

井戸・ボアホール推定 AI システム GM-WELL

ジーエムラボ株式会社 鈴木輝彦・安藤滉平・三軒家宏將・今井紀和・本田明成

要 旨

近年、地盤沈下や地盤の液状化災害が問題視されている。このような災害は、地下水位や地下水の流向・流速といった地下水の挙動と深く関係している。地下水の挙動は、地下水解析を利用する事で推測できるが、従来の地下水解析は多くの作業が必要であった。それに対し人工知能による地質推定機能を搭載した GM-WELL は、簡単（3 ステップの操作）に全国で地下水解析を実施し揚水試験や熱応答試験（TRT）の事前評価が行える。その計算精度は、全国 1 万 8 百箇所の揚水井（以降より、観測井と称する）を対象とした地質推定精度検証と揚水量計算精度検証において実用レベルの計算精度（相関係数 0.77）に達していることが確認された。更には、井戸データ追加機能により実設計領域におけるデータ密度を高くする事で地質推定精度を大幅に向上でき、防災対策や地中熱利用（オープンループ型、クロズドループ型）の設計・施工の効率化が期待できる。

1. はじめに

近年、地球温暖化による水害・土砂災害が頻発しており、今後も増加すると予測されている。2024 年 1 月に発生した能登半島地震では、軟弱地盤において、くい基礎が破壊され高層ビルが倒壊し、地盤の液状化により道路や建造物等広域に被害が起きた事は記憶に新しい。これにより、年々発生確率が高まっている南海トラフ地震の被害軽減にむけた基本計画の見直しが進められている。このような災害（主に地盤の液状化）は地下水の挙動（地下水位や地下水流向・流速）と密接な関係があり、適切な対策工を行うことで被害を防止できる。また、2022 年度より一般社団法人全国さく井協会が地下水利用設計管理技術者資格を策定し地下水を有効かつ適正に利用する為の防災意識が高まっている。

地下水の挙動は、有限要素法による浸透流解析や熱流動解析（以降より地下水解析と称する）を利用する事で推測できるが、従来の地下水解析は、解析領域の設定や水文地質構造の把握、計測・試験データ収集、メッシュ作成、解析条件（物性条件や境界条件）の設定、結果の抽出や図化など多くの作業が必要であった。人工知能による地質推定機能を搭載した GM-WELL を用いる事で、3 ステップの操作でメッシュ作成や解析条件設定、解析実行といった作業がエキスパートシステムにより自動実行される為、誰でも簡単に全国で地下水解析を実施し揚水試験や熱応答試験（TRT）の事前評価が行える。

図 1 に実務における地下水解析フローを示した。左図は一般的な地下水解析フロー¹⁾、右図は GM-WELL を利用した場合の地下水解析フローである。GM-WELL を利用すれば特に手間のかかる「解析領域の設定」から「予測解析」までの工程を 3 分程度で進める事ができる。

本論文では、GM-WELL の実用性確認の為、日本全国の観測井を対象とした地質推定精度検証及び揚水量計算精度検証を実施した。

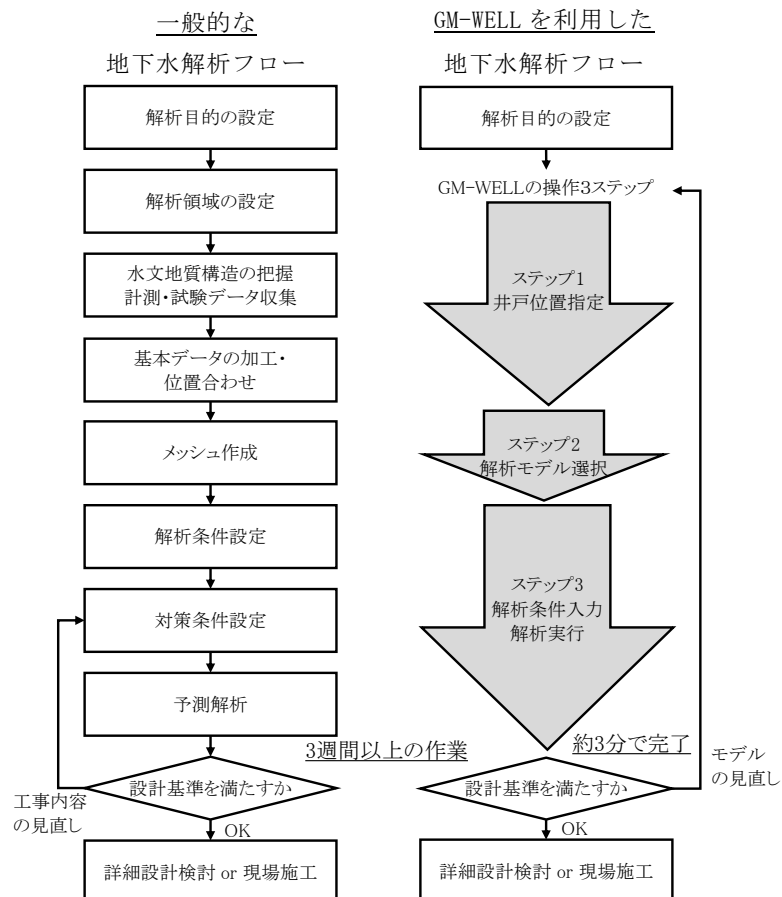


図 1 実務における地下水解析フロー

2. GM-WELL

GM-WELL の地下水解析に必要な操作は図 2 に示すように 3 ステップあり、概ね 3 分で終了する。

ステップ 1. 井戸位置指定では、解析対象とする井戸の位置を地図上からクリックする。

ステップ 2. 解析モデル選択では、解析の目的に応じ、影響圏半径モデルと流域界モデルの 2 種から使用する解析モデルを選択する。

ステップ 3. 解析条件入力&解析実行では、水位低下量を入力する事で、地下水解析結果として揚水量が得られる。

表 1 に、防災対策や地中熱利用等の地下水対策項目に対する GM-WELL の適用項目を示した。GM-WELL では、基本的な地下水解析機能として揚水試験解析が用意されている。その他にオプションとして熱応答試験解析や移流分散解析、熱流動解析があり、汚染拡散対策や地中熱利用（オープンループ型、クローズドループ型）の検討にも対応している。

井戸周辺メッシュ分割は、水平方向、鉛直方向共に動水勾配に対し十分な精度を得られるようにした。

水位境界条件は、解析モデル周辺のメッシュ節点位置に過去の計測データ²⁾から補間した水位を与え影響圏半径モデルでは固定条件とし、流域界モデルでは不透水境界とした。また計算揚水量を求める為、井戸のスクリーン位置に初期水位に対し計測水位低下量分低くした水位を設定した。降水量は過去の降水量を参照し、井戸が属する市町村の降水量を設定した。

三次元メッシュの各要素に割り当てる透水係数は、人工知能による地質推定機能により次のよう

に決定した。初めに砂層や粘土層等全国の代表的な 13 分類の地盤定数³⁾を定めた（表 2 参照）。次に人工知能による地質推定機能により、13 分類の地質が各々有する存在確率（以降より、地質存在確率と称する）を定めた。最後に透水係数は、表 2 にある地質別の透水係数と地質存在確率の加重平均を求め決定した。

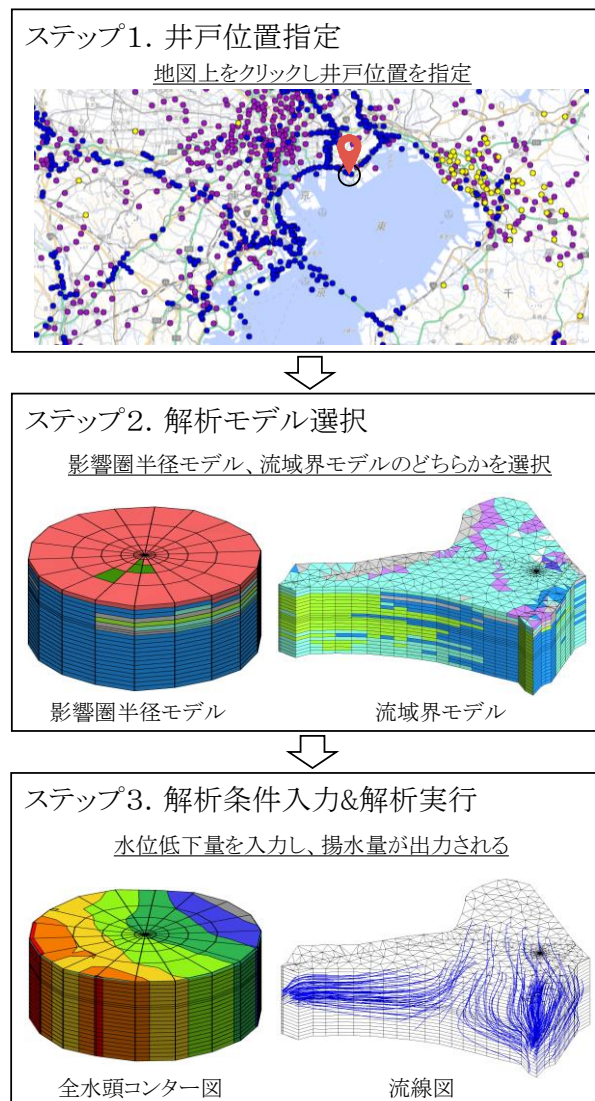


図 2 GM-WELL の操作 3 ステップ

表 1 GM-WELL の適用項目

地下水対策項目	ポテンシャル評価業務				設計業務
	揚水試験解析	熱応答試験解析	移流分散解析	熱流動解析	設計支援解析
液化化	○	-	-	-	△
地盤沈下	○	-	-	-	△
土砂災害	○	-	-	-	△
流動阻害	○	-	-	-	△
汚染拡散	○	-	○	-	△
熱利用設計（オープン）	○	-	○	○	○
熱利用設計（クローズ）	-	○	-	○	○

△：井戸工限定

更に、地域において透水係数に差が生じる為、13分類の地質の内、特に影響が大きくなる地質を対象に全国地域別の透水係数を最適化する補正係数（以降より、地域別補正係数と称する）を設定した。

表 2 13 分類の地盤定数

地質番号	地質分類	透水係数 [m/s]	有効間隙率 [-]
1	表土	1.0E-05	0.15
2	腐植土	1.0E-05	0.40
3	粘土	1.0E-08	0.10
4	ローム	1.0E-06	0.20
5	シルト	3.0E-06	0.20
6	砂	1.0E-04	0.30
7	砂礫	3.0E-04	0.20
8	礫	1.0E-03	0.15
9	岩石	5.0E-09	0.10
10	互層	1.0E-05	0.20
11	岩盤	1.0E-11	0.01
12	火山灰	1.0E-06	0.20
13	不明	1.0E-08	0.25

※地域別補正係数適用前の透水係数

3. 地質推定精度検証

地質推定精度検証の為、観測井の地質と人工知能で定めた地質が同深度で一致するか地質分布と透水係数の生起確率の整理を行った。図 3 には、代表的な 3 地域（北海道、関東、九州）における比較検証結果を示す。X 軸が地質分布と透水係数の生起確率、Y 軸が観測井の度数分布を示す。破線の結果は、地質存在確率第一位の地質と観測井の各地質が一致する精度（地質分布精度）を示す。実線の結果は、地質存在確率 0 以上の地質と観測井の各地質が一致する精度（透水係数精度）を示す。

図 3 の地質推定精度検証結果より、地域別（北海道、関東、九州）の差は見られず、地質分布精度と透水係数精度それぞれで地域によらず同等な傾向となった。

観測井は主に国土交通省：全国地下水資料台帳⁴⁾を参照したが位置座標（緯度経度等の位置座標）が定かでない観測井については住所から位置を定めた。この為、観測井の位置は最大数 km の誤差を含んでいる。

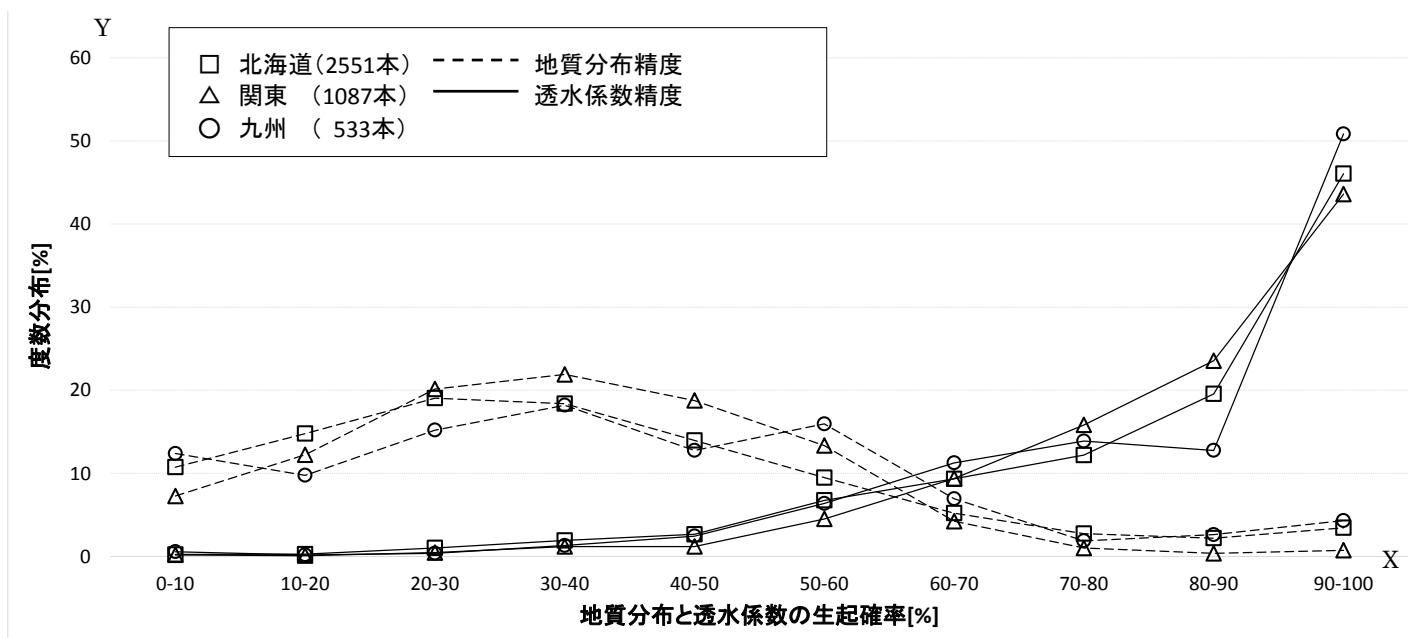


図 3 観測井毎の地質推定精度検証結果

4. 揚水量計算精度検証

地域別補正係数を用いた揚水量計算精度検証の為、観測井を対象に計測揚水量と計算揚水量の比較検証を実施した。

計測揚水量（X 軸）と計算揚水量（Y 軸）の比較検証結果を図 4～図 6 に示す。左のグラフは地域別補正係数の適用前、右のグラフは適用後の結果を示す。グラフ中の斜線は計測揚水量に対する計算揚水量の精度の目安（計測揚水量に対し 0.1～10 倍及び 0.3～3.0 倍程度）となる線である。

相関係数は、計測揚水量と計算揚水量の相関関係を表す数値であり -1 から 1 の間で推移する。相関係数は 0 に近づくほど相関関係がなく、-1 に近いほど負の相関、1 に近いほど正の相関がある。

相関係数 r は式(1)より求めた。また相関係数の一般的な基準を表 3 に示す。本検証の場合、計算揚水量と計測揚水量が近い値となる程、精度が高い（相関係数は、1 に近づく）。

$$r(x,y) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad \dots\dots(1)$$

ここで、 x は観測井別の計算揚水量、 y は観測井別の計測揚水量、 $\bar{x}, \bar{y}$ は x, y それぞれの平均値、 i は観測井番号である。

表 3 相関係数基準値

相関係数	解釈
0.0～0.2	ほとんど相関関係がない
0.2～0.4	やや相関関係がある
0.4～0.7	かなり相関関係がある
0.7～1.0	強い相関関係がある

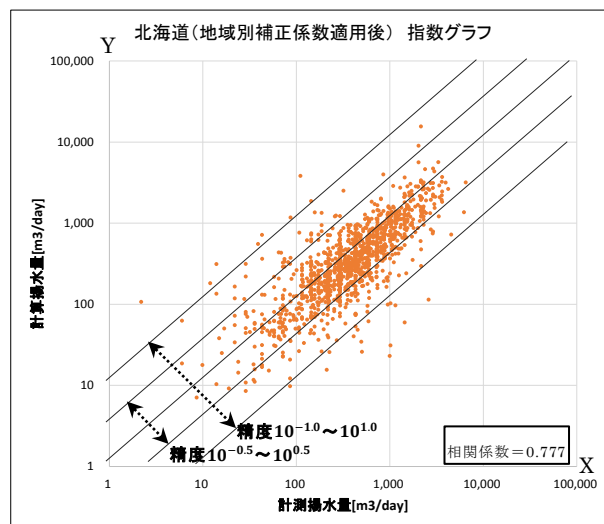
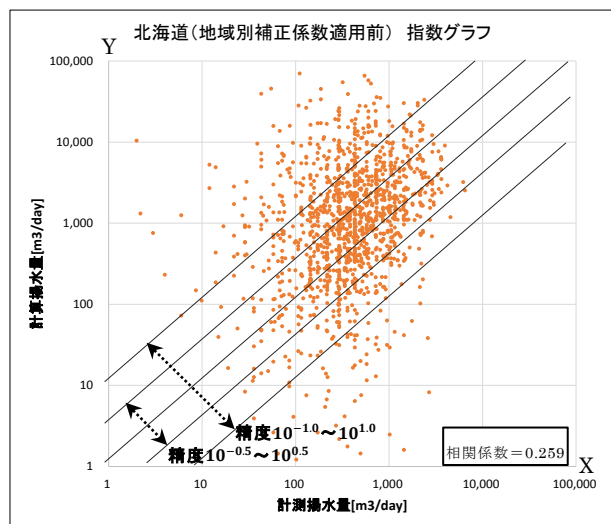


図 4 揚水量比較結果 北海道

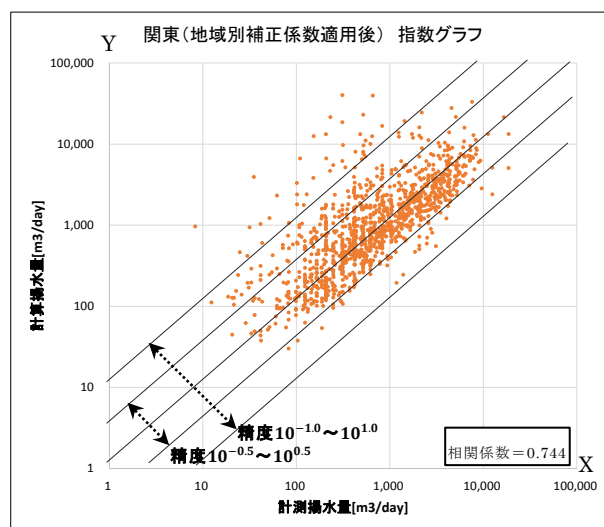
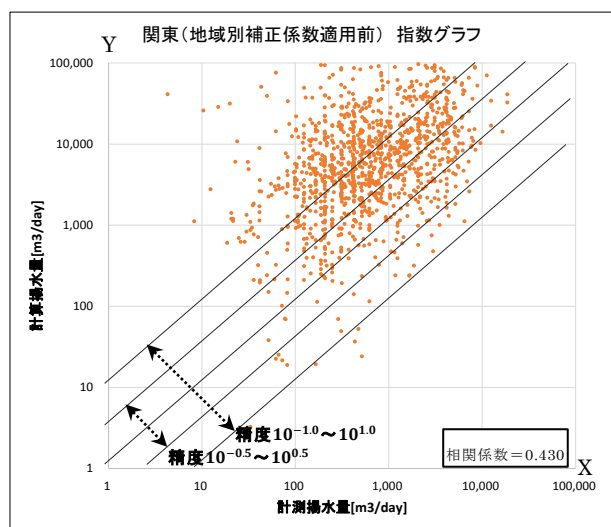


図 5 揚水量比較結果 関東

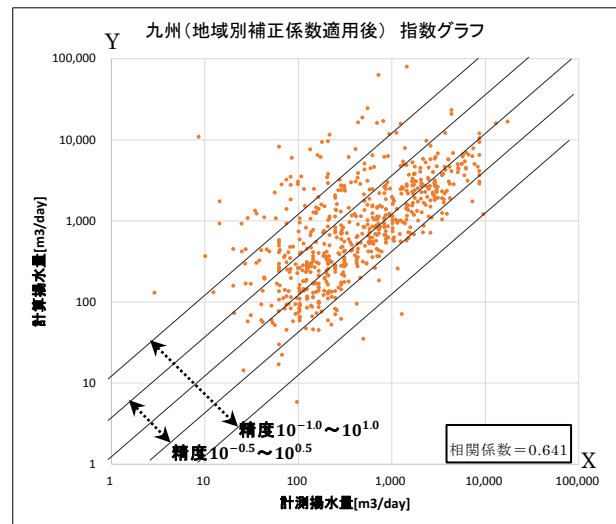
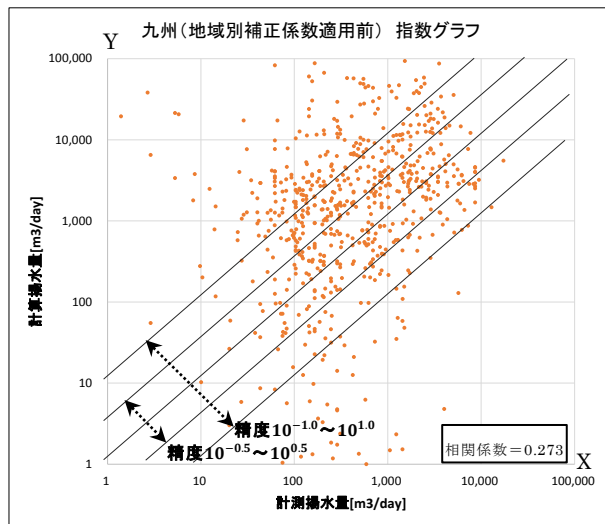


図6 揚水量比較結果 九州

5. 考察

GM-WELL の実用化検証の為、地質推定精度検証及び揚水量計算精度検証を実施した。

図3の地質分布精度については、水平方向に少しずれただけで地質存在確率が変化する為、生起確率が低めに評価される条件となる。一方透水係数精度は、生起確率が高めに評価される条件となる。その後に実施した図4～図6の揚水量計算精度検証結果の相関係数は0.77に達し計測揚水量と計算揚水量は強い相関関係があった。このことから、透水係数精度についても高い精度が得られた事が確認できた。

また図4～図6の揚水量計算精度検証より、地域別補正係数の適用前と適用後と比較すると相関係数が0.3～0.5程度上昇しており、地域別補正係数は有効だと確認できた。

図5、図6では計測揚水量よりも計算揚水量の方が高い傾向が見られた。これは人工知能による地質推定時に、井戸最深部より下方の要素に割り当たる透水係数に実際より高い透水係数が割り当てられている事が原因である。具体的な一例として、山麓部などデータ密度が低い地点の浅井戸（岩盤が地表面近くまで隆起している場所）の深部の地質（本来岩盤）が周辺観測井の地質（扇状地や平野部の高透水性の地質）に置き換わってし

まうことが確認されている。

地質推定精度検証と揚水量計算精度検証において実用レベルの計算精度（相関係数0.77）に達していることが確認された。更には、井戸データ追加機能により実設計領域におけるデータ密度を高くする事で地質推定精度を大幅に向上でき、防災対策や地中熱利用（オープンループ型、クローズドループ型）の設計・施工の効率化が期待できる。さらに精度を向上させ全国規模の防災対策に貢献する為には、位置が明確な井戸位置データ（数秒～数十秒単位の精度を有する緯度・経度データ）の入手が必要である。

参考文献

- 1) 日本地下水学会（2010）：地下水シミュレーション・これだけは知っておきたい基礎理論、26p
- 2) 越谷 賢・丸井敦尚（2011）：日本全国の地盤調査ボーリングデータを用いた地形・地質条件に基づく地下水面の推定、日本地下水学会誌、53、179～191.
- 3) 岡山地下水研究会（2003）：実務者のための地下水環境モデリング、28p、292～293p
- 4) 国土交通省：全国地下水資料台帳調査、
https://nlftp.mlit.go.jp/kokjo/inspect/landclassification/water/f9_exp.html