

第3回 無降雨時等の崩壊研究会

【資料-2】 空中電磁探査調査



国土交通省

国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management



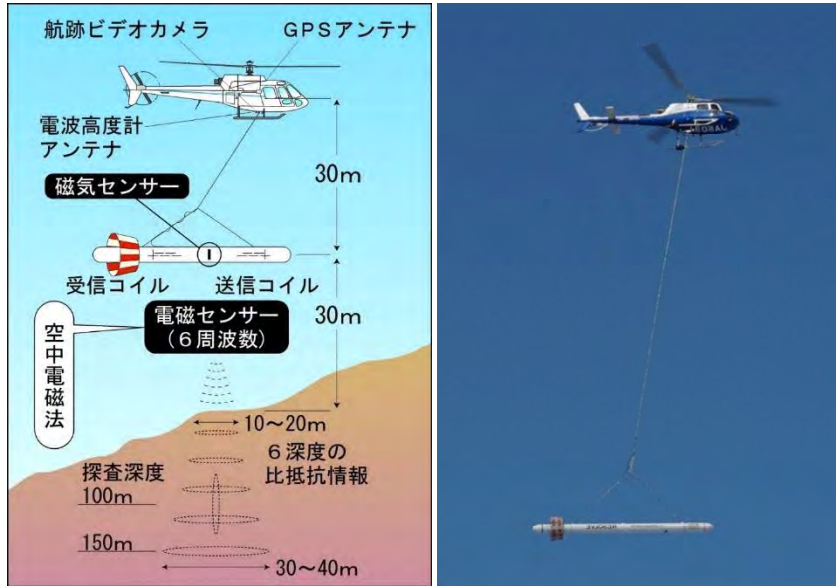
九州地方整備局

Kyushu Regional Development Bureau

1. 空中電磁探査調査の概要

(1) 探査方法

【空中電磁探査の測定方法】



ヘリコプターで複数の送受信コイルを収納したセンサを曳航し、送信コイルの磁場に反応して発生する地盤からの磁場を計測することで地盤内部の比抵抗分布を調査
異なる周波数帯域の磁場を用いることによって、異なる深度の斜面内部の比抵抗を同時に取得できる

(3) 探査深度

探査深度: 測定周波数と地盤の比抵抗から算出
Z=探査深度 ρ=地盤の比抵抗、f=測定周波数

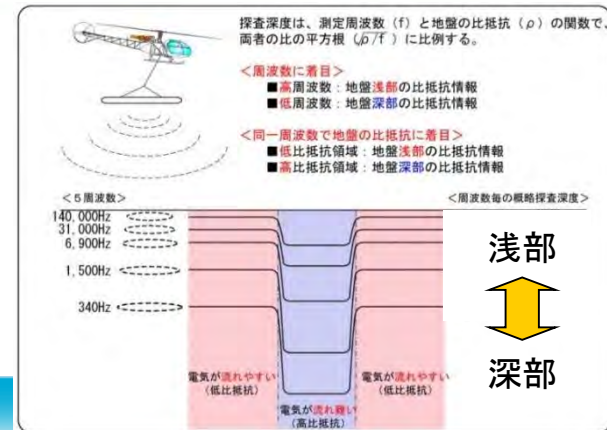
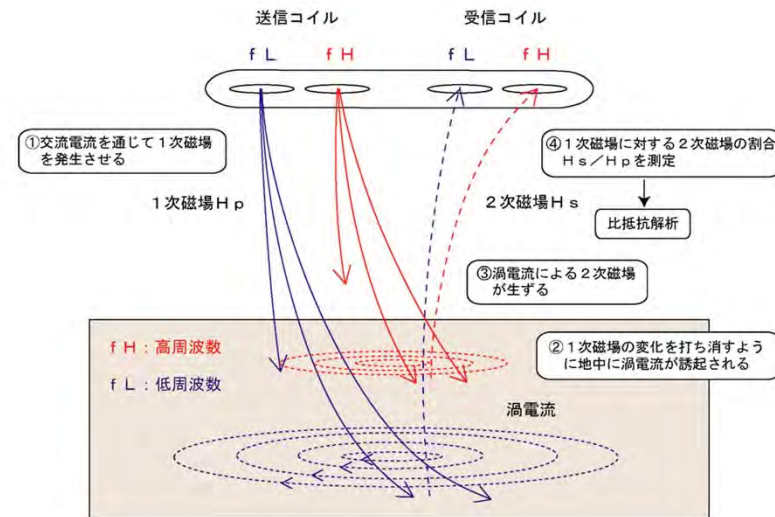
$$Z = \frac{1}{2} \times 503.3 \sqrt{\frac{\rho}{f}}$$

(2) 探査原理

人工的に発生させた磁場が、地盤に透入する際に生じる電磁誘導現象を利用して地盤の電気的性質を調査する

※電磁誘導: コイルの中の磁界が変化するとコイルに電流が流れる現象

【探査原理】



1. 空中電磁探査調査の概要

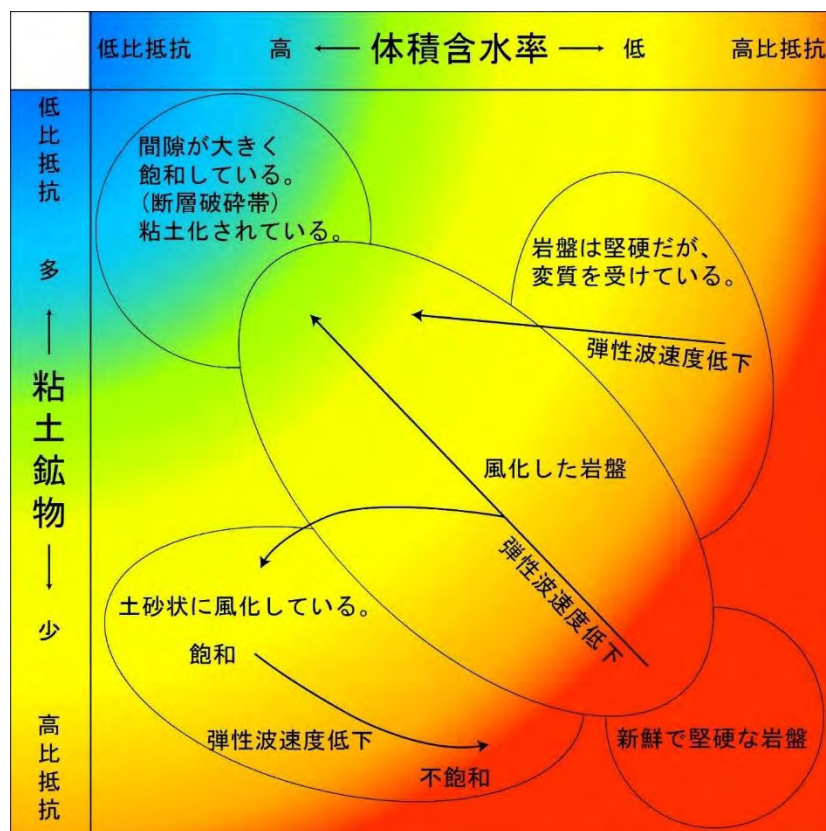
(4) 取得する地盤情報・・・比抵抗

定義：比抵抗は単位断面積を通る電流に対する単位長さ当たりの電気抵抗である

- 単位は $\Omega \cdot m$ (オームメートル)で、通常は記号 ρ で示す
- 異方性を示すこともあるが物質固有の電気特性として取り扱えるので、電気探査や電磁探査の基本物性として用いられる

社団法人 物理探査学会編(2005)新版 物理探査用語辞典

(5) 比抵抗と地下水・地質状況の関係



横軸：体積含水率(= 間隙率×飽和度)

・・・地下水に関する情報

- ・間隙率が大きく、飽和度が高いほど低比抵抗
- ・間隙率が大きく、飽和度が小さいほど高比抵抗

縦軸：粘土鉱物の含有量・・・地質情報

- ・新鮮岩の場合、泥質ほど低比抵抗
- ・風化・変質の程度が大きいほど低比抵抗

- 降雨前（渇水時）と降雨後（降雨後1～2ヶ月後）の2時期で比抵抗値を計測
- 短期間であれば、極端な地盤の風化・変質や間隙率の変化の可能性は低い

2時期の比抵抗を比較することで、地質による比抵抗値の変化の影響を除去できる可能性がある

土木学会 関西支部 比抵抗高密度探査に基づく地盤評価に関する調査・研究委員会
(1997)比抵抗高密度探査に基づく地盤評価, 平成9年度講習・研究検討会テキスト,p.107.



国土交通省

国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management



九州地方整備局

Kyushu Regional Development Bureau

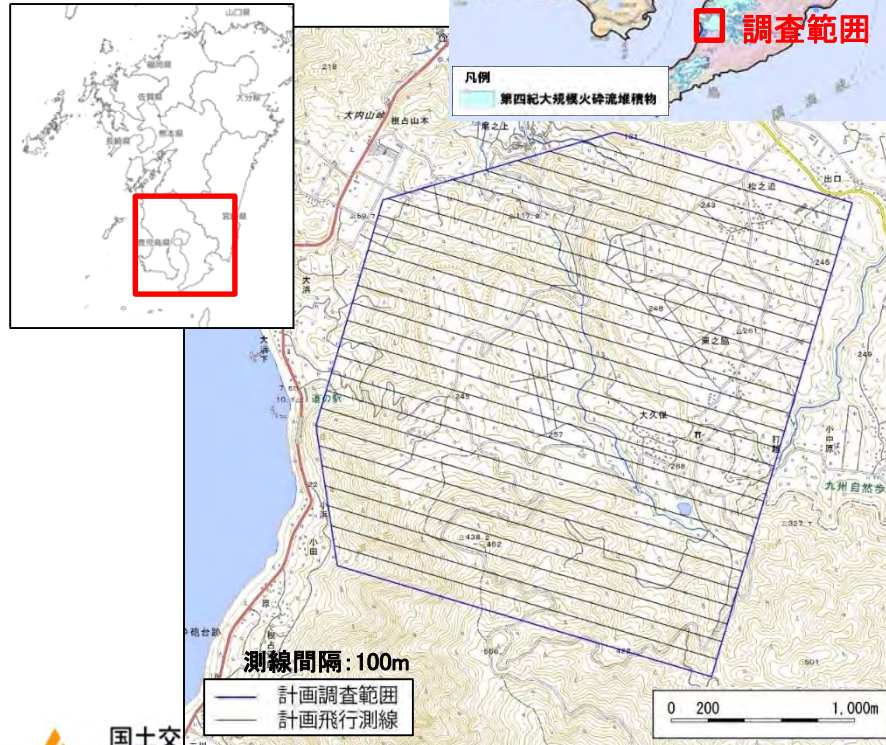
2. 空中電磁探査調査の実施状況

- 第四紀火砕流堆積物の分布する火砕流台地として、「南大隅地域」・「耶馬溪地域」にて調査を実施
 - ⇒ 渇水時である令和元年5月と、降雨後の令和元年10月の2時期で調査を実施
 - ⇒ 5月と10月の調査は、同じ飛行測線にて実施した

【空中電磁探査調査箇所・範囲】

鹿児島県
南大隅町船石川周辺
調査範囲: 6.13km²

	計画範囲 (km ²)	測線長 (km)	測線数 (本)
南大隅町	6.13	63.09	28



大分県中津市耶馬溪町
調査範囲: 12.15km²



	計画範囲 (km ²)	測線長 (km)	測線数 (本)
耶馬溪	12.15	121.46	61



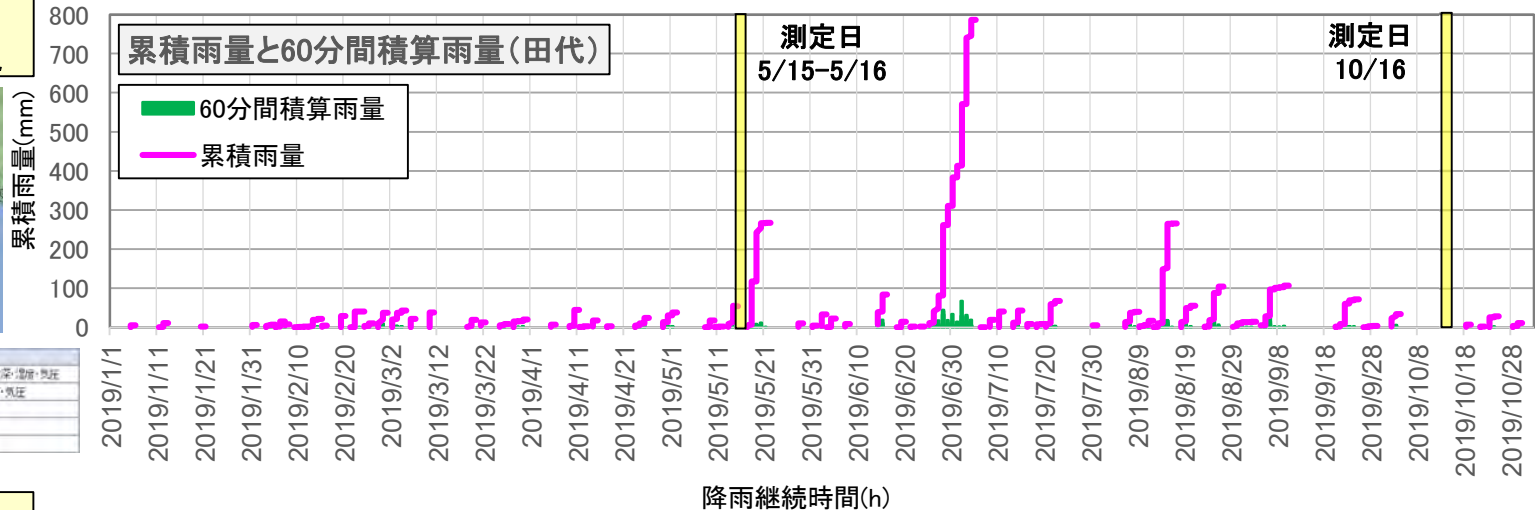
2. 空中電磁探査調査の実施状況

- 5月の調査実施前は、南大隅町・耶馬溪町ともに降雨は少ない状態であった
- 10月の調査実施前では、両地域とも8月に累計で200～300mm程度の降雨があったほか、南大隅町では6月に非常に大きな降雨を経験している

鹿児島県 南大隅町船石川周辺



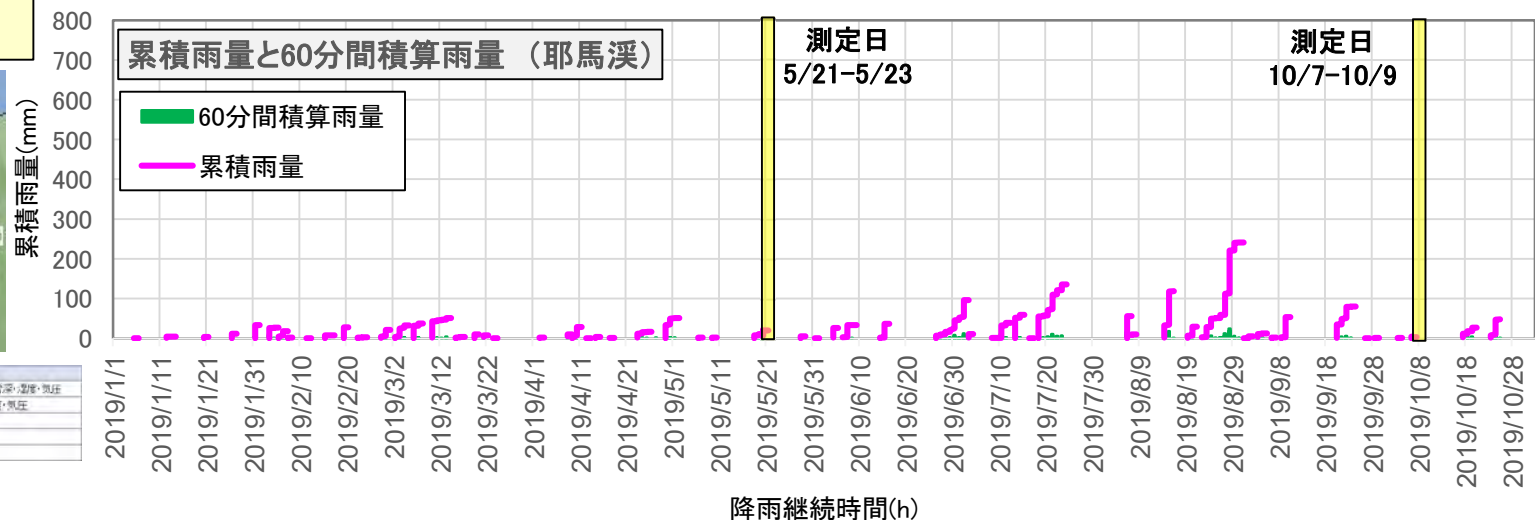
観測所名	観測所の種類	観測要素
鹿児島	気象台	気温・降水量・風向・風速・日照時間・積雪深・湿度・気圧
湯原所・特別地域気象観測所	気象・降水量・風向・風速・日照時間・湿度・気圧	
地城気象観測所(アマダス)	降水量	
地城気象観測所(アマダス)	気温・降水量・風向・風速	
地城気象観測所(アマダス)	気温・降水量・風向・風速・日照時間	



大分県 耶馬溪町金吉周辺



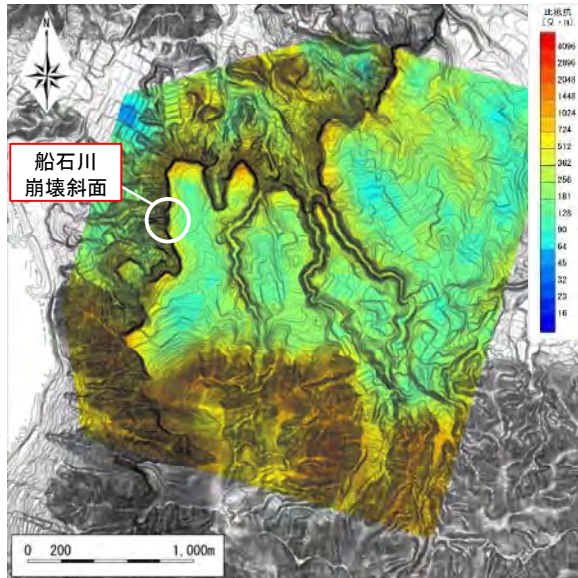
観測所名	観測所の種類	観測要素
鹿児島	気象台	気温・降水量・風向・風速・日照時間・積雪深・湿度・気圧
湯原所・特別地域気象観測所	気象・降水量・風向・風速・日照時間・湿度・気圧	
地城気象観測所(アマダス)	降水量	
地城気象観測所(アマダス)	気温・降水量・風向・風速	
地城気象観測所(アマダス)	気温・降水量・風向・風速・日照時間	



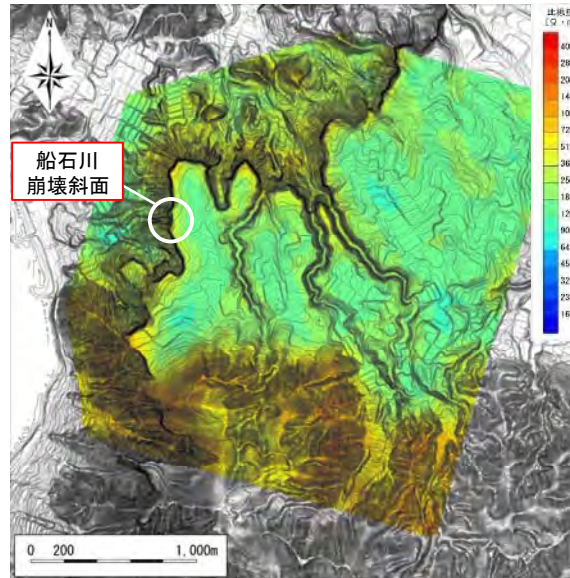
2. 空中電磁探査調査結果 ～鹿児島県南大隅地域～

比抵抗分布平面① 140,000Hz (探査深度 概略 10 m)

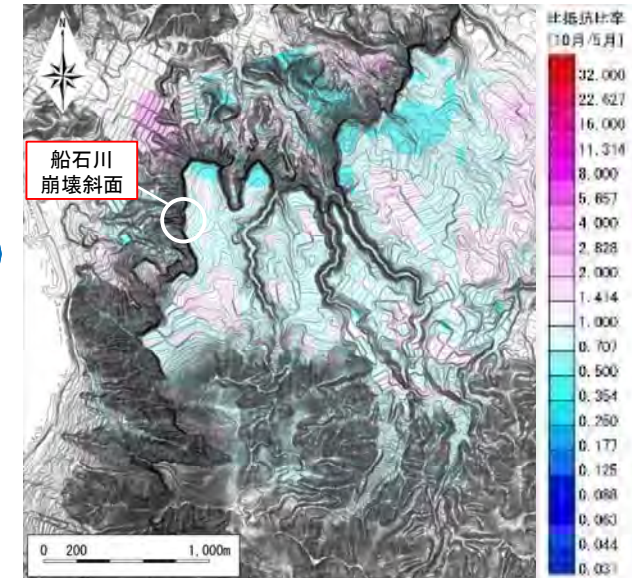
火砕流台地の深度10m付近は、概ね阿多火砕流溶結凝灰岩の上部に該当



比抵抗分布平面図
(5月測定)



比抵抗分布平面図
(10月測定)



2時期の比抵抗比較平面図
(比率:10月測定/5月測定)

比抵抗平面図

高比抵抗は暖色系で、低比抵抗は寒色系で示した

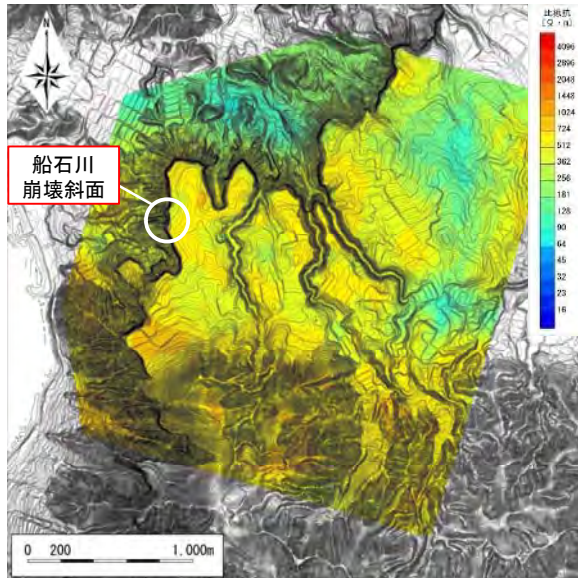
暖色系 : 電気が流れにくい ⇒ 間隙率×飽和度が低い
寒色系 : 電気が流れ易い ⇒ 間隙率×飽和度が高い

2時期の比抵抗比較

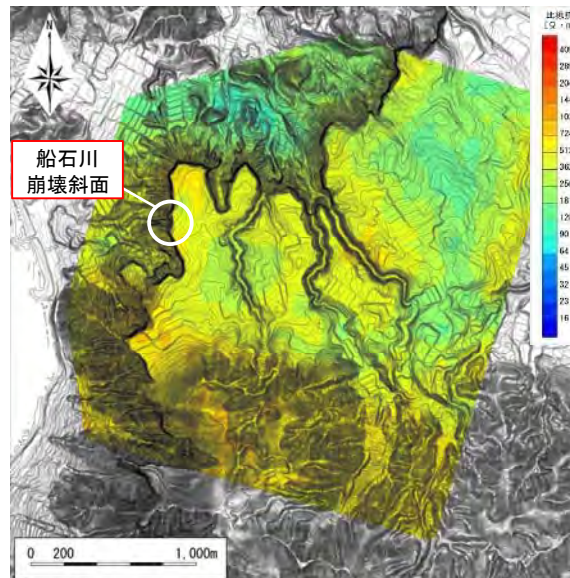
赤表示:5月と比較して10月は
高比抵抗になった領域
青表示:5月と比較して10月は
低比抵抗になった領域

2. 空中電磁探査調査結果 ～鹿児島県南大隅地域～

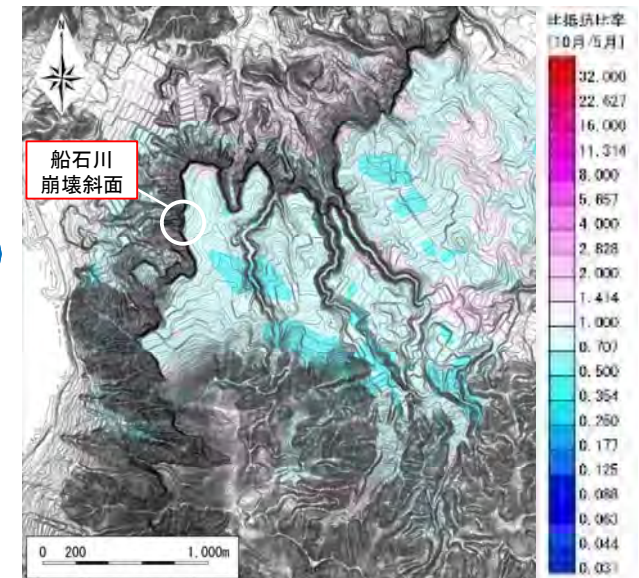
比抵抗分布平面② 1,500Hz (探査深度 概略 130 m)



比抵抗分布平面図
(5月測定)



比抵抗分布平面図
(10月測定)



2時期の比抵抗比較平面図
(比率:10月測定/5月測定)

比抵抗平面図

高比抵抗は暖色系で、低比抵抗は寒色系で示した

暖色系 : 電気が流れにくい ⇒ 間隙率×飽和度が低い
寒色系 : 電気が流れ易い ⇒ 間隙率×飽和度が高い

2時期の比抵抗比較

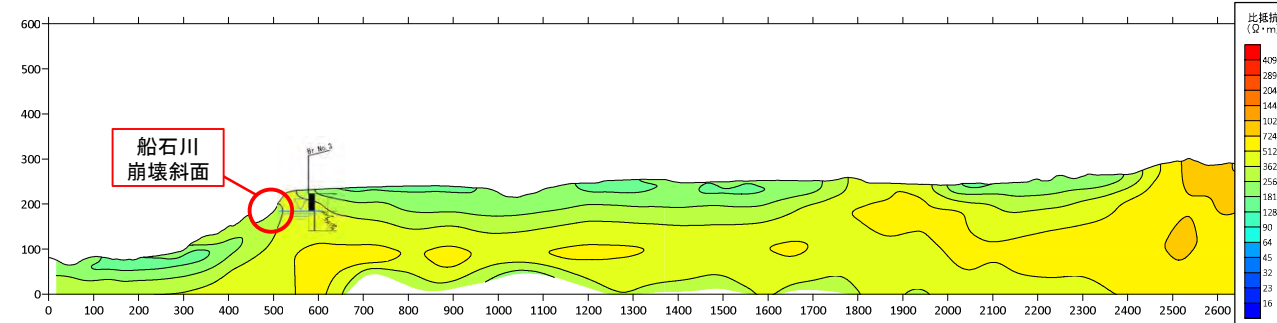
赤表示:5月と比較して10月は
高比抵抗になった領域
青表示:5月と比較して10月は
低比抵抗になった領域

国土地理院基盤地図情報5mDEM(表示:1mコンター)

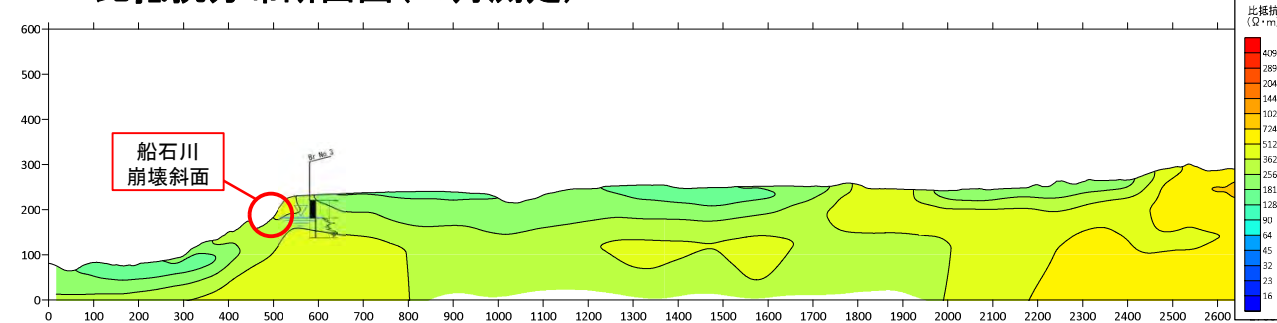
2. 空中電磁探査調査結果 ～鹿児島県南大隅地域～

比抵抗分布断面図（船石川崩壊斜面付近断面）

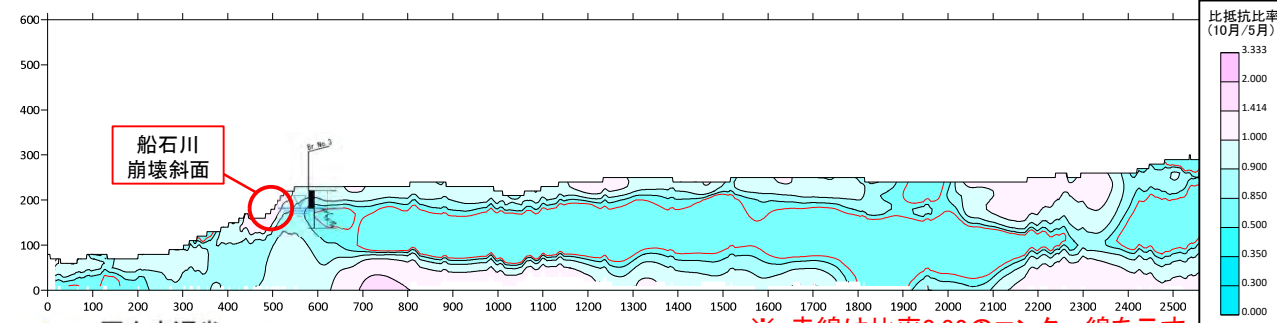
標高 (m) 比抵抗分布断面図(5月測定)



標高 (m) 比抵抗分布断面図(10月測定)

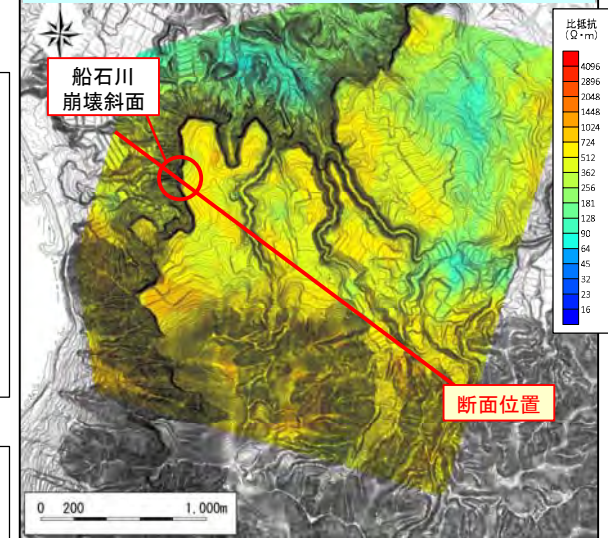


標高 (m) 2時期の比抵抗比較断面図(比率:10月測定/5月測定)



※: 赤線は比率0.82のコンター線を示す

比抵抗分布平面図(5月:探査深度 概略130m)



比抵抗断面図

高比抵抗は暖色系で、
 低比抵抗は寒色系で示した
 暖色系：電気が流れにくい
 ⇒ 間隙率×飽和度が低い
 寒色系：電気が流れ易い
 ⇒ 間隙率×飽和度が高い

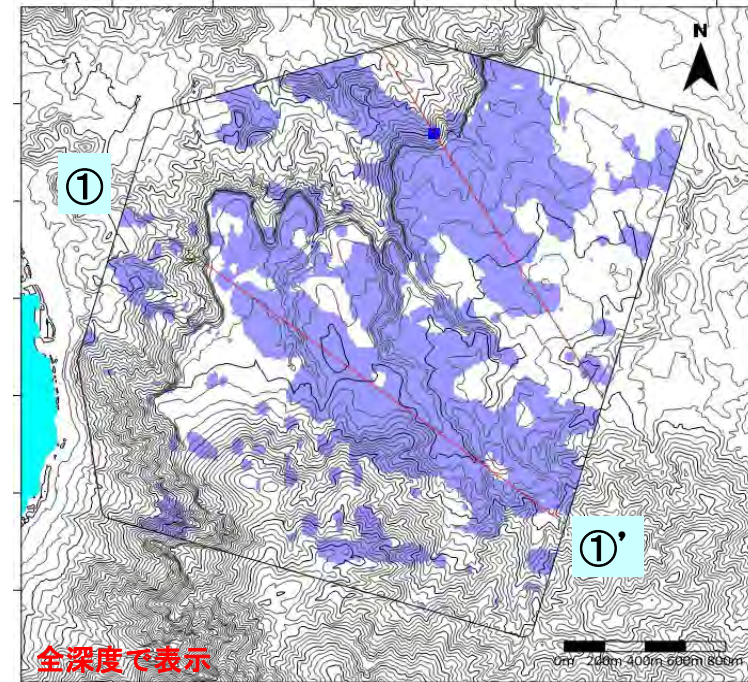
2時期の比抵抗比較

赤表示: 5月と比較して10月は
 高比抵抗になった領域
 青表示: 5月と比較して10月は
 低比抵抗になった領域

2. 空中電磁探査調査結果 ～鹿児島県南大隅地域～

- 今回の調査では、降雨前（湯水時）と降雨後（降雨後1～2ヶ月後）の2時期で比抵抗値を計測
- 計測時期の時間的な差は短いため、極端な地盤の風化・変質の進行や間隙率の変化の可能性は低い

【2時期の比抵抗比較平面図(南大隅を例)】

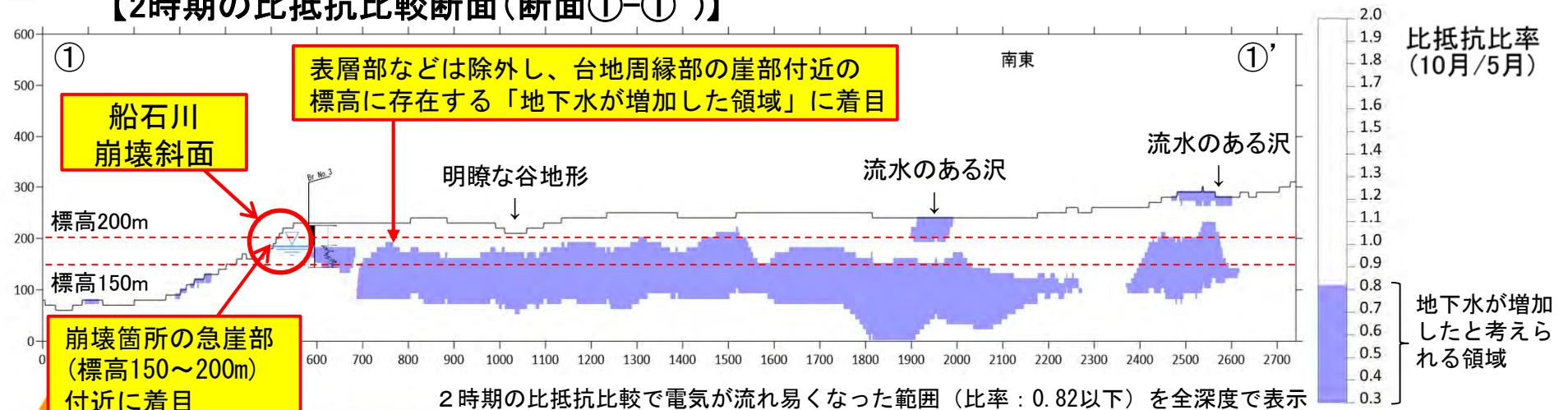


2時期の比抵抗を比較し、地質による比抵抗値の変化の影響を除去することで、『地下水が増加した領域』の把握について検討

- 2時期の比抵抗比率(10月/5月)で電気が流れ易くなった領域
 ≡ 含水比が増加した範囲 ≡ 地下水が増加した範囲
- 地下水が増加した範囲が明瞭となるよう表示範囲を設定
 ⇒ 既往調査ボーリングによる地下水位なども参考
 ⇒ 表層部などではなく、台地内部での分布に着目

※:地下水を対象としているため、温度の影響は小さい

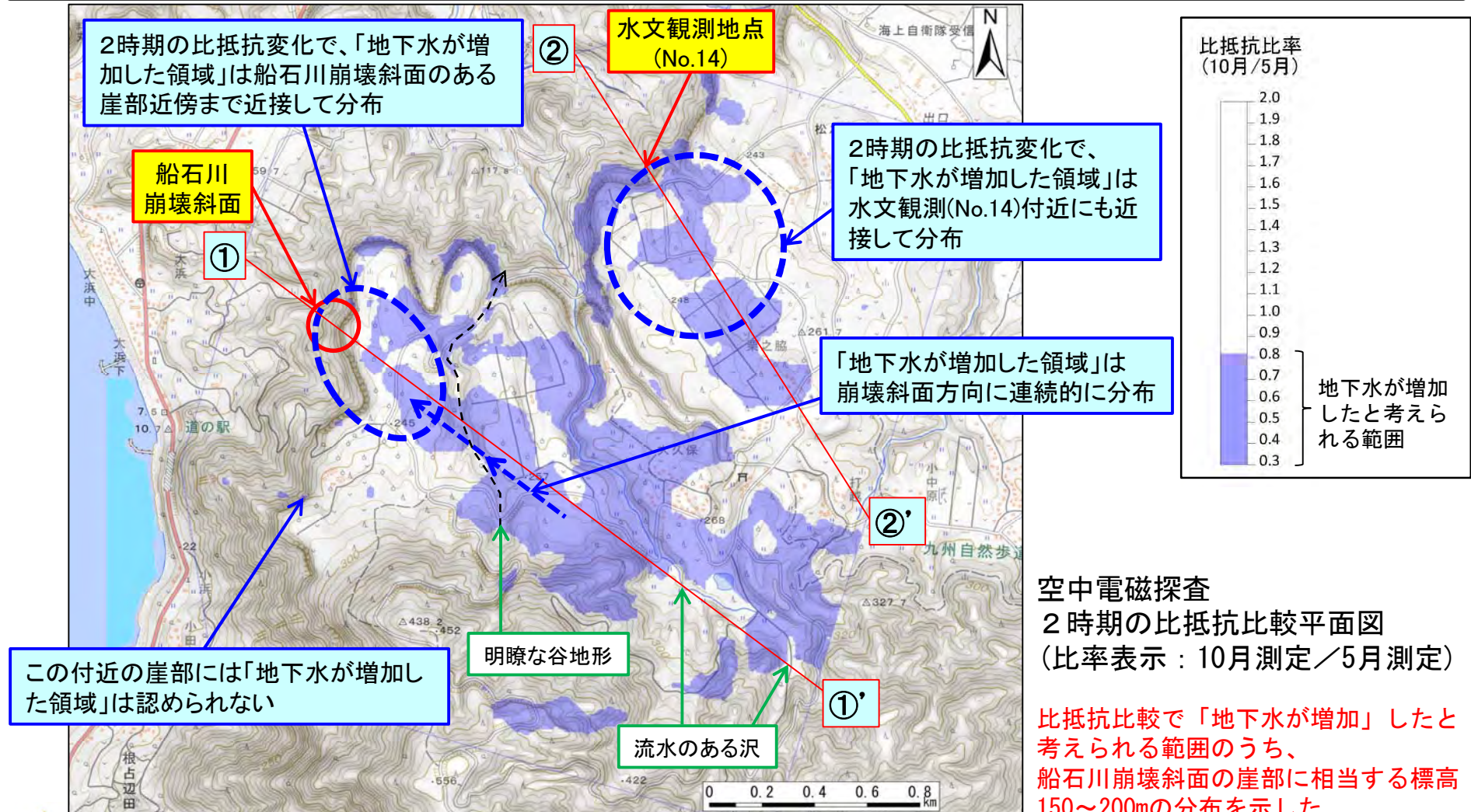
【2時期の比抵抗比較断面(断面①-①')】



2 時期の比抵抗比較で電気が流れ易くなった範囲 (比率 : 0.82以下) を全深度で表示

2. 空中電磁探査調査結果 ～鹿児島県南大隅地域～

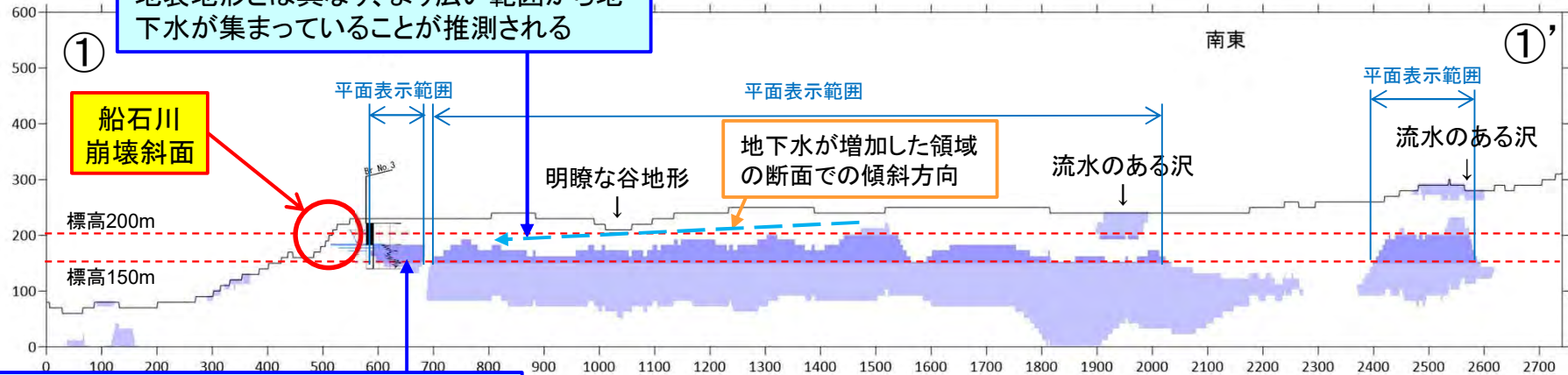
- 船石川崩壊斜面や水文観測地点付近では、地中内部の「地下水が増加した領域」が崖部近傍まで分布する。一方で「地下水が増加した領域」が認められない崖部も確認される
- 船石川崩壊斜面の方向に「地下水が増加した領域」が連続的に分布している



2. 空中電磁探査調査結果 ～鹿児島県南大隅地域～

多少の凹凸はあるものの、連続して「地下水が増加した領域」が分布
地表地形とは異なり、より広い範囲から地下水が集まっていることが推測される

【2時期の比抵抗比較断面(断面①-①')】



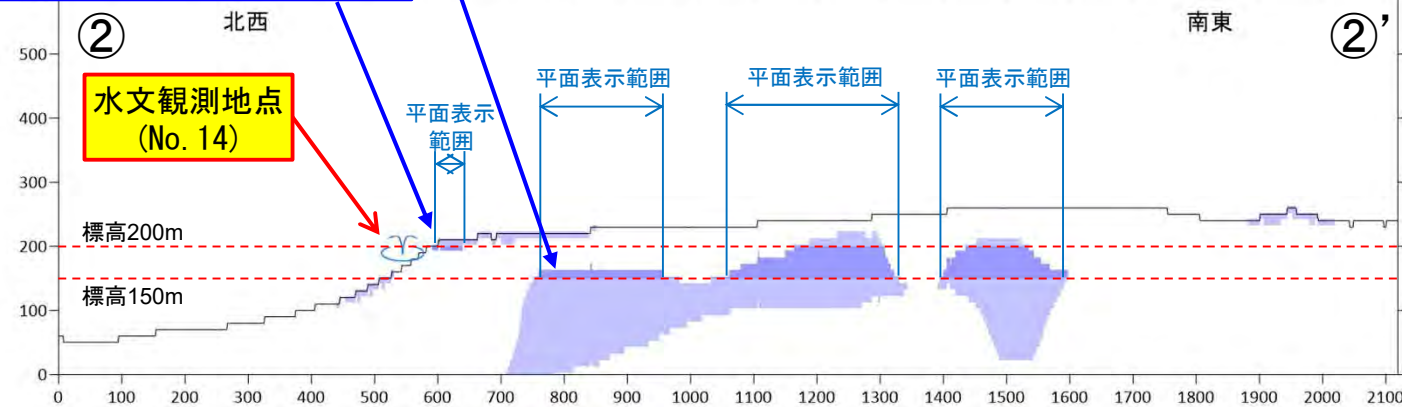
2時期の比抵抗変化で、「地下水が増加した領域」は船石川崩壊斜面に近接して分布

2時期の比抵抗変化で電気が流れ易くなった範囲(比率:0.82以下)を、標高150m~200mの範囲を濃く表示

水文観測地点近傍にも「地下水が増加した領域」は分布

表層部の影響の可能性もある

【2時期の比抵抗比較断面(断面②-②')】



2時期の比抵抗変化で電気が流れ易くなった範囲(比率:0.82以下)を、標高150m~200mの範囲を濃く表示



国土交通省

国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management



九州地方整備局

Kyushu Regional Development Bureau

2. 空中電磁探査調査結果 ～鹿児島県南大隅地域～

- 「地下水が増加した領域」と比流量調査結果との重ね合せを実施
- 船石川崩壊斜面付近など、**台地の崖部近傍に「地下水が増加した領域」が存在する流域では、比流量値が大きい傾向がある**
- ただし、地下水の流入範囲・方向などは断面図から推測する程度であり、詳細は不明である

比流量調査で、比流量が相対的に高い流域付近に空中電磁探査による「地下水が増加した領域」が存在

水文観測地点
(No.14)

「地下水が増加した領域」は、水文観測(No.14)付近にも近接して分布

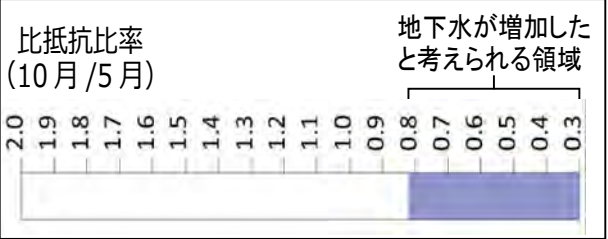
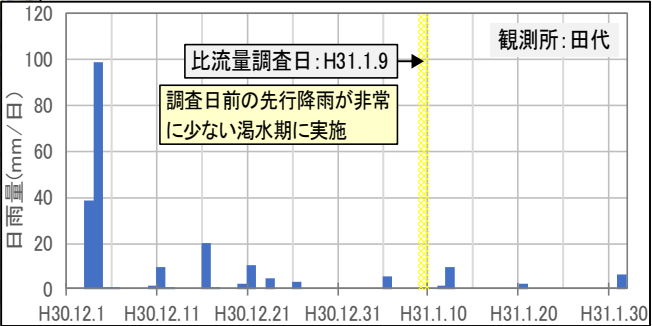
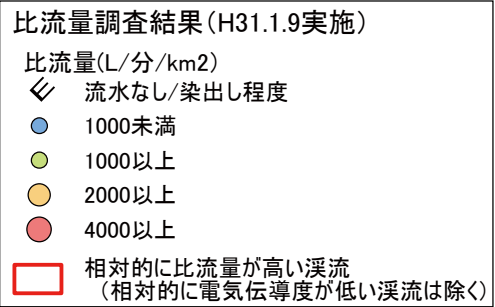
船石川崩壊斜面

明瞭な谷地形

想定される地下水の流れ

この付近の崖部には「地下水が増加した領域」は認められない
⇒ この流域の比流量は小さい
⇒ 調査結果とも整合

「地下水が増加した領域」が連続して分布
表層の谷地形を超えた範囲から地下水が流入していることが想定される
⇒ **船石川の崩壊発生機構とも整合**

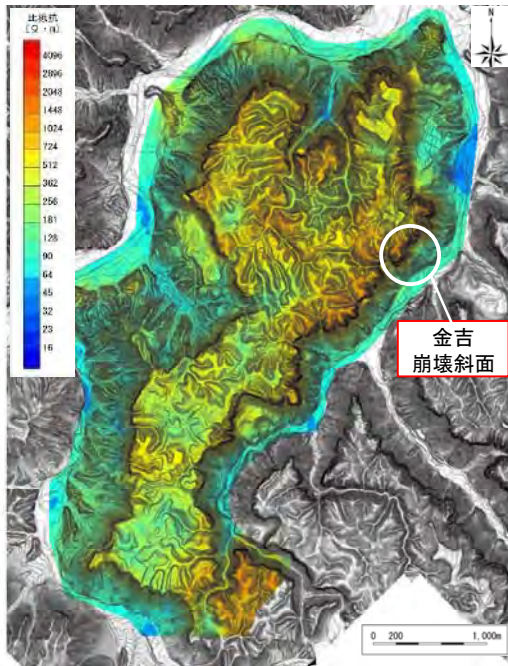


比抵抗比較で「地下水が増加」したと考えられる範囲のうち、火砕流台地の崖部に相当する標高150～200mの分布を示した

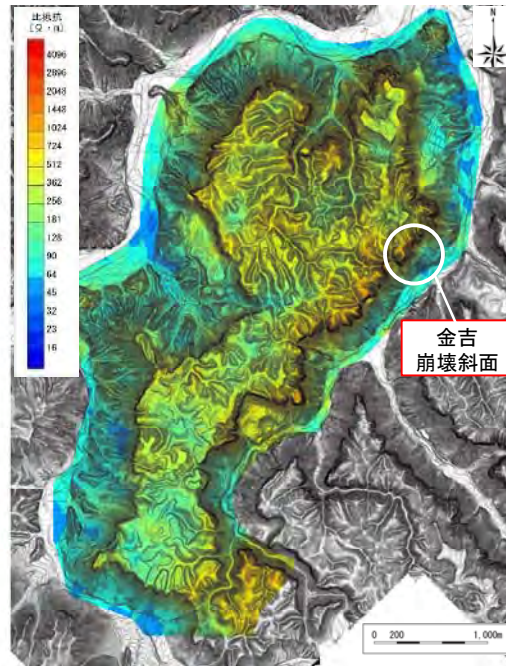
3. 空中電磁探査調査結果 ～大分県耶馬溪地域～

比抵抗分布平面① 140,000Hz (探査深度 概略 20 m)

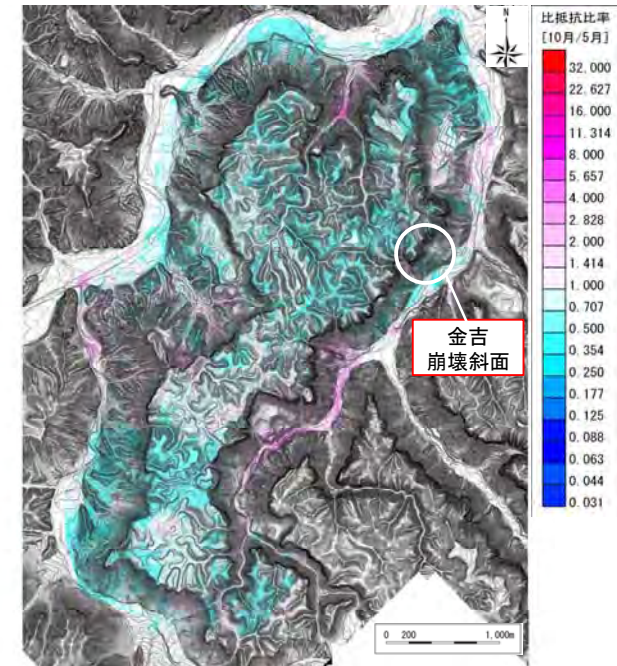
火砕流台地の深度20m付近は、耶馬溪火砕流堆積物上部の強溶結部に該当



比抵抗分布平面図
(5月測定)



比抵抗分布平面図
(10月測定)



2時期の比抵抗比較平面図
(比率:10月測定/5月測定)

比抵抗平面図

高比抵抗は暖色系で、低比抵抗は寒色系で示した

- 暖色系 : 電気が流れにくい ⇒ 間隙率×飽和度が低い
- 寒色系 : 電気が流れ易い ⇒ 間隙率×飽和度が高い

2時期の比抵抗比較

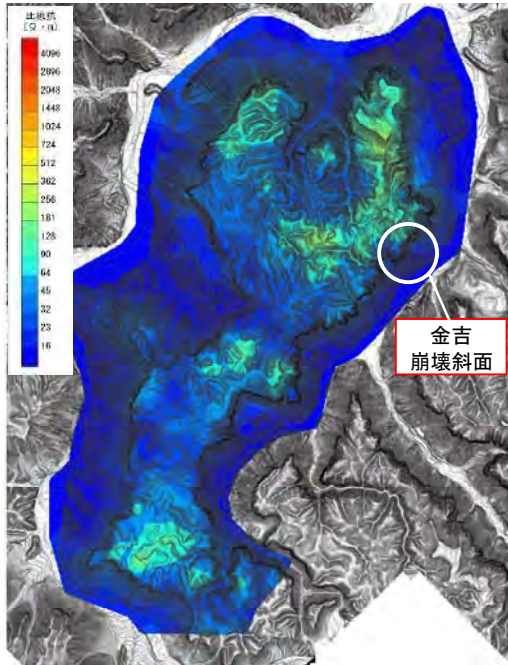
- 赤表示:5月と比較して10月は高比抵抗になった領域
- 青表示:5月と比較して10月は低比抵抗になった領域

国土地理院基盤地図情報5mDEM(表示:1mコンター)

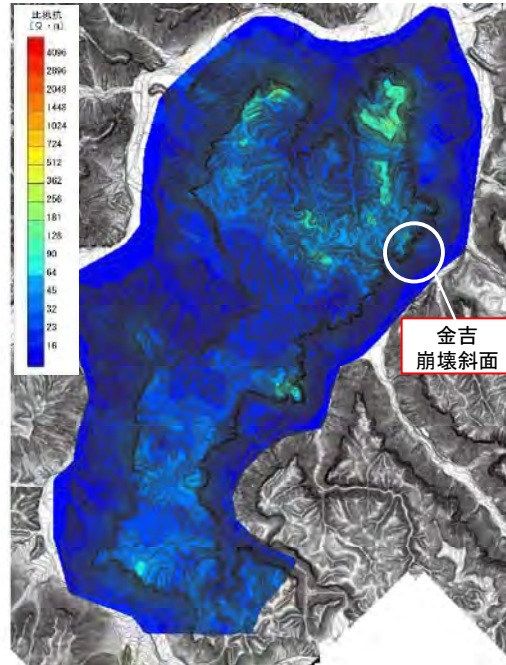
3. 空中電磁探査調査結果 ～大分県耶馬溪地域～

比抵抗平面② 340Hz (探査深度 概略 135 m)

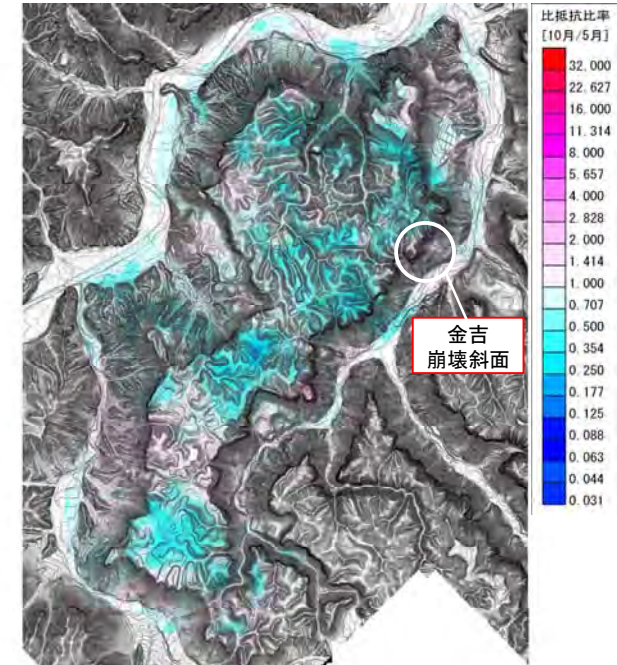
火砕流台地の深度135m付近は、新时期宇佐火山岩類に該当



比抵抗分布平面図
(5月測定)



比抵抗分布平面図
(10月測定)



2時期の比抵抗比較平面図
(比率:10月測定/5月測定)

比抵抗平面図

高比抵抗は暖色系で、低比抵抗は寒色系で示した

- 暖色系 : 電気が流れにくい ⇒ 間隙率×飽和度が低い
- 寒色系 : 電気が流れ易い ⇒ 間隙率×飽和度が高い

2時期の比抵抗比較

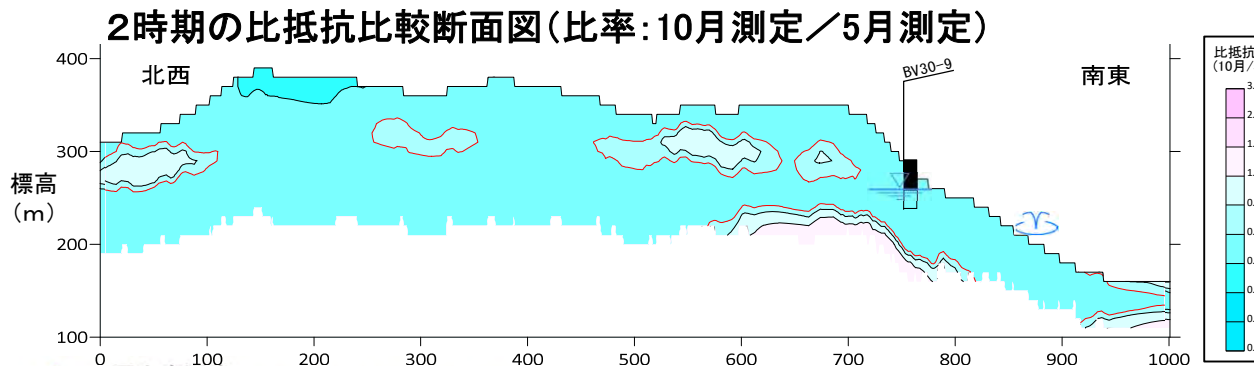
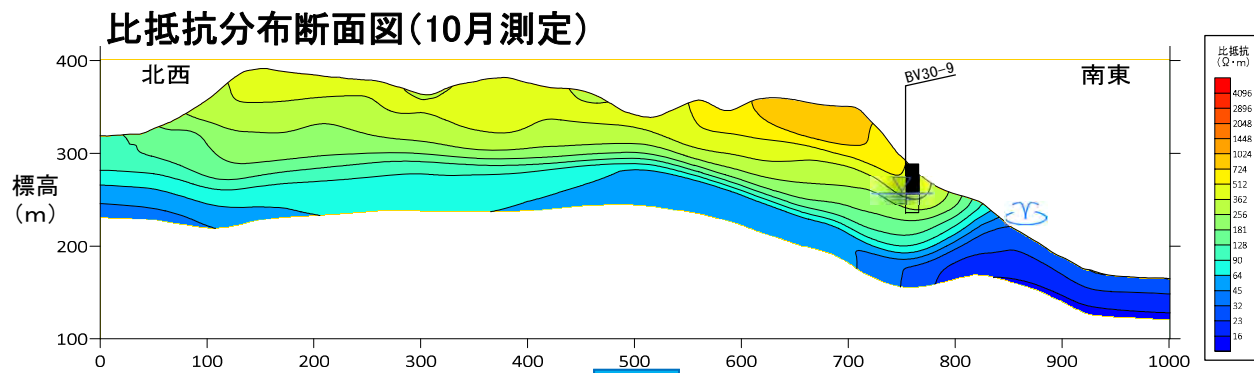
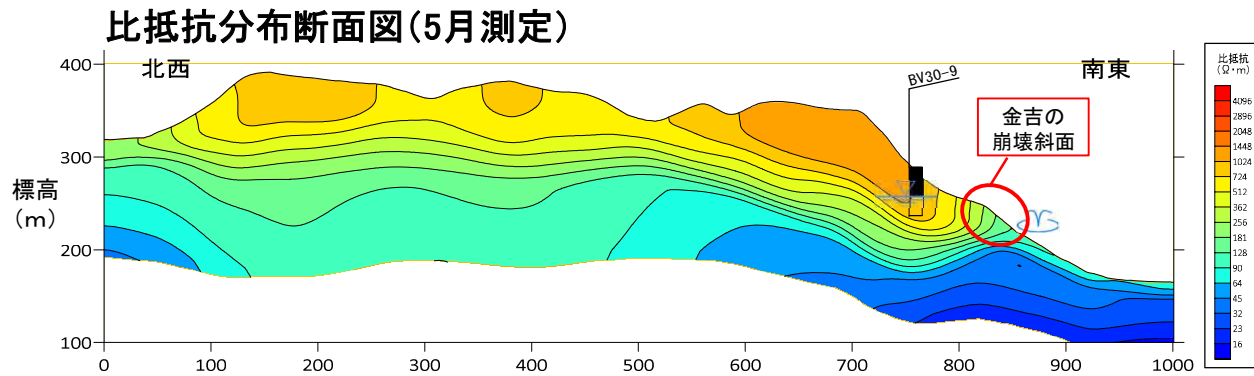
- 赤表示: 5月と比較して10月は高比抵抗になった領域
- 青表示: 5月と比較して10月は低比抵抗になった領域

国土地理院基盤地図情報5mDEM(表示:1mコンター)



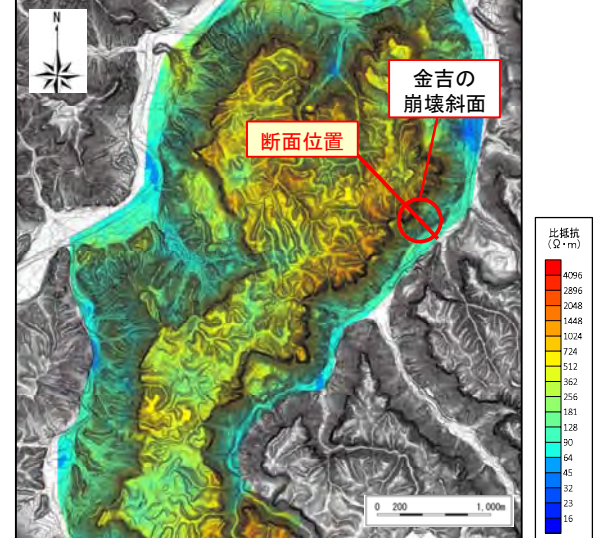
3. 空中電磁探査調査結果 ～大分県耶馬溪地域～

比抵抗分布断面図（金吉の崩壊斜面付近断面）



※: 赤線は比率0.85のコンター線を示す

比抵抗分布平面図(5月:探査深度 概略0m)



比抵抗断面図

高比抵抗は暖色系で、
低比抵抗は寒色系で示した
暖色系：電気が流れにくい
⇒ 間隙率×飽和度が低い
寒色系：電気が流れ易い
⇒ 間隙率×飽和度が高い

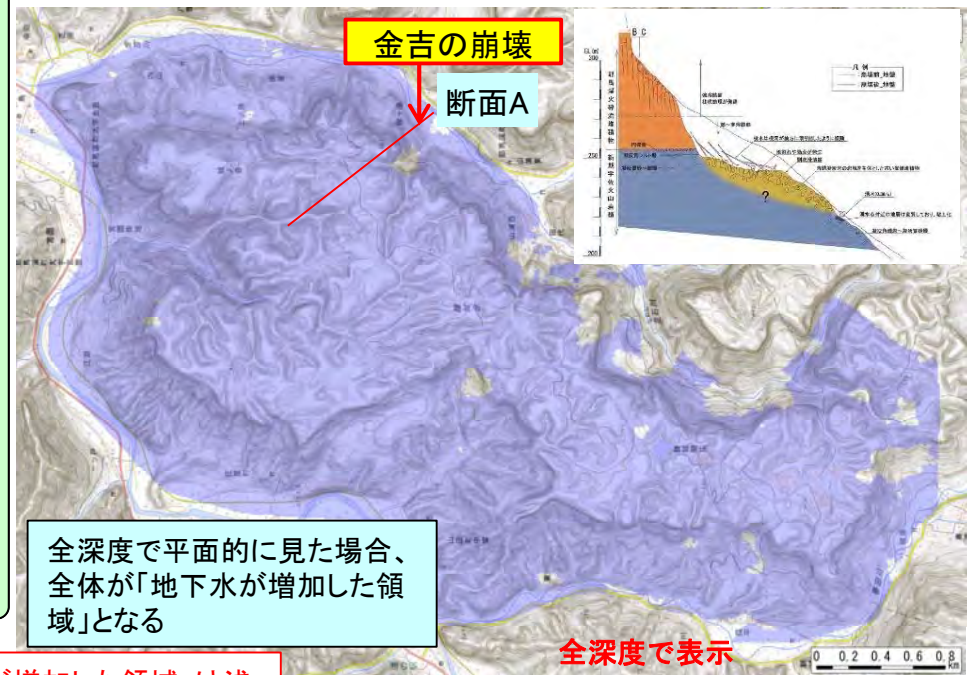
2時期の比抵抗比較

赤表示: 5月と比較して10月は
高比抵抗になった領域
青表示: 5月と比較して10月は
低比抵抗になった領域

3. 空中電磁探査調査結果 ～大分県耶馬溪地域～

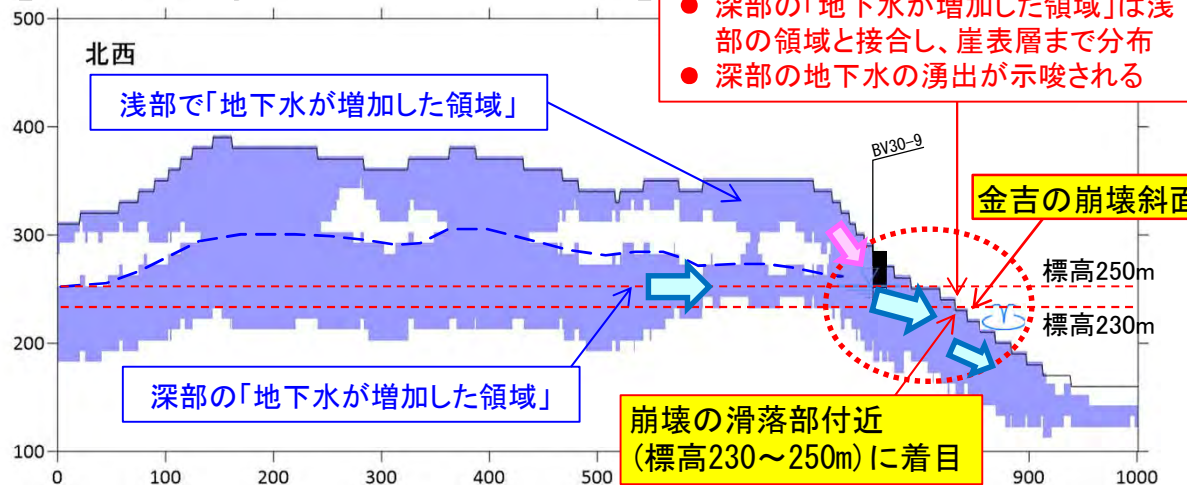
- 全深度で「地下水が増加した領域」を表現すると、その領域は台地全体に分布
- 断面で見ると、南大隅地域とは異なり、浅部と深部の2層の「地下水が増加した領域」が存在することが確認できる
 - ⇒ 南大隅はごく表層を除けば1層である
- 金吉の崩壊斜面周辺では、深部の「地下水が増加した領域」は浅部の領域と接合しつつ、崖表層部付近まで分布する
 - ⇒ 深部の地下水が地表部に湧出していることが示唆される

【2時期の比抵抗比較平面図(耶馬溪地域)】

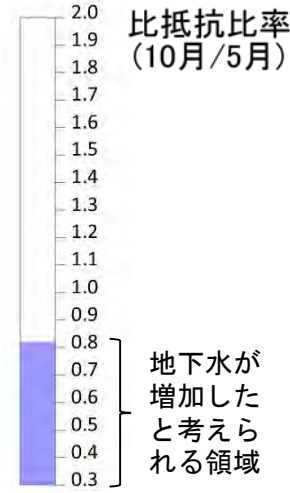


全深度で平面的に見た場合、全体が「地下水が増加した領域」となる

【2時期の比抵抗比較断面(断面A)】



比抵抗比率 (10月/5月)



空中電磁探査
2時期の比抵抗比較平面図
(比率表示
10月測定/5月測定)
比抵抗比較で「地下水が増加」
したと考えられる範囲の全深
度を表示

国土交通省 2時期の比抵抗比較で電気が流れ易くなった範囲(比率:0.85以下)を全深度で表示



国土技術政策総合研究所
National Institute for Land and Infrastructure Management

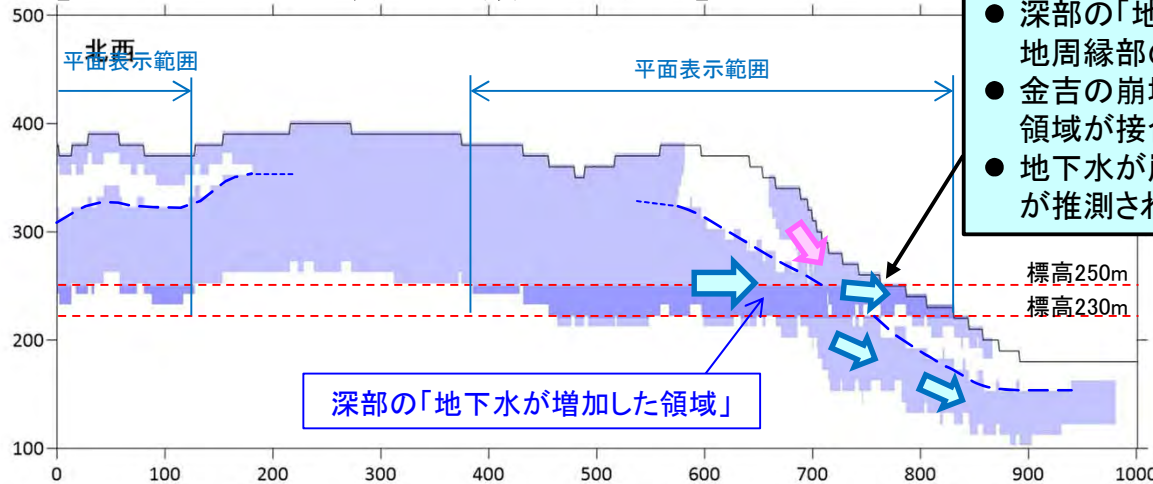


九州地方整備局
Kyushu Regional Development Bureau

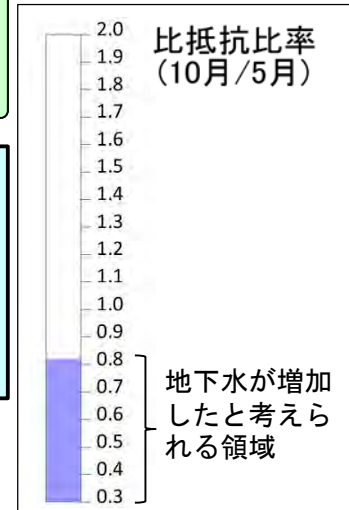
3. 空中電磁探査調査結果 ～大分県耶馬溪地域～

■ 断面で見ると、深部の「地下水が増加した領域」が崖表層まで連続する箇所（例：断面B）と、崖表層には分布しない箇所（例：断面C）が確認される

【断面B: 金吉の崩壊箇所と類似した箇所】

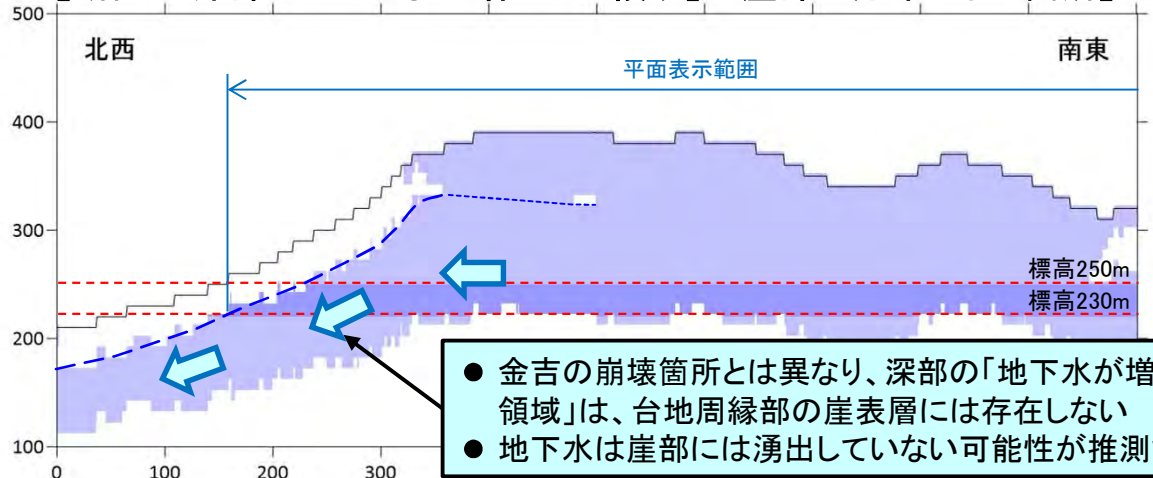


- 深部の「地下水が増加した領域」は台地周縁部の崖表層まで連続して分布
- 金吉の崩壊と同様に、浅部と深部の領域が接合しているように見える
- 地下水が崖部に湧出している可能性が推測される



深部の「地下水が増加した領域」

【断面C: 深部の「地下水が増加した領域」が崖部に分布しない箇所】



- 金吉の崩壊箇所とは異なり、深部の「地下水が増加した領域」は、台地周縁部の崖表層には存在しない
- 地下水は崖部には湧出していない可能性が推測される

【断面位置図】

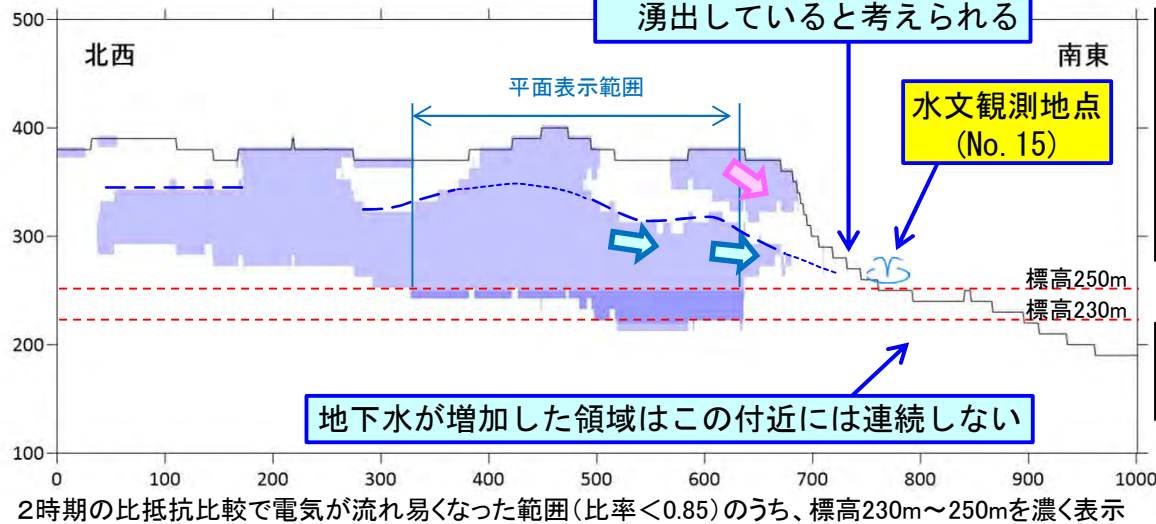


2時期の比抵抗比較で電気が流れ易くなった範囲（比率:0.85以下）を、標高230m～250mの範囲で表示

2時期の比抵抗比較で電気が流れ易くなった範囲(比率:0.85以下)のうち、標高230～250mを濃く表示

3. 空中電磁探査調査結果 ～大分県耶馬溪地域～

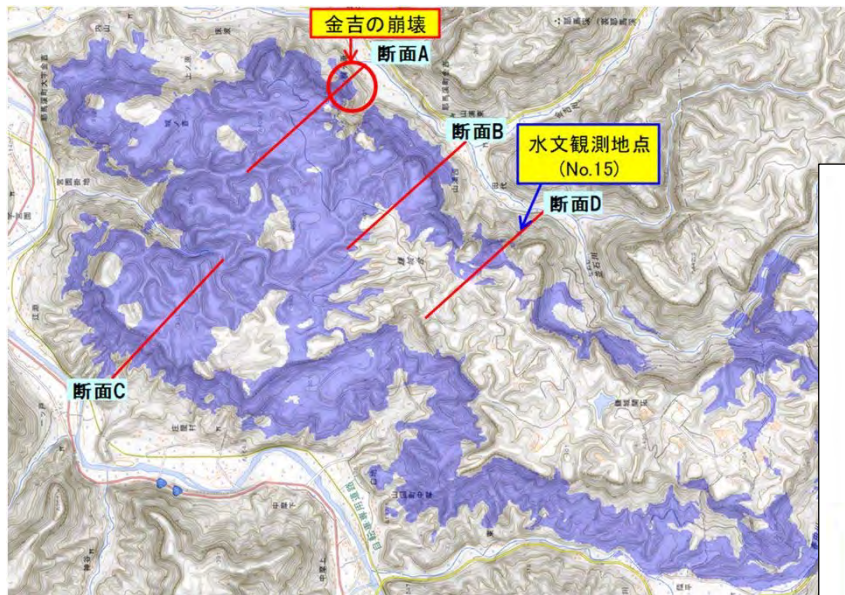
【断面D: 水文観測地点】



断面D

- 金吉の崩壊箇所とは異なり、深部の「地下水が増加した領域」は、崖表層までは連続しないが、近傍までは分布している
- 台地下方斜面の地中内部には連続しない
- 浅部の「地下水が増加した領域」が崖表層に分布している

崖部末端付近に深部の地下水が湧出している可能性も考えられる



2時期の比抵抗比較で電気が流れ易くなった範囲 国土交通省 (比率<0.85) を、標高230m~250mの範囲で表示

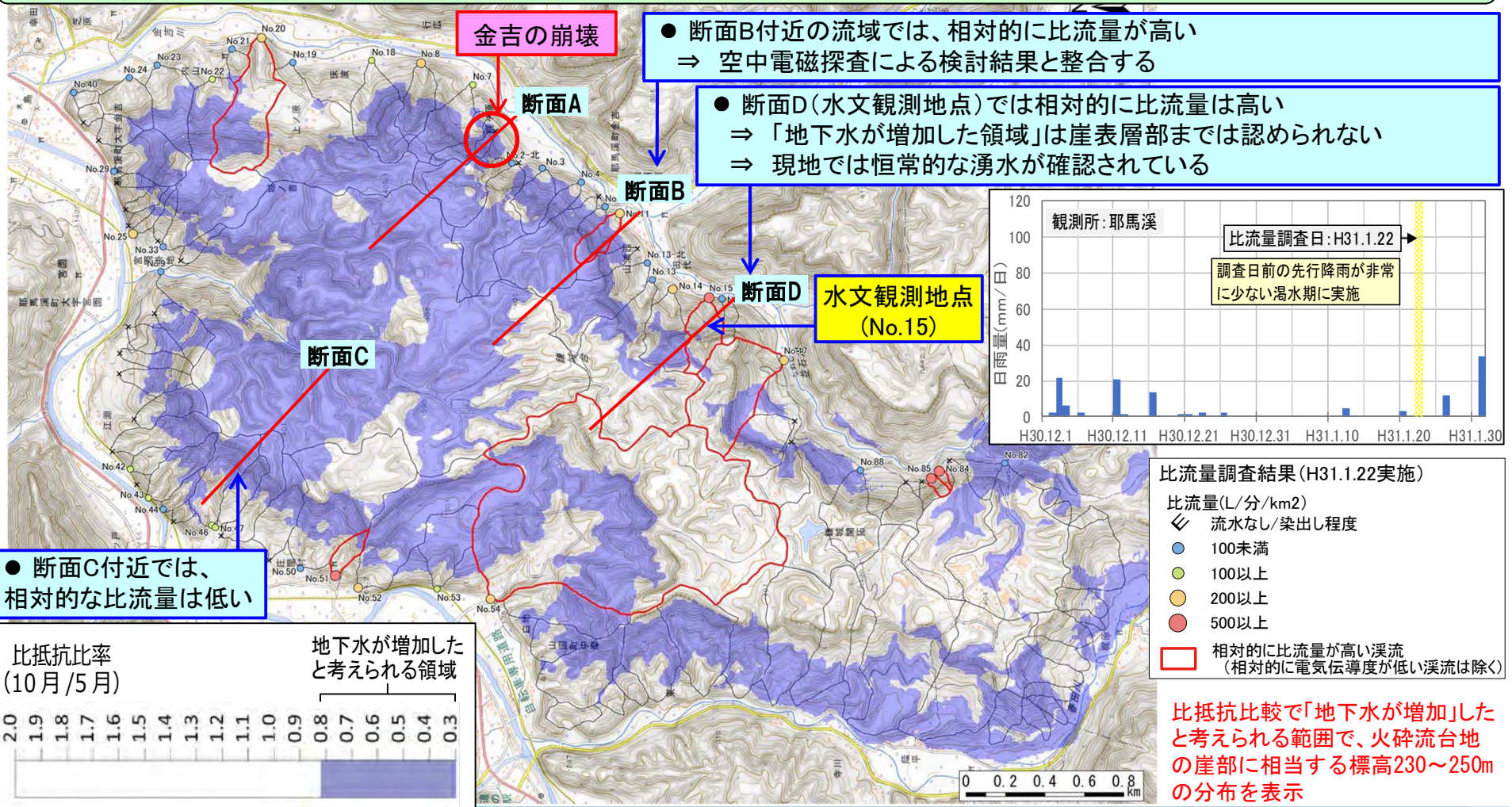
現地では、恒常的な湧水が確認されており、相対的に電気伝導度及び比流量とも高い値を示す

恒常的に湧水(地下水)が存在するため、比抵抗比率にはあまり差がでていないことが考えられる



3. 空中電磁探査調査結果 ～大分県耶馬溪地域～

- 南大隅地域と同様に「地下水が増加した領域」と比流量調査結果との重ね合せを実施
- 深部の「地下水が増加した領域」が崖表層部に分布する付近で、相対的に比流量が大きい値を示す流域が位置しており、空中電磁探査での検討結果と比流量調査結果は整合する箇所が多い
- 水文観測地点では「地下水が増加した領域」は崖表層部までは認められないが、現地では恒常的な湧水が確認されている



3. 空中電磁探査調査結果 まとめ

- 渇水期と降雨後の2時期の比抵抗値を比較することで、降雨後に「地下水が増加した領域」を示した

【崩壊事例との関係性】

- 南大隅地域では主に火砕流台地内部に1層、耶馬溪地域では浅部と深部の2層の「地下水が増加した領域」が存在することが推測された
- 南大隅地域では、台地内部に分布する「地下水が増加した領域」が、船石川の崩壊斜面の崖部近傍に連続的に分布すると共に、断面図からは、地表地形による集水範囲以外から地下水が流入していることが推測された
- 金吉の崩壊斜面付近では、深部の「地下水が増加した領域」が浅部の領域と接合しつつ崖表層部近傍まで分布しており、台地深部の地下水が金吉の崩壊斜面付近に湧出していることが推測された

【現地での比流量調査結果との関係性】

- 「地下水が増加した領域」が崖表層部近傍まで分布する箇所、相対的に高い比流量値を示す箇所が多いことが確認された。逆に、「地下水が増加した領域」が分布しない箇所では比流量が小さい箇所も確認された
- 一方で、「地下水が増加した領域」が崖表層部までは連続して分布はしないが、現地では恒常的な湧水が確認されている箇所もあった



- 空中電磁探査調査結果から、船石川の崩壊及び金吉の崩壊箇所近傍に地下水が存在し、“無降雨時等に発生する崩壊には地下水が関与している”ことが確認できた
- 2時期の比抵抗値から推定した「地下水が増加した領域」の分布に着目することで、地下水の集中する箇所を抽出できると考えられるため、「地下水が増加した領域」の評価・判断方法などにはまだ課題はあるものの、調査方法としては有効性があると考えられる
- 今後は、他地域での調査事例などを増やすなど、更なる検討が必要である