

東京都の台地部及び低地部における鉛直 次元モデルによる地盤沈下解析

東京都環境科学研究所 環境資源・生物多様性研究科

平野晃章

本日の発表内容

- 背景
- 本研究の目的
- モデルの作成
- 結果
- まとめ

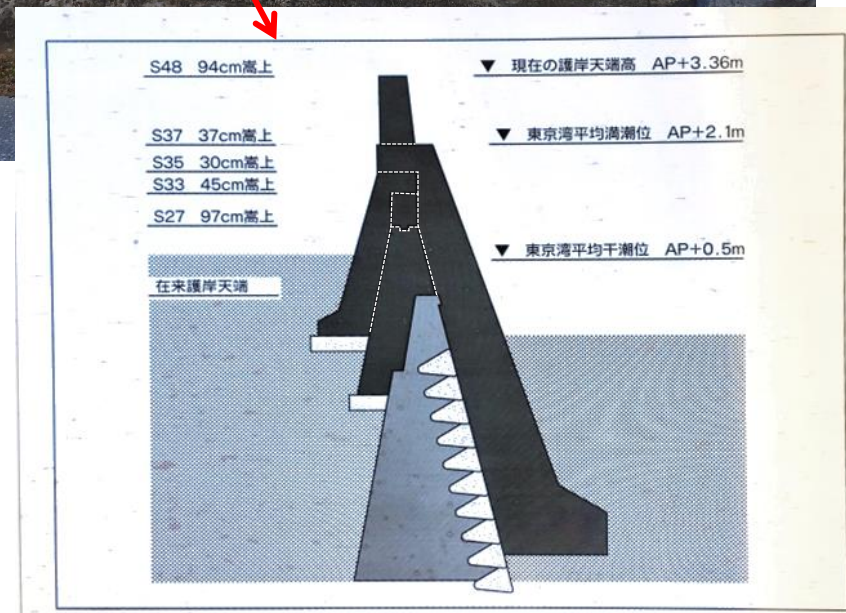
背景 地盤沈下とは

地下水・地盤沈下検証結果報告書（2022）より一部抜粋・加筆



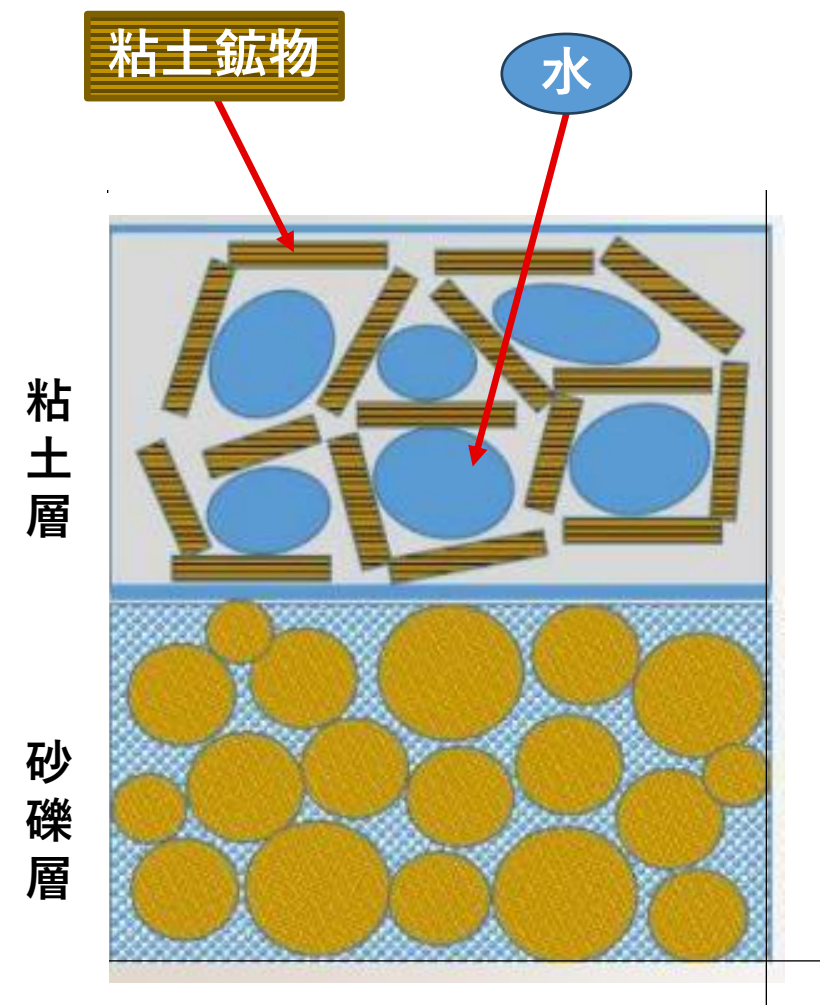
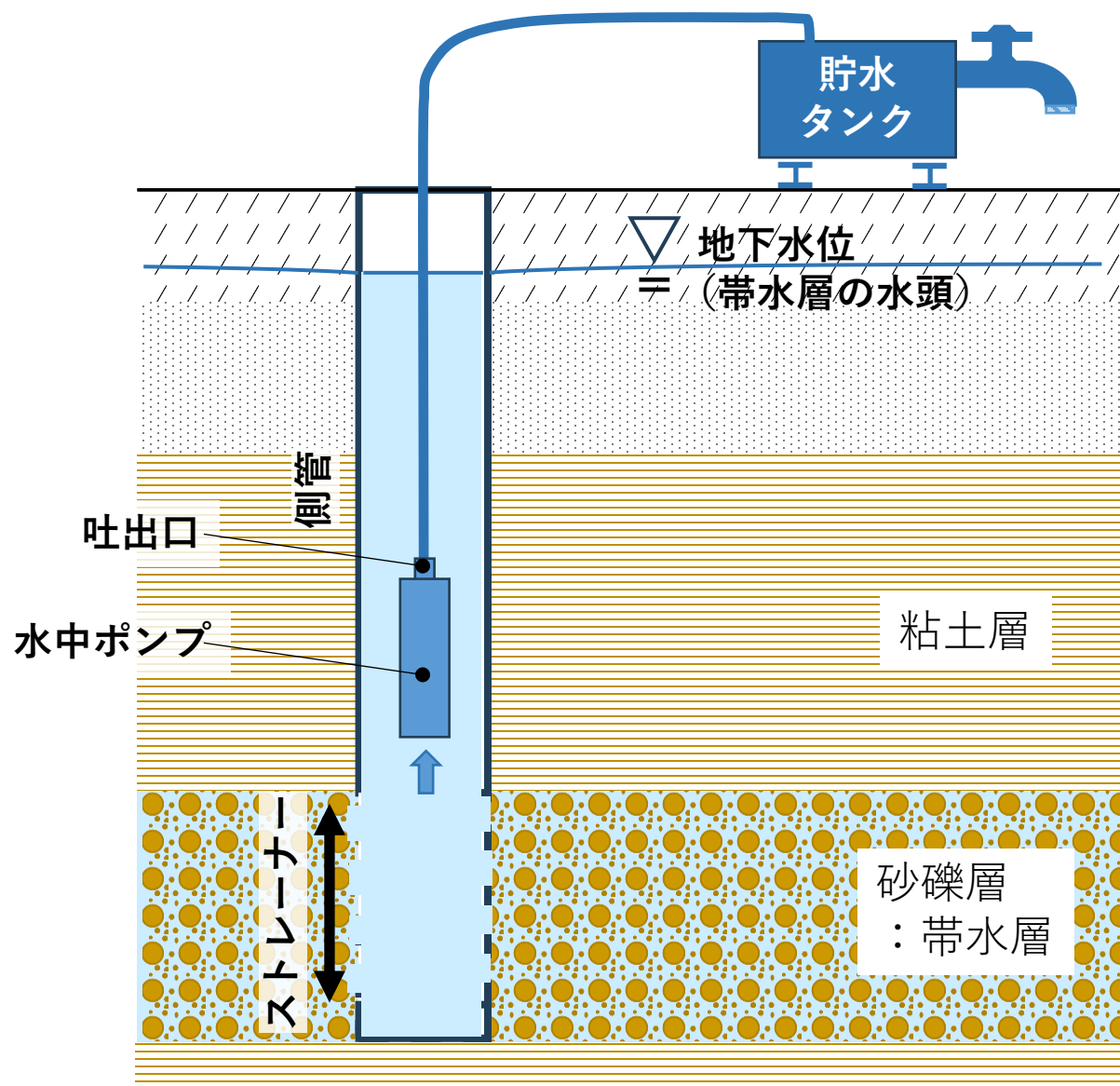
「扇橋閘門パンフレット」（東京都江東治水事務所）より一部抜粋・改変

A.P.(ArakawaPeil)とは中央区新川付近の隅田川の最低水位を0mと定めた高さの表示方法のことで、標高(T.P.)0mはA.P.+1.134mとなります。



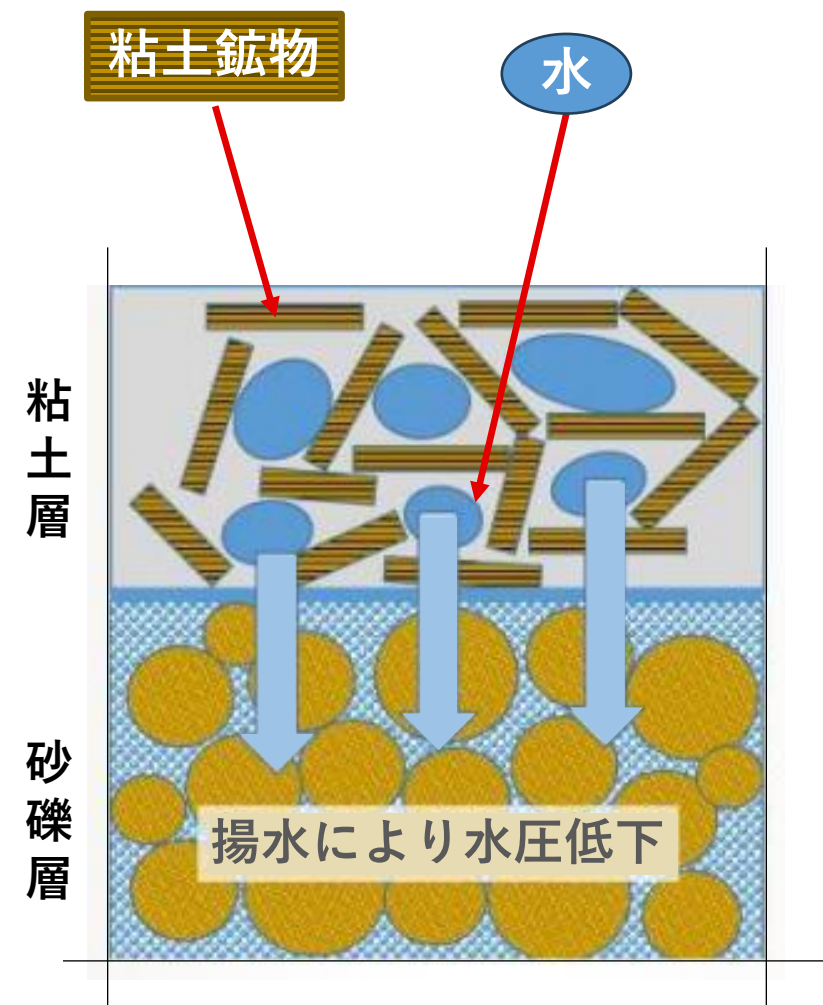
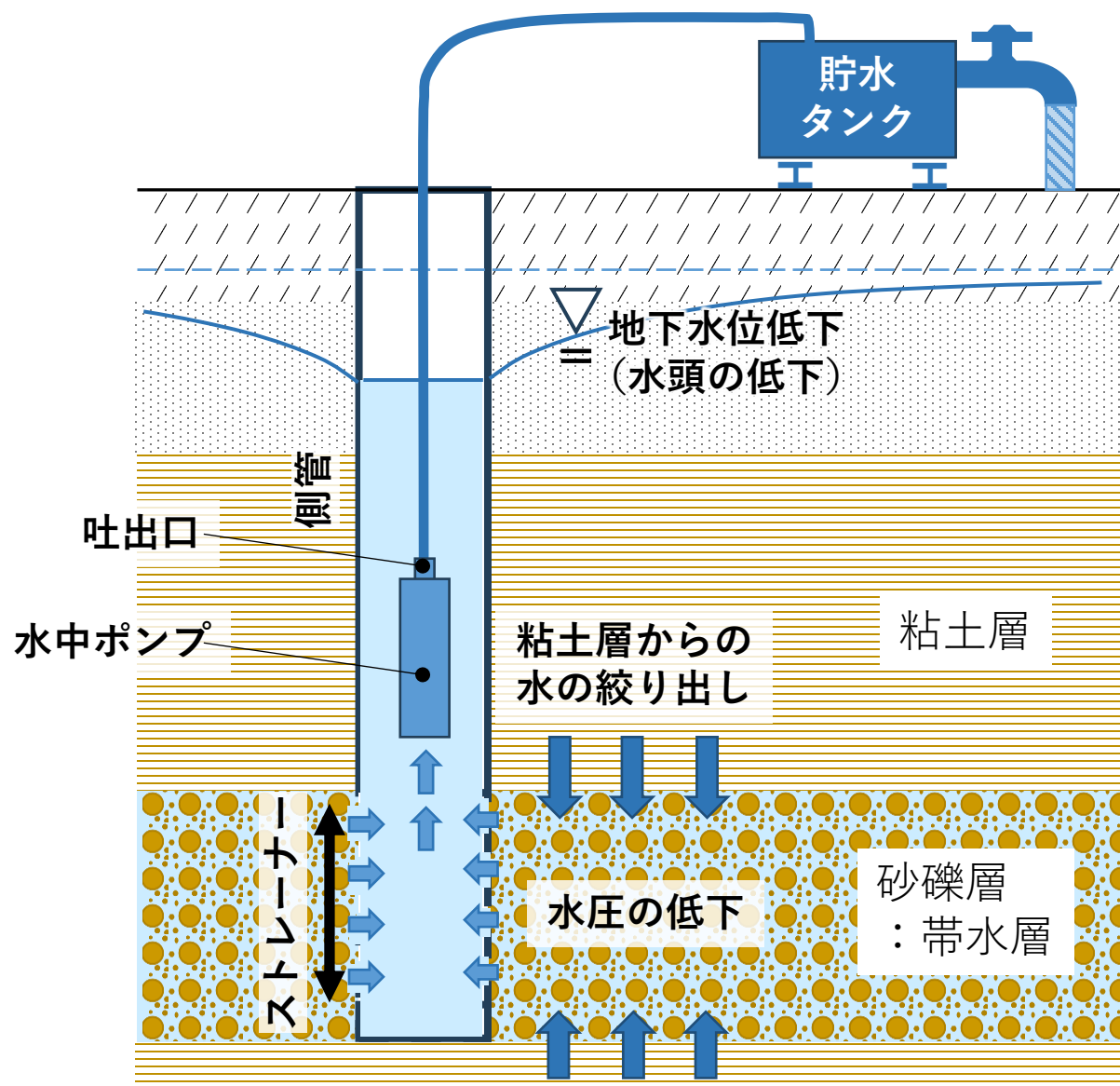
背景 1 地下水と地盤沈下問題

地盤沈下のメカニズム



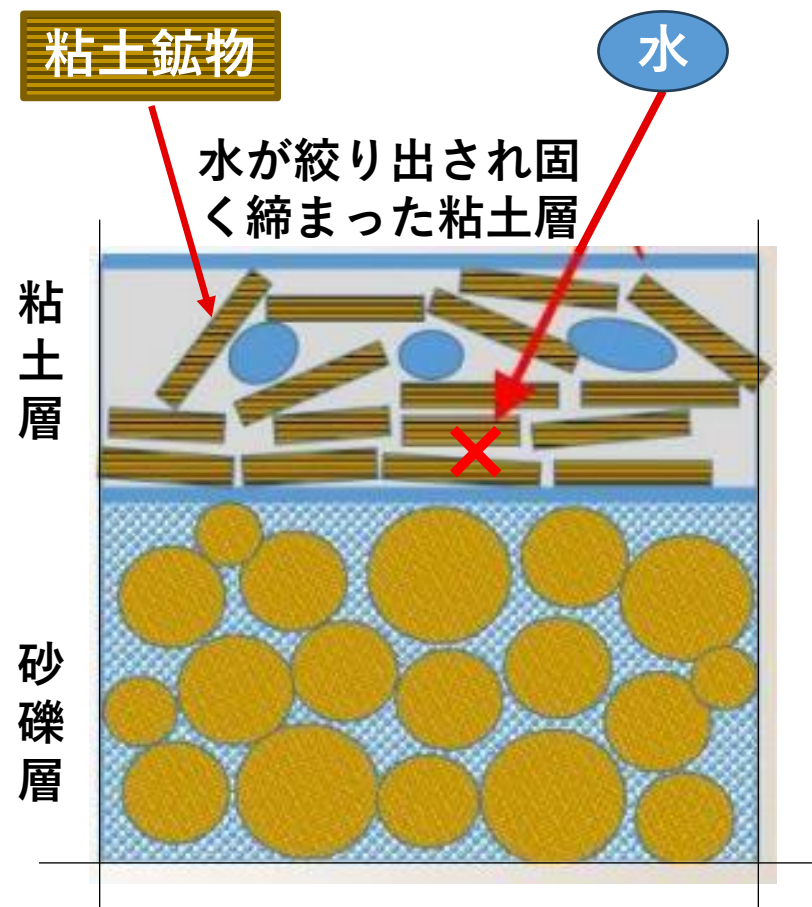
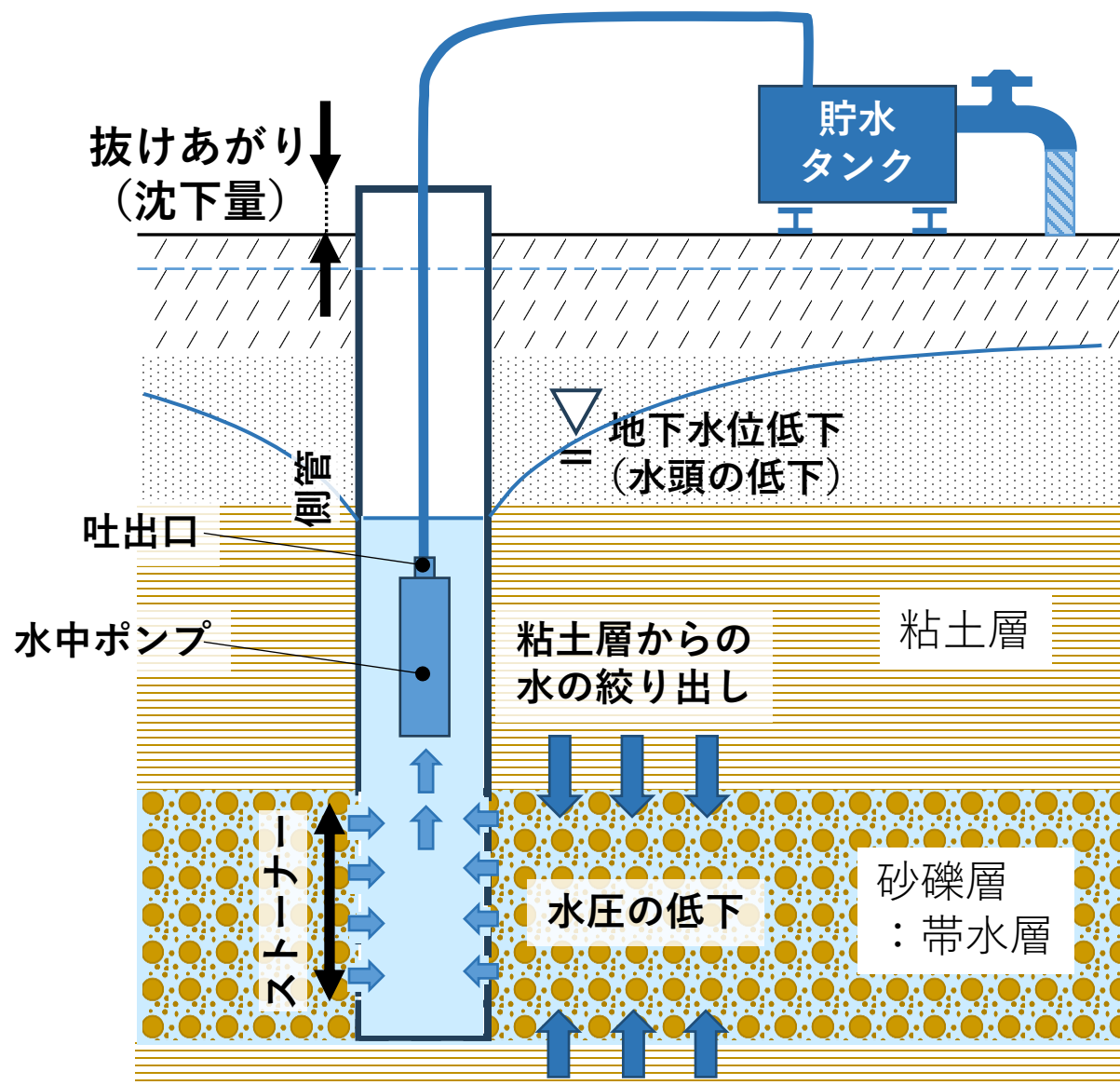
背景 1

地盤沈下のメカニズム



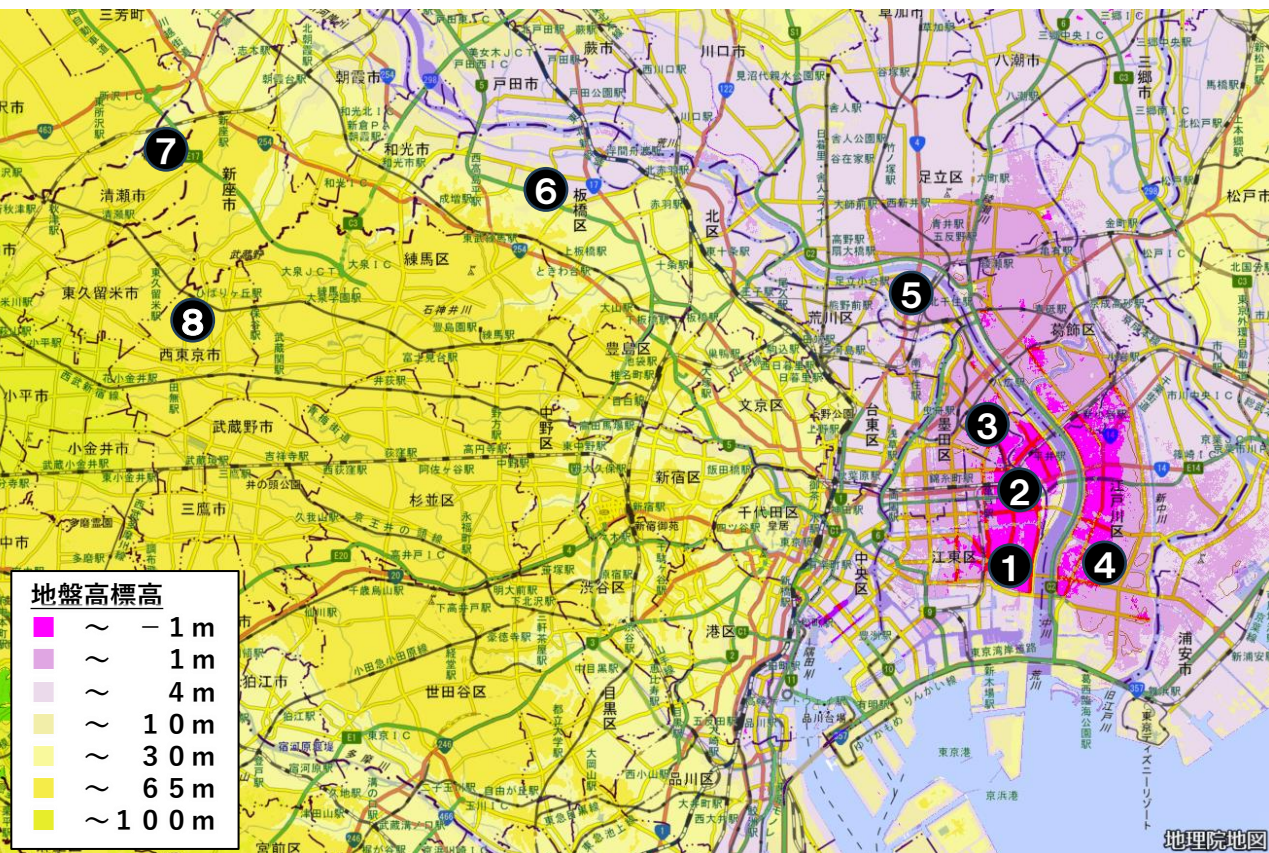
背景 1

地盤沈下のメカニズム



背景 1

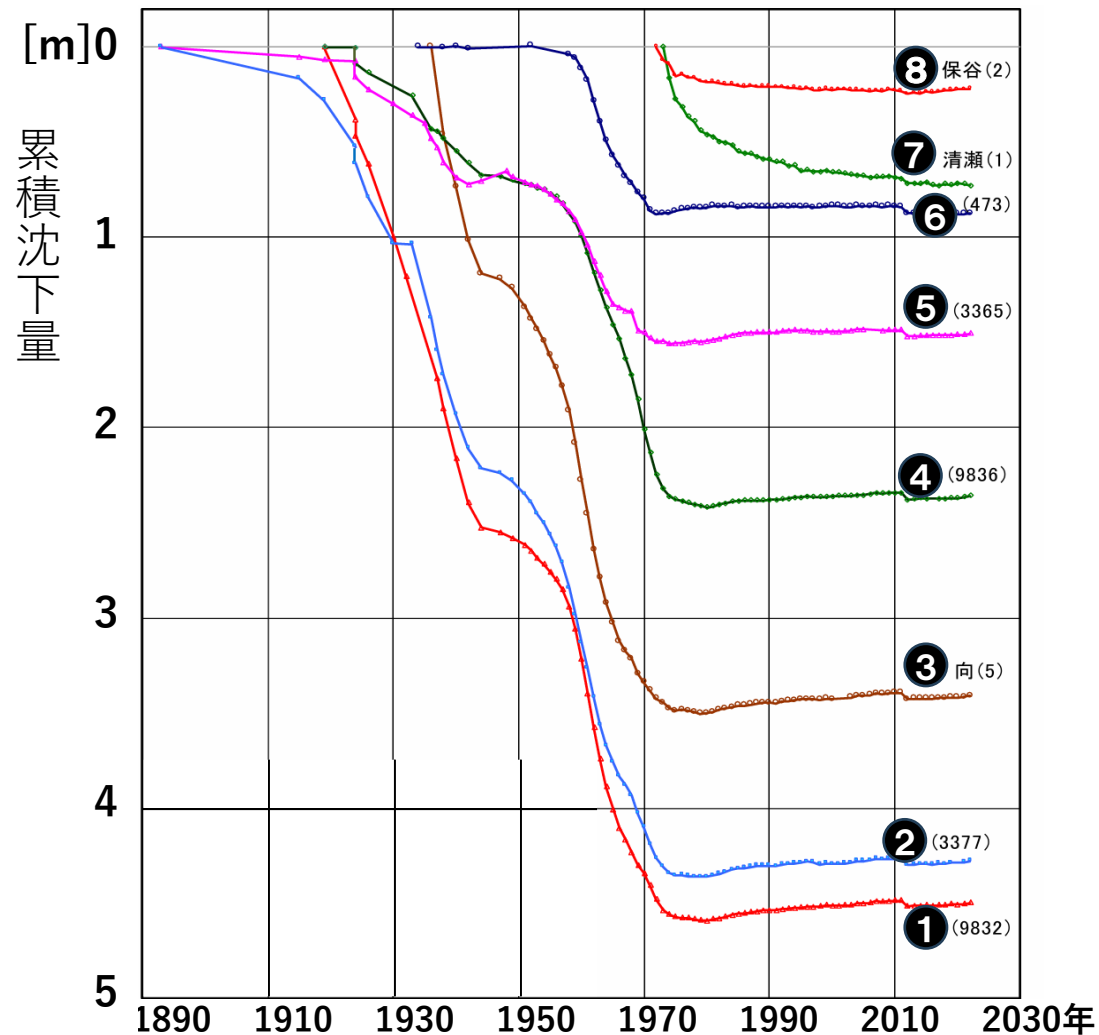
地盤沈下の経年変化



主要水準基標の所在地

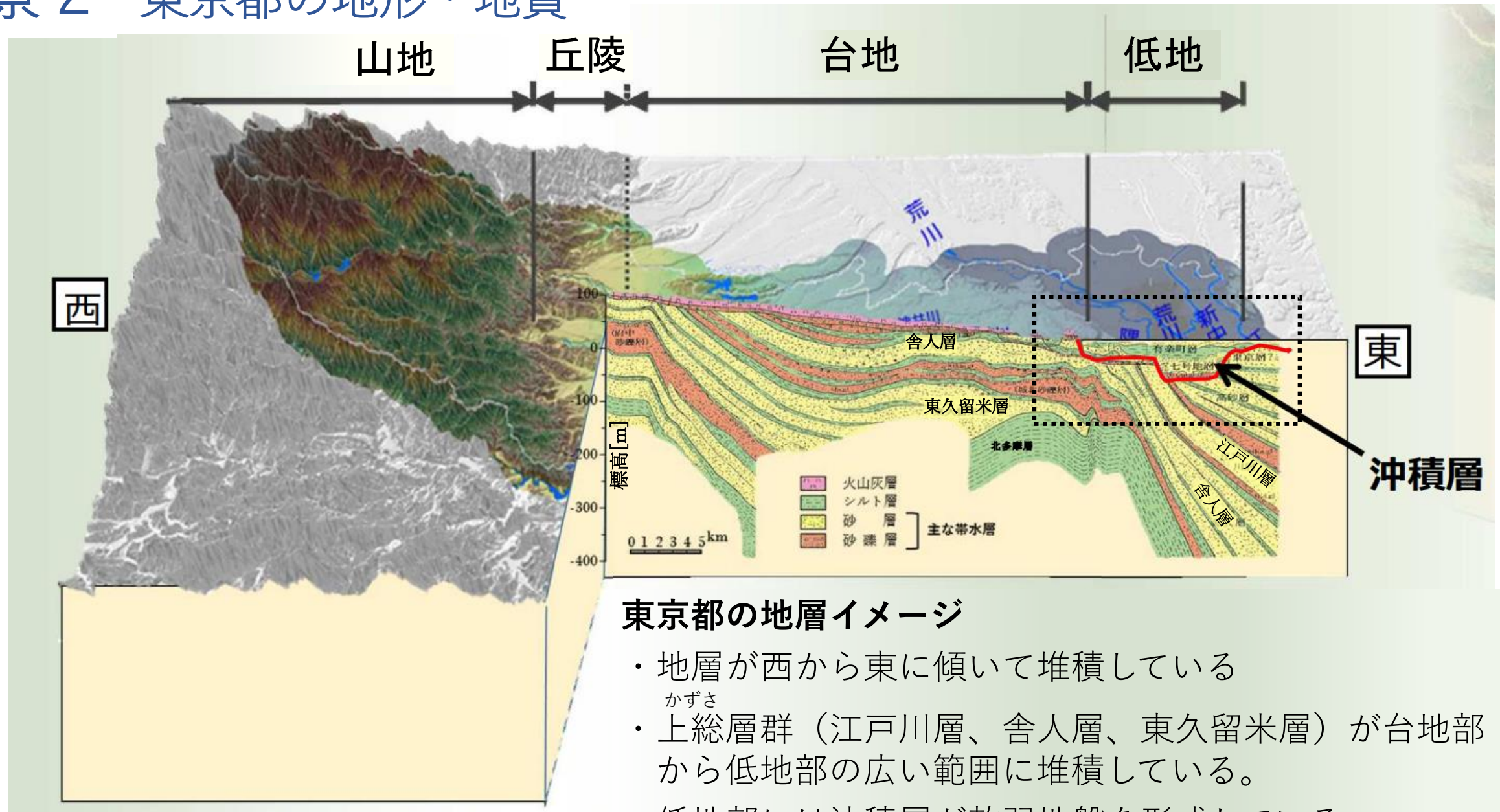
- 一旦沈下した地盤は戻らない。今後は？
- 安易な過剰揚水で更なる地盤沈下は避けなければいけない
- 保全と利用の両立が求められている

主要水準基標の累積沈下量



「令和4年地盤沈下調査報告書」(東京都土木技術支援・人材育成センター)より一部改変

背景 2 東京都の地形・地質



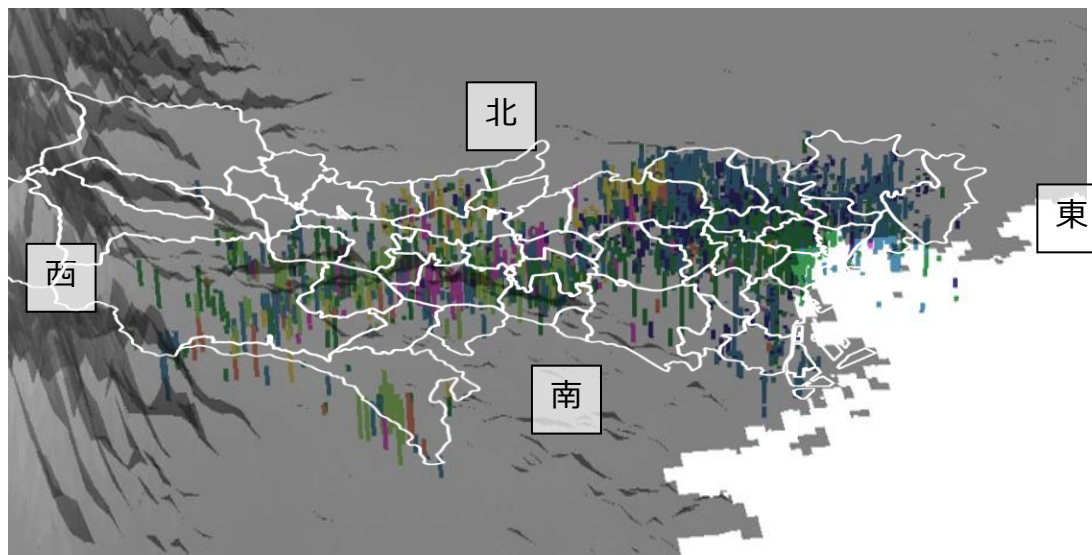
東京都の地層イメージ

- ・ 地層が西から東に傾いて堆積している
- ・ 上総層群（江戸川層、舎人層、東久留米層）が台地部から低地部の広い範囲に堆積している。
- ・ 低地部には沖積層が軟弱地盤を形成している

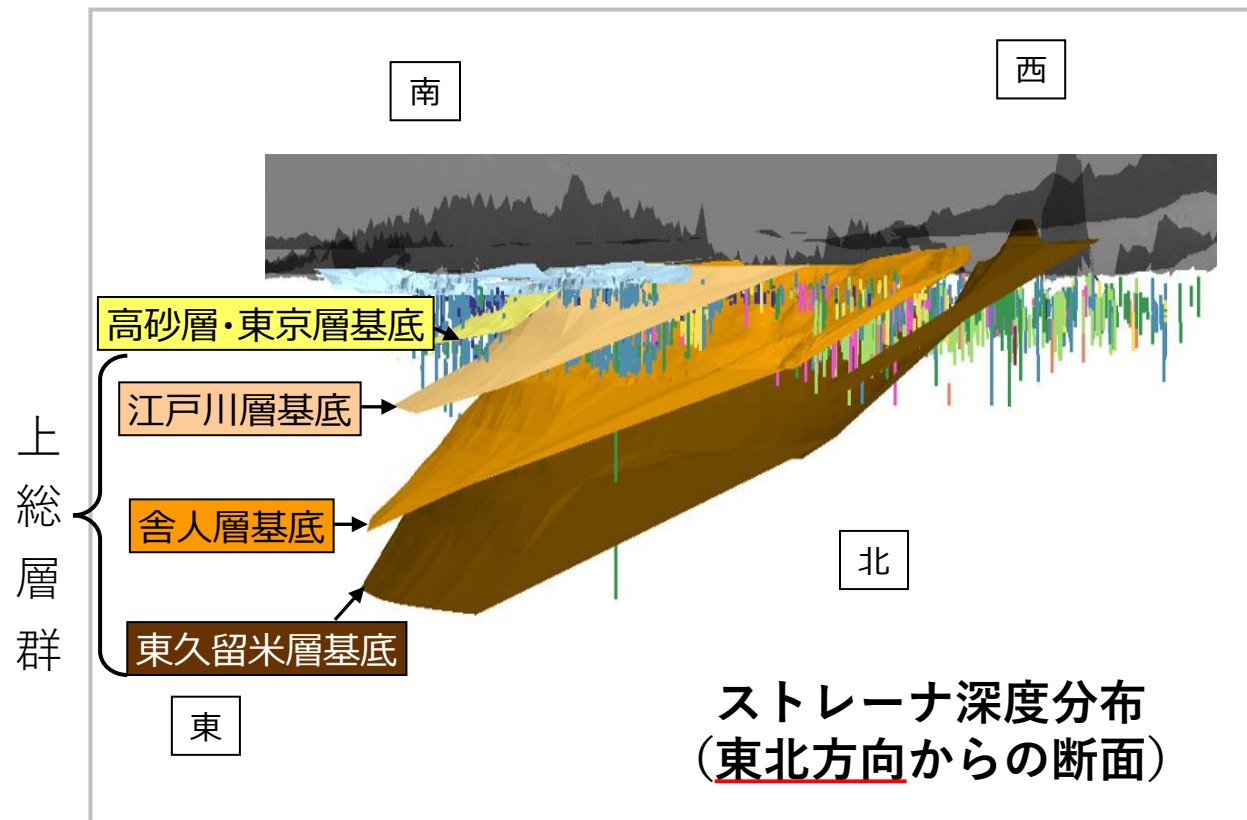
「東京の地下水・地盤環境レポート」より抜粋 一部加工

背景 2

揚水井の分布



ストレーナ深度分布
(南西方向からの俯瞰図)



ストレーナ深度分布
(東北方向からの断面)

井戸用途区分：

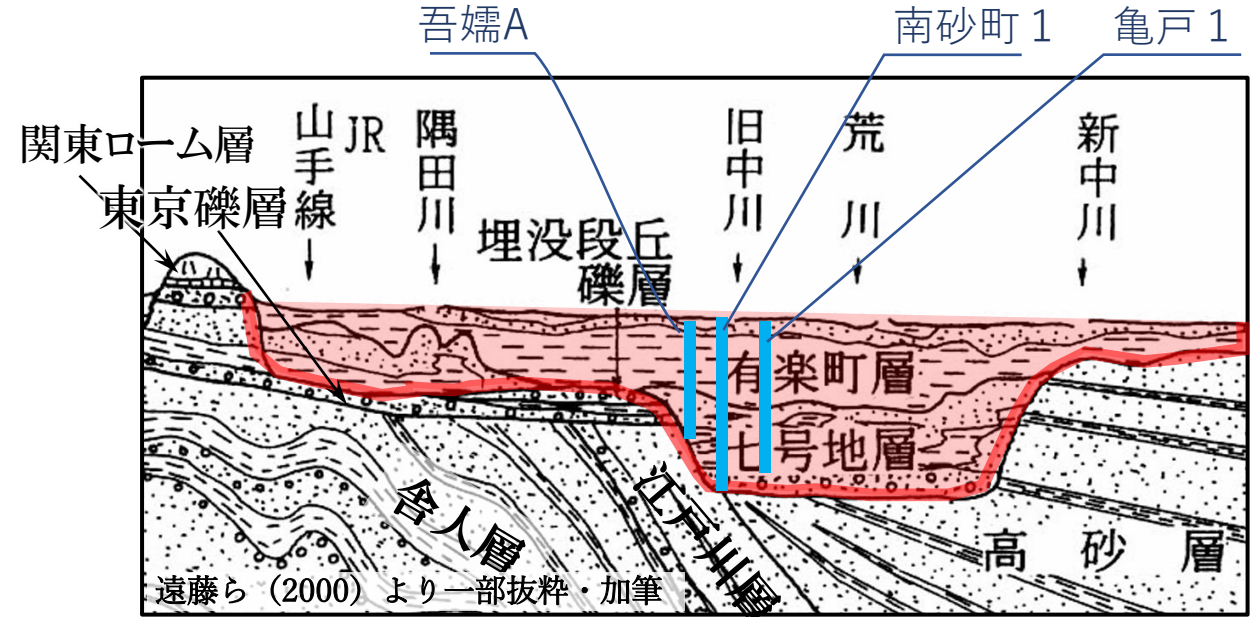
上水道 (■・■)、工業用水 (■・■)、水洗便所用 (■)、公衆浴場用 (■)、農業用水 (■)、雑用水 (■・■)、飲用水 (■)、その他 (■)

※田部ら (2019)、東京都環境科学研究所年報 (2019) p.58より一部加筆

背景 2

沖積層の沈下量

- 沖積層は約1.5万年前から堆積した新しい地層
- 一般に新しい地層ほど地盤が柔らかく収縮・変形が起こりやすい
- 地盤沈下は主に沖積層で起こっているが、より深い地層(上総層群等)でも起きている



地層別の沈下の割合

観測井名	亀戸第1	南砂町第1	吾孺A
沖積層	61%	62%	62%
〃以深	39%	38%	38%

東京都土木技術支援・人材育成センターの観測データより

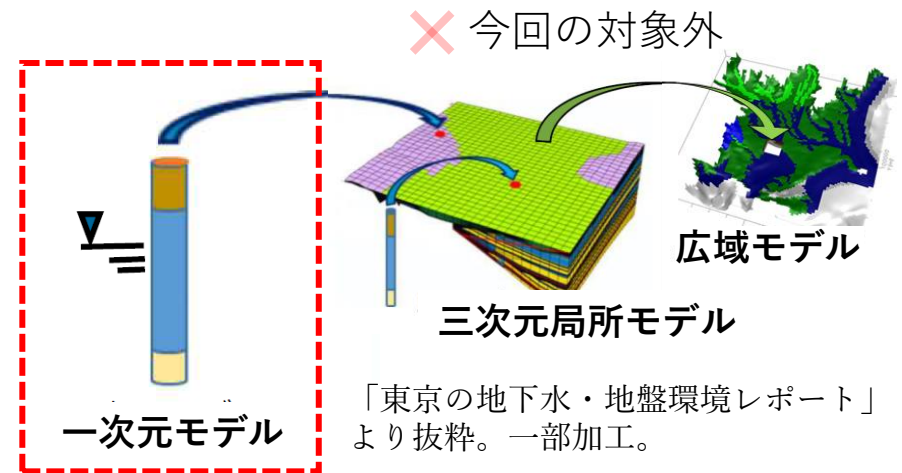
本研究の目的

- 近年、地下水の保全と利用の両立が課題となっている
 - 都内に広く分布する上総層群の帯水層が、多くの揚水井の水源となっている
 - 沖積層のみならず上総層群の沈下リスクを評価する必要がある
- ➔ 東京都の台地部及び低地部の沖積層から上総層群に至る地層について、鉛直一次元モデルによる解析を行い、沈下特性を検討する

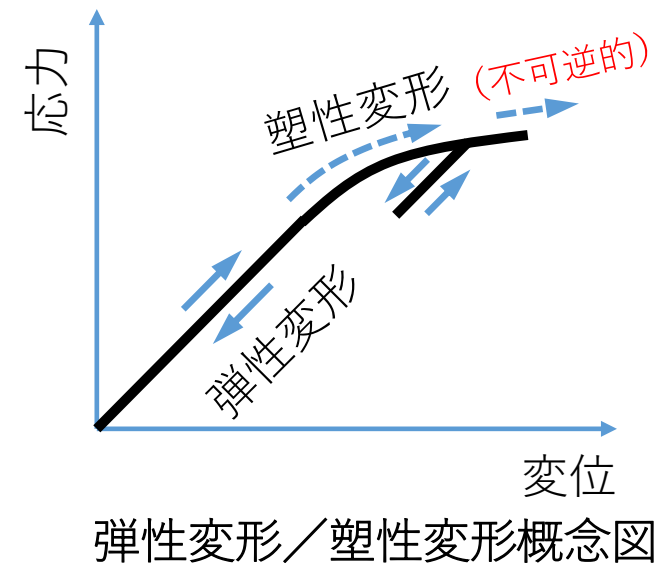
- ①各地点におけるモデルの作成、地盤沈下量の再現
- ②将来における揚水による地盤沈下の可能性の評価
- ③地域別の沈下特性の評価

モデルの作成 ～ 本モデルの特色

- 鉛直一次元モデルにより垂直方向の沈下量を解析する
- 地下水位を既知として地盤沈下量を再現するモデル（揚水量 \times 地下水位 \rightarrow 沈下量）
- 地盤の弾性変形、塑性変形を一体的に解析（線形弾性－修正Cam-Clayモデル）
- 物性探索により地盤の物性値（土質定数）が得られない地点についても解析
- 地層ごとの解析ではなく、深さ 1 m ごとに地盤の変位や水圧の変動を解析



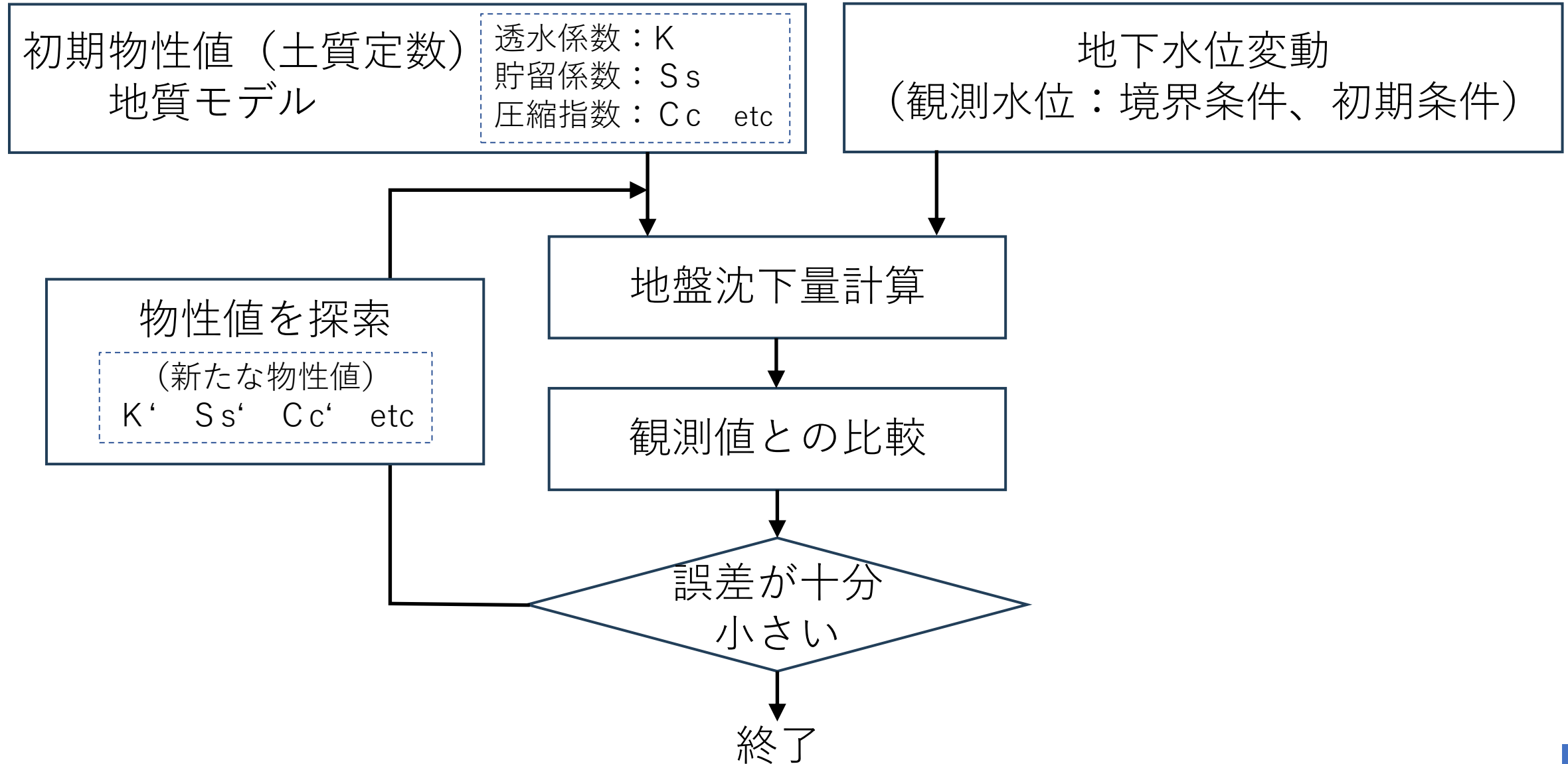
東京大学との共同研究によりモデルを作成



弾性変形／塑性変形概念図

モデルの作成

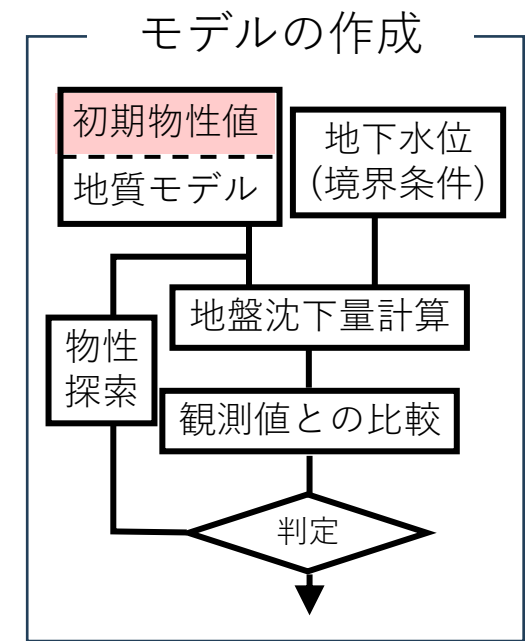
モデルのフロー



モデルの作成

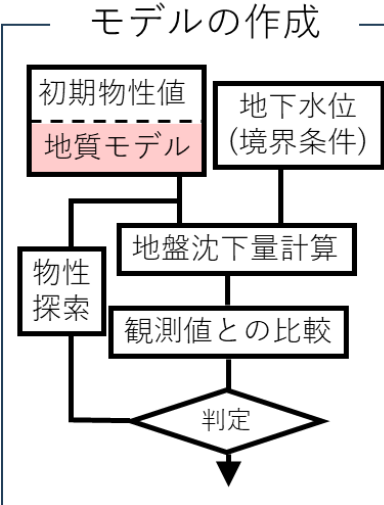
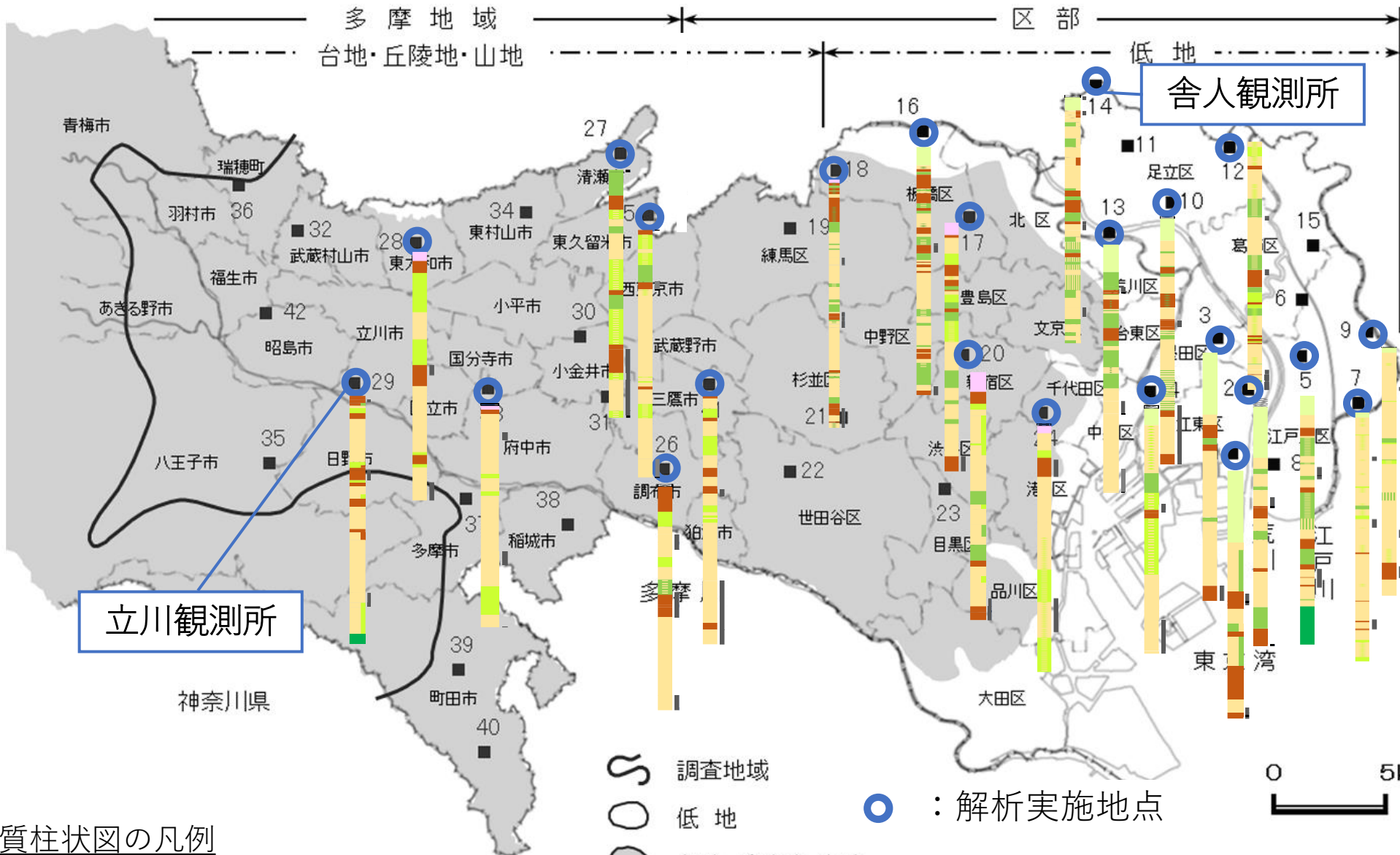
初期物性値（土質定数）

土質		透水係数 [m/day]	間隙比 [-]	比貯留係数 [1/m]	圧縮指数 [-]
深層	粘土	5e-5	0.8	2e-5	1.2(0.5)
	砂	1e-3	0.7	1e-5	0.01
	礫（深層）	0.1	0.5	1e-5	0
浅層	ローム	10	3	1.5e-3(2~5e-5)	1
	軟弱シルト	2e-4	1.8	1e-3(2~5e-5)	0.7(0.5)
	粘土	1e-4	1.4	5e-4(2e-5)	1.2(0.5~)
	砂	1e-1	0.7	2e-4(1e-5)	0.01
	礫	10	1	5e-5(1e-5)	0



モデルの作成

地質モデル (解析実施地点の地質柱状図)

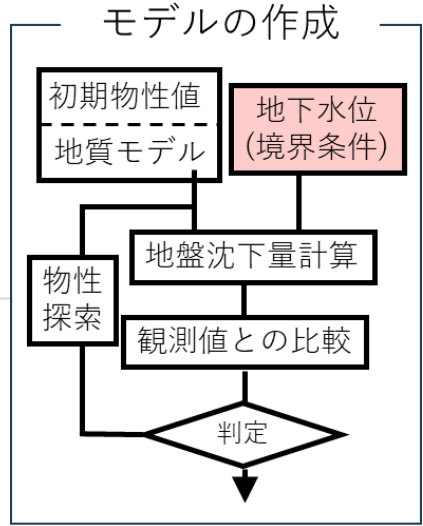
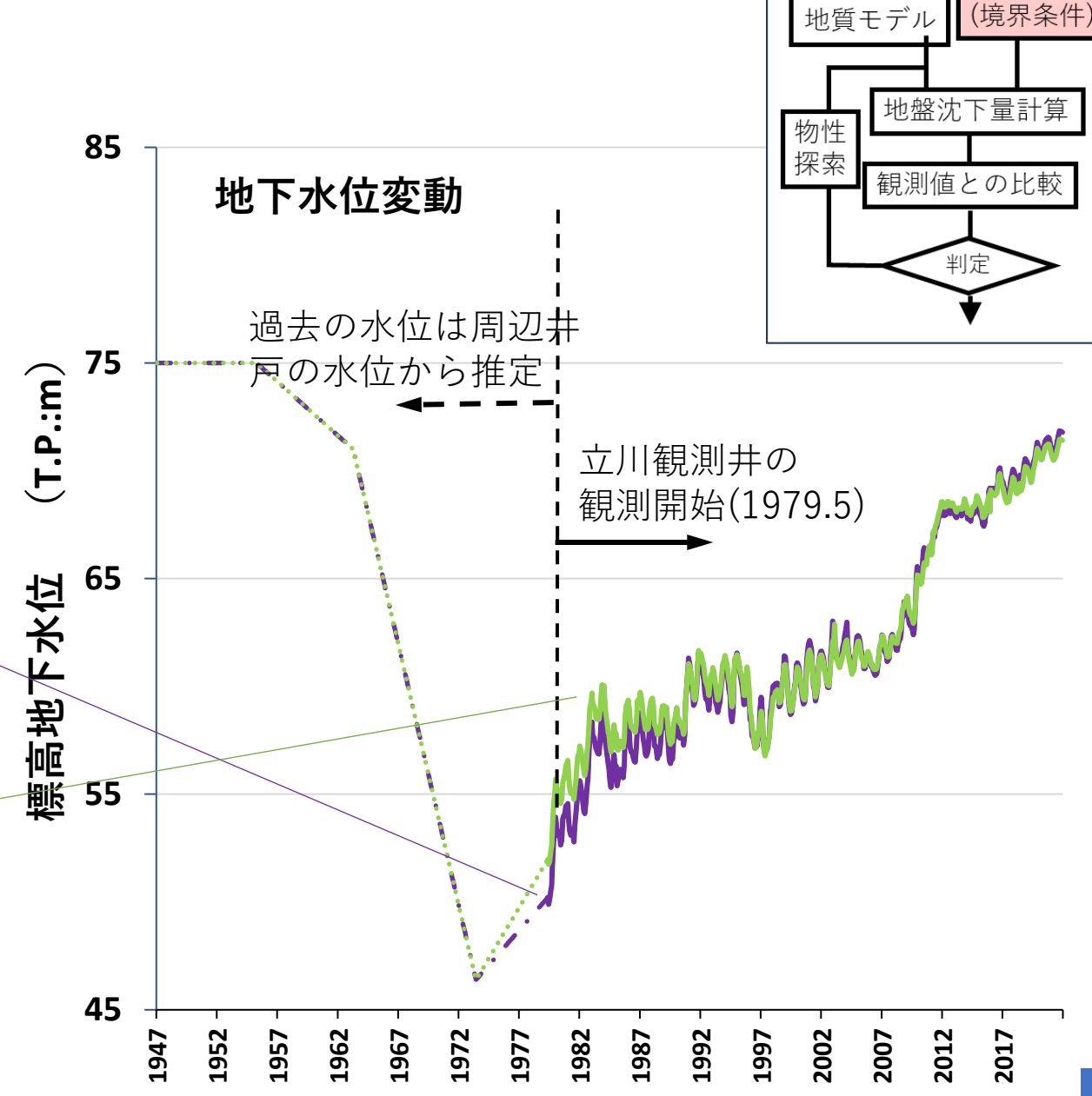
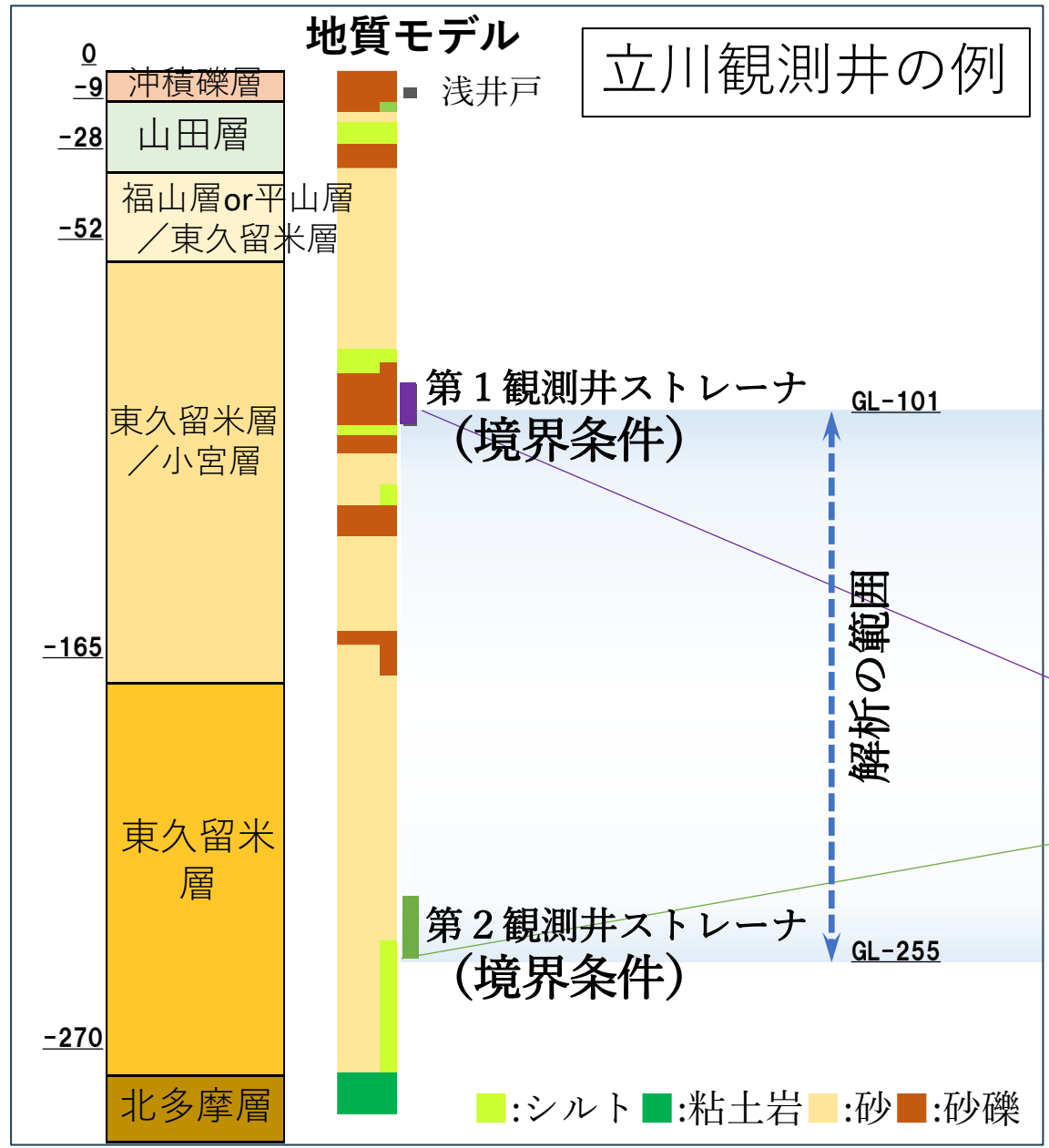


地質柱状図の凡例

: ローム
 : シルト
 : 粘土
 : 砂
 : 砂礫

- 調査地域
- 低地
- 台地・丘陵地・山地
- 東京都土木技術支援・人材育成センター地盤沈下観測所 (番号は地点番号を表す)
- : 解析実施地点

モデルの作成 地下水位変動の入力（境界条件の設定）



モデルの作成 沈下量計算 (解析理論)

◆線形弾性 + 修正Cam-Clayモデル

$$\Delta e^e = -\frac{S_s}{\rho g} (\sigma' - \sigma'_0)(1 + e_0)$$

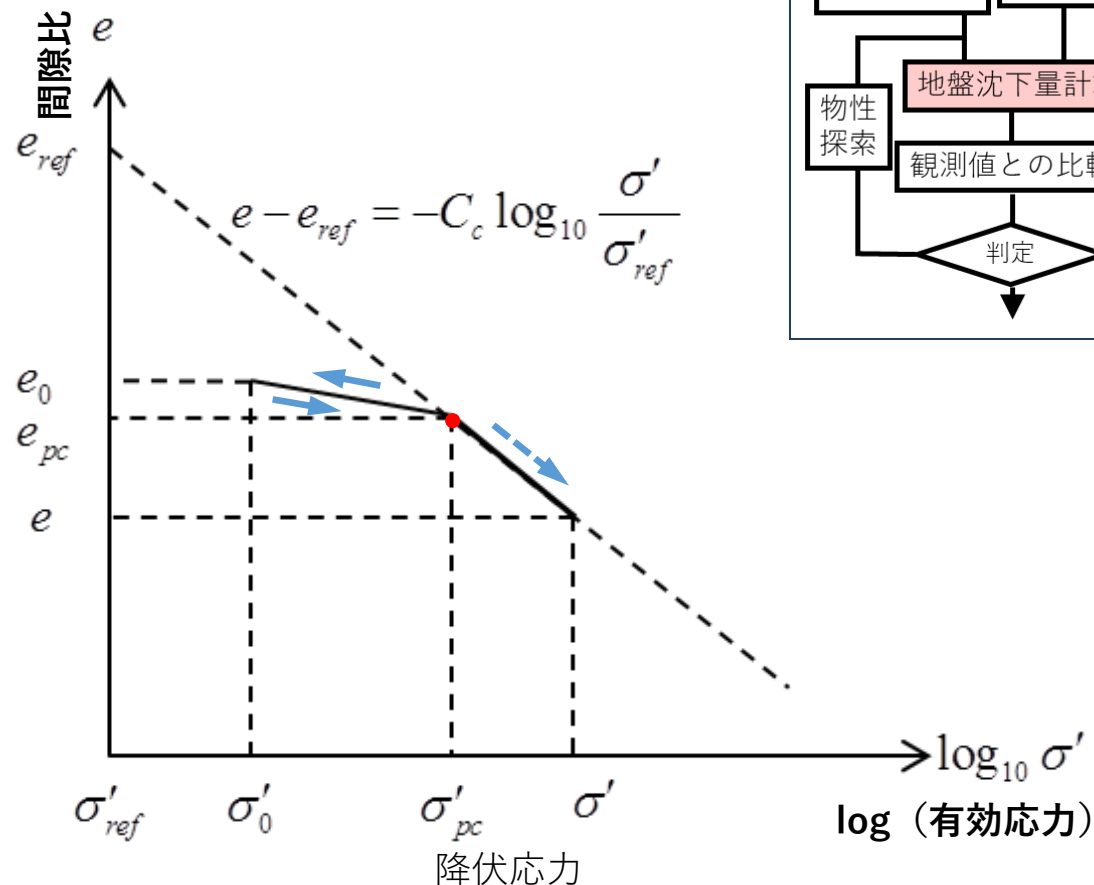
$$\Delta e^p = \begin{cases} -C_c \log_{10} \frac{\sigma'}{\sigma'_{pc}} + \frac{S_s}{\rho g} (\sigma' - \sigma'_{pc})(1 + e_0) & \sigma' \geq \sigma'_{pc} \\ 0 & \sigma' < \sigma'_{pc} \end{cases}$$

◆Darcyの法則

$$q = -K \left(\frac{1}{g} \frac{\partial p}{\partial z} + \rho \right)$$

◆地下水の質量保存

$$\frac{1}{1 + e_0} \frac{\partial e}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial z} + Q = 0$$



S_s :比貯留係数[1/m]

C_c :圧縮指数[-]

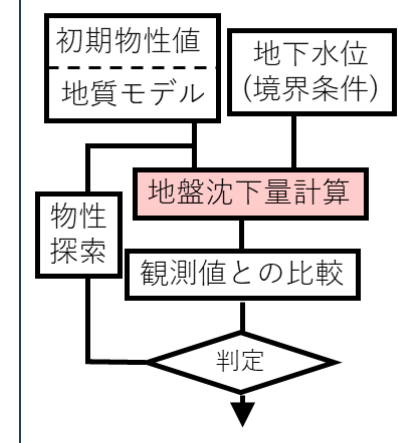
ρ :水の密度[kg/m³]

g :重力加速度[m/s²]

K :透水係数[m/s]

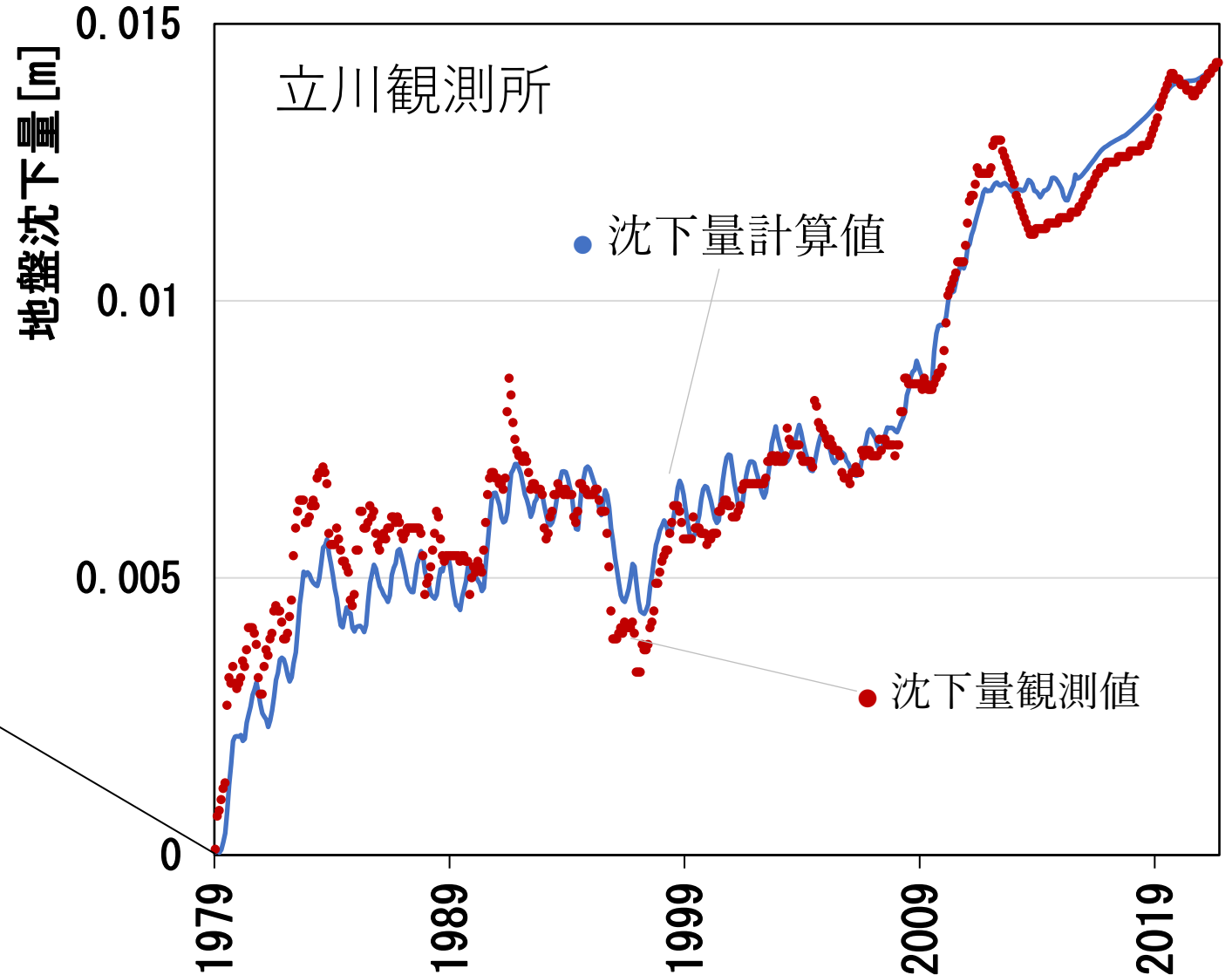
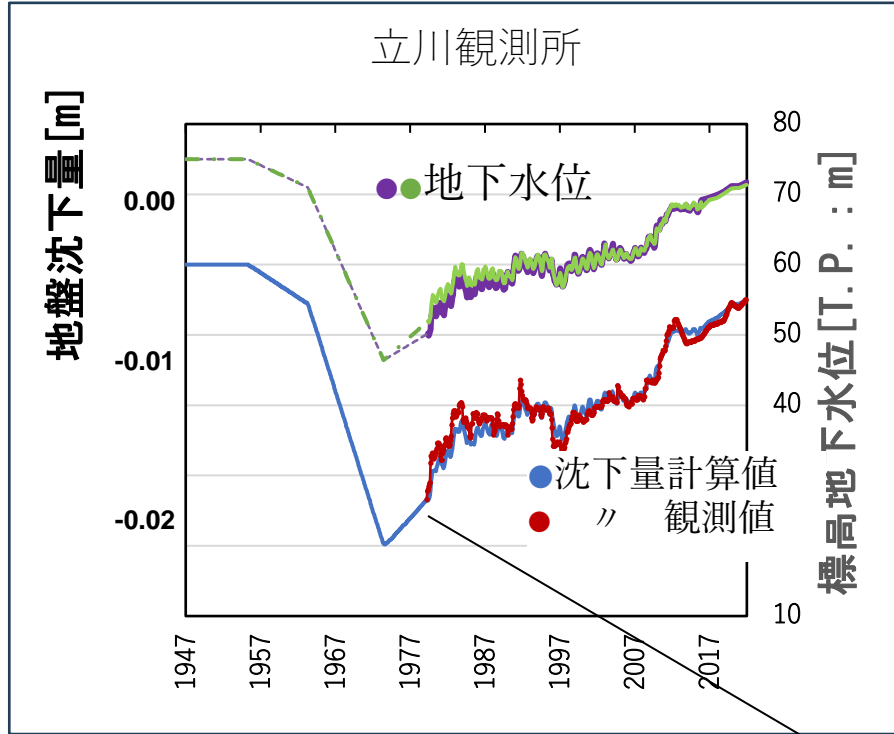
Q :生産・消滅項[1/s]

モデルの作成



結果

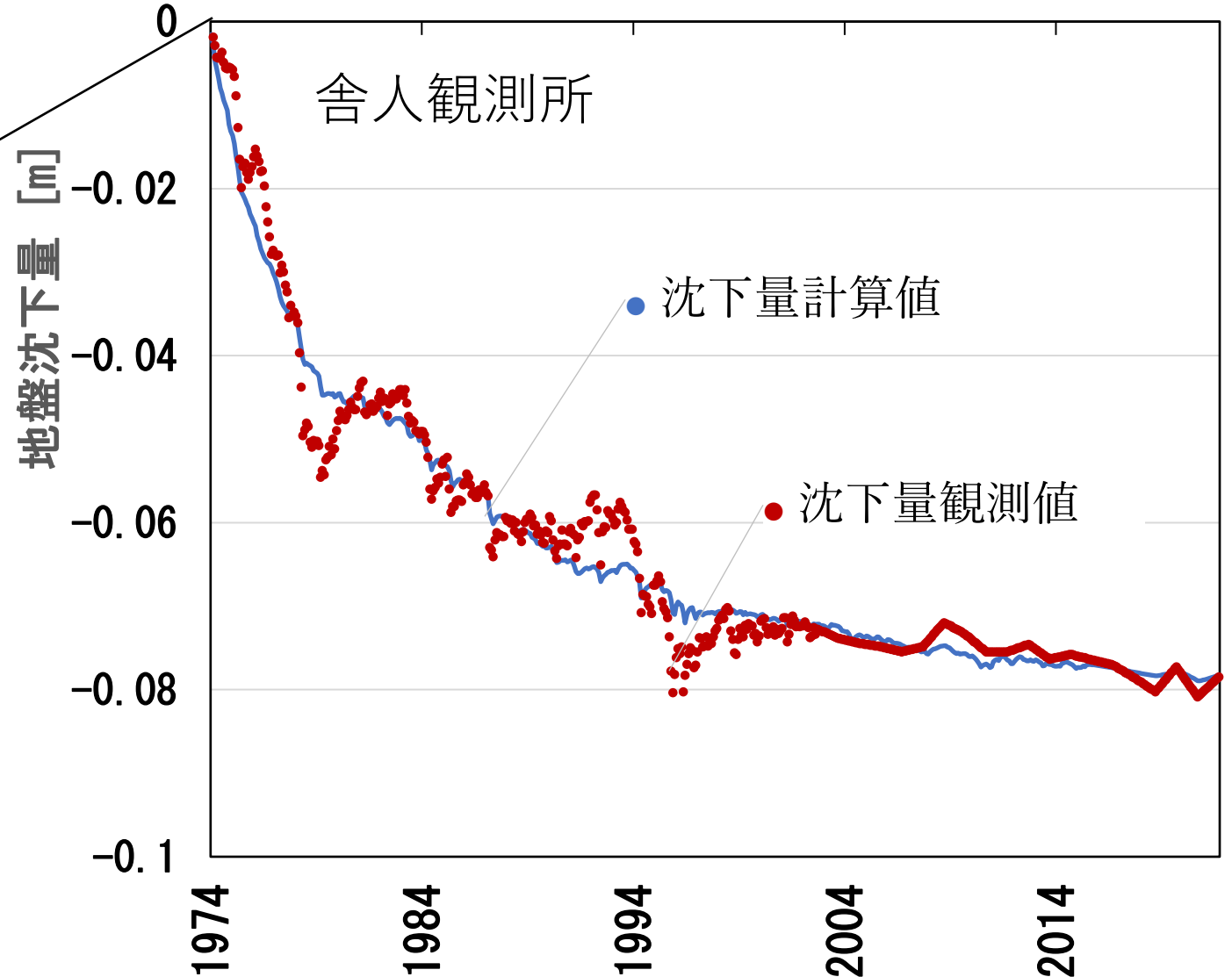
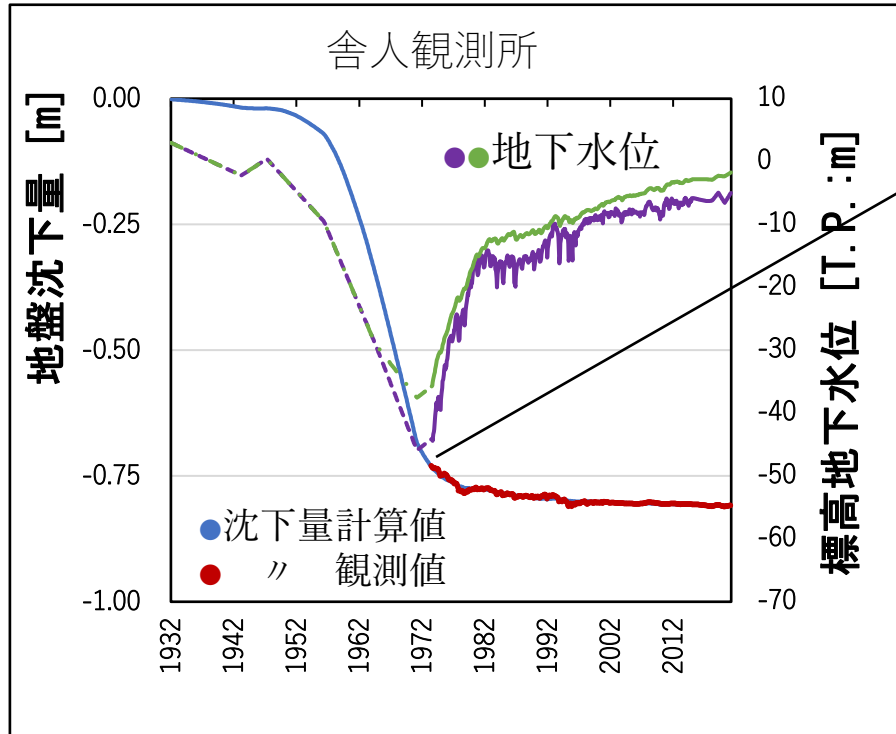
沈下量の再現 (台地部)



- ・ 地下水位の下降・上昇と地盤の沈下・膨張が対応
- ・ 実測値と計算値もよく一致した

結果

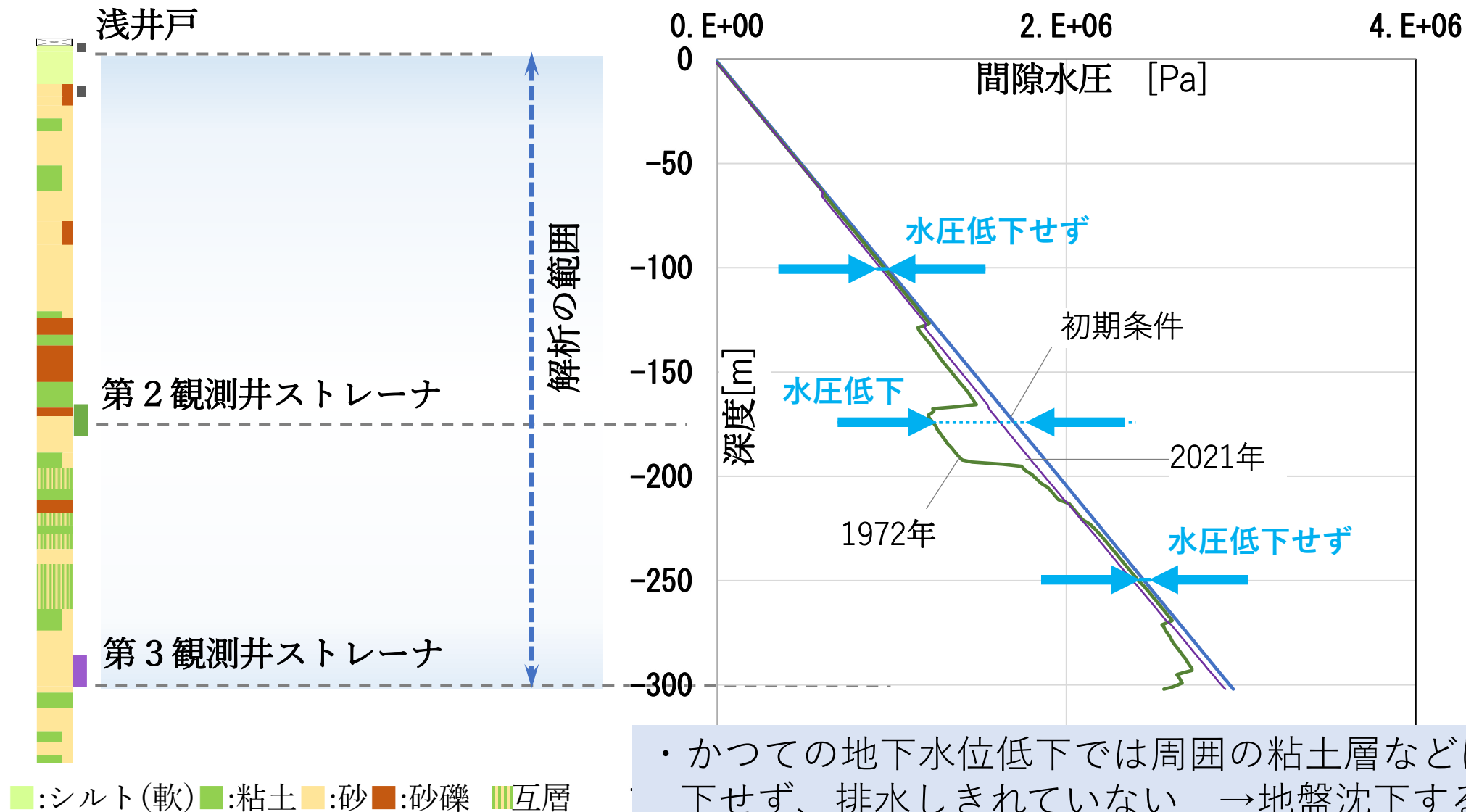
沈下量の再現（低地部）



- ・ 地下水位が上昇しても地盤は回復しない
- ・ 実測値と計算値もよく一致した

結果 揚水による地盤沈下の可能性

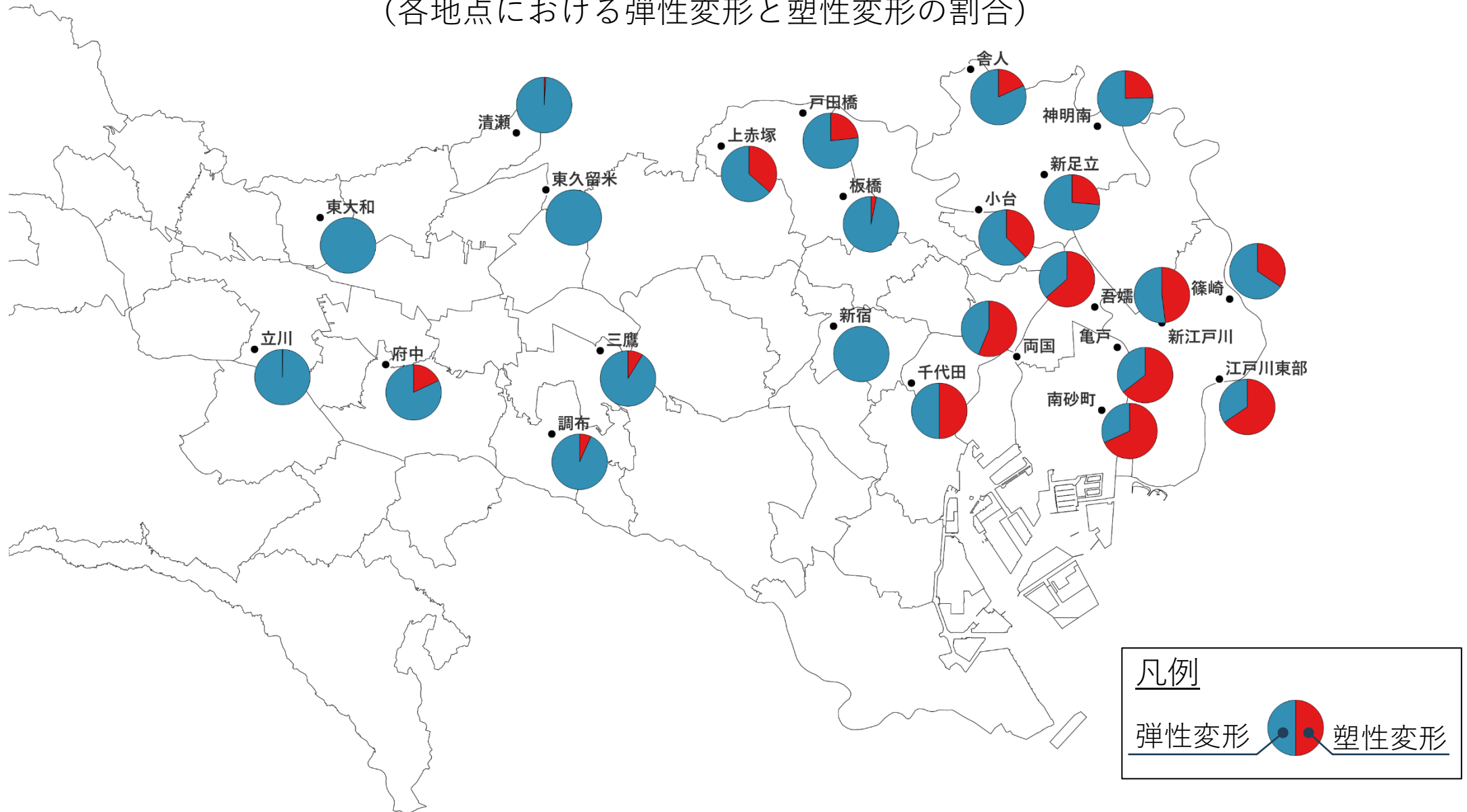
舎人観測所における間隙水圧（計算値）の鉛直分布



・かつての地下水位低下では周囲の粘土層などは水圧低下せず、排水しきれていない →地盤沈下する余地

結果

地域別の沈下特性の評価 (各地点における弾性変形と塑性変形の割合)



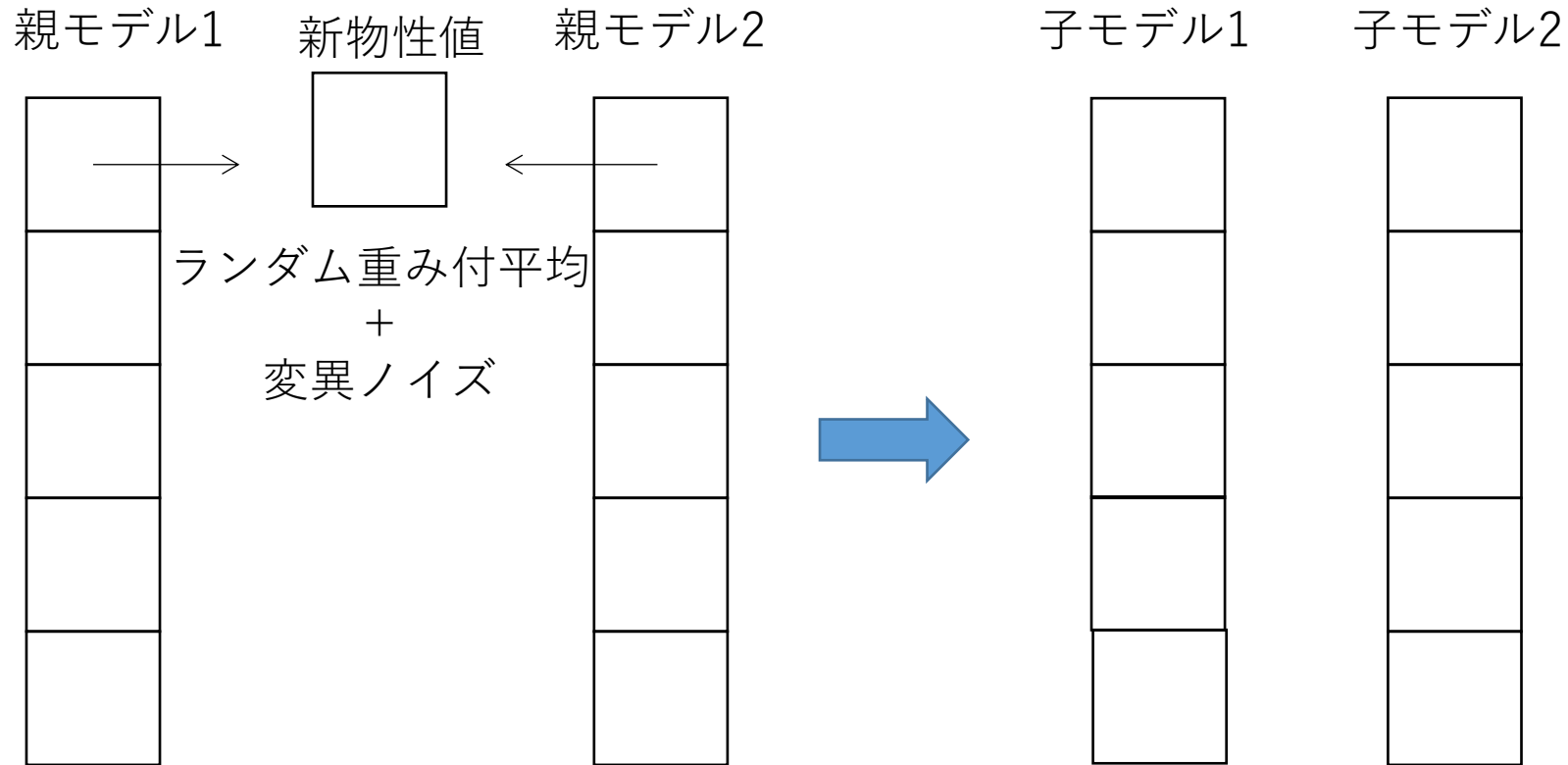
まとめ

- 線形弾性－修正Cam-Clayモデルによる鉛直一次元モデルは、東京都の台地部及び低地部で良好な再現性が得られた
- 間隙水圧の解析から、粘土層中の間隙水は排水しきれておらず、地下水水位が再び低下した場合に塑性変形が再発する余地があることが示唆された。
- 解析した23地点の結果を比較したところ、西部の台地部では弾性変形の割合が多く、東部の低地部は塑性変形の割合が多い結果となった（既存の知見と一致）

今後の展望

- 解析範囲を数km四方に広げた三次元局所モデルの構築
- 揚水量からの地下水水位低下、地盤沈下の予測シミュレーション

遺伝的アルゴリズムによる物性探索



カップリングの選択
観測との残差二乗和が小さいモデルほど子孫を残せる確率が高い(残差二乗和⁻¹に比例)

異常な子モデルの防止
変異ノイズで物性値が、あらかじめ決められた範囲を逸脱しないよう変動範囲を設定

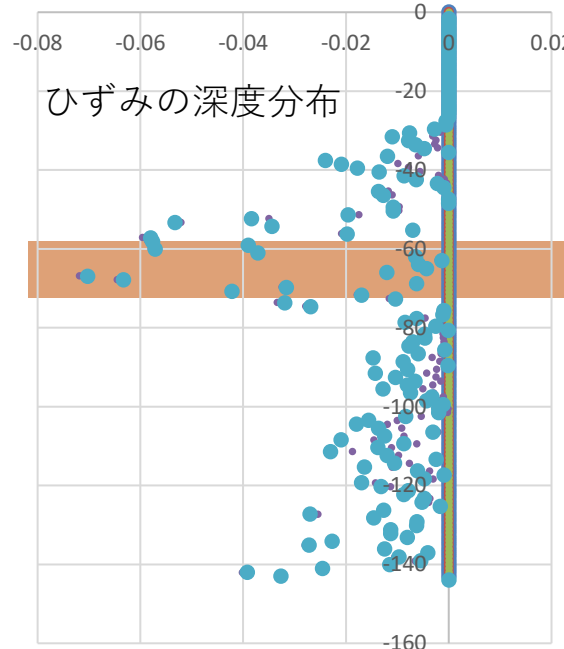
- それぞれの物性値による地盤沈下量を計算
- 観測との差が小さいモデルを次世代の親とする

礫層で塑性変形させる／させないの比較（新江戸川観測井）

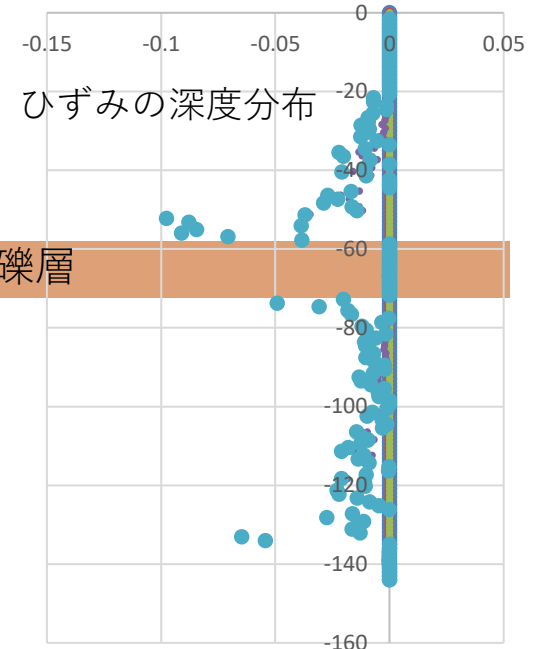
課題の説明

- 観測されていない帯水層の水位変動を無視
- どの深度で塑性変形が起きているか検証できない
- 区部台地部での微細な変動が再現できない

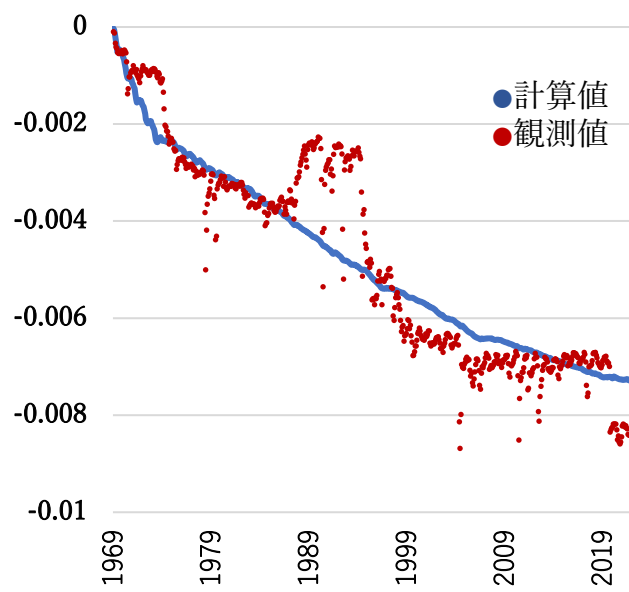
塑性変形させる場合



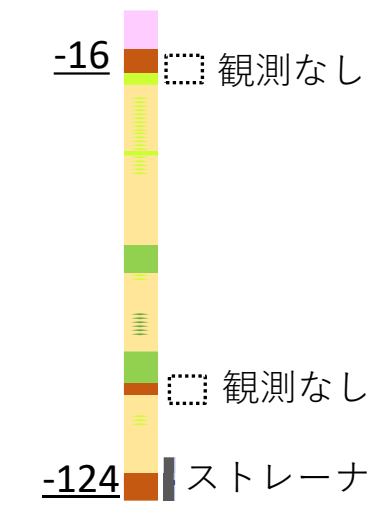
塑性変形させない場合



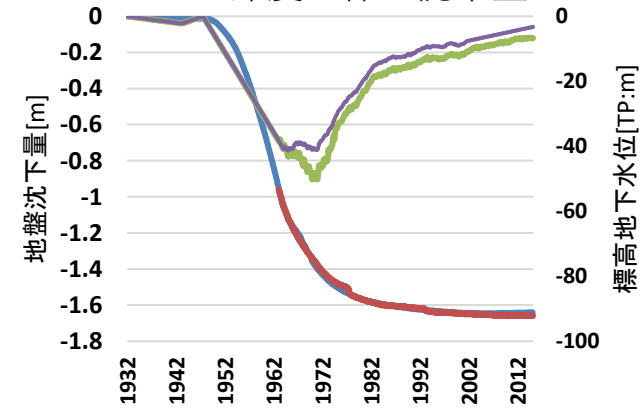
新宿観測井の地盤沈下量



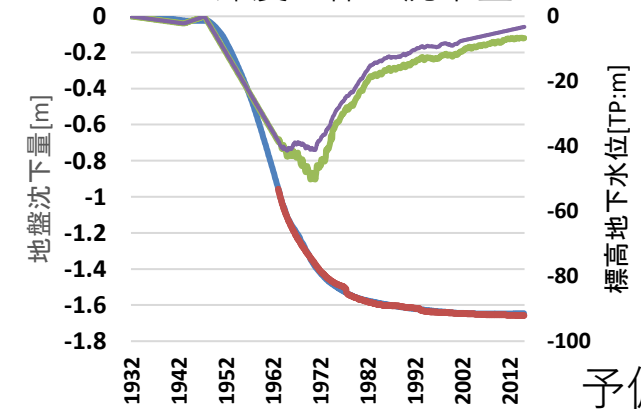
新宿観測井の構造



深度全体の沈下量



深度全体の沈下量



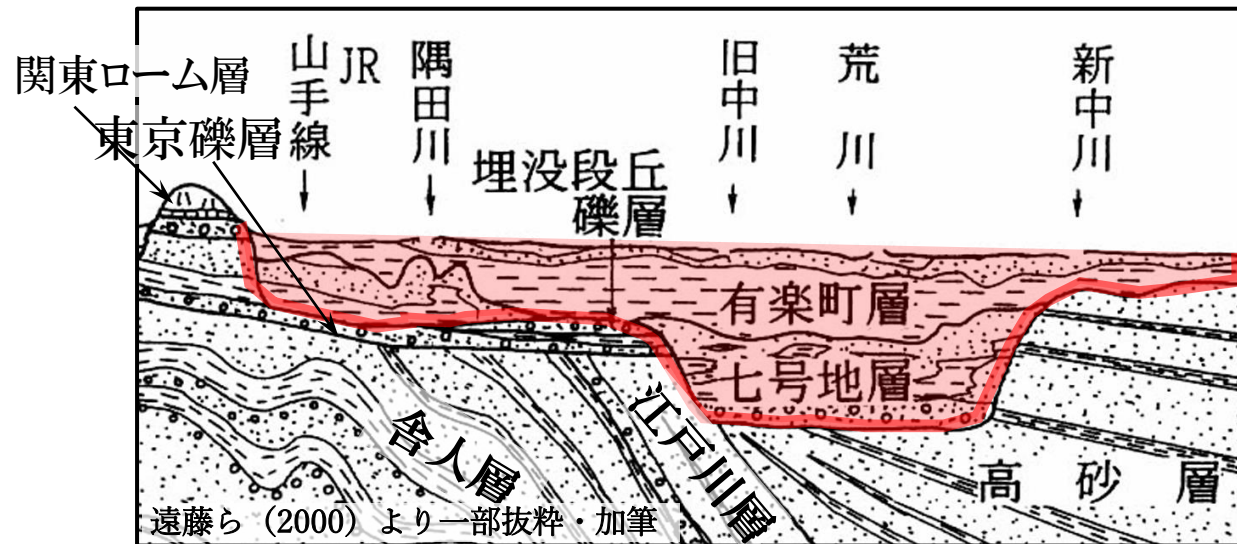
礫層で塑性変形させる場合／させない場合で深度全体の沈下量に変化なかった

予備

東京都区部の地質層序

地質時代	地質年代*	地層区分	山の手台地		下町低地	
			南西地域 (世田谷区付近)	台地域一帯 (除南西地域)	低地一帯	
第四紀	完新世	沖積層	黑色腐植土層 (善福寺川・神田川・野川等、 台地を開折している中小河川 沿いに分布)		有楽町層	
			1			
	洪積世	1.6	新期段丘堆積層	関東ローム層		埋没ローム層
						七号地層
				段丘礫層		埋没段丘礫層
				東京層群		高砂層
				世田谷層		東京層
						江戸川層
						舎人層
						東久留米層
紀世	73	上総層群	北多摩層			

* 単位：万年前



舎人観測井の地質モデルと境界条件

