資料２

地下水の実態把握の取組について

各調査研究の実施状況等

	調査研究	実施状況等（R8年10月時点）
専門性の高い調査研究	**1 地下水流動系の解明** **《筑波大学との共同研究》** ➢ 東京の地下水における涵養ー流動ー流出のプロセスの解明	○ 地下水の広域流動の概況把握 ・令和３年度以前まで 都内広域の土セン観測井、民間井戸、河川、湧水、降水の採水を行い、溶存イオン、酸素安定同位体、六フッ化硫黄（SF6）等の分析を実施 **多摩部と区部低地部の水質の違いや複雑な三次元的流動について解明** ・令和４年度 多摩川中流域における河川と地下水、湧水の交流について調査 **山地から台地へと至る領域の多摩川の河川が水輸送に果たす役割を解明** ・令和５～６年度 **区部**の台地部から低地部のデータが不足している地域を中心として、**台地部と低地部における地下水の関係解明**を目的に、調査及び解析を実施 ・令和７年度 ①都内全域の地下水流動系を明らかにする目的の中で、これまでの調査でデータが不足している地域を中心として、**南西側山地から台地への移行及び低地から北東への地下水流動の解明**を目的に、調査及び解析を実施 ②これまでの研究成果をわかりやすく示すため、令和７年度に「東京地域の地下水流動に関す る三次元可視化」に取り組んだ。
	2 地下水の揚水等の影響予測 **《東京大学との共同研究》** ➢ 地盤沈下や湧水に影響が生じる地下水位とその水位に達する揚水量の予測	**○ 一次元地盤沈下モデルの構築（～令和5年度）** 広域的に地下水が利用されている舎人層を対象に23か所の観測井において一次元地盤沈下モデルを作成し、**地盤変動量の再現を確認** **○ 局所地下水流動･地盤変形連成モデルの構築** ・**低地北部の足立区をケーススタディ**として作成 ・層序の不確実性を考慮するため、遷移確率地球統計学に基づき、候補となる地質モデルを複数構築 ・過年度の揚水量分布に基づく数値シミュレーションを実施し、再現性を確認 **○ 塑性変形確率推定法の検証** ・光学実験系の設計と組み立てを実施

本資料の記載について

■これまでの成果（～Ｒ７）

前回報告書（令和４年度公表）に掲載していること

■これまでの成果（～Ｒ７）

前回報告書（令和４年度公表）以降に明らかになったこと及び取組状況

１　地下水流動系の解明　《筑波大学との共同研究》
～東京の地下水における涵養－流動－流出のプロセスの解明～

■取組の概要

地下水がどこで涵養され（起源：涵養域）、どのくらいの時間をかけ（滞留時間）、どこを流れているか（流動経路）を把握することにより、東京の地下水における涵養－流動－流出のプロセスの解明を目指す。

■実施体制

筑波大学（辻村研究室）と東京都環境科学研究所による共同研究
（2019(令和元)年度開始）

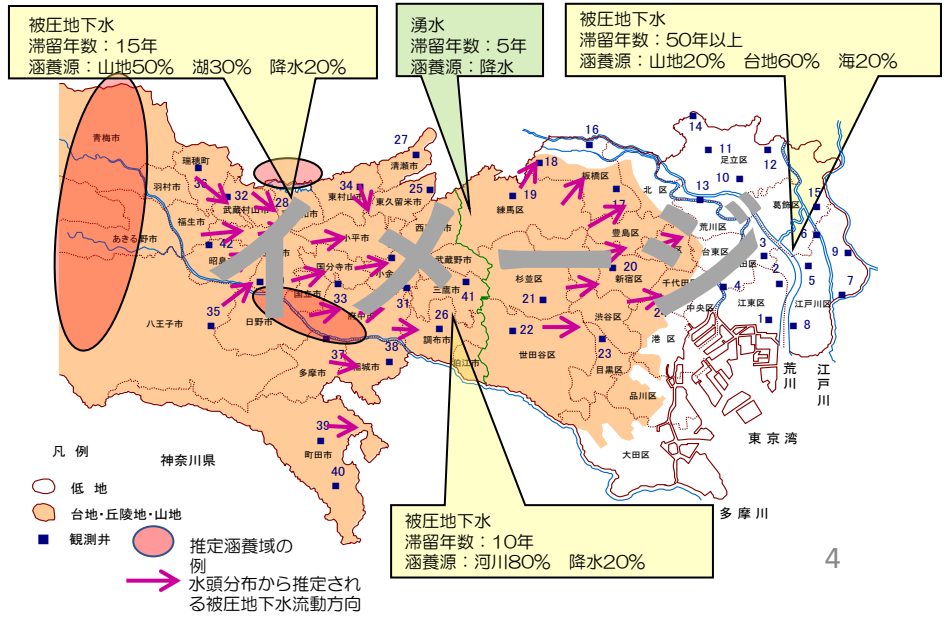
■当研究の特徴

東京の地下水流動系は地形・地質や大規模揚水により複雑で、従来は涵養源の推定や滞留時間の評価が十分に行われていなかった。

本研究では、地下水・地表水・湧水の同位体や溶存ガス等のトレーサー成分を分析し、水理水頭分布のデータと統合・解析して、涵養－流動－流出のプロセスを解明する。

◆地下水の涵養年代が推定できるトレーサー
①トリチウム：1950年代水爆実験の前後を判別
②フロン：1940～90年代　③SF_6：1970年代以降
◆涵養域や流動経路が推定できるトレーサー
④溶存イオン：複数地点における水の溶存イオン組成を比較し、流動過程における水－岩石間のイオン交換や滞留時間、流動経路に関する情報を得る。
⑤酸素・水素安定同位体比：質量数の異なる酸素18、水素2安定同位体比の値により、涵養域に関する情報や、流動過程における水の混合、相変化等に関する情報を得る。

《地下水流動系解明のイメージ》



■展開方法

第１段階　被圧地下水の広域流動の概況把握

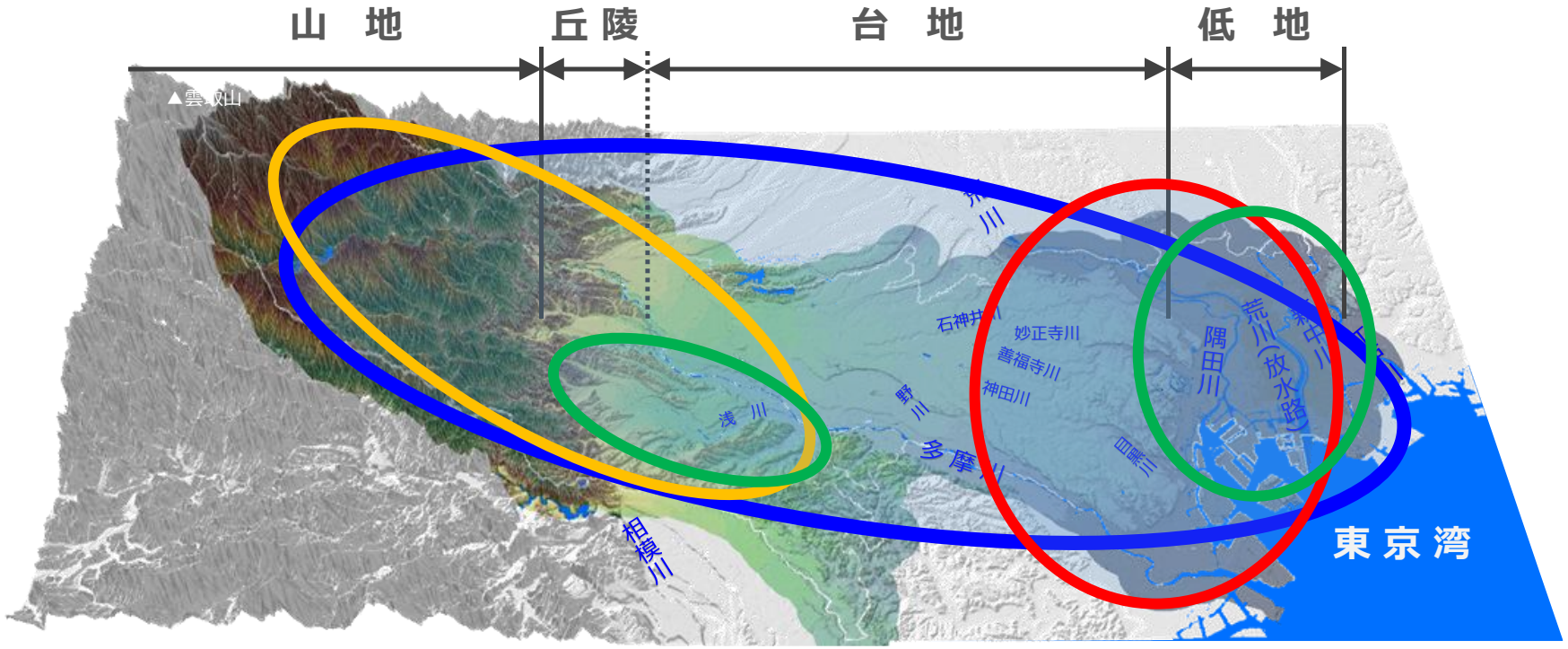
建設局の地下水位観測井（都内39地点83井）の採水とトレーサー分析を水理水頭分布と統合・解析し、地下水の流動方向や滞留時間の概況を把握する。

第２段階　地下水と地表水との交流に関する概況把握(現在)

データの不足していたエリアを中心に、地下水・河川水・湧水のトレーサー成分の分布を検討し、涵養域や流出域、台地から低地への地下水流動等を把握する。

１　地下水流動系の解明　《筑波大学との共同研究》
～東京の地下水における涵養－流動－流出のプロセスの解明～

■これまでの成果（～Ｒ７）



○～R3調査
　都内広域の地下水観測井、民間井戸、河川、湧水、降水の調査を行い、多摩部と区部低地部の水質の違いや複雑な３次元的な流動について解明

○R4調査
　多摩川などの河川と地下水の交流について調査。山地から台地へと至る領域の多摩川の河川が水輸送に果たす役割を解明

○R5, 6調査
　区部台地部から低地部のデータが不足している地域を中心として、区部台地部と低地部における地下水の関係を解明

○R7調査
南西側山地から台地への移行及び低地から北東への地下水流動について解明

１　地下水流動系の解明　《筑波大学との共同研究》
～東京の地下水における涵養－流動－流出のプロセスの解明～

■これまでの成果（～Ｒ７）

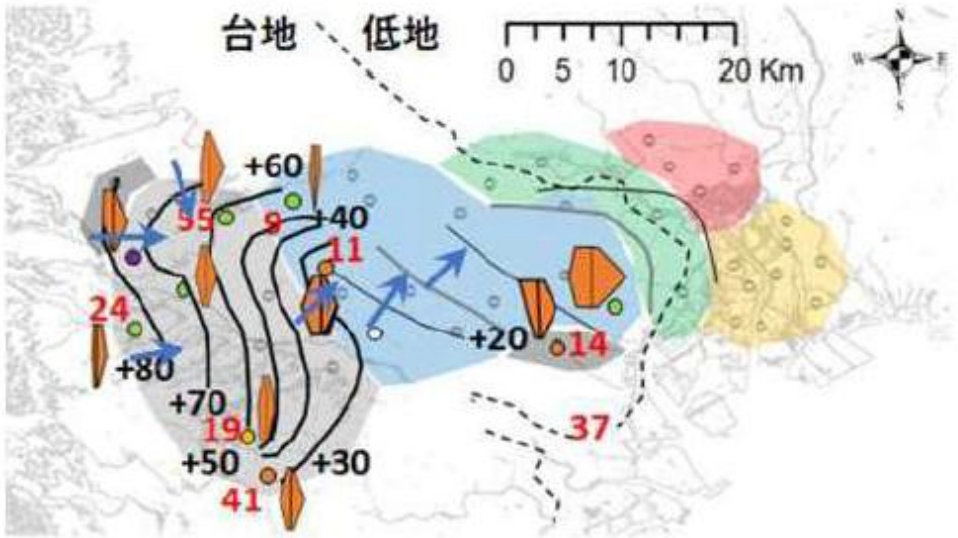
■ **水平方向**の流動とトレーサー成分等の分布

【浅い深度】　多摩台地部・・・**西から東へ**地形に沿って流動

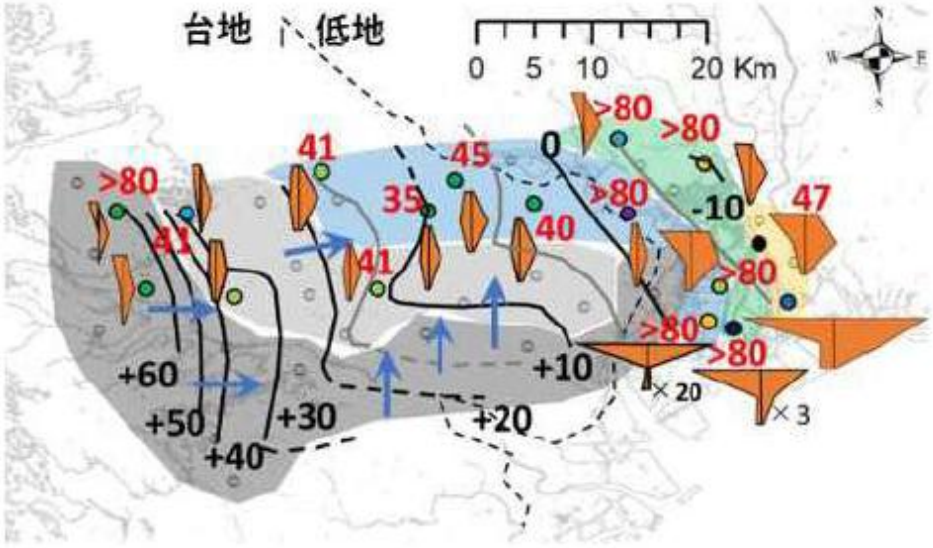
区部台地部・・・**南西から北東へ**流動

【深い深度】　区部台地部・・・**南から北、西から東へ**流動

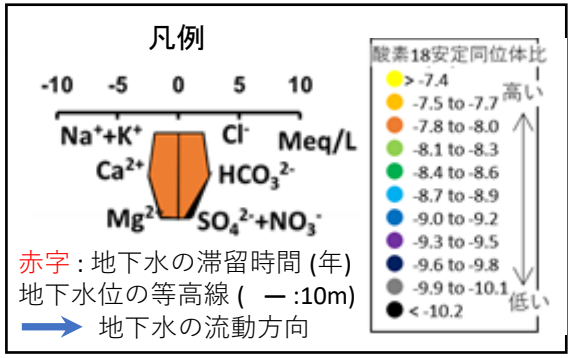
区部低地部・・・**南西から北東へ**流動　　※研究途上のため、今後修正される可能性有



浅い深度の地下水（標高-25 m ～ 25 m）



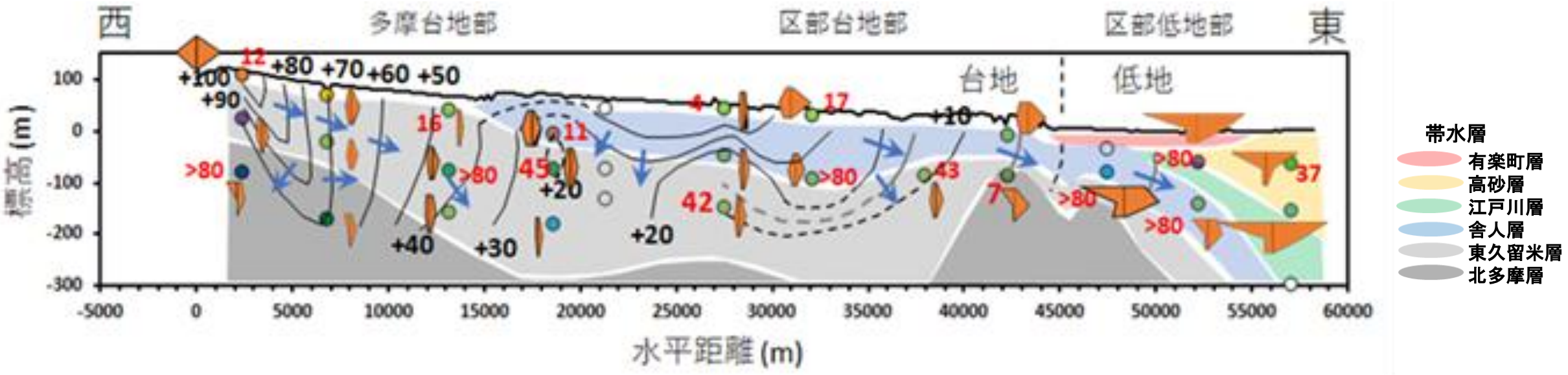
深い深度の地下水（標高-175 m ～ -125 m）



１　地下水流動系の解明　《筑波大学との共同研究》
～東京の地下水における涵養－流動－流出のプロセスの解明～

■これまでの成果（～Ｒ７）

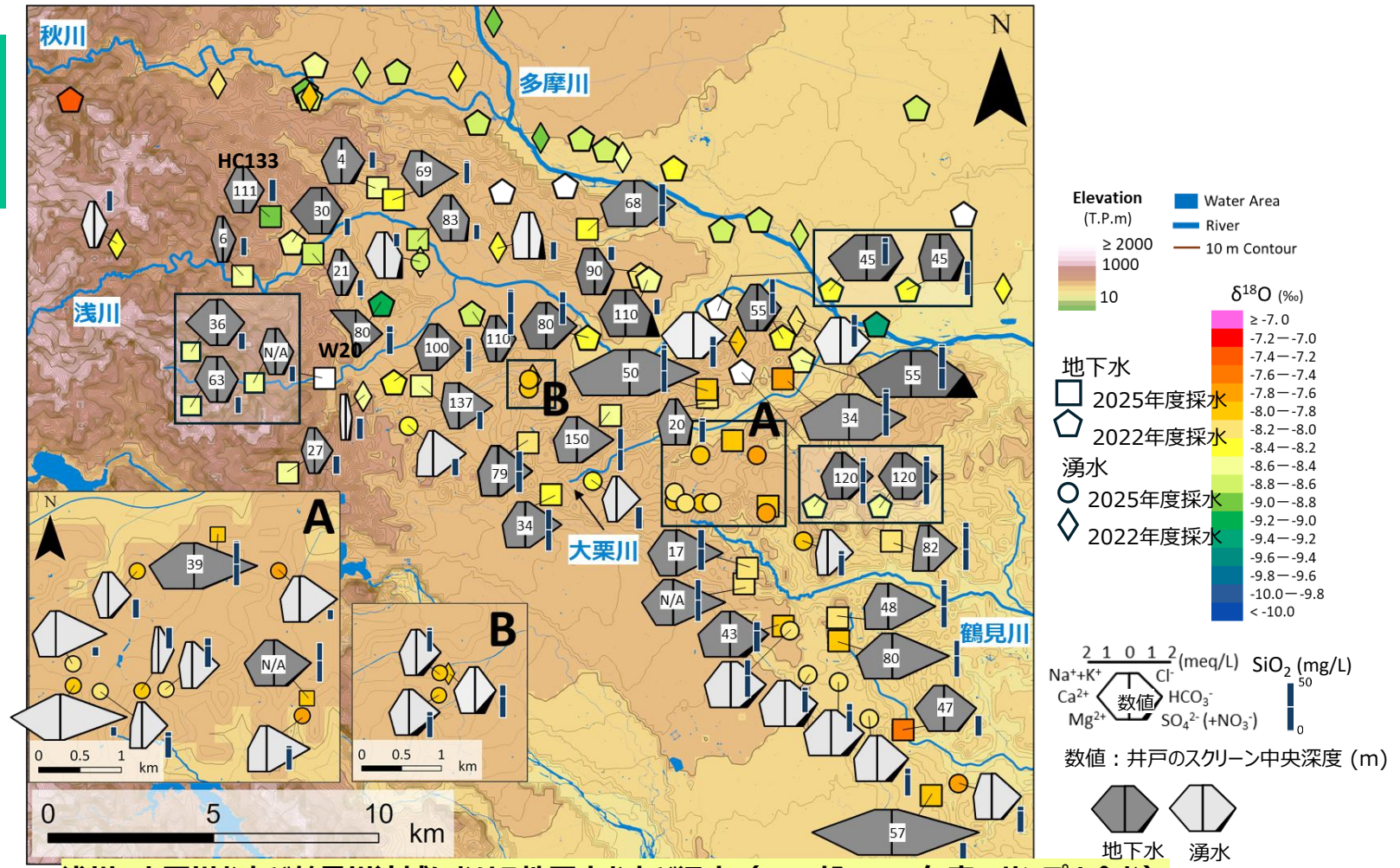
- **鉛直方向**の流動とトレーサー成分等の分布
  多摩と区部台地部の境界付近での鉛直下向きの流動、区部台地部において帯水層を超える**複雑な流動**
- 低地部では滞留時間が80年以上と顕著に古く、安定同位体比が低い特徴も考慮すると、**標高の高いところから長い時間かけて流動**してきた可能性が示唆



■これまでの成果（～R７）

- **多摩川右岸地域の地下水・湧水**は、カルシウム(Ca^{2+})と重炭酸濃度が他のイオンに比較し高い傾向がある。この特徴は**多摩川左岸台地部における地下水・湧水のそれと類似しており、両者に質的な連続性**が認められる。
- **上流域の地下水・湧水**における酸素安定同位体比($\delta^{18}O$)は、下流域のそれに比較し低い傾向がある。この特徴は河川水におけるそれと類似しており、両者に質的な連続性が認められる。

R７調査結果：多摩川右岸地域の地下水・湧水における同位体・溶存成分組成

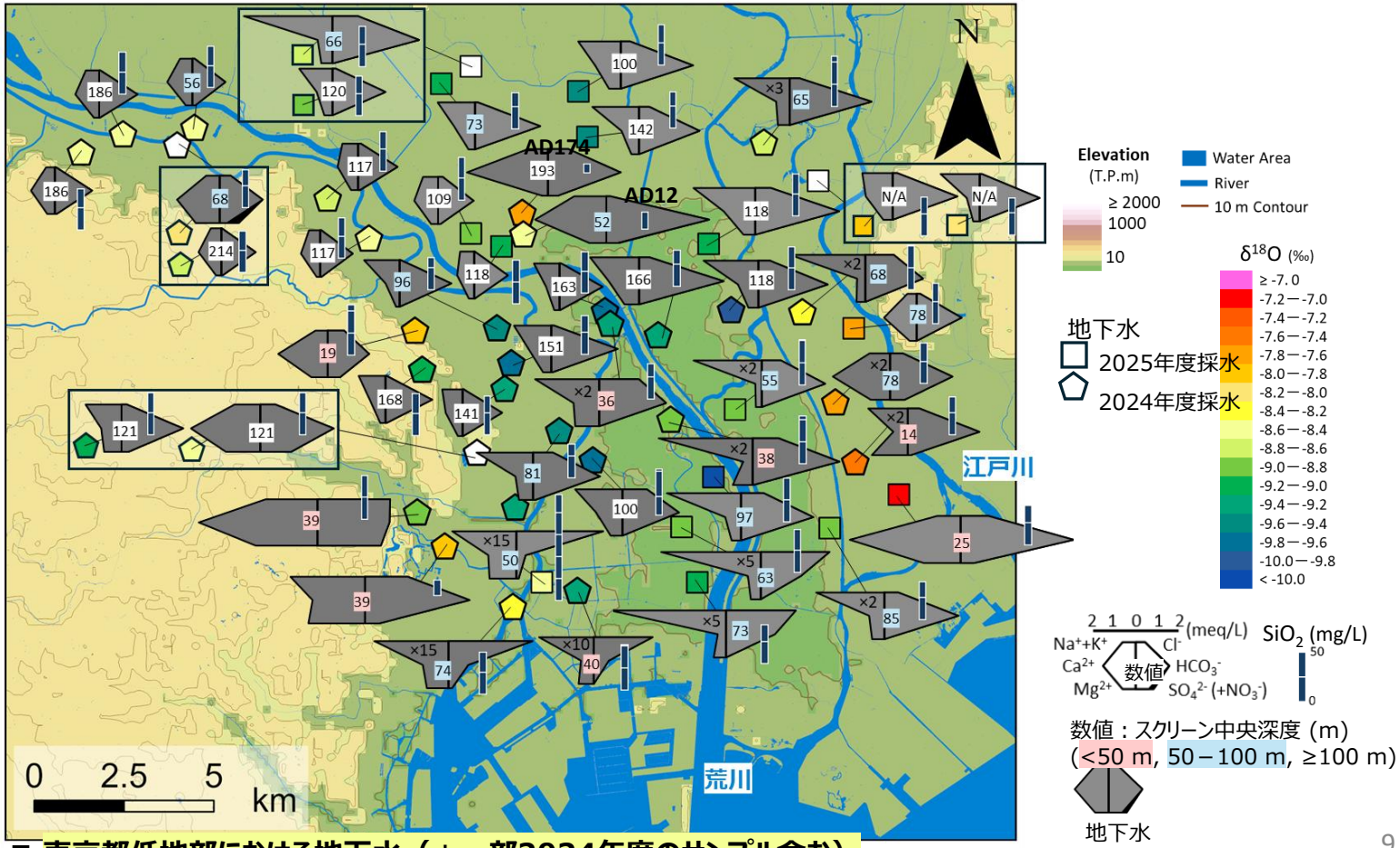


■ **浅川、大栗川および鶴見川流域における地下水および湧水（＊一部2022年度のサンプル含む）**

■これまでの成果（～R７）

- 荒川沿いの上流においてはカルシウム（Ca^{2+}）と重炭酸濃度（HCO_3^-）が他のイオンに比較し高い傾向を示すが、中流においてはナトリウム（Na^+）濃度が、また下流においてはナトリウムと塩素濃度（Cl^-）が高い傾向を示す。
- 荒川下流沿いにおける酸素同位体比（$\delta^{18}O$）は江戸川沿いのそれに比較し、顕著に低い傾向を示す。
- 江戸川沿いにおいてはナトリウムと重炭酸濃度が他のイオンに比較し高い傾向を示すが、一部カルシウム濃度が高いものがみられる。
- 江戸川沿いの地下水においては東側台地におけるそれとイオン組成が類似のものがみられ、**東から西に向かう地下水流動も示唆**される。

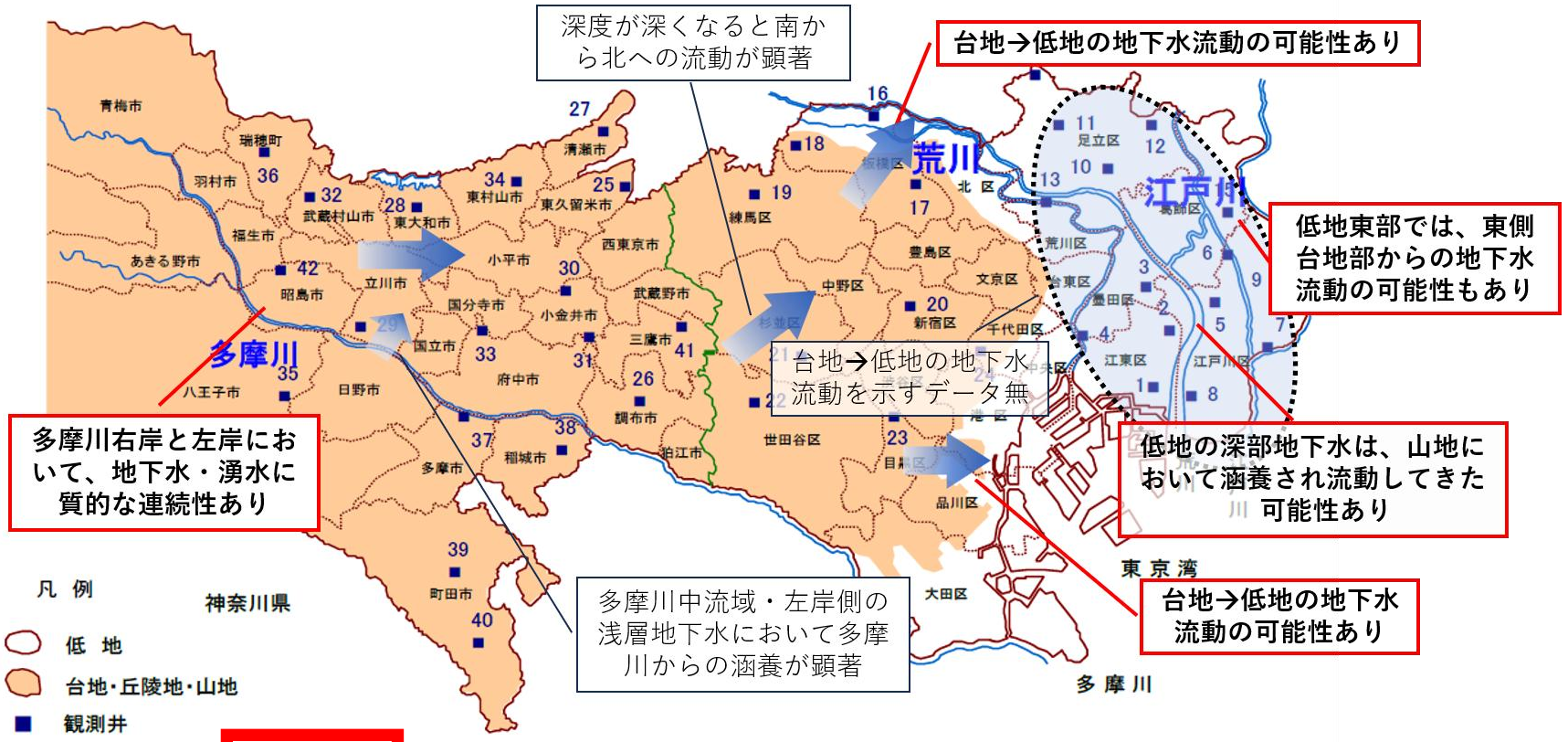
R７調査結果：東京都低地部の地下水における同位体・溶存成分組成



■ **東京都低地部における地下水（＊一部2024年度のサンプル含む）**

1　地下水流動系の解明　《筑波大学との共同研究》
～東京の地下水における涵養－流動－流出のプロセスの解明～

■これまでの成果のまとめ（～2024(令和７)年度）



：前回報告書（令和４年度公表）以降に明らかになった点

明らかになった点

- 台地部浅層では地形に沿い**西から東に向かう流動が卓越**
- 台地部・低地部深層では、基盤岩形状の影響を受け、南西から北東に向かう流動が卓越（台地部中央の深層で一部水位の低下）
- 台地－低地境界の北部と南部において、**台地から低地への流動の可能性**
- 山地部から低地部に至る深層の流動の可能性
- **多摩川右岸と左岸において、地下水・湧水に質的な連続性あり**

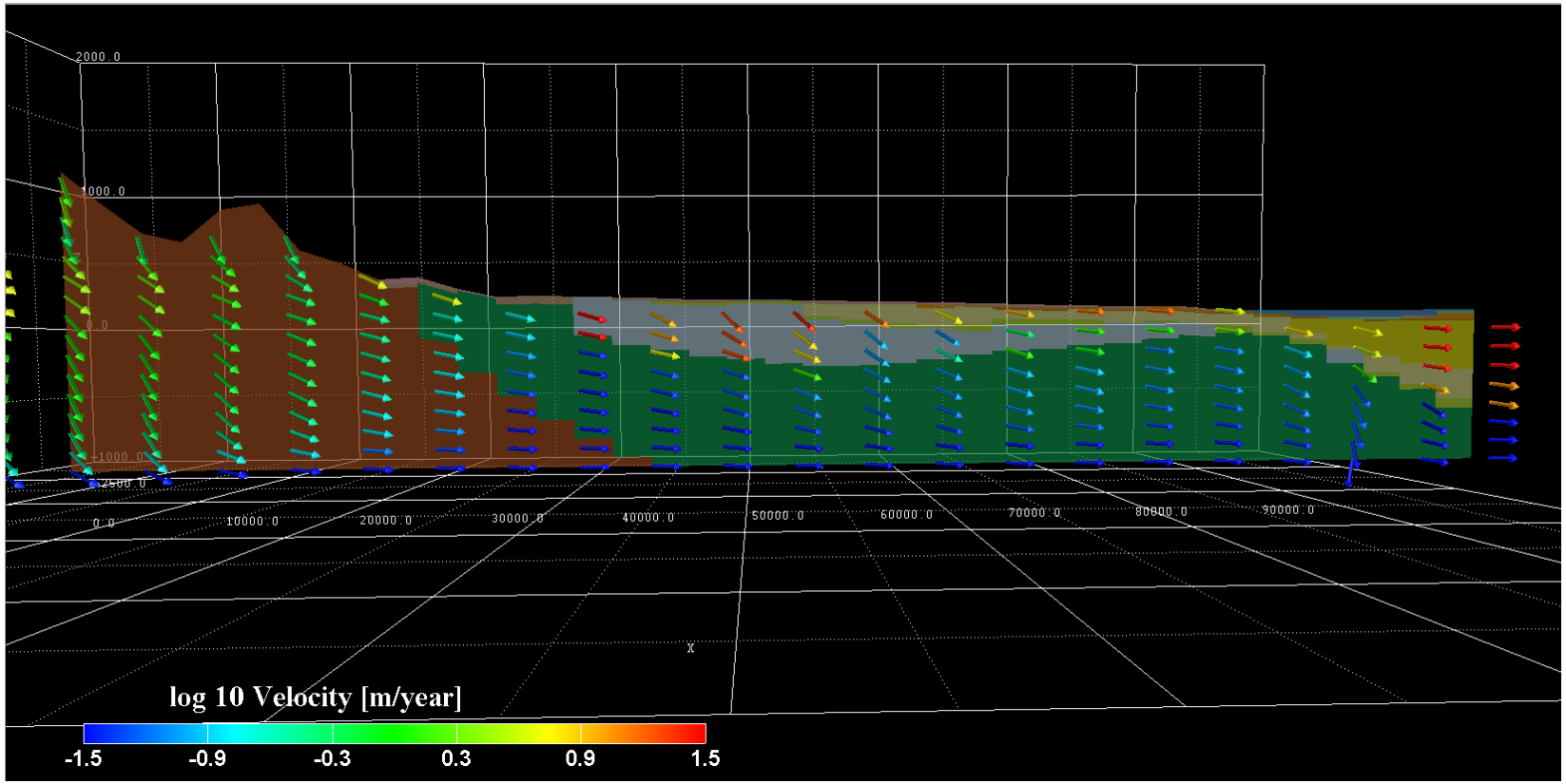
課題

- 都境を超えた南西から北東への流動
- 低地部における高塩素イオン濃度の起源

１　地下水流動系の解明　《筑波大学との共同研究》
～東京の地下水における涵養－流動－流出のプロセスの解明～

これまでの成果のまとめ（地下水の三次元可視化）

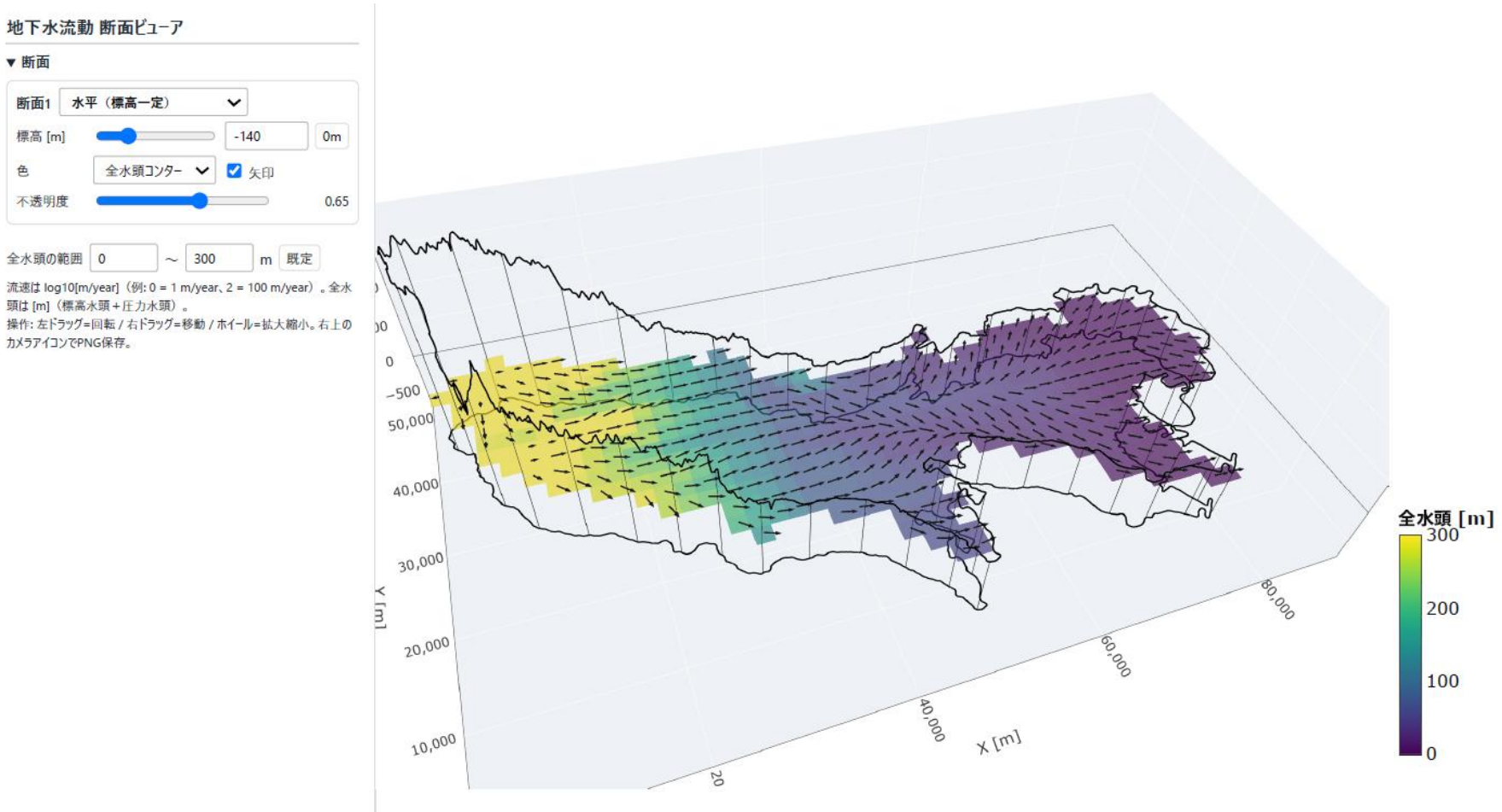
- これまでの研究成果をわかりやすく示すため、**令和７年度に「東京地域の地下水流動に関する三次元可視化」**に取り組んだ。
- 東西断面、南北断面、南西－北東断面等、複数断面において、地下水流動の流束と方向を地質条件とともに示す。下記は東西断面における地下水流動。矢印の向きは流動方向を、矢印の色は流束の大きさを示している。



１　地下水流動系の解明　《筑波大学との共同研究》
～東京の地下水における涵養－流動－流出のプロセスの解明～

これまでの成果のまとめ（地下水の三次元可視化）

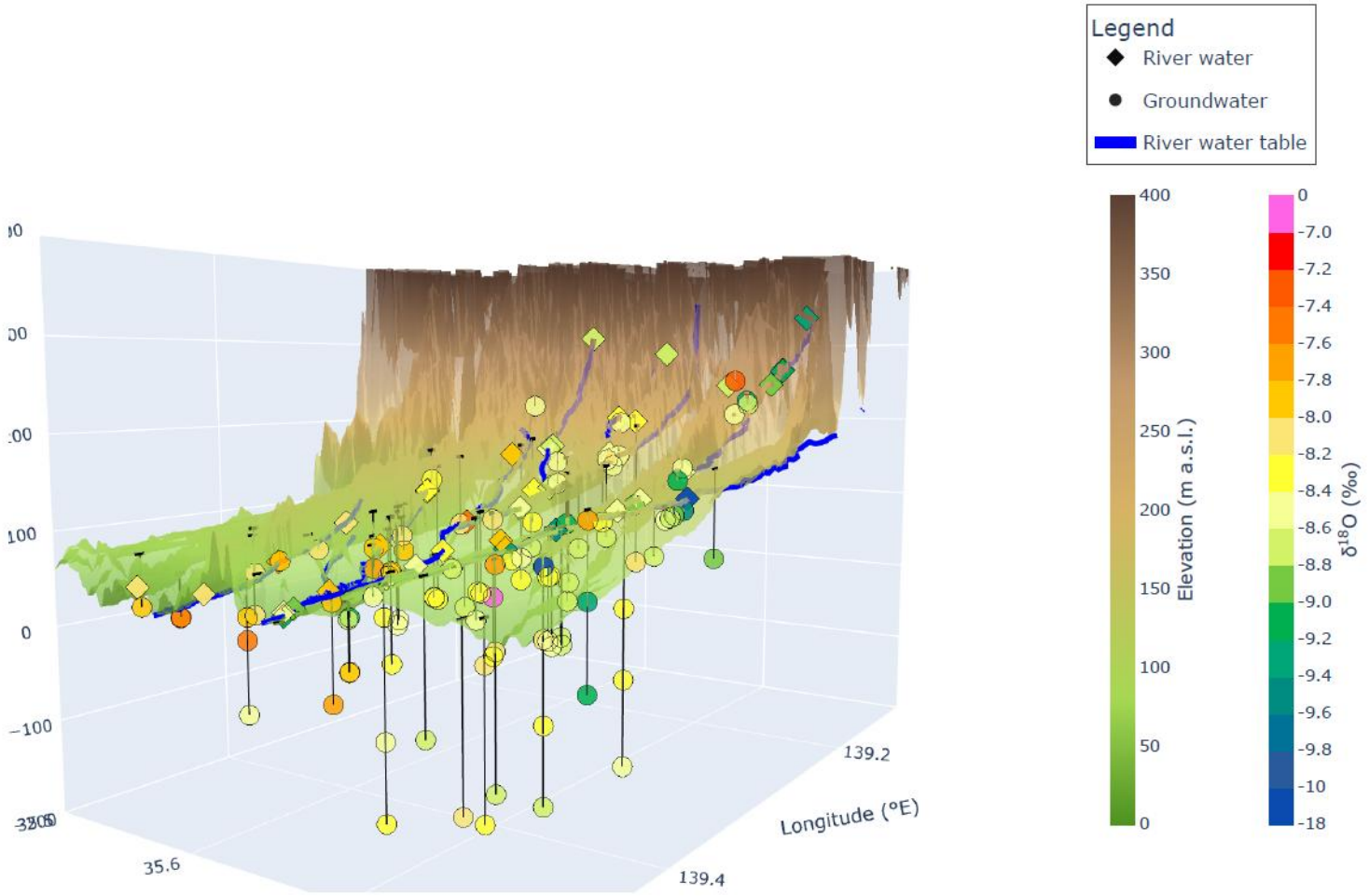
■ 東西断面、南北断面、南西－北東断面等、複数断面において、地下水流動の流束と方向を地質条件とともに示す。
Web上で閲覧者が、任意の方向から断面を見ることができるように設定。下記は、水平断面。



１　地下水流動系の解明　《筑波大学との共同研究》
～東京の地下水における涵養－流動－流出のプロセスの解明～

これまでの成果のまとめ（地下水の三次元可視化）

■ 東西断面、南北断面、南西－北東断面等、複数断面において、地下水流動の流束と方向を地質条件とともに示す。Web上で閲覧者が、トレーサー成分（この図は酸素安定同位体比($\delta^{18}O$)）の空間分布を任意の方向から見ることができるように設定。



２　地下水の揚水等の影響予測　《東京大学との共同研究》
～地盤沈下や湧水に影響が生じる地下水位とその水位に達する揚水量の予測～

■取組の概要

地下水の揚水が地下水位や地盤に与える影響（揚水-地下水-地盤の関係）を定量化し、地盤沈下が起きる地下水位や湧水に影響が生じる地下水位、またその地下水位に達する揚水量等を予測する。

■実施体制

東京大学（愛知研究室）と東京都環境科学研究所による共同研究（2017(平成29)年度開始）

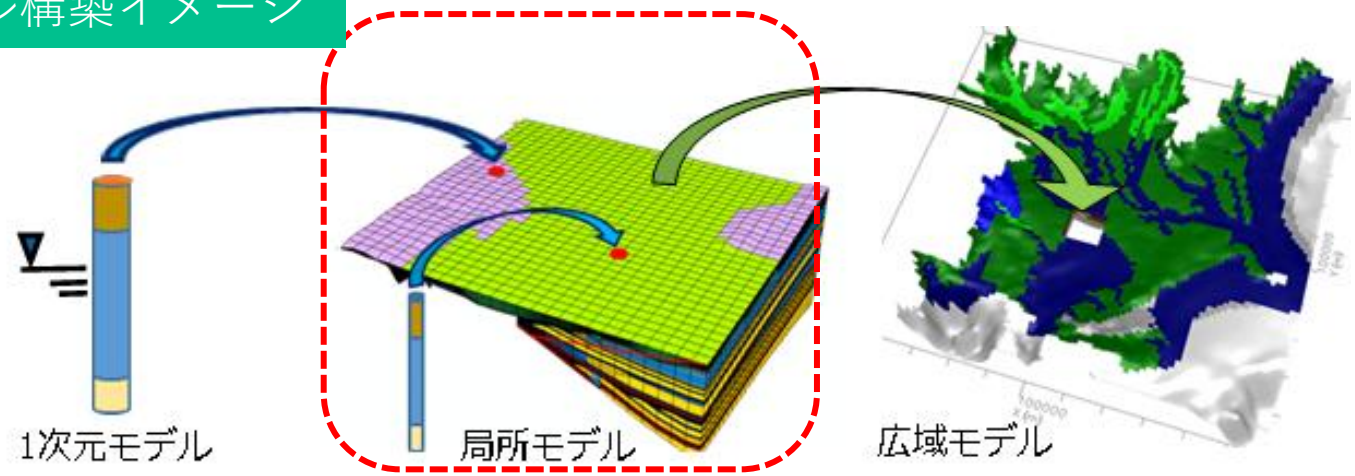
■展開方法

第１段階
建設局土セン観測井における過去の地下水位と地盤収縮の履歴を高精度に再現する**一次元地盤沈下モデル**を作成し、地盤物性値を推定

第２段階【現段階】
建設局土セン観測井の周辺に、過去の地下水位と地盤収縮の履歴を高精度に再現する**局所地下水流動・地盤変形連成モデル**を作成

第３段階
局所地下水流動・地盤変形連成モデルを**広域地下水流動モデル**と連結し、帯水層がつながる地下水流動を考慮した高精度予測を実施

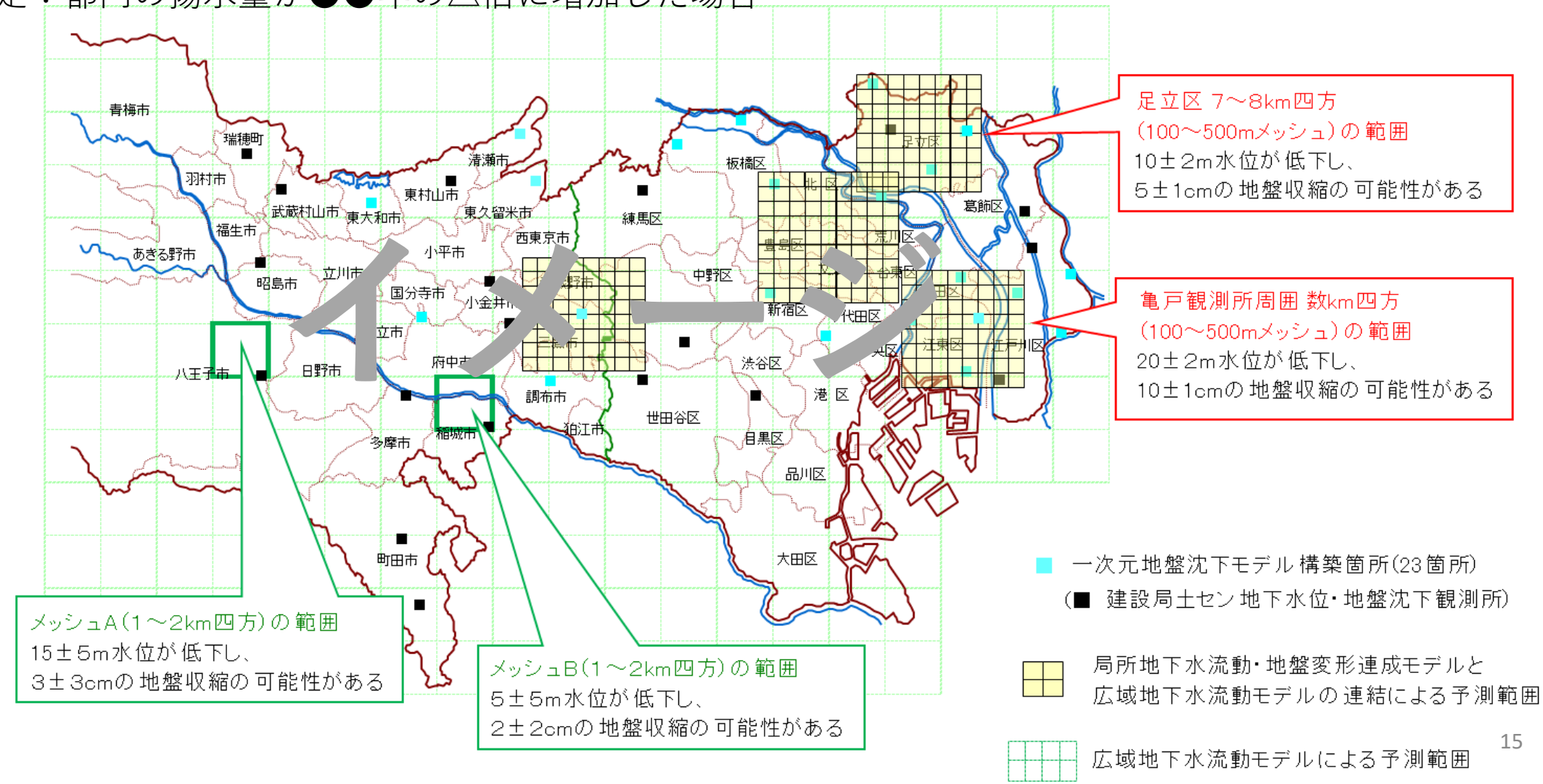
■シミュレーションモデル構築イメージ



２　地下水の揚水等の影響予測　《東京大学との共同研究》
～地盤沈下や湧水に影響が生じる地下水位とその水位に達する揚水量の予測～

■シミュレーション結果イメージ

想定：都内の揚水量が●●年の△倍に増加した場合



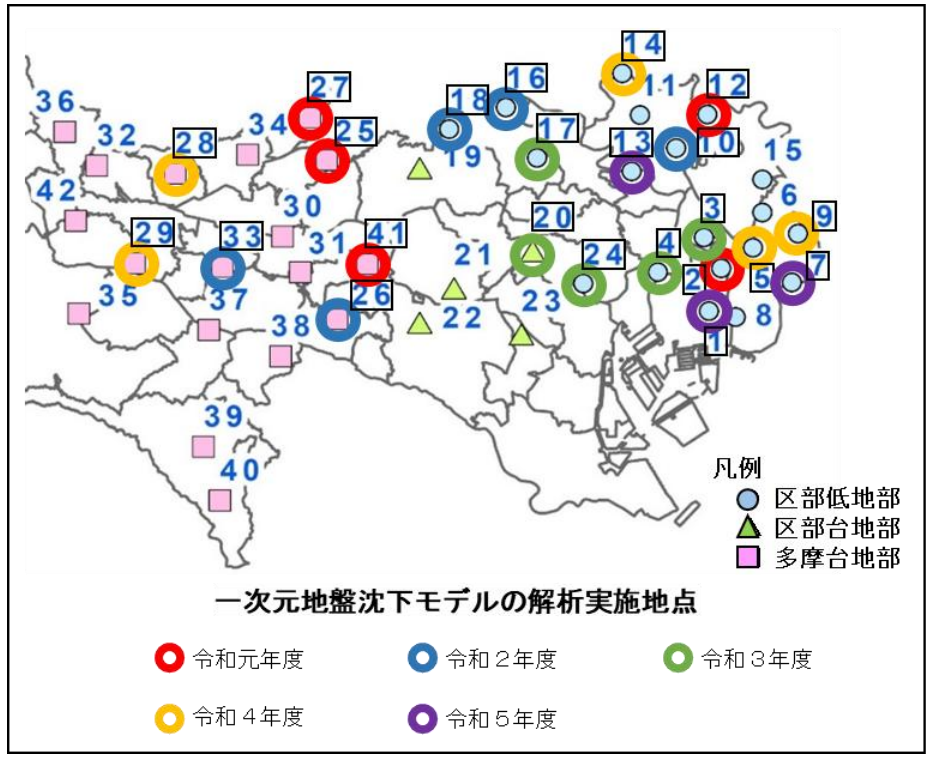
２　地下水の揚水等の影響予測　《東京大学との共同研究》
～地盤沈下や湧水に影響が生じる地下水位とその水位に達する揚水量の予測～

これまでの成果のまとめ（第１段階）①

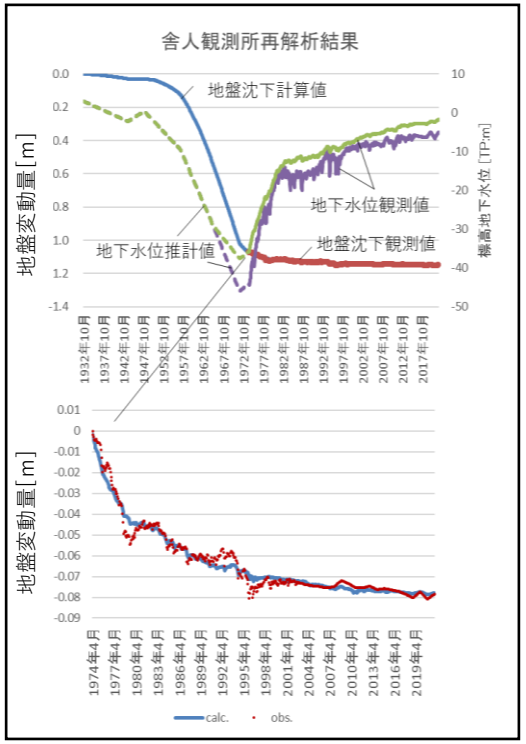
- ■ 観測井における**一次元地盤沈下モデルを作成**（深度方向１ｍ単位でモデル化）
- ■ 地盤沈下と地下水位の実測値等から、地盤の詳細な物性値を探索（地盤物性値の逆解析）
- ■ **計23地点で地盤変動量の再現を確認**

⇨得られた地盤物性値は局所モデル（第２段階）の初期値として活用

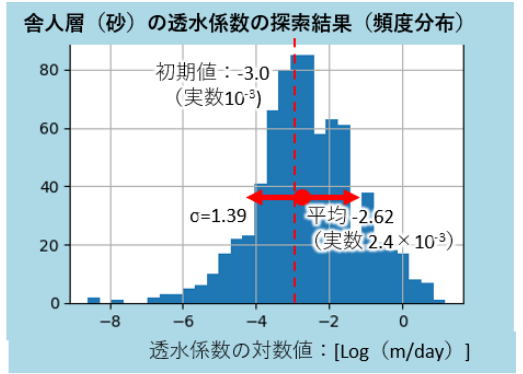
一次元地盤沈下モデルの解析実施地点

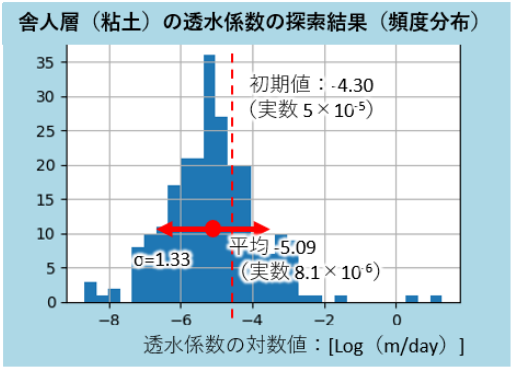


解析結果例（舎人）



得られた地盤物性値例



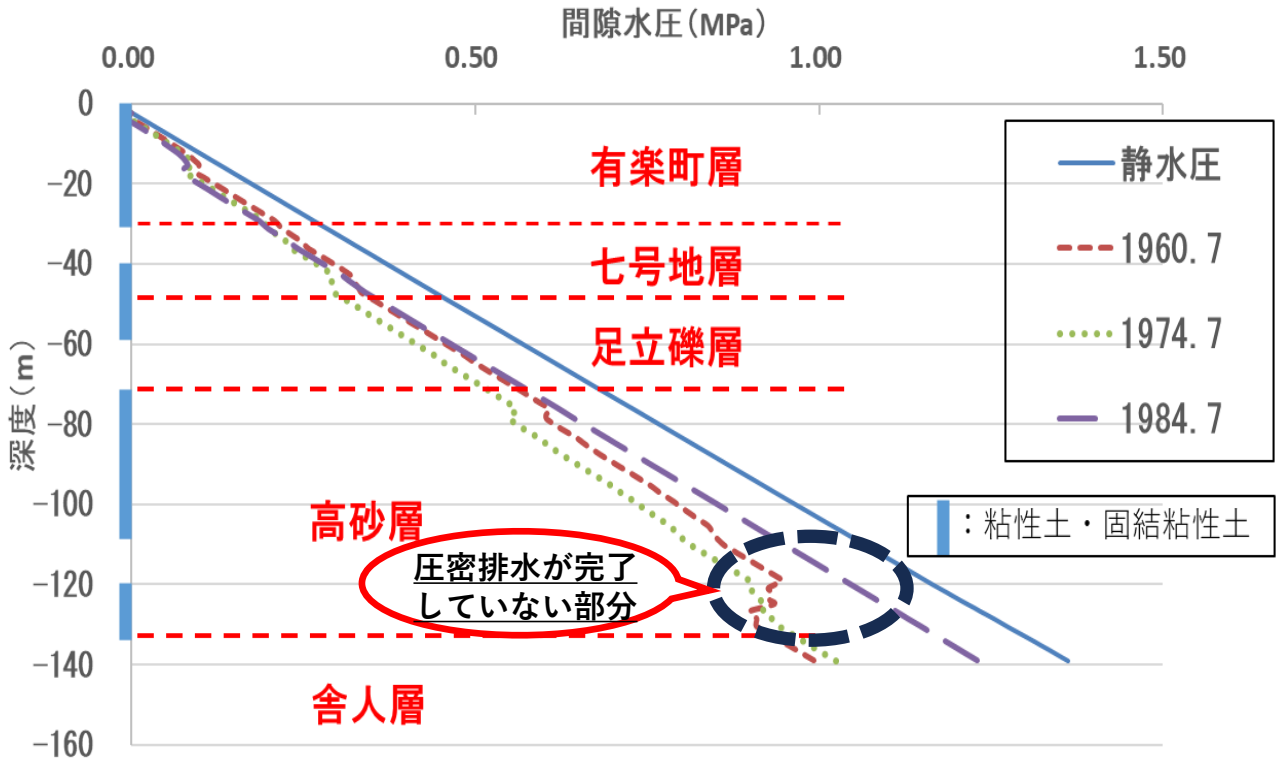


２　地下水の揚水等の影響予測　《東京大学との共同研究》
～地盤沈下や湧水に影響が生じる地下水位とその水位に達する揚水量の予測～

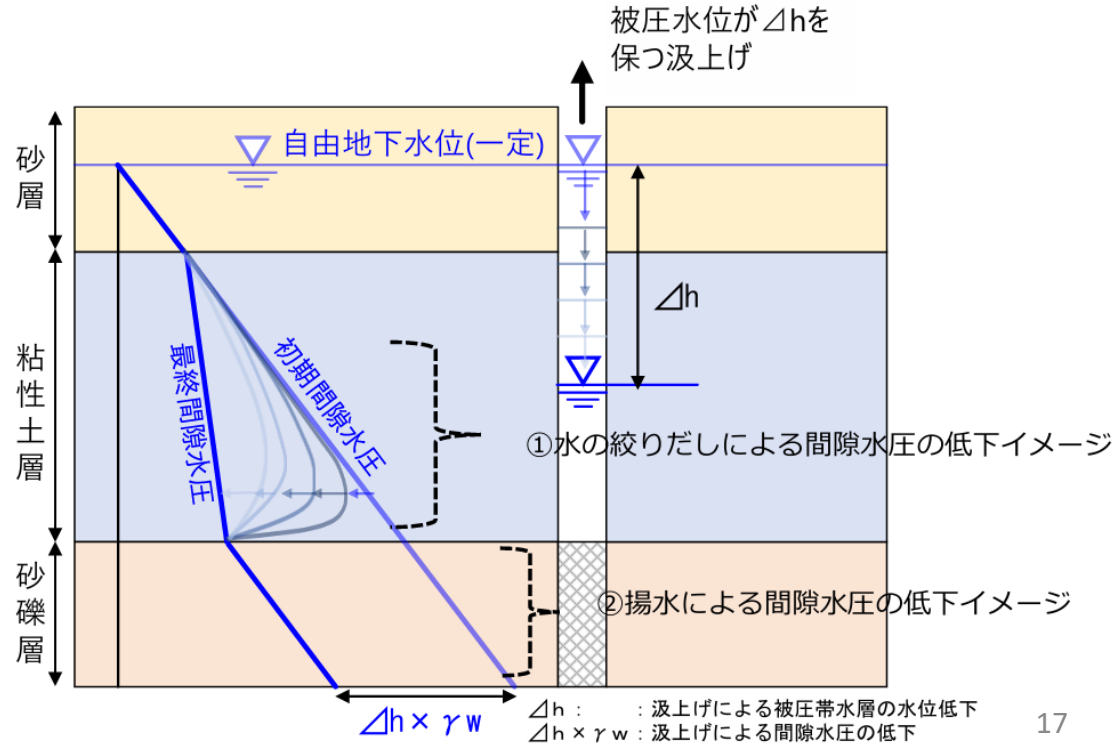
これまでの成果のまとめ（第１段階）②

- 一次元地盤沈下モデルに基づき、将来的に地盤沈下が再発する可能性について検討
- **低地部では**粘性土内に圧密排水が完了していない部分があり、**将来的な地下水位再低下の場合における粘土層の塑性変形再開余地**を確認

間隙水圧の分布の推定結果例（亀戸第２観測井）



（間隙水圧分布の変化イメージ）



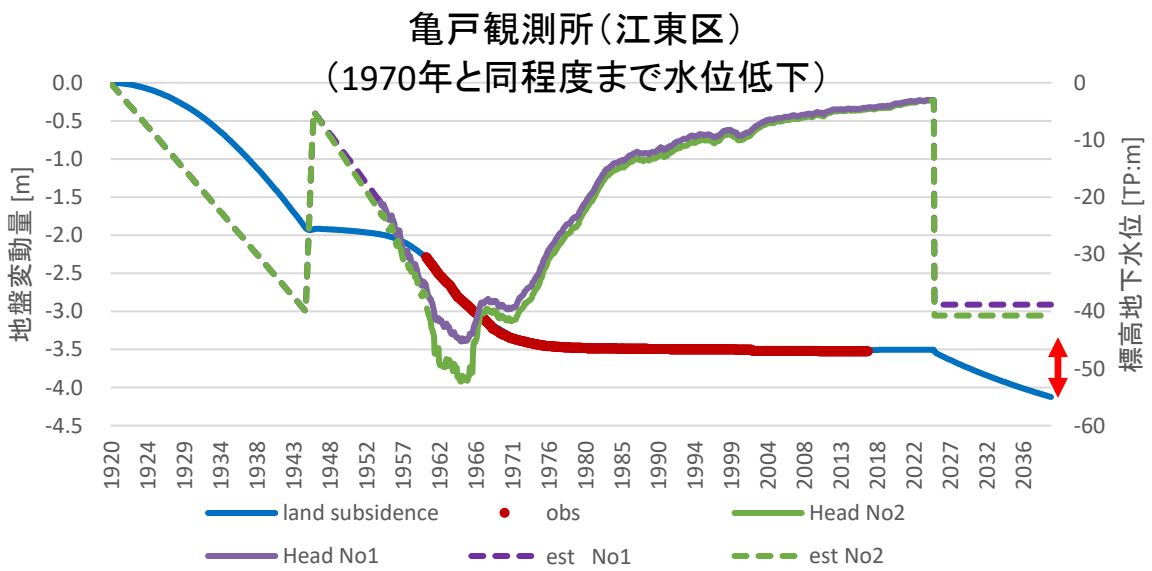
２　地下水の揚水等の影響予測　《東京大学との共同研究》
～地盤沈下や湧水に影響が生じる地下水位とその水位に達する揚水量の予測～

これまでの成果のまとめ（第１段階）③

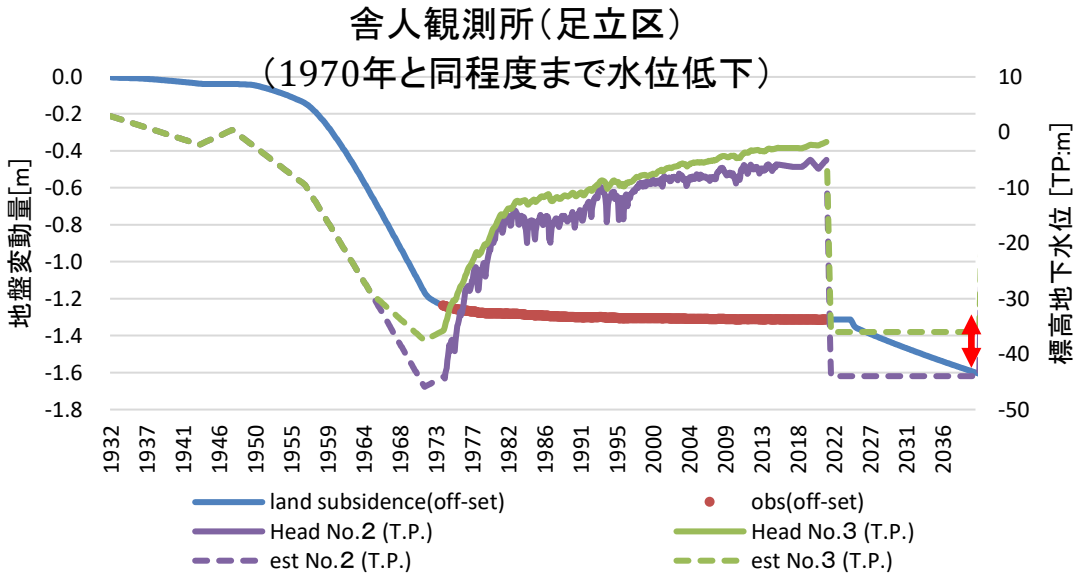
■ 「低地部の将来的な地下水位再低下の場合における粘土層の塑性変形再開余地」をわかりやすく説明するため、一次元地盤沈下モデルを用い、将来的な地盤沈下再発リスクを再現計算

■ 地下水位低下とそのときの地盤収縮の関係をグラフ化

（再現シナリオ）
2025年～2040年の15年間に過去最大水位低下を暴露。2025年と2040年の地盤変動量の差を「沈下量」とする。



沈下量 62 cm



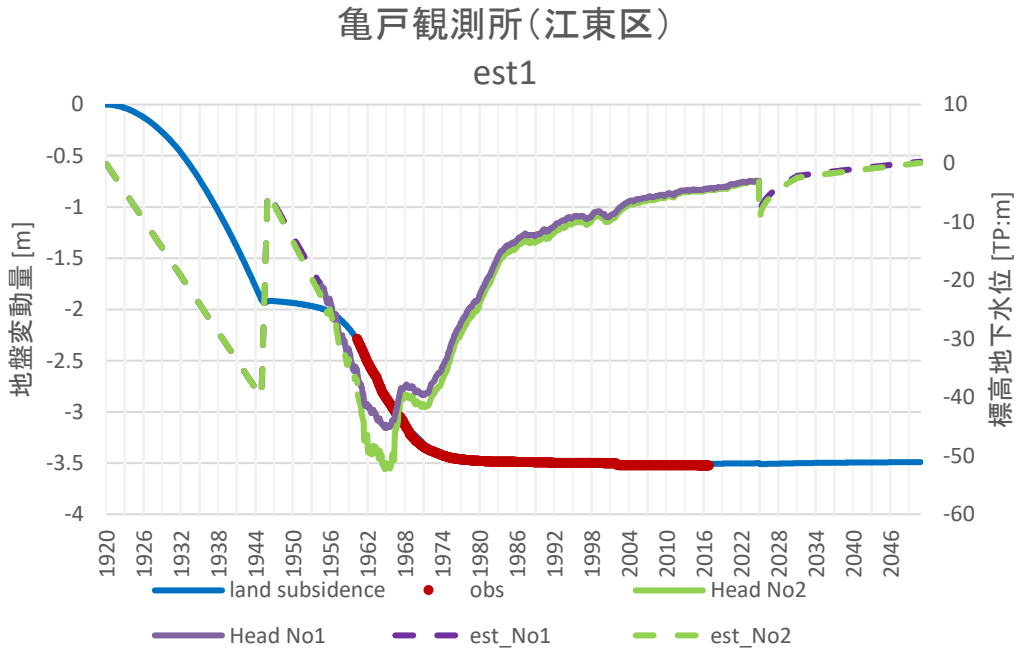
沈下量 24 cm

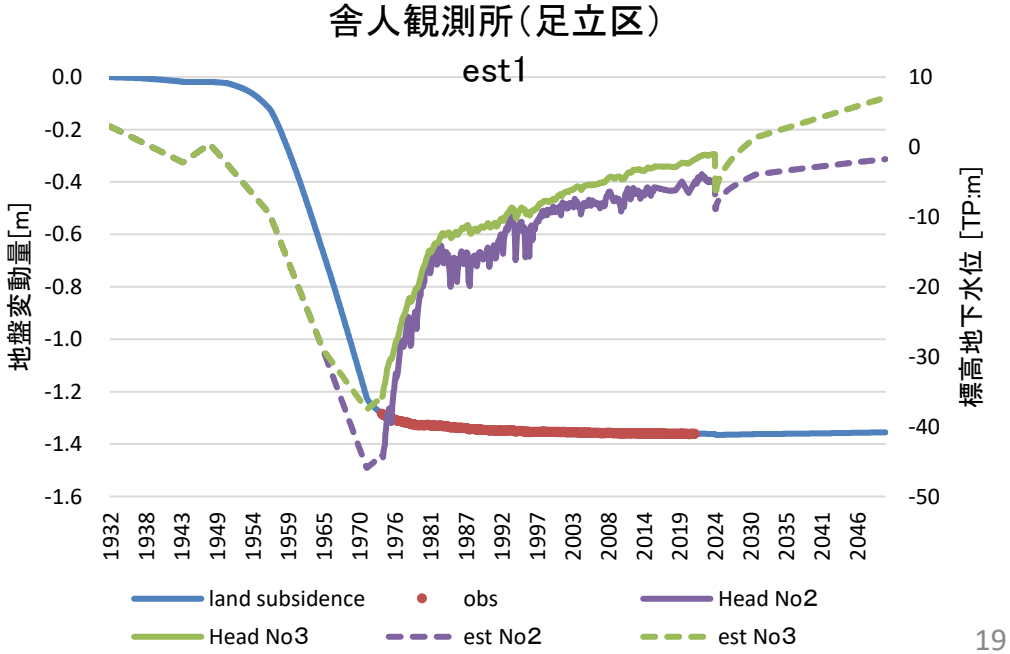
２　地下水の揚水等の影響予測　《東京大学との共同研究》
～地盤沈下や湧水に影響が生じる地下水位とその水位に達する揚水量の予測～

（参考）

■ 災害時等の一時的利用を想定し、一次元地盤沈下モデルを用い、将来的な地盤沈下再発リスクを再現計算
■ 恒久沈下量を発生させないシナリオも存在
※　一次元地盤沈下モデルは揚水量との関係は計算できないため、許容揚水量を評価したものではない

（再現シナリオ）2001年時点の水位まで低下・5年で回復

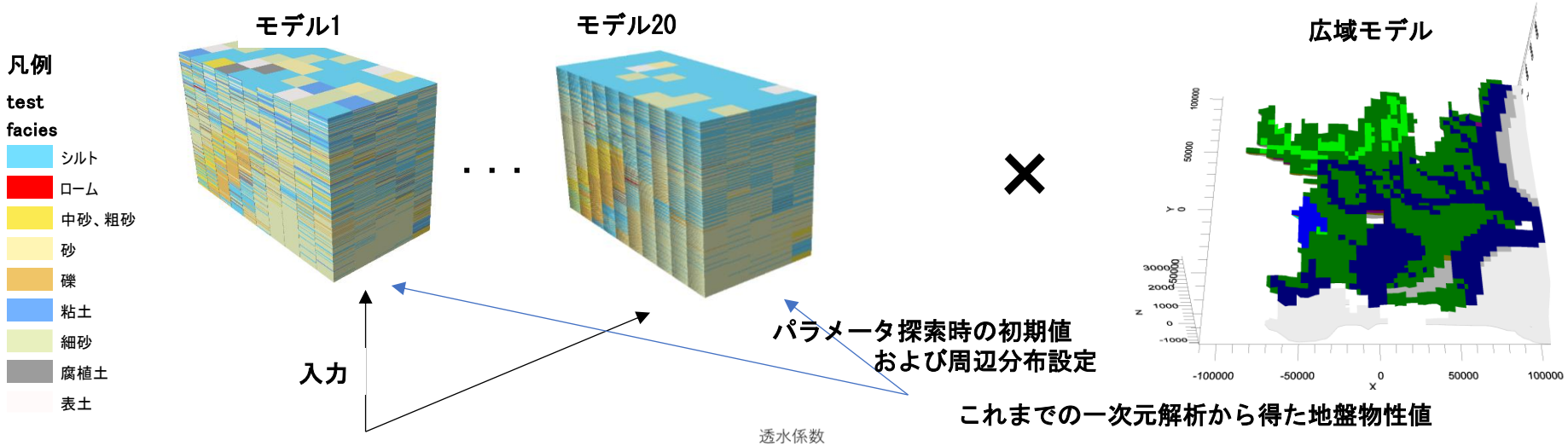


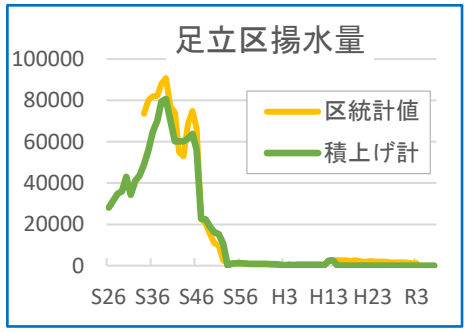


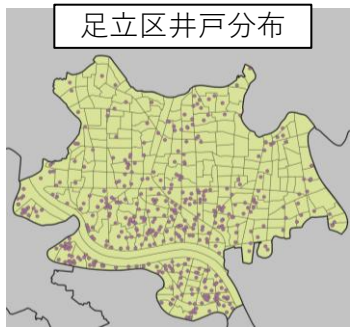
２　地下水の揚水等の影響予測　《東京大学との共同研究》
～地盤沈下や湧水に影響が生じる地下水位とその水位に達する揚水量の予測～

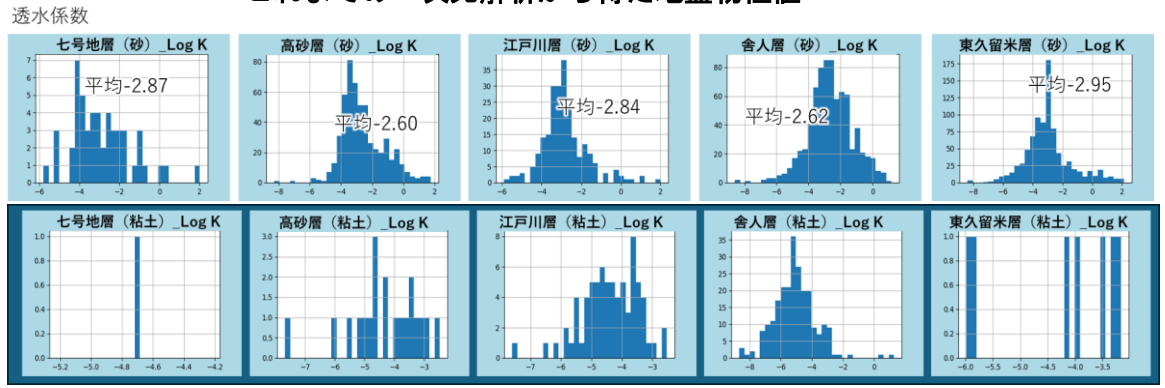
これまでの成果のまとめ（第２段階）①

- ■ 一次元モデルで得られた地盤物性値を初期値として活用し、低地の足立区をケーススタディとして局所モデル（第２段階）を作成中
- ■ 層序の不確実性を考慮するため、遷移確率地球統計学に基づき、候補となる地質モデルの複数構築を目指す







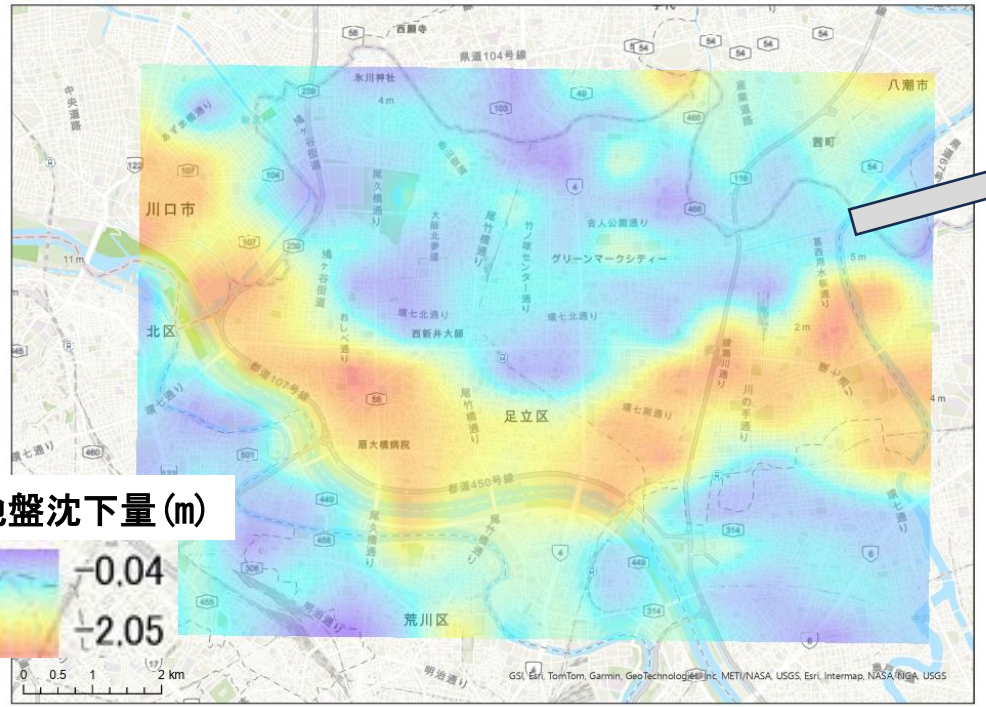


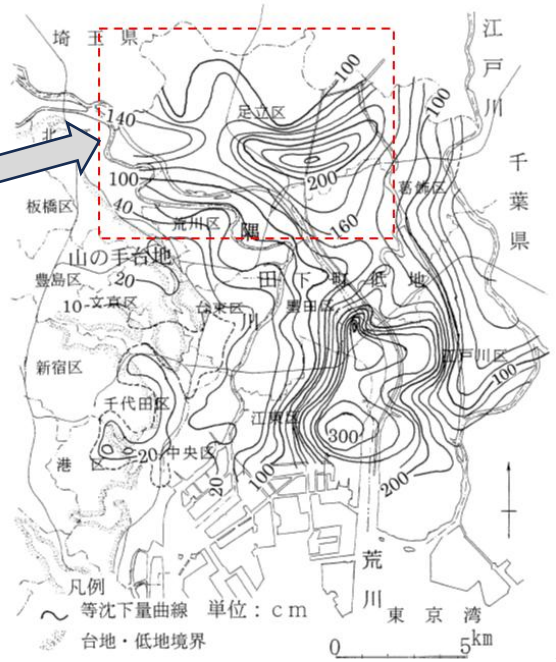
２　地下水の揚水等の影響予測　《東京大学との共同研究》
～地盤沈下や湧水に影響が生じる地下水位とその水位に達する揚水量の予測～

これまでの成果のまとめ（第２段階）②

■ 局所モデル・広域モデル連結による過年度の揚水量分布に基づく試解析を実施
■ 最大沈下量のオーダー感や埋没谷で沈下量が大きい傾向の再現に成功
（課題）埋没段丘上の沈下量が合っていない、ムラが目立つ（井戸配置・地質モデルの確率的生成の影響か）、
井戸枯れによる収束不能　など ⇨まだ20個生成はできていない

試解析結果の例（足立区）





1938-1977の地盤変動量（遠藤ほか，2001）

課題解決に向けた検討状況

・井戸枯れする帯水層の透水係数の生成確率分布を高透水側に上方修正
・帯水層構造の連続性を高めるため、地質構造の確率分布モデル構成時に東京都区部大深度地下地盤図の地質モデル情報を導入し、ボーリング情報と整合しない部分を修正していく方法も試行中
・井戸枯れした場合のモデルの評価値を工夫し、評価関数の微分を滑らかにする工夫を今年度後半で検討する予定

２　地下水の揚水等の影響予測　《東京大学との共同研究》
～塑性変形確率推定法の検証～

■取組の概要

地盤沈下モデルと地下水位・地盤変動等の観測データを組み合わせ、弾性変形から塑性変形への移行を早期に推定する技術を開発する。早期警戒指標として活用することで、地盤沈下対策の迅速化・高度化を目指す。

■実施体制

構築した一次元地盤沈下モデルを元に、2025（令和７）年度より開始

■展開方法

第１段階

塑性変形確率推定法の**設計**と一次元地盤沈下モデルの**シミュレーションデータ**を用いた机上検討

第２段階【現段階】

透明粘土鉱物（ラポナイト）を用いた**実地盤材料**への適用検証

第３段階

磁気式沈下計等の**実測定データ**を用いた精度検証

■開発技術の活用イメージ

観測データ＋モデルから地盤の塑性変形のおそれを事前に検知

↓

必要に応じ周辺井戸での揚水量削減の協力依頼

↓

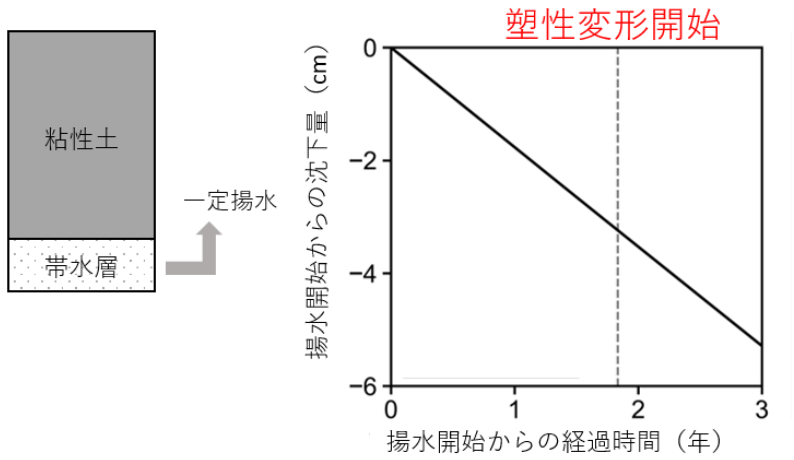
深刻な地盤沈下を未然に回避

２　地下水の揚水等の影響予測　《東京大学との共同研究》
～塑性変形確率推定法の検証～

これまでの成果のまとめ（第１段階）

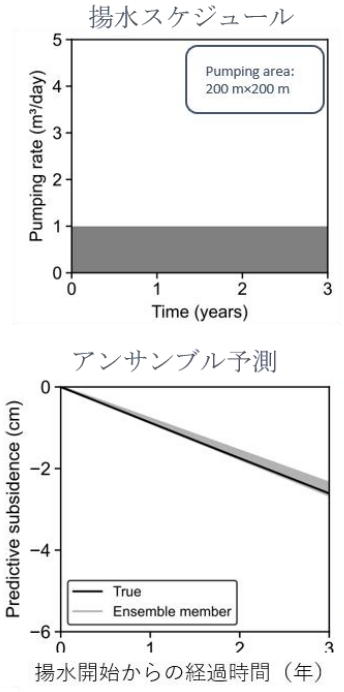
■ モデルアンサンブルとモニタリングデータを用いた塑性変形確率推定法の提案
■ 数値シミュレーションによる塑性変形確率推定法の検証

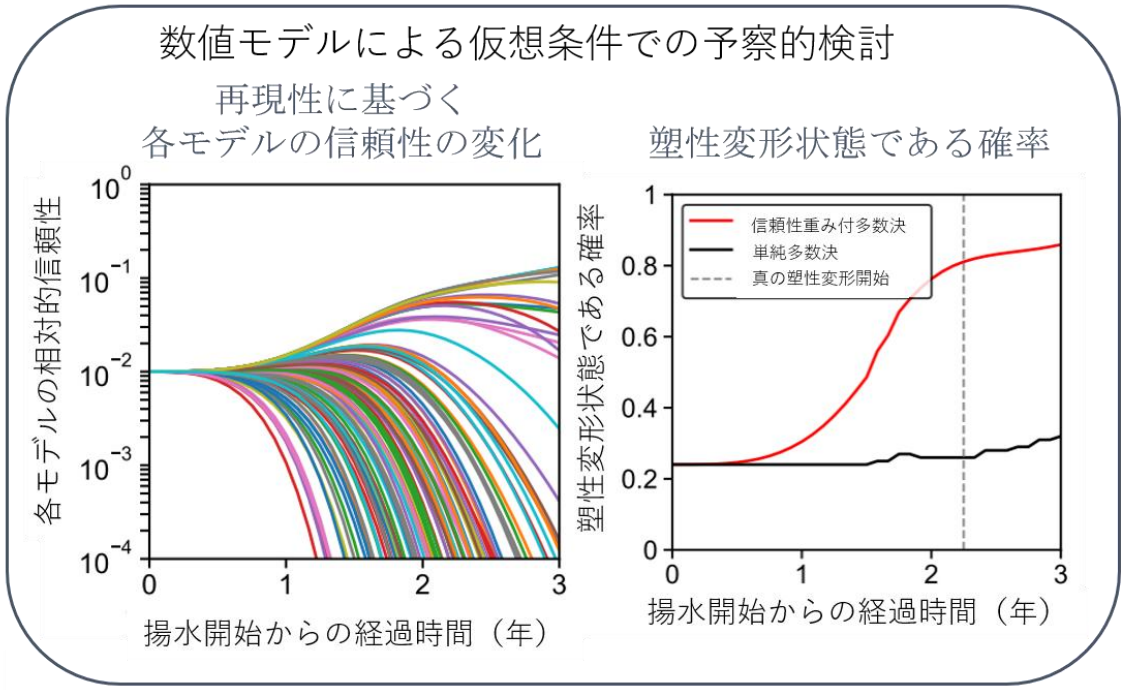
地盤沈下モニタリングデータから、塑性変形移行の検知はどうすれば良いのか？



- **単純な地盤モデルで予察的解析したところ、塑性変形が始まっても変曲点などは明瞭でない。**
- **1年以内に塑性変形の始まりを検知することは難しそう。**

不確実性評価用モデルアンサンブルを活用した推定の開発





再現性に基づく信頼性の重み付き多数決判定により、塑性変形開始直前に80％程度のリスクに達していることが分かり、事前警告が実現できる可能性

２　地下水の揚水等の影響予測　《東京大学との共同研究》
～塑性変形確率推定法の検証～

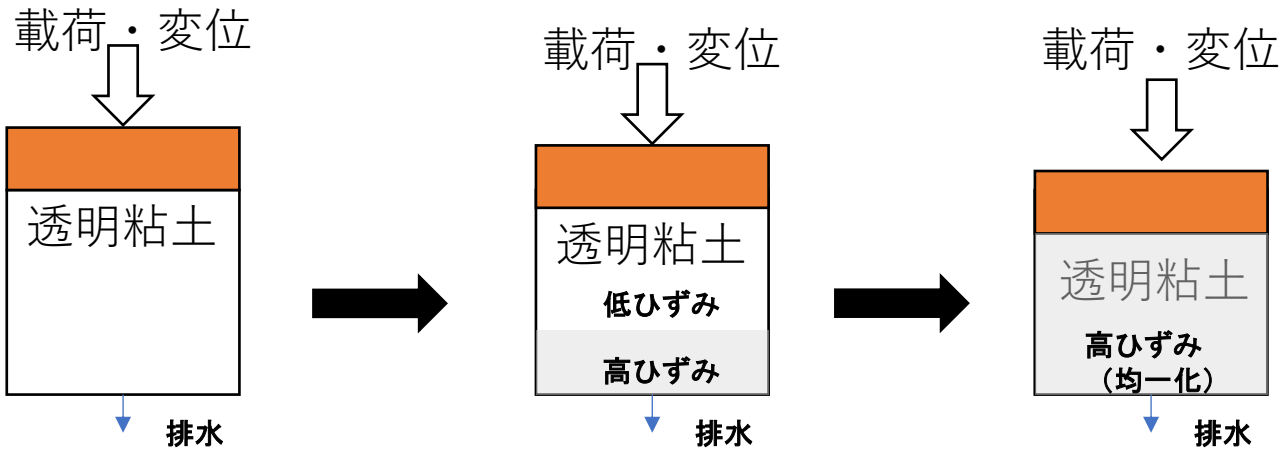
これまでの成果のまとめ（第２段階）①

■ 透明土を用いた塑性変形確率推定法の検証実験手法の開発
（１）　マッハ・ツェンダー干渉計による高精度ひずみ可視化法の検討
（２）　偏光イメージングによる塑性変形の直接計測法の検討

数値シミュレーション同士の検証だけでは、パラメータが合えば数値モデルが変形現象のすべてを完璧に表現できるという前提になってしまうため、実地盤材料への適用性については十分な検証になっていない。

透明粘土鉱物（ラポナイト®）を用いた室内実験により、内部のひずみ分布および弾塑性状態を可視化したデータとの比較検証を試みる

室内実験におけるひずみの進展イメージ



光学特性の変化による計測

(1) ひずみ→密度変化→屈折率変化

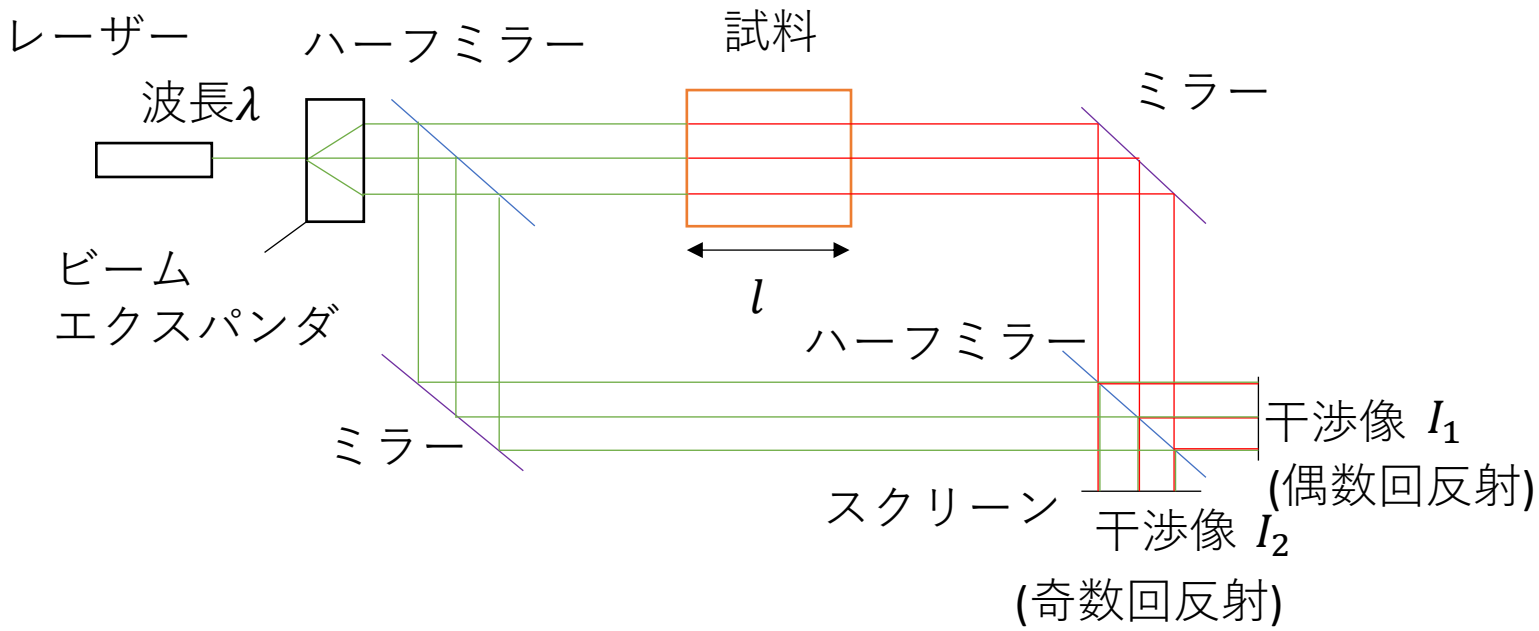
(2) 塑性変形→配向変化→偏光変化

２　地下水の揚水等の影響予測　《東京大学との共同研究》
～塑性変形確率推定法の検証～

これまでの成果のまとめ（第２段階）②

（１）　マッハ・ツェンダー干渉計による高精度ひずみ可視化法の検討

マッハ－ツェンダー干渉計法



屈折率　$n = \frac{\lambda}{2\pi l}\left[\cos^{-1}\left(\frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2}\right) + m\pi\right]$

この時間変化Δnを計測すると、

$$\Delta\varepsilon = \frac{8n}{(n^2-1)(n^2+2)}\Delta n$$

により、ひずみの時間変化$\Delta\varepsilon$が求められる

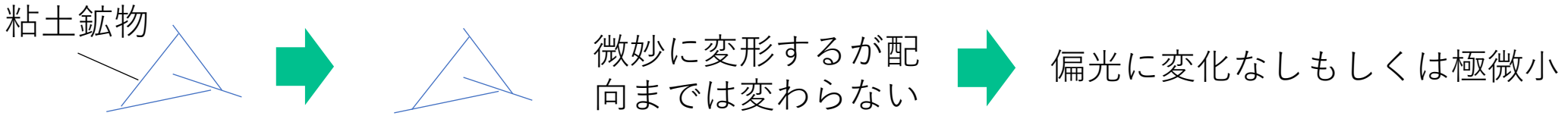
グリーンレーザーの波長帯では、理論上、ε~10^{-6} オーダーのひずみも計測可能

２　地下水の揚水等の影響予測　《東京大学との共同研究》
～塑性変形確率推定法の検証～

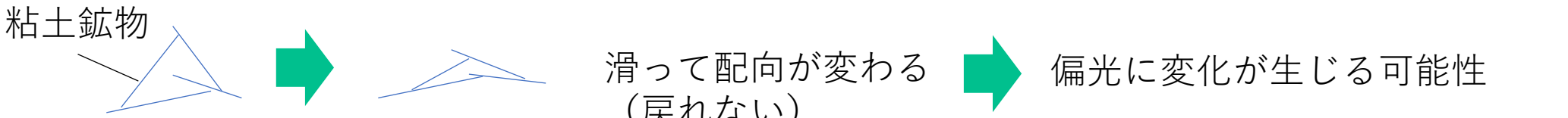
これまでの成果のまとめ（第２段階）③

（２）　偏光イメージングによる塑性変形の直接計測法の検討

弾性変形領域



塑性変形領域



ラポナイトの大変形を偏光イメージにより可視化した例

Bertelsen et al. (2018) Frontiers in Earth Science, 6, 199.

２　地下水の揚水等の影響予測　《東京大学との共同研究》
～塑性変形確率推定法の検証～

これまでの成果のまとめ（第２段階）④

（２）　偏光イメージングによる塑性変形の直接計測法の検討



4角度偏光の光強度データ（$I_0, I_{45}, I_{90}, I_{135}$）

配向角　$\phi = \frac{1}{2}\tan^{-1}\frac{I_{45} - I_{135}}{I_0 - I_{90}}$

複屈折強度　$\Delta = \sqrt{(I_0 - I_{90})^2 + (I_{45} - I_{135})^2}$

仮説

（塑性変形が生じると、この値が水平に近付く）

（塑性変形が生じると、この値が上昇）