 3 では Box A を15度、Box B を10度傾斜させて実験斜面とし、室温を - 10 から + 5

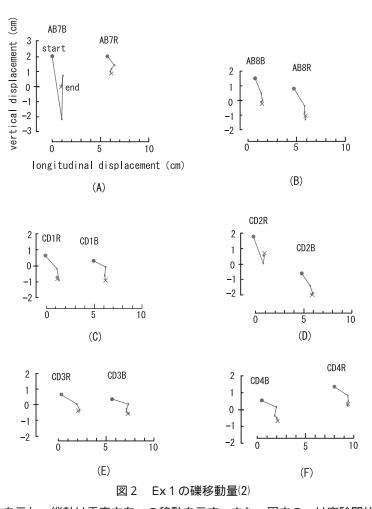
まで変化させて実験斜面の土壌試料を凍結融解させた。 実験斜面には径15cm 程度、厚さ2cm 程度の扁平礫を 4個置いた。凍結開始は2008年9月20日13時、融解開始 が2008年9月22日18時で、融解完了が2008年9月25日19 時である。実験斜面の凍上 (礫の垂直移動) は凍結開始 直後に始まり、9月21日頃ピークを迎えている。水平移 動量は凍上が終わり、霜柱が崩壊するときにピークを迎 えた。その時期は9月24日頃である。一方、地温の観測 結果は9月22日の夜に最低値を記録している。垂直移動 量の最大よりも水平移動量が最大になる時期が遅れるこ とからも、礫の移動は霜柱クリープによることが明らか である。Box A に置いた礫はZ方向1.0cm 持ち上がり、 Y方向へ1.1cm 移動した (図7A、図7B、図7C)。 Box Bの礫は平Z方向に0.7cm 持ち上がり、Y方向へ 0.1cm 移動した (図7D、図7E、図7F)。Box A と Box B の移動量の大きな差には、箱の傾斜のみならず、 箱Aでは霜柱が成長し凍上した一方で箱Bでは霜柱がほ とんど成長しなかったことが影響している。これには土 層中のアイスレンズの成長が関与していると考えられる。 同様のことは Ex3のみならず、実験全体で認められた。

ここでは主に Ex18について述べる。Ex18は実験室内 の温度を - 25 まで下げて A、B両方の実験斜面を凍結 させた後、それぞれ10 ℃傾斜をつけて融解させた。こ の際 Box A には900cc の水を供給した。Box B には250 cc の水を供給し、2300g の雪で斜面上を覆った。Box A と Box B の実験斜面には径15cm 程度、厚さ 2 cm 程度 の扁平礫をそれぞれ 3 個置いた。

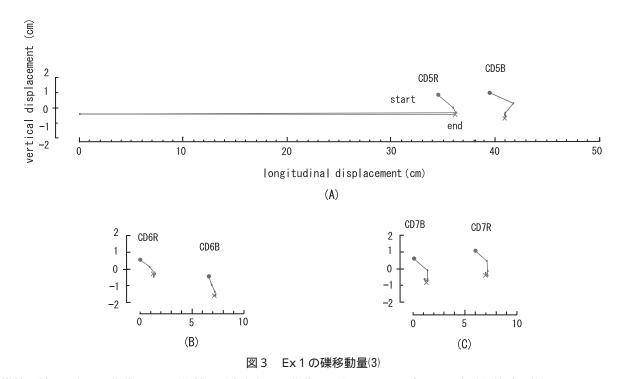
雪を載せなかった Box A の礫は Z 方向へ2.5cm 持ち上がり、 Y 方向へ0.8cm 移動した(図22A)。 Z の値が2.5cm なので10 °という傾斜から求められる Y 方向への移動は0.43cm であり、この実験ではその約1.9倍の移動量を観察した。一方、雪を載せた Box B の礫は Z 方向へ1.1cm 持ち上がり、 Y 方向へ1.2cm 移動した(図22E)。同じく計算上は0.19cm であるので、観察した移動量はその約6.3倍である。このように雪で斜面を覆ったときの方が雪を載せないときよりも、計算上の値に対して Y 方向へ大きな移動量が認められた。この結果は他の雪を載せた実験でも同様の結果が認められる。

また、実験ではY方向にマイナスの動きをする礫が認められた (図12B、図12C、図12Dほか多数)。すなわち、礫が斜面上方へ向かう動きである。この現象は、実験斜面上において礫と礫の隙間の地表に細粒物質がない部分が凍結によってマウンド状に盛り上がり、この盛り上がりに押されて礫が斜面上方へ動いたものである。実際の斜面においても同様のことは十分に起こりうると考えられる。

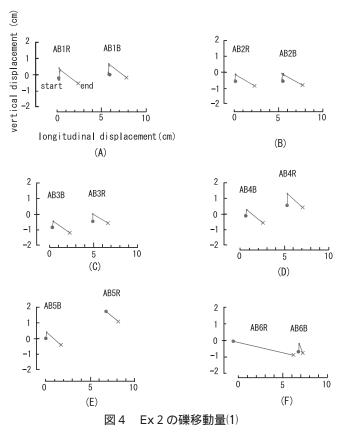


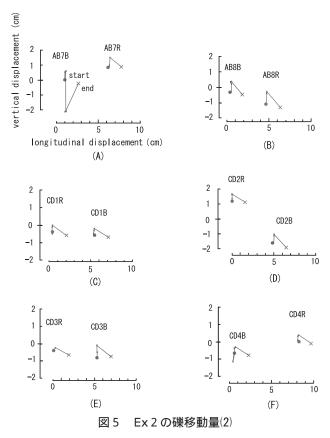


横軸は斜面下方への移動を示し、縦軸は垂直方向への移動を示す。また、図中のは実験開始時の位置を示し、 \times は実験終了後の位置を示す。(A)や(B)は個々の礫を示し、"AB1R"等の記号は礫の上に置かれた座標番号を示す。



横軸は斜面下方への移動を示し、縦軸は垂直方向への移動を示す。また、図中の は実験開始時の位置を示し、×は実験終了後の位置を示す。(A)や(B)は個々の礫を示し、"AB1R"等の記号は礫の上に置かれた座標番号を示す。





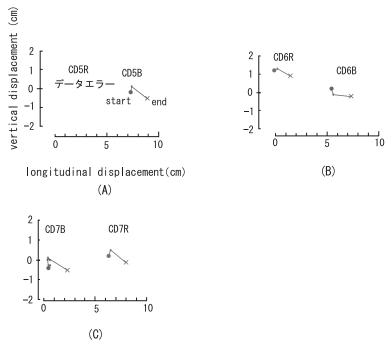
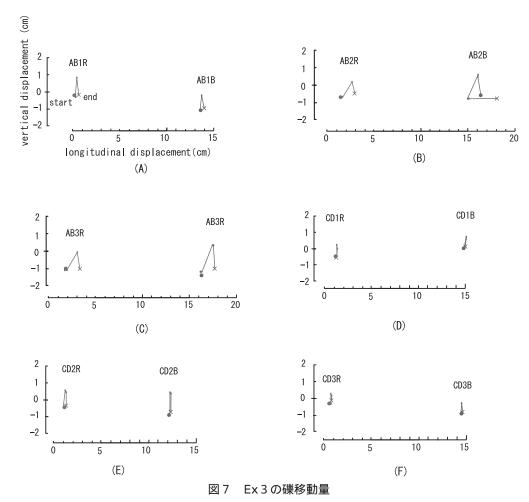
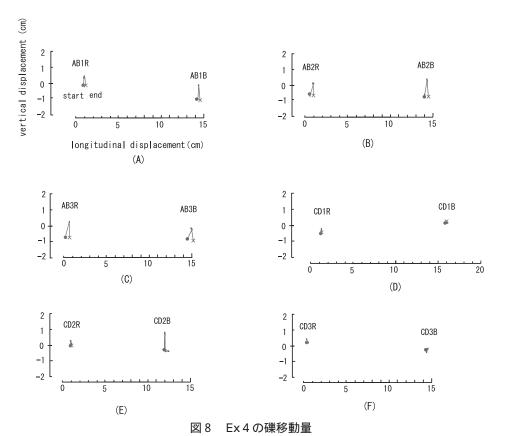


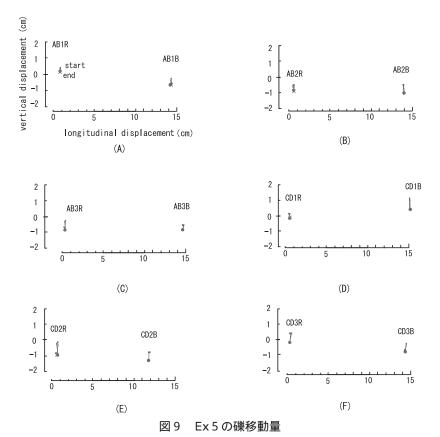
図 6 Ex 2 の礫移動量(3)



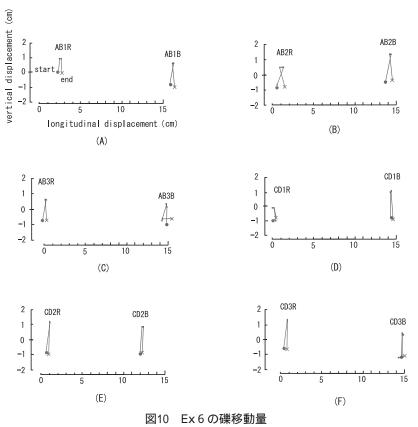
横軸は斜面下方への移動を示し、縦軸は垂直方向への移動を示す。また、図中の は実験開始時の位置を示し、×は実験終了後の位置を示す。(A)や(B)は個々の礫を示し、"AB1R"等の記号は礫の上に置かれた座標番号を示す。



横軸は斜面下方への移動を示し、縦軸は垂直方向への移動を示す。また、図中の は実験開始時の位置を示し、×は実験終了後の位置を示す。(A)や(B)は個々の礫を示し、"AB1R"等の記号は礫の上に置かれた座標番号を示す。



横軸は斜面下方への移動を示し、縦軸は垂直方向への移動を示す。また、図中の は実験開始時の位置を示し、×は実験終了後の位置を示す。(A)や(B)は個々の礫を示し、"AB1R"等の記号は礫の上に置かれた座標番号を示す。



横軸は斜面下方への移動を示し、縦軸は垂直方向への移動を示す。また、図中のは実験開始時の位置を示し、×は

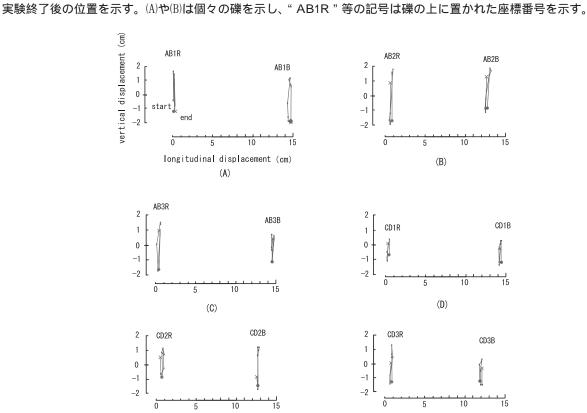
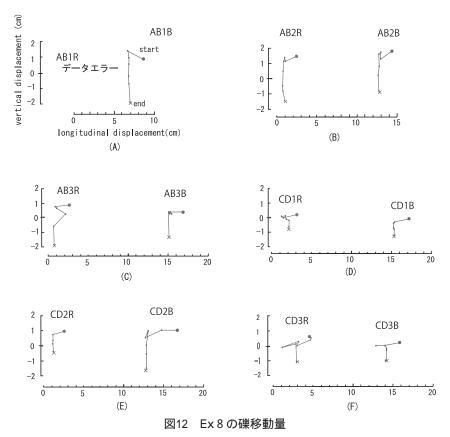
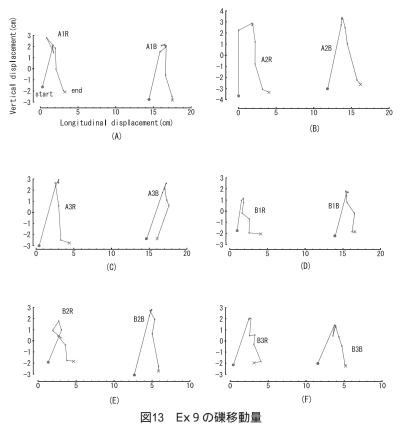


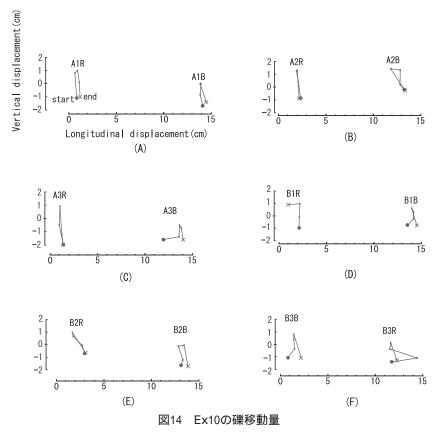
図11 Ex7の礫移動量 横軸は斜面下方への移動を示し、縦軸は垂直方向への移動を示す。また、図中の は実験開始時の位置を示し、×は 実験終了後の位置を示す。(A)や(B)は個々の礫を示し、"AB1R"等の記号は礫の上に置かれた座標番号を示す。

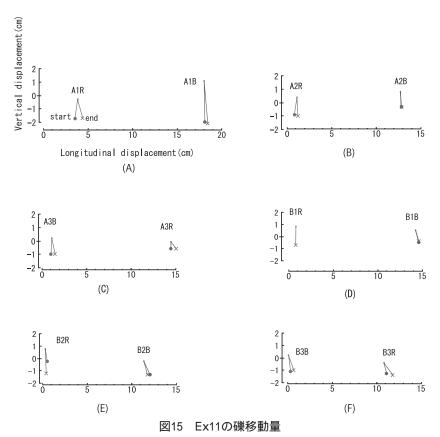
(E)

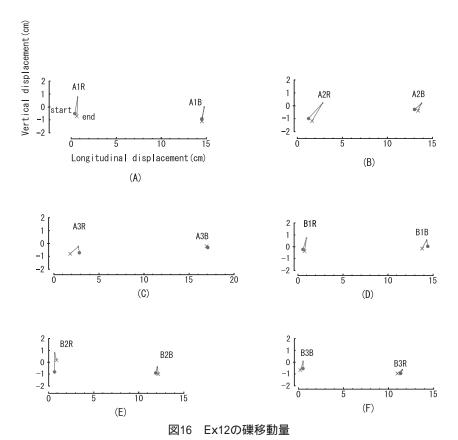
(F)



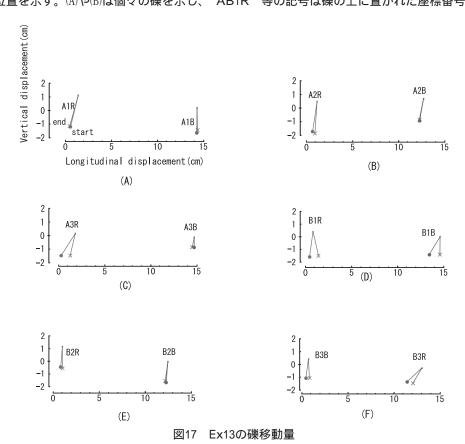




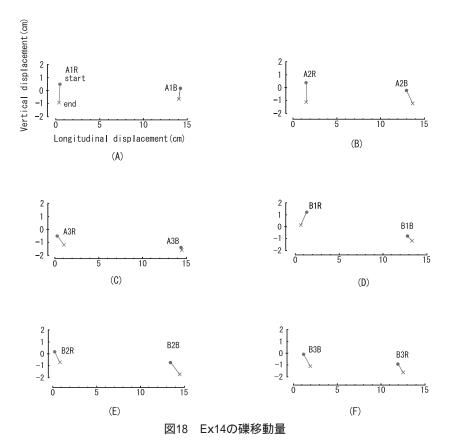


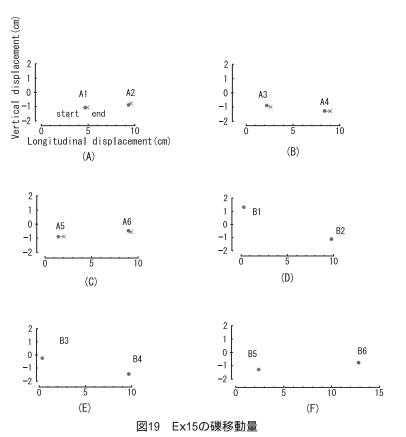


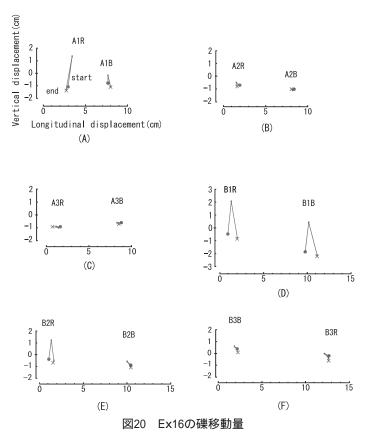
横軸は斜面下方への移動を示し、縦軸は垂直方向への移動を示す。また、図中の は実験開始時の位置を示し、×は実験終了後の位置を示す。(A)や(B)は個々の礫を示し、"AB1R"等の記号は礫の上に置かれた座標番号を示す。

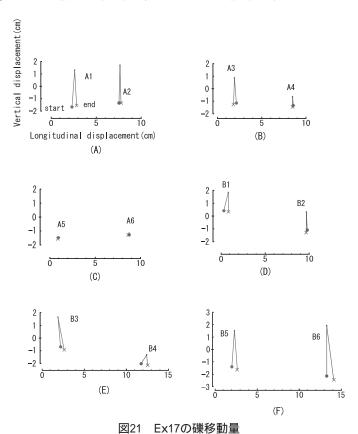


横軸は斜面下方への移動を示し、縦軸は垂直方向への移動を示す。また、図中のは実験開始時の位置を示し、×は実験終了後の位置を示す。(A)や(B)は個々の礫を示し、"AB1R"等の記号は礫の上に置かれた座標番号を示す。









横軸は斜面下方への移動を示し、縦軸は垂直方向への移動を示す。また、図中の は実験開始時の位置を示し、×は実験終了後の位置を示す。(A)や(B)は個々の礫を示し、"AB1R"等の記号は礫の上に置かれた座標番号を示す。

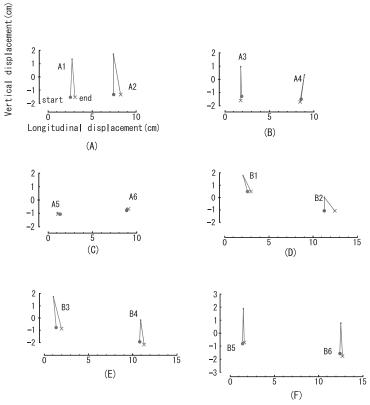
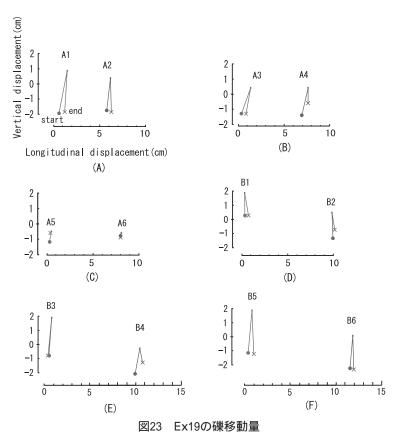
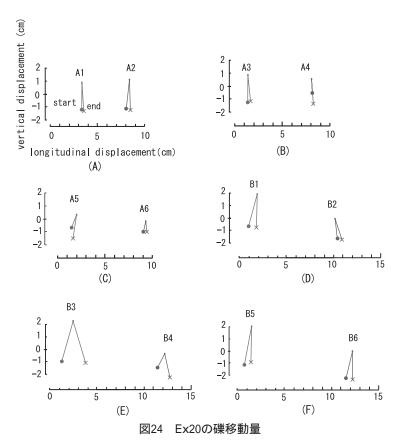
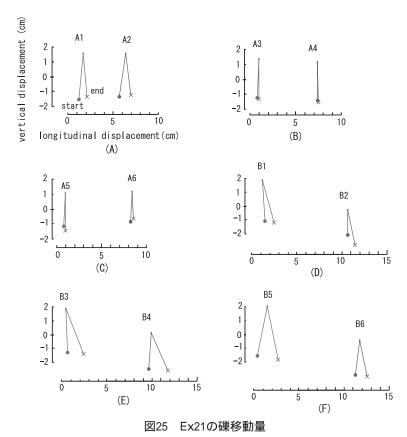


図22 Ex18の礫移動量

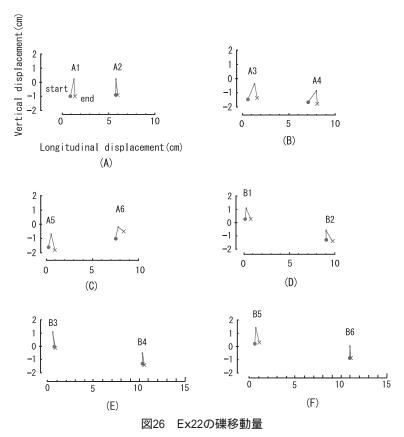


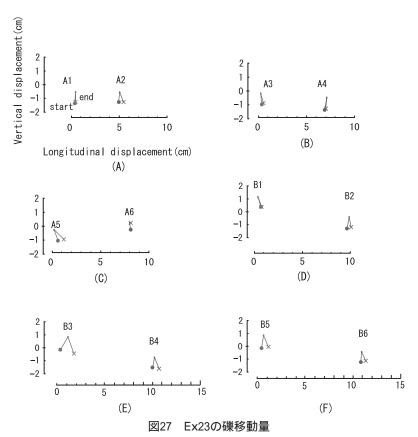
横軸は斜面下方への移動を示し、縦軸は垂直方向への移動を示す。また、図中の は実験開始時の位置を示し、×は実験終了後の位置を示す。(A)や(B)は個々の礫を示し、"AB1R"等の記号は礫の上に置かれた座標番号を示す。





横軸は斜面下方への移動を示し、縦軸は垂直方向への移動を示す。また、図中の は実験開始時の位置を示し、×は実験終了後の位置を示す。(A)や(B)は個々の礫を示し、"AB1R"等の記号は礫の上に置かれた座標番号を示す。





4. 考察

実験全体をとおし、Z方向への持ち上がり、すなわち 凍上量とY方向への移動、すなわち斜面下方への移動に は正の相関が認められた。Z方向への移動の大部分は霜 柱が礫を持ち上げていることによる。したがって、いわ ゆる霜柱クリープが実験斜面上で発生し、移動量の一部 は霜柱クリープによるものと考えて良い。

一方で傾斜と凍上量から算出される霜柱クリープによる礫の移動量よりも大きな移動量が観察された。したがって、実験斜面では霜柱クリープが認められるものの、礫の移動量はそれのみでは説明できないことが明らかである。この現象は特に実験斜面上に雪を載せた場合に顕著に認められる。このことから、融解時に雪から地表面へ水分が供給されることでマッドフローが発生し、これに礫が乗って動いていることが考えられる。この結果は御霊櫃峠において鈴木ほか(1985)が報告した観察と良く似ている。このことから、御霊櫃峠のような低標高の斜面では凍結・融解サイクルに起因する霜柱クリープのようなプロセスと、積雪の融解によるマッドフローなど地表面を流れる水が関与したプロセスとが複合して、礫を移動させていると考えられる。

また、霜柱クリープやマッドフローだけでは説明が難しい複雑な動きを見せた座標もあった。現在のところ、これらの動きを説明するプロセスは提唱されていない。 凍結融解環境下における斜面物質移動プロセスには土壌水分・傾斜・凍結あるいは融解の速度など、かなり多くのパラメータが関与していることが予想される。

5. まとめと今後の課題

実験結果から、霜柱クリープが礫の移動には重要な役割を果たしていることがあきらかになった。また、雪の有無が融解時の地表面の水分条件に大きく影響し、礫の移動量に大きく影響していることも明らかである。

現在の実験装置では土壌水分と地温のコントロールが難しい。実験室の温度調整が冷風を吹き出す構造になっているため、常に冷風にさらされる表面付近が水分が失われやすい。また、Box に水や雪を過度に供給すると土壌水分を下げるためにかなりの時間がかかる。限られた期間内で実験の回数を必要なだけ確保するためには、Box 内の水分量など、コンディションが悪い状況下でも実験を継続しなければならない。より良い実験結果を

得るためには土壌水分を適切にコントロールする方法を 開発する必要がある。

謝辞

本研究は「平成21年度北海道大学低温科学研究所一般共同研究」として助成を受けた。また、立正大学の環境変動・管理論研究室の皆様には作図にご協力いただいた。お礼申し上げます。

参考文献

- 福井幸多郎・小泉武栄 (2001): 木曽駒ヶ岳高山帯での風食ノッチの後退とパッチ状裸地の拡大. 地学雑誌, 110, 3,355-361
- 苅谷愛彦・佐々木明彦・鈴木啓助 (1997): 月山の強風砂礫斜面における通年気象観測と地形形成環境. 地理評, 70A, 676-692.
- 檜垣大助 (1990): 飯豊山地山稜部における斜面物質移動の観察. 東北地理, 42, 20-21.
- 岩田修二 (1980):白馬岳の砂礫斜面に働く地形形成作用. 地学雑誌、89、6、1-17.
- 瀬戸真之・石田 武・松本 太・宮下香織・田村俊和 (2005): 奥羽山脈南部, 御霊櫃峠の強風砂礫地における冬季の角礫移 動. 地理予, 68, 112.
- Seto Masayuki, Miyashita Kaori, Ishida Takeshi, Matsumoto Futoshi, Tamura Toshikazu (2006): Surface Stone Migration and Freeze-Thaw Cycles on a Low Mountain Peak in Northeastern Japan. Abstracts, International Joint Symposium Environmental Changes and Earth Surface Processes in Semi-arid and Temperate Areas, 80.
- 瀬戸真之・田村俊和・田村悠太・澤田結基・曽根敏雄 (2008): 凍結・融解プロセスによる地表面礫移動の実験的研究. 地球 環境変動の下でのモンスーン地域の流域環境管理に資する水 文地形学的基礎研究, 平成17~19年度日本学術振興会科学研 究費 補助金基盤研究 B 研究成果報告書, 69-97.
- 鈴木聡樹・平井昌行・高橋俊治・小疇 尚・清水長正・長谷川 裕彦 (1985):郡山西方・御霊櫃峠の周氷河現象. 地理予, 28,84-85.
- 鈴木郁夫 (1992): 谷川連峰の強風砂礫地における表面礫の移動. 地理評, 65A, 2, 75-91.
- 沢口 晋一 (1987), 北上山地山稜部の荒廃裸地における凍結・ 融解による斜面物質移動, 地理学評論 Ser. A, 60, 12, 795 -813
- 高橋伸幸・長谷川裕彦 (2003): 気温観測結果から推定される 北アルプス南部常念乗越の森林限界高度と周氷河環境. 地理 評、76、3、161-171
- 田村俊和・石田 武・西 克幸・瀬戸真之・栗下勝臣 (2004): 奥羽山脈南部, 御霊櫃峠にみられる植被階状礫縞の形態. 地 理予, 65, 202.

Laboratory Experiment of Surface Stone Displacement under Freeze-thaw Conditions

SETO Masayuki*, SUE Akihito**, SAWADA Yuki***, SONE Toshio****, TAMURA Toshikazu*

*Faculty of Geo-environmental Science, Rissho University

**Graduate Student of Geo-environmental Science, Rissho University

***Geological Museum, GSJ

****Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University

Abstract:

In order to clarify the processes of stone displacements occurred in wind-beaten bare ground which is very locally developed below the forest line, a series of experiments, Ex 1 to Ex23, was carried out under the controlled freeze-thaw cycles in a cold laboratory. Two boxes, Box A and Box B, were prepared. Both boxes were filled with soil 10 cm thick. Four flat and angular stones about 15 cm across with point marks were placed on soil surface of each box. Box A and Box B are inclined 15 degrees and 10 degrees, respectively. The results of Ex3 under cooling to -10 degrees Celsius during 5 hours followed by warming to +5 degrees Celsius during 73 hours showed that frost heaving was occurred and the maximum horizontal stone movement, 1.1 cm, was recorded when a needle ice collapsed. The frost heaving (vertical movement of gravels) of the experiment slope began immediately after a freeze start and maximum value was recorded in about 21 September. Frost heaving was end, and the maximum value of horizontal movement was recorded when a needle ice collapsed around 24 Sep. in the time. On the other hand, the ground temperature recorded the lowest at night of 22 Sep. The delay of time between the occurrence of maximum gravel movement and that of needle-ice development suggests that gravels were moved by frost creep which was caused by the needle ice. The average of frost heaving amount and that of gravel movement was 1.0cm and 1.1cm, respectively, at Box A, whereas 0.7cm and 0.1cm, respectively, at Box B. Both ice needles and ice lens were observed in the box in which frost heaving and movement occurred. Strong correlation was recognized between frost heaving amount and the maximum value of gravel movement. The difference of gravel movement at the two boxes seems to be caused by not only the slant of the box but also less-developed needle-ice and ice lens at Box B.

Keywords: Freeze-thaw cycles, processes of stone displacement, ground temperature, soil moisture