



第20回1F廃炉の先研究会

地下水流動からみた福島県阿武隈山地周辺の 放射性セシウムによる汚染リスク

2022年6月24日（金）

竹内真司

（日本大学文理学部地球科学科）

Google



自己紹介

- 出身：静岡県
- 専門分野：地質、地下水流動
- 主な経歴：
 - 1991（H3）：動力炉・核燃料開発事業団・東海(現、日本原子力研究開発機構)
 - 1994（H6）：科学技術庁
 - 1995（H7.3.20）：地下鉄サリン事件（霞が関駅にてニアミス）
 - 1996（H8）：動燃事業団・東濃（岐阜）
 - 2010（H22）：原子力機構・東海
 - 2011（H23）：東北地方太平洋沖地震（茨城県にて被災、震度6弱）
 - 2011（H23）：原子力機構・福島（兼務）
 - 2012（H24）：日本大学
 - 2018年（平成30年9月6日）：北海道胆振東部地震（日本地質学会参加中に被災）

研究対象

●福島原発事故関連

- 福島県南相馬市周辺での地下水流動と放射性セシウムの移行
- 関東地方への影響（主要河川沿いのセシウム分布）
- 浅層地盤中の物質移行

●放射性廃棄物の地層処分関連

- 断層や割れ目の性状と地下水・物質移動
- 炭酸カルシウムなどによる岩石中の空隙のシーリング特性
- 地層処分の社会的受容性

●土壌・地下水汚染関連

- 揮発性有機化合物
- 重金属汚染（主要河川沿いの重金属分布）

*「野外調査とシミュレーションなどによる地下水・物質移行研究」
→環境汚染（原発事故影響や放射性廃棄物処分など）問題の解決は、
現世代・将来世代への貢献

内容

- 研究の背景
- 地下水中の放射性セシウム測定結果
- 地質・地質構造
- 地下水流動解析
 - 広域スケール：阿武隈山地から海側への地下水流動
 - 狭域スケール：堆積岩分布域での地下水流動
- 放射性セシウムによる汚染リスク
- 今後の課題

研究の背景：花崗岩類の露出



研究の背景：風化花崗岩の露出



研究の背景：堆積岩類の露出



研究の背景：双葉断層帯（阿武隈山地／低地）

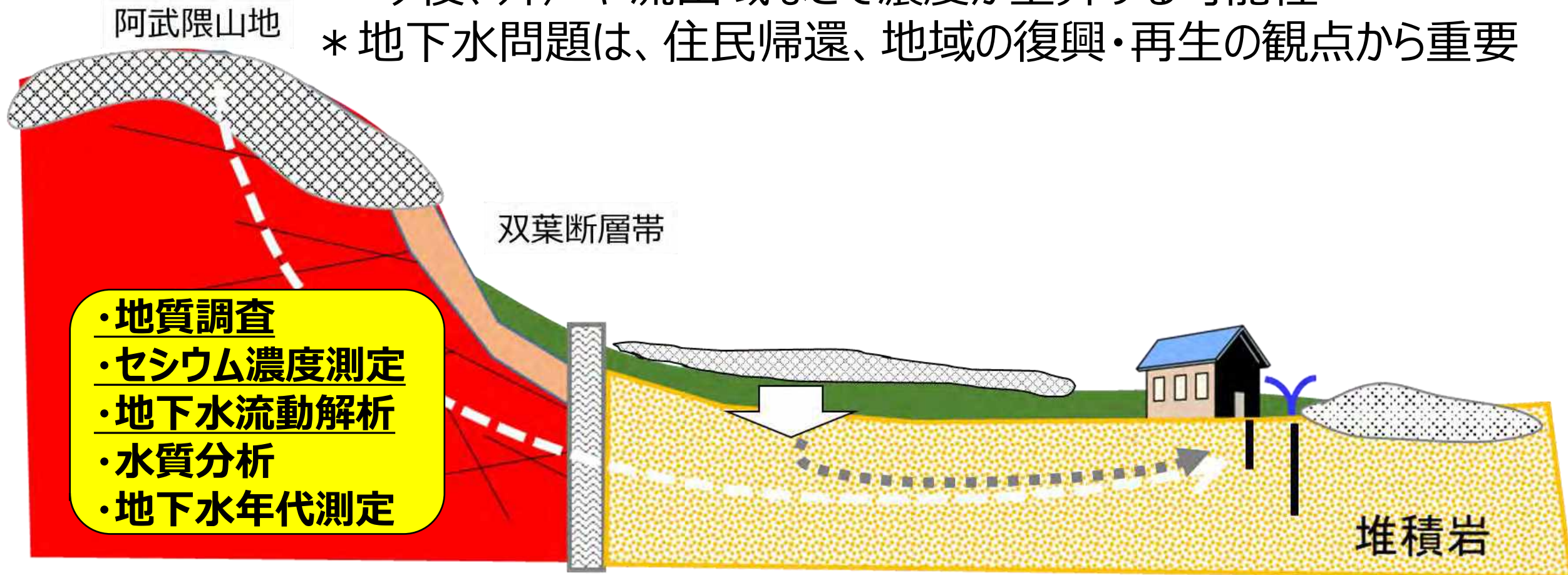


花崗岩類（左）／堆積岩（右）の境界部

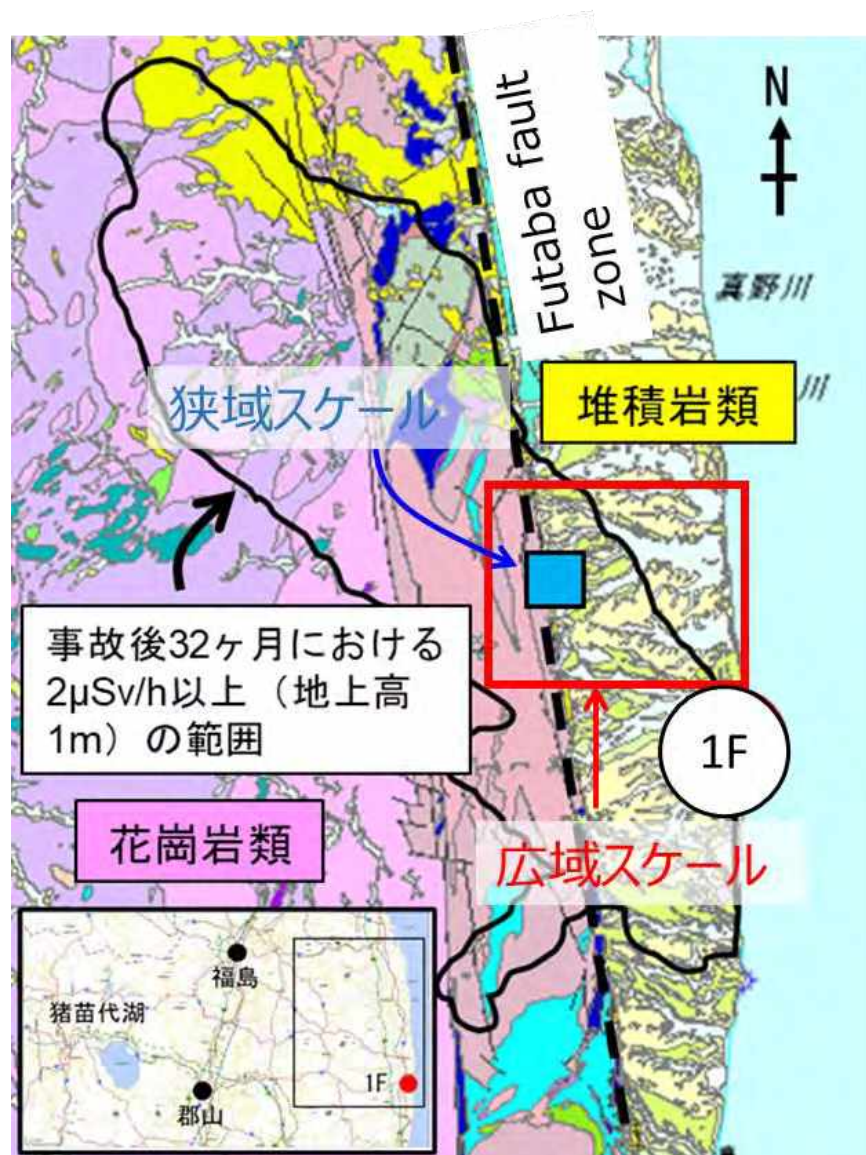
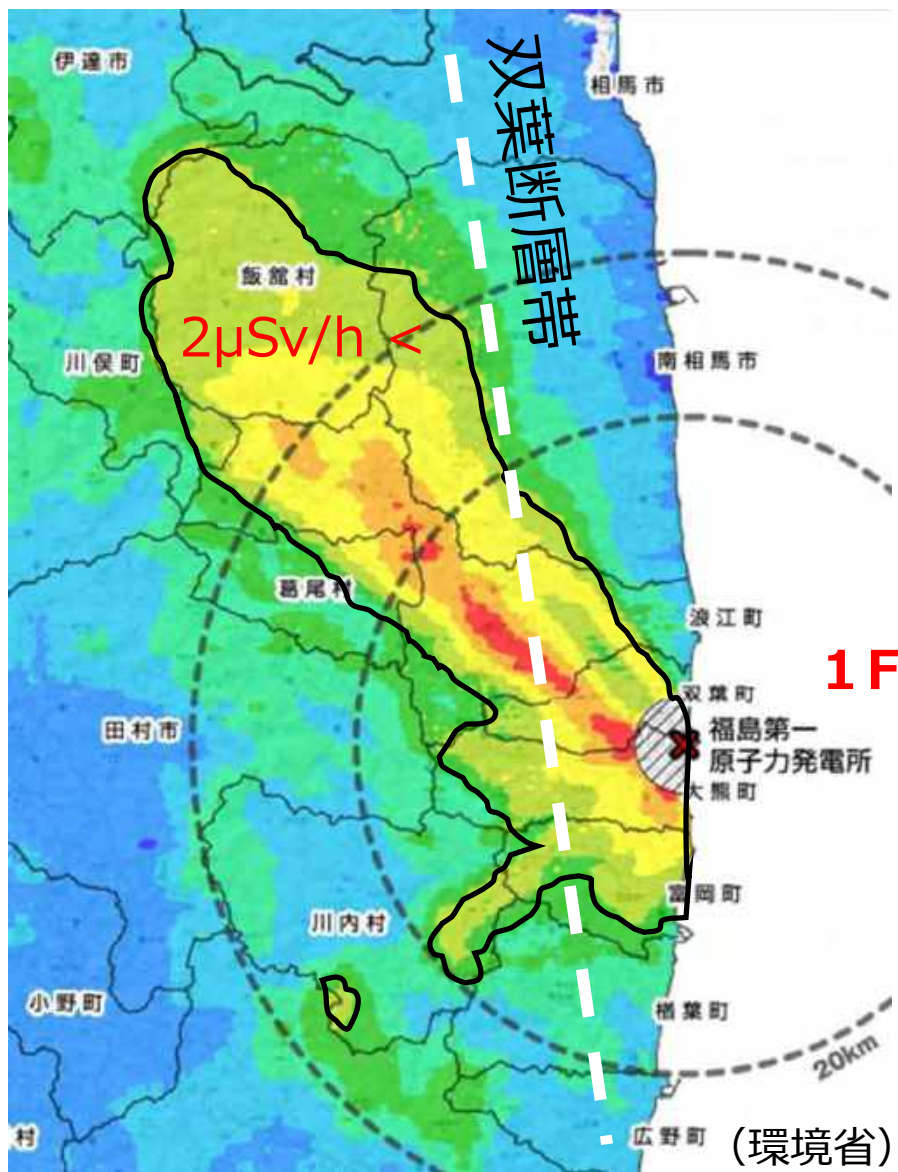


研究の背景

- 降下・沈着した ^{137}Cs の多くは表層土壌に吸着
 - 基盤が露出するような地点では地下水と共に浸透
 - 今後、井戸や流出域などで濃度が上昇する可能性
- * 地下水問題は、住民帰還、地域の復興・再生の観点から重要



南相馬市周辺の地形・地質・事故後の空間線量率



研究領域

□ 広域スケール

■ 狭域スケール

空間放射線量率分布（事故後32ヶ月）

阿武隈山地は相対的に高濃度



中通り

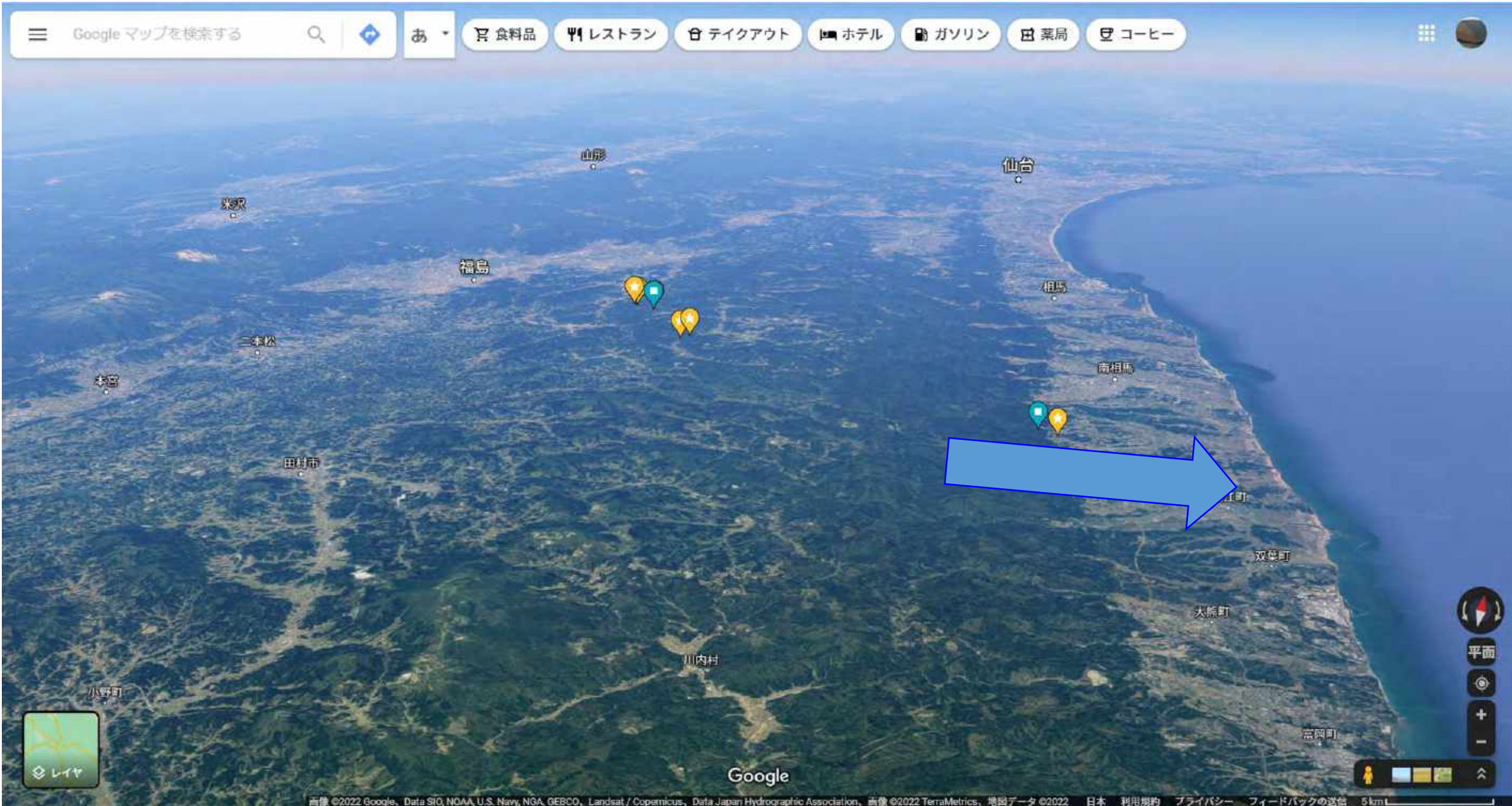
花崗岩類

阿武隈山地

双葉断層帯

堆積岩

1F



<https://www.google.co.jp/maps/@37.047121,140.9150117,20078a,35y,346.87h,70.53t/data=!3m1!1e3!5m1!1e4?hl=ja>

地下水中の放射性セシウム測定

花崗岩類

双葉断層帯

堆積岩

阿武隈山地



1F

観測井戸での放射性セシウム測定

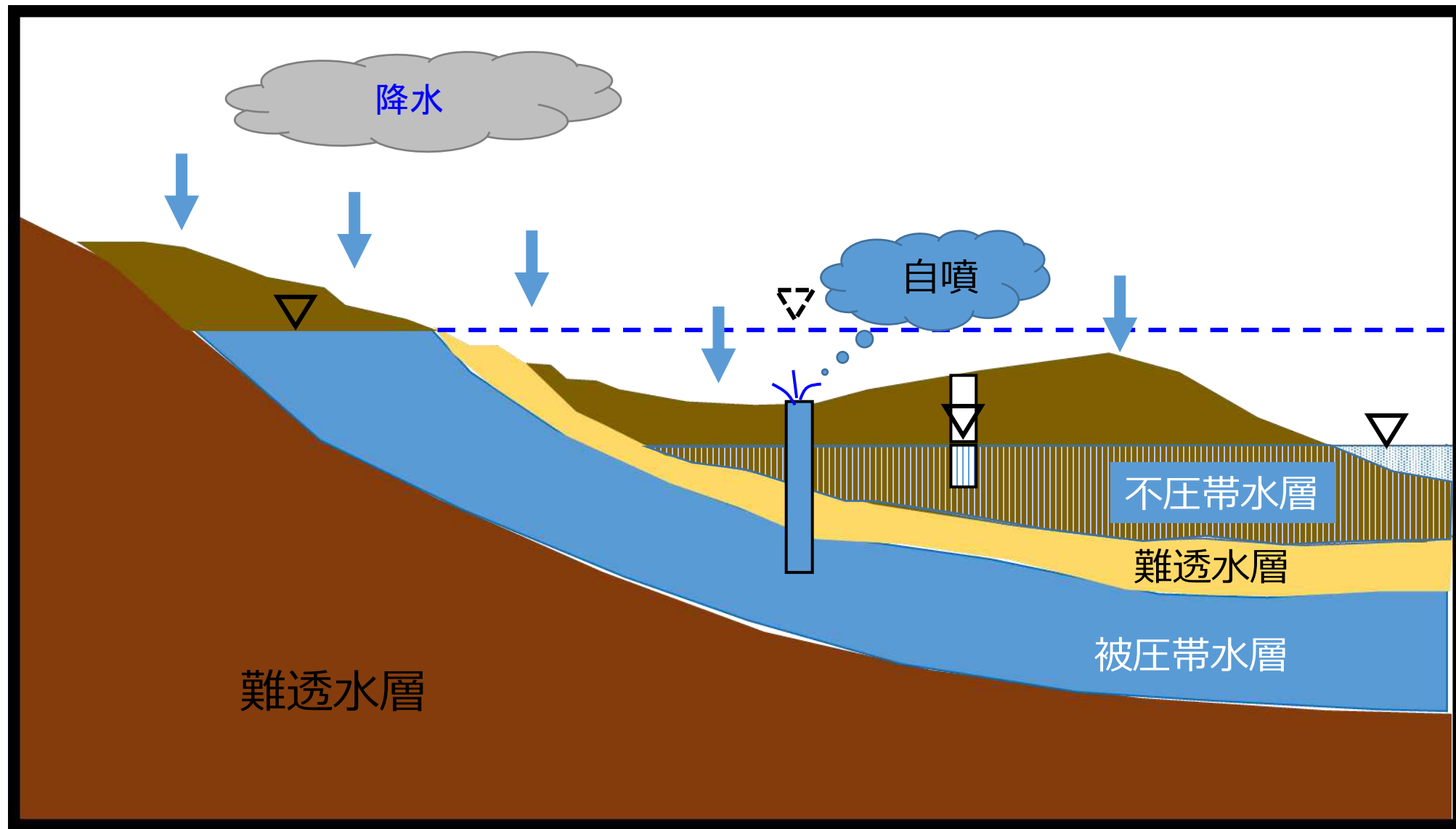


浅井戸

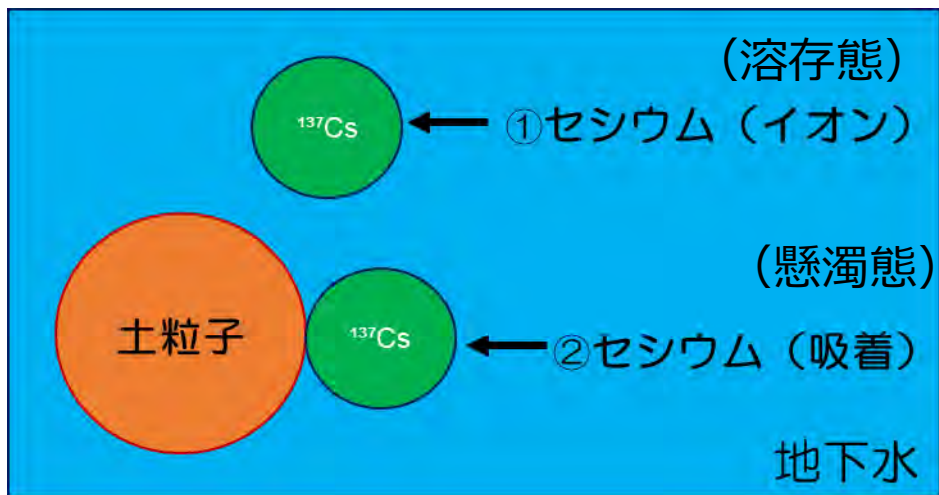


深井戸

地下水の存在状態



井戸水中の放射性セシウム¹³⁷の測定



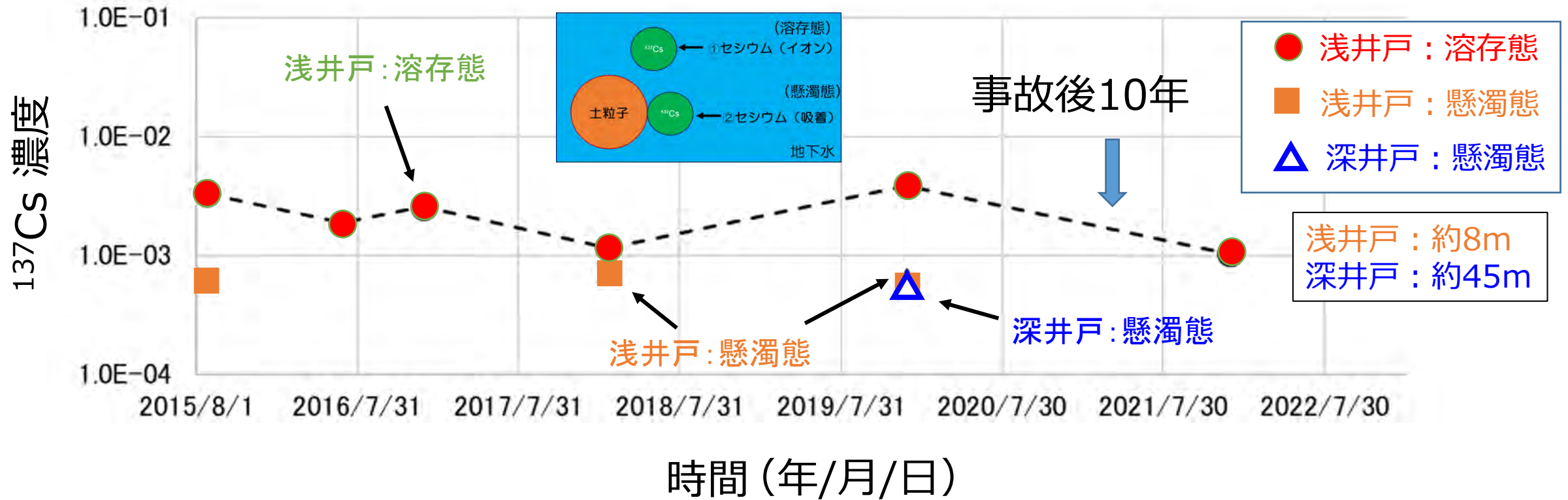
- ① 地下水にイオンとして溶け込んだもの (溶存態)
- ② 地下水中の土粒子に吸着したもの (懸濁態)



研究領域の井戸での ^{137}Cs 濃度の変化

(Bq/L)

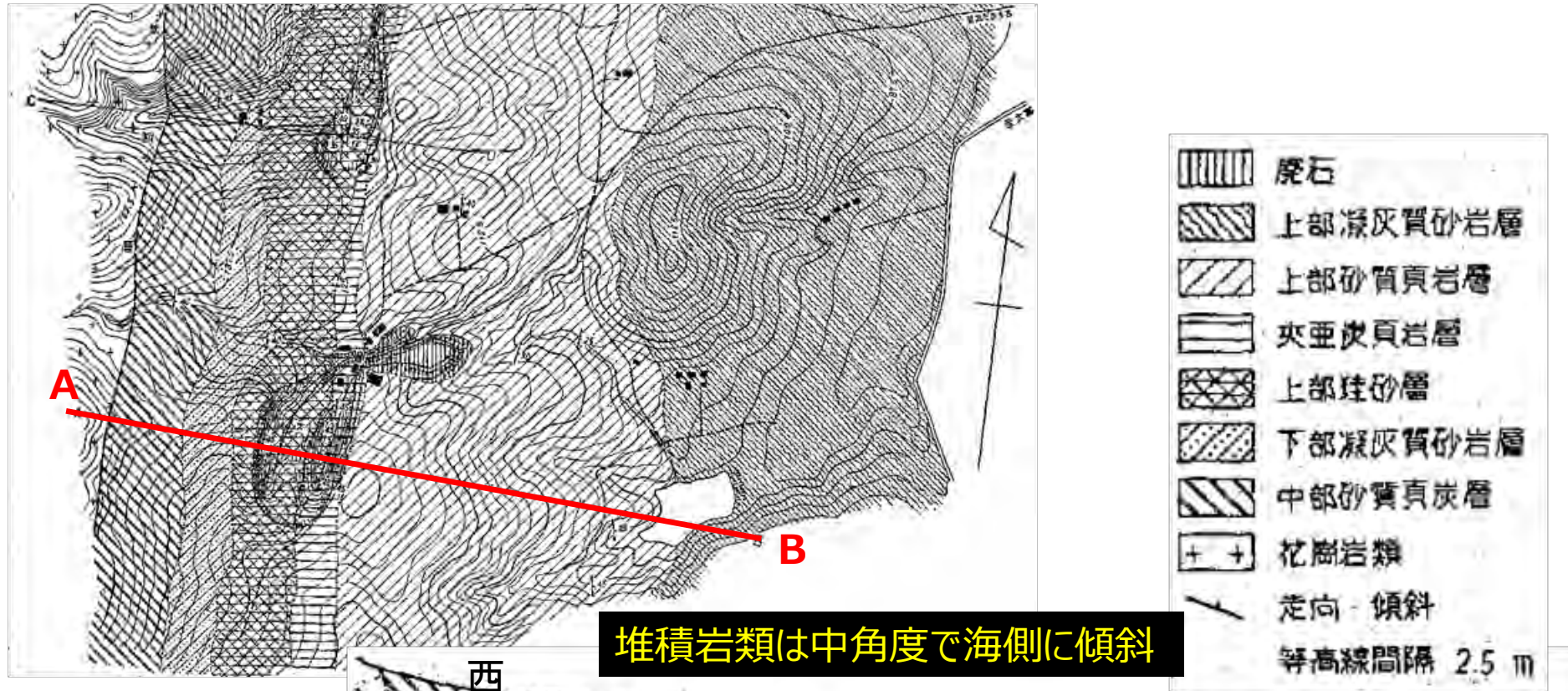
* 食品衛生法に基づく飲料水中の放射性セシウム基準値：10 (Bq/kg=Bq/L)



- 浅井戸の放射性セシウム (^{137}Cs) は事故後10年経過しても検出
- 汚染源、汚染経路の解明が重要 → 地下水流動解析、粒子追跡線解析

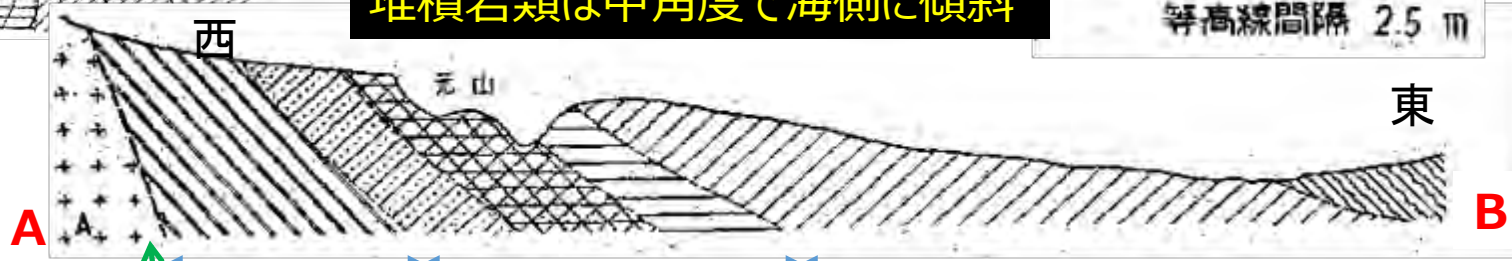
地質・地質構造

調査地域の地質平面図・断面図



堆積岩類は中角度で海側に傾斜

南相馬市小高区
良質の珪砂を産出



国見山花崗閃緑岩

双葉断層帯

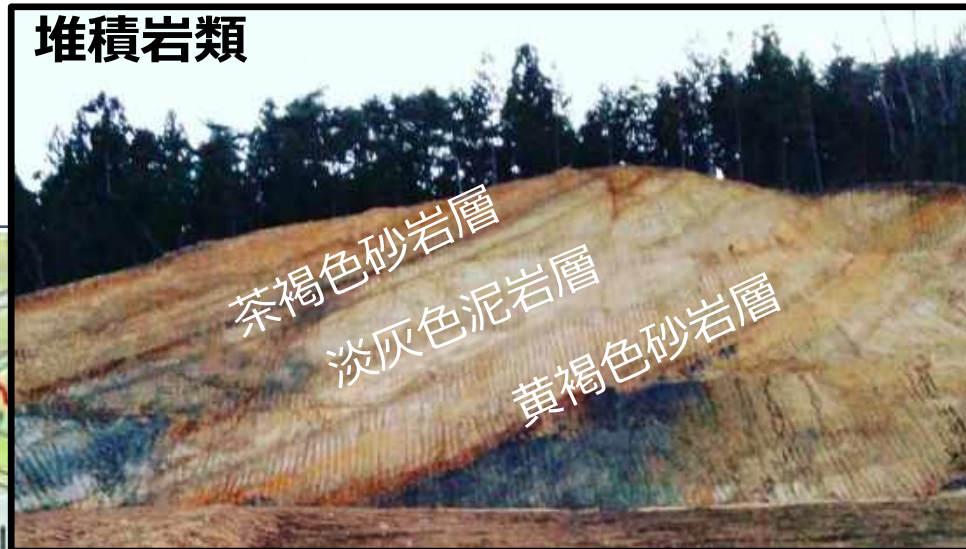
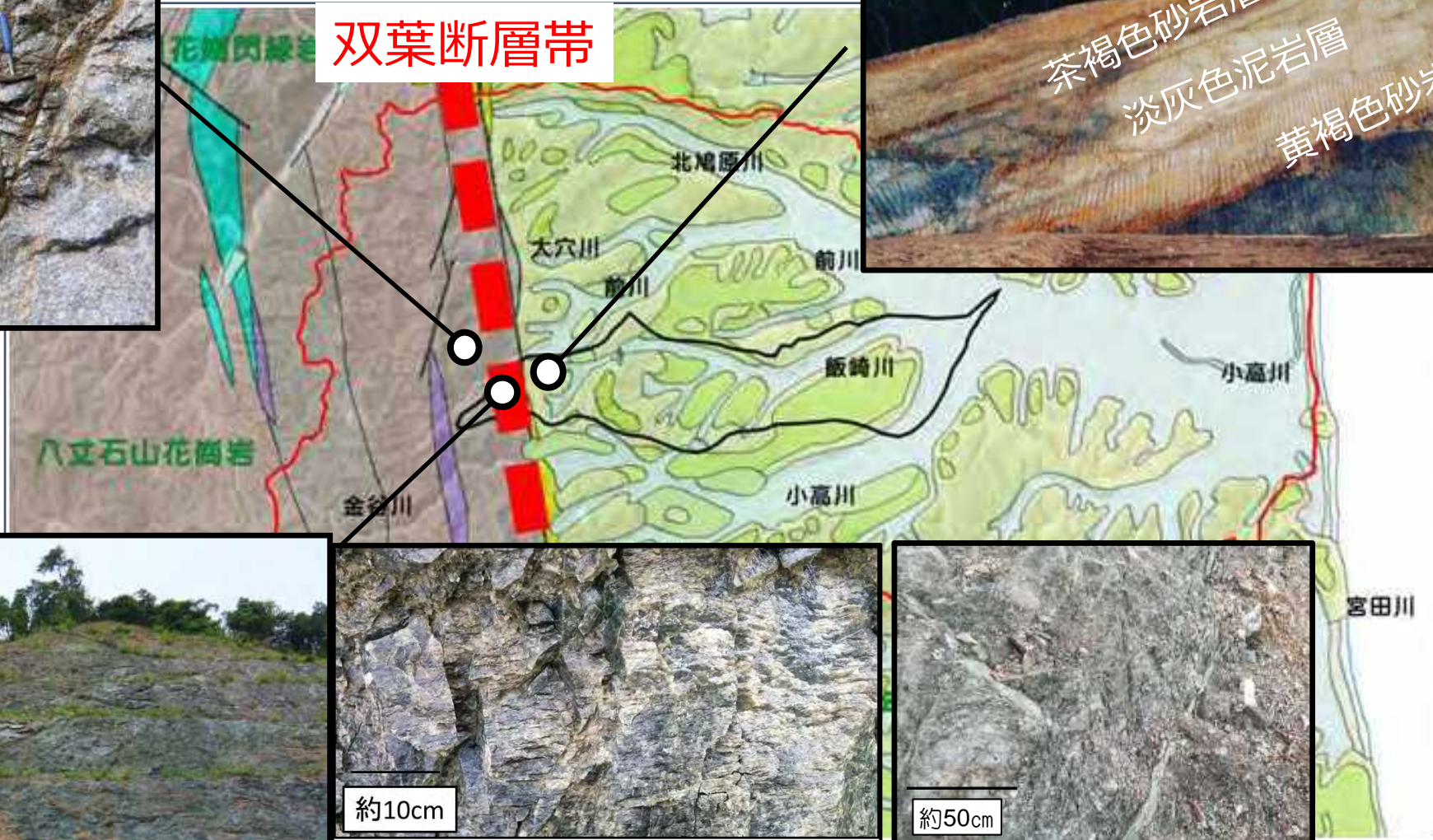
五安層

向山層

大年寺層

時津 (1956) : 福島県相馬地区珪砂鉱床調査報告,
地調月報, vol.7, pp.57-62, 1956

調査地域の地質



マイロナイト
(地下数10kmでの断層)



断層粘土

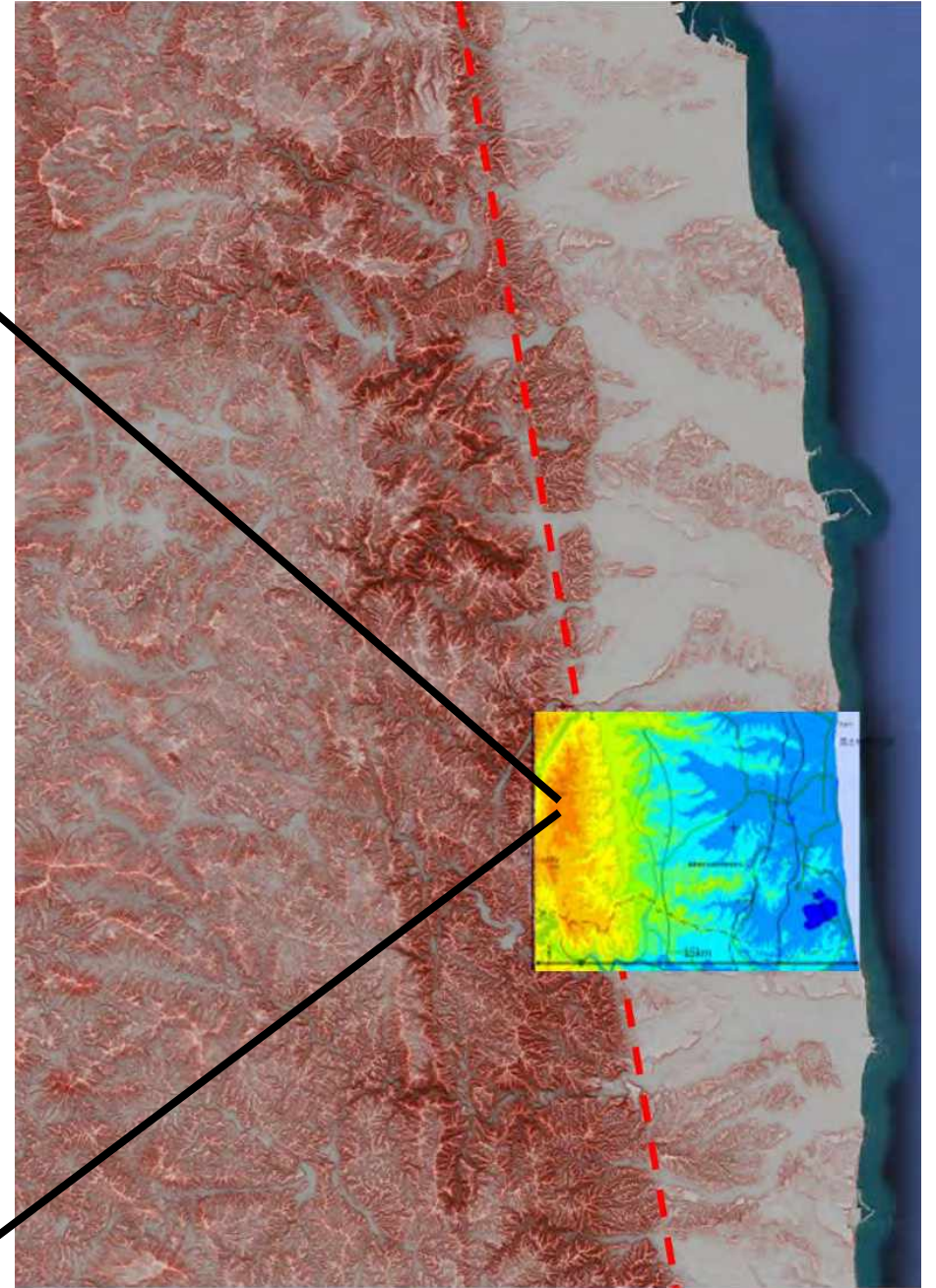
海側に傾斜する砂岩層と泥岩層の互層



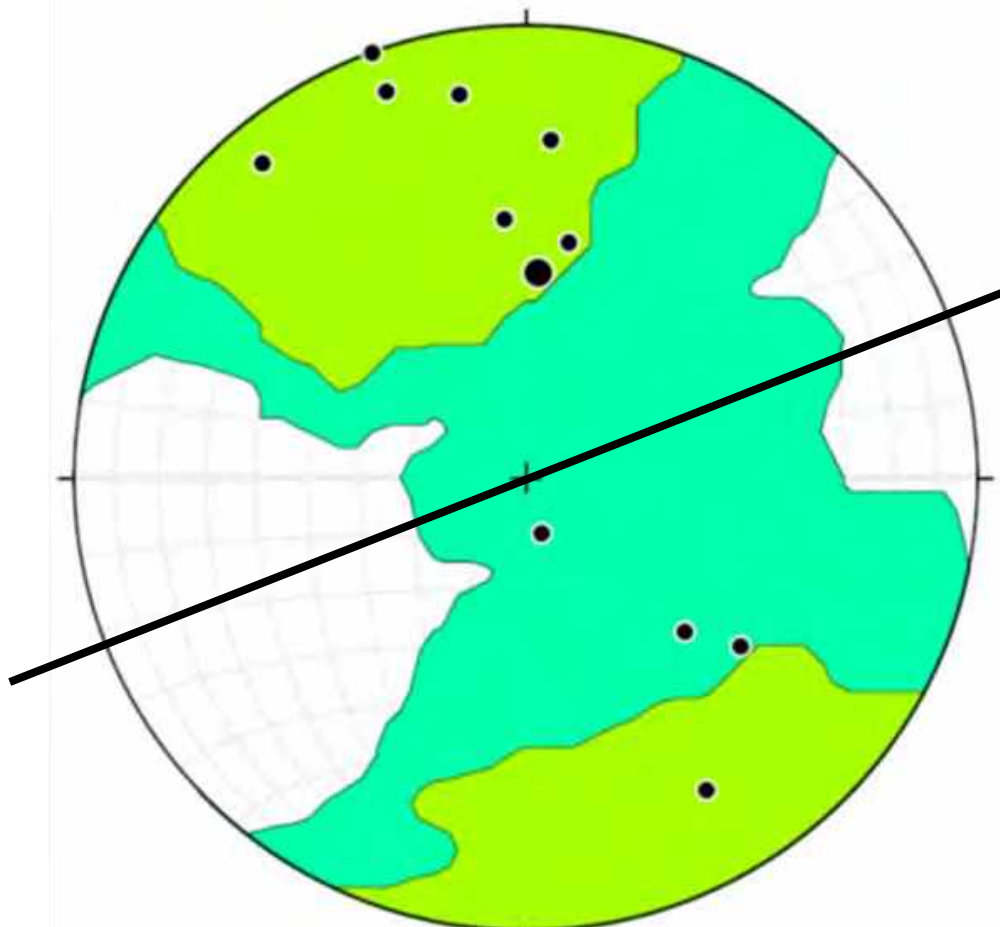
双葉断層帶



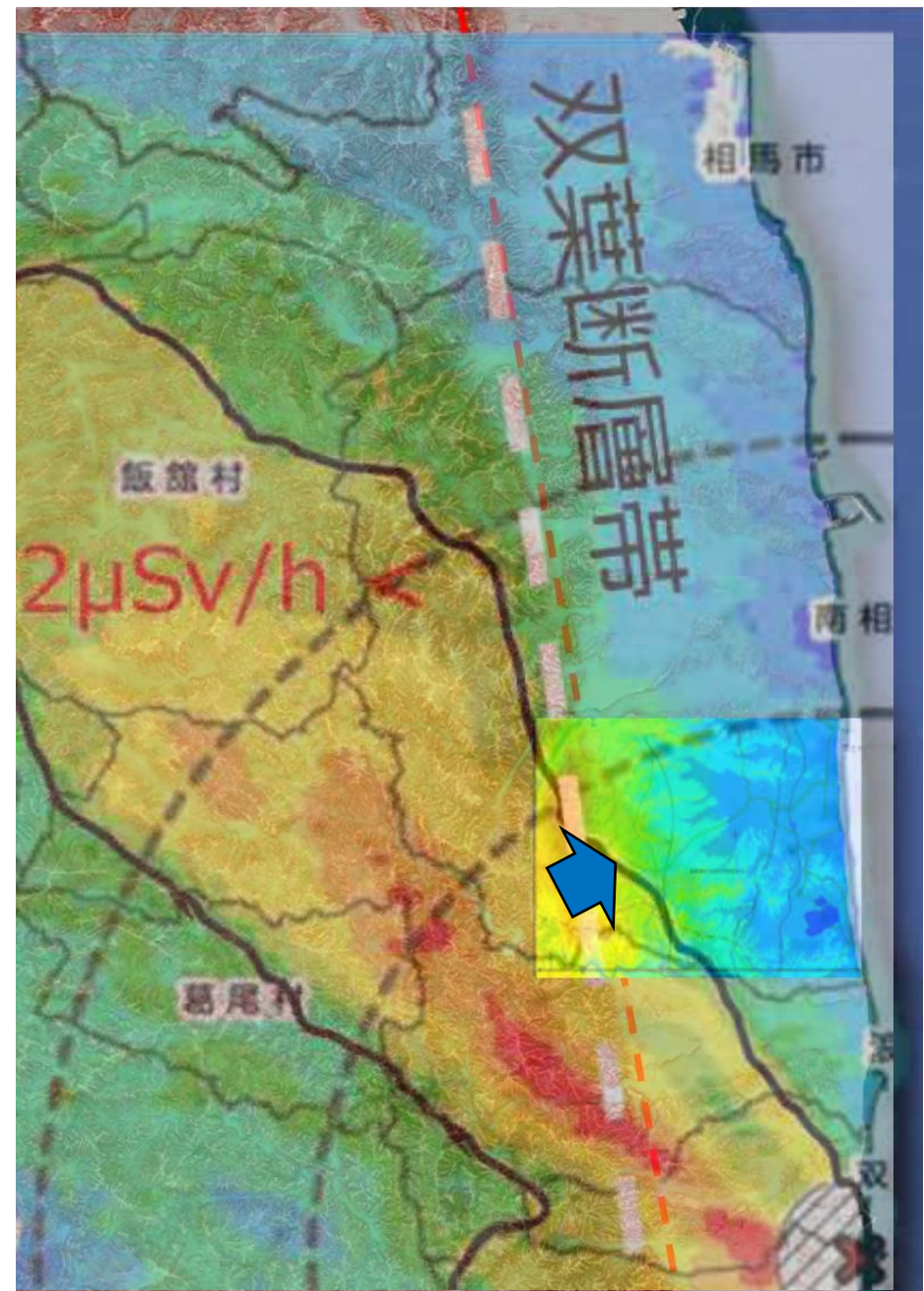
花崗岩類中の亀裂



花崗岩類中の亀裂の方向



花崗岩類の亀裂の分布（下半球投影）



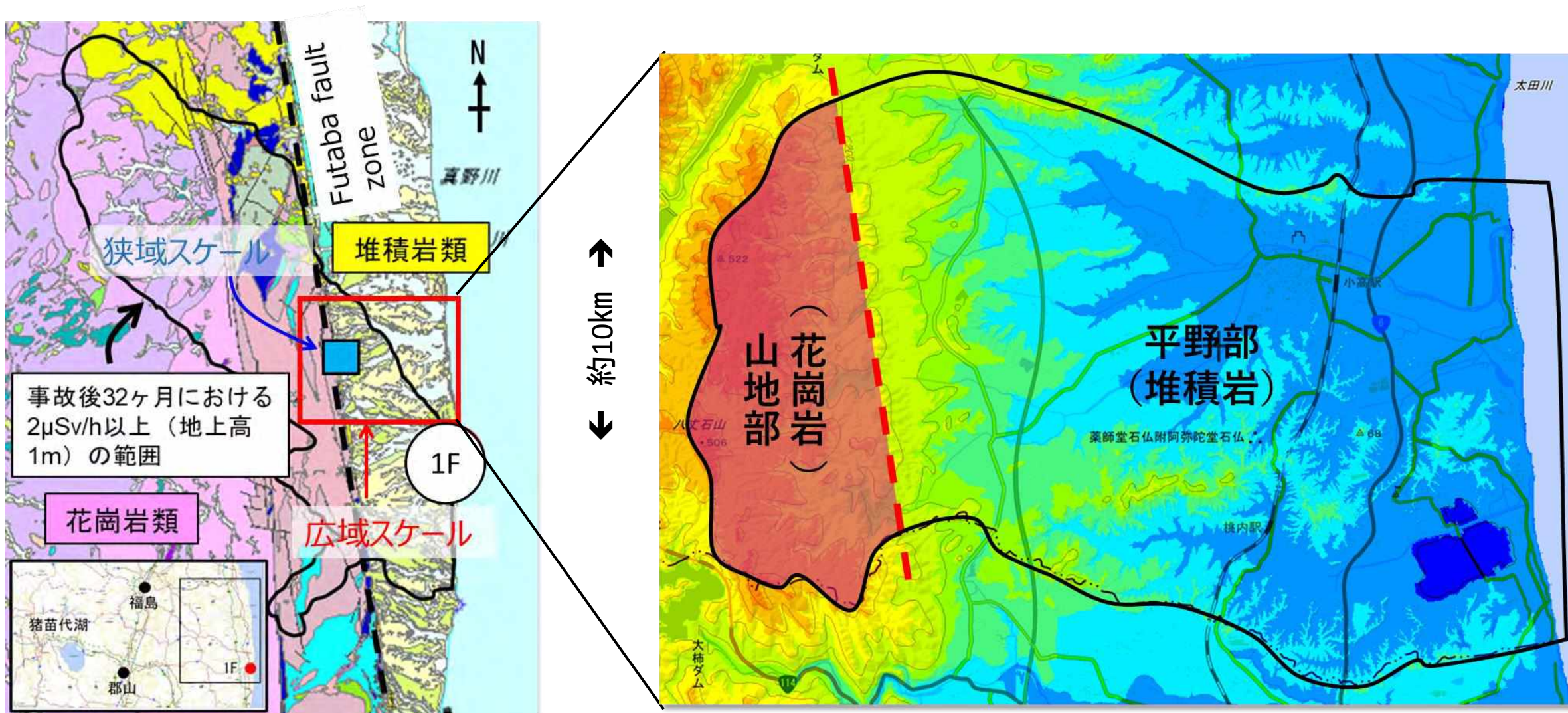
地下水は北北東方向の亀裂に沿って流れやすい？

地下水流動解析

- 広域スケール
- 狭域スケール (2ケース)

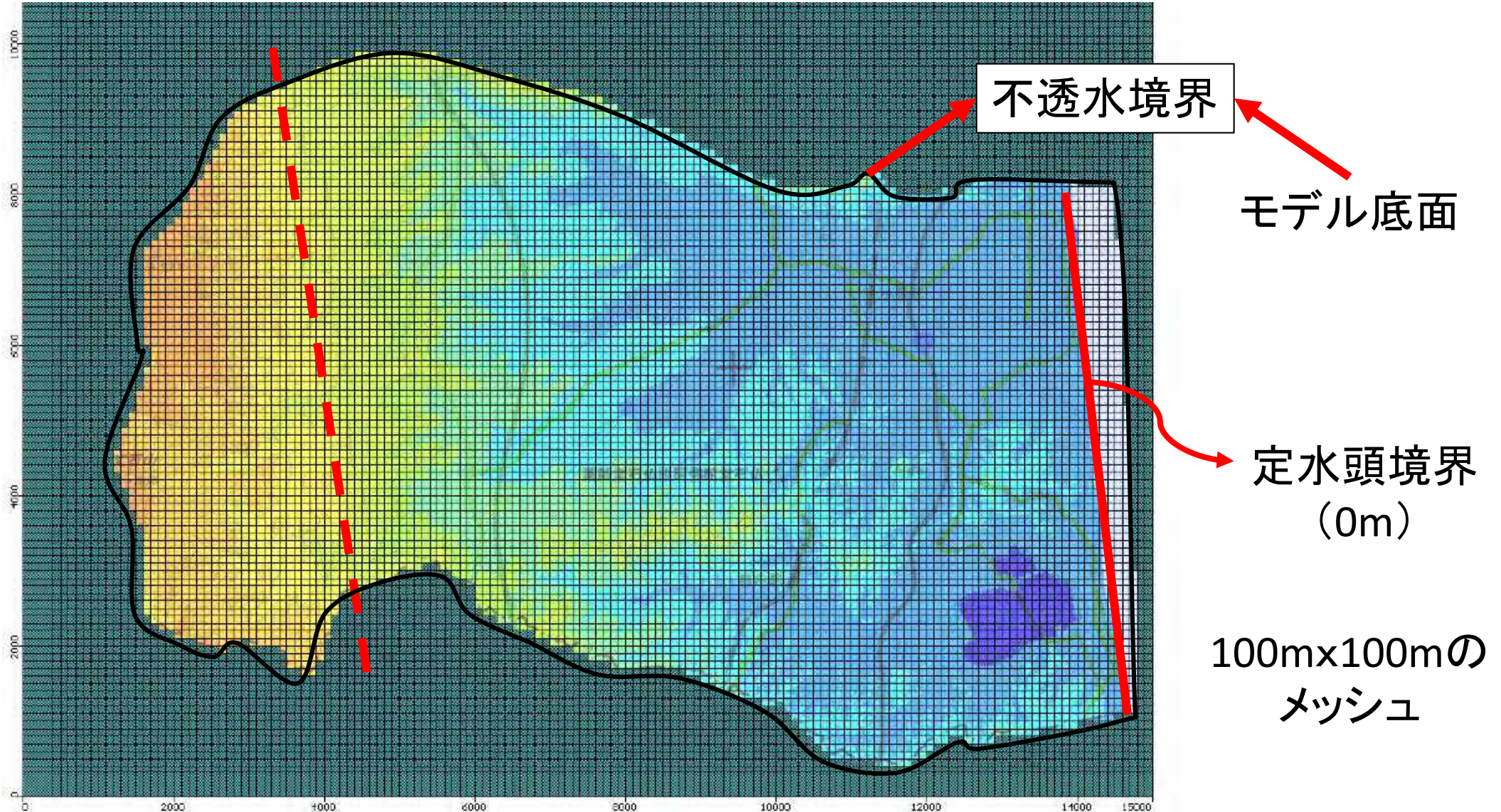
地下水流動解析 (広域スケール)

解析領域 (広域スケール)



国土地理院地図

解析メッシュと境界条件



Model0

地質モデル

側面（陸側）
・不透水境界

側面（海側）
・固定水頭境界
（標高0m）

500
0
-500
1000
Z (m)

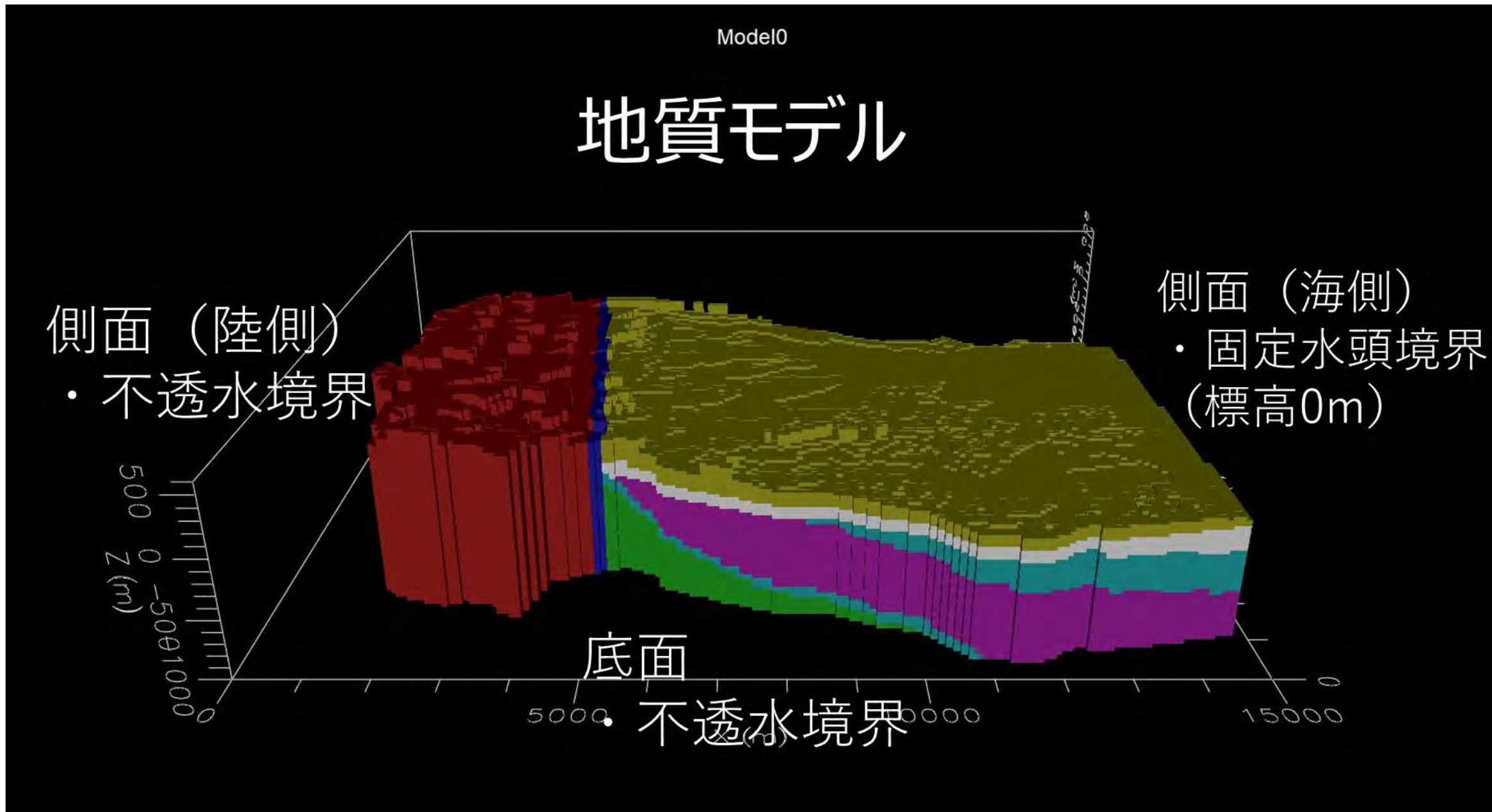
底面

・不透水境界

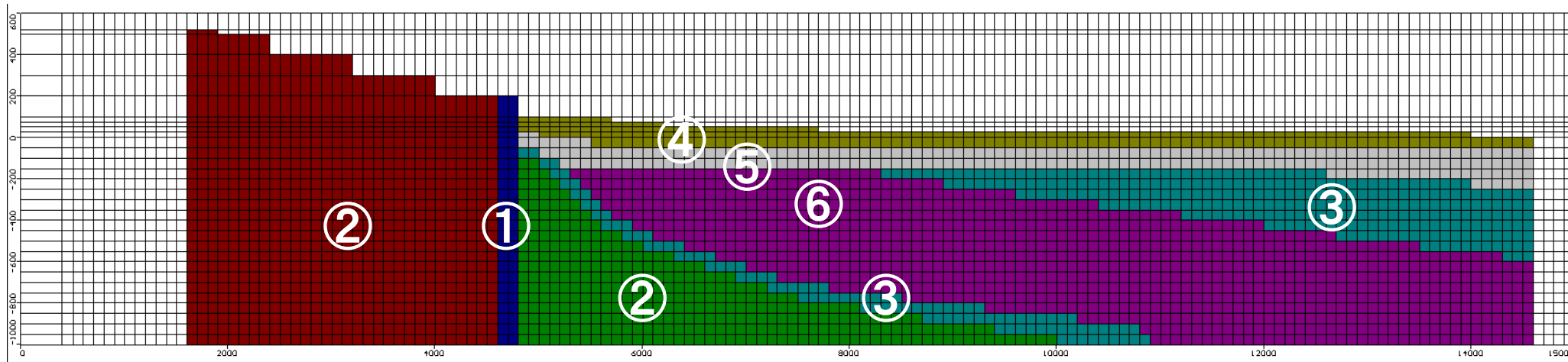
5000

10000

15000



水理地質構造モデルと感度解析ケース
 (ケースごとに入力値を変えて計算)



番号	岩相	透水係数k (m/sec)	比貯留係数Ss (1/m)	比産出率Sy (-)	総間隙率T.P (-)
①	断層	5.00E-10 低	3.60E-05	5.00E-07	5.00E-06
		5.00E-09 中			
		5.00E-08 高			
②	花崗岩 (基盤岩)	5.00E-08	5.00E-05	5.00E-06	1.00E-03
③	泥岩	1.00E-08 低	2.00E-05	5.00E-03	1.00E-02
		5.00E-08 高			
④	後期鮮新統砂岩	4.50E-03	2.00E-04	7.00E-02	1.00E-01
⑤	前期鮮新統砂岩	4.00E-04	1.60E-04	6.00E-02	9.00E-02
⑥	先新第三紀砂岩	5.00E-05	1.30E-04	5.00E-02	7.00E-02

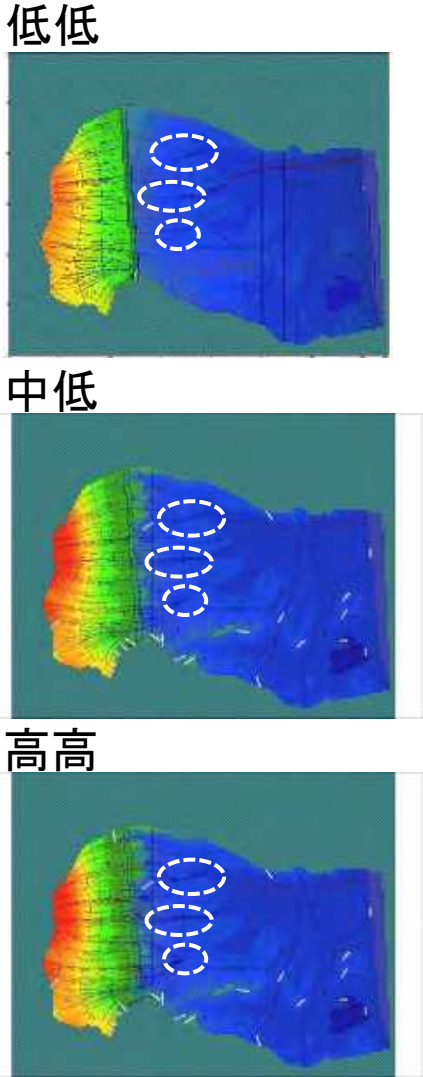
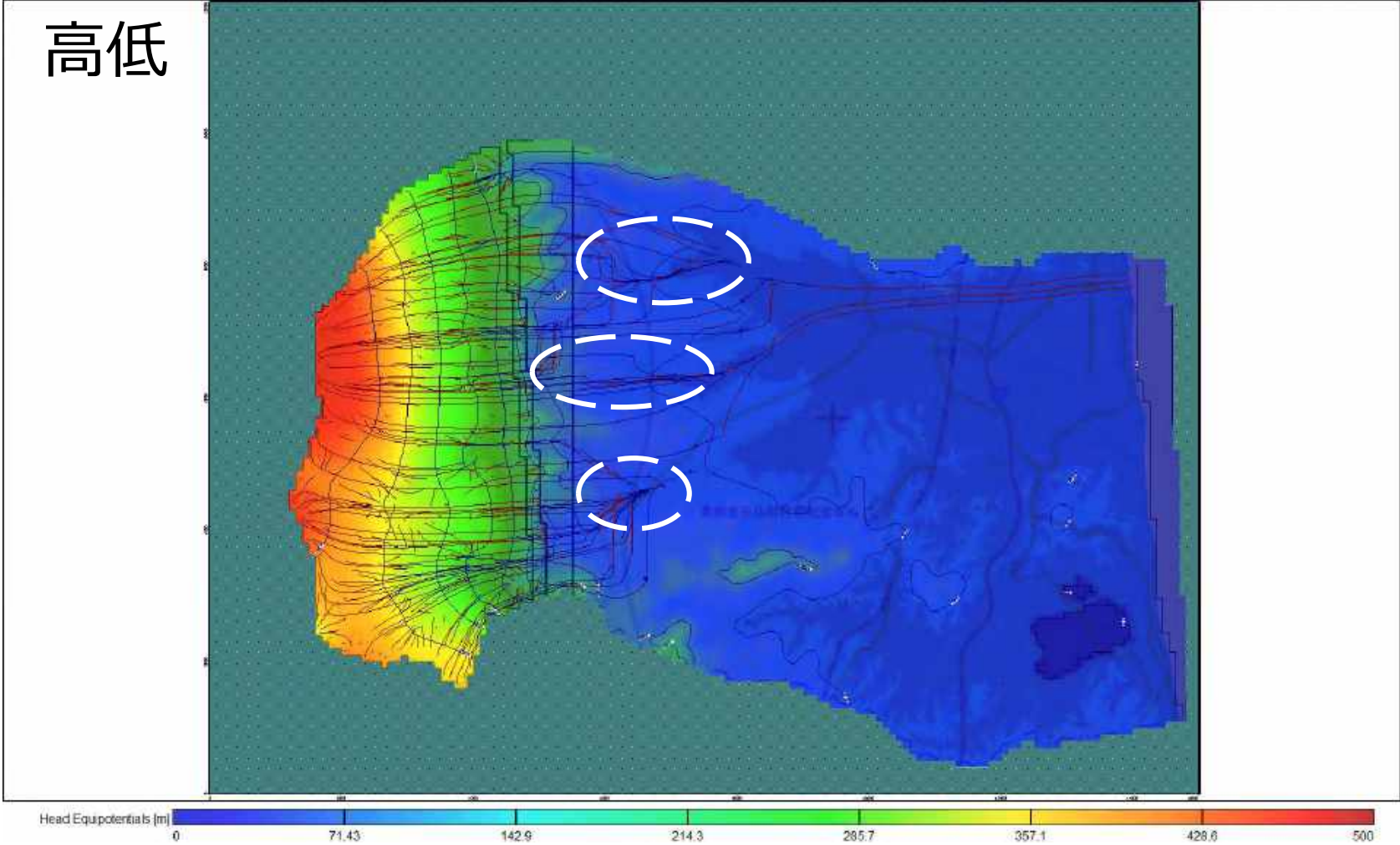
(断層) 低/低 (泥岩)

中/低

高/低

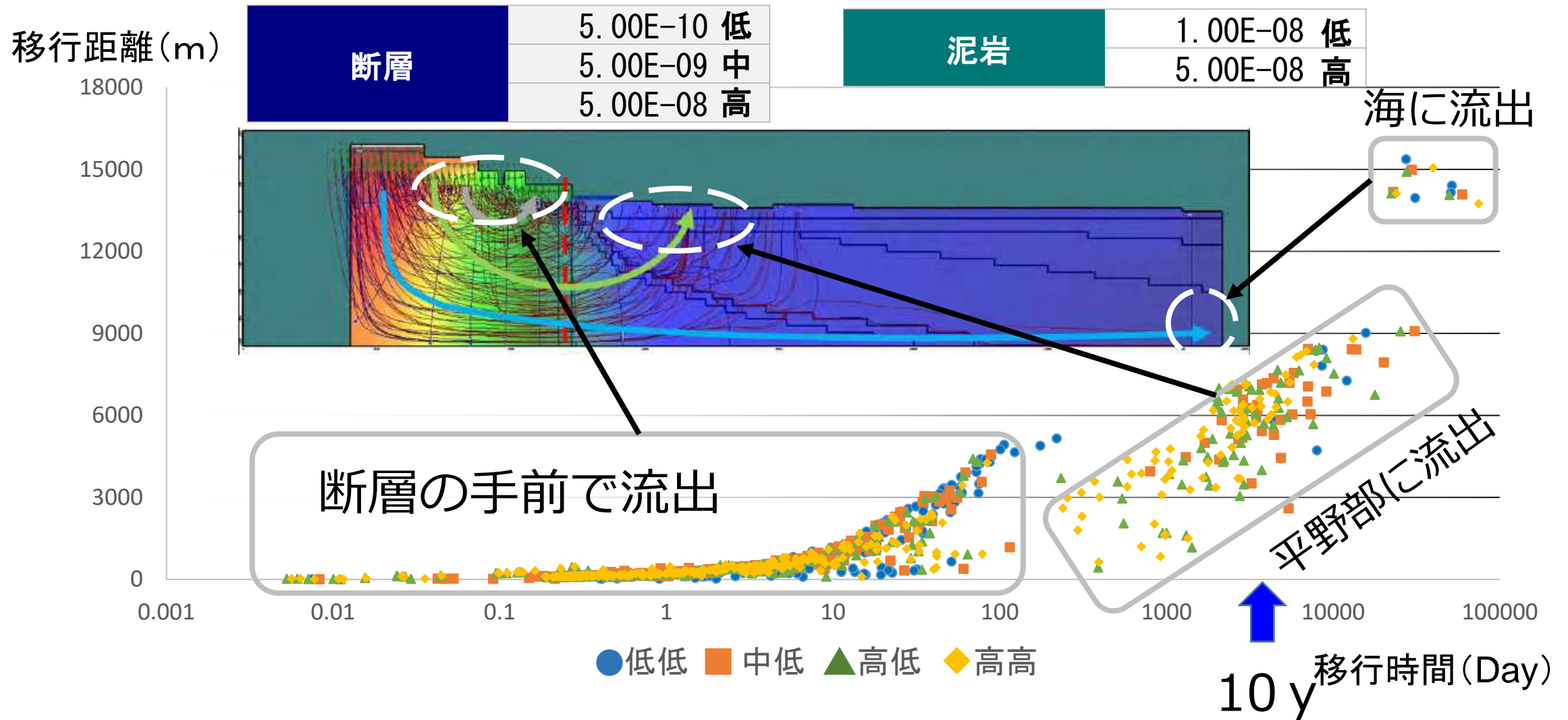
高/高

解析結果：粒子追跡線解析



平野部では **3** か所に流出

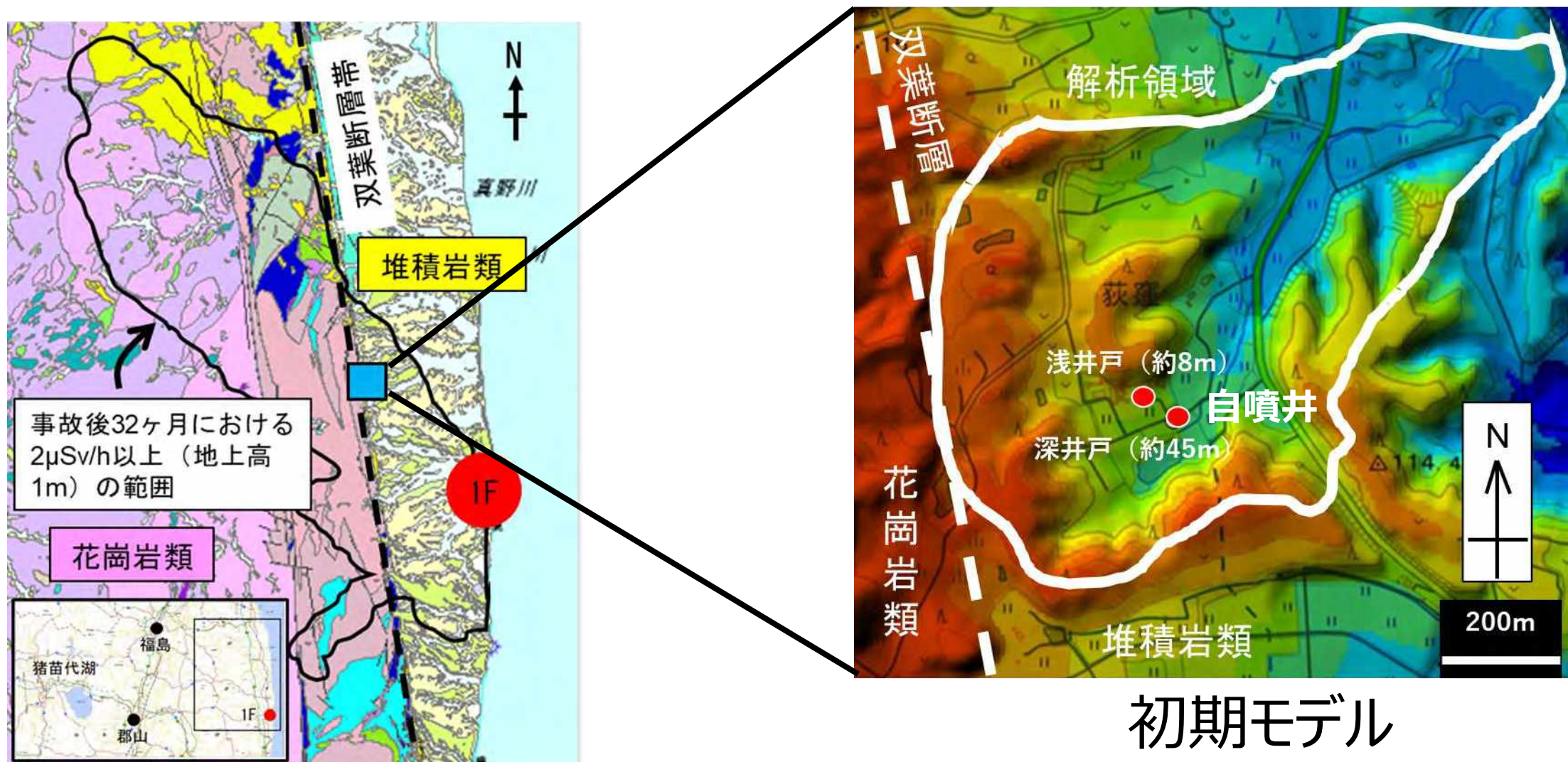
解析結果：粒子の移行時間と移行距離の関係



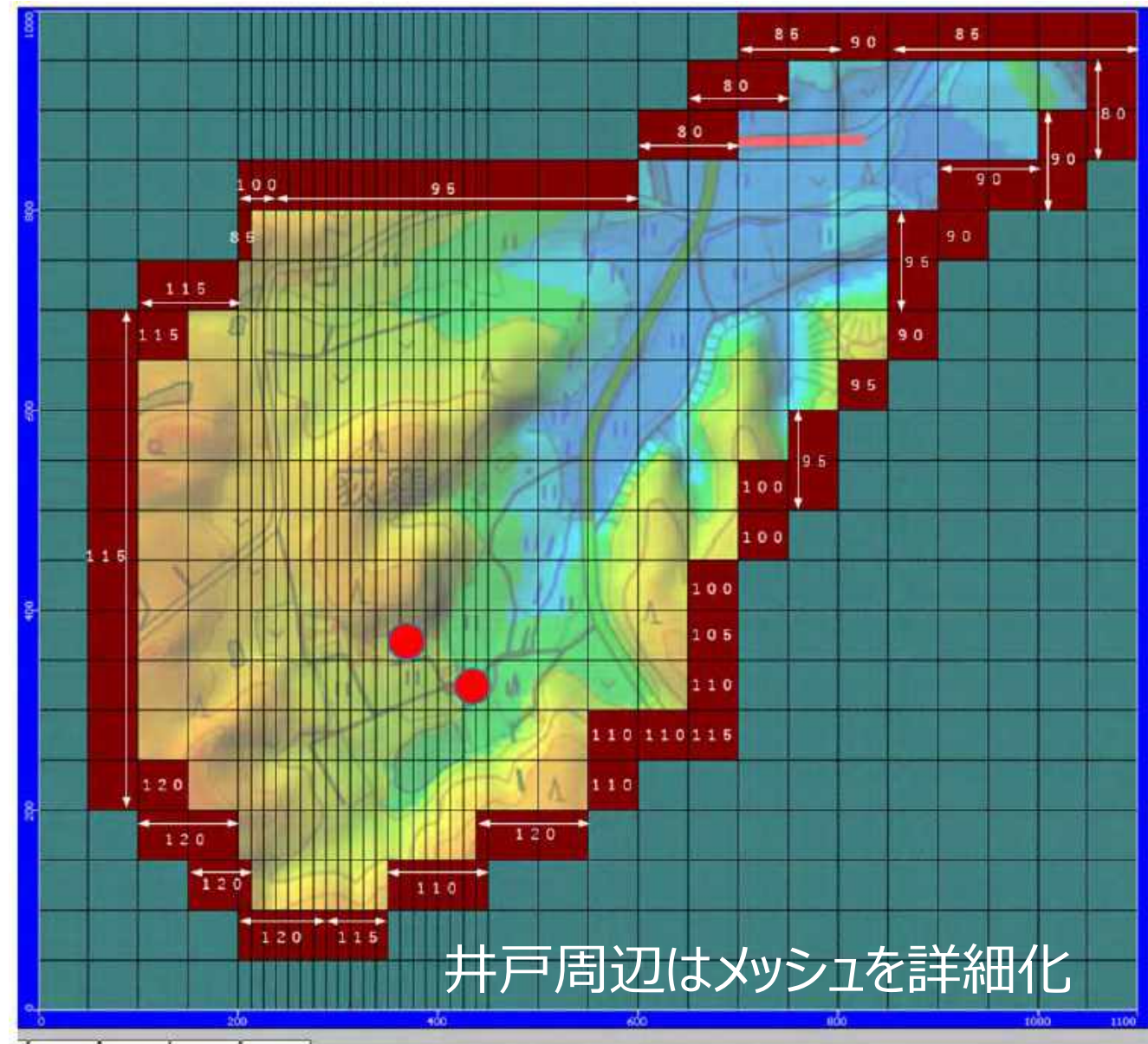
※表示するのは山地部から放出された粒子の軌跡のみ

解析領域（狭域スケール）

～井戸の放射性セシウム（ ^{137}Cs ）はどこから？～

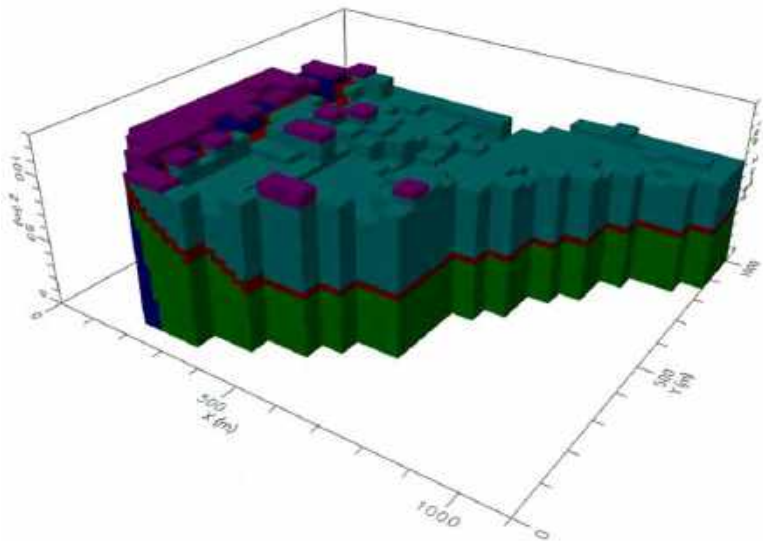
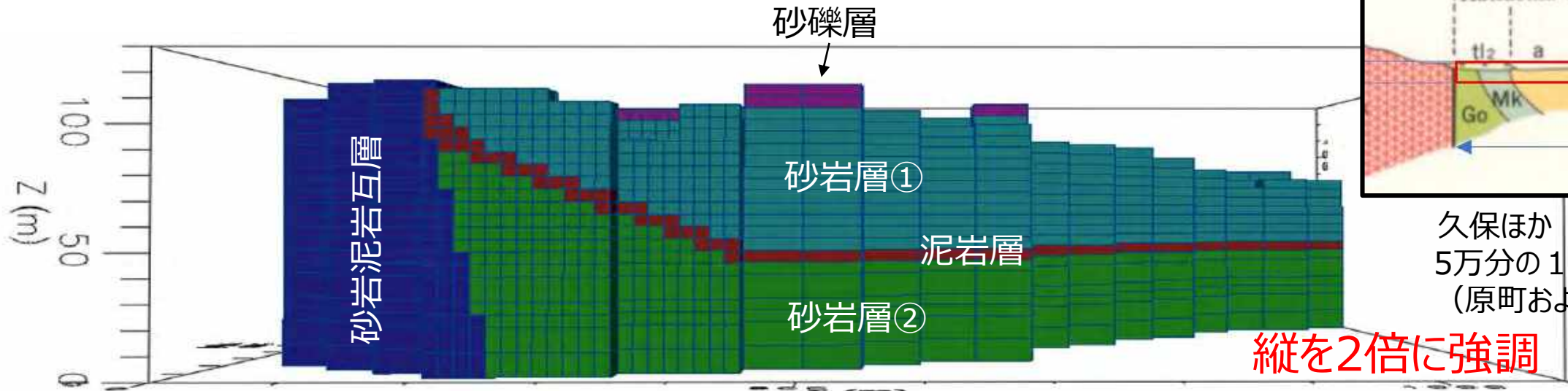


解析メッシュ



井戸周辺はメッシュを詳細化

水理地質構造モデル



岩種	透水係数 (m/s)	貯留係数 (-)
砂礫層	1.0E-03	1.0E-03
砂岩泥岩互層	5.5E-05	1.0E-05
砂岩層①	1.0E-03	1.0E-04
泥岩層	1.0E-06	1.0E-06
砂岩層②	1.0E-03	1.0E-04

- 境界条件
 - ・側面：固定水頭
 - ・底面：不透水
- 解析コード
 - ・MODFLOW®
 - ・定常解析

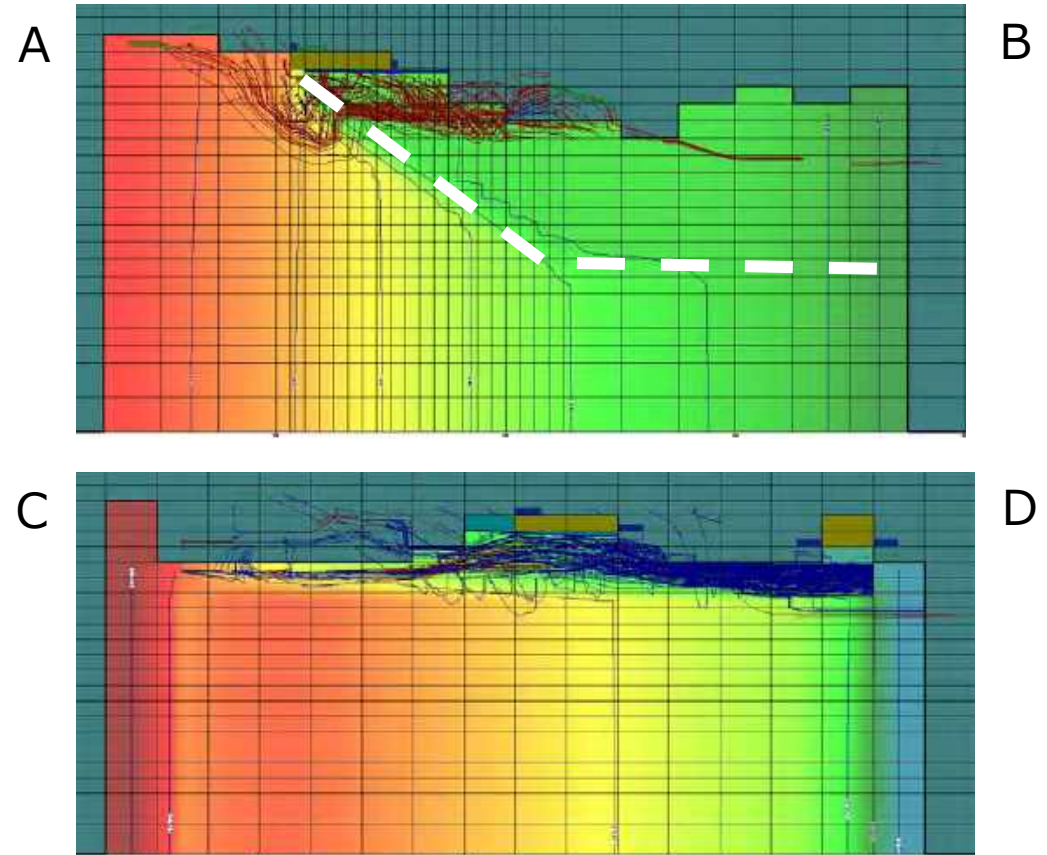
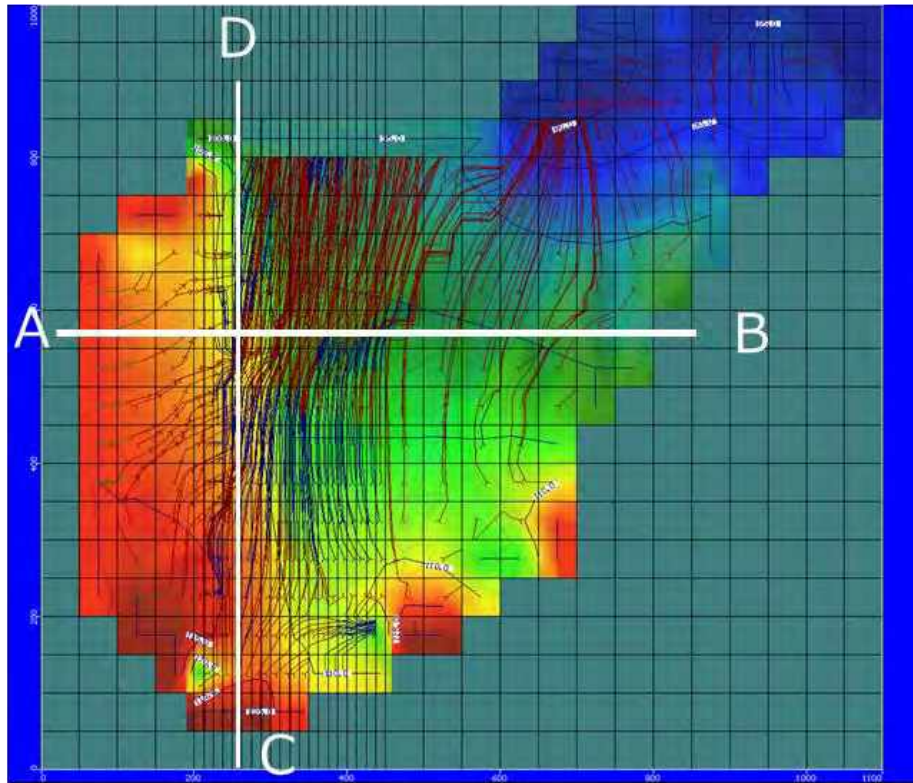
水圧分布と粒子追跡線解析

- 水圧分布

- 西・南方 → 北・北東
- 泥岩層による被圧

- 粒子追跡線解析

- 北方境界、北東方向（ため池）に流出



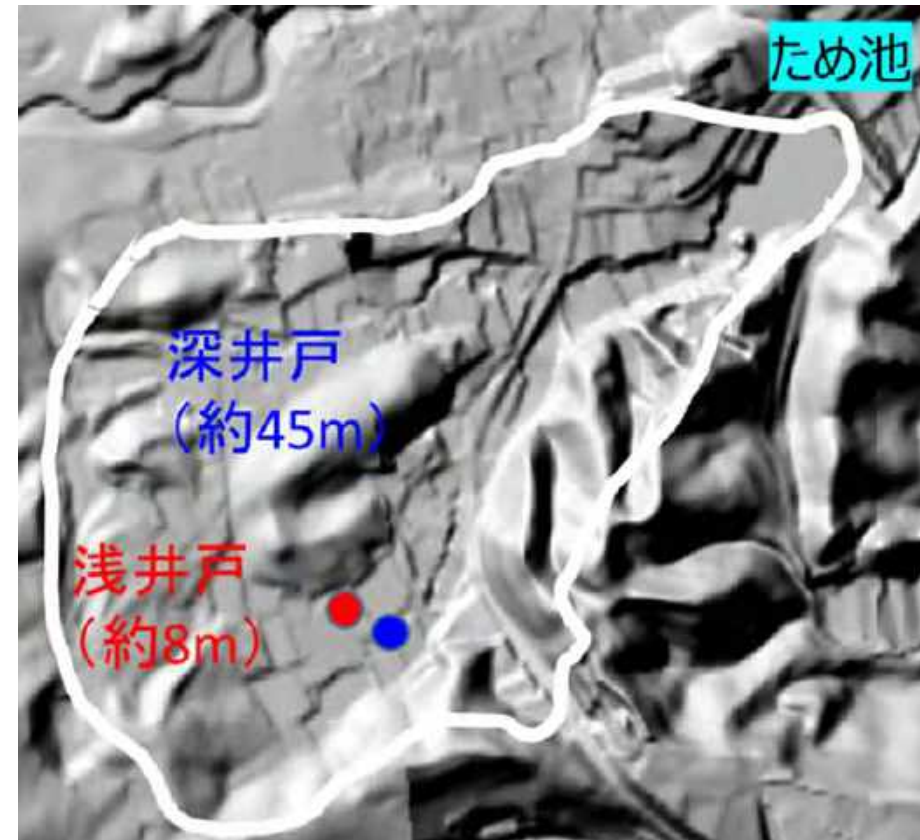
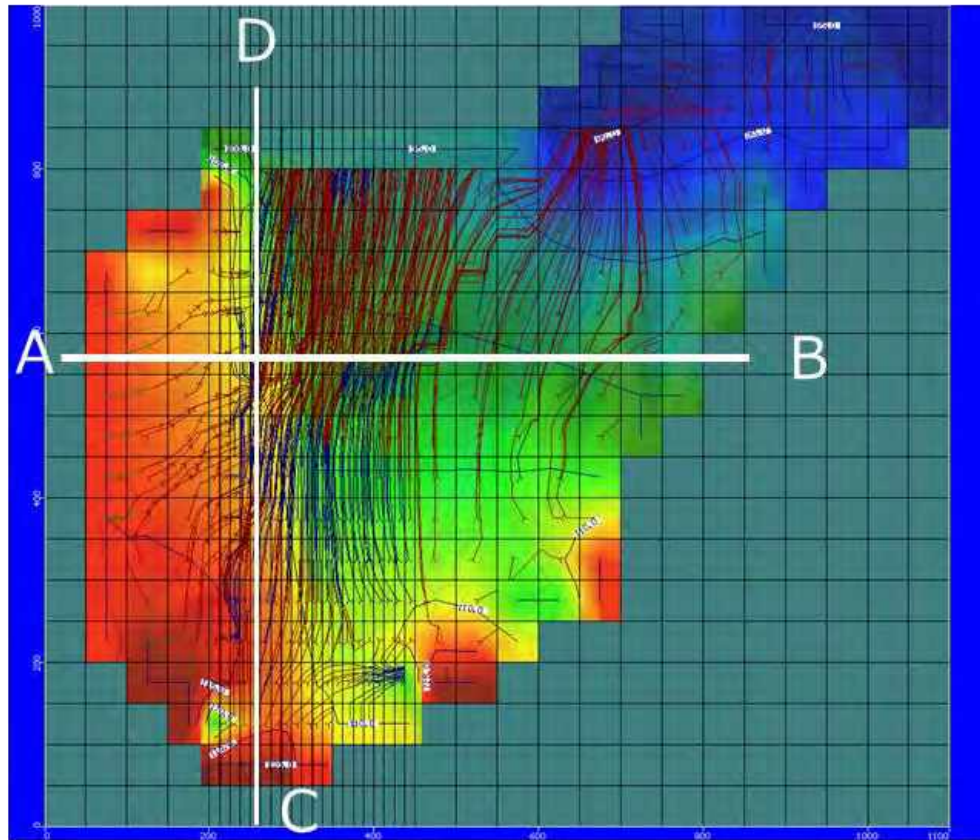
水圧分布と粒子追跡線解析

- 水圧分布

- 西・南方 → 北・北東
- 泥岩層による被圧

- 粒子追跡線解析

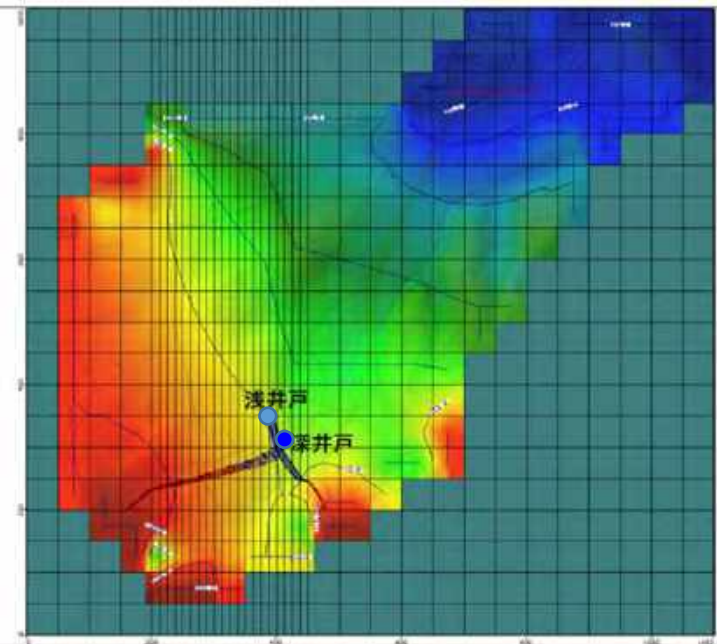
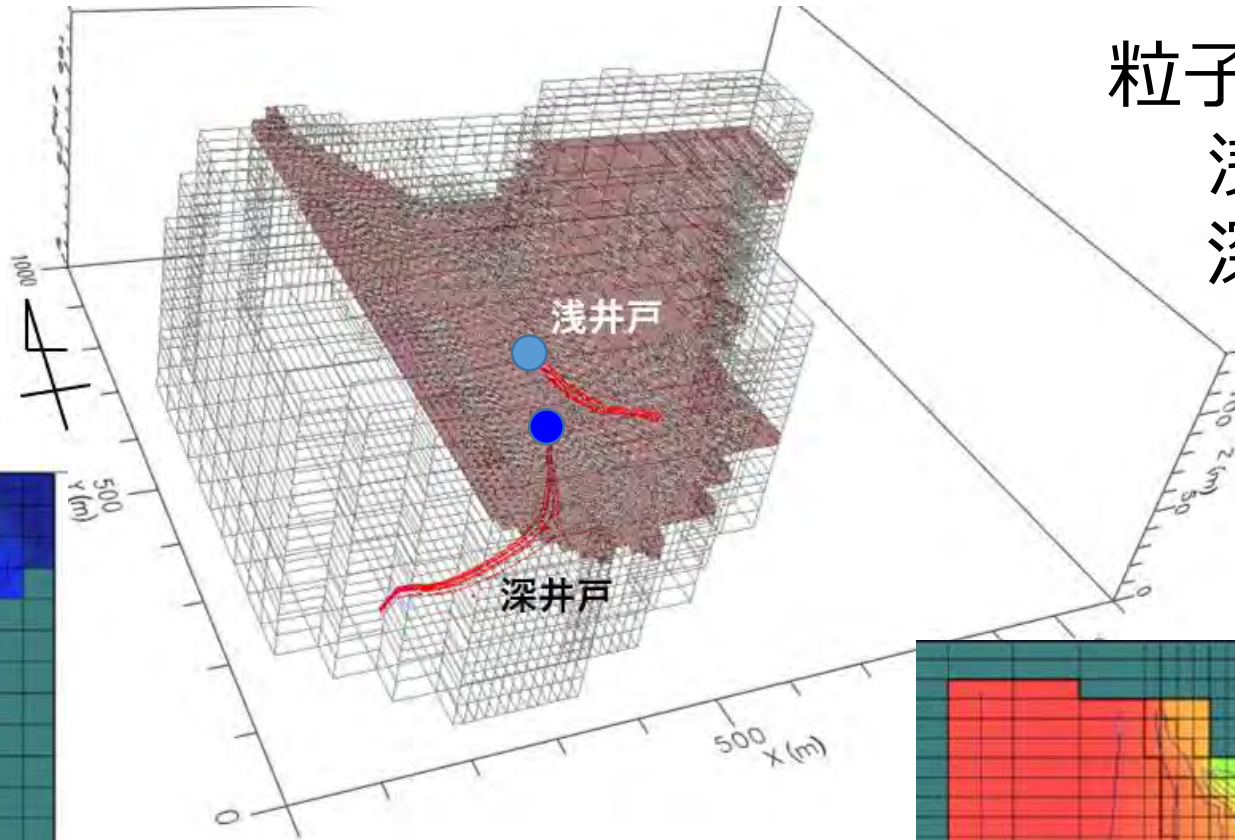
- 北方境界、北東方向（ため池）に流出



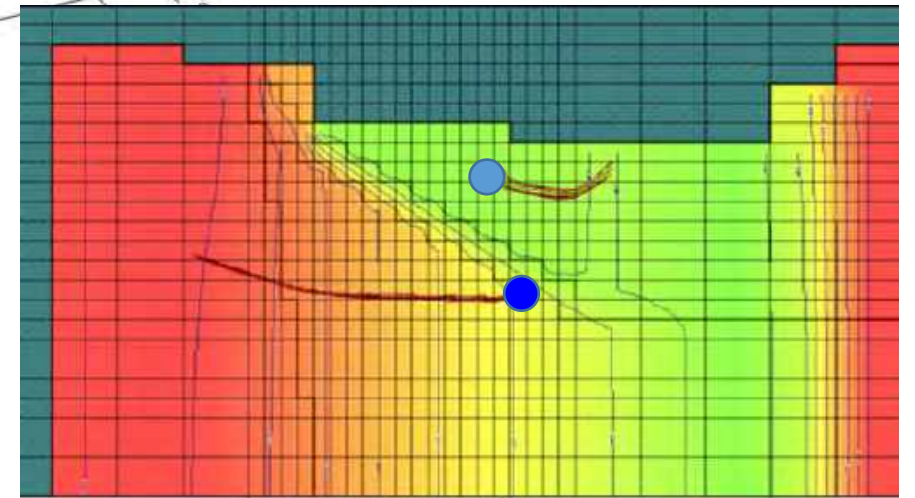
逆粒子追跡線解析の結果

(観測井戸から流れを逆に辿る)

粒子の設定深度
浅井戸：-20m
深井戸：-50m

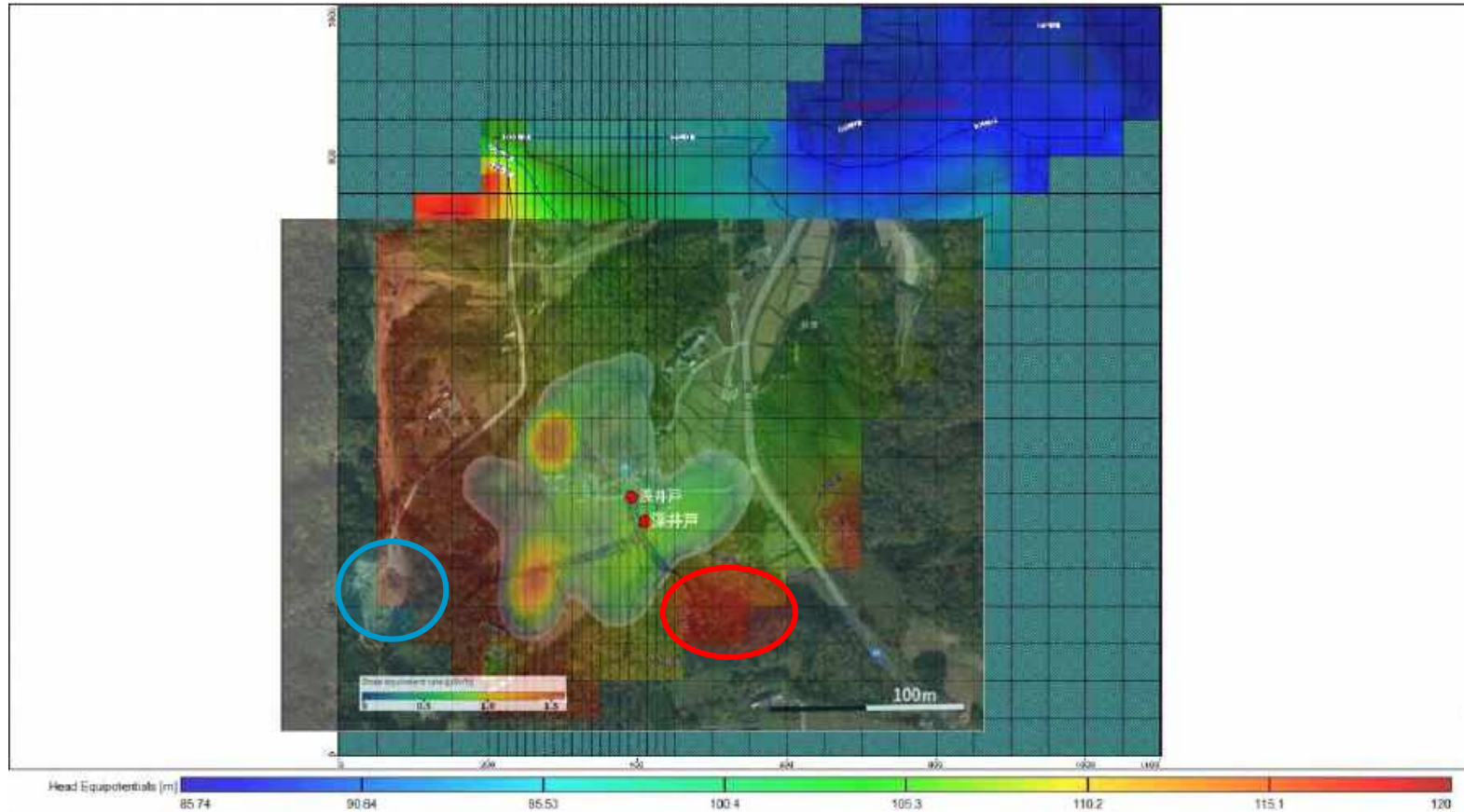


上から



南から

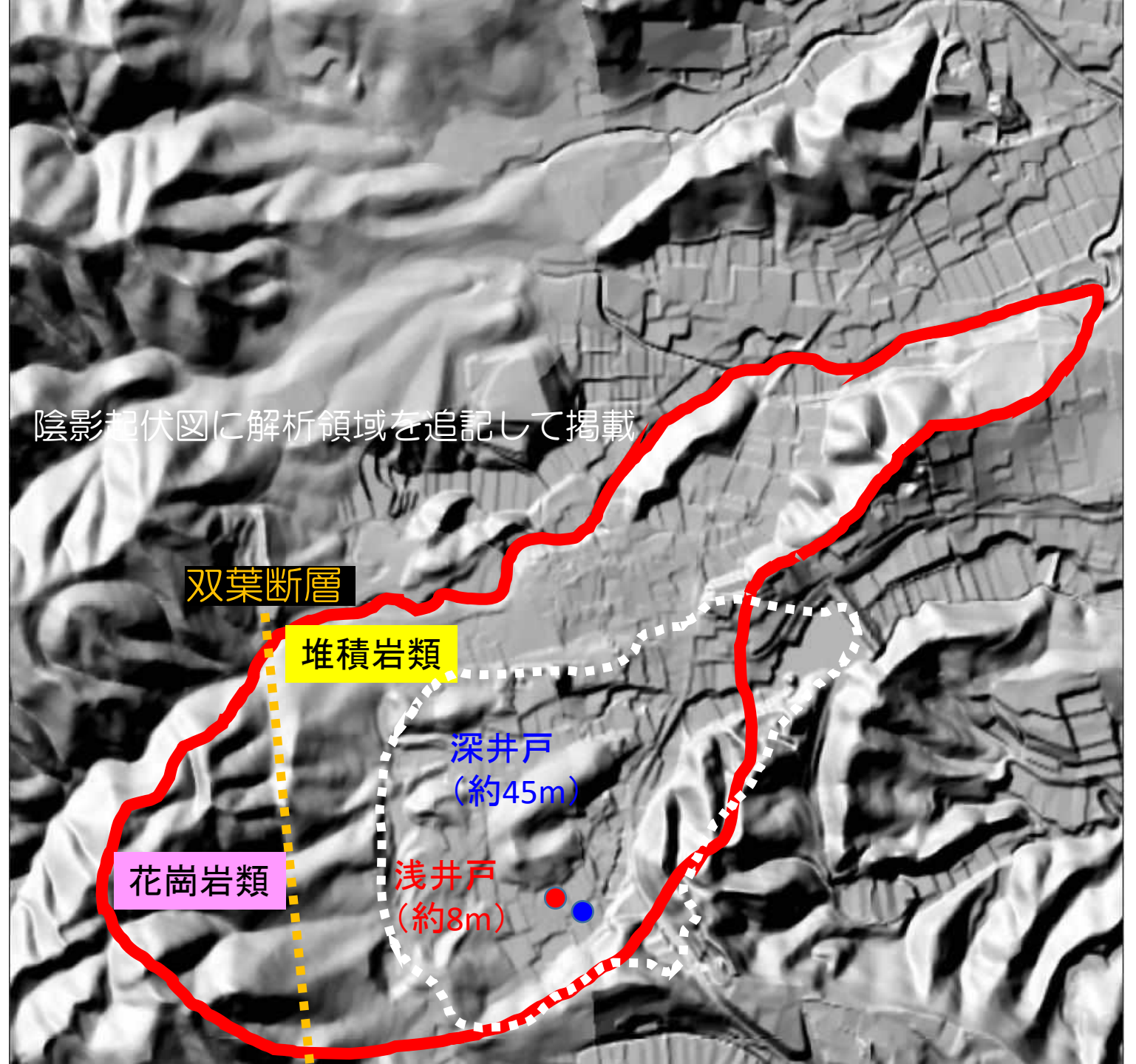
^{137}Cs の起源の推定



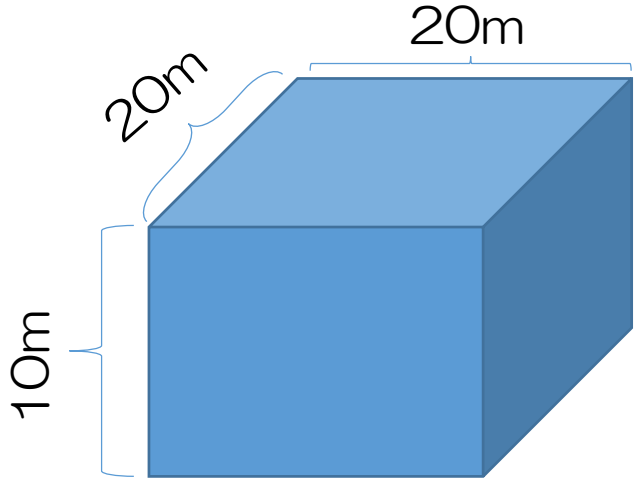
- ◆ 浅井戸 : 除染作業が困難な南側の山地部
- ◆ 深井戸 : 比較的濃度が高い西側の花崗岩分布域

狭域解析

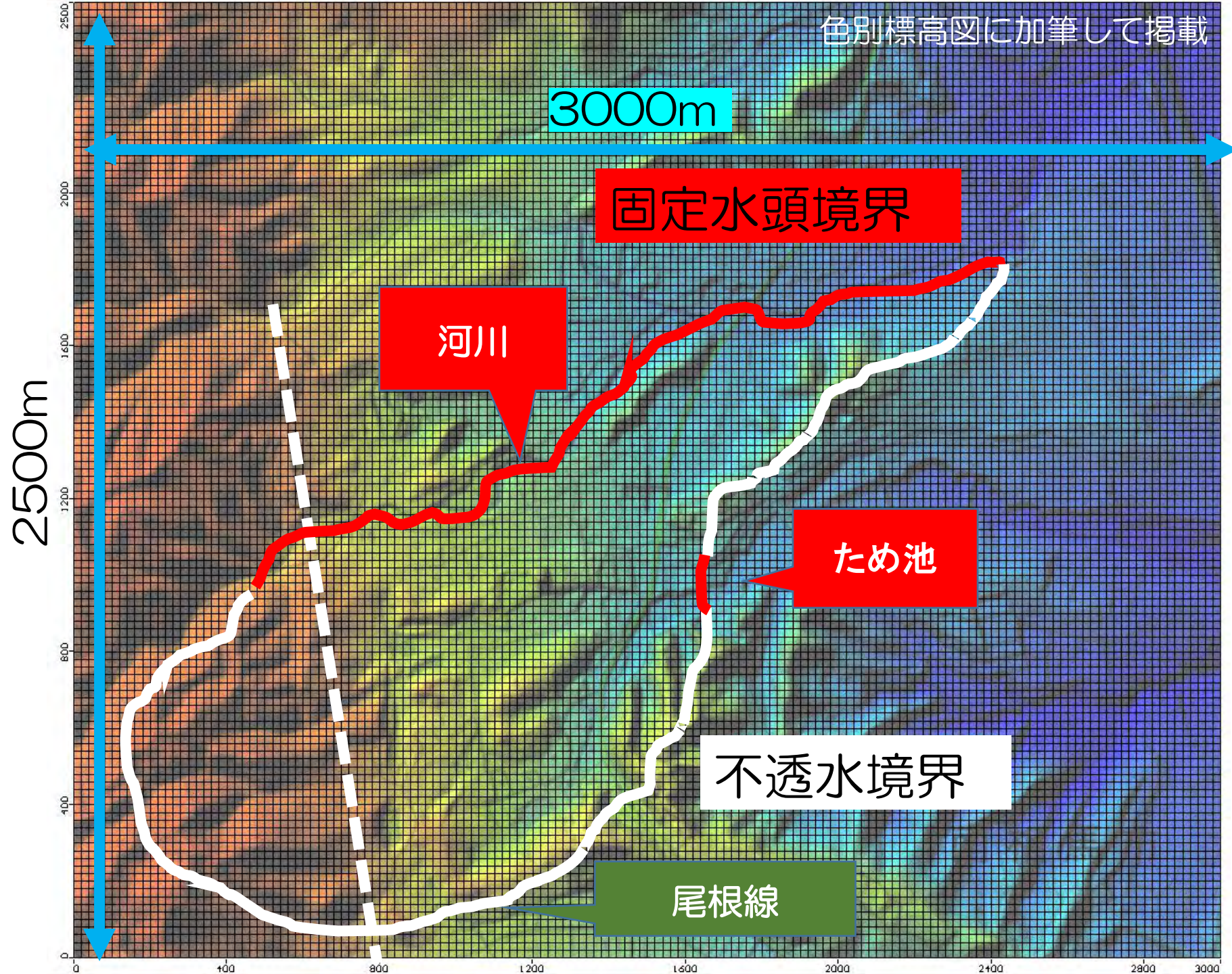
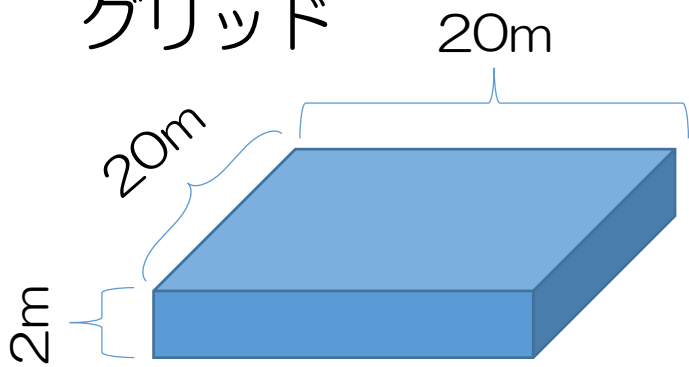
- 初期モデルの解析領域を拡張
- 河川（ため池）、尾根線に囲まれた領域（断層西側も含む）



標高140m以上の
グリッド

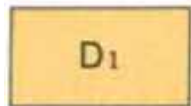


標高140m以下の
グリッド

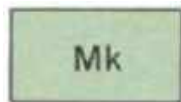


解析領域の地質分布

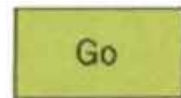
大年寺層
砂岩層砂岩



向山層
泥岩・砂岩礫岩及び凝灰岩亜炭層を含む



五安層
細粒砂岩



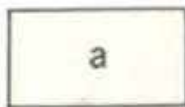
国見山花崗閃緑岩
畑川破碎帯以東の貫入岩類



5万分の1地質図幅「原町及び大甕」に加筆して掲載

砂礫層

谷底平野堆積物
Valley floor deposits



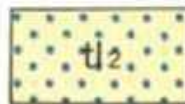
砂・泥及び礫
Sand, mud and gravel

扇状地及び緩斜面堆積物
Alluvial fan and gentle slope deposits



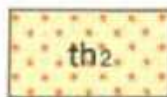
礫・砂及び岩屑
Gravel, sand and debris

低位II段丘堆積物
Lower terrace II deposits



礫及び砂
Gravel and sand

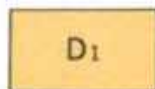
高位II段丘堆積物
Higher terrace II deposits



礫・砂及び泥(上部に風化火山灰層をのせる)
Gravel, sand and mud, covered with a weathered volcanic ash layer

砂岩層 (上位)

砂岩相
Sandstone facies



砂岩
Sandstone

泥岩層

向山層
Mukaiyama Formation



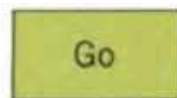
石英質砂岩
Quartzose sandstone



泥岩・砂岩・礫岩及び凝灰岩、垂炭層を挟む
Mudstone, sandstone, conglomerate and tuff intercalating lignite seams

砂岩層 (下位)

五安層
Goyasu Formation



細粒砂岩
Fine-grained sandstone

花崗岩類

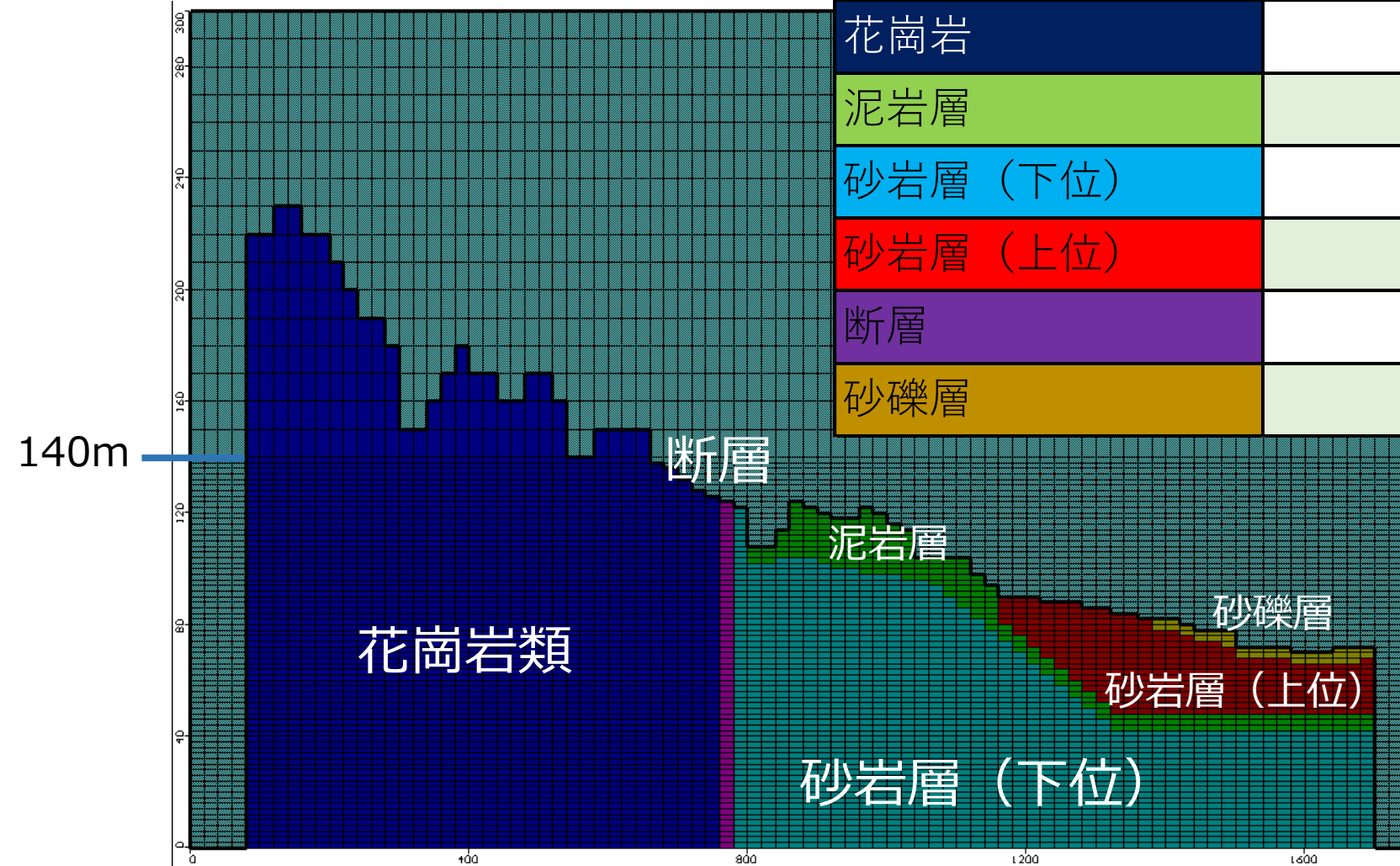
国見山花崗閃緑岩
Kunimiyama Granodiorite



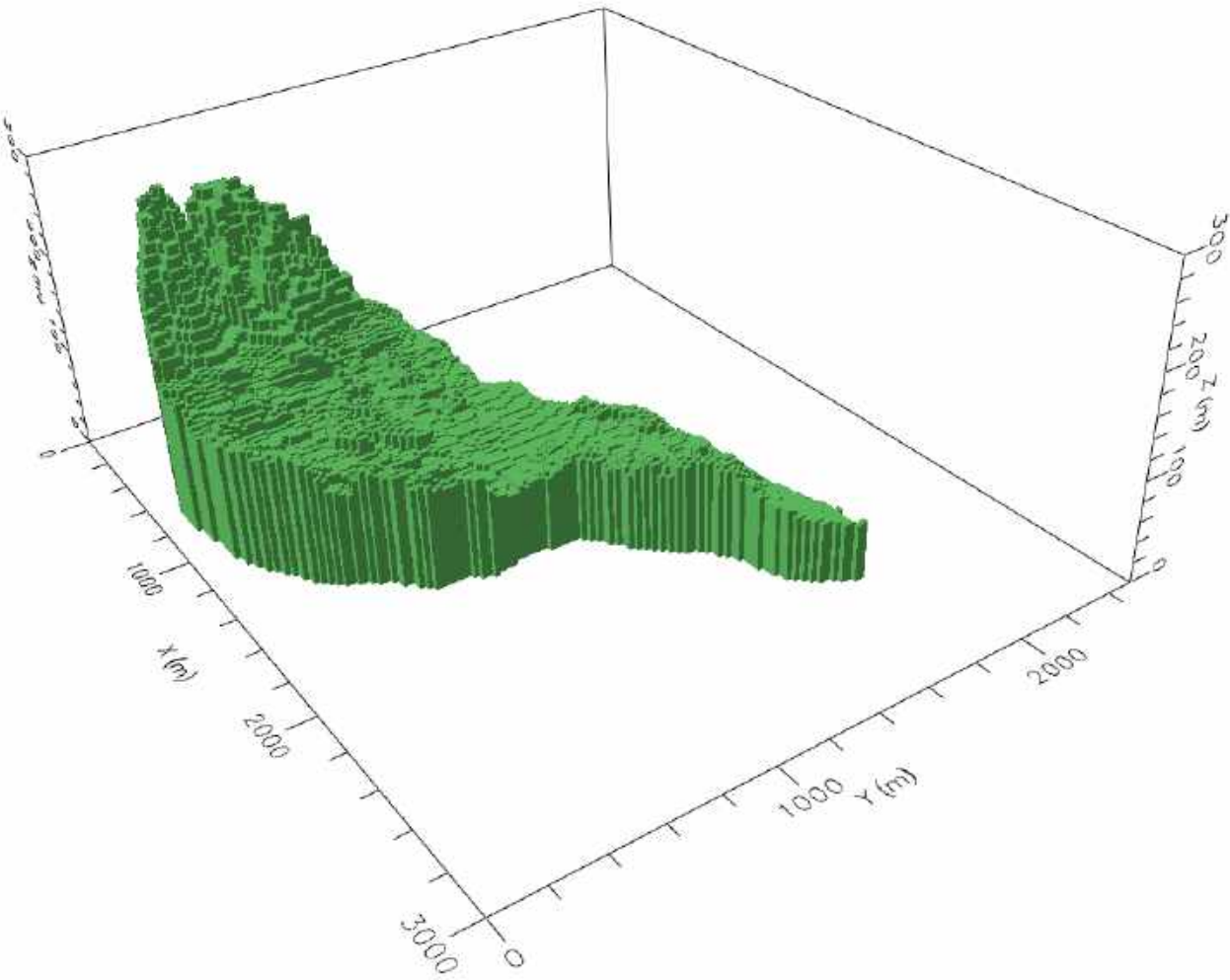
中粒角閃石黒雲母花崗閃緑岩
Medium-grained hornblende-biotite granodiorite

水理地質構造モデル

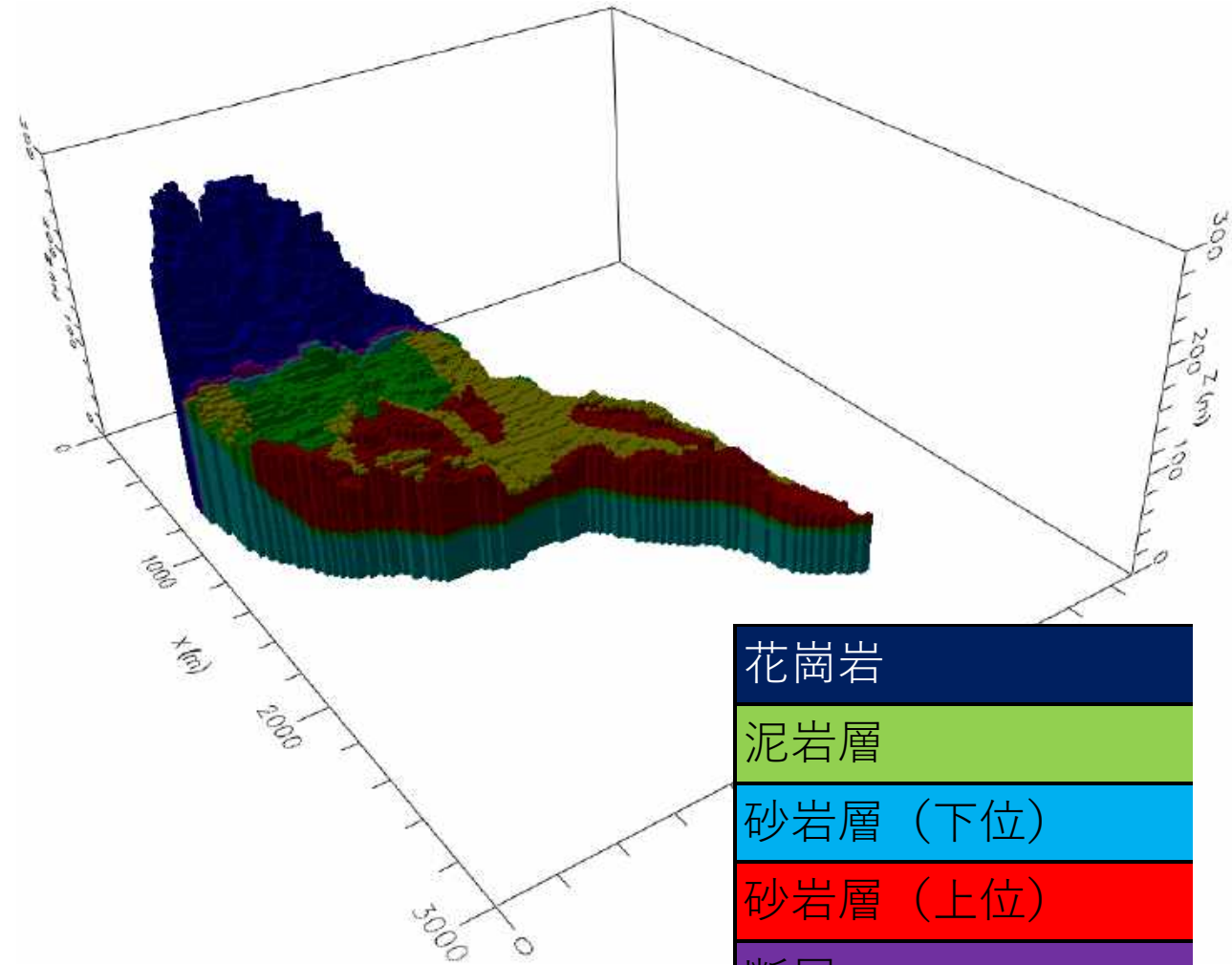
	透水係数k[m/s]	比貯留係数Ss [1/m]
花崗岩	5.00E-07	1.00E-07
泥岩層	1.00E-06	1.00E-06
砂岩層 (下位)	1.00E-05	1.00E-05
砂岩層 (上位)	1.00E-03	1.00E-03
断層	5.00E-07	1.00E-07
砂礫層	1.00E-03	1.00E-03



地形モデル



地質構造モデル



花崗岩
泥岩層
砂岩層 (下位)
砂岩層 (上位)
断層
砂礫層

感度解析

各地層の透水係数 K(m/s)

model_name	花崗岩	断層	泥岩層	
model_test_5	5.00E-07	5.00E-07	1.00E-06	高
model_test_6	1.00E-06	5.00E-07	1.00E-06	
model_test_7	5.00E-06	5.00E-07	1.00E-06	
model_test_8	1.00E-07	1.00E-07	1.00E-06	
model_test_9	5.00E-07	1.00E-07	1.00E-06	中
model_test_10	1.00E-06	1.00E-07	1.00E-06	
model_test_11	5.00E-08	5.00E-08	1.00E-06	
model_test_12	1.00E-07	5.00E-08	1.00E-06	
model_test_13	5.00E-07	5.00E-08	1.00E-06	低

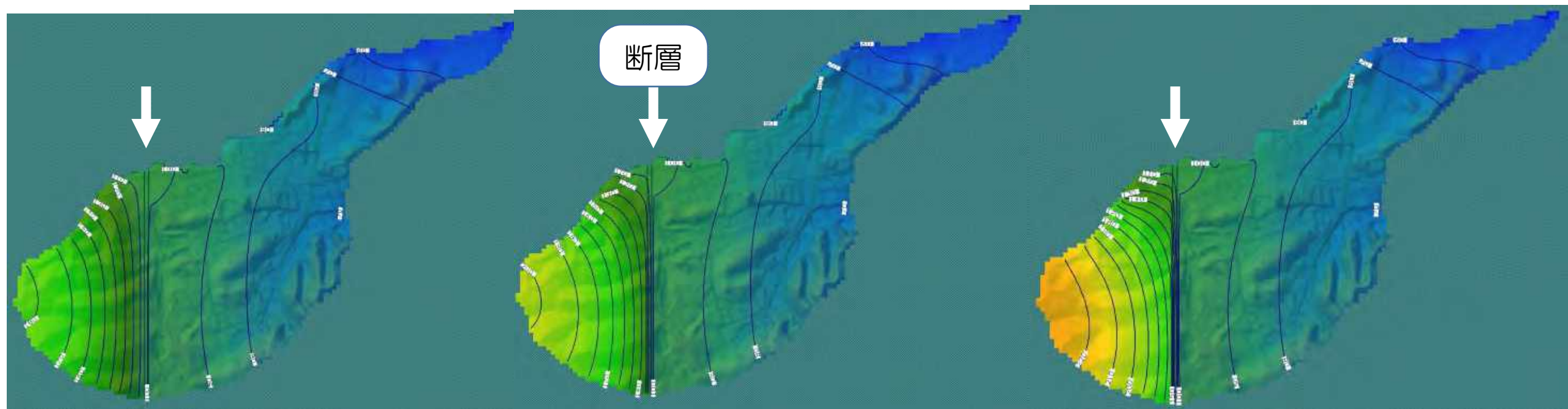
解析結果 水圧分布

断層の透水係数

高

中

低



Head Equipotentials [m] 0 47.06 94.12 117.6 170.6 200 252.9 300

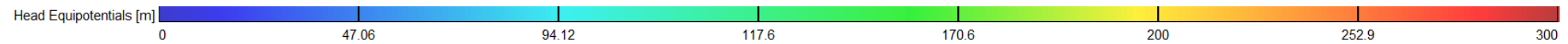
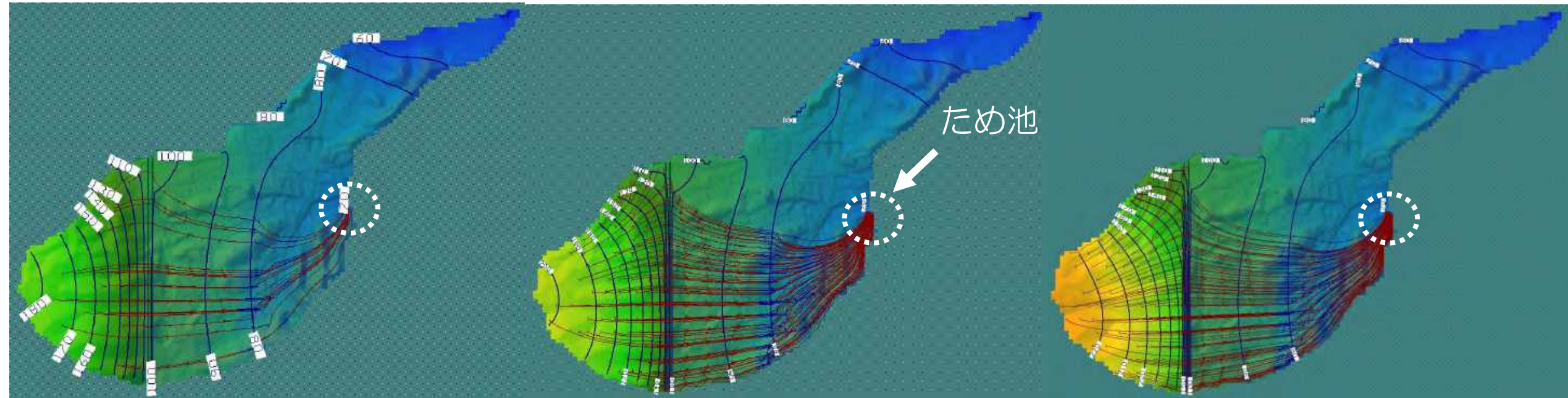
解析結果：粒子追跡線解析

断層の透水係数

高

中

低

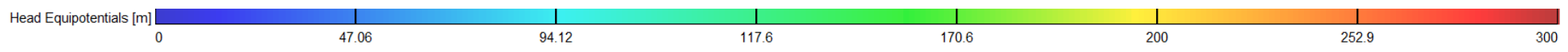
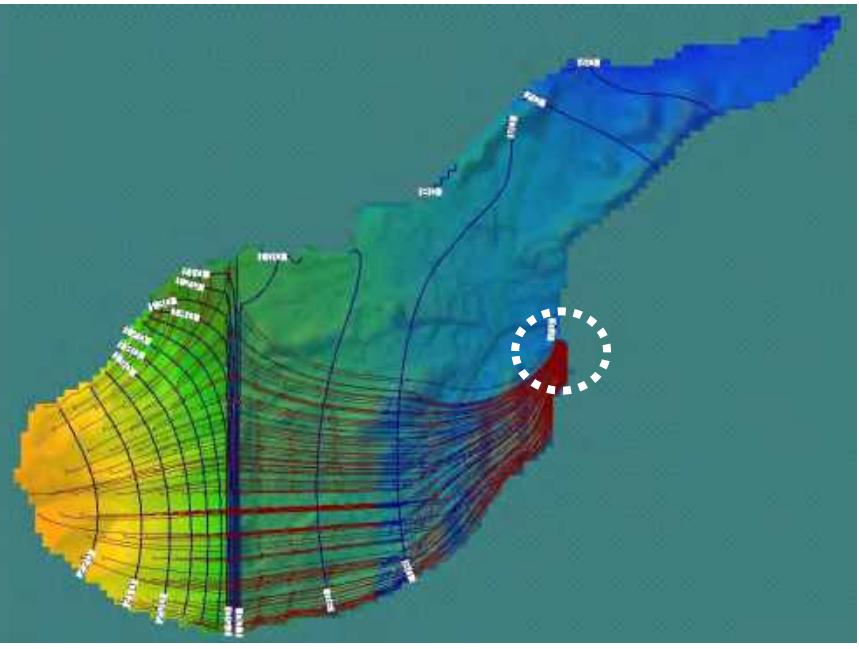
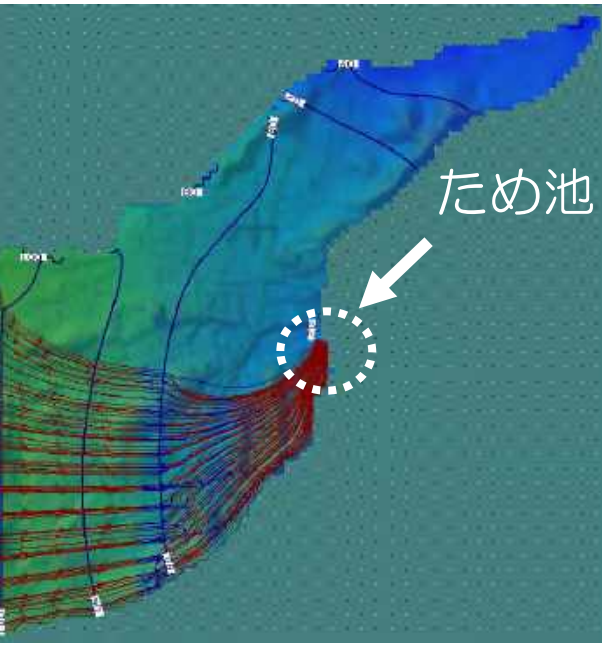
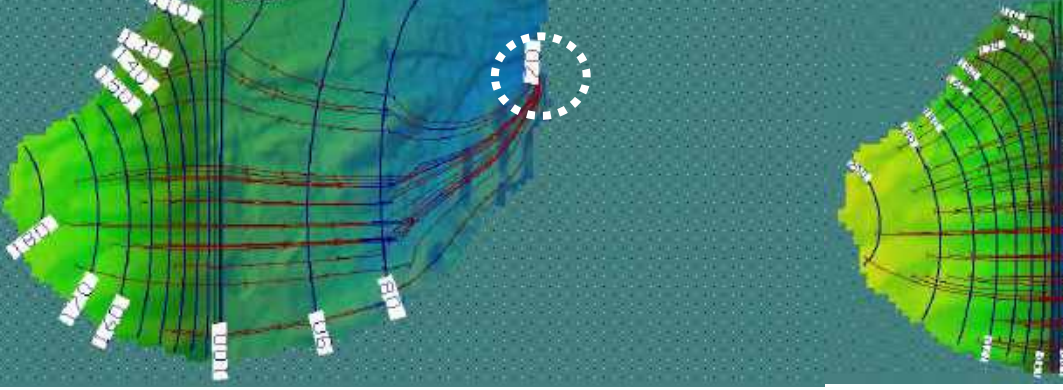
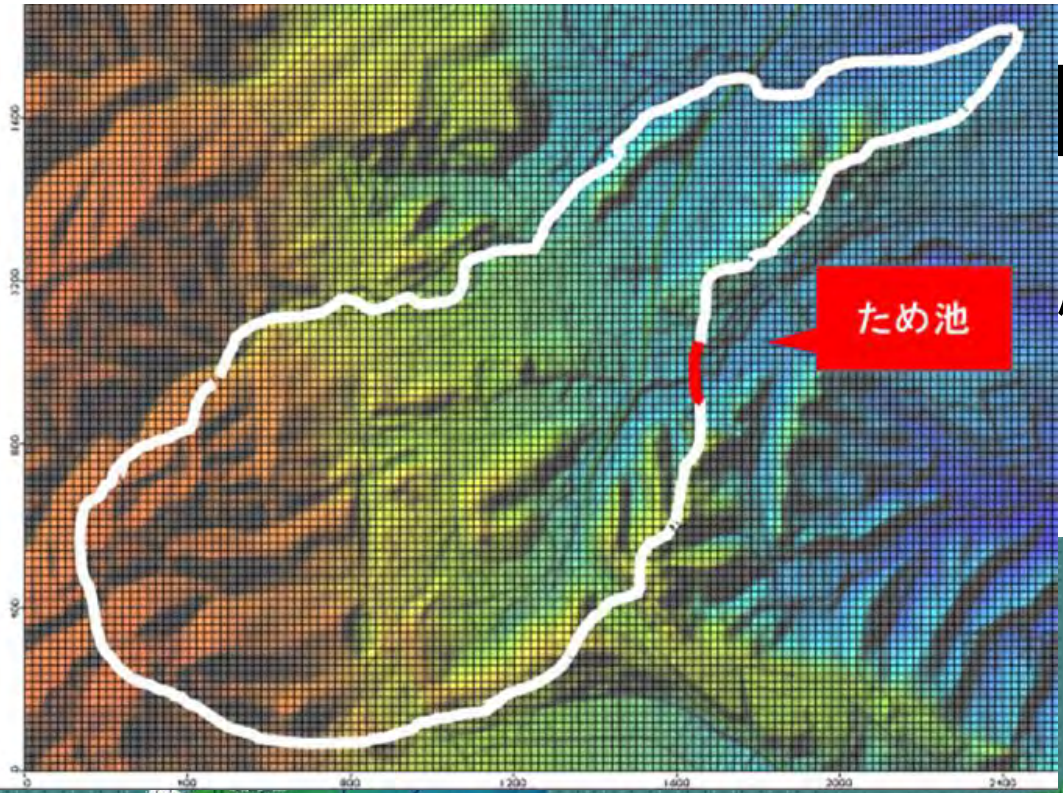


トラッキング (粒子追跡線解析)

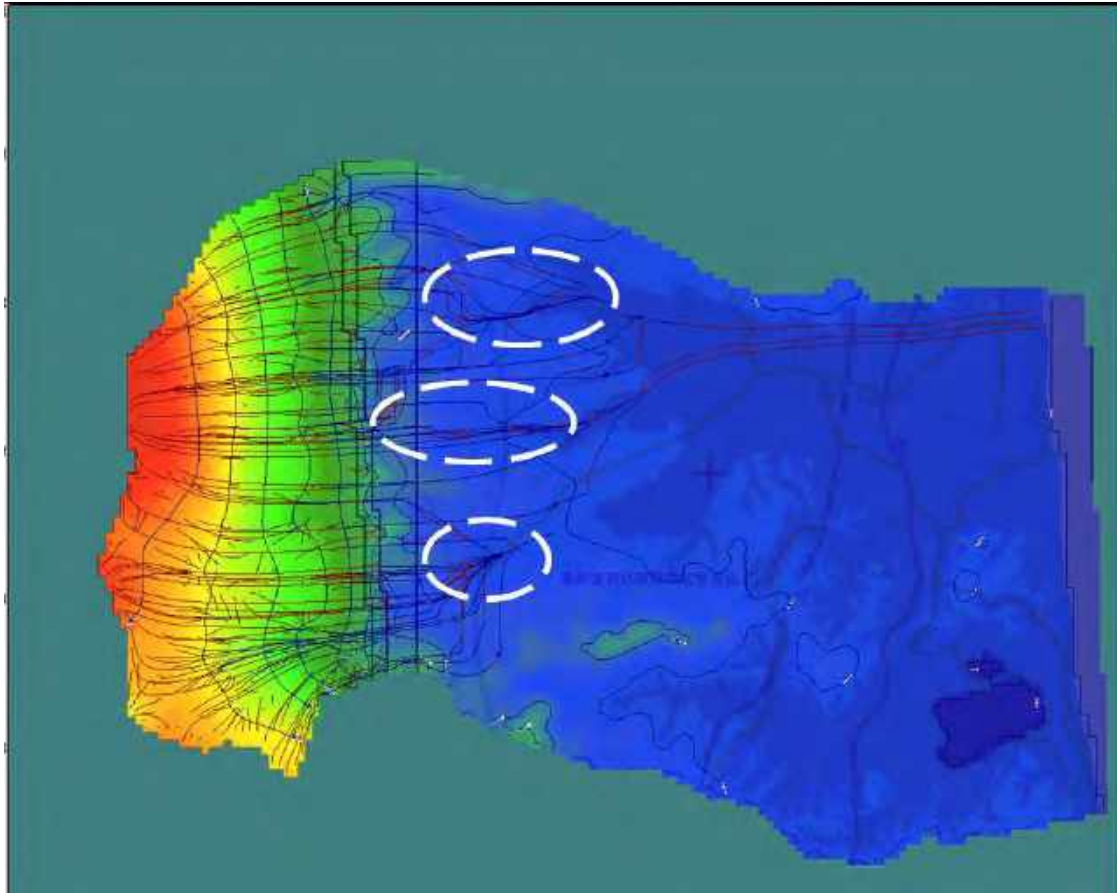
層の透水係数

中

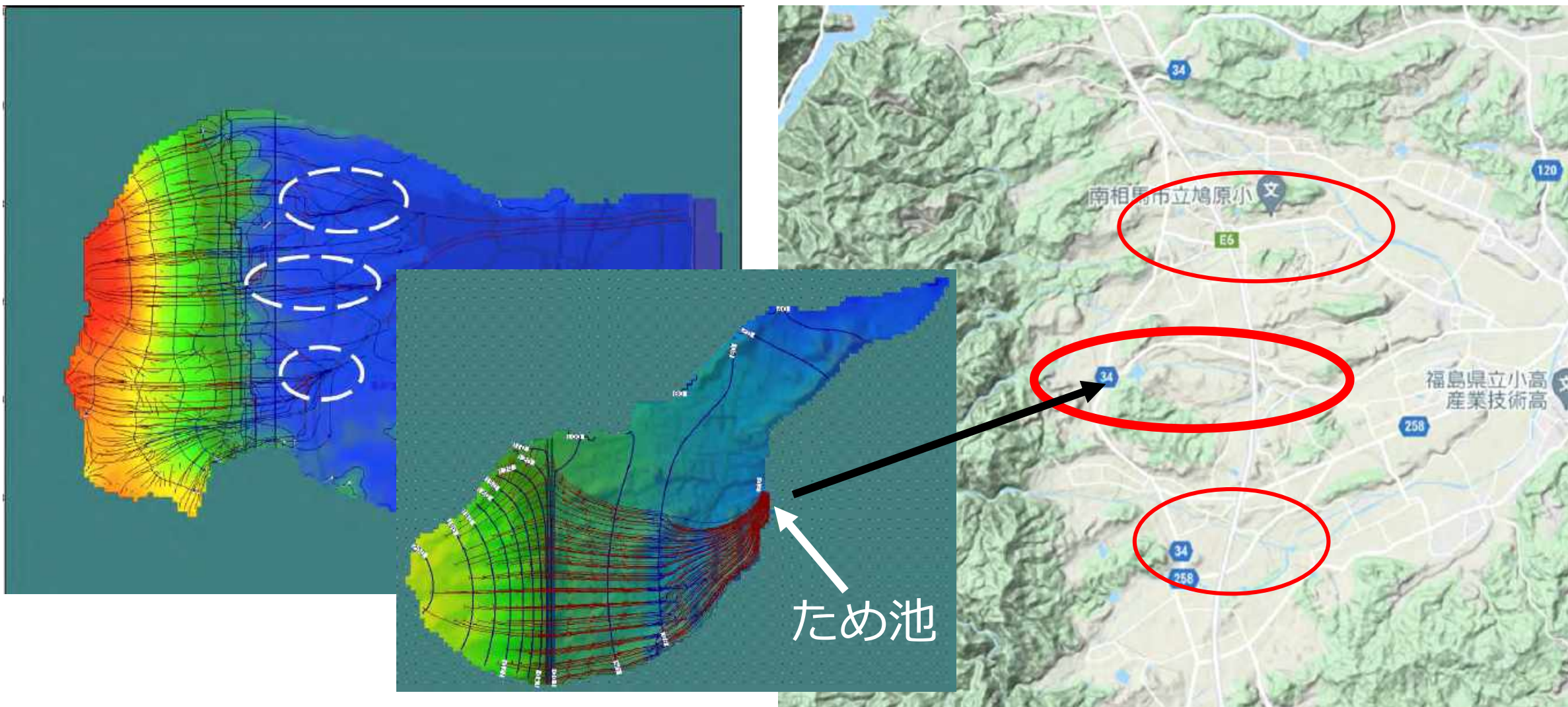
低



流出地点 (広域スケール)

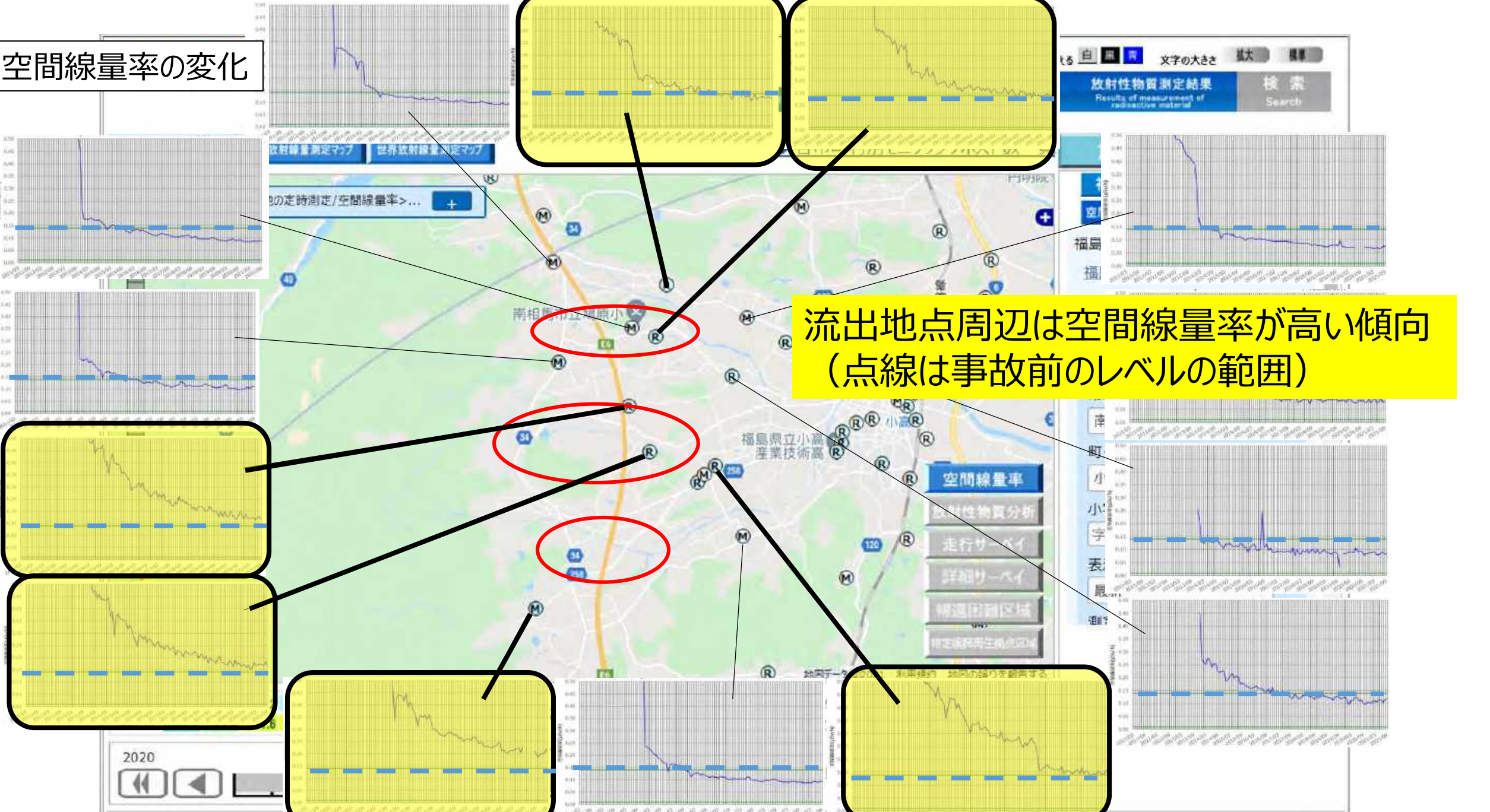


流出地点(広域と狭域)



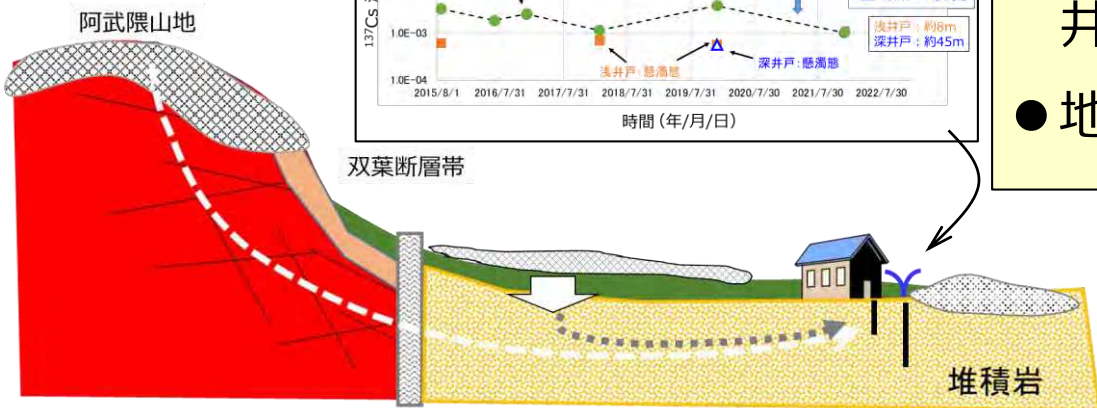
狭域スケールの流出地点（ため池）は広域スケールの流出地点と一致

空間線量率の変化



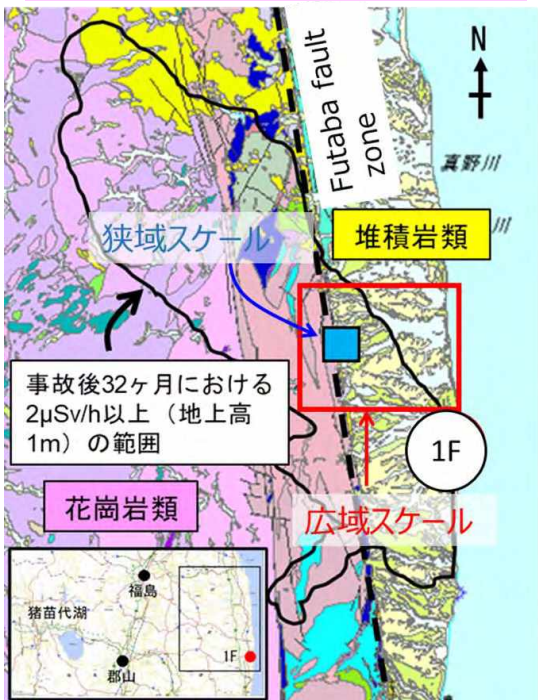
流出地点周辺は空間線量率が高い傾向
(点線は事故前のレベルの範囲)

まとめ

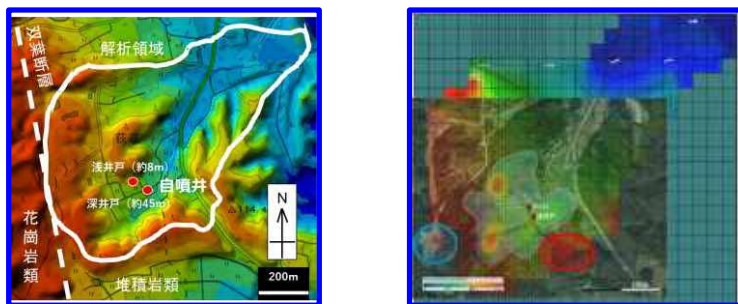


- 観測井戸（特に浅井戸）で、 ^{137}Cs 濃度は未だ減少していない
- 地下水流動解析で推定された井戸に到達する地下水の起源は、井戸周辺の ^{137}Cs 濃度が比較的高い地点と整合的
- 地下水流動解析の結果、地下水は平野部の河川、ため池に流出

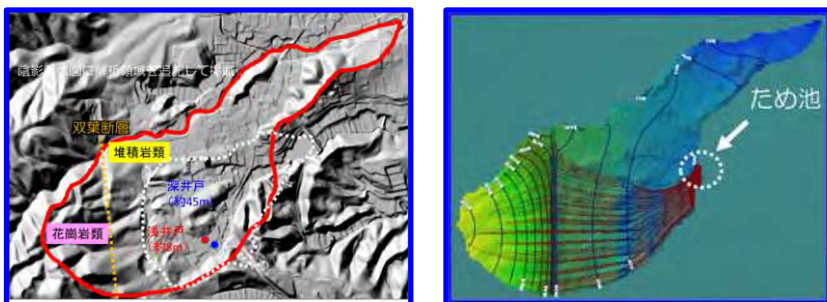
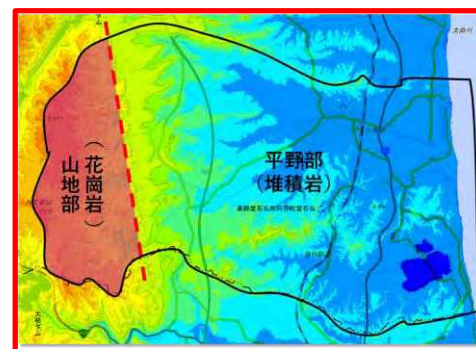
解析領域と周辺の地質概要



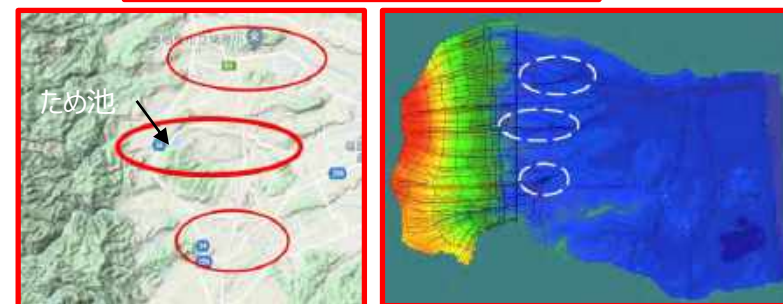
狭領域①の解析結果



広領域の解析結果



狭領域②の解析結果



狭領域と同じため池に流出

放射性セシウムによる汚染リスク*について

- 観測井戸（特に浅井戸）の ^{137}Cs 濃度は減少傾向にない

→ 継続的なモニタリングと原因解明、他地域での確認が必要

- 地下水流動解析で推定された井戸に到達する地下水の起源は、井戸周辺の ^{137}Cs 濃度が比較的高い地点と整合的

→ 未除染の地域への対応が必要

- 地下水流動解析の結果、地下水は平野部の河川、ため池に流出

→ 今後、流出地点において濃度上昇の可能性、継続的なモニタリングが必要

* 定量的なものではなく、定性的な危険性という意味合い

今後の技術的、社会的課題

- 井戸および平野部の流出地点付近での ^{137}Cs の継続的なモニタリング
- 現地調査に基づく地質、地下水データの収集とこれに基づくシミュレーション
- ◆このような不確実性を多分に含む研究結果は、関係者（特に非専門家）に有効か？
- ◆対話の題材としたら何が不足しているか？

ご清聴、ありがとうございました。
m(_ _)m



双葉断層中の粘土