

学 位 論 文 題 名

Geostatistical Reservoir Modeling of Trending Heterogeneity Specified in Focused Recharge Zone: A Case Study of Toyohira River Alluvial Fan, Sapporo, Japan

(伏没涵養帯に着目した帯水層の漸移異質性に関する地球統計学的
モデリング - 豊平川扇状地を例として -)

学位論文内容の要旨

近年の気候変動や人口急増は世界各地、とりわけ乾燥・半乾燥地域において深刻な水資源不足を招いている。粗粒な沖積層は乾燥地域における貴重な地下水貯留層だが、その賦存量は有限で、かつ地下水位の低下や汚染の影響はその高透水性ゆえ広範囲に及ぶ。持続的な地下水の利用・開発を目的とした地下水モデリングでは、透水性の空間変化の再現が最大の課題である。特に地球統計学的手法はデータの不足と不確定性を考慮する点で決定論的手法に比べ優位だが、粗粒な沖積層ではその漸移異質性によって必要な定常性仮定を満たさない。オーダー変化する透水係数の空間変動から巨視的トレンドを抽出するには、多数の原位置データが必要であるため、特に深部方向の漸移異質性のモデル化はほとんど行われていない。

本研究の目的は、豊平川扇状地における扇状地礫層の漸移異質性、特に鉛直方向のトレンドを明らかにするとともに、地球統計学的モデリングを通じて、漸移異質性に起因する複雑な地下水流動や物質移送が定量的に再現可能なことを示すことである。この目的に対し、本研究は河川沿いの伏没涵養帯に着目した。伏没涵養帯は涵養量や範囲の特定が可能な点で、降雨による面的涵養と区別される。河床から鉛直方向に浸透した地下水流は深部への浸透過程で異質性の影響を受け様々な速度・方向に変化する。特に透水性が深度減衰する漸移異質性下では、地下水流が浅層部に集中し、深層部で定常となる。また地下水温は表流水との変化コントラストが大きく、伏没涵養帯内での良好なトレーサーになりうる。この水位・水温分布を伏没涵養帯内で密に測定、解析することで、漸移異質性の詳細な評価が可能となる。

まず豊平川扇状地における伏没涵養帯を特定するため、地下水面標高と鉛直動水勾配のマッピングを行った。既設井戸の水位は異なる時期や深度で観測されており、そのマッピングには不確定性を伴う。このため長期観測データの変動分析を踏まえたフィルタリングとクリギング法を組み合わせることで、より信頼性の高いマップを得た。特にスクリーンが複数設置される深井戸の場合、観測水位が代表する深度の特定は困難なため、スクリーンの上端、中間、下端の各深度でマッピングを行い、交差検証法により最も妥当なマップを選定した。

次いで、伏没涵養帯の区間と伏没量を把握するため、豊平川にて同時流量観測を実施した。豊平川の流量観測は、礫床河川に特有の複雑な水深・流速の分布によって大きな観測誤差を伴い、これまで伏没量の定量評価が困難であった。本研究では、可搬式ドップラー流速計の採用と流速測定測線の細密化を組み合わせた観測法を考案した。扇頂から扇端まで河川流量を連続的に観測し、流量の縦断分布とその変化から伏没区間と伏没量を特定した。

本研究では、特殊サンプラーで採取した不攪乱試料を用いた礫質土の透水係数モデルを導出し、透水係数の深度プロファイルとそのトレンドを推定した。不攪乱試料の礫間の細粒部の充填度（基質充填度）を4段階（I～IV）に分類し、高充填部の透水性は粒径の二乗、低充填部の透水性は分布長の二乗に比例するとした合成透水係数モデルを導き、試料採取深度での現場透水試験の実測値を再現するようパラメータの最適化を行った。次いで、透水係数モデルを扇頂、扇央、扇端の連続コアに適用し、対数透水係数の深度プロファイルとし、更

に推定誤差を緩和する移動平均を施して、対数透水係数の移動平均と深度との回帰分析を行った。この回帰式を変換し、透水係数の鉛直トレンドが指数減衰式として導かれた。

推定した鉛直トレンドに地球統計学的手法を組み合わせることで、漸移異質性を反映した多数の透水係数分布が生成できる。生成した透水係数分布を用いて水位・水温分布を計算し、観測値との再現性を比較評価することで、漸移異質性モデリングの重要性が示される。解析に先立ち、伏没涵養帯内の地下水観測井を利用し、水位・水温の連続観測が行われた。解析モデルは、観測測線に沿った断面二次元領域での有限差分モデルとし、かつ河道から観測孔間を1mグリッドの高解像度モデルとした。計算には、水温変化に伴う透水性の変化を忠実に反映できる地下水・水温移送の連成解析プログラムを用いた。透水係数分布は、トレンドを除いた残差成分を条件付ガウスシミュレーションによって100パターン生成し、指数減衰式による鉛直トレンドを加え、漸移異質の透水係数分布とした。また同じ残差成分に深度平均（一定）を加え、対比する定常異質の透水係数分布とした。他の不確定条件（セルの異方性、河床の透水性、河床幅、熱拡散係数の異方性、バリオグラムのレンジ、流体物性の温度依存性、ブロック平均の影響）も比較した計13ケースを設定し、各100パターンの透水係数分布での水位・水温分布を計算した。計算誤差が基準以下となる透水係数分布パターンを各ケースで抽出することで、解析条件が再現性に与える影響を比較・考察した。

以上から、本研究によって明らかになった事項は以下のとおりである。

- ・ 豊平川扇状地では、都市化の影響を反映した負（下向き）の鉛直動水勾配が全体を占める。扇央～扇頂部の河川沿いは伏没涵養と水理地質構造を反映した負のピークが認められた。
- ・ 伏没涵養帯は南大橋付近～南19条大橋付近の約1.5km区間に特定され、伏没量は約 $1\text{m}^3/\text{s}$ と見積もられた。同量は日量に換算し、札幌市の全地下水揚水量の約8割に相当する。
- ・ 不攪乱試料の低充填部（基質充填度Ⅲ、Ⅳ）は、採取深度における高透水な水みちを反映する。特に扇頂～扇央では深度30m以浅に集積し、深度とともに急減する傾向があった。
- ・ 扇状地礫層の単位深度の透水係数 $\bar{K}$ (m/s)は、不攪乱試料の重量百分率20%粒径 d_{20} (m)と基質充填度Ⅰ～Ⅳの分布長を $L_1 \sim L_4$ (m/m)を用い、下式のようにモデル化された。

$$\bar{K} = 6.89(d_{20}/1,000)^{1.9}(L_1 + L_2) + 0.0167L_3^3 + 1.87L_4^3$$

- ・ 透水係数の鉛直トレンドは、扇頂～扇央部にて深度 Z (m)、地表での透水係数を $\bar{K}_0$ (m/s)とし、以下の指数減衰式が得られた。なお扇端部では明瞭なトレンドは認めなかった。

$$\bar{K} = \bar{K}_0 \exp(-AZ) = 10^{-23} \exp(-0.11Z) \quad \text{at } Z < Z_0 = 30\text{m}$$

減衰項 $A = 0.11(\text{m}^{-1})$ は岩盤での一般値の10～1,000倍に達し、深度30mで収束する。この深度トレンドは、扇状地形成時の急激な堆積と、堆積後の間隙構造の変化を反映する。

- ・ 透水係数の水平トレンドは扇央で最大となる「こぶ構造」が推定されたほか、その残差成分のバリオグラムはレンジが水平1,000m、鉛直20mとなり、強い異方性が認められた。
- ・ 漸移異質条件下では透水係数分布の幾つかは、基準誤差以内で観測値を再現できた一方、定常異質条件下での透水係数分布はいずれも基準誤差を満たすことはできなかった。また他条件を変えた場合も再現性に与える影響は、漸移異質性の有無ほど大きくなかった。以上から、伏没涵養帯内の複雑な地下水流動場を再現するための漸移異質性モデリングの重要性と、推定した鉛直トレンド（指数減衰式）の妥当性が明らかとなった。
- ・ 高解像度モデルで基準誤差を満たす透水係数分布をブロック平均（5m解像度）した場合、計算水位・水温は基準誤差を満たさなかった。広域モデルへのアップスケーリングでは、単純なブロック平均では不十分であり、異方性を含む合成処理が必要なが分かった。

最後に将来計画として、扇状地全体の三次元広域モデリングの発展に向け、解決すべき諸課題（水理地質構造、面的涵養、都市化、アップスケーリング）とその解決方針を議論した。

学位論文審査の要旨

主査	特任教授	池田隆司
副査	教授	日置幸介
副査	教授	鈴木徳行
副査	准教授	知北和久

学位論文題名

Geostatistical Reservoir Modeling of Trending Heterogeneity Specified in Focused Recharge Zone: A Case Study of Toyohira River Alluvial Fan, Sapporo, Japan

(伏没涵養帯に着目した帯水層の漸移異質性に関する地球統計学的
モデリング – 豊平川扇状地を例として –)

博士学位論文審査等の結果について（報告）

近年の気候変動や人口急増は世界各地，とりわけ乾燥・半乾燥地域において深刻な水資源不足を招いている．粗粒な沖積層は乾燥地域における貴重な地下水貯留層だが，その賦存量は有限で，かつ地下水位の低下や汚染の影響はその高透水性ゆえ広範囲に及ぶ．そのため，持続的な地下水の利用・開発を目的とした地下水モデリングが盛んに行われている．しかし，その多くは透水性の空間変化の再現が最大の課題となっており，これを如何に推定し検証するかが問われている．オーダー変化する透水係数の空間変動から巨視的トレンドを抽出するには，多数の原位置試験データが必要であり，特に鉛直方向の漸移異質性のモデル化はほとんど行われていない．本論文は，このような現況にある透水係数分布について，豊平川扇状地の伏没涵養帯に着目し，鉛直動水勾配のマッピング，礫床河川での同時流量観測，礫質土の透水係数モデルの構築，熱移送モデルの確率的シミュレーションを行うことで，基礎的な問題と実用的なモデルの構築を目的としている．さらに，帯水層の漸移異質性が複雑な地下水流動場とその物質移送に与える影響とともに，地下水モデルに反映すべき重要性について研究したものである．

本研究の成果，および評価は以下のとおりである．

・豊平川扇状地では，都市化に伴い流出域が消失し，鉛直下向きの動水勾配が支配的であった．特に扇央部の河川沿いは，伏没涵養帯を反映する下向きの動水勾配ピークが認められた．これは，膨大な既存井からのデータを統計的に処理する事により得られたものであり，優れたデータ処理能力が発揮されている．

・伏没量は、南大橋付近～南 19 条大橋付近の約 1.5km 区間で約 $1\text{m}^3/\text{s}$ と見積もられた。同量は日量に換算し、札幌市の全地下水揚水量の約 8 割に相当する。これは、現場での検証を自らの測定で行ったもので、観測能力にも長けていると評価される。

・不攪乱試料の低充填部（基質充填度Ⅲ、Ⅳ）は深度 30m 以浅に集積し、深度とともに急減した。この低充填部の分布深度では、現場試験での透水係数が著しく高い傾向にあった。また、不攪乱試料から、透水係数 $K(\text{m/s})$ について、不攪乱試料の重量百分率 20% 粒径 $d_{20}(\text{m})$ と基質充填度Ⅰ～Ⅳの分布長を $L_1 \sim L_4(\text{m/m})$ を用いて定式化した。さらに、透水係数の鉛直トレンドを定式化することに成功した。これらは、現位置でのサンプリング、実験室での分析、および統計的处理を組み合わせ得られたものであり、独創性と新知見が随所に見られる。

・透水係数の水平トレンドは、縦断方向(南北方向)では扇央部で最大となる「こぶ構造」が認められたが、横断方向には顕著なトレンドは認められなかった。断面二次元モデルは横断方向に相当するため、透水係数分布は鉛直方向の漸移異質性のみ仮定し作成した。この漸移異質性を仮定し発生させた透水係数分布からは、観測水位・水温を再現できるパターンが幾つか得られた。一方、定常異質性を仮定した透水係数分布からは、観測値を再現できるパターンは得られなかった。また他条件を変化させた場合の再現結果への影響も漸移異質性の有無に比べて顕著で無かった。以上から、伏没涵養帯の複雑な水位・水温分布には礫層の漸移異質性が支配的に係わり、そのモデル化が重要なことが明らかとなった。これらは、モデルの構築と巧みな数値解析の結果であり、不確定性の高い問題に対して新しいアプローチによる明確な答えを示したものと評価される。

これを要するに、著者は透水係数の鉛直トレンドとして指数減衰モデルを提唱し、伏没涵養帯内での透水係数分布の地球統計学的な推定を通じて、砂礫層の漸移異質性が複雑な水位分布・水温移送に支配的に係わっていることを明らかにしたものである。これらのことは、粗粒な沖積層の地下水モデリングにおける地下水流動・物質移送に係わる新知見を得たものとして、地下水学、地盤工学、陸水学、水文学等の諸分野に幅広く貢献するところ大なるものがある。また本研究成果は既に、国内外の学会や専門誌で発表されており高い評価を得ている。

よって、著者は、北海道大学博士（理学）の学位を授与される資格あるものと認める。