

## 地すべり危険度区分における空中電磁法の適用性

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 独立行政法人農業工学研究所 公開日: 2024-03-08 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 中里, 裕臣, 黒田, 清一郎, 奥山, 武彦 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="https://doi.org/10.24514/0002000064">https://doi.org/10.24514/0002000064</a>

## 地すべり危険度区分における空中電磁法の適用性

中里裕臣\*・黒田清一郎\*・奥山武彦\*・伊藤吾一\*\*・佐々木 裕\*\*\*

### 目 次

緒言 .....	197	1 周波数別見かけ比抵抗分布図 .....	202
試験研究方法 .....	197	2 見かけ比抵抗分布の特徴 .....	202
1 災害素因の面的把握手法の必要性 .....	197	3 Cブロックにおける検討 .....	202
2 調査地概要 .....	198	結言 .....	202
3 空中電磁法 .....	199	参考文献 .....	203
探査結果および考察 .....	202	Summary .....	204

### 緒 言

日本の国土は世界でも有数の変動帯に位置し、固結度の低い比較的新しい時代の地層が斜面を形成している。ここに地震震源域や火山帯が重なり、さらにはモンスーン帯という気候条件も重なり、国民は土砂災害と背中合わせの生活を強いられていると言っても過言ではない。自然災害による人的被害者数の推移を見ると、年々相当数の犠牲者が生じていることがわかり(古谷, 1998), 1967年～1998年間の土砂災害・洪水災害を合わせた斜面災害による犠牲者数は兵庫県南部地震を含む地震災害の犠牲者数に匹敵する(Fig. 1; 佐々, 2002)。

そこで、本報告では土砂災害の防止・軽減のためには災害素因の面的把握手法の確立が必要であることを論じ、その一手法として空中電磁法を取り上げ、破碎帯地すべり地における適用事例から同法の有効性を示す。

なお、本報告は交付金プロジェクト「集中豪雨によるため池等の災害発生機構の解明と予測技術の開発, H13～H15」の成果の一部をとりまとめたものである。空中電磁法探査の実施では、高知県長岡郡大豊町および大日本コンサルタント株式会社の関係各位に多大なご協力とご理解を賜った。ここに深く感謝の意を表す。

### 試験研究方法

#### 1 災害素因の面的把握手法の必要性

近年の土砂災害としては1997年の鹿児島県出水市針原

\* 造構部土木地質研究室

\*\* 「中国四国農政局」

\*\*\* 「九州大学」

平成16年1月5日受理

キーワード：土砂災害・地すべり・空中電磁法・比抵抗

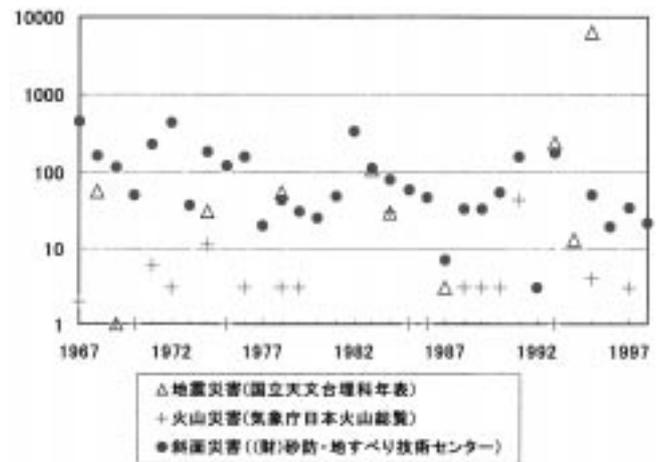


Fig. 1 日本の自然災害による死者・行方不明者数の推移 (佐々, 2002)

Transition of the number of dead and missing person by natural disaster of Japan. (after Sassa, 2002)

川の土石流災害(21名死亡), 1998年の福島県西郷村を中心とする豪雨災害(17名死亡), 1999年の広島市を中心とする豪雨災害(24名死亡)そして2003年の熊本県水俣市宝川内の土石流災害(15名死亡)などが記憶に新しい。これらの災害は1995年の秋田県鹿角市澄川地すべりや1996年の長野県蒲原沢土石流とあわせて、崩壊源の土砂が崩壊後高速で移動し、下流に大きな被害をもたらす特徴を持っている。最近では京都大学防災研究所を中心にこのような土砂災害を「流動性崩壊」と呼び、従来の「斜面の安定性」を重視する防災研究から「崩壊土塊の運動性」に着目する動きがある。

ケーススタディにより個々の斜面の流動性崩壊の発生機構を解明し、移動土塊の運動性と被害範囲を予測することは重要であるが、災害予測では一連の斜面のどこが崩壊するかを明らかにする必要がある。このためには崩壊素因と崩壊誘因の平面分布を重ね合わせ、危険箇所を抽出する作業が不可欠であり、特に地すべりに関しては再活動性がある

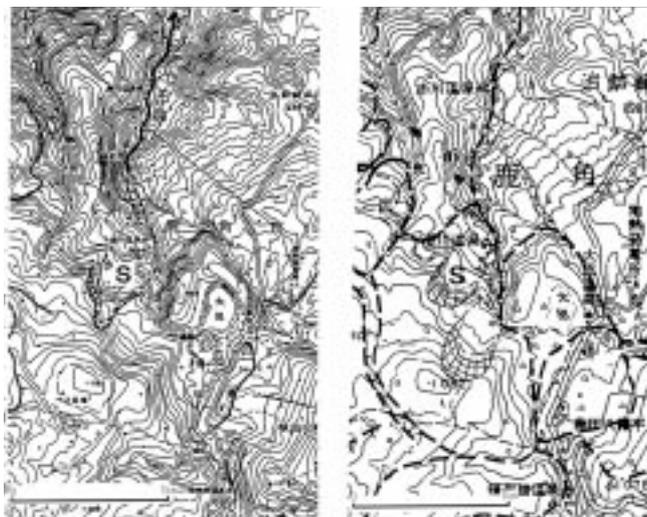


Fig. 2 1995年澄川地すべりの範囲 (左) と地すべり地形分布図「八幡平」(右) (井口, 1998)。Sは活動ブロックを示す。

The area of the Sumikawa Landslide in 1995 (left) and the landslide map of “Hachimantai” (right). (after Inokuchi, 1998) “S” shows the landslide block moved in 1995.

ることから地すべり地形の把握の有効性が知られている。例えば、澄川地すべりでは事前に作成されていた地すべり地形分布図 (清水ら, 1984) の地すべりブロックの範囲で地すべりが再活動した (井口, 1998; Fig. 2)。このように、地すべり地形分布図の防災的意義は大きいが、一方でこの図から活動地すべりブロックの南側の地すべり地形がなぜ動かなかったのかを説明することは困難である。

そこで、次の段階として崩壊地の地質構造、水文状況が調査され、崩壊発生素因に関する斜面の類型化が行われる。1993年南九州豪雨災害と1998年南福島豪雨災害の調査報告 (九州農政局計画部, 1994; 千木良, 1999) における崩壊斜面の類型化の着眼点としては以下のようにまとめられる。

崩壊予備物質の有無 (風化層厚, 未固結堆積物, 破碎帯の存在)

分離面の有無 (断層・節理系の有無と方向性)

間隙水圧を増大させる水文地質構造 (高透水路の存在, パイピングの有無)

このような着眼点は崩壊後に生じた露頭を観察することで得られるものである。断層の伸びや崩壊多発地層の分布などは地表踏査による地質図学的検討である程度推定することが可能であるが、その他の情報の取得には地下地質調査が必要となる。しかし、ボーリング調査やサウンディング調査を斜面全体に対して行うことは現実的に不可能であり、面的に取得可能な何らかの情報によって上記の着眼点を置き換え、危険度区分を行う必要がある。

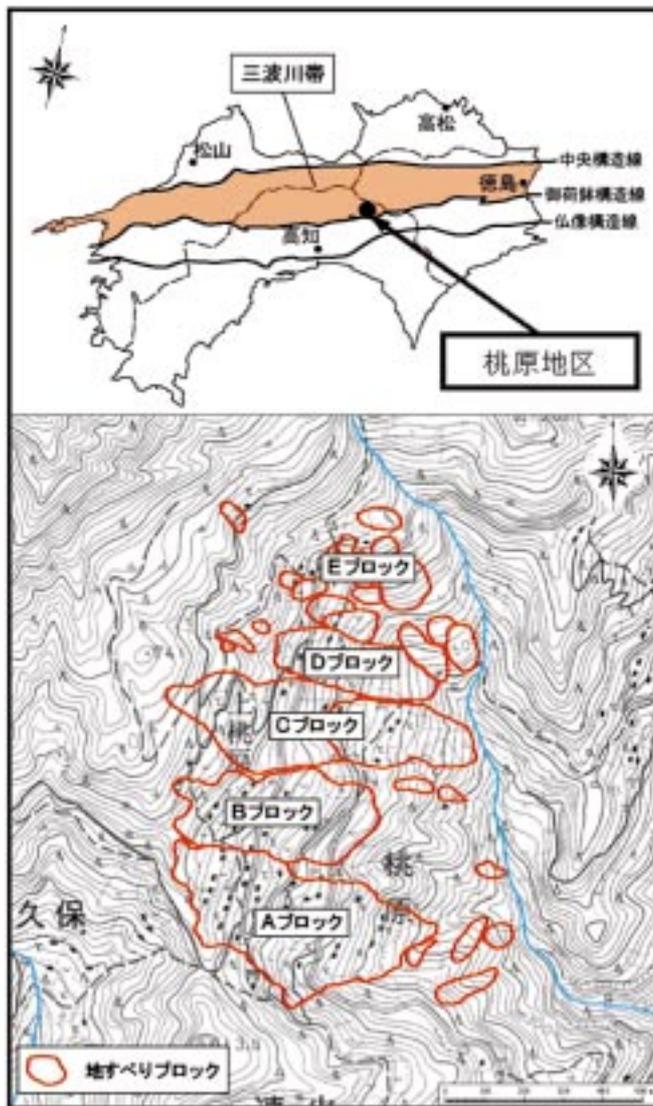


Fig. 3 調査地位置図および地すべりブロック区分図  
Location of the survey site and distribution of landslide blocks

ここで、地盤比抵抗は地層の水飽和度, 間隙率, 間隙水比抵抗及び粘土鉱物含有量によって変化することが知られている (Archie, 1942など)。地すべり土塊は、破碎の進行に伴う上記の比抵抗パラメータの変化に応じて基岩に対する相対的な比抵抗変化を示すことが期待される。地盤比抵抗を求める手法としては比抵抗法 2 次元探査が一般的であるが、電極及び電線の設置を必要とするため、広域的に実施するには作業性やコストにおいて問題がある。そこで、本研究では斜面の広域的な危険度区分を行うために広域的な地盤比抵抗を求める手法として、探査能率の高い空中電磁法を採用した。

## 2 調査地概要

調査地は高知県中北部の三波川帯に位置する地すべり防止区域桃原・西桃原区域 (以下、桃原地区とする) である (Fig. 3)。桃原地区は標高300~700mにかけての平均傾斜約20°の東斜面に位置し、幅100~300m, 長さ500~

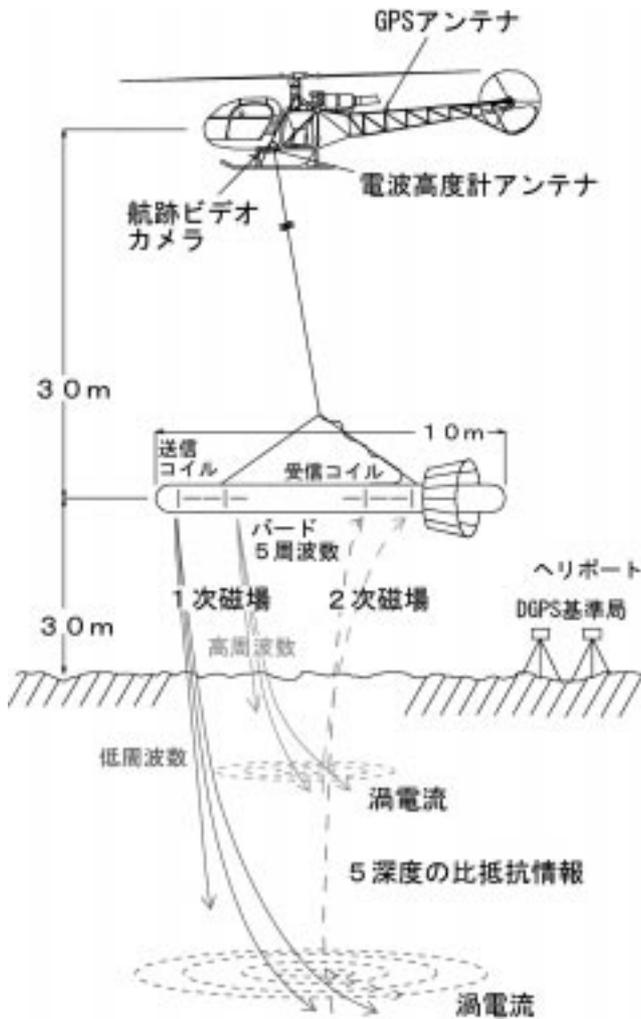


Fig. 4 空中電磁法探査システム  
Survey system of HEM

800mの5つの大規模地すべりブロックが識別されている。大規模ブロックの内部および周辺にはさらに小規模な地すべりブロックが認められている。

本地区の地質構造は斜面に対し見かけ傾斜10~20°の流れ盤を呈し、硬質な砂質片岩の上に脆弱な強剥離性泥質片岩と緑色片岩の互層が分布している。地すべりは泥質片岩と緑色片岩互層中に生じていると考えられ、特にA、BおよびCブロック下部ではすべり面深度は40mにおよび、厚い崩積土が分布している。

3 空中電磁法  
a 概要

空中電磁法は、連続的にある周波数で発信される1次磁場に対して地盤によって誘導される2次磁場の強度を同相(1次磁場と同じ位相)と離相(1次磁場と90°ずれた位相)成分に分離し、各成分の1次磁場に対する2次磁場の強度比を測定し、地盤比抵抗を求める手法である。ヘリコプターを用いる空中電磁法はHEM(Helicopter-borne Electromagnetic Method)とも呼ばれる。低周波数の電

Table 1 探査機器仕様  
Specification of survey equipment

機器	仕様
空中電磁法測定器	DIGHEW-V空中電磁法システム 曳航型バード、バード長：約10m 多重コイル配置(5周波数) 鉛直コイル配置：27,500Hz, 1,100Hz 水平コイル配置：137,500Hz, 5,500Hz, 220Hz 測定成分：各周波数における2次磁場/1次磁場強度比の同相・離相2成分(ppm単位) ノイズレベル：1次磁場強度比の1ppm以下 サンプリング：10サンプリング/秒
電波高度計	Honeywell AA-300
航跡測定システム	Trimble4000DGPSナビゲーションシステム：誤差±5m ビデオカメラ

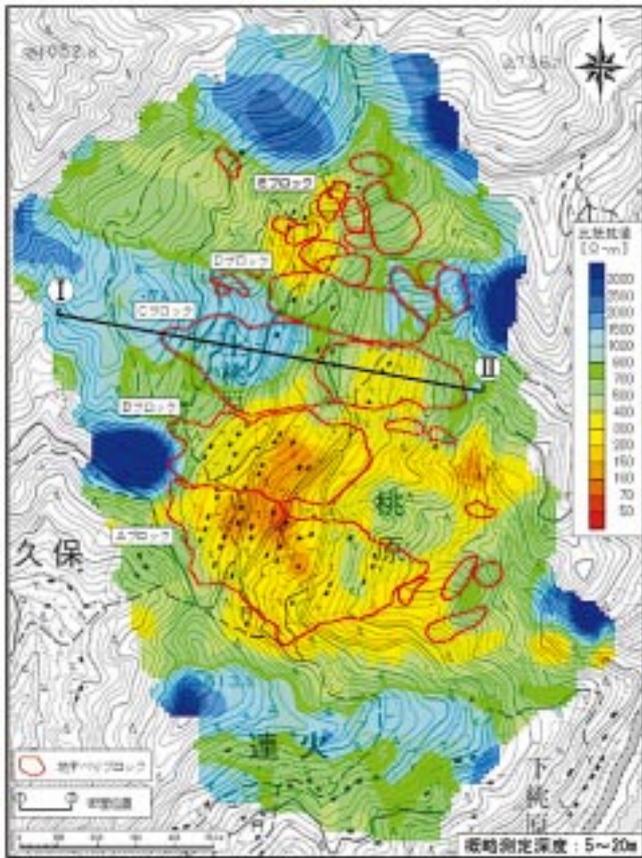


Fig. 5 飛行測線配置図(測線の1目盛は20データ毎に表示)  
Distribution of Flight survey lines

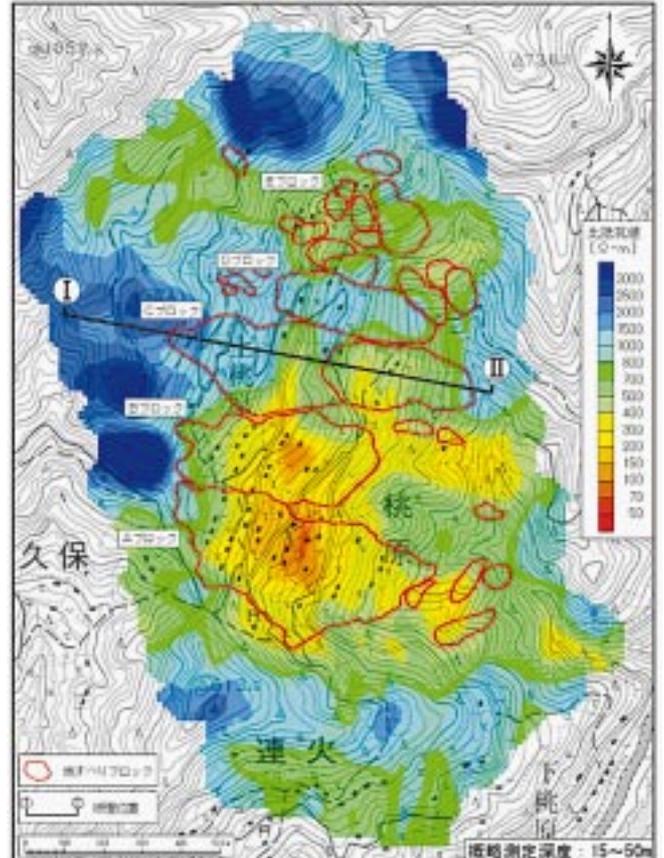
磁波ほど地下深部に透入するため、複数の周波数を使用することにより幅広い深度の探査を行うことができる。なお空中電磁法理論の詳細については物理探査学会(1998)などを参照されたい。

探査システムをFig. 4に、測定機器仕様をTable 1に示す。電磁波の送受信コイルはバードと呼ばれる筒型の容器に収納され、ヘリコプター機体の影響を避けるため、30mのワイヤーでつり下げられる。バードは対地高度約30mを保って、飛行速度30km/hで曳航され、航跡はDGPSシステム、電波高度計及び航跡ビデオカメラによって記録される。データサンプリングポイントの位置誤差は±5m以内である。

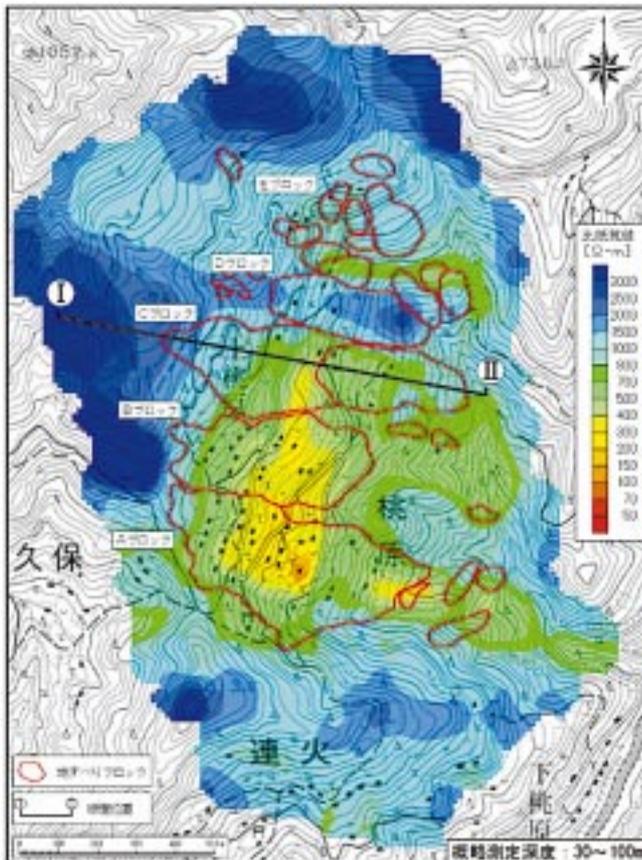
バードには137,500, 27,500, 5,500, 1,100, 220Hz



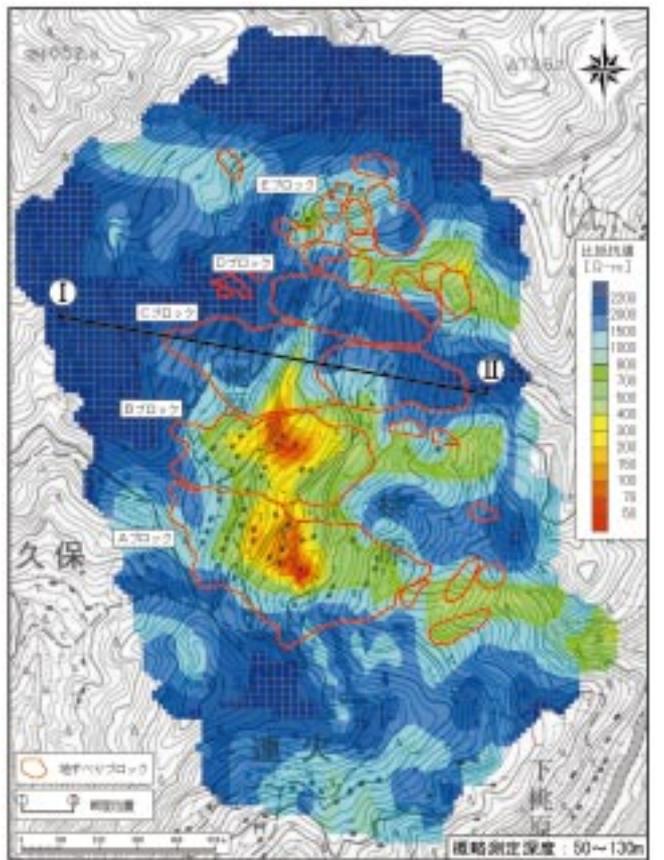
137,500Hz 概略探查深度 5 ~ 20m



27,500Hz 概略探查深度 15 ~ 50m



5,500Hz 概略探查深度 30 ~ 100m



1,100Hz 概略探查深度 50 ~ 130m

Fig. 6 桃原地区見かけ比抵抗分布図 (4周波数: 137,500Hz, 27,500Hz, 5,500Hzおよび1,100Hz)

Apparent resistivity distribution in Momohara area at four frequencies: 137,500Hz, 27,500Hz, 5,500Hz and 1,100Hz.

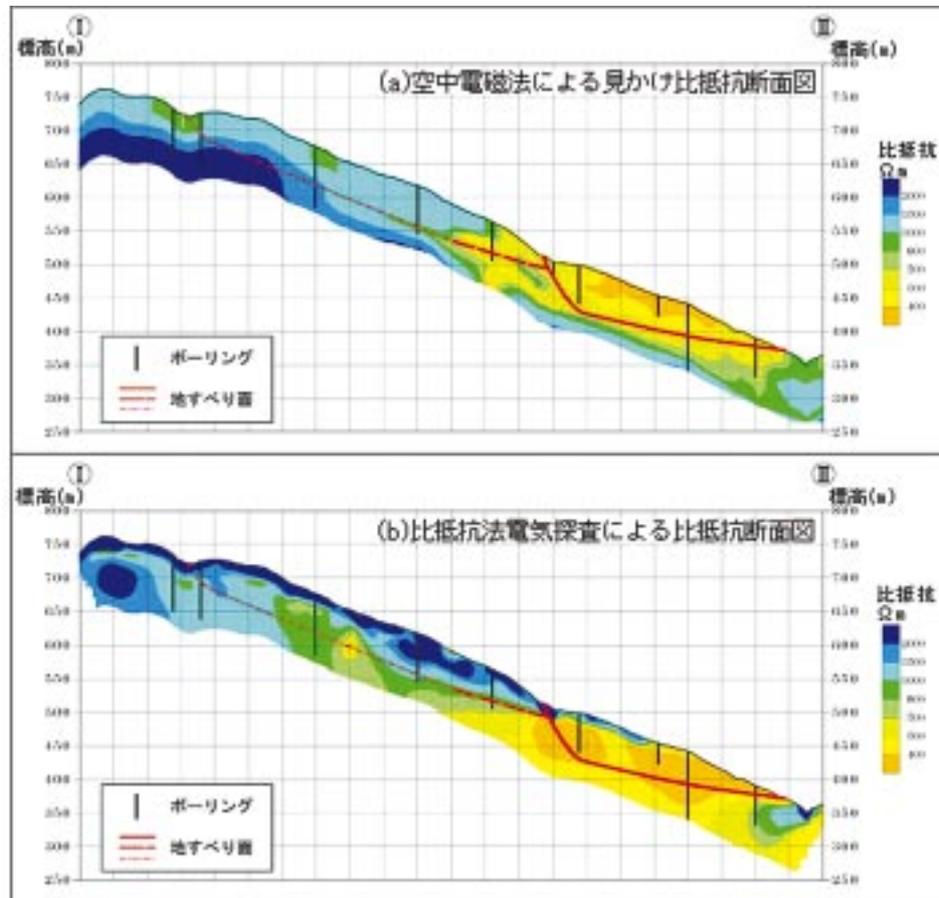


Fig. 7 Cブロック主測線比抵抗断面図:(a)空中電磁法による見かけ比抵抗断面図,(b)比抵抗法2次元探査による比抵抗断面図  
Resistivity section along center line of C block: (a)apparent resistivity section by HEM, (b)inverted resistivity section by 2D resistivity survey.

の周波数用の5組の送受信コイルが収納されており、測定時には5周波数の電磁波が同時に連続的に送信され、受信コイルでは1秒間に10データがサンプリングされる。

#### b 探査・解析の流れ

空中電磁法では、探査に先立ち、調査地周辺にヘリポートを確保し、探査範囲の安全性を確認した上で飛行申請を行う。ヘリコプターは低空を微速で何度も往復しながら探査を行うため、探査範囲周辺住民への周知も重要である。

探査および解析は以下の流れに沿って行われる。

地上における機器較正(固定治具による位相調整)

高々度(約400~500m)におけるゼロレベル較正

測定飛行(5周波数の同相・離相成分比測定)

ドリフト補正

航跡図の確定

探査データのGIS化

見かけ比抵抗計算

受信コイルでは2次磁場とともに1次磁場も検知されるため、1次磁場の影響を機械的に除去して2次磁場のみを測定している。しかし、1次磁場強度に対して2次磁場強度は100万分の1から1万分の1オーダーと極めて小さいため、主に1次磁場の除去の不完全さに起因する周波数毎のゼロレベルの変動は空中電磁法の探査精度を確保する上

で大きな問題となる。本研究では、において固定治具を用いて地上における較正の確実性を向上させ、では大地の影響を受けない高々度でゼロレベルを較正したうえで、同一地点で複数の高さでデータを取得し、ドリフト量を未知数として逆解析を行い、においてドリフト補正を行う手法(小西, 2002a; 2002b)により測定精度の向上に努めた。

空中電磁法では、Frischknecht(1967)の電磁応答式に基づき、均質大地に関する5つの電磁応答パラメータ(透磁率、周波数、地盤比抵抗、測定高度および送受信コイル間隔)のうち、透磁率(一般的な地盤では1とされる)、周波数および送受信コイル間隔を既知として、測定される同相・離相成分比に対応する地盤比抵抗と測定高度の組み合わせを得ることができる。この関係を基に各周波数毎の見かけ比抵抗が観測点毎に計算される(小西, 1998)。

#### c 探査諸元

探査範囲は5つの大規模地すべりブロックを含む2.2km<sup>2</sup>の範囲であり、測線間隔は100mを標準として、測線本数23測線、測線延長22.3kmの探査を実施した(Fig. 5)。総測定飛行時間は2時間20分であった。

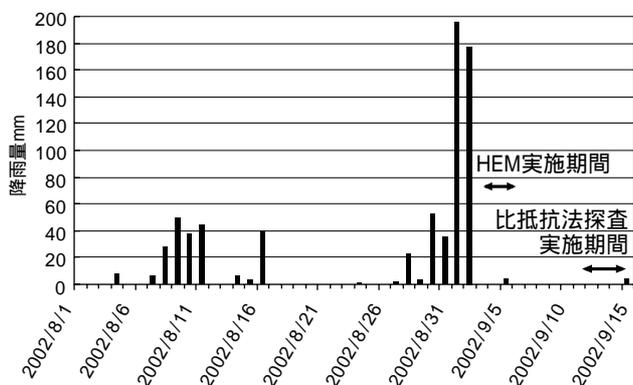


Fig. 8 桃原地区日降雨量 (2002.8.1-2002.9.15)  
Daily precipitation at Momohara area(2002.8.1-2002.9.15)

## 探査結果および考察

### 1 周波数別見かけ比抵抗分布図

空中電磁法による桃原地区の周波数別見かけ比抵抗分布をFig. 6に示す。周波数に対応する探査深度は地盤比抵抗の関数でもあるため、各周波数の概略探査深度は幅を持ったものとなっている。また、使用周波数の2倍の数値は見かけ比抵抗を計算できる応答限界の目安となるため、1,100Hzの図では表示上限を2,200 mとし、最低周波数である220Hzのデータについては、ほとんどの探査点で応答限界を超える440 m以上となったため、図示していない。

### 2 見かけ比抵抗分布の特徴

Fig. 6によると、低周波数すなわち相対的深部の見かけ比抵抗分布図ほど寒色系で示される高比抵抗部の範囲が増大している。1,000 m以上の高比抵抗部は地すべりブロックを取り巻く尾根部を中心に分布し、1,000 m以下の低比抵抗部は地すべりブロックを中心に分布するため、高比抵抗部は基岩の分布を、低比抵抗部は土砂化した地すべり崩積土の分布を示していると考えられる。

### 3 Cブロックにおける検討

空中電磁法では探査範囲に対して3次元的に密な比抵抗データを取得しているため、補間により飛行測線にとらわれず任意方向の見かけ比抵抗断面図を作成することができる。Cブロックでは、主測線沿いにボーリングデータおよび比抵抗法2次元探査による比抵抗断面図が得られているため、空中電磁法データによる主測線沿いの見かけ比抵抗断面図を作成し、探査結果の妥当性を検討した。空中電磁法の見かけ比抵抗断面図は、観測点毎に測定周波数に対応する平均透入深度に見かけ比抵抗値を配し、深度方向に3次スプライン補間を施して作成される(Sengpiel, 1988)。

Fig. 7 (b)はCブロック主測線で実施された比抵抗法2次

元探査(2極法, 電極間隔5 m, 解析深度100 m)の逆解析による比抵抗断面図である。地すべりブロック上部では700 m以上の高比抵抗部, ブロック下部では700 m以下の低比抵抗部が分布する。測線上で実施された調査ボーリングとの比較によると、地すべり崩積土と見なされるN値50未満の部分は地すべりブロック下部の低比抵抗部の分布とほぼ一致し、N値50に相当する比抵抗値は300~350 mである。ただし、地表付近で地下水位の低い部分では崩積土でも350 m以上を示す場合がある。一方、地すべりブロック上部では土砂化した部分はごく表層部にしか分布せず、亀裂の発達した結晶片岩が分布する。この地すべりブロック上部におけるボーリングでは深度40~60 m付近に粘土層が追跡され、岩盤地すべりの存在が推定されている。このように地すべり地形が明瞭で、地盤比抵抗が高い場合は、岩盤すべりである可能性を指摘できる。

Fig. 7 (a)は空中電磁法による見かけ比抵抗断面図である。Fig. 7 (b)と比較すると、地すべりブロック下部で低比抵抗、ブロック上部で高比抵抗を示すパターンは調和的であり、空中電磁法によるブロック下部の低比抵抗部は、土砂化した地すべり崩積土の分布を示すことが確認できる。また、ブロック下部よりは高比抵抗であるが基岩に比べると比抵抗の低いブロック上部は岩盤地すべりブロックに相当すると考えられる。しかし、細かく見るとブロック上部において比抵抗法電気探査(Fig. 7(b))では表層ほど高比抵抗であるのに対し、空中電磁法(Fig. 7(a))では深部ほど高比抵抗であるなど調和しない点も認められる。空中電磁法探査は2002年9月4~6日、比抵抗法電気探査は2002年9月12~15日のほぼ同時期に実施されたが、空中電磁法探査の直前には台風による豪雨があった(Fig. 8)。この時期にCブロック上部には地下水観測孔は設置されていなかったため、地下水面の位置は不明であるが、空中電磁法探査時には比抵抗法電気探査時に比べ、地表付近がより湿潤状態にあったと推定される。比抵抗法電気探査結果を基本として考えると、上記の不調和の要因としては、このような探査時の水文状況の違いや、空中電磁法では表層部の高比抵抗層は空気層との区別が困難であり、探査データがより下層の比抵抗を反映している可能性などが考えられる。この点に関しては、今後空中電磁法データについても逆解析を行い、比抵抗断面図の精度を向上させようとして検討する必要がある。

## 結言

土砂災害の発生予測を行うため、危険斜面を特定する際に必要な地下地質情報として地盤比抵抗に着目し、これを広域的に取得できる手法として空中電磁法を取り上げた。そして、空中電磁法を破碎帯地すべり地に適用し、探査結果による低比抵抗部が地すべり崩積土の分布を反映してい

ることを明らかにした。さらに空中電磁法では地盤比抵抗情報を3次元的に取得しているため、任意の断面で地下構造の検討が可能であることを示した。

以上により、空中電磁法による比抵抗探査は、土砂災害予測に必要な広域的崩壊素因分布調査に有効であるといえる。今後は空中電磁法データの逆解析により深度方向の探査精度を向上させ、定量的な比抵抗分布による地すべり危険度区分手法について検討を進める予定である。

### 参考文献

- 1) Archie, G.E. (1942): The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics, *Trans. AIME*, 146, 54-62
- 2) 千木良雅弘 (1999) : 西郷村で多発した斜面崩壊の地質的要因, 地すべり学会シンポジウム・地すべり発表討論会「平成10年度斜面災害・土砂災害の特徴と実態」予稿集, 30-37
- 3) 物理探査学会 (1998) : 第6章 電磁探査, 物理探査ハンドブック, 297-398, 物理探査学会, 東京
- 4) Frischknecht, F. C. (1967): Fields about an oscillating magnetic dipole over a two-layer earth, and application to ground airborne electromagnetic surveys, *Quarterly of the Colorado School of Mines*, 62, 1, 326p.
- 5) 古谷尊彦 (1998) : 土砂災害研究の現状と今後の方向について, 土砂・洪水災害研究に関するワークショップ論文集, 1-10, 防災科学技術研究所, つくば
- 6) 井口 隆 (1998) : 澄川地すべり発生前の地すべり地形と地すべり変動, 地すべり, 35, (2), 11-19
- 7) 小西尚俊 (1998) : 空中電磁法による3次元探査, 物理探査, 51, (6), 643-658
- 8) 小西尚俊 (2002a) : 空中電磁法測定のカリブレーション誤差について, 物理探査, 55, (1), 45-54
- 9) 小西尚俊 (2002b) : HEMレベリングにおける新ドリフト補正手法の開発, 物理探査, 55, (4), 249-259
- 10) 九州農政局計画部 (1994) : 平成5年南九州豪雨災害調査報告書, 83p, 九州農政局, 熊本
- 11) 佐々恭二 (2002) : 地震豪雨時の高速土砂流動現象メカニズムの解明 - 大都市圏での災害とその防災 -, 都市域斜面防災の世紀, 7-33, 文部科学省科学技術振興調整費・APERIFプロジェクト, 東京
- 12) Sengpiel, K. P. (1988) : Approximate inversion of AEM data from a multilayered ground, *Geophys. Prosp.*, 36, 446-459
- 13) 清水文健・大八木規夫・井口 隆 (1984) : 地すべり地形分布図「八幡平」防災科学技術資料, No.85, 国立防災科学センター, つくば

# Applicability of helicopter electromagnetic survey for landslide hazard assessment

NAKAZATO Hiroomi, KURODA Seiichiro, OKUYAMA Takehiko,  
ITO Goichi and SASAKI Yutaka

## Summary

It is important to recognize the distribution of landslide blocks for the forecast and prevention of landslide disasters. Geological survey and air-photo interpretation are principal methods of regional scale investigations for evaluating the risk of landslides. However, it is necessary to understand not only the characteristic topography of landslides but also the sub-surface conditions of landslide bodies, and to evaluate a risk of landslides for improving the accuracy of disaster forecasts. The porosity and moisture content are expected to increase with the stage of failure within the landslide body. Therefore, landslide bodies seem to show a characteristic value of resistivity corresponding to the stage of failure in each landslide body due to dependence of the resistivity on the porosity and moisture content of the material. We propose the helicopter-borne electromagnetic method (HEM) as an effective way to evaluate the regional risk for landslide disasters, based on the results of the application of the HEM in a landslide area of the shear zone type, the Sanbagawa tectonic zone in Kochi Prefecture.

The results of the HEM showed horizontally low apparent resistivity inside the landslide block, and showed vertically high apparent resistivity in deeper areas. These tendencies show that the distribution of a landslide soil mass can be estimated by the distribution of zones of low apparent resistivity. According to an examination of a landslide block based on borehole data and two-dimensional resistivity survey data, it was confirmed that the landslide body corresponded to a low resistivity part of 350  $\Omega$ m or less. Furthermore, we constructed an apparent resistivity cross section along a two-dimensional resistivity survey line based on HEM data acquired three-dimensionally, and showed that the resistivity distribution in both resistivity cross sections generally corresponded. Therefore, we clarified that the HEM could effectively determine the distribution of landslide bodies in the landslide areas of the shear-zone type.

In this study, we performed an HEM survey of 22.3km survey lines in the range of 2.2 km<sup>2</sup> within a flight time of 2 hours and 20 minutes. The use of such a highly efficient survey method will be expected to applied widely to landslide hazard assessment due to its improvement of the accuracy of section analysis and by developing an inversion technique in the future.

Keywords : sediment disasters, landslide, helicopter-borne electromagnetic method, resistivity