

複数の地下水観測手法を 組合わせた地すべり地下水解析例

1. はじめに
2. 地すべり地の地下水観測手法
3. 調査方法
4. 調査結果
5. 考察
6. まとめ

日本エルダルト株式会社
横山 賢治

地すべりは社会生活に 与える影響が大きい災害

1. はじめに

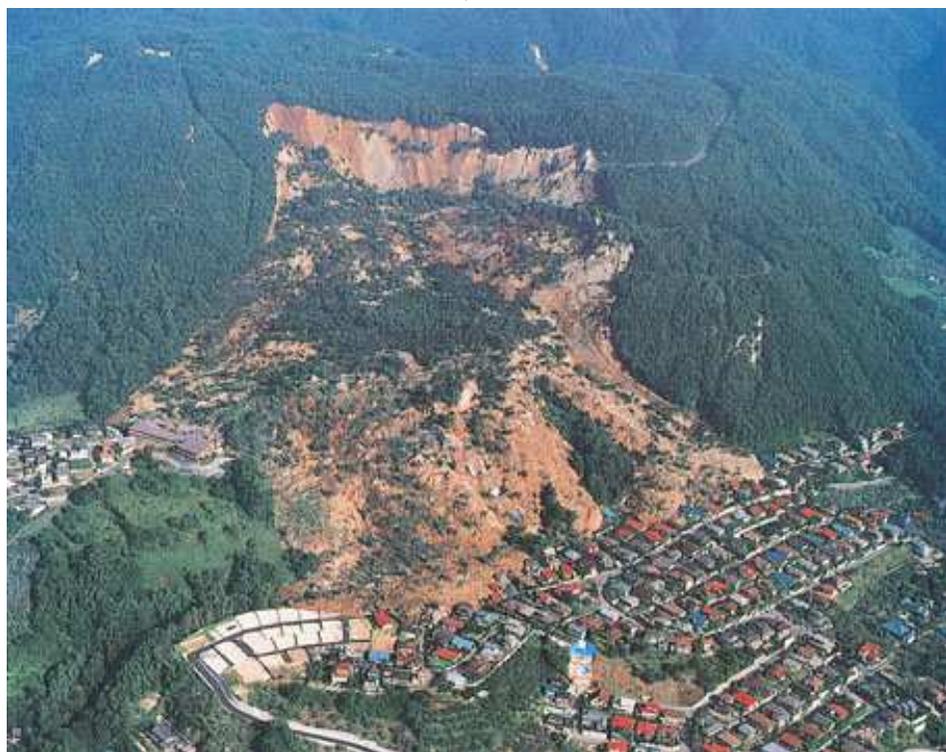
地すべりは活発に滑動すると
時として甚大な被害を及ぼす



地すべり模式図 (国土交通省, 2008)

生活圏の遠近に関わらず甚大な災害に繋がる

1985年地附山地すべり(長野県)



地質調査業協会連合会webサイト(2022)

2011年紀伊半島豪雨(和歌山県)



土木研究所webサイト(2024. 10. 21現在)

地すべり誘因の大半は「水」

・ 降雨融雪による地下水の供給



融雪・降水が占める
割合は80%以上

(土木研究所, 2007)

・ 土塊バランスの崩壊
(切土や浸食など)

・ 大規模地震

水、すなわち「地下水」挙動を 精度よく観測することが重要

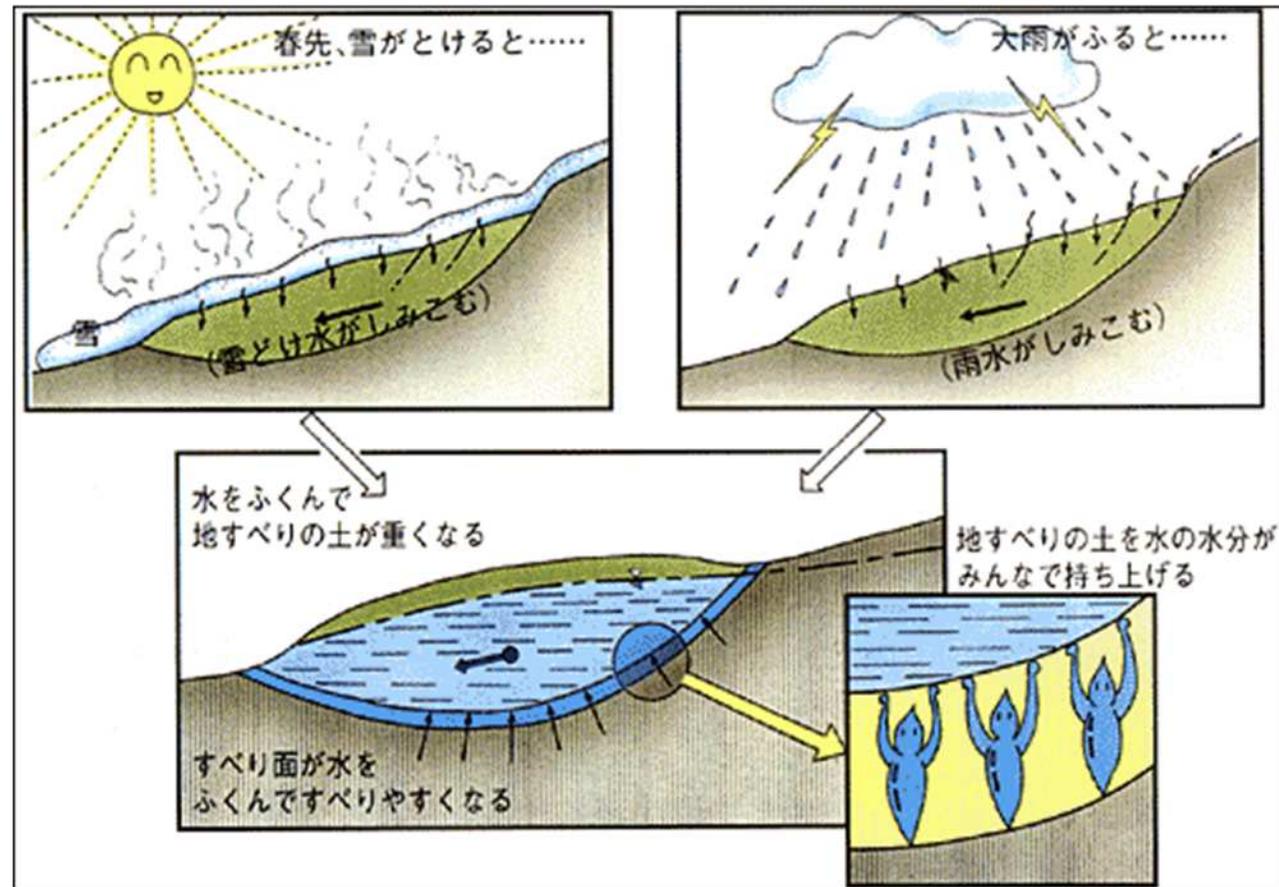
雨や融雪による水の浸透



地下水位の上昇



せん断抵抗の低下
地すべりの発生



精度の高い地下水情報が必要な理由

山地斜面中の地下水は極めて不均質に分布



適切な解析が困難

効果的な対策工展開ができない

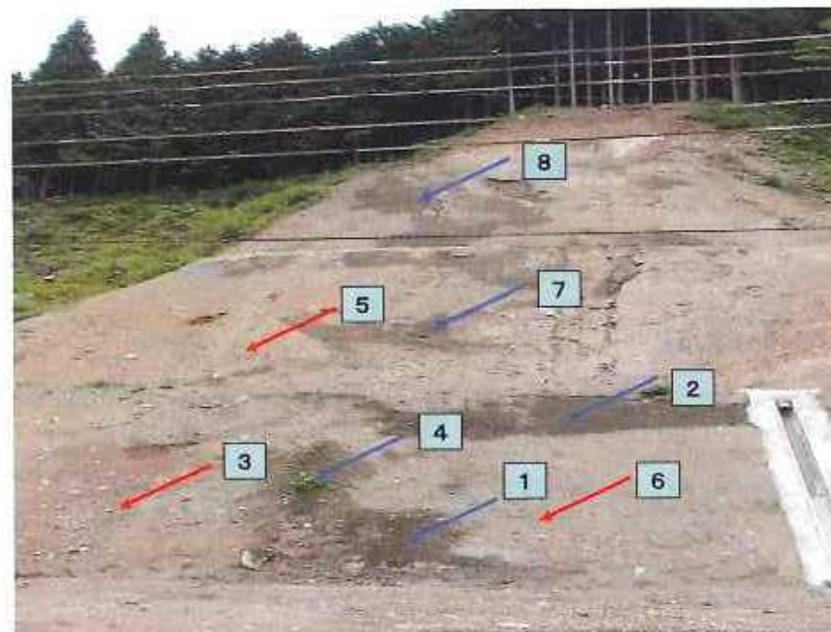


写真1-1 道路切り取り斜面に見る「水ミチ」番号は土壤採取位置

竹内, (1996)

地すべり地下水調査の種類は複数存在する

2. 地すべり地の地下水観測手法

「直接的手法」と「間接的手法」に大別できる



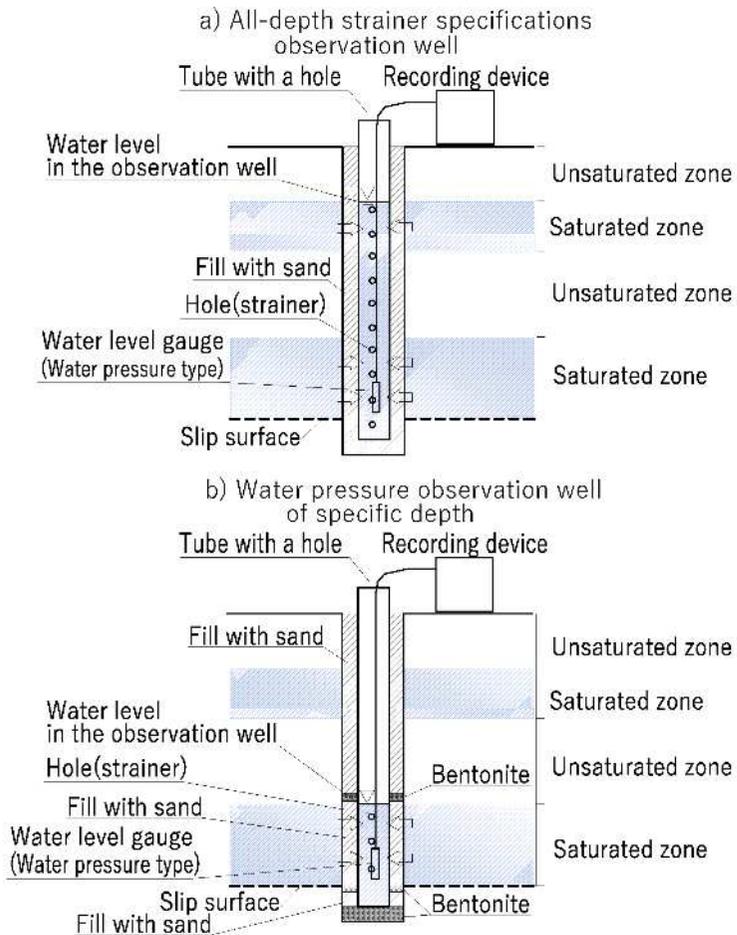
地下水に直接接触して調査する
…孔内水位観測、地下水検層等々…

地下水に触れずに調査する
…電気探査、温度探査等々…

直接的手法：直接水に触れて調査する

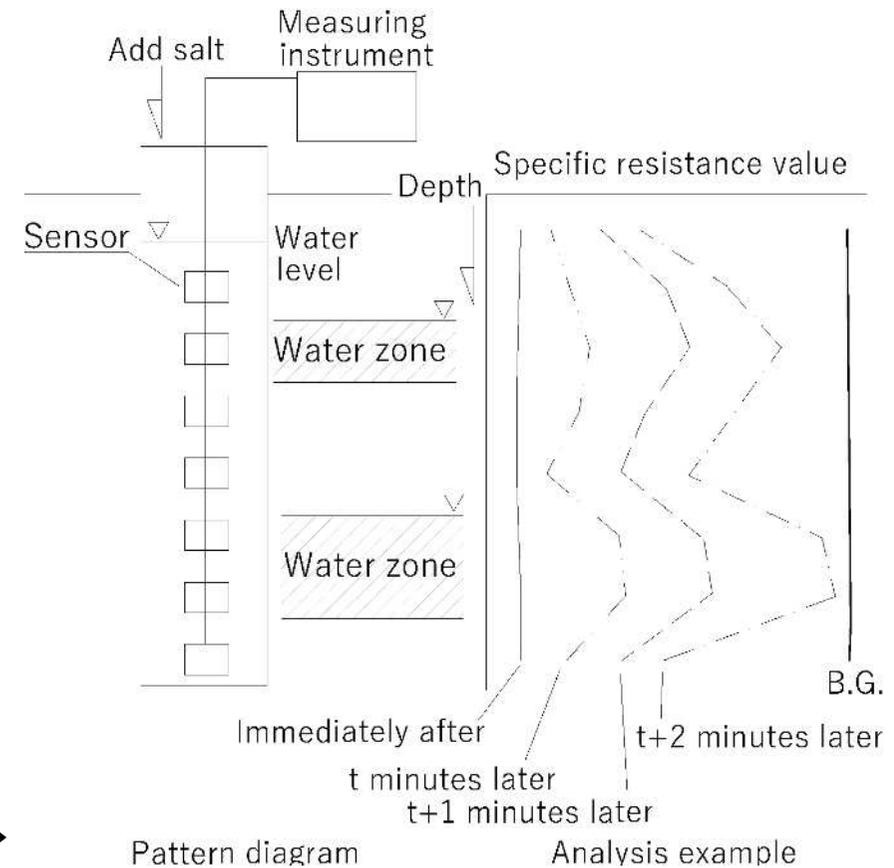
| 調査方法 | 原理 | 主な利点・主な課題点 |
|---------|--|-------------------------------------|
| 孔内水位測定 | 観測孔内部に溜まった水の深度を計測する | 存在する水を確実に計測できる ピンポイントのデータしか得られない |
| 地下水検層 | 観測孔の水に食塩などを溶かして電気伝導度の回復速度から地下水流動層を検出する | 複数の地下水帯を検出可能 ピンポイントのデータしか得られない |
| トレーサー試験 | 地下水にトレーサー物質を投入して、複数地点でトレーサーの検出や濃度計測から経路を検討する | 地下水流動を検出可能 分解能を上げるためには費用と労力が掛かる |

孔内水位観測と地下水検層模式図

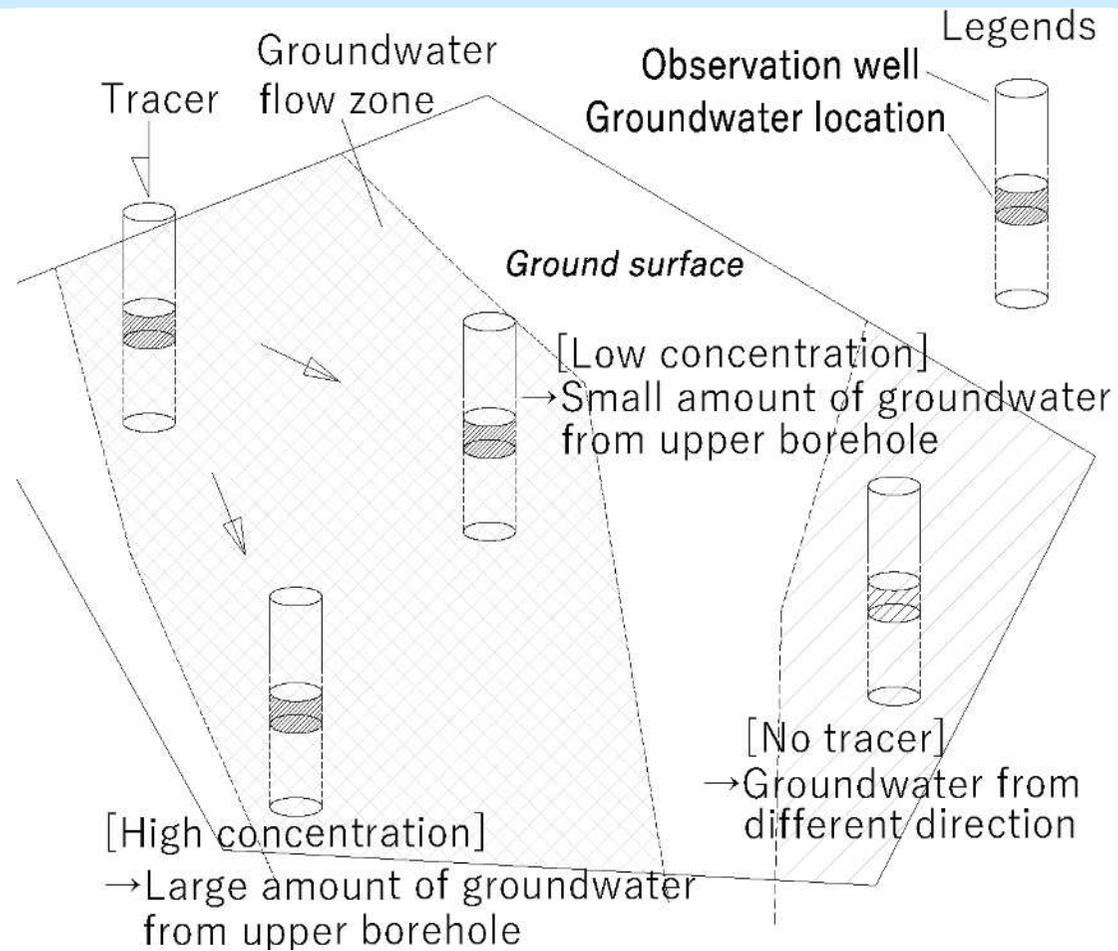


← 孔内水位観測模式図
(Yokoyama et al. (2022))

地下水検層模式図→
(Yokoyama et al. (2022))



トレーサー試験模式図

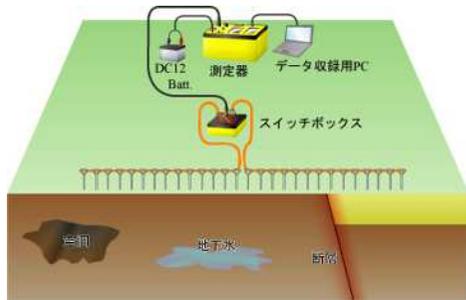


トレーサー試験模式図
(Yokoyama et al. (2022))

間接的手法：直接水に触れずに調査する

| 調査方法 | 原理 | 主な利点・主な課題点 |
|---------|--------------------------|---------------------------------|
| 電気探査 | 電気の伝わり方の差から水の存在を推定する | 2次元的な計測が可能 人工的なノイズがある場合適用が困難 |
| 1m深地温探査 | 地中温度の差から水の存在を推定する | 簡易に広い範囲を計測可能 計測不能時期が存在する |
| 流水音探査 | 地面の音を計測して水の存在を推定する | 簡易に多くの箇所を計測可能 大深度への適用が困難 |
| 空中電磁探査 | 電磁波を用いて比抵抗を測定し、水の存在を推定する | 広範囲を探査できる 水に近い比抵抗の分離が困難 |

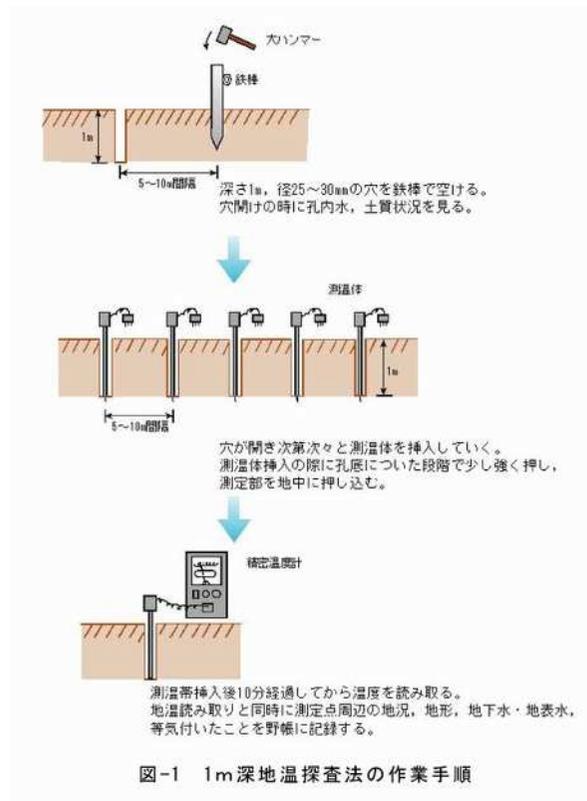
間接的手法の模式図



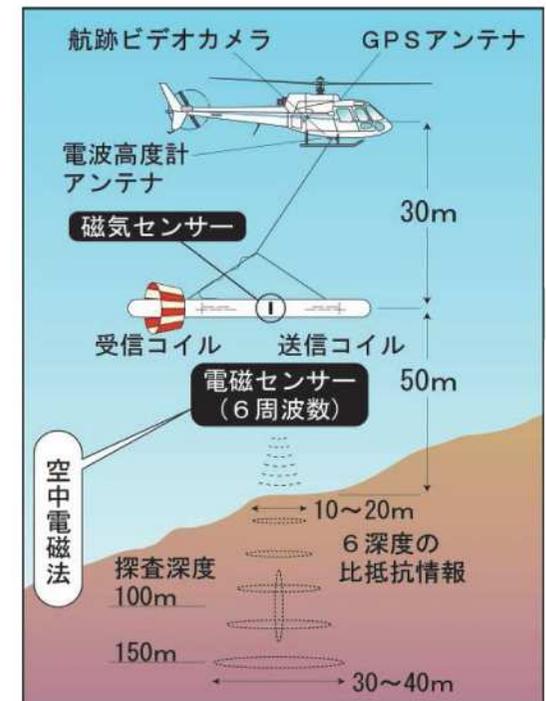
電気探査模式図
(日本地下探査webサイト)



流水音探査状況
(太田ジオリサーチwebサイト)



1m深地温探査模式図
(斜面对策技術協会webサイト)

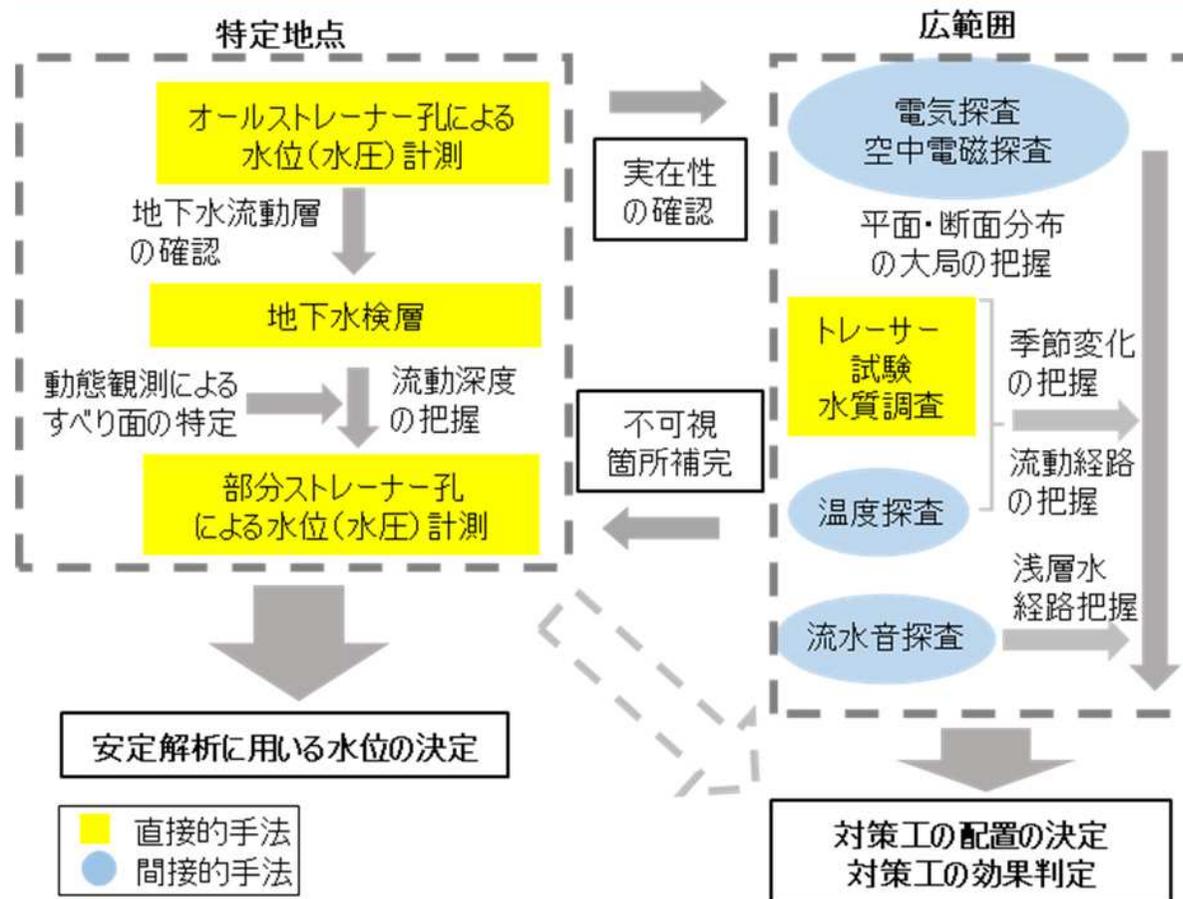


空中電磁探査模式図
(牧浦ほか, (2018))

直接的手法と間接的手法は なぜ組み合わせる必要があるのか

| 手法 | 利点 | 課題点 |
|-----------------------------|-----------------|---------------|
| 直接的手法 | ・ 水の存在確実性を担保できる | ・ 点の情報しか得られない |
| それぞれの手法は互いに補い合う関係にある | | |
| 間接的手法 | ・ 広範囲を迅速に調査可能 | ・ 存在確実性は推定になる |

適切な組合せは有効な調査手法となる



Yokoyama et al. (2022)
をもとに作成

組合せによる調査および解析例

<採用した調査手法>

3. 調査方法

直接的手法

孔内水位測定
<地下水の深度を調査>

水質調査
<地下水の同一性を調査>

点の調査



間接的手法

1m深地温探査
<地下水を面的に調査>

面の調査



地下水の 深度情報
同一性の確認
流出経路
経時的な変化
が期待できる

調査解析サイトは結晶片岩類の地すべり地



<直接的手法>

孔内水位観測

浅層地下水観測 11箇所

深層地下水観測 2箇所

水質調査 14試料

<間接的手法>

1m深地温探查 49点

孔内水位観測で得られるデータは地下水位

浅層地下水位観測 → 浅層領域の形成される地下水帯の
時間的变化を観測

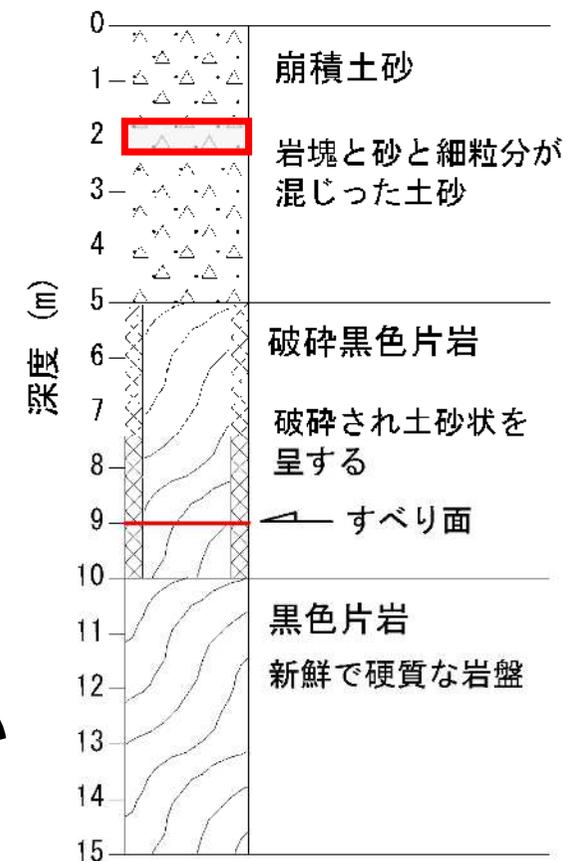
深層地下水位観測 → 深層(すべり面付近)地下水の
時間的变化を観測

浅層・深層観測ともに測定観測は10分とした

浅層地下水観測をなぜ採用したのか



ボーリングコア写真



深度2.0m付近に細粒分が多い深度が分布する
→深度2.0m以浅に地下水帯が形成される可能性が高い

水質調査は地下水の同一性を調べる

調査はイオンクロマトグラフ法で行い、
陽イオン4項目と陰イオン6項目で実施した

浅層観測孔と深層観測孔および近傍の水路と
河川水、天水を対象として採水した

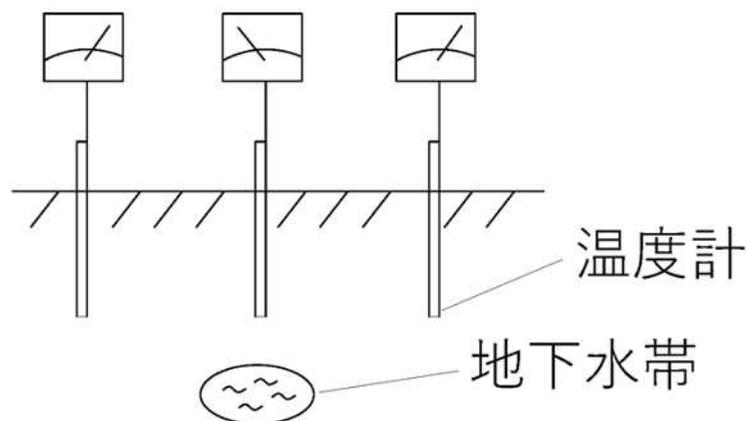
採水は降雨期間中に4回実施

マグネシウム (Mg) イオン
カルシウム (Ca) イオン
ナトリウム (Na) イオン
カリウム (K) イオン

塩素 (Cl) イオン
硫酸 (SO₄) イオン
硝酸 (NO₃) イオン
亜硝酸 (NO₂) イオン
リン酸 (P) イオン
フッ酸 (F) イオン

1m深地温探査では地下水流動経路を検出する

1 m深度の温度を測定する



1m深地温探査模式図(竹内, (1980))

探査は降雨時と非降雨時の2回実施



1m深地温探査結果例

(竹内, (2003))

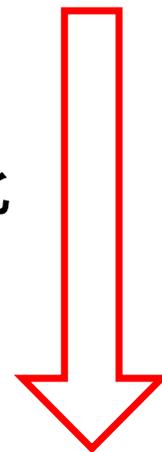
調査結果の整理

4. 調査結果

孔内水位観測結果：地下水位の時間的変化

水質調査結果：溶存イオン濃度の時間的変化

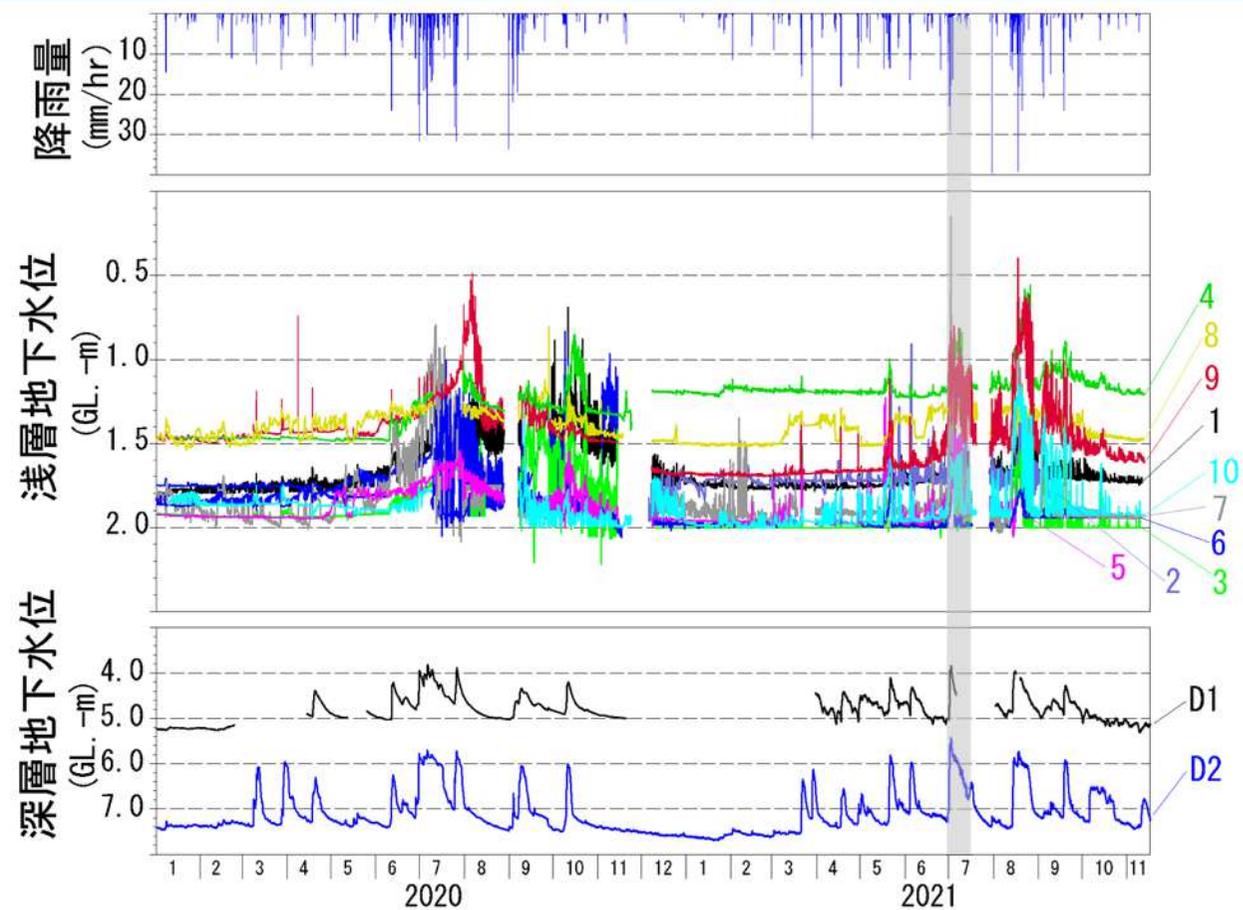
1m深地温探査結果：地下水流動箇所を検出



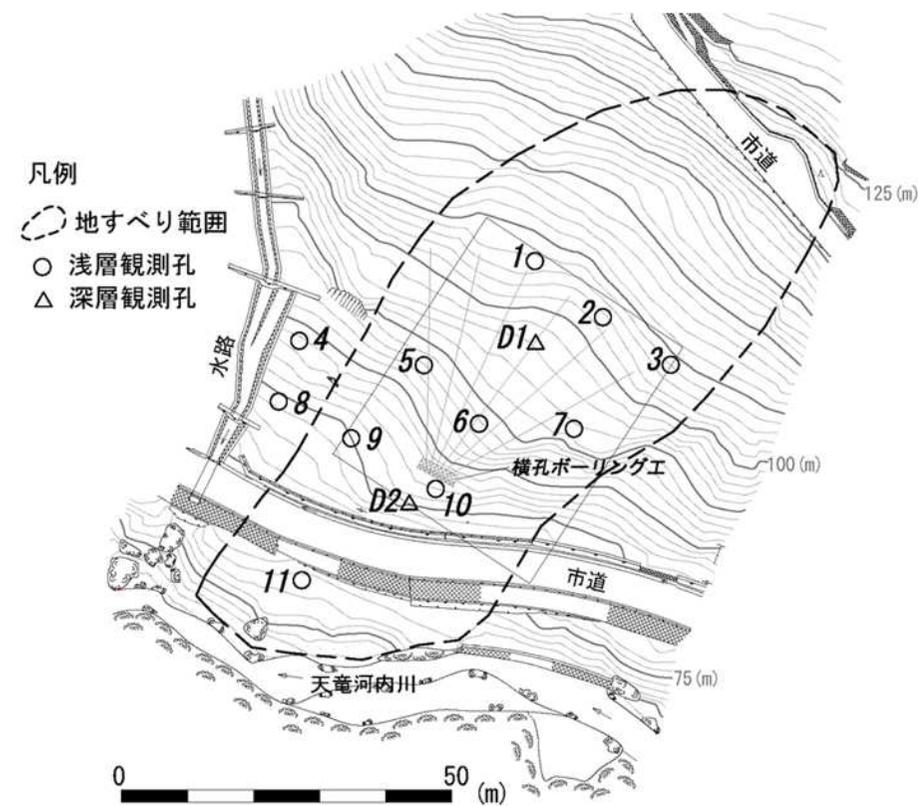
浅層地下水の流出経路を推定できる

地下水水位観測結果

浅層は変動にばらつき大きい 深層は長周期的に変動



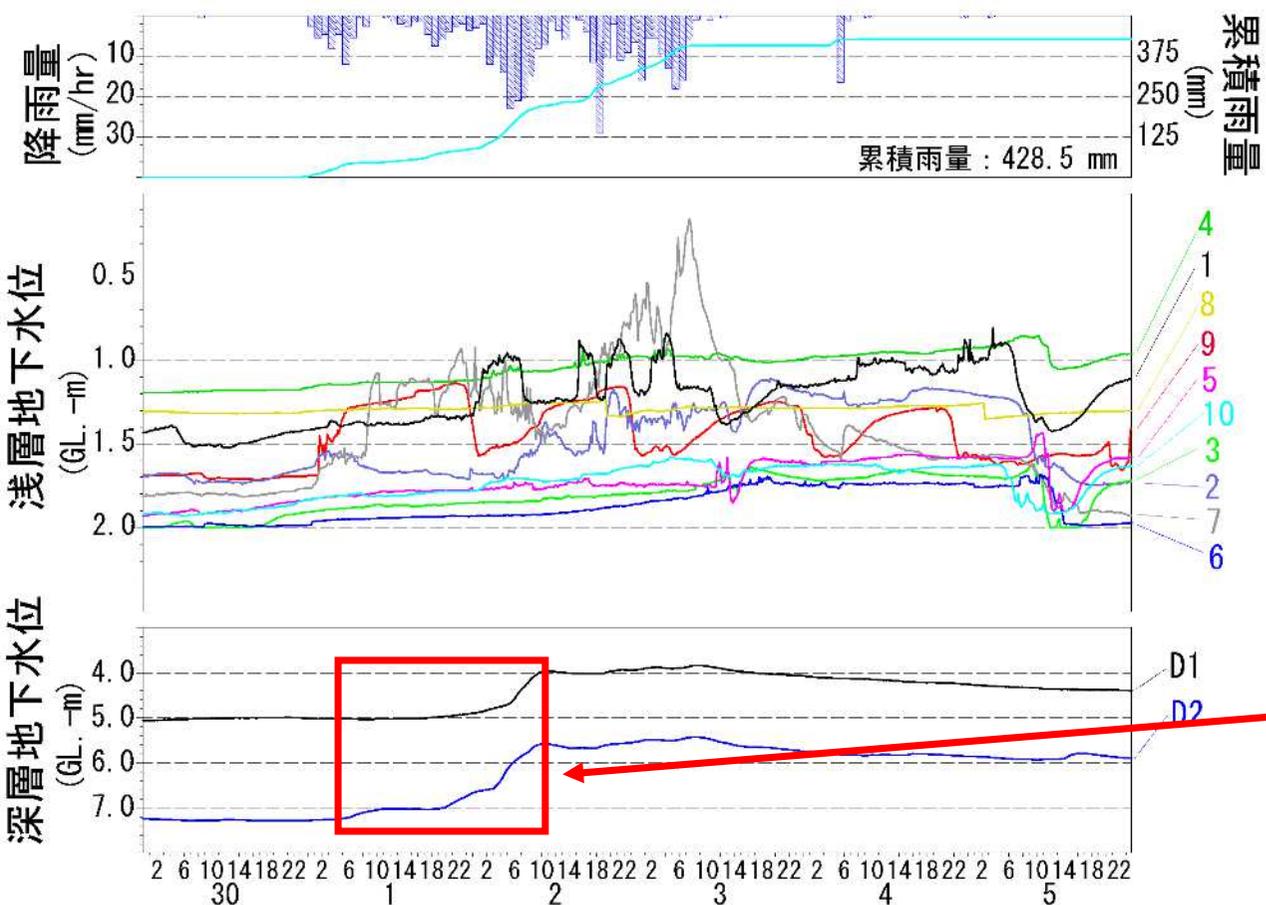
地下水水位変動と降雨量グラフ



観測孔位置図

豪雨時の地下水挙動

孔によって特徴的な変動が見られる



7番孔の水位変動は大きい
8番孔の水位はほぼ変動なし

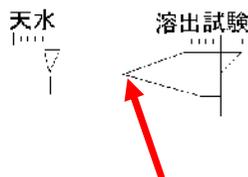
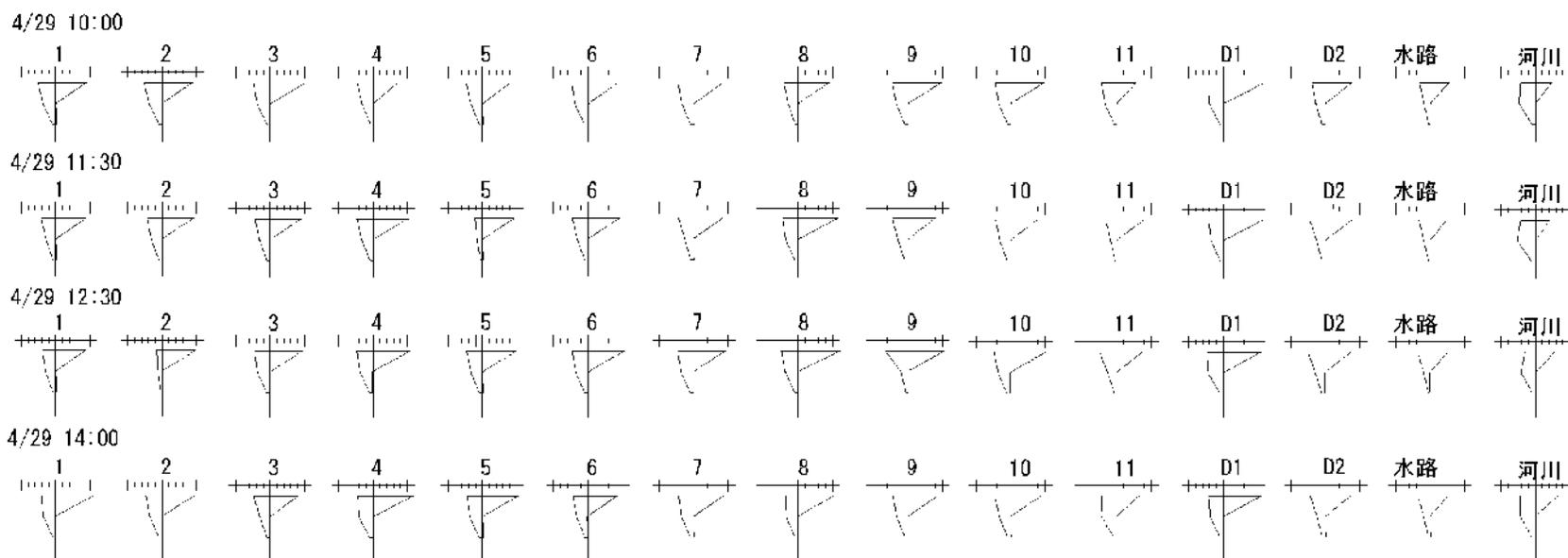


浅層領域の地下水分布は
不均質と言える

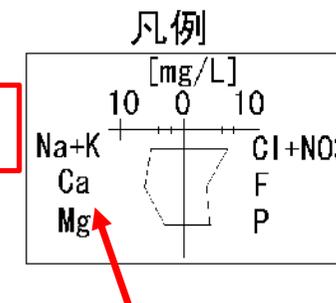
D1に比べD2の方が早く
上昇している

水質調査結果

調査地点ごとの分布傾向に大きな差はない



溶出試験ではCaイオンが特徴的に多い



ヘキサダイアグラム

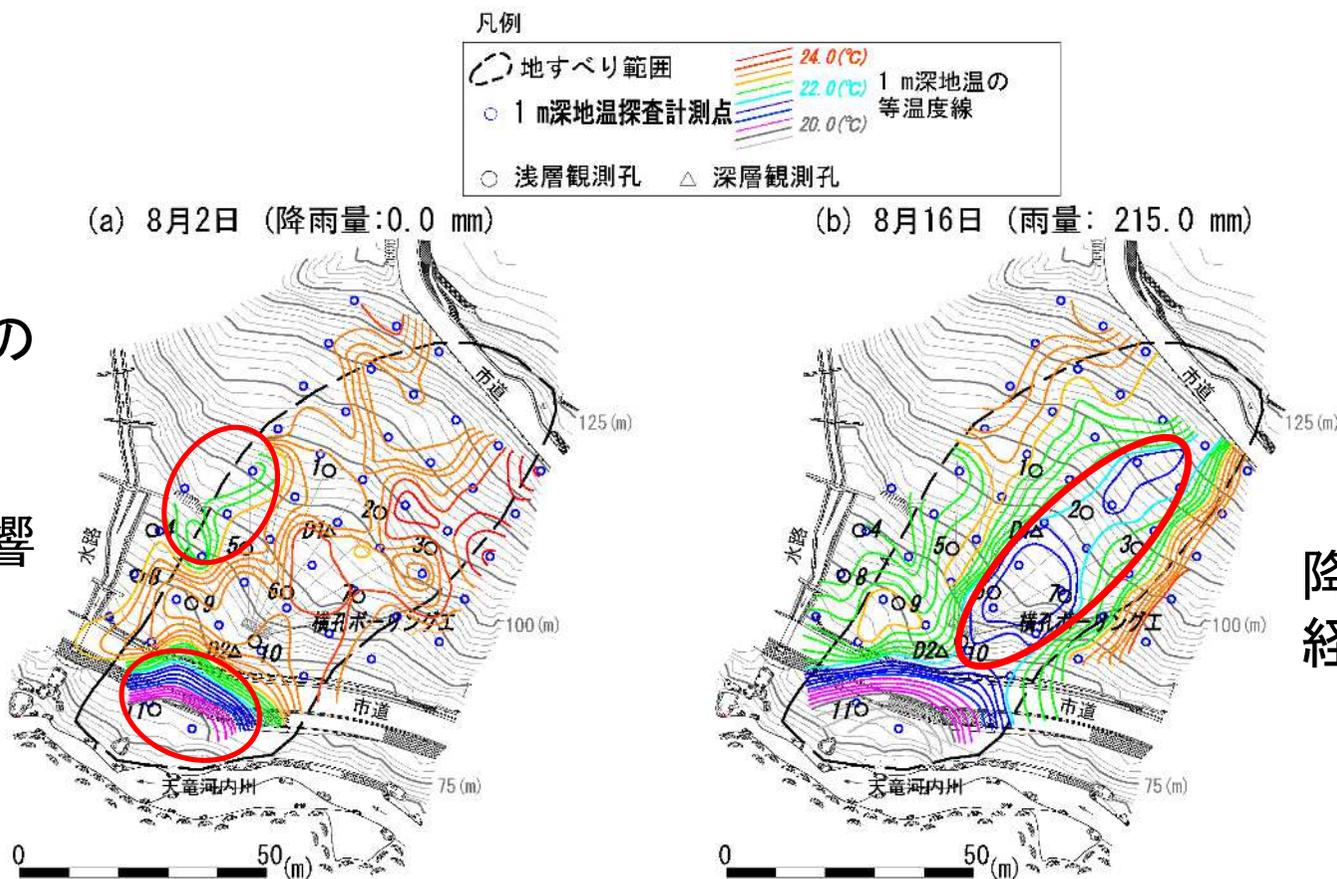
1m深地温探査結果

降雨時には地下水流動箇所が検出される

水路や河川付近の
地温が低い

表流水などの影響

降雨時には流動
経路が検出



1m深地温分布図

組合せによる解析

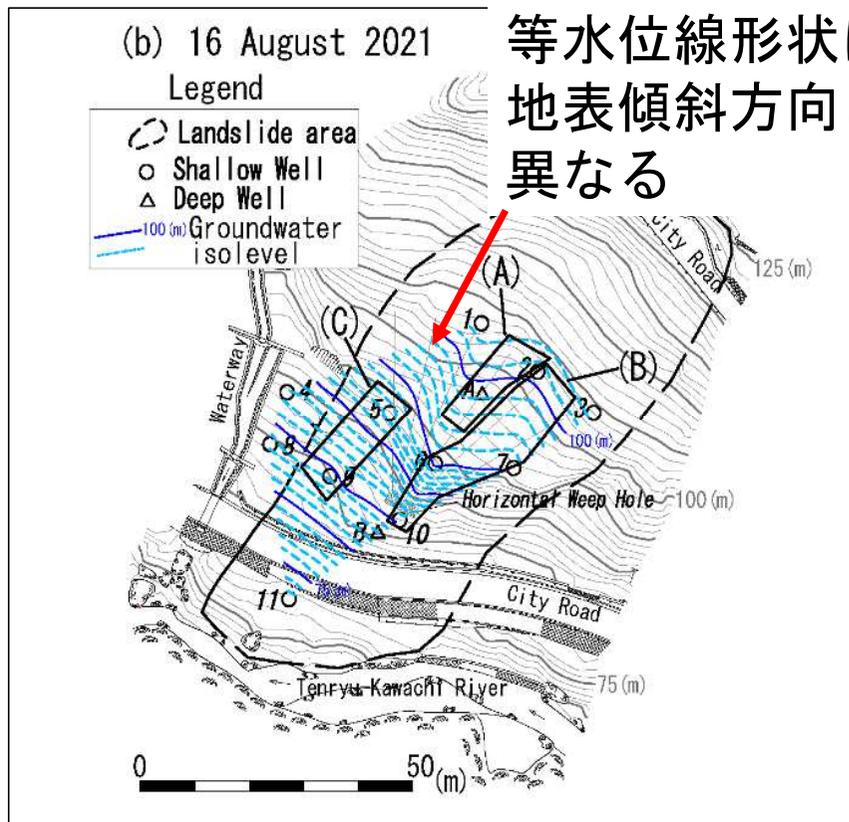
5. 考察

浅層領域の地下水分布を標高で示す
→地下水流動方向を推定

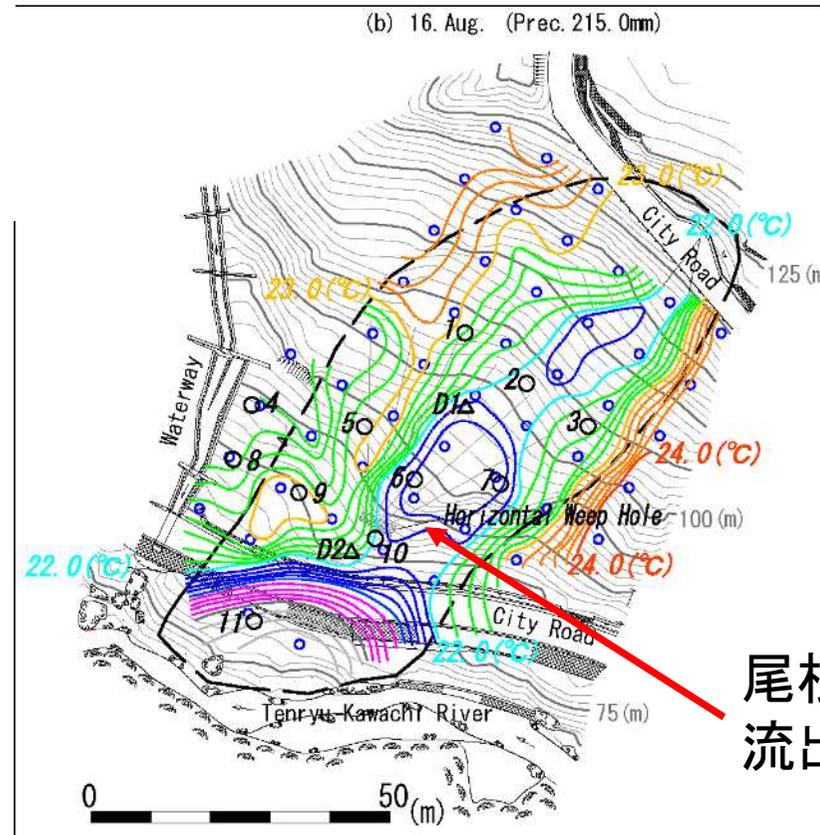
イオン濃度の時間的变化
→地下水の滞留時間に差が生じている

流出経路の分布
→地形と調和しない位置に形成されている

浅層地下水は地表の最大傾斜方向とは異なる経路を流動している

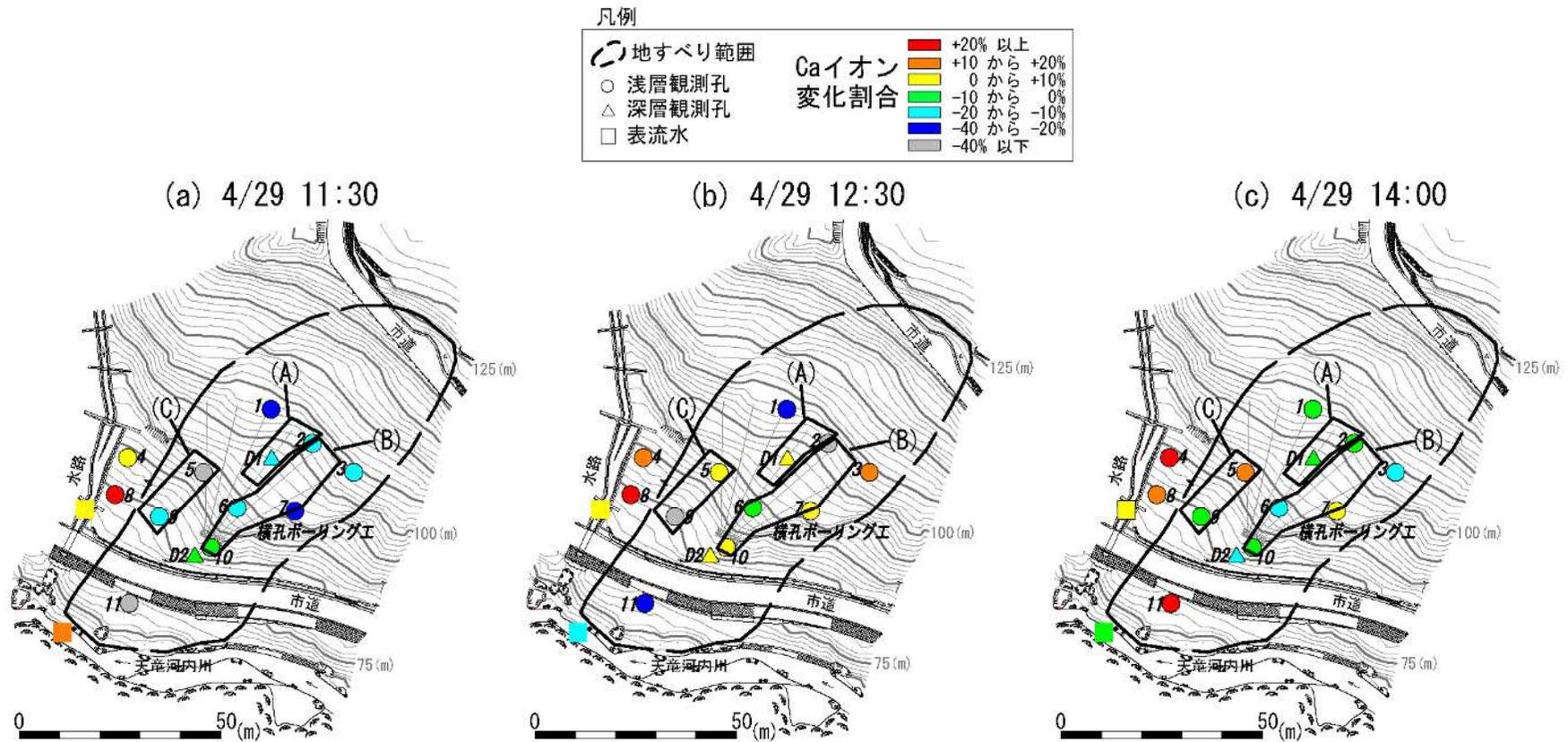


2021/8/16 10:00等水位線分布



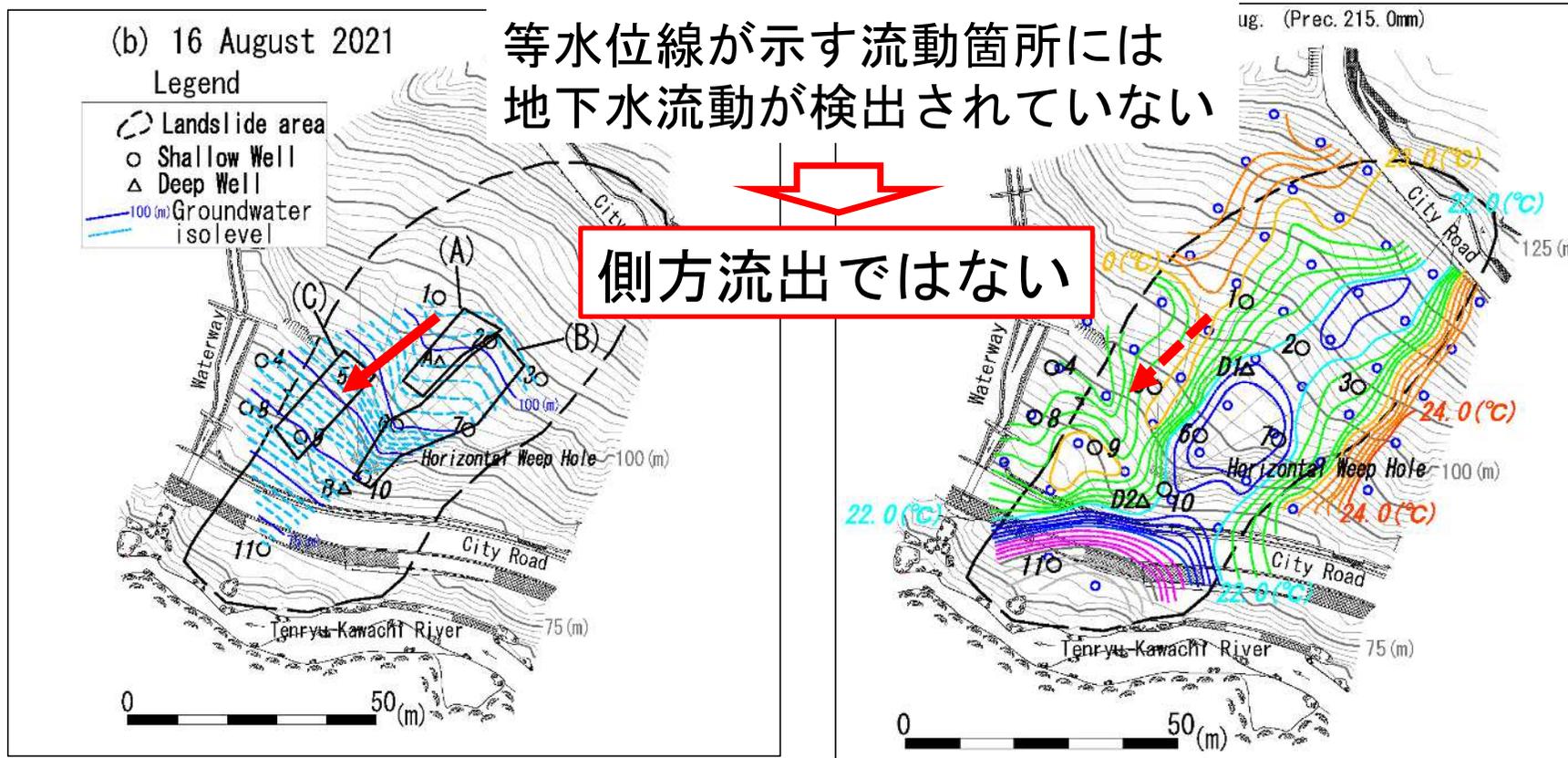
2021/8/16 1m深地温分布

Caイオンは場所ごとに濃度変化に差がある



4/29 10:00を1とした変化割合図

浅层地下水はどこに流動しているのか



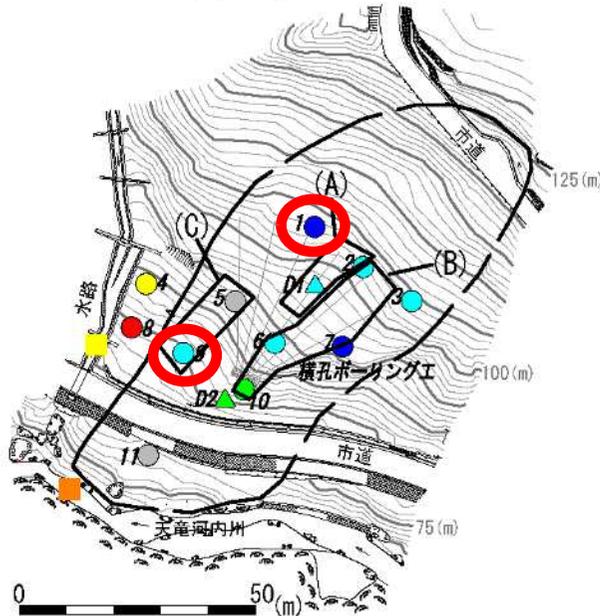
2021/8/16 10:00等水位線分布

2021/8/16 1m深地温分布

流動経路はCaイオン濃度変化と 照らし合わせると浸透箇所が抽出できる

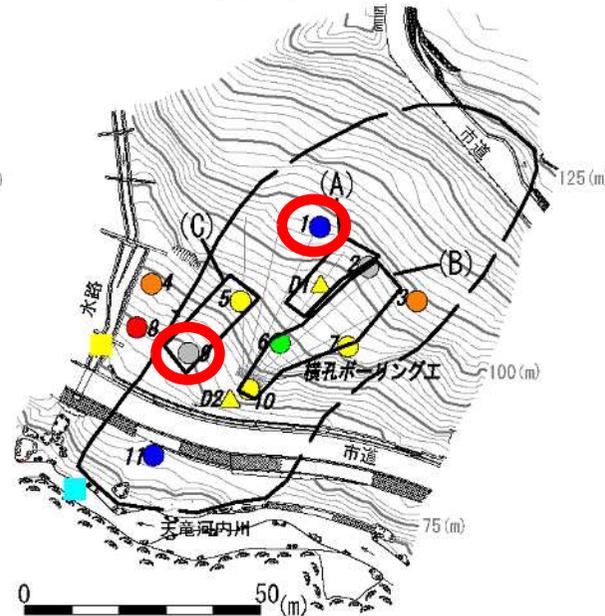
減少量が多い箇所では
Caイオン濃度が低い水が
供給されているはず

(a) 4/29 11:30



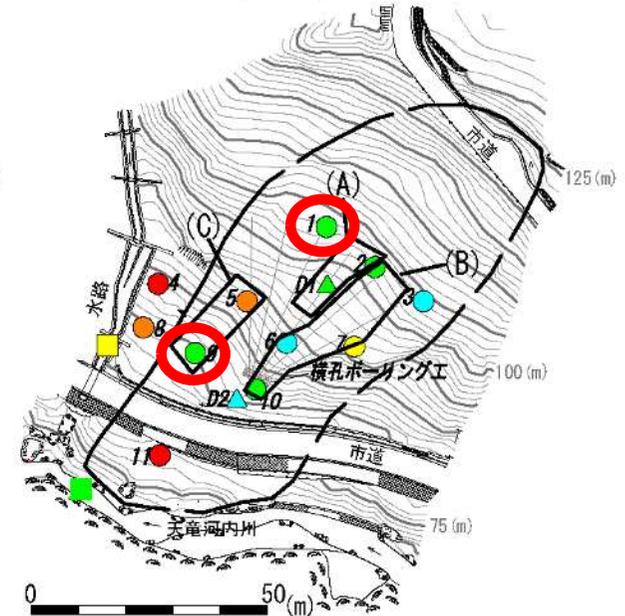
水は移動しているが、
1m深地温では流出が
検出されない

(b) 4/29 12:30



側方流出ではなく
鉛直浸透が優勢

(c) 4/29 14:00



Caイオン濃度割合変化図

複数の観測手法を組み合わせることによって 地下水流動経路・浸透箇所を抽出できる

6. まとめ

<水位観測>

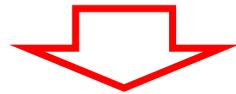
等水位線

地下水流動経路の抽出が可能



<水質調査>

Caイオン濃度変化

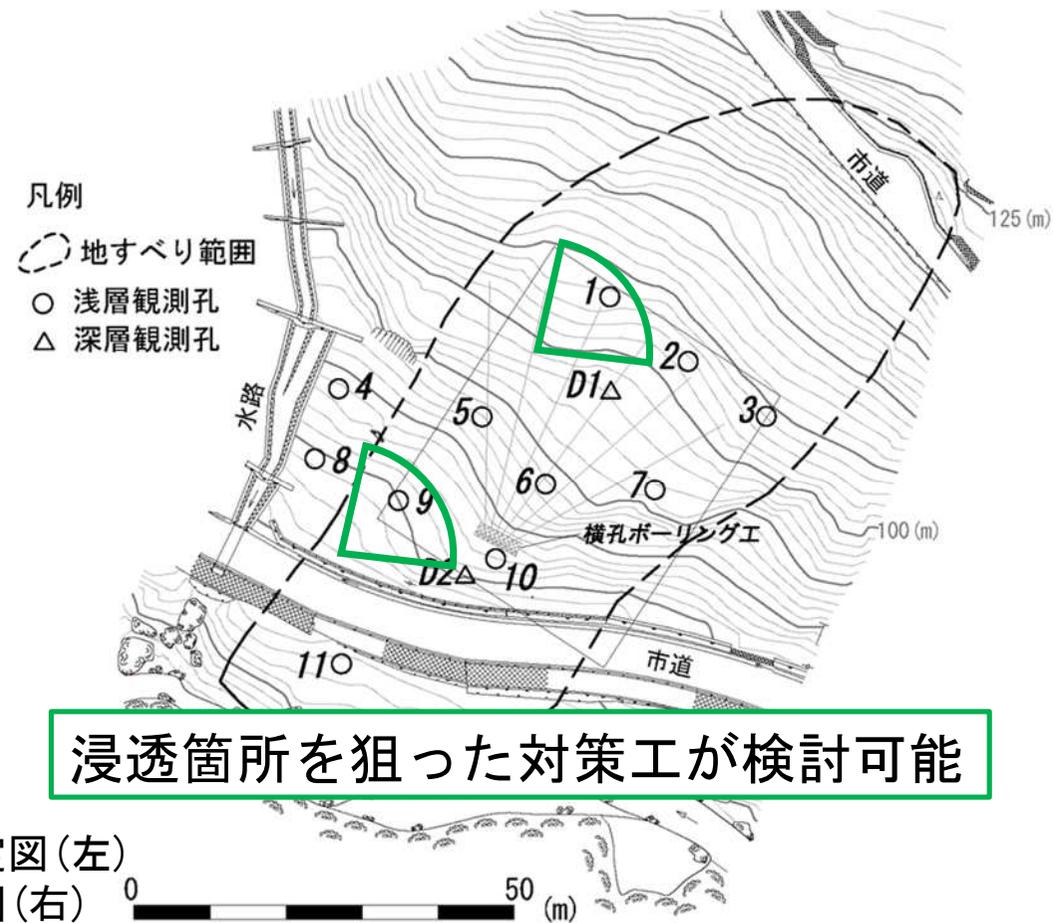


浸透箇所の抽出が可能

<1m深地温探査>

1m深地温分布

流出経路や浸透箇所は対策工検討に 非常に有益な情報を提供する



地下水流動箇所推定図(左)
対策工位置選定例図(右)

組合せによる地下水調査は 積極的な活用が望まれる

複数の調査を実施すると調査費用は増加するが
これまでの対策工展開とは異なる展開が可能となれば
工事費用を圧縮できる可能性が高い。

結果的に事業費を抑えることができることから
積極的な活用が望まれる。

ご清聴ありがとうございました

引用文献

土木研究所 (2007): 地すべり防止技術指針(解説), pp. 55-56.

土木研究所 (2013): 土研ニュース <https://www.pwri.go.jp/jpn/about/pr/mailmag/webmag/wm032/news.html>

国土交通省東北地方整備局webサイト(2024):

https://www.thr.mlit.go.jp/shinjyou/04_gakushu/jisuberi_sikumi/sikumi.html

国土交通省webサイト (2008): https://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sabo/jisuberi_taisaku.html

牧浦信一, 上出定幸, 堤浩志, 奥村稔, 小田和広, 松井保 (2018): 空中電磁法探査による比抵抗分布に着目した高速道路危険斜面の抽出技術の開発, 公社地盤工学会中国支部論文報告書, 地盤と建設, Vol. 36, No. 1, pp. 17-30.

太田ジオリサーチwebサイト(2024): <https://ohta-geo.co.jp/>

斜面防災対策技術協会webサイ (2022): https://www.jasdim.or.jp/gijutsu/jisuberi_joho/tyosa/tion/model.html

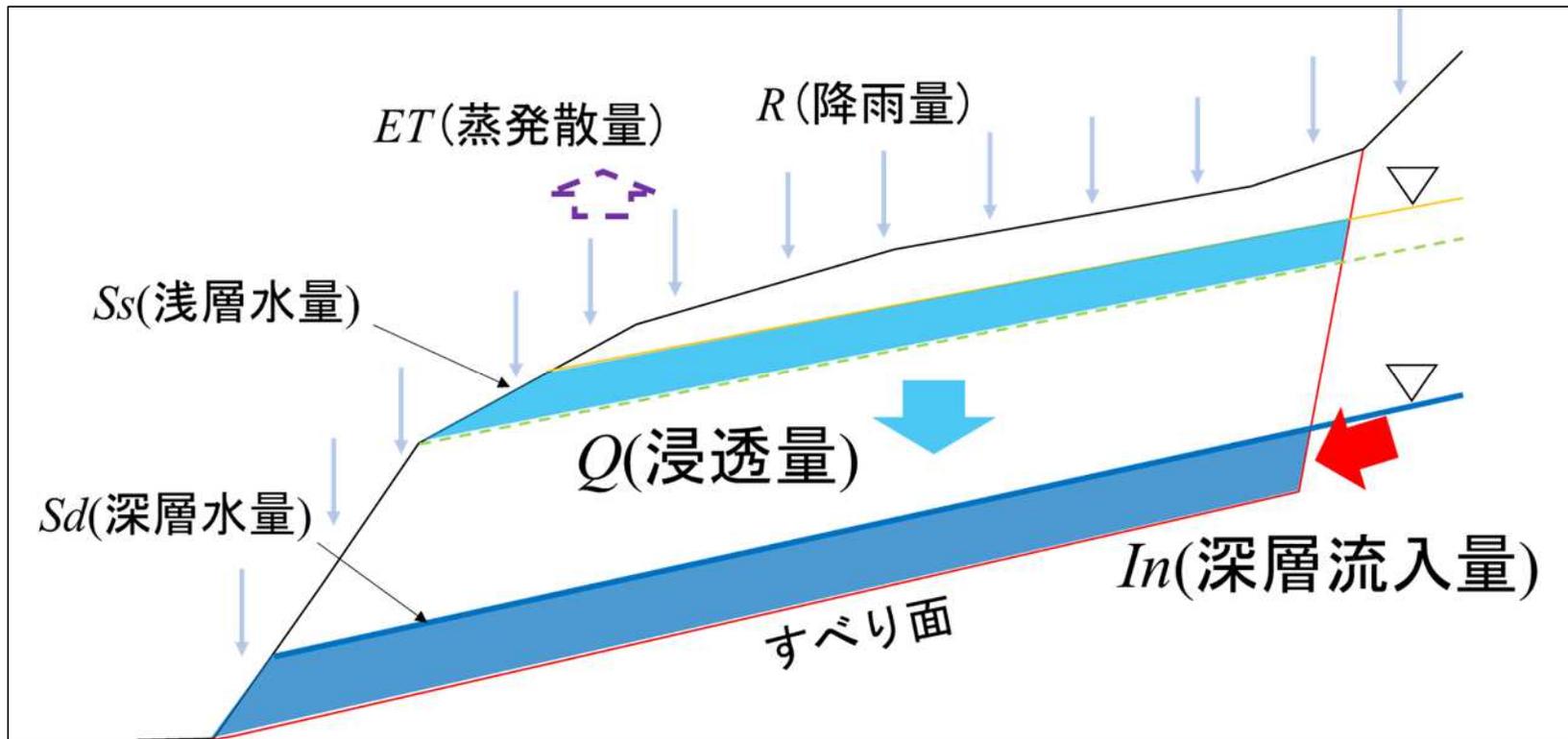
竹内篤雄 (1996): 温度測定による流動地下水調査法, pp. 62-63. 古今書院, 東京.

Yokoyama, K., Imaizumi, F., and Egusa, T. (2022): A Review of Groundwater Observation Methods for Slow-Moving Landslide, International Journal of Erosion Control Engineering, Vol. 15, No. 2, pp. 7-22.

横山賢治 (2023): 浅層地下水が深層地下水動態に与える影響の解明, 岐阜大学連合農学研究科 博士論文

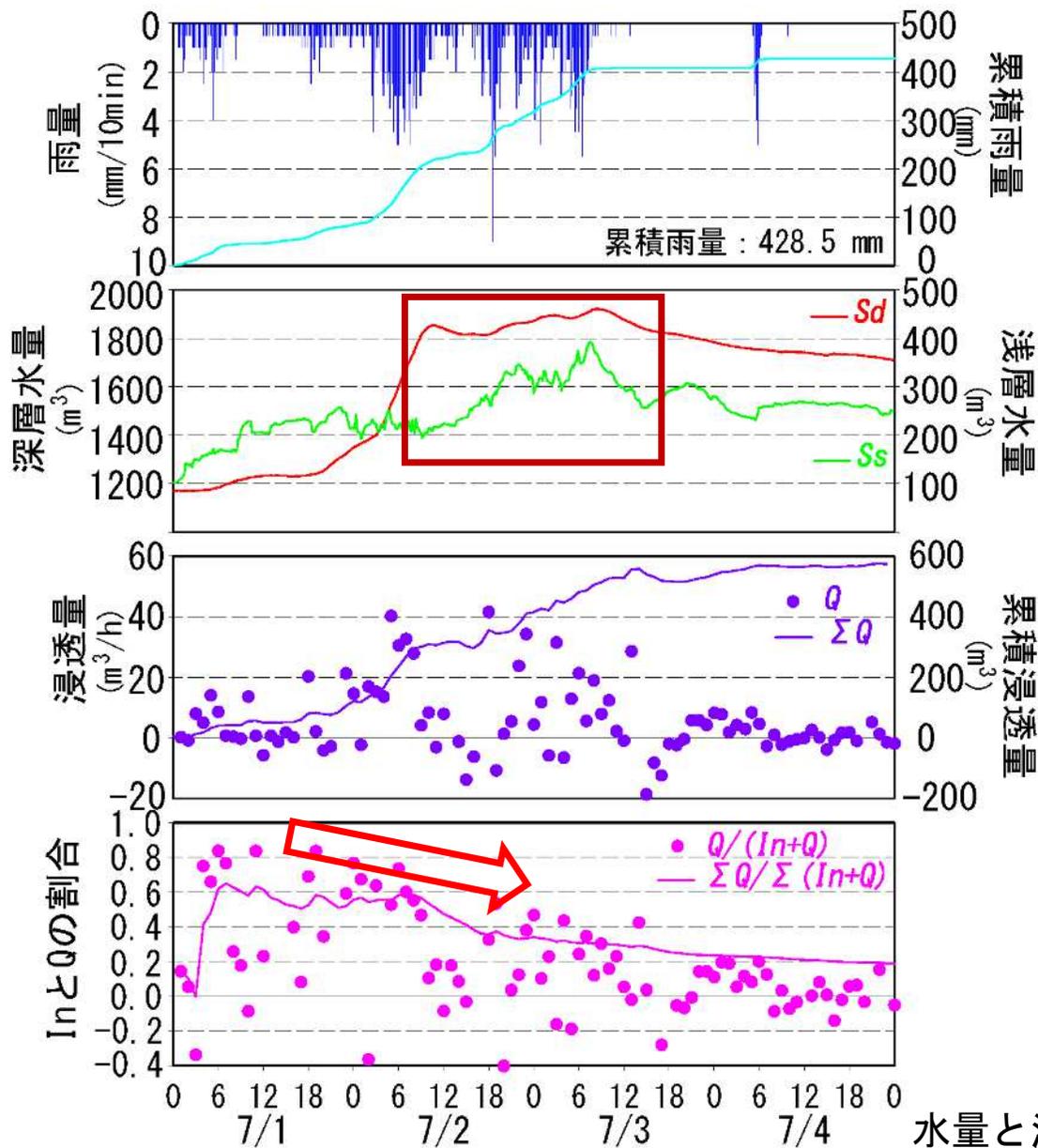
全国地質調査業協会連合会webサイト (2022): <https://www.zenchiren.or.jp/tikei/saigai.html>

水収支解析から鉛直浸透が優勢であることを考察できる



解析模式断面図

深層地下水量の増加が浅層に比べ遅い理由



鉛直浸透量の割合は降雨前半で多い
鉛直浸透量割合が減少に転じると
浅層地下水量が増加する



浅層地下水が深層領域に鉛直浸透
していると考えられる

鉛直浸透の場所は水質調査などから
推定可能