

滋賀県南部田上山地における凍結融解と土砂生産に関する観測

堤 大三・藤田正治・澤田豊明・伊藤元洋*・手島宏之**

*日本工営株式会社

**京都大学大学院工学研究科

要 旨

滋賀県南部に位置する田上山地の若女裸地谷の裸地斜面において、凍結融解と土砂生産現象の詳細な観測を行なった。観測期間は、2004 年 12 月から 2005 年 4 月までであり、その間に気温、地表面温度、基岩温度（深度 10, 25, 50 cm）を 10 分間隔で連続計測した。その結果、観測期間中に凍結融解が繰り返し起こり、基岩中の温度が 0℃ 以下となる凍結層は、少なくとも 10 cm の深度まで達することがわかった。また、この凍結融解作用によって土砂が活発に生産されることが確認された。さらに、基岩上の土砂被覆が凍結融解作用を緩和することが示唆された。

キーワード：土砂生産、凍結融解、田上山地、現地観測

1. はじめに

一般に土砂生産現象は、降雨や地震による斜面崩壊、火山噴火による降灰といった大規模かつ突発的なものと、凍結融解作用および湿潤乾燥作用による基岩の風化とそれに続く浸食という小規模ではあるが恒常的なものに大別される。ただし、降雨による斜面崩壊や侵食は既に生産された土砂が河道に流出する現象であり、厳密な意味での土砂生産現象とは異なる。それに対して、凍結融解による基岩の風化は、まさに土砂が生産される現象であり、我が国の山地斜面における支配的な土砂生産源のひとつである。このような土砂生産は、山地・河川・海岸とつながる流砂系の出発点であり、その量と質を評価し予測につなげることは、流域一貫した土砂管理を実践する上で必須の課題である。

これまで、凍結融解による土砂生産に関する観測例がいくつか報告されている。鈴木・福嶋（1989）は、滋賀県南部の田上山地における土砂生産量の長期観測から、裸地斜面における土砂生産量は毎年ほぼ同じであり、その値を 5,000～10,000 m³/km²/year と報告している。また、裸地斜面における土砂侵食量が毎年ほぼ一定量であるのは、冬期

の凍結融解に起因する土砂生産が毎年一定しているからであると述べている。澤田・芦田（1986）は、岐阜県高原川流域において、地質や勾配の異なる多くの裸地斜面からの土砂生産量を毎週 1 回の高い頻度で長期間にわたって計測しており、藤田ら（2005）は、その観測結果と降雨および凍結融解との関係について解析を行った。それによると土砂生産特性は季節によって異なり、冬期から春期にかけては凍結融解回数と、夏期から秋期にかけては時間雨量と高い相関が見られることから、冬期の凍結融解によって生産された土砂が夏期の降雨によって流出する土砂生産・流出プロセスが存在すると結論付けている。しかし、これらの研究では詳細な凍結融解現象の観測は行なわれておらず、また斜面からの侵食量を土砂生産量とみなしているため、凍結融解により基岩が粒状化するという土砂生産現象の実態までは迫っていない。それに対して奥西ら（2000）は、兵庫県南部、六甲山地の崩壊斜面において、凍結融解についての詳細な観測を試みているが、対象とする斜面において基岩と土壌の区別が明確ではなく、観測結果からは定性的な結論しか導き出していない。

本研究では、凍結融解による土砂生産現象の実態を明らかにし、そのメカニズムを解明することを目的として、滋

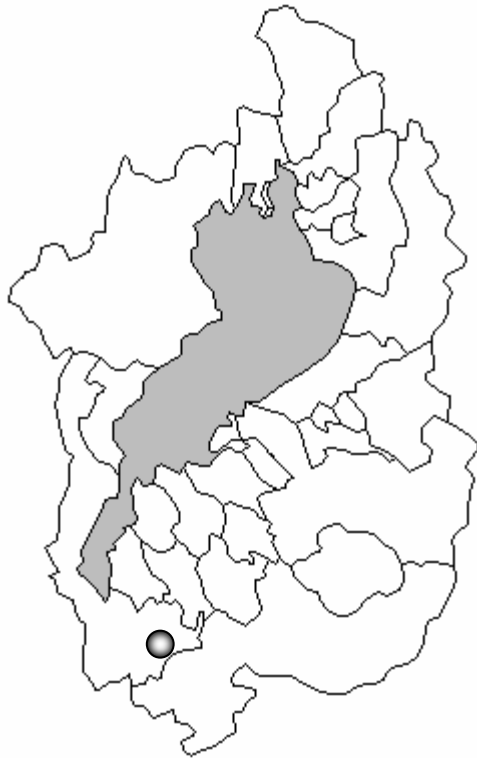


Fig. 1 Observation site in Tanakami Mountain, southern part of Shiga Prefecture

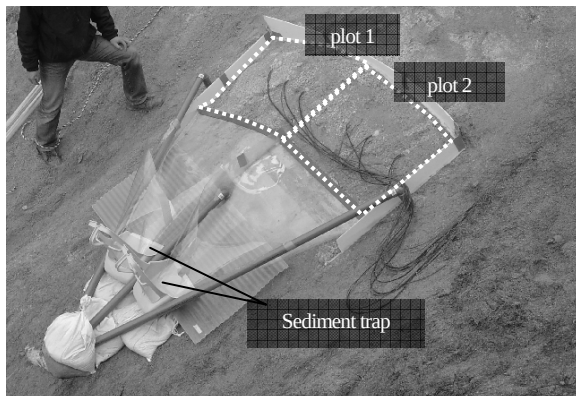


Fig. 2 Equipment for the observation on the bare slope

賀県南部、田上山地の裸地斜面において凍結融解と土砂生産に関する詳細な現地観測を行なった。

2. 観測地の概要

滋賀県南部の田上山地は (Fig. 1), 古くは風化花崗岩のはげ山として有名であり, 表土の侵食・流出を防止するため早くから砂防工事が行なわれた場所である。現在では, 多くの地点で植生が回復し, 表土の流出量も減少したといわれているが, いくつかの斜面は裸地状態のままで残存している。それらのひとつである若女裸地谷の北北西向きの

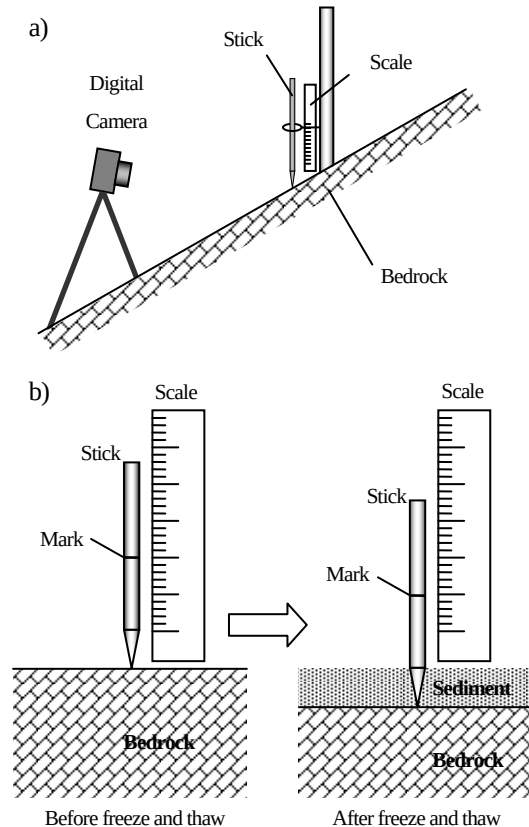


Fig. 3 a) Schematic of setup for short term observation, and b) method for monitoring thickness of sediment layer

斜面にて観測を行った。観測地周辺の植生としては, クロマツ, ヒメヤシバシ等が見られるが, 観測斜面は完全な裸地である。基岩は風化花崗岩から成り, 非常に脆く崩れやすいものの, 基岩と土層の間には明瞭な境界が見られる。斜面勾配は約 34° で, 風化花崗岩を母材とする非常に薄い土層 (5~10 cm) が基岩を覆っている。

3. 観測方法

観測は, 2004 年 12 月から 2005 年 4 月までの期間に実施した。ただし, それ以降も後述する温度観測等は継続して行なっている。観測の対象として, Fig. 2 に示すとおり, 裸地斜面の一部に小さな領域を設定した。観測領域の設定においては, 表層の土砂を取り除き, 基岩面を露出させた上で, 斜面方向に 0.6 m, 斜面横方向に 1.8 m の領域を仕切り板で囲い, 領域内外の土砂移動を遮断した。また, 斜面下流側に土砂トラップを設けて生産される土砂が流出することを防いでいる。この観測領域を左右に分割し, 斜面の上に向かって左側を plot 1, 右側を plot 2 とした。各 plot の面積はそれぞれ 0.56 m^2 である (Fig. 2)。両 plot には, 斜面垂直方向に 10, 25, 50 cm の穴をドリルで開けて熱電

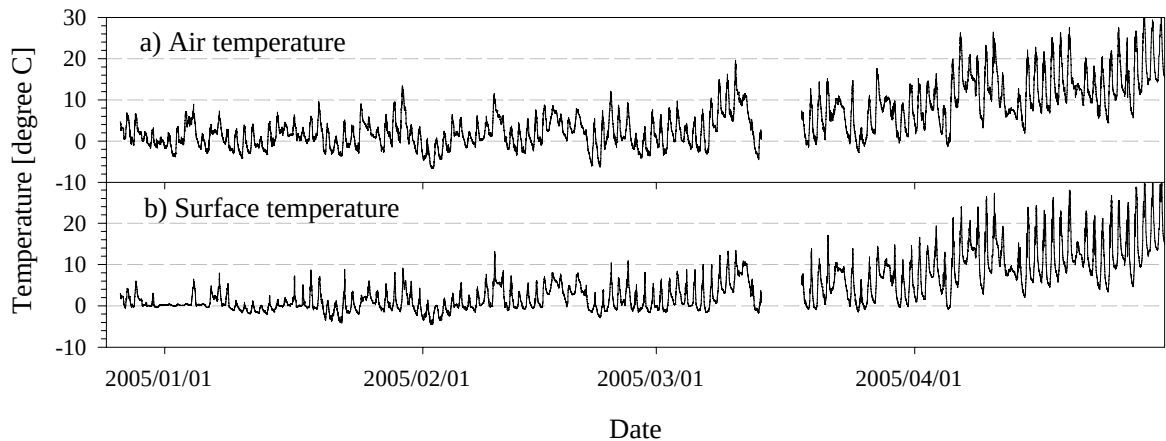


Fig. 4 Changes of air and surface temperature

対を埋設し、基岩内部の温度分布を 10 分間隔で計測した。同時に、気温と地表面温度も 10 分間隔で計測した。plot 1 においては、ほぼ 1 週間に 1 度の頻度で、生産された土砂を回収・計量した。土砂の回収にはプラスチック製の刷毛を用い、風化基岩の構造を破壊しないよう注意した。一方、plot 2 においては、生産された土砂を観測期間中はそのまま放置し、期間の終わりに（2005 年 4 月 17 日）全て回収・計量した。

観測期間中の 2005 年 2 月 11–13 日において、短期間の集中観測を行ない、凍結融解とそれに伴う土砂生産の実態を観察した。集中観測にはデジタルカメラを用い、15 分間隔のインターバル撮影を行った。また、重さ 83 g のアルミ製の杭をカメラの視野内に設置し、その移動量から生産土砂の層厚変化をモニターすることで、土砂生産速度を計測した。Fig. 3 に短期集中観測装置の概略図と土砂の層厚変化のモニタリングの仕組みを示す。

4. 観測結果

4.1 温度変化

気温と地表面温度の変化を Fig. 4 に示す。気温は日変動を繰り返す、3 月後半から徐々に上昇している。気温が氷点下となる期間は、観測開始の 2004 年 12 月下旬から 2005 年 4 月上旬までの約 4 ヶ月間にわたり、また期間中の最低気温も -6.8°C にまで達している。一方、地表面温度も気温と同様の変化を示し、4 月上旬（4 月 5 日）まで氷点下を記録している。これらのことから、観測地点においては冬期間中、断続的ではあるが凍結融解を起す気象条件が満たされているといえる。気温と地表面温度の違いとして、地表面温度は日変動の振幅が気温のそれより小さい。これは、地温が気温より高いこと、地盤の凍結融解による潜熱の影響で温度変化が緩和されること、斜面が北北西に向いていることでほとんど日射の影響を受けないことが原因であ

ると考えられる。また、2005 年 1 月初旬に、地表面温度がほぼ 0°C で一定値となる期間が見られるが、これは積雪により地表が被覆されたことによる影響と考えられる。

Fig. 5, 6 に plot 1, 2 それぞれの地中温度（深度 10, 25, 50 cm）の変化を示す。両 plot ともに、地表に近い位置ほど気温の日変動の影響を受けて大きく変動するが、深くなるにつれて変動幅が小さくなっている。また、深度が大きくなるほど温度は高く、深度 50 cm の温度は最低でも 2.5°C までしか下がっていない。それに対して、plot 1 の深度 10 cm では、2 月初旬に温度が氷点下になる期間が表れており、凍結層が少なくとも 10 cm の深さまで到達したことを示している。一方、plot 2 の深度 10 cm では温度が氷点下とはならず、凍結層は 10 cm よりも浅い範囲に限られている。plot 1 と 2 との違いは、生産土砂を定期的に排除するか、そのまま放置するかであり、plot 2 が plot 1 より浅い深度までしか凍結層が到達しないのは、放置された土砂が表層を被覆することで大気と基岩間の熱伝導を妨げているためであると考えられる。この土砂による被覆効果は、後に示す土砂生産量にも大きく影響を与えている。ただし、温度が 0°C となっても全ての間隙水が凍結するわけではなく、一定の割合で不凍水の状態で凍らない水が残存しているため、温度が 0°C となった範囲全てで土砂が生産されるという訳ではない。

4.2 土砂生産量

Fig. 7 に plot 1 において生産された土砂量の変化を示す。Fig. 4 と比較すると、気温および地表面温度が氷点下となる期間に土砂生産が活発に起こり、4 月になり気温および地表面温度が 0°C を下回らなくなると、土砂が生産されなくなることが示されている。このことから、明らかに基岩の凍結融解が土砂生産を規定していることが確認できる。この関係をさらに明確にするため、凍結融解作用を温度の指標で表し、土砂生産量との相関を検討した。Fig. 8 に、

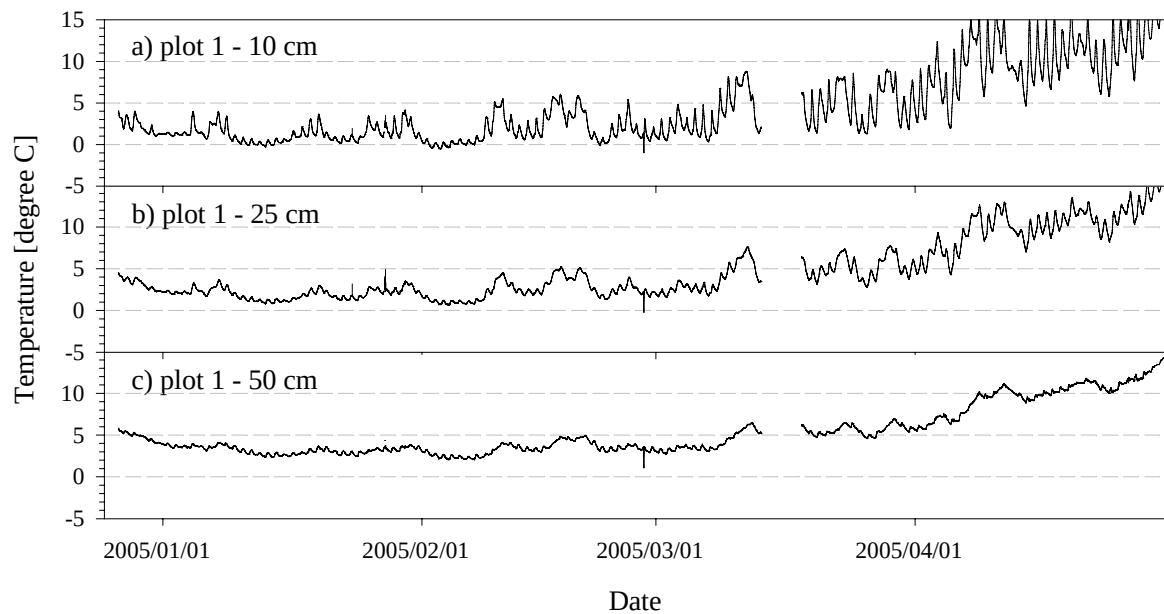


Fig. 5 Changes of subsurface temperature in plot 1

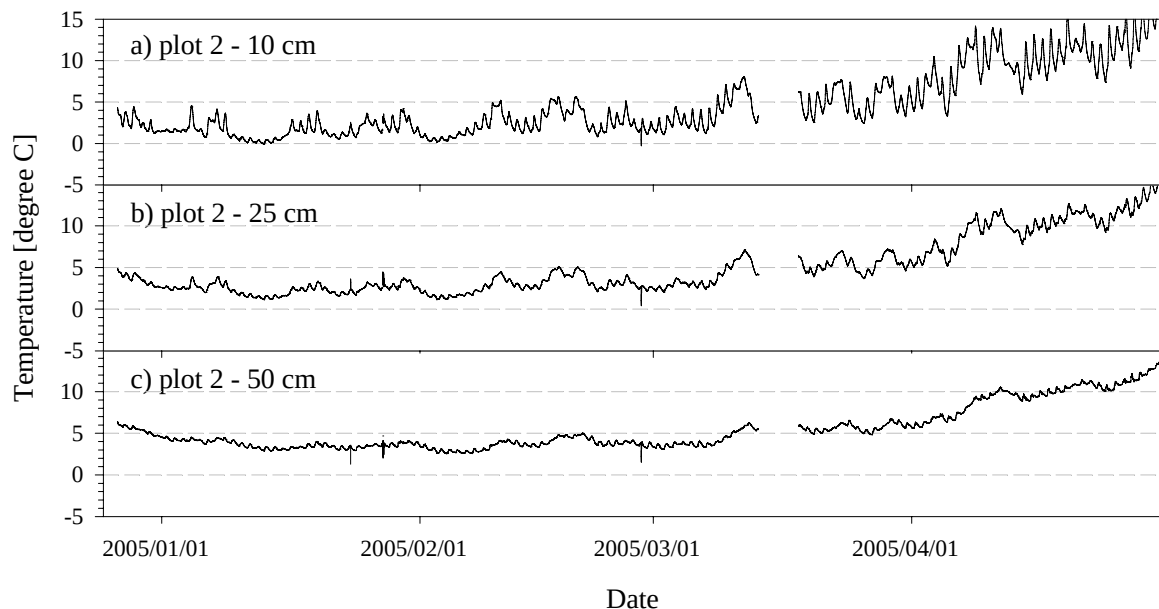


Fig. 6 Changes of subsurface temperature in plot 2

土砂生産量に対する、積算寒度 (0°C 以下の気温の積分値)、最低気温、最低地表面温度の関係をそれぞれ示す。ここで、各温度指標は、前回の生産土砂回収時点から当該回収時点までの期間についての値である。いずれの図も正の相関を示しており、各温度指標と土砂生産量との間には一定の比例関係が成り立っている。これらの図に関して特記すべき点は、凍結融解作用が無くなる、つまり横軸の値が 0 に近づくと土砂生産量も 0 に近づいていることである。このことから、凍結融解により土砂が生産されていることが明示されている。これらの図の内、積算寒度と土砂生産量との

関係は、最も明確な比例関係を示している。確かに、直線から外れる点もいくつかあるが、その中で右下にずれている点は、表層土砂を取除き基岩を露出した後、最初に回収された土砂量であり (2005 年 1 月 16 日)、それ以前に凍結融解作用をほとんど受けていなかったため、生産量が比較的少なかったものと説明できる。また、左上にずれている点は、2005 年 1 月 27 日に回収した土砂量であるが、この点だけはその他の点と異なり回収間隔が 4 日と短く、積算寒度がそのために小さくなっており、その他の点と異なる傾向を示したものと考えられる。

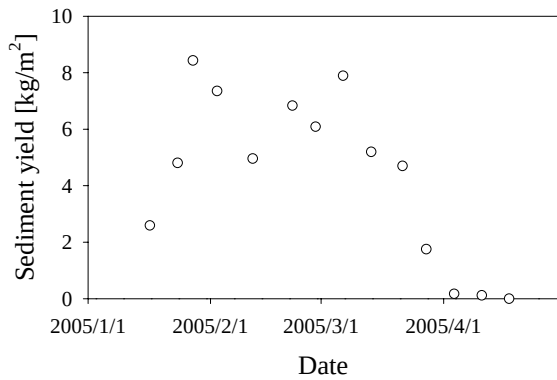


Fig. 7 Changes of sediment yield in plot 1

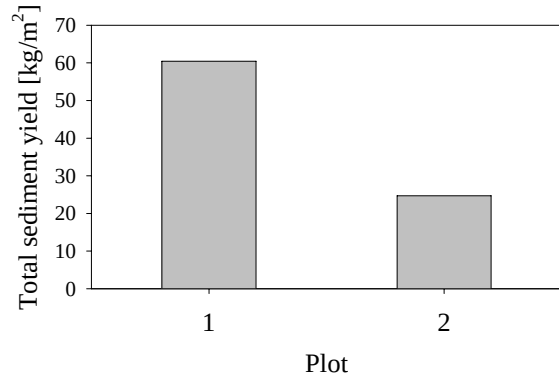


Fig. 9 Comparison of total sediment yield between plot 1 and 2

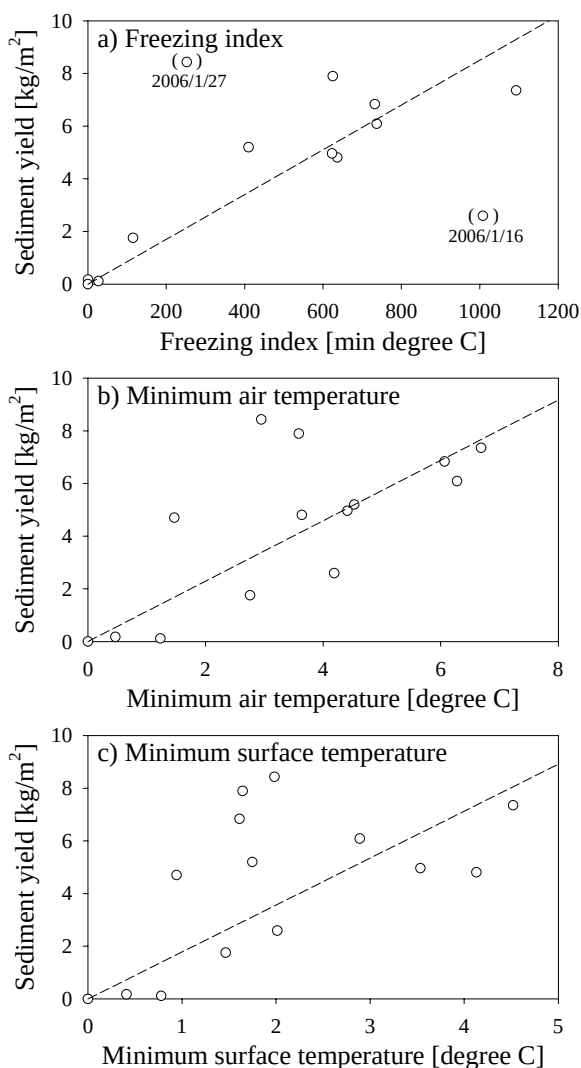


Fig. 8 Relationships between sediment yield and temperature index (a: freezing index, b: minimum air temperature, c: minimum surface temperature)

Fig. 9 に、plot 1 から生産された土砂量の総和と、plot 2 において観測期間の終わり（2005 年 4 月 17 日）に回収した土砂量とを示す。図が示すとおり、plot 1 と 2 からの土砂生産量は大きく異なり、plot 1 からの生産量は plot 2 のその 2 倍以上である。この差は、地表面の土砂による被覆状態の違いに起因していると考えられる。plot 1 では生産土砂を定期的に回収したため、その都度基岩が大气に露出し、直接凍結融解作用を受けることで、土砂生産量が大きくなったと考えられる。逆に、plot 2 では、生産された土砂がそのまま表層に残留しているため、それが緩衝帯として働き、基岩との境界がこの緩衝帯の厚さだけ下に後退したことで、凍結融解作用を直接受けなかったため、生産量が小さくなったものと考えられる。このことから考察すると、斜面勾配が安息角を上回るような急斜面では、生産土砂が常に斜面から滑落し、基岩が露出するため緩斜面と比較して土砂生産量が大きくなるものと予想される。なお、生産された土砂の空隙率を実測値の 0.48 岩石の密度を 2.65 g/cm^3 とすると、plot 1 と 2 からの土砂生産量はそれぞれ、 $44,000 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{year}$ と $18,000 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{year}$ と換算される。この結果は、既往の計測値 $5,000 \sim 10,000 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{year}$ （鈴木・福寛, 1989）と比較すると、plot 1 では最大 9 倍、plot 2 では 4 倍程度大きな値となっている。この理由は、plot 1 では、定期的に生産された土砂を除去したため凍結融解効果が基岩に直接作用したことによるものと考えられる。また、plot 2 においても、観測開始時に表面の土砂を除去しており、plot 1 ほどではないにしても、生産量が大きくなったものと考えられる。しかし、いずれにしても plot 2 については、既往の観測値に近い値であり、本研究での観測と既往の観測結果には整合性が認められる。

4.3 短期集中観測

短期集中観測における気温・地表面温度の変化と基岩面変位（生産土砂の層厚変化）を図 10 に示す。2 月 11 日から 12 日にかけての夜間と、12 日から 13 日にかけての夜

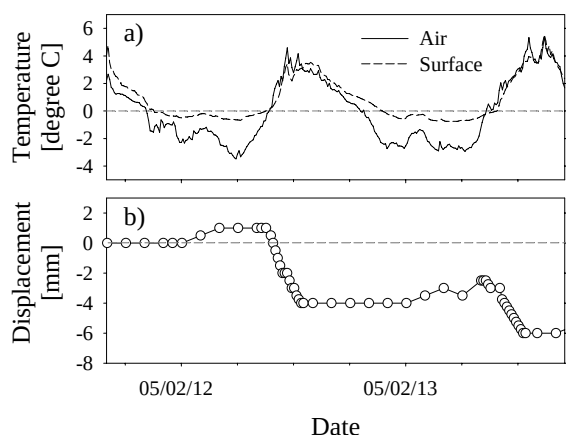


Fig. 10 a) Changes of air and surface temperatures, and b) displacement of bedrock surface (change of sediment layer thickness)

間に、気温が -3°C 程度まで低下、それに伴って地表面温度も 0°C 以下となり、地盤が凍結する条件となっている。また、2月12、13日共に日中の気温・地表面温度が $5, 6^{\circ}\text{C}$ まで上昇し、凍結した地盤が融解する条件も整っている。撮影した映像においても、夜間に基岩が凍上を伴って凍結し、日中の温度上昇と共に融解、土砂化する現象が確認された。基岩面は、夜間の凍結に伴い上方向に 1mm 程度変位し、翌朝から昼にかけての気温上昇と共に下方向に変位している。夜間の上方向への変位は、凍上が原因である。また、下方向への変位が始まる時刻は12、13両日共に9:00から10:00頃で、これはちょうど気温・地表面温度が 0°C を上回る時刻に一致しており、融解によって土砂が生産されたことを意味している。12、13日の温度条件はほとんど同じであるが、下方向への変位量は、それぞれ約 4mm と 2mm であり、2倍程度の差が生じている。変位量の計測が、図3に示すような簡易な方法であるため、その測定精度に問題があるためとも考えられるが、仮にその精度が信頼できるとすると、12日に生産された土砂が基岩表面を覆い、それが緩衝帯として働いたため13日における凍結融解作用が弱まり、土砂生産量が減少したためと説明できる。このことは、図9に示した、plot 1と2の総土砂生産量の違いに対する説明と整合している。これらのことから、基岩が受ける凍結融解作用は、基岩が露出した状態の場合にその効果が大きく、時間経過と共に生産された土砂の被覆によってその効果が小さくなっていくと考えられる。よって、土層が十分発達した斜面では、基岩からの土砂生産はほとんど起こっていないと考えられる。

5. おわりに

本研究において行った、滋賀県南部田上山地の裸地斜面における現地観測によって、これまでほとんど検討されていなかった凍結融解現象とそれに伴う土砂生産について、いくつかの重要な知見が得られた。それらを以下に挙げる。

- (1) 風化花崗岩のような地質の場合、冬期の非常に活発な凍結融解作用によって、基岩の構造が破壊され、多量の土砂が生産されていることが、現地観測により明らかとなった。この土砂生産量は、既往の観測値ともよく対応している。
- (2) 基岩表面の被覆状態の違いによって、土砂生産量が大きく異なり、土砂が基岩表面を覆っている場合、土砂生産量が低く抑えられることが解った。このことから、勾配が大きく表層土が滑落するような斜面の基岩からは、より多くの土砂生産量がみこまれる。
- (3) 基岩の構造が破壊され、土砂が生産されるためには、複数回の凍結融解作用を経験する必要があることが明らかとなった。必要な凍結融解回数は、地質や風化の程度によって異なると考えられる。

本研究では、田上山地の一斜面に限定して観測を行なったが、異なる気候帯および地質においても同様な凍結融解作用と土砂生産現象が起こるとは限らず、異なる条件下での観測を行ない、結果を比較検討する必要がある。

謝 辞

本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金（基盤研究C）の助成を得て行なわれた。本研究を行うに当たり、京都大学大学院農学研究科の山水高久教授、同小杉賢一朗助手に協力と助言を頂いた。また、国土交通省近畿地方整備局琵琶湖河川事務所の皆様の協力を頂いた。ここに記して、感謝の意を表します。

参考文献

- 奥西一夫 研究代表 (2000) : 土壌凍結が斜面の安定性に与える影響, 平成 9-11 年度科学研究費補助金 (基盤研究(B)(2)) 研究成果報告書.
- 澤田豊明・芦田和男 (1986) : 山地流域における土砂生産特性, 第30回水理講演会論文集, p.205-210.
- 鈴木雅一・福嶋義宏 (1989) : 風化花崗岩山地における裸地と森林の土砂生産量—滋賀県南部, 田上山地の調査資料から—, 水利科学 33 (190), p.89-100.
- 藤田正治・澤田豊明・志田正雄・伊藤元洋 (2005) : 高原川流域における土砂生産特性, 水工学論文集 49, p.1075-1080.

Field Observation of Sediment Yield due to Freeze and Thaw Process on Bare Slope in Tanakami Mountains, Shiga Prefecture

Daizo TSUTSUMI, Masaharu FUJITA, Toyoaki SAWADA, Motohiro ITO* and Hiroyuki
TESHIMA**

*Nippon Koei Co., Ltd.

** Graduate School of Engineering, Kyoto University

Synopsis

A detailed field observation was conducted to elucidate mechanisms of freeze and thaw process and following sediment yield on a bare slope in Tanakami Mountains, southern part of Shiga Prefecture. During the observation period (December, 2004 – April, 2005), air, surface and subsurface (10, 25, 50 cm depth) temperatures were continuously measured with 10 min interval. From the observation results, it was indicated that the freeze and thaw cycle occurred repeatedly, and the frozen zone (temperature $< 0^{\circ}\text{C}$) reached to the depth of 10 cm. It was confirmed that the sediment yield occurred due to the active freeze and thaw process, and stopped at the end of the observation period when the freeze and thaw cycle also stopped (April, 2005). It is also suggested that the bedrock surface cover affects to the sediment production due to the freeze and thaw processes.

Keywords: sediment yield, freeze and thaw, Tanakami Mountains, field observation