

表層崩壊予測精度向上のための 斜面土壌水分空間分布計測



小杉 賢一郎
 こすぎ けんいちろう
 京都大学大学院農学研究科 准教授

1 はじめに

豪雨の度に繰り返される土砂災害のなかで、表層崩壊は最も発生件数が多く、人命および財産に莫大な被害をもたらしており、その予測が大きな社会的要請となっている。近年、航空機レーザープロファイラによる精密な数値地形図の整備が急速に進み、崩壊発生場所の予測に大きく貢献しているが、同時に、表面地形からの予測には限界があることも明らかになってきている。例えば**写真-1**のように、同様の地形を呈する斜面でも、崩壊が発生する箇所としない箇所があり、その違いを説明するのは容易ではない。さらに、地形からは水の集中が起こりにくい凸型斜面で発生する表層崩壊も決して少なくなく、予測を困難にしている。このような斜面を崩壊発生後に踏査すると、基岩の割れ目などからの湧水が頻繁に見つかり、実は水が集まりやすい場所であったことが分かる。このような土層の内

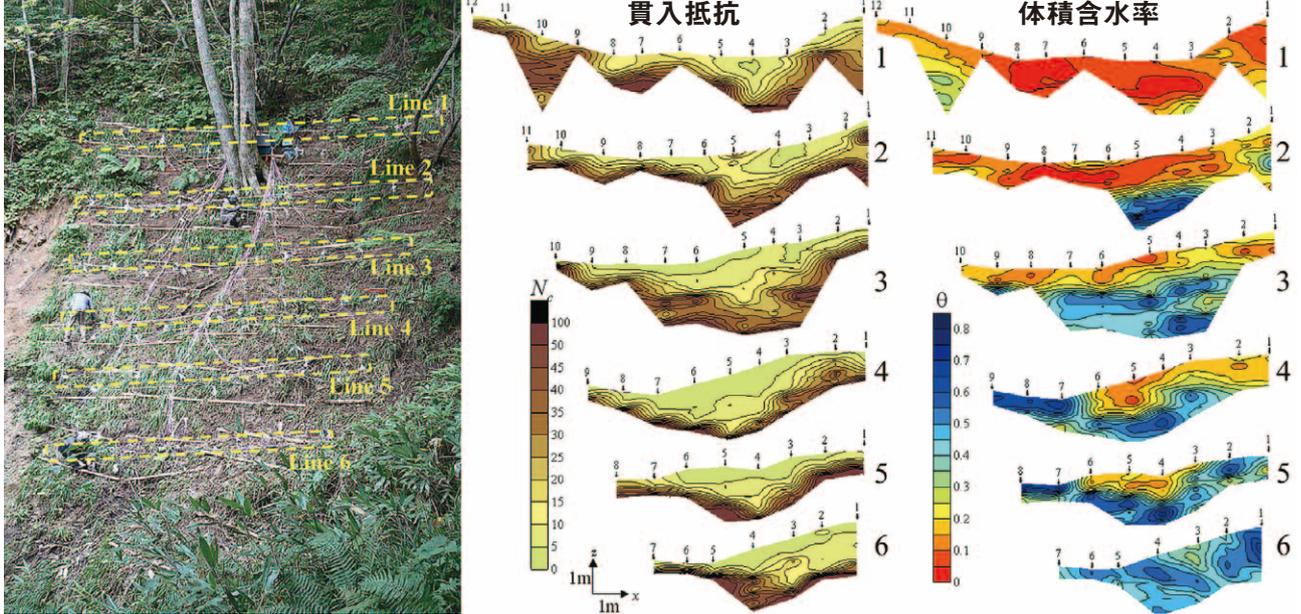


写真-1 2009年7月に防府市で発生した表層崩壊 (アジア航測㈱提供)



写真-2 水分計付貫入計 (CPMP) の全体 (a) と先端部 (b)

図-1 CPMPによる計測を行った斜面と貫入抵抗・体積含水率の計測結果



部に隠された集水性の高い部分の存在は、崩壊が発生する以前に、地形から直接判断することは非常に難しい。

我々の研究室では、表層崩壊の予測精度を向上させるためには、土層の内部構造、特に土層内の水の集中に関する情報を得ることが不可欠だと考え、種々の研究に取り組んでいる。ここではその中から、土壌水分計付貫入計を用いた調査、高密度テンシオメータ網を用いた観測、高密度電気探査、赤外線リモートセンシングについて紹介する。

2 水分計付貫入計CPMPを用いた斜面土層の調査

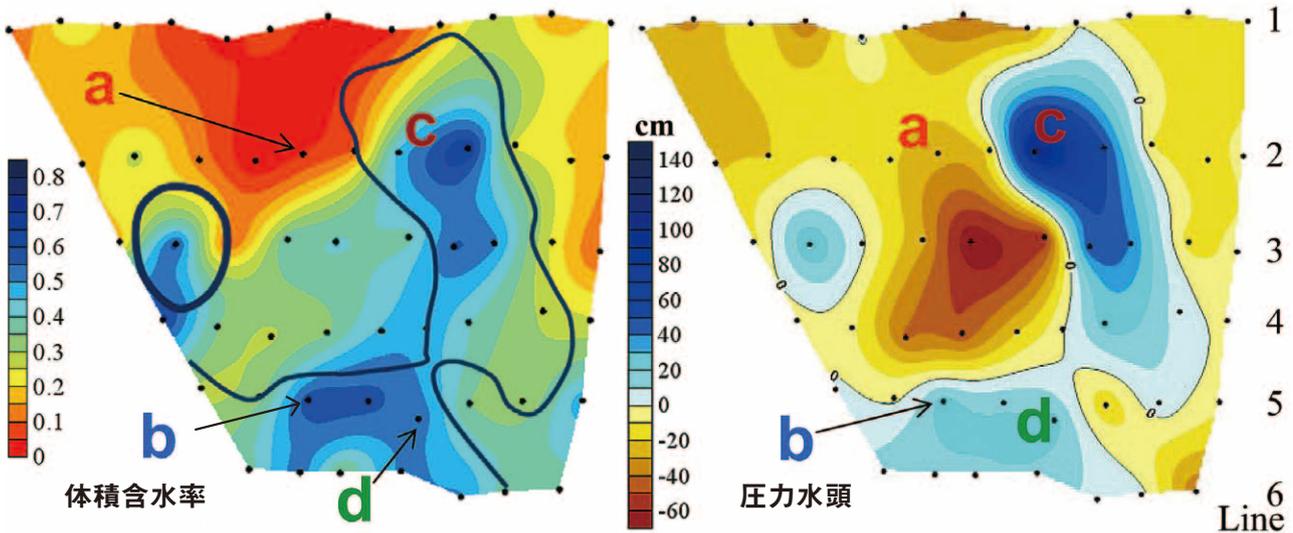
斜面内部の水の集中具合を知るには、土壌水分の空間分布を計測することが有効である。そのためには、テンシオメータや土壌水分計を埋設すればよいが、この場合、データの空間的な分解能がセンサーの数に依存してしまうという問題がある。センサーは一台数万～数十万円してコストがかかるうえ、測器の設置に手

間と時間がかかり、機動性を重視した使用には適さない。

一方、最も標準的な秤量法による計測では、決められた体積の土壌を、土壌断面を掘削したり専用のオーガーを用いたりして採取せねばならず、非常に効率が悪い。かつ、破壊的な計測方法である。

そこで我々は、斜面の土層厚計測を目的として頻繁に実施される貫入試験に着目し、土壌水分計付貫入計(CPMP; Combined penetrometer moisture probe)の開発を行った(小杉ら, 2004; 山川ら, 2007; Kosugi et al., 2009; Yamakawa et al., 2010)。この測器は、土壌貫入計のロッドの先端に小型の水分計を取り付けたものであり、貫入抵抗を測定しながら同時に土壌水分の鉛直分布を計測できる。その写真を写真-2に示した。長谷川式土壌貫入計をベースとして設計されていて、2kgの錘を50cmの高さから自由落下させたときの衝撃で、先端に直径20mmの貫入コーンが取り付けられたステンレスロッドを土層内に貫入させていく(写真-2a)。貫入ロッドの長さは1m程であるが、延長が可能であり、土層が厚い場合でも計測できる。土壌水分計測にはTDR式水分計の原理を用いた。貫入コ

図-2 図-1の計測斜面における基岩面上の体積含水率と間隙水圧の分布
(左パネル内の青線は、圧力水頭 = 0 cmの等値線を表す)



ーンの直上がセンサー部であり、アクリル管の周囲に二本のステンレスワイヤをコイル状に巻き付けた構造をしている(写真-2b)。ステンレスワイヤは、それぞれ同軸ケーブルの信号線とシールド線に繋がれ、中空にした貫入ロッド内部を貫通して貫入計上端から取り出され、電磁波パルスの発生・解析装置と接続されている。計測された比誘電率は、専用のキャリブレーション式により体積含水率 θ に変換される。

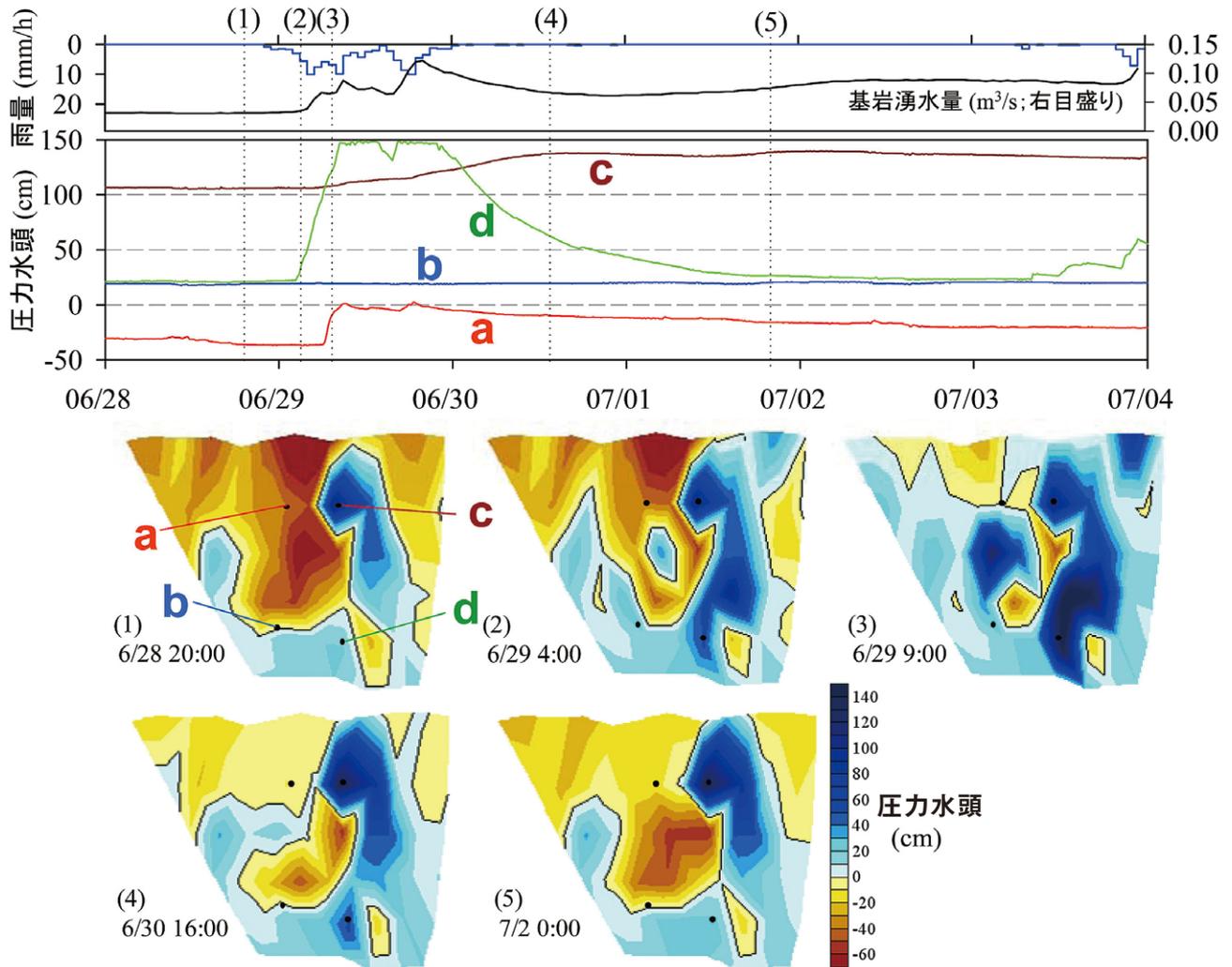
このCPMPを用いて、山地斜面内部の水分分布を計測した。観測斜面は、京都大学防災研究所穂高砂防観測所のヒル谷試験流域内に設けた。この地域の年間降水量は2,000 mmで、そのおよそ4分の1が冬期の積雪によってもたらされている(気象庁アメダスデータ; 栃尾)。ヒル谷は、割谷山溶岩・火砕岩、砂岩・チャート・玄武岩・石灰岩を含む中生界メランジ堆積物、花崗岩質岩脈等から成る複雑な地質構造を持ち、観測斜面の地質は花崗斑岩に属している。観測斜面は平均勾配40°のほぼ平行な地形を呈し、下端では常に湧水が見られた(図-1左側パネル)。また、既往の崩壊地が隣接しており、この崩壊地内には基岩割れ目からの湧水が確認された。

観測斜面上に6本の横断測線を設け(図-1左側パネル)、各測線において1m間隔でCPMPによる計測を実

施した。各断面で得られた貫入抵抗(Nc値; 10cmの貫入に必要な打撃数を表す)の分布を示したものが図-1の中央パネルである。各断面図の下端は、土層と基岩の境界面を表しており、ここでは既往研究(沖村・田中、1980; 吉松ら、2002)に倣って、Ncが100を超える深さを境界面と定義した。土層-基岩境界面には複雑な凸凹があり、地表面形状が平坦であるのとは対照的である。またLine2より下流側では、中央が窪んだ集水地形を呈していることがわかった。土壌の体積含水率 θ (図-1右側パネル)は、最上流部のLine1で全体的に小さくなっていた。Line2より下流側では、土層-基岩境界面が凹んだ部分で含水率の上昇が見られ、Line6では断面全体が湿っていた。またLine4と5では、斜面に向かって左側の土層が薄い部分でも含水率の大きな上昇が見られた。このように、一様に見える斜面内でも、土壌水分はかなり不均一に分布していた。

図-2の左側パネルは、基岩面上で計測された体積含水率の二次元分布を示したものである。Line2の中央やや右寄りの高含水率部は、下流のLine3~6の高含水率部と連続しており、一連の水みちを形成していることが窺える。これとは別に、Line3とLine4の左端付近にも、小規模な水みちの存在が示唆された。

図-3 雨量・基岩湧水量・間隙水圧の時系列（短期）と基岩面上の間隙水圧分布



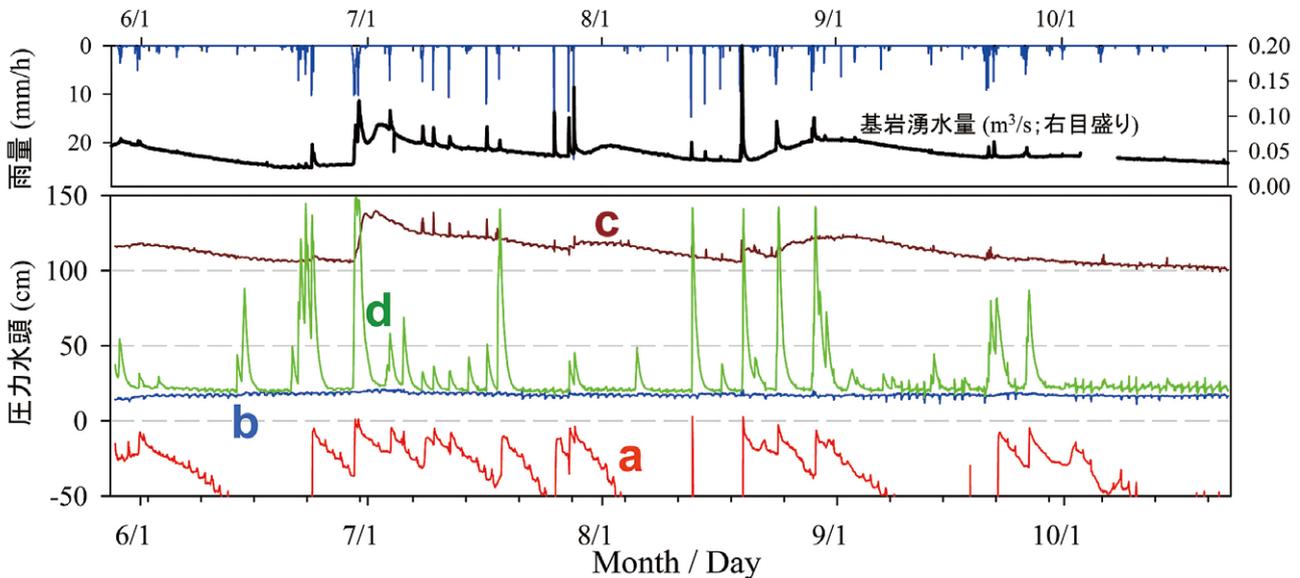
3 テンシオメータ網による 土壌間隙水圧の観測

CPMPによる計測を実施した図-1斜面の各地点において、テンシオメータを土層—基岩境界面に設置し、基岩面上の土壌間隙水圧を観測した。間隙水圧は、その上昇が表層崩壊発生の直接の原因となることから、崩壊予測において最も重要となる物理量の一つである。図-2の右側パネルには、無降雨時に観測された土壌間隙水圧（圧力水頭表示）の平面分布を示した。間隙水圧は非常に不均質に分布し、その分布の様子は

CPMPで計測された含水率の分布（図-2左側パネル）とよく対応していた。例えば、Line2中央やや右寄りの含水率が高い部分では、80cm以上の大きな間隙水圧が観測された。さらに、この高含水率部から下流側に続く水みちに沿って、飽和帯が分布していた。また、Line3の左端付近の含水率が高い部分でも、間隙水圧が大きくなっていた。以上のように、CPMPで計測された土壌水分の空間分布から、土壌間隙水圧の不均質分布の状況を的確に把握できるといえる。

図-3には、積算雨量112mm、最大時間雨量10.2 mm/hの降雨時に観測された、間隙水圧の変動を示し

図-4 雨量・基岩湧水量・間隙水圧の時系列 (長期)



た (Masaoka et al., 2010)。降雨前の間隙水圧分布 (時刻(1)) は、[図-2](#)に示したものとほぼ同様であった。降雨中 (時刻(2)および(3)) には、CPMPによる含水率分布や降雨前の圧力水頭分布 ([図-2](#)) で示された水みちの周辺で、間隙水圧が鋭敏な上昇を示した。特に地点dでは、間隙水圧が最大150cmまで達した。降雨が終了すると、ほとんどの地点で間隙水圧は低下を示した。ただし、Line2中央やや右寄りの地点c周辺では、間隙水圧は降雨後も上昇を続け、降雨終了後13時間たった時点 (時刻(4)) でピークとなり、その後長期間にわたって高い値が維持された (時刻(5))。この降雨イベントでは、観測斜面に隣接する既往崩壊地内の基岩割れ目からの湧水量も、降雨に遅れた二次的な上昇を示していた ([図-3](#)上側パネル)。このことから、地点cにおける間隙水圧の変動は、基岩からの湧水の影響を受けたものだと考えられた (Masaoka et al., 2010)。以上の間隙水圧の応答パターンは、他の降雨イベントでも観測された ([図-4](#))。

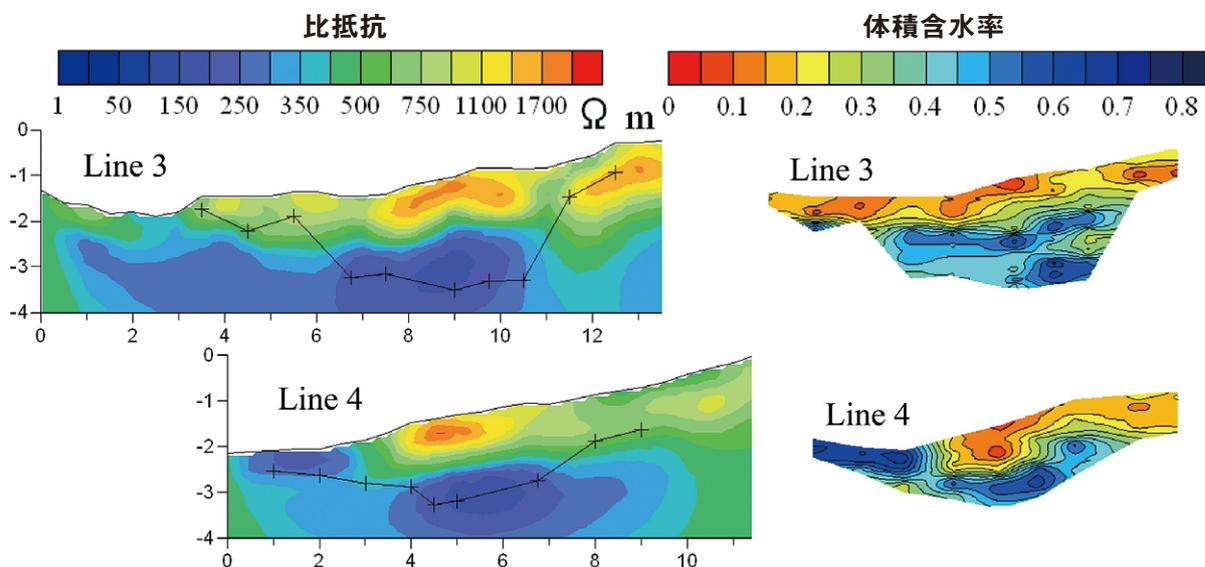
CPMPによる計測結果 ([図-1](#)、[図-2](#)) においては、地点c付近の基岩面上において周囲よりも突出して高い含水率が検出されていた。よってCPMPは、土層内の水みちのみでなく、土層内に隠された基岩湧水ポイントの探索にも有効であると考えられた。

4 高密度電気探査による水分分布の把握

CPMPを用いた斜面調査と、その結果を受けて実施したテンシオメータ網による観測で、斜面内部の水分集中箇所や水移動の様子を把握することができた。しかしながら、これらの調査・計測は斜面上の各地点で実施する必要があり、空間的に連続した水分分布を把握するには手間がかかる。そこで同じ[図-1](#)の斜面において、非接触計測技術の一つである高密度電気探査を実施した。対象としたのは、[図-1](#)のLine3、4に沿った横断測線である。電極の配置にはダイポール・ダイポール法を用い、電極間隔は0.5~1.0mとした。

横断面内の比抵抗分布は、[図-5](#)の左側パネルのようになった。図中には、CPMPによって計測された土層-基岩境界面を黒線で示している。また、CPMPにより計測された含水率分布を[図-5](#)右側パネルに示した。Line3、4とも、土層-基岩境界面の凹みで含水率が高くなっているが、この部分では低比抵抗値が計測された。さらに、Line4左側の高含水率部でも、比抵抗が小さくなっていた。このように、電気探査により計測された比抵抗分布は、CPMPにより計測された含水率分布と良好な対応を示したことから、高密度電気探査

図-5 図-1の計測斜面における比抵抗と体積含水率の分布



は斜面の土壤水分空間分布を知るための有力な手法と考えられる。

ただし、電気探査では、CPMPの計測で得られた局所的な含水率の増加部・低下部は検出されず、空間分解能的には劣ると考えられる。その一方で、CPMPでは計測不可能な土層-基岩境界面より深い部分についても比抵抗分布が得られ、基岩内部の水分状態を把握できるという利点もある。このようなことから、高密度電気探査とCPMPによる計測を適切に組み合わせることによって、精度の高い水分分布計測を効率的に行えると考えられる。

5 赤外線リモートセンシングによる水分分布の把握

CPMPによる計測や高密度電気探査を、膨大な数・面積に及ぶ急傾斜地崩壊危険区域や土石流危険渓流の全てで実施することは不可能であり、調査対象斜面の抽出方法が重要となる。そのような手法の一つとして、赤外線サーモグラフィを用いたリモートセンシングについて検討した。

土層内に隠された水みちや基岩湧水ポイントでは、

日頃から土壤水分が高いことが予想される。このような場所では、高温・乾燥時であっても、樹木が活発に蒸散を行うことによって、樹冠表面温度が低く抑えられると予想される。従って夏期の乾燥時に、リモートセンシングによって樹冠表面温度分布を計測することによって、水分集中箇所のおよその位置を把握できる可能性が高い。そこで、40年生のスギを植生とする平行斜面(写真-3)を対象として、赤外線計測を実施してみた。計測には、サーモレーサTH9100MLN(NEC三栄株式会社)を使用した。この機械の計測温度範囲は-20~100℃、計測分解能は0.04℃、熱画像画素数は320×240ドットである。計測は快晴日(2009年8月19日)に実施し、対象となる斜面を見渡せる位置から、熱画像と可視画像をセットで撮影した。

得られた熱画像(図-6上側パネル)から、樹冠表面温度が周囲よりも低くなっている部分が検出された。

図-6下側パネルでは、これらの低温エリアを可視画像上にマークしている。可視画像の上では、低温エリアと非低温エリアとの違いは明確でないことがわかる。

次に、低温エリアと非低温エリアの両方を含む横断測線(図-6中の黒線)を設定し、CPMPによる計測と高密度電気探査を実施した。この測線上では、斜面に向かって右側の部分の樹冠表面温度が低く、左側の部



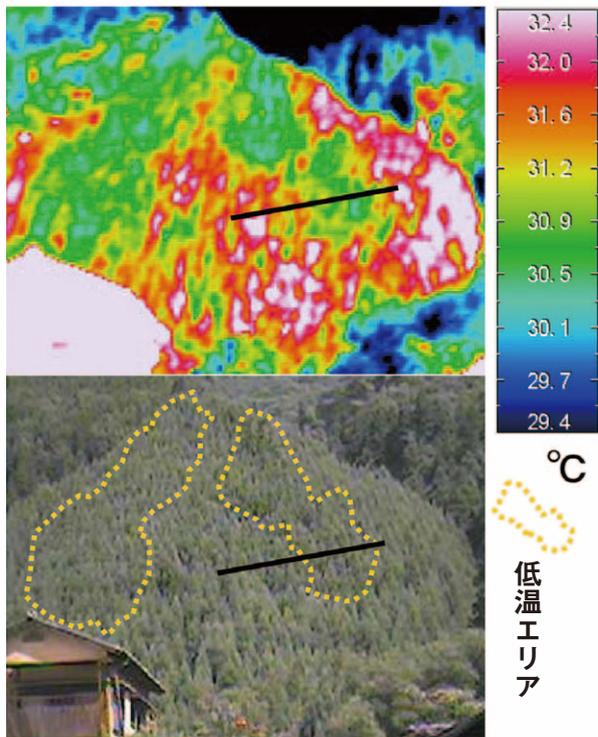
写真-3 熱赤外リモートセンシングを行った斜面

分の樹冠表面温度が高くなっていた。CPMPによる計測は測線上の11地点で行った(図-7の青丸印)。結果を図-7上段パネルに示す。土層の厚さは57~228 cmであり、平均値は114cmであった。体積含水率は、バラツキが大きいものの、総じて斜面に向かって右側の部分(水平距離約6~20m)で大きく、左側の部分(水平距離約20~28m)で小さい傾向にあった。これらはそれぞれ、樹冠表面温度が低い部位と高い部位に対応しており(図-6参照)、熱赤外計測によって得られた温度分布が土壌水分量と良好に対応することが示された。

高密度電気探査は、ダイポール・ダイポール法を用い、電極間隔を1.5mとして実施した。得られた比抵抗の分布を、図-7の下側パネルに示す。パネル中には、貫入試験によって計測された土層-基岩境界面も併せて示している。比較的高い土壌水分が計測された斜面に向かって右側の部分(水平距離約6~20m)では、土層内の比抵抗が低くなっており、良好な対応が見られた。一方、斜面に向かって左側の部分(水平距離約20~28m)では、低い土壌含水率に対応して高比抵抗領域が広がっていた。これらの比抵抗分布は、樹冠表面温度(図-6)の分布とも良好に対応していた。なお、

図-6 熱画像ならびに対応する位置での可視画像

(図中の黒線は図-7の調査を実施したラインを表す)



計測範囲の右端付近(水平距離約8~10m)では、土層内の低比抵抗部分が、基岩の比較的浅い部分の低比抵抗帯に繋がっている様子が見て取れる。このことから、この位置において、基岩地下水が土層内に湧出し、土壌水分量を増加させている可能性がある。

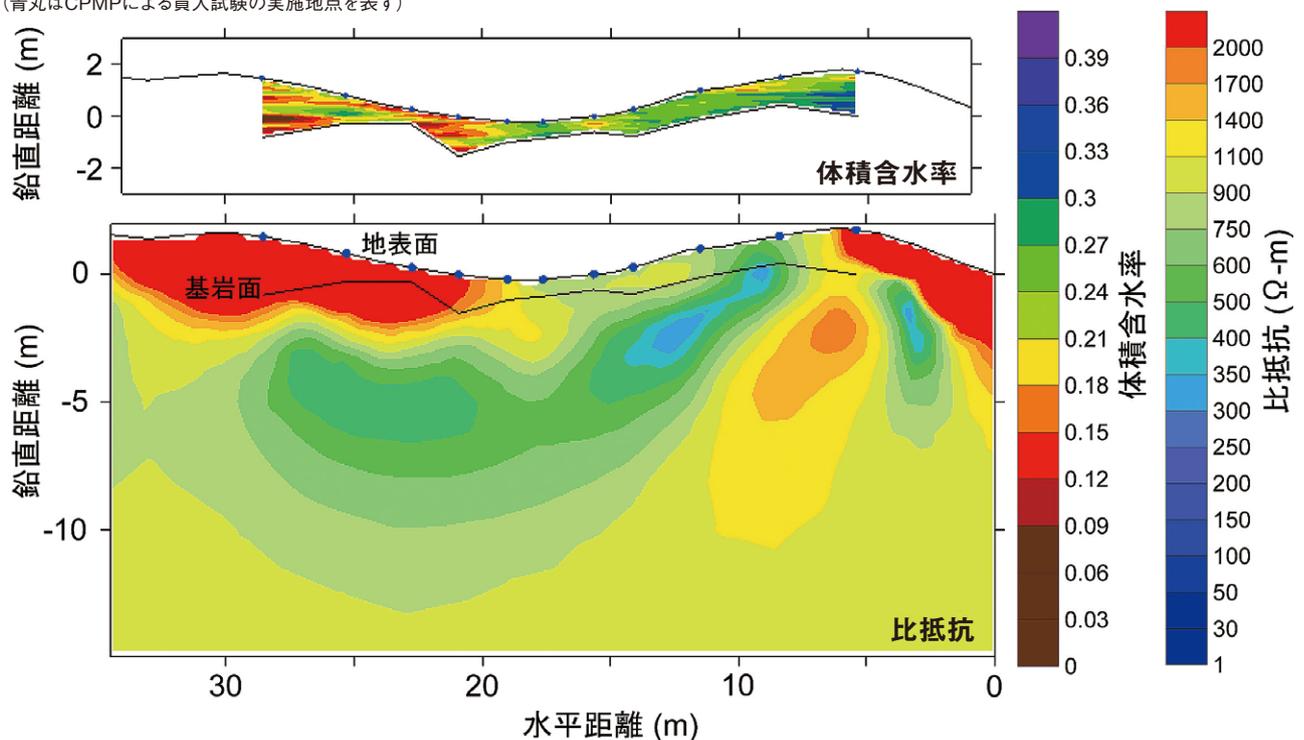
以上のように、熱赤外リモートセンシングによって樹冠面上の異常低温部を検出することで、斜面土層内の水分集中箇所を推定できる可能性が示された。

6 おわりに

表層崩壊発生の正確な予測には、表面地形の情報のみでは不十分であり、土層内の水みちの発達具合や基岩からの湧水箇所といった、斜面内部の集水性の把握が必要である。そのためには、斜面の土壌水分空間分布を計測することが有効と考えられる。本稿では、土壌水分分布を効率的に計測する幾つかの手法について、これまで行ってきた調査・研究の内容を紹介した。

図-7 CPMPによる土層厚と体積含水率の計測結果（上）と高密度電気探査による比抵抗の計測結果（下）

(青丸はCPMPによる貫入試験の実施地点を表す)



その成果から、「熱赤外リモートセンシングによって水分集中が予想される斜面を絞り込んだうえで、高密度電気探査と水分計付貫入計を組合せた水みち・湧水箇所の精査を行う」ことにより、崩壊危険箇所を的確に把握できると考えている。ただし、これら一連の手法は限られた数の斜面に適用されただけであり、その有用性の検証は不十分である。今後、調査事例を増やすことで、手法の検証・改良を進めていきたい。

謝辞

京都大学農学研究科山地保全学分野の山川陽祐君、正岡直也君をはじめとする大学院生、学生の方々には、現地調査に協力いただいた。京都大学農学研究科環境デザイン分野の今西純一氏には、サーモグラフィを貸与していただいた。堤大三氏をはじめとする京都大学防災研究所穂高砂防観測所のスタッフには、現地観測に関してご協力いただいた。深く謝意を表します。

引用文献

- ★ 小杉賢一郎・堤大三・水山高久・長谷川秀三 (2004) : 斜面土壤水分空間分布計測のための土壌水分計付貫入計の開発, 砂防学会誌, Vol. 57, No. 3, p. 3-13
- ★ Kosugi, K., Y. Yamakawa, N. Masaoka, and T. Mizuyama, A combined penetrometer-moisture probe for surveying soil properties of natural hillslopes, Vadose Zone J., 8, 52-63, doi:10.2136/vzj2008.0033, 2009.
- ★ 沖村 孝・田中 茂, 一試験地における風化花こう岩斜面の土層構造と崩壊発生深さに関する研究, 砂防学会誌, 33(1), 7-16, 1980.
- ★ Masaoka, N., Y. Yamakawa, K. Kosugi, and T. Mizuyama, Intensive measurements of soil pore water pressure for analyzing heterogeneous hydrological processes on a hillslope, Int. J. Erosion Cont. Eng., 3, 53-58, 2010.
- ★ Yamakawa, Y., K. Kosugi, N. Masaoka, Y. Tada, T. Mizuyama, Use of a combined penetrometer-moisture probe together with geophysical methods to survey hydrological properties of a natural slope, Vadose Zone J., 9, 768-79, doi:10.2136/vzj2010.0012, 2010.
- ★ 山川陽祐・小杉賢一郎・梁 偉立・水山高久, 土壌水分計付貫入計の改良, 砂防学会誌, 60(4), 34-39, 2007.
- ★ 吉松弘行・川満一史・瀬尾克美・長谷川秀三・村中重仁, 斜面の表層構造調査用の簡易貫入試験機について, 平成14年度砂防学会研究発表会概要集, 392-393, 2002.