第 39 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集
（社）土木学会　2010 年１月　講演番号 58

野外観測における微小電位変動と斜面変状の予測事例

丹羽 廣海[1*]・村山 秀幸[1]・伊東 佳彦[2]
日下部 祐基[2]・宍戸 政仁[2]・竹内 昭洋[3]

[1]株式会社フジタ　技術センター（〒243-0125 神奈川県厚木市小野2025-1）
[2]独立行政法人土木研究所寒地土木研究所（〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸1条3-1-34）
[3]東海大学　地震予知研究センター（〒424-8610 静岡県静岡市清水区折戸3-20-1）
*E-mail: hiroumi.niwa@fujita.co.jp

岩盤の破壊に先行して微小な電位が発生することが知られている．本研究では，岩盤崩壊危険斜面や地すべり性変状斜面において地盤災害の監視・予測に適用する目的で微小電位観測をおこなってきた．現場観測では，降雨の影響に起因する微小電位の変動量は非常に大きく，岩石の破壊に起因する微小電位変動を識別することが困難となる．前報では積雪寒冷地の変状斜面における微小電位変動傾向について述べ，観測現場全体の電位変動傾向と変状箇所個別の電位変動傾向を対比することによる斜面の不安定化予測・評価方法について考察した．本報告では，最新の微小電位観測データによる斜面不安定化予測・評価および，評価精度向上に向けた解析方法について考察する．

Key Words : *micro geo-electric signals, failure prediction, field measurements, principal components analysis*

1. はじめに

わが国では，その厳しい地形地質条件から斜面崩壊による災害が多発している．斜面崩壊の発生に先立ってその前兆を捉える崩壊予測技術の研究は様々な分野でおこなわれているが，いまだ確立された手法はないのが現状である．一方，岩石や地盤の破壊に先行して微小な電位が発生することが古くから知られており[1)]，筆者らはこれを微小電位と称している．微小電位観測は，地盤の自然電位を観測することによって崩壊発生の前兆を検出しようとする手法で，ギリシャにおける地震予知の分野でいくつかの成功事例が報告されているVAN法を応用したものである[2)]．筆者らは，微小電位観測を岩盤崩落や斜面崩壊の予測，斜面健全度評価に適用すべく研究を進めてきた[3)4)]．

既報[5)]では積雪寒冷地の変状斜面における野外観測事例から，複数地点間における電位の比率を相対的にあらわした新しい指標である電位分担率を用いて変状予測の可能性について報告した．本報告では解析的手法を用いた野外観測データの評価方法について考察する．

2. 微小電位観測の概要

(1) 微小電位観測の概要

微小電位観測は，地盤内に設置した電極間の電位差を精密かつ連続的に観測することによって，岩石の破壊に先行して発生すると考えられている電気的信号を事前に捕らえることを目的としている．微小電位発生のメカニズムとしては固体力学的観点から**表-1** に示すように様々なモデルが考えられている[6)]．固体の応力変動に伴って電位差が発生するためには，電荷イオンが伝達あるいは遮蔽される必要性があり，これらの現象の担い手がどのような物理現象であるかを明らかとすることが，微小電位発生メカニズム解明の論点となる．筆者らはこれまでの室内実験結果から，微小電位発生メカニズムとして岩石中の水が電荷移動の担い手と考える流動電位モデルが有力と考えている[7)]．

(2) 適用斜面における微小電位観測方法

微小電位観測を適用した積雪寒冷地にある変状斜面は，毎年融雪期の地下水位上昇に伴って地すべり性の緩慢な変動を繰り返している．本斜面では対策工が順次進められており変動量は小さくなってきているが，斜面末端部

の一部では依然として変動が続いている．

本地域には白亜系蝦夷層群に相当する堆積岩が広く分布している．変状を起こしている地質は泥岩を主体とし，一部で砂岩を挟在する．泥岩の状態は，目立った亀裂は見られないが掘削後時間が経過するにつれて砕片化が進行し，やがて土砂状にまで劣化する岩質で風化やスレーキングに対して弱い．

微小電位観測は，**図-1** に示すとおり変状斜面末端部に地表電極を計 6 箇所設置しておこなった．微小電位観測は理論的には距離減衰が小さいと考えられることから，地すべりや岩盤崩壊が危惧される斜面を少ない観測点で広範囲に監視できる可能性が期待される．本斜面では斜面末端部の変状が活発な箇所を網羅するように配置し，各電極の間隔は 50m 程度とした．一般に絶対電位を測定することは困難であるため，本斜面の微小電位観測ではすべり面以深の安定土塊中に設置した地中電極を負極の共通電極（以下 COM(-)と称す）として，COM(-)と地表電極間の電位差を観測している．電極には長さ L=500mm，径φ20mm の銅製棒状電極を使用した．なお，積雪，凍上の影響を避けるため地表電極は地表から約 1.5m の深さに埋設した．微小電位観測のサンプリングレートは 10s とし，太陽光発電を利用して常時観測をおこなっている[8]．

3. 微小電位変動の傾向

図-2 に，2008 年 1 月下旬から 2009 年 9 月中旬までの約 1 年 8 ヶ月間の適用斜面における微小電位変動傾向を時系列で示す．微小電位観測はサンプリングレート 10s で実施したが，図に示したデータは観測期間が長いため 1 時間につき 1 データに整理したものである．また，降雨量，積雪深，代表的な地下水位および**図-1** に示す位置のパイプひずみ計 S-1，S-2 のすべり面付近における観測結果を併記した．図より斜面変状は 4 月上旬の融雪期に最も活発で，特にパイプひずみ計 S-1 のひずみが大きいことが読み取れる．一方パイプひずみ計 S-2 を含むブロックの変状はすでに収束傾向にある．また，降雨時のパイプひずみ計の変動はわずかであり，斜面変状の主な要因は融雪期の地下水位上昇が支配的である．

微小電位の変動は冬季に比べて夏季の方が顕著で，降雨時に微小電位は大きく変動する傾向が見られる．この原因は，冬季には降水量自体が少ないことに加えて積雪があり雨が地中に浸透しにくいため降雨の影響を受けにくいが，夏季には降雨の影響を直接地盤が受けるためと考えられる．

また，各電極と地中電極間の電位差の絶対値は，春の融雪期から夏にかけて上昇する傾向が認められる．この

表-1 微小電位発生のメカニズムに関する諸モデル

モデル名称	必要な仮定	機　構
流動電位	応力勾配・間隙水	岩石表面との電気的な相互作用のために，岩石中の空隙を圧力勾配によって流れる間隙水は電荷を運ぶ．
圧電分極の補償電荷 (Ikeya, 1997)	応力変化・圧電物質・導体	圧電物質に応力が加わると分極が生じ，この分極を遮蔽するために自由電荷が再配置される．応力がなくなると，この自由電荷の対消滅によって電磁波が放出される．
転位の移動による電気双極子 (Slifkin, 1996)	応力変化・刃状転位・不純物イオン	帯電したジョグは不純物イオンなどによって遮蔽されている．応力変化に刃状転位は素早く追随できるが，不純物イオンは出来ないために電気双極子が生成される．
圧力誘導電流 (Varotsos, 1998)	応力変化・格子欠陥	価数の異なる不純物イオンによって，結晶中に電気双極子が生成される．圧力が高くなるとこの双極子が回転し易くなり，ある圧力のとき外部電場の方向に向きが揃う．このとき，双極子の回転にともなって電流が流れる．

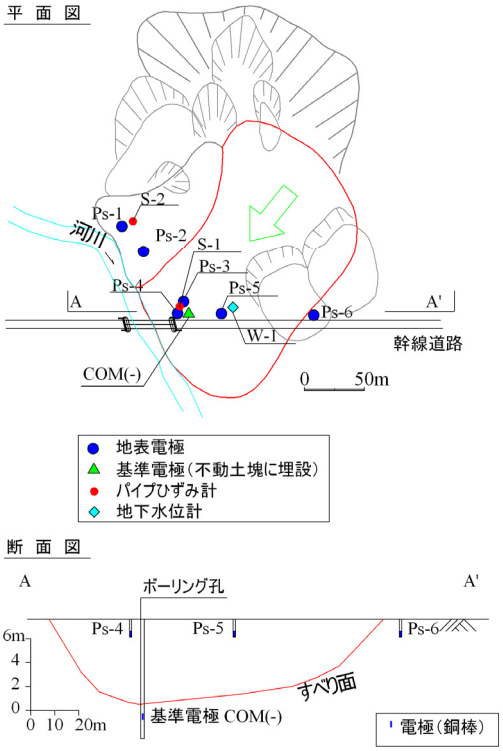

図-1 微小電位観測配置図

傾向は，地中のすべり面以深の不動土塊の電位に対して，本変状斜面の表層が有する電気的なポテンシャルが春から夏にかけて相対的に大きくなることをあらわしている．すなわち，ある共通電極を基準として見ると，ある観測場の電気的ポテンシャルは年間を通して一定ではなく変動していると言える．この原因としては，融雪にともなう上流域からの地表水および浅層地下水の流入や，降雨が増加することによって，共通電極を設けた地中に比べて表層付近において電荷の移動が活発になっている可能性がある．

以上の，気象等の要因によって起こっていると考えられる微小電位変動は，地盤内で破壊にともない発生する

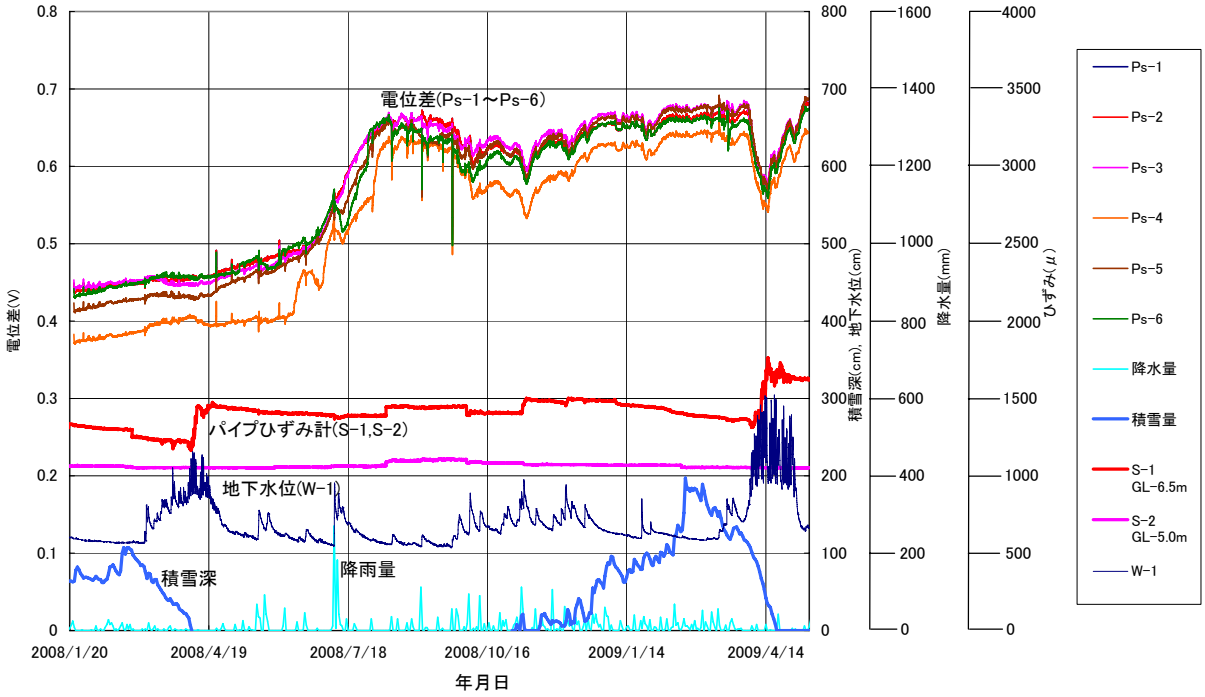

図-2 微小電位の年変動（各地表電極と地中電極間の電位差）

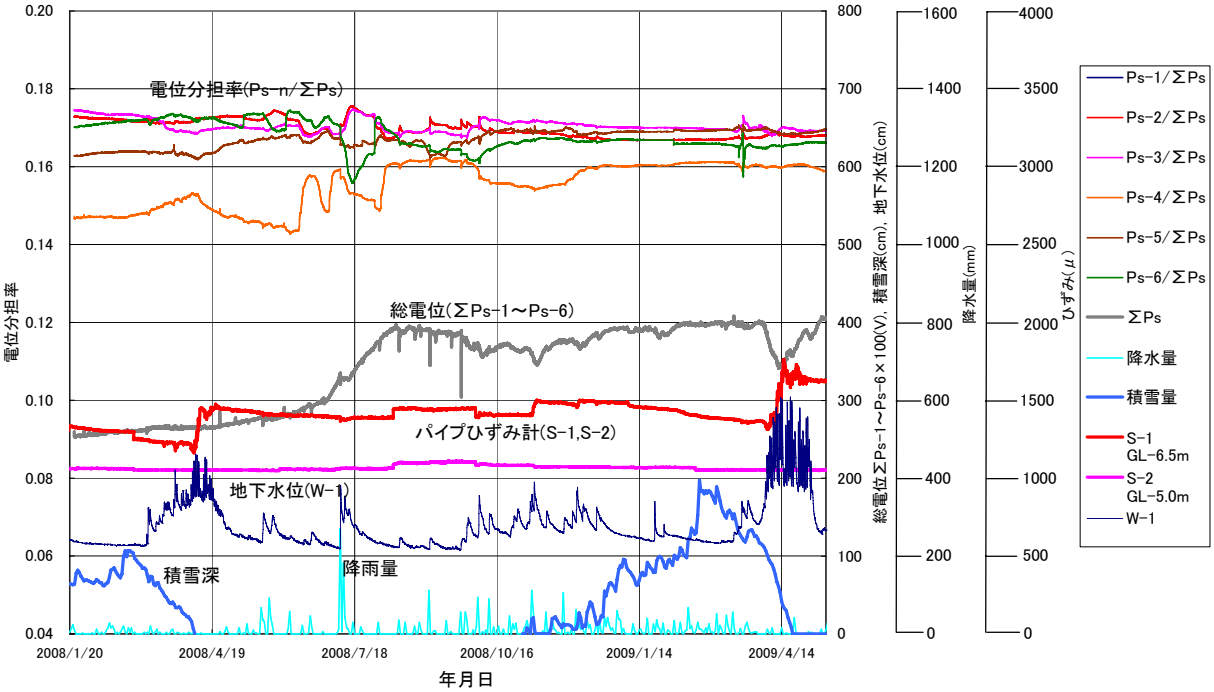

図-3 電位分担率の変動傾向

と考えられる微小電位変動とは異なり，外的なノイズによる影響と考えられる．また，これらの外的なノイズが微小電位に及ぼす影響の度合いは年間を通して一定ではなく，季節変動がある可能性が高い．

4. 電位分担率による評価

電位分担率は，前報[5]にて筆者らが提案する指標で，式(1)に示すように，ある微小電位観測場全体が持つ電気的ポテンシャルのうち，その地点がどれだけのポテンシャルを分担しているかをあらわす指標である．**図-3**に各電極の電位分担率を時系列で示す．

$$R_n = Ps\text{-}n / \Sigma Ps \qquad (1)$$

R_n:地表電極 Ps-n の電位分担率

ΣPs: $Ps\text{-}1 + Ps\text{-}2 + Ps\text{-}3 + \cdots Ps\text{-}n$

電位分担率 R_n は，微小電位の変動と同様に冬季に比べて夏季の方が顕著に変動する傾向が見られる．

前報[5]では，2008 年 4 月の融雪期における斜面変状の前後の電位分担率に着目し，斜面変状に先行して 3 月頃に Ps-3 と Ps-6 などで電位分担率が逆転する現象が認め

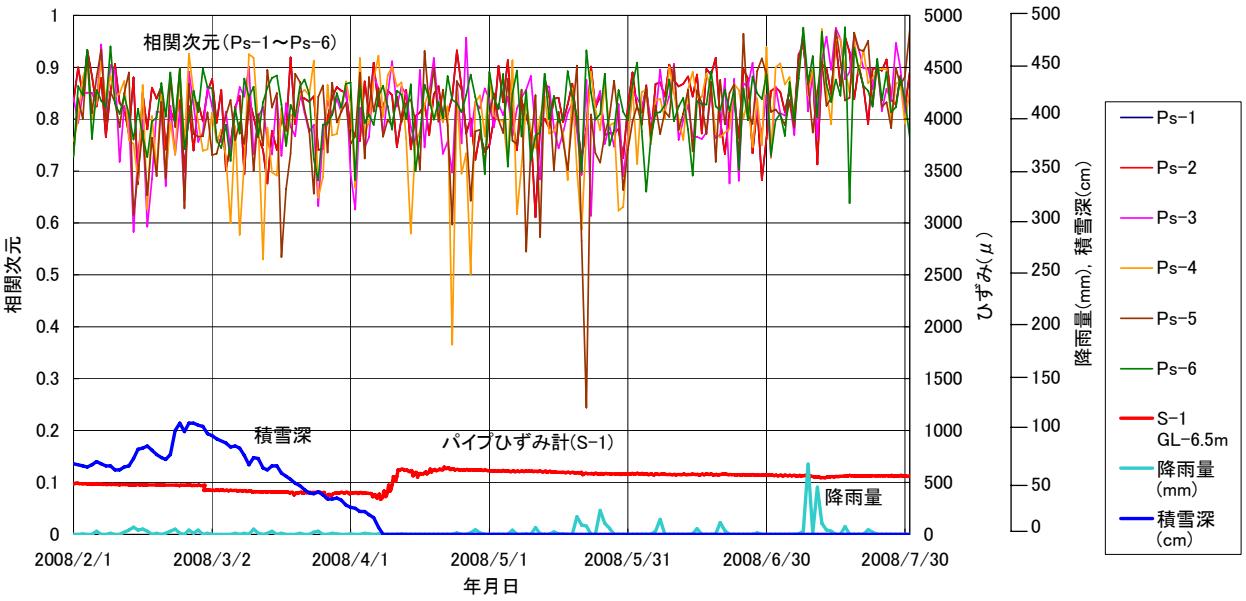

図-4 フラクタル解析による相関次元の変動傾向

られることを報告した．同様に 2009 年 4 月の融雪期に着目すると，融雪前の 3 月頃までほとんど変動することなく推移していた電位分担率が，斜面変状が始まる時期に Ps-1，Ps-3，Ps-5 などで逆転する現象が認められ，その後大きな斜面変状が起こっている．

以上のように，斜面変状に先行して電位分担率の変動が識別されたことから，電位分担率が斜面不安定化に至る臨界状態を示す指標となる可能性が示唆される．しかしながら，斜面変状が収束した後で電位分担率が収束する傾向は認められないことや，電位分担率の変動量と斜面変状の大きさに相関性がないことから，斜面崩壊や不安定化を予測するための定量的なしきい値を定めにくく，斜面不安定化予測の実用に向けては課題が残されている．

5. 微小電位観測データへの解析的手法の適用

(1) フラクタル解析

岩盤崩壊や斜面変状を一種の臨界現象であると考えると，フラクタル解析が有効である可能性がある．臨界点近傍では，様々な物理量のゆらぎが大きくなり秩序を失うようにして発散することが知られており，この現象を捉えるのにフラクタル次元が有効と考えられている[9]．

フラクタル解析によって得られた相関次元を**図-4** に示す．相関次元はフラクタル次元の一種で，微小電位の時系列グラフの形状の複雑さを表す指標である．臨界現象である斜面変状の発生が近づくにつれて微小電位の変動は規則的であった傾向が複雑になり，相関次元が大きくなることが期待される．相関次元の算出には 10 分間隔に整理した各電極の電位差を 24 時間（144 データ）ごとのデータセットに区切って，時系列変動に対する相関次元を試算した．すなわち図は，電位差を時系列にプロットした曲線を 24 時間ごとに区切って，その形状の複雑さを示す指標として相関次元[9]を求めたものである．

相関次元 D_2 は式(2)に示すように相関積分 C(r)の対数軸上の傾きとして算出される．相関積分はアトラクタを構成する任意の点 xi を中心とする半径 r の円を考えた場合に円に含まれる点の数を表し，式(3)で求められる．（ここで，n はデータ点の数，H(x)は x≧のときに 1，x<0 のときに 0 を返すヘビサイド関数．）

$$D_2 = \frac{\log C(r)}{\log r} \tag{2}$$

$$C(r) = \frac{1}{n^2}\sum H(r - |xi - xj|) \tag{3}$$

図より，この方法で試算した相関次元には，斜面変状の前後で特に明瞭な特徴が認められなかった．

今回の試算では，観測された電位差を正規化等の処理をおこなわず機械的に 24 時間ごとに相関次元を求めた．相関次元を指標として臨界状態を識別するためには正規化等の処理方法や，データの区切り方法についてさらなる検討が必要であると考えられる．

(2) 主成分分析

野外における微小電位観測では，降雨などの気象要因による影響が大きいため，破壊に起因する微小電位変動を識別しにくいことが課題となる．そこで，微小電位の時系列データに対して，主成分分析（principal component analysis:PCA）の適用を試みた．斜面崩壊や岩盤崩落などの監視すべき範囲が限られた場では，降雨などの外的要因に起因する微小電位変動は観測フィールド全体でほぼ斉一に影響を受けると考えられるため，これらの影響は第一主成分として現れることが期待される．

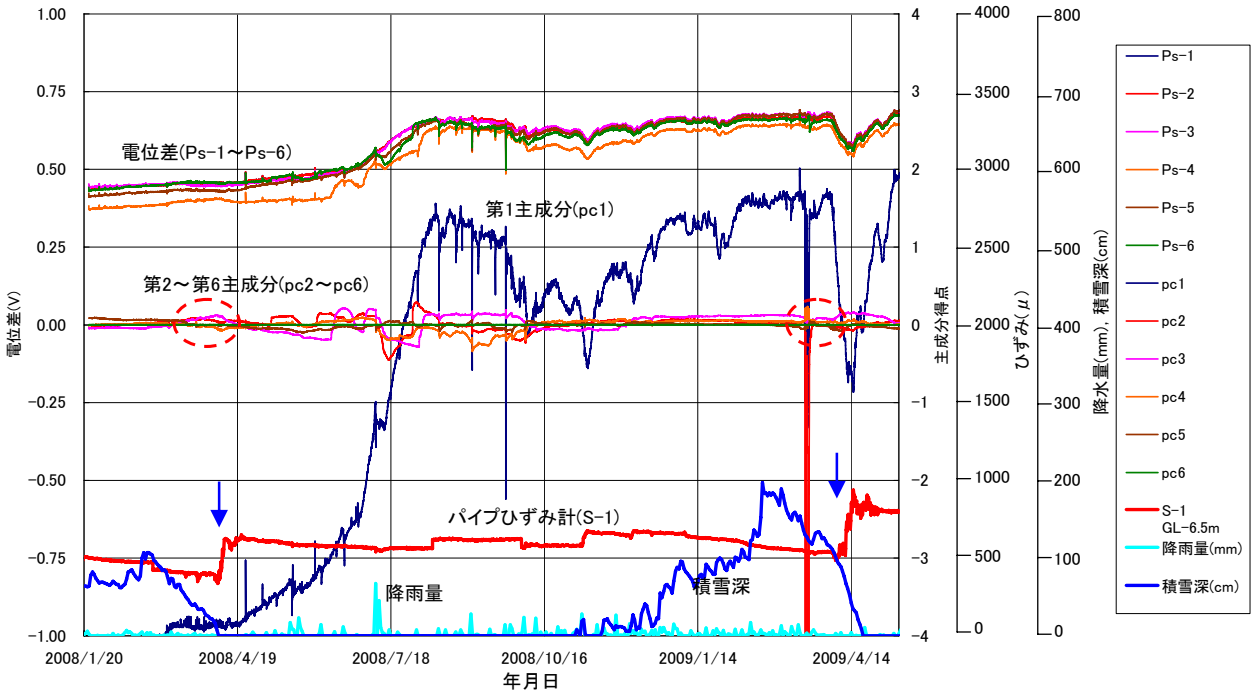

図-5 主成分分析による主成分得点の変動傾向

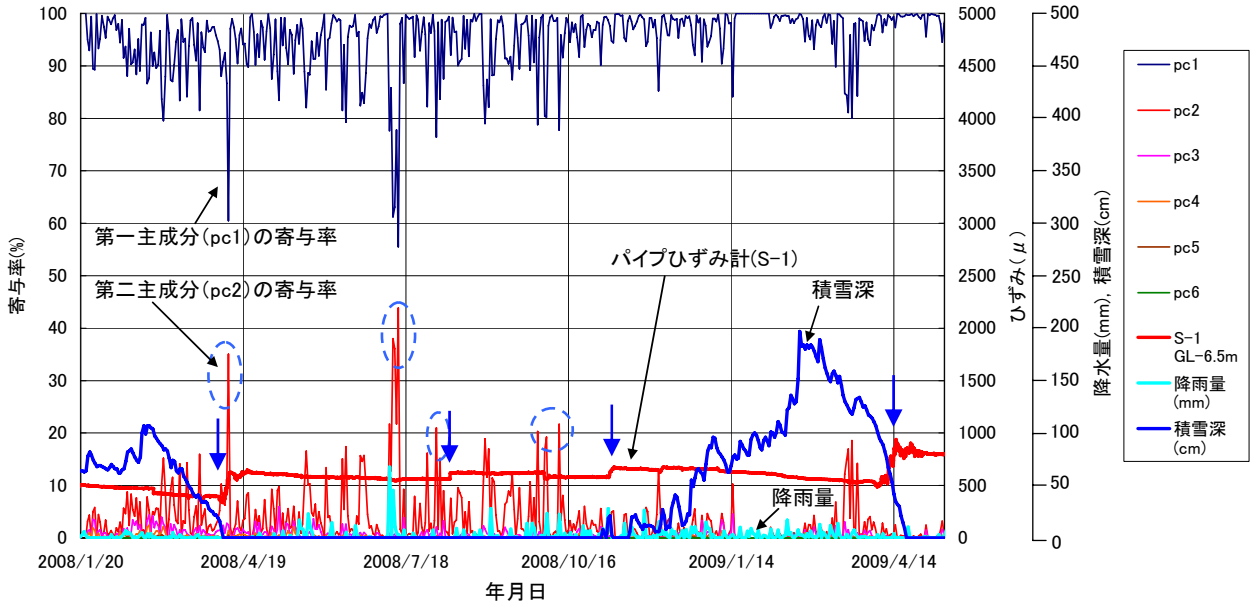

図-6 主成分分析による寄与率の変動傾向

主成分分析とは，多変量データの持つ情報を少数個の総合特性値に要約する手法で，複数の要因が複雑に作用している複数のデータに対して，それらを合成し卓越する成分に分け，複数（変数の数と同数）の主成分を抽出する分析方法である．

主成分分析によって得られた主成分得点を図-5 に，24 時間ごとに試算した寄与率を図-6 にそれぞれ示す．この場合，変数である電極の数が 6 個のため第一から第六までの 6 つの主成分が抽出される．主成分分析では，ある広がりを持ったデータに対し，分散が最大となるベクトルを軸とする主成分を抽出する．主成分得点とは，各変数を主成分を表す軸に投影した位置の原点からの距離で，主成分の方向に対しての平均値からの離れを表す指標である．また寄与率とは，各主成分が全体でどの程度の割合を占めているかを表した指標である．主成分得点の試算には 1 時間間隔に整理した各電極の電位差を使用し，寄与率の試算には 24 時間（24 データ）ごとのデータセットに区切って寄与率の時系列変動を求めた．図より，パイプひずみ計の変動に先行して，主成分得点の変動および，寄与率の変動がいくつか認められる．すなわち図-5 より主成分得点に着目すると，第一主成分が全体の電位差の傾向を良く表しており，春から夏にかけて電位差の絶対値が大きくなる傾向に呼応して第一主成分が大きく変動している．第二主成分以下は第一主成分

に比べて絶対値の変動は少ないが，パイプひずみ計の大きな変動が起こる融雪期に先行して主成分得点の変動が認められる．また，**図-6** より寄与率に着目すると，各電極の電位差は第一主成分が 80%以上を占める期間がほとんどであるが，パイプひずみ計が変動する期間において第二主成分以下の寄与率が 20%～40%に大きくなる期間が認められる．

上記の傾向から，第一主成分が降雨などの外的要因に起因する微小電位変動を表し，第二主成分以降の主成分が地盤の破壊に起因する微小電位変動を表していると仮定すると，第二主成分以下の寄与率の上昇に着目することが斜面不安定化の予測に有効な指標となり得る可能性がある．

6. おわりに

本報告では，変状斜面における微小電位の野外観測事例を示し，解析的手法を用いた観測データの評価方法について考察した．その結果より以下の新たな知見を得た．

①気象等の外的要因によって起こっていると考えられる微小電位変動の影響は年間を通して一定ではなく季節変動がある可能性が高い．

②電位分担率は斜面不安定化に至る臨界状態を示す指標となる可能性が示唆されるが，斜面崩壊や不安定化を予測するためのしきい値の設定などの点で斜面変状予測の指標として用いるためには課題が残る．

③フラクタル解析による相関次元を指標として臨界状態を識別するためには正規化等の処理方法や，データの区切り方法についてさらなる検討が必要である．

④主成分分析による第二主成分以下の寄与率は斜面不安定化の予測に有効な指標となる可能性がある．

今後は，微小電位観測による斜面不安定化予測の実用化に向けて，観測データの正規化等の処理方法や，データの区切り方法についてさらなる試行をおこない，斜面崩壊や不安定化を予測するためのしきい値の設定方法についても検討を重ねる計画である．

参考文献

1) 長尾年恭：地震予知研究の新展開，p.35，近未来社，2001.
2) 日本地震学会地震予知検討委員会編：地震予知の科学，東京大学出版会，pp.71-72，2007.
3) 村山秀幸，伊藤由明，鈴木信行，伊東佳彦，日下部祐基，伊藤憲章：低土被り区間のトンネル掘削における微小電位観測を用いた地表面モニタリング，第 36 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.17-22，2007.
4) 村山秀幸，加藤卓朗，伊東佳彦，日下部祐基，橋本祥司，長尾年恭：微小電位計測による岩盤崩壊監視技術に関する基礎的研究-その 2：地盤の凍結・融解に伴う微小電位の発生特性に関する検討-，土木学会第 34 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.141-146，2005.
5) 丹羽廣海，村山秀幸，伊東佳彦，日下部祐基，宍戸政仁：変状斜面における微小電位変動傾向と評価方法に関する考察，第 38 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集，pp.51-56，2008.
6) 村山秀幸，加藤卓朗，長尾年恭，小野義之，入野寛彦：地電位観測による地盤災害予測技術開発への試み，土木学会第 56 回年次学術講演会，pp.350-351，2001.
7) 宍戸政仁，伊東佳彦，日下部祐基，村山秀幸，丹羽廣海，長尾年恭：室内岩石試験における微小電位発生のメカニズムと発生傾向の検討，第 38 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集，pp.167-171，2008.
8) 丹羽廣海，村山秀幸，伊東佳彦，日下部祐基，宍戸政仁：変状斜面における微小電位の観測，第 43 回地盤工学研究発表会，pp.1971-1972，2008.
9) 高安秀樹：フラクタル，pp.49-54，朝倉書店，1986.

TENDENCY OF MICRO GEO-ELECTRIC SIGNALS ON FIELD MEASUREMENT AND CASE STUDY OF A FAILURE PREDICTION

Hiroumi NIWA, Hideyuki MURAYAMA, Yoshihiko ITO,
Yuki KUSAKABE, Masahito SHISHIDO and Akihiro TAKEUCHI

Using the Micro Geo-Electric Signals (MGES), we carried out a field measurements of a slope in a cold and snowy region, in order to predict rock collapses and slope failures for these several years. The field measurements showed that it is difficult to recognize the irregular changes of MGES generated prior to failure because the remarkable changes by the rainfall are included in the MGES. We had described a case study for the failure prediction method using the index of potential ratio in our previous paper. This paper describes recent MGES data in an unstable slope, and discusses the analysis methods to improve the accuracy of prediction.