

# ボーリングデータを用いた3次元 表層地盤モデルの構築とその活用

2015. 8. 5

神戸大学大学院 工学研究科 教授

神戸の減災研究会 会長

澁谷 啓

## 研究テーマ1

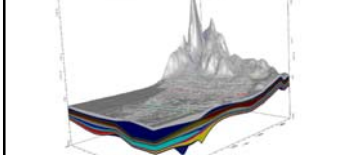
# A市での事例

## 研究の目的



→ 豪雨時の地下水の変動を考慮した市街地の浸透評価手法の確立と、その有用性の検討を行うことを目的に、兵庫県A市全域を対象として、一連の工学的手法を提案し、長期に亘る地下水観測データと比較検討することにより、提案法の妥当性および一般性を検証した。

### ① 3次元地形・地盤モデルの構築



・地形情報やボーリング柱状図の情報を用いて表層地盤の3次元地盤モデルを構築

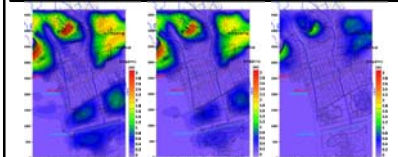
### ② 現場注水試験の実施



・現場注水試験による表層地盤の不飽和浸透特性の把握



### ③ 広域地下水流動解析の実施と結果の評価



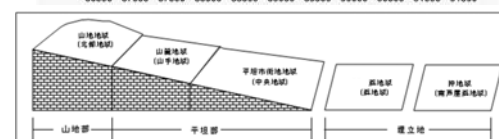
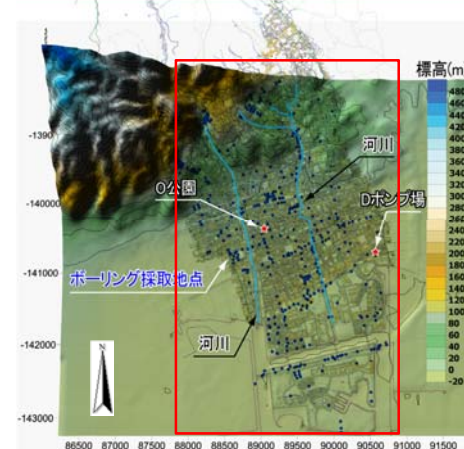
・3次元広域地下水流動解析により、降雨による地下水の流れの経時変化をシミュレート

### ④ 浸透適地マップの作成(適地・不適地の評価)



・解析結果を降雨による地下水位の上昇傾向および消散速度に着目して浸透・不適地の評価を行う  
・急傾斜地などの情報も総合的に勘案し、浸透適地マップを作成

## 解析対象地の概要



- ・六甲山系の麓に位置する市街地
- ・北部に山地、南部に臨海部、埋立地、その間に台地や低地の平坦部が存在するひな壇型の地形構造
- ・規模  
東西：約3km  
南北：約5km
- ・南北方向を流下する2つの主要な河川が存在
- ・ボーリングデータ数：約430本

# 解析プログラムの概要



## ① Hydro GeoAnalyst (HGA)

- ➡ SWS(Schlumberger Water Services)社開発の地盤情報管理ソフトウェア
- ・地盤ボーリングデータの視覚化や3次元地盤モデル構築のための補助ツールとしてHGAを使用

## ② Visual MODFLOW (VMOD)

- ➡ SWS社開発の地下水解析ソフトウェア

広域地下水流動解析

## ③ Groundwater Modeling System-MODFLOW (GMS)

- ➡ Aquaveo, LLC社開発の地下水解析ソフトウェア

- ・②VMODと③GMSは、アメリカ地質調査所(USGS)開発の地下水流動解析モデル“MODFLOW”をGUI化したプログラム
- ・MODFLOW は、つぎに示す3次元地下水水収支式(式(1)参照)を基礎方程式として、これを有限差分法により解く。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right] + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

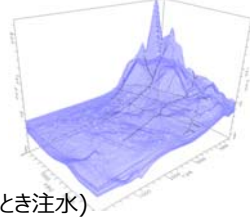
ここで、 $K_{xx}$ ,  $K_{yy}$ ,  $K_{zz}$  : 座標軸方向(x,y,z)の透水係数

$h$  : ピエゾ水頭

$W$  : 通過体積内で単位体積あたりの注水/排水量(正值のとき注水)

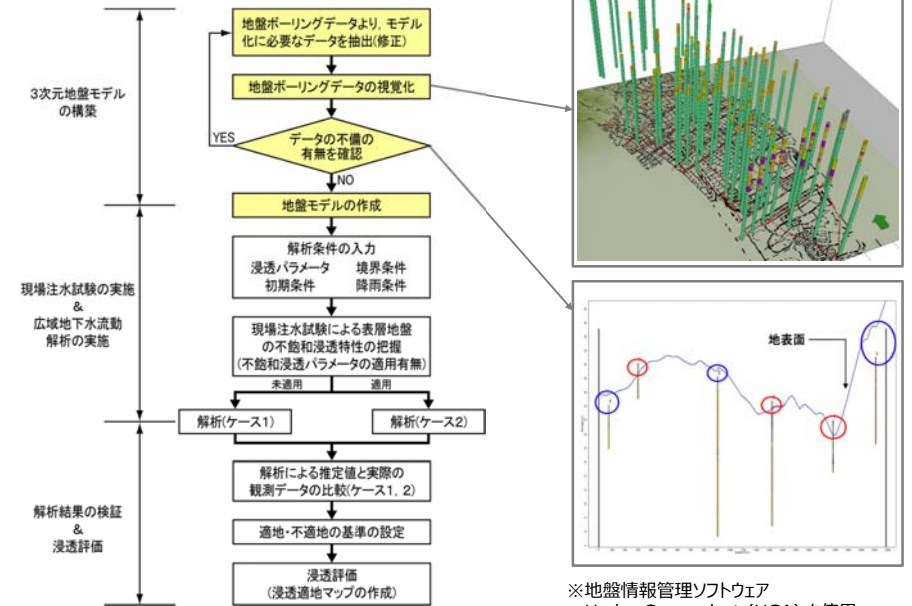
$S_s$  : 比貯留係数

$t$  : 時間



5

# 浸透評価の流れ



※地盤情報管理ソフトウェア  
Hydro Geoanalyst (HGA) を使用

6

## 解析条件の入力：降雨条件

### ◆ 降雨シナリオの設定

解析エリアの過去10年間の平均年間降水量  
1239.4mmを1年間エリア全域に均等に入力

年度	年間降水量 (mm/year)
2011	1,624.5
2010	1,633.0
2009	1,197.5
2008	1,040.5
2007	922.0
2006	1,479.5
2005	687.0
2004	1,448.5
2003	1,538.0
2002	823.5
10年平均降水量 (2002~2011)	1,239.4

### ◆ 降雨現象の表現

表層メッシュに涵養量を設定

雨水浸透の結果、地下水として蓄えられる  
涵養量を与えることで降雨現象を表現

解析エリアの  
浸透率を算定

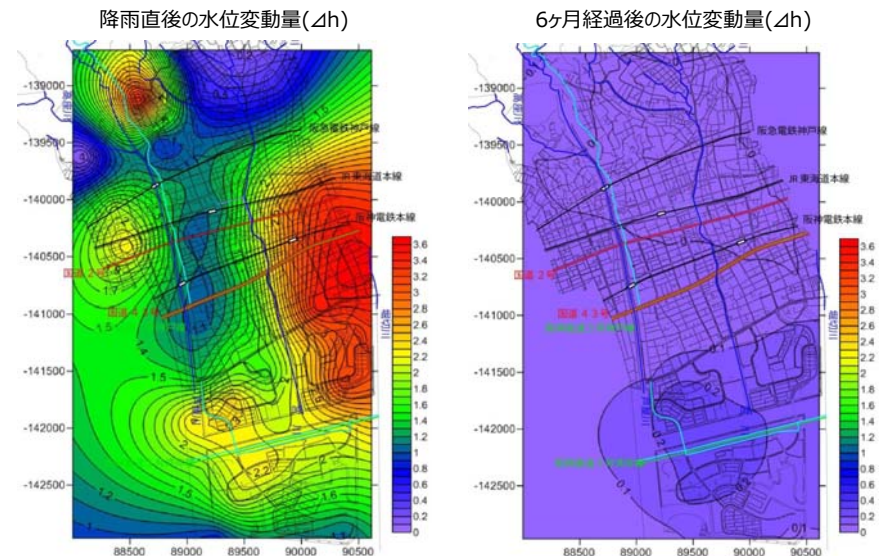
涵養量 = 降水量 × 浸透率  
として涵養量を設定

降水量に対する地中に浸透する雨量の割合  
(浸透率) = 1 - (流出係数※)

※下水道施設計画・設計指針と解説 (日本下水道協会, 2009) より

## 解析結果(表層の保水性を考慮しない場合：ケース1)

### ◆ 解析結果：降雨による地下水位変動量の経時変化(ΔH)



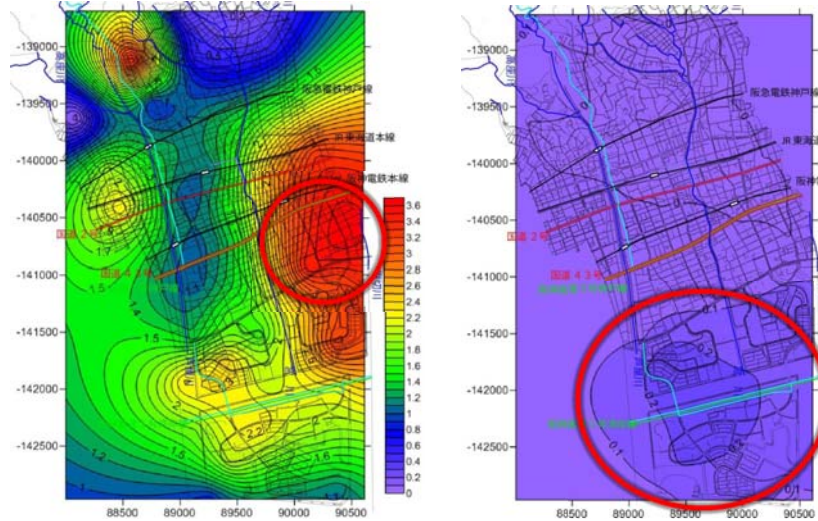
8



- ・宮川の東側が降雨時に地下水位の上昇が大きいと予想される地域
- ・1ヶ月経過した時点で $\Delta H_{\max}$ は約1.25mに減少
- ・時間経過とともに地下水位が初期状態に復元していく様子が伺える
- ・南側の埋立地の場合、降水後の地下水位の回復が遅く、浸透水の残留時間が長い地域

降雨直後の水位変動量( $\Delta h$ )

6ヶ月経過後の水位変動量( $\Delta h$ )

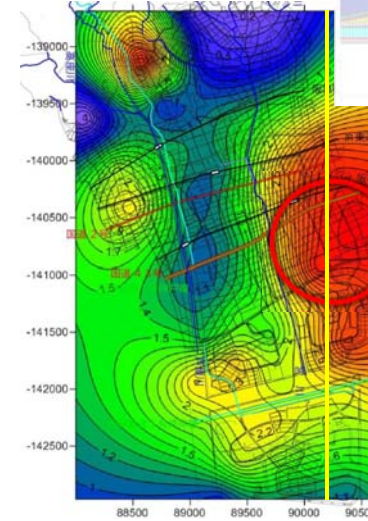


9

## 解析結果(表層の保水性を考慮しない場合：ケース1)

### ◆ 東部平坦部

降雨直後の水位変動量( $\Delta h$ )



地下水位が上昇しやすいエリアと  
浸水履歴を有するエリアが一致

解析対象領域の降雨に対する挙動を  
定性的には再現できたのでは？

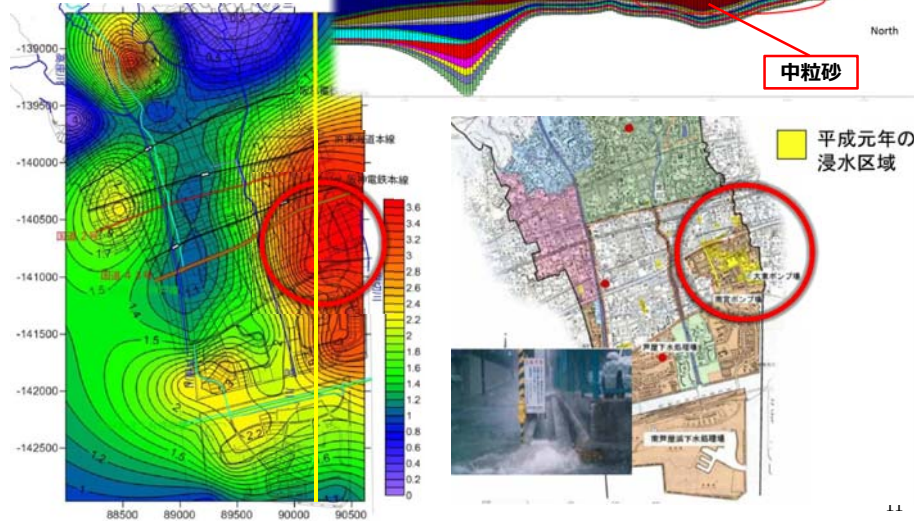


10

## 解析結果(表層の保水性を考慮しない場合：ケース1)

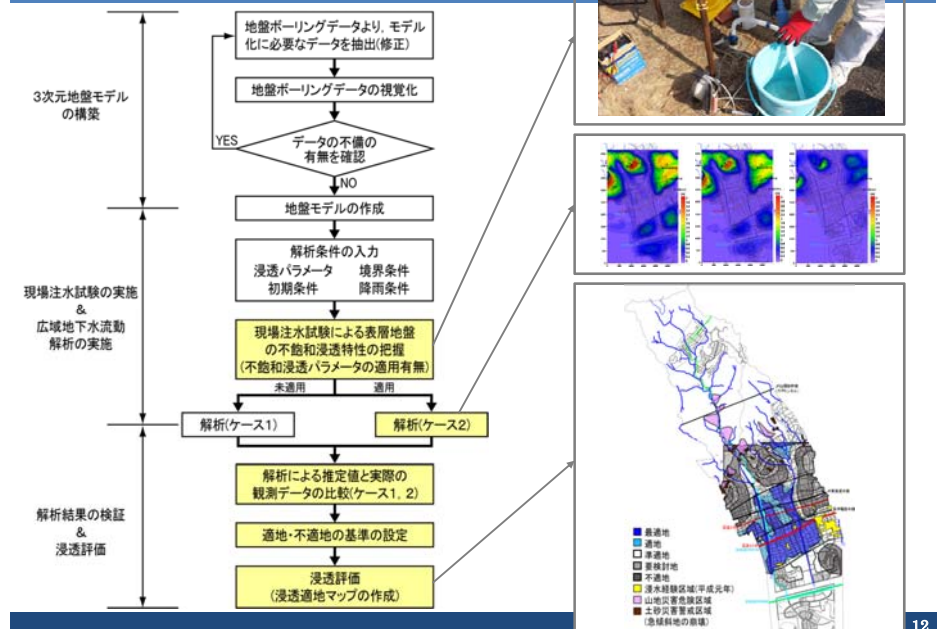
### ◆ 東部平坦部

降雨直後の水位変動量( $\Delta h$ )



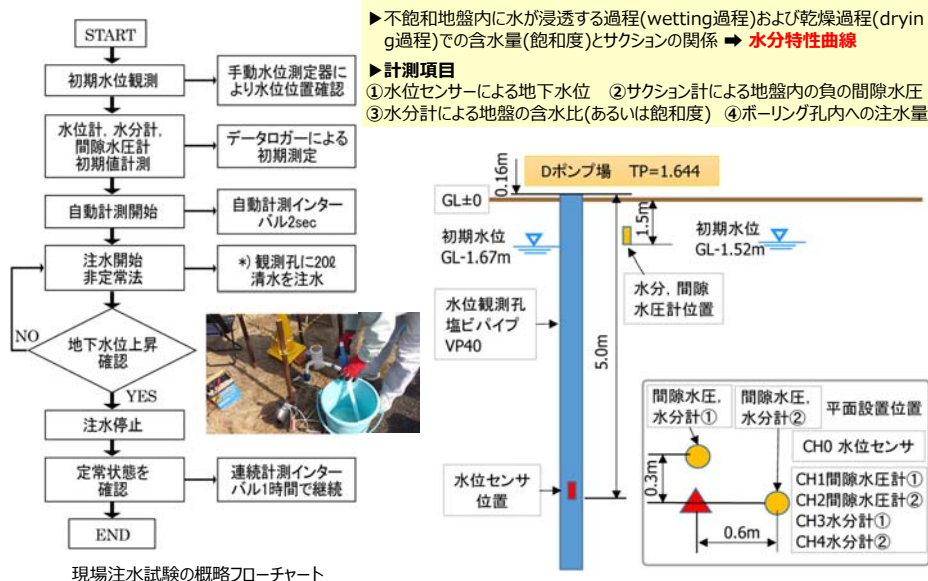
11

## 浸透評価の流れ



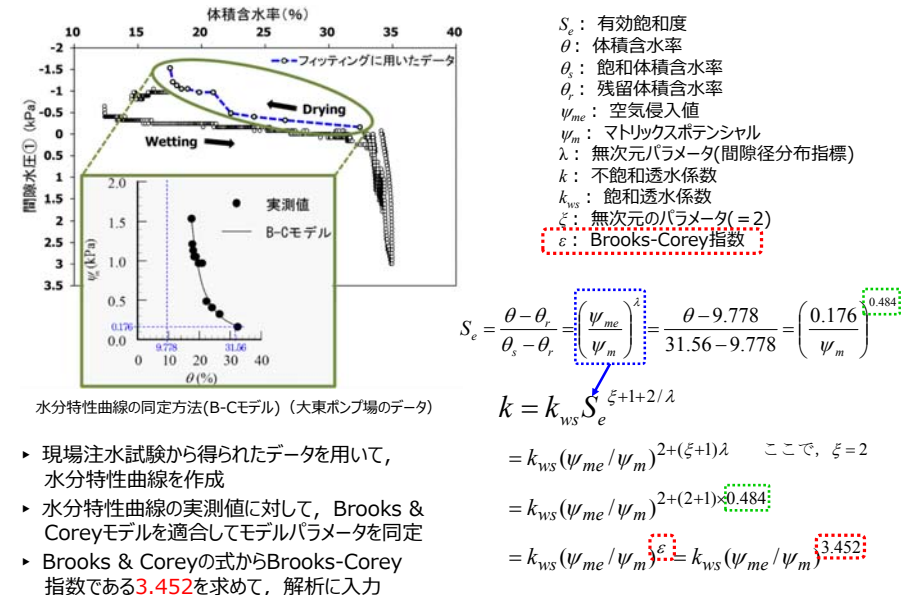
12

## 現場注水試験の概要



13

## 水分特性曲線の同定方法および結果(Brooks & Corey model)



14

## 不飽和浸透特性パラメータ

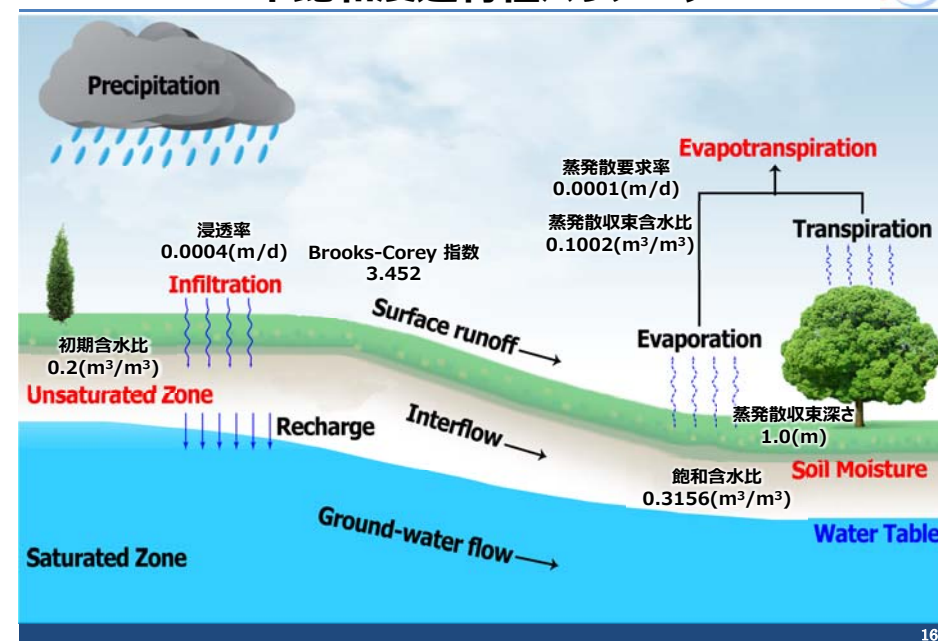


不飽和浸透特性パラメータの一覧表

指標	数値
Brooks-Corey 指数	3.452
飽和含水比 (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	0.3156
初期含水比 (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	0.2
浸透率 (m/d)	0.0004
蒸発散要求率 (m/d)	0.0001
蒸発散収束深さ (m)	1.0
蒸発散収束含水比 (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	0.1002

15

## 不飽和浸透特性パラメータ



16



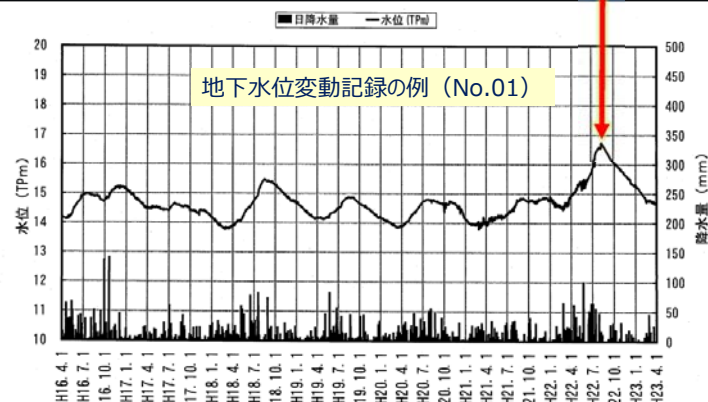
## 解析結果の検証方法



### 地下水位の観測データと解析による推定値の比較

→ 山手幹線の川横断工事が地下水位に与える影響の調査として行われた、計27箇所の地下水位観測データを使用

モデルの妥当性を検証するため、観測データの**最大値**と降雨直後の地下水位の推定値を比較



17

## 観測地点の位置(計27箇所)

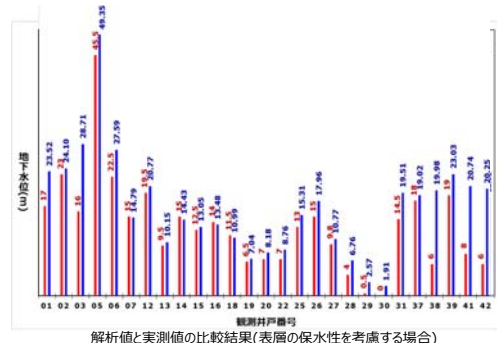


18

## 解析結果の検証(表層の保水性を考慮する場合：ケース2)



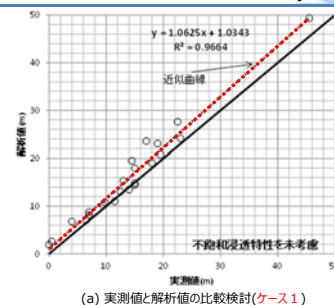
### 地下水位の観測データ(実測値)との比較



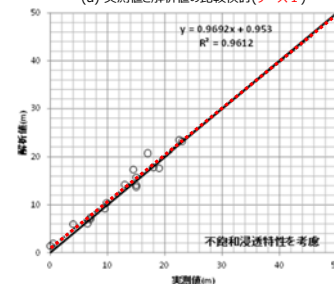
解析値と実測値の比較結果(表層の保水性を考慮する場合)

→ ケース1(不飽和地盤の保水性を考慮しない解析)では、近似曲線が実測値と解析値の45度線から少しずれていることが確認できる。

しかし、ケース2(不飽和地盤の保水性を考慮した解析)では、近似曲線が実測値と解析値の45度線とほとんど一致していることから、ケース1と比較して、降雨に対する地下水の応答を**定性的に再現**することができ、**定量的な精度も改善**することができたと考えられる



(a) 実測値と解析値の比較検討(ケース1)



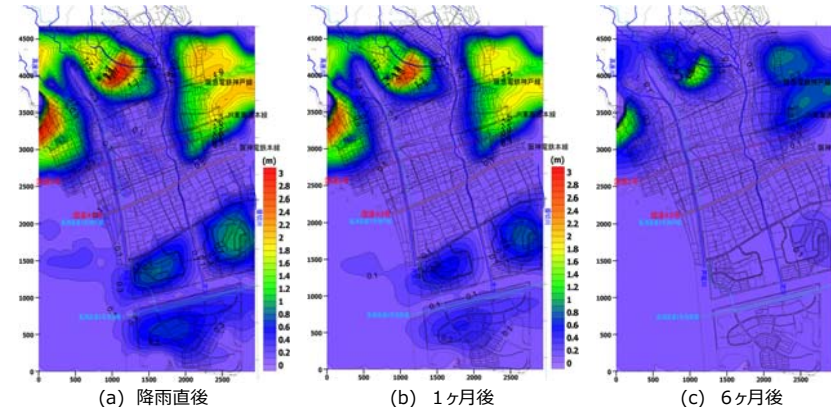
(b) 実測値と解析値の比較検討(ケース2)

19

## 解析結果(表層の保水性を考慮する場合：ケース2)



### 解析結果：降雨による地下水位変動量の経時変化( $\Delta H$ )



→ ケース1の解析結果と比較すると、山麓地帯の地下水位の上昇・低下の傾向および変動量に違いが認められる。ケース1の場合、6ヶ月経過後には地下水位の上昇量がほぼ100%消散しているのに対し、ケース2の場合は、6ヶ月経過後にも1m程度の地下水位が残留している。このように、地下水位の消散速度が遅い理由として、**不飽和浸透パラメータを解析に適用することにより、地下水面上りの表層部の保水性が適切に反映されたため**と考えられる。

20

## 適地・不適地基準の設定



### ◆ 適地・不適地判定基準（仮）

ケース2の解析結果を降雨に対する地下水の上昇傾向および上昇した地下水位の消散速度に着目して、浸透評価を行う

#### 【 適地判定基準 】

区分	選定基準の主な内容
最適地	降雨終了直後の時点で、降雨による地下水位の変動がほとんどない区域
適地	降雨終了後1ヶ月の経過時点で、降雨により上昇した地下水位が100%消散する区域
準適地	降雨終了後1ヶ月の経過時点で、降雨により上昇した地下水位が100%消散する区域 地下水位の上昇が最大地下水位上昇高( $\Delta H_{max}$ )の50%未満

#### 【 不適地判定基準 】

区分		選定基準の主な内容
浸水地		過去の浸水履歴地
浸透不適地	不適地	地下水位の上昇が最大地下水位上昇高( $\Delta H_{max}$ )の75%以上 または、降雨中止後6ヶ月経過しても降雨前の状態に戻らない
	要検討地	地下水位の上昇が最大地下水位上昇高( $\Delta H_{max}$ )の50%以上

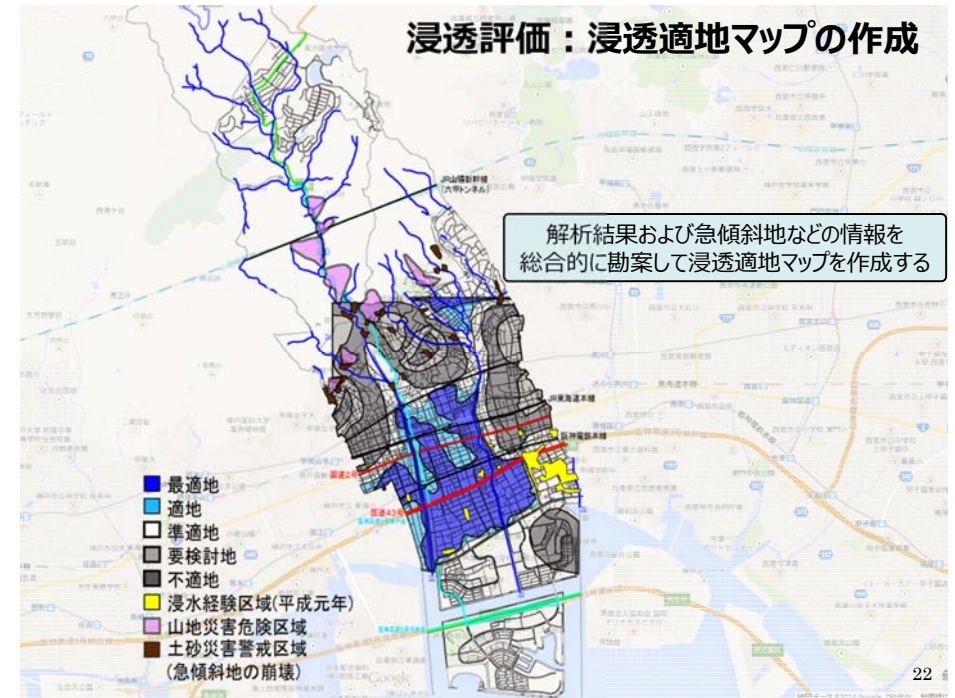
21

## まとめ①



- ① 本研究では、実存する都市(A市)を研究対象として、GIS情報とボーリング情報を融合した**3次元地形・地盤モデルを構築**した。このモデルの特徴として、(1)一般的な地形情報(GISデータ)に加え、約432箇所の既存のボーリングデータを活用していること、(2)雨水浸透の対象となる表層地盤の複雑な地層構成を反映したこと、の2点が挙げられる。
- ② **現場注水試験**により、地下水面より上部の**不飽和状態にある表層部に雨水が浸透した場合の保水性を評価**した。表層の不飽和地盤内で土壌水分および間隙水圧の両方を測定し、表層部の水分特性曲線を求め、これを解析モデルに適切に反映した。

## 浸透評価：浸透適地マップの作成



22

## まとめ②



- ③ ②で得られた**不飽和状態にある表層地盤の保水性を考慮**し、初期条件(初期地下水位)と南部の境界条件以外は、**表層の保水性を考慮しない場合(ケース1)**と全く同じ条件で広域地下水流動解析(**ケース2**)を実施した結果、解析結果は市内27箇所に点在する既往の地下水位観測の最大値とよく一致した。
- 一方、表層の保水性を考慮しない場合(**ケース1**)の地下水変動推定結果は、実測値を過大評価していることが分かった。地下水変動推定精度の向上のためには、表層部の不飽和浸透特性を正しく評価し、解析に適切反映することの重要性が確認できた。



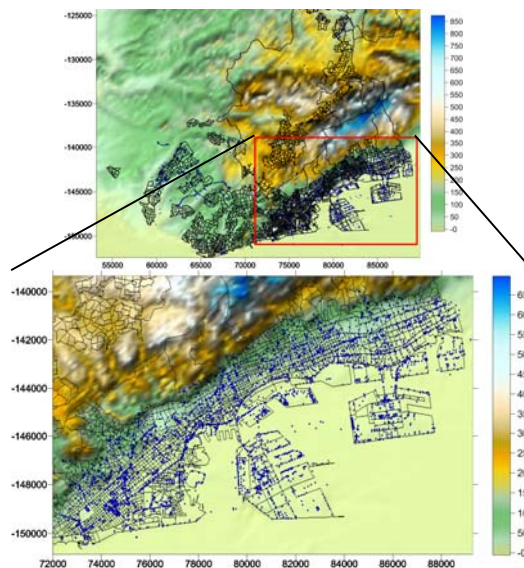
- ④ ③の結果を踏まえて、適地・不適地の基準を設けることにより、**浸透適地・不適地区分図を提案した**。従来の地下水変動を考慮せず、地盤調査の結果や地形情報などをもとに行われる浸透評価手法に比べ、本手法では、降雨による地下水の変動傾向を評価して地盤の浸透評価を行うため、**より地盤災害のリスクが小さい判定結果**が得られるものと考えられる。

⇒ 一方、降雨に対する地下水の変動傾向と浸透施設が発揮し得る性能との関係が不明確であるため、浸透評価基準については今後精査していく必要がある。

## 研究テーマ2

# 神戸市での事例

## 解析対象地の概要



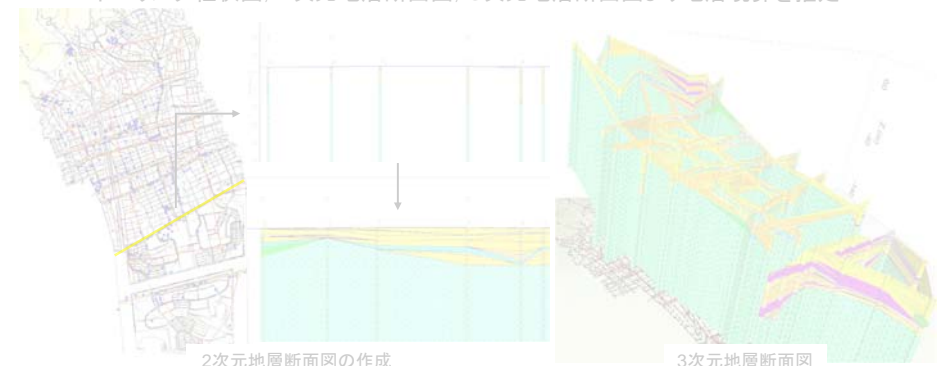
- ・六甲山系の麓に位置する市街地
- ・北部に山地，南部に臨海部，埋立地，その間に台地や低地の平坦部が存在するひな壇型の地形構造
- ・規模  
東西：約30km → **17km**  
南北：約20km → **9 km**
- ・ボーリングデータ数：  
約8000本 → **5200本**

## 地層境界の推定手法



### a) モデル作成者の主観にもとづく手法

ボーリング柱状図，2次元地層断面図，3次元地層断面図より地層境界を推定



### b) 市販のプログラムの機能を用いる手法

- ・解析プログラムGMSの“Horizon Optimizer”を使用
- ・地層の上下関係を表すHorizon ID を統計的に最も誤差が小さくなるように割り当てる

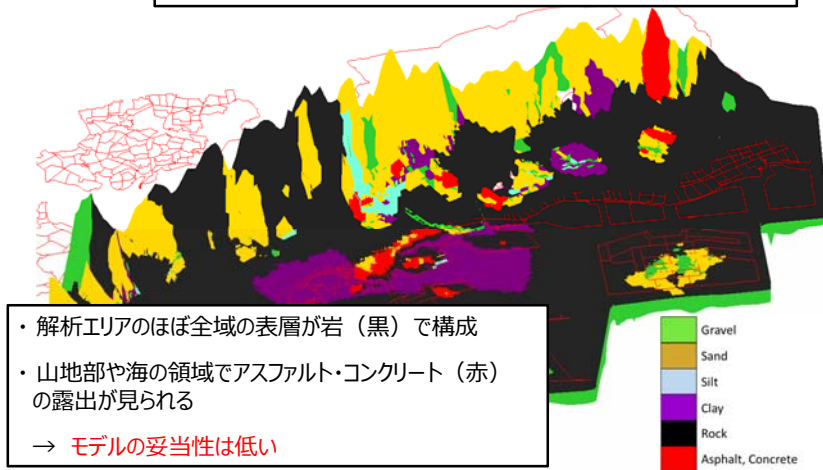
## ボーリングデータを全て用いた検討【Case-1】



### ◆ Case-1

モデル化の条件：

- ・モデル化対象領域内の**5200本全てのボーリングデータ**を使用
- ・土質分類を6種類に簡素化

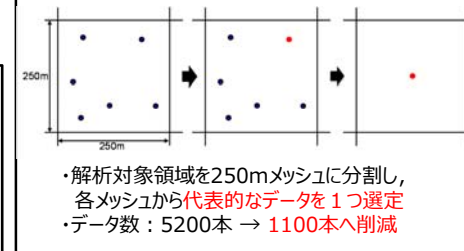


29

## Case-1 に対する考察・対策



### 対策1：ボーリングデータの選定



### 要因1：データ密度が大きい

近くのデータであってもボーリング技師の違いにより全く同じ柱状図にはならない



適切に地層境界が推定されない

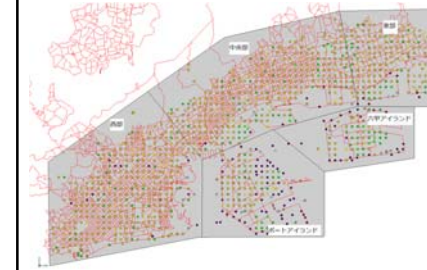
### 要因2：モデル化対象領域が大きい

モデル化対象領域全てのボーリングデータが整合するように層境界を推定



遠くのボーリングデータの影響を受ける

### 対策2：モデル化対象領域の分割



## Case-1 に対する考察・対策



### 要因3：岩、アスファルトの位置、登場頻度

岩：山地部にのみ存在

アスファルト：表層にのみ存在

岩、アスファルトは全ボーリングデータの中で登場頻度が低い

高い位置に存在する層として判定

まとまった層を形成しやすい

表層に広く層を形成

### 対策3：不透水の土質（岩、アスファルト・コンクリート）の除外

岩：ほとんどがボーリングデータの最深部に存在

→地盤モデル最下面は不透水境界として扱う

アスファルト：ほとんどが柱状図の最上部に存在

→表層の浸透能は浸透率の設定時に反映される

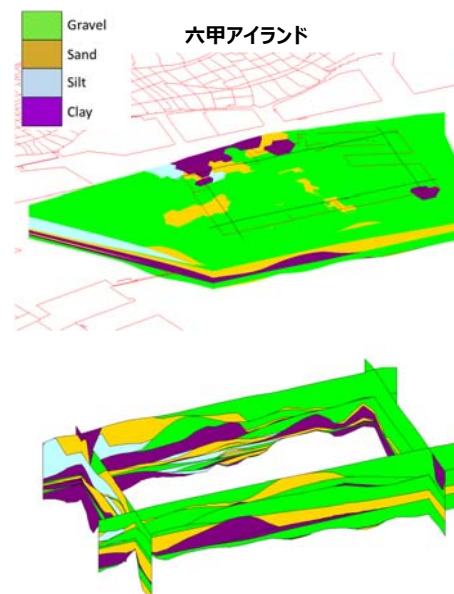
コンクリート：ごく一部のボーリングデータにのみ存在

→解析対象領域全体に層を成しているのではなく局所的に存在

広域地下水流動解析を前提に地盤モデルを構築

解析上無視できる

## モデル化対象領域の分割による検討【Case-3】



### ポートアイランド

・表層に砂礫、その下に粘性土が堆積している様子が確認できる



埋立地の地層構造が再現された



・表層の一部で粘性土が露出



埋立地造成前のボーリングデータの  
影響が

不備が生じた箇所の透水係数を適切に設定することで、解析上この問題は解消可能



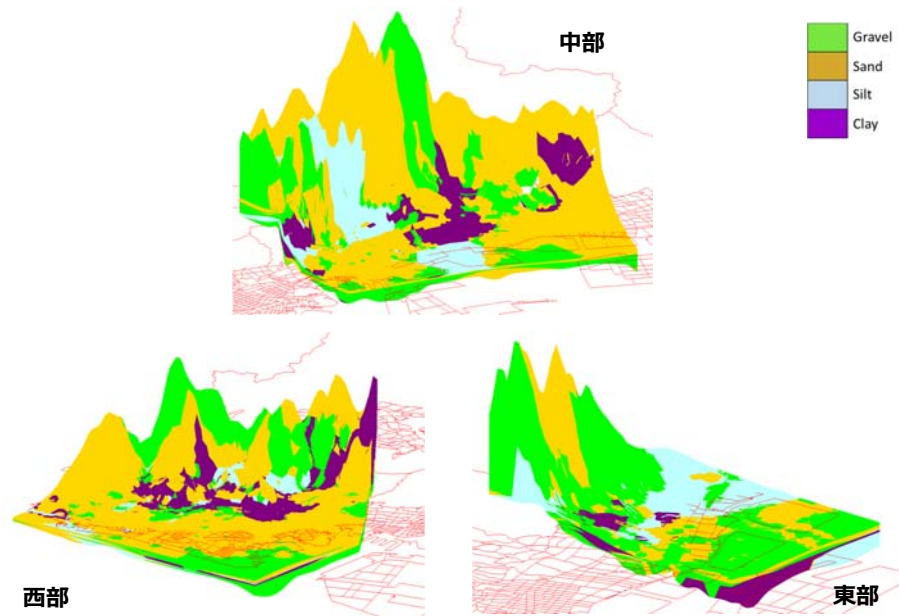
概ね妥当な結果が得られた

31

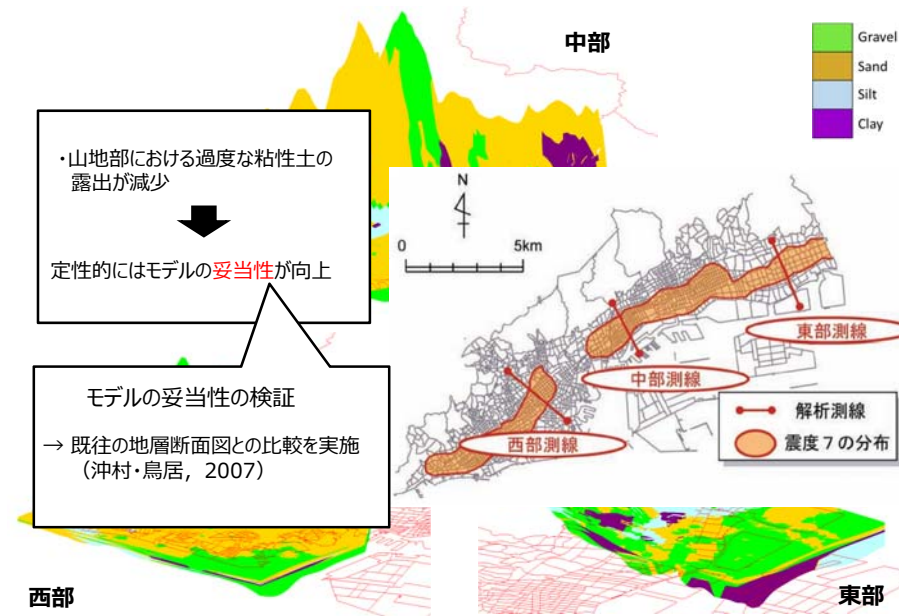
32



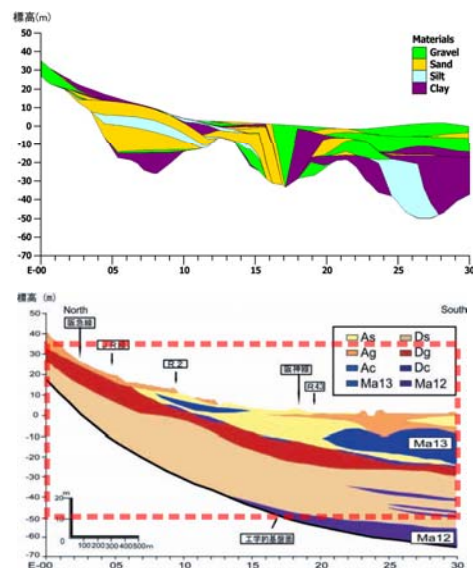
## モデル化対象領域の分割による検討【Case-3】



## モデル化対象領域の分割による検討【Case-3】



### 東部側線



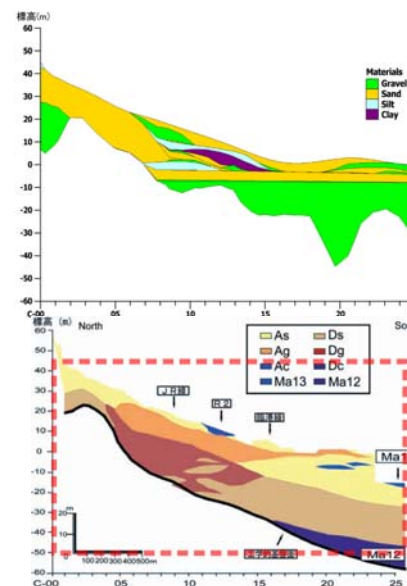
地表から標高-10m付近までの領域においては、既往の地層断面図と同様の傾向が見られる

- ・標高が小さくなるにつれて既往の断面図との乖離が目立つ
- ・標高が小さくなるにつれて形成される地層がいびつな形となる

山地部の比較的浅いボーリングと臨海部の比較的深いボーリングとが混在することで適切に地層境界が推定されなかった

ボーリングデータ最深部の点の集合から生成される曲面が地盤モデルの下端面となることによる影響

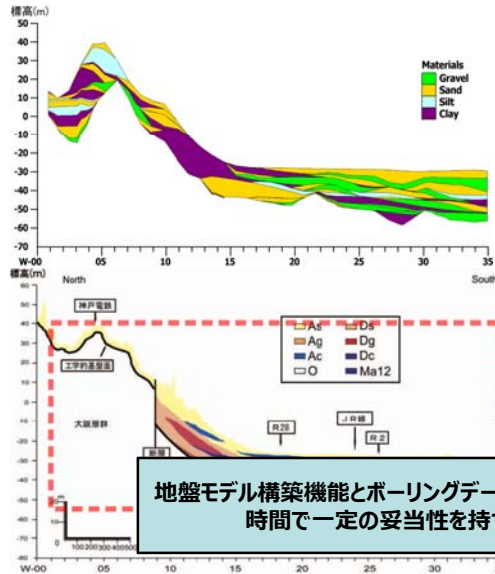
### 中部側線



標高-30m程度以上の領域では砂・礫が主で、局所的に粘土が存在するという特徴を捉えている

C-10~15 で粘土層が確認されたものの、深度は再現できていない

- ・標高が小さくなるにつれて既往の断面図との乖離が目立つ
- ・標高が小さくなるにつれて形成される地層がいびつな形となる



W-15~35の範囲においては既往の地層断面図と整合する結果が得られた

山地部でいびつな形の地層が目立つ



- ・DEMデータより生成される表層レイヤーが地盤モデル上端面となる
- ・山地部は地表面の起伏が大きい

- ・標高が小さくなるにつれて既往の断面図との乖離が目立つ
- ・標高が小さくなるにつれて形成される地層がいびつな形となる

地盤モデル構築機能とボーリングデータの処理を組み合わせることで、短時間で一定の妥当性を持つ地盤モデルが作成できた

## ➡ 神戸市を対象として3次元地盤モデルを構築

- ◆ 3次元地盤モデルを構築する際、**ボーリングデータを適切に整理**することでモデル構築を容易にし、精度の向上にも寄与する

- ◆ **市販のプログラムの地層境界推定機能は、地盤モデル構築の補助ツールとして有用**であり、適切に使用することで地盤モデルの高精度化・構築に要する時間の削減が期待できる