

13. 富山規制地域を対象とした非定常3次元地下水モデルの水理パラメータの同定

山川 夏葵^{1*}・松浦 拓哉²・手計 太一³

¹富山県立大学 工学部 環境・社会基盤工学科 (〒939-0398 富山県射水市黒河5180)

²富山県立大学大学院 工学研究科 環境工学専攻 (〒939-0398 富山県射水市黒河5180)

³富山県立大学大学院 准教授 工学研究科 (〒939-0398 富山県射水市黒河5180)

* E-mail: t617040@st.pu-toyama.ac.jp

本研究の目的は富山規制地域を対象に地下水モデルの透水係数、比貯留係数のパラメータを同定することである。気候値はSI-CATの中で実施された、データを使用した。富山規制地域内に位置する地下水の観測井3地点を基に感度分析を実施した。3地点の地下水位の観測値は11月から4月にかけて、消雪揚水の影響で地下水位の変動が大きく、それ以外では地下水位の変動が少ないことがわかった。本研究では、5月から10月の平時の地下水位を用いて感度分析を実施した。その結果、透水係数を変化させた場合は地下水位は上昇傾向であり、地下水が溜まる結果となった。一方、比貯留係数を変化させた場合、観測値を概ね再現することができ、透水係数よりも比貯留係数の方が影響を及ぼすことが分かった。

Key Words : groundwater level, hydraulic conductivity, specific storage, Toyama, Dtransu

1. はじめに

水資源管理を進める上で、地下水の流速、流量、流動といった地下水の挙動を正確に把握し、評価することは重要であり、これらを評価する手法として、数値シミュレーション技術は有用な手段の一つである。

透水係数、比貯留係数といった水理パラメータは地質学的に同一である帯水層において大きく変動することが明らかになっている。例えば、透水係数は透水試験によって得られるが、局所的なデータであり、解析領域全域の透水係数を把握することは困難である。従って、数値解析を行う際、水理パラメータは地質学的に同一と見なすことができる帯水層において、一定値として解析されることが多い。

水理パラメータの設定方法としては、従来、逆解析法を用いた手法が良く用いられる。例えば、斎藤・川谷(2001)は指数関数モデル、自己回帰モデル、べき乗モデル、1/f型モデルによって生成される透水係数の空間分布の統計的性質について比較検討した。解析スケールの変化や解像度を変化させた場合、統計的性質が変化し透水係数の空間分布が変化することを明らかにし、1/f型モデルでは解析スケールや解像度の影響を受けず良好な

再現結果が得られると明らかにしている¹⁾。藤間・中田(1986)は透水係数の同定過程を数理的に定式化し、最適化手法により空間分布構造の最良近似式を確立した。その結果、地下水位観測データのみから実用上支障のない推定精度で透水係数の空間分布を把握することができることを明らかにした²⁾。北・手計(2015)は揚水試験結果が存在する11地点の観測井を対象に、地下水位の観測結果に合わせるように、透水係数と比算出率の逆推定を行った。その結果、被圧地下水の場合、パラメータの逆推定は困難であると示している。一方、不圧地下水ではパラメータの逆推定は可能であると明らかにしている³⁾。柿沼ら(1985)は定常3次元分散モデルを用いて、塩化物イオン濃度の観測値と解析値の比較を行い、分散係数の同定をした⁴⁾。

本研究の目的は富山規制地域を対象に非定常3次元地下水モデルの透水係数、比貯留係数のパラメータを同定することである。本研究対象地域である富山県では、尾田ら(2018)によると、富山県域の降雪量は減少傾向であり、特に平野部の積雪深は有意水準5%で減少傾向であることが明らかになっている⁵⁾。気候変動がもたらす気温上昇により、降雪として降るはずだった分が降雨に変化するという降水形態の変化が指摘されている。降水

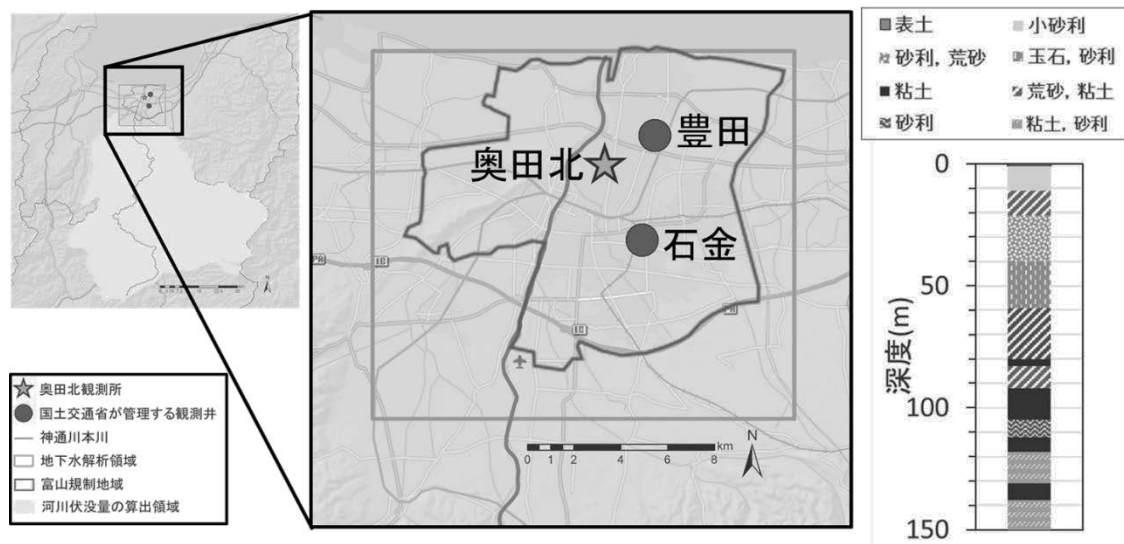


図-1 富山規制地域と「奥田北観測所」の柱状図

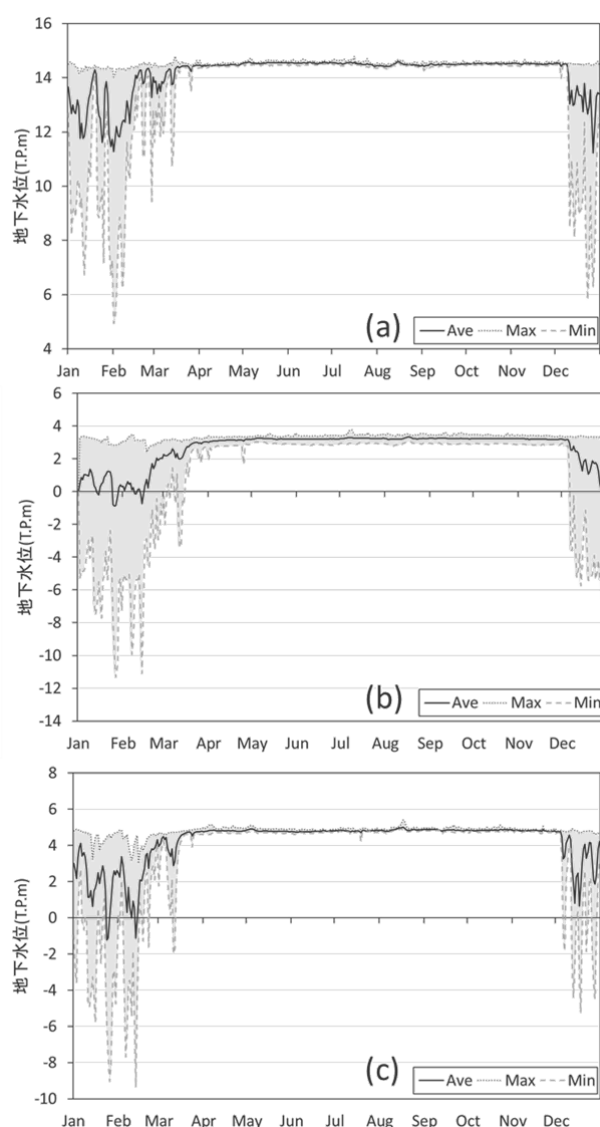


図-2 富山規制地域に位置する地下水観測井の地下水位の最大値、平均値、最小値の時系列(a: 石金, 観測値: 2002~2007年)(b: 豊田, 観測値: 2002~2019年)(c: 奥田北, 観測値: 2013~2018年)

形態の変化による地下水の流動の変化, 消雪揚水といった揚水量の変化は地下水の塩水化, 地盤沈下といった地

下水障害を引き起こし, 地下水環境に多大な影響を与えると考えられる. 以上を鑑み, 本研究では, 富山規制地域を対象に気候変動が地下水環境に与えた影響を推定するための前段階として, 気候モデル MRI-CGCM3 の現在気候を用いて, 透水係数と比貯留係数のパラメータの同定結果を報告する.

2. 地下水モデルの概要

本研究では岡山大学の西垣教授, 三菱マテリアル(株), (株)ダイヤモンドコンサルタント共同開発のDtransu-3D・EL (Density Dependent Transport Analysis Saturated Unsaturated Porous Media - 3 Dimensional Eulerian Lagrangian Method)を使用し, 地下水解析を実施した. 浸透量方程式は以下の通りである.

$$\rho_f \theta \gamma \frac{\partial c}{\partial t} + \rho \{ \beta S_s + C_s(\theta) \} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \{ \rho K_{ij}^S K_r(\theta) \rho_r \} \quad (1)$$

ここで, φ は圧力水頭, θ は体積含水率, S_s は比貯留係数, $C_s(\theta)$ は比水分容量, K_{ij}^S は飽和透水テンソル, $K_r(\theta)$ は比透水係数, c は濃度($0 \leq c \leq 1$, 飽和濃度を1として正規化), ρ_f は溶媒の密度, ρ は流体の密度, ρ_r は溶媒の密度に対する流体の密度比(ρ/ρ_f), $\beta=1$ の時は飽和領域, $\beta=0$ の時は不飽和領域, γ は溶質の密度比である.

3. 富山規制地域と地下水解析領域

図-1は1976年3月に制定された, 富山規制地域⁶⁾と地下水解析領域を示す. 図-1には国土交通省が管理している「豊田」, 「石金」と富山県が管理している「奥田北」の地下水の観測井の位置と奥田北の柱状図も示した. 規制地域とは, 地下水採取に伴う障害が生じた地域と生じる可能性がある地域において, 揚水設備と集水量を規制

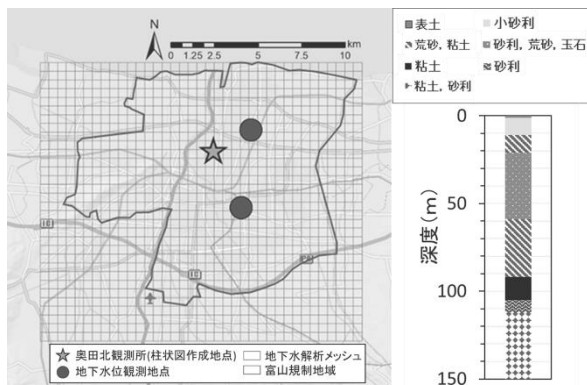


図-3 地下水解析モデルの水平メッシュと鉛直方向の層構造

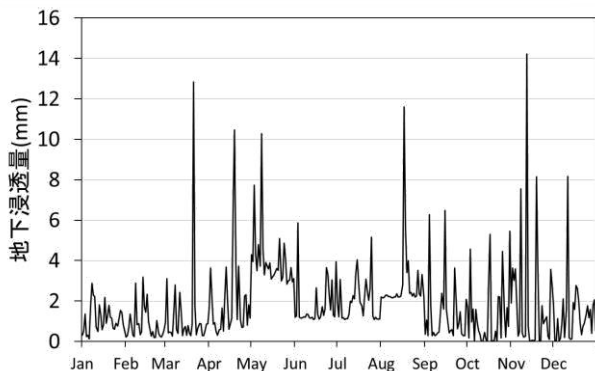


図-4 1981年における地下水解析領域内の地下浸透量の推定結果(気候モデル：MRI-CGCM3)

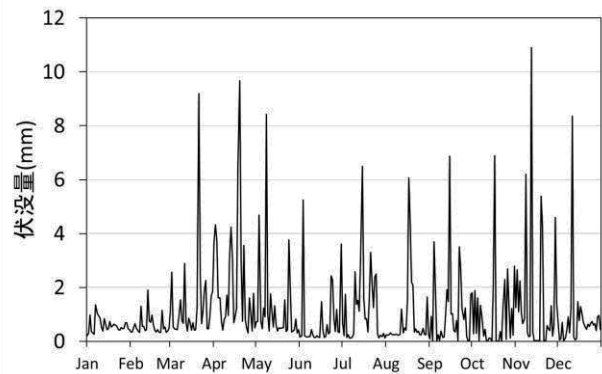


図-5 1981年における神通川本川からの伏没量の推定結果(気候モデル：MRI-CGCM3)

する条例である⁹⁾。その中でも富山地域にあたる富山規制地域を本研究では、地下水解析領域とした。図-2は富山規制地域内に位置する観測井の観測期間内の地下水位の最大値、平均値、最小値の時系列を示す。「石金」，「豊田」，「奥田北」の地下水位の観測データはそれぞれ、2002年から2007年，2002年から2019年，2013年から2018年である。3地点ともに11月から4月にかけて，地下水位の変動が大きいことがわかる。これは，消雪ポンプの使用によるものである。一方，それ以外の5月から10月の地下水位の変動は少なく，3地点ともに同様な傾向である。本研究では，5月から10月の消雪ポンプの使用の影響がない，平時の5月から10月の地下水位の観測値を用いて，透水係数，比貯留係数のパラメータ同定を実施した。

表-1 透水係数を変化させた感度分析の解析 Case

帯水層	比貯留係数	透水係数(cm/s)				
		Case.1	Case.2	Case.3	Case.4	Case.5
表土	1.E-04	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
小砂利	1.E-04	1.E-10	1.E-08	1.E-06	0.001	0.1
荒砂, 粘土	1.E-04	1.E-06	1.E-06	1.E-06	1.E-06	1.E-06
砂利, 荒砂, 玉石	1.E-04	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
粘土	1.E-04	1.E-06	1.E-06	1.E-06	1.E-06	1.E-06
砂利	1.E-04	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
粘土, 砂利	1.E-04	1.E-04	1.E-04	1.E-04	1.E-04	1.E-04

表-2 比貯留係数を変化させた感度分析の解析 Case

帯水層	透水係数 (cm/s)	比貯留係数				
		Case.6	Case.7	Case.8	Case.9	Case.10
表土	0.5	0.2	0.6	0.01	0.6	0.999
小砂利	0.001	0.2	0.6	0.01	0.6	0.999
荒砂, 粘土	1.E-06	1.E-04	1.E-04	1.E-04	0.01	0.999
砂利, 荒砂, 玉石	0.01	1.E-04	1.E-04	1.E-04	0.01	0.999
粘土	1.E-06	1.E-04	1.E-04	1.E-04	0.01	0.999
砂利	0.01	1.E-04	1.E-04	1.E-04	0.01	0.999
粘土, 砂利	1.E-04	1.E-04	1.E-04	1.E-04	0.01	0.999

図-3 は地下水解析モデルの水平メッシュと鉛直方向の層構造を示す。本研究の解析領域は東西方向に 18.5 km，南北方向に 16 km で作成し，メッシュ間隔は 500×500 m で作成した。鉛直方向の層構造は奥田北(図-1)の柱状図を基に 8 層で構築し，全メッシュ一様に与えた(節点数：11286 点，要素数：9472 メッシュ)。

4. 境界条件と解析条件

地下浸透量と表面流出量の推定に利用した気候値は文部科学省気候変動適応技術社会実装プログラム(SI-CAT: Social Implementation Program on Climate Change Adaptation Technology)の中で，国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構が1 kmメッシュにダウンスケーリングしたものを利用した。使用した気候値は1981年の1年間の降水量，気温，日射量を用いた。気候モデルはMRI-CGCM3である。地下浸透量と表面流出量の算出には，松浦ら(2018)の水収支モデルを用いて算出した⁷⁾。計算時間間隔は日である。

図-4は1981年における解析領域の地下浸透量の推定結果である。地表からの浸透量の境界条件は水収支解析で得られた地下浸透量の結果を解析領域の全域に与えた。

図-5は1981年における伏没量の推定結果である。神通川からの伏没量は実験的に黒部川の伏没率を用いて算出した。算出方法は竹内らの伏没量の推定結果に年間河川流量を除算することで伏没率を算出した⁸⁾。その後，解

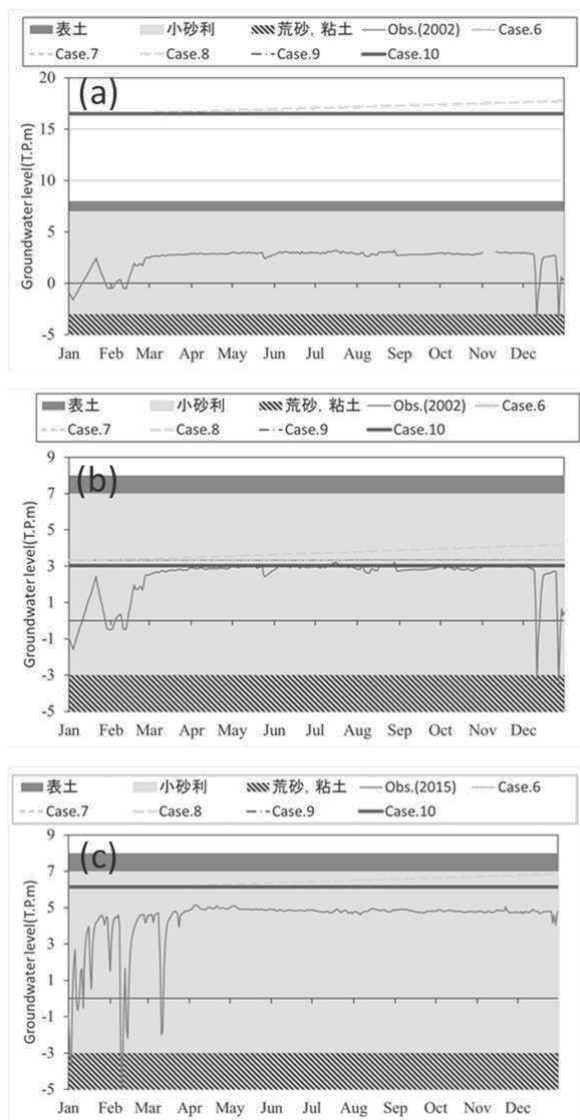


図-6 1981 年における Case.1～Case.5 の地下水位解析結果と各観測井戸における日平均地下水位との比較(a：石金，観測値：2002 年)(b：豊田，観測値：2002 年)(c：奥田北，観測値：2015 年)

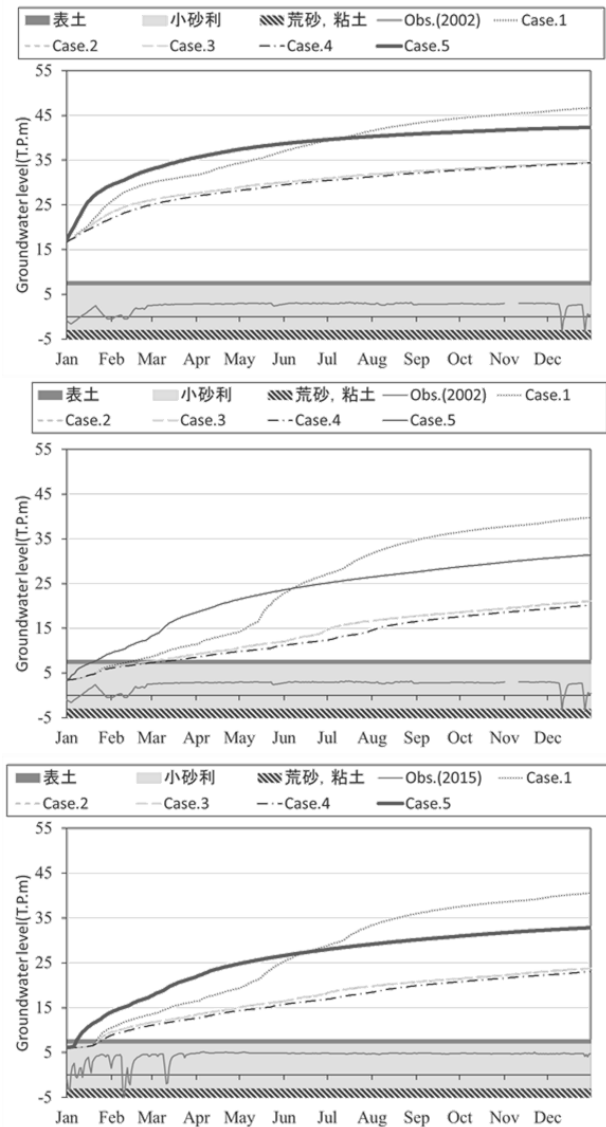


図-7 1981 年における Case.6～Case.10 の地下水位解析結果と各観測井戸における日平均地下水位との比較(a：石金，観測値：2002 年)(b：豊田，観測値：2002 年)(c：奥田北，観測値：2015 年)

析領域の集水域に該当する表面流出量と地下浸透量の総和に伏没率を乗じることで、伏没量を算出した。

表-1，表-2は水理パラメータの感度分析の条件である。Case.1～Case.5は第一帯水層の小砂利の透水係数を変化させて感度分析を実施した。Case.6～Case.10は帯水層毎の透水係数と比貯留係数の条件を組み合わせで感度分析を実施した。

5. 感度分析の結果

図-6はCase.1からCase.5における「石金」，「豊田」，「奥田北」の3か所の観測井の解析結果と地下水位の比較である。解析結果は1981年の気候値データを用いた解析結果を示す。観測値は各観測井，消雪揚水稼働時期

(11月から3月)の区間以外の各年毎の地下水位の変動は少ないため、「石金」と「豊田」は2002年の観測値を利用し、「奥田北」は2015年の観測値を利用した。地下水位の観測値と層構造を比較すると、各観測地点の地下水位の観測値は第一帯水層(小砂利)の層である。従って、第一帯水層の透水係数を変化させて感度分析を実施した。図-6より、全層比貯留係数を 1.0×10^4 一定で与え、Case.1からCase.5の透水係数を与えた結果、全Caseで右肩上がりで上昇することが分かった。その要因としては、層一定に与えた、比貯留係数が低く地下水が溜まり地下水位が上昇したと考えられる。Case.番号が進むにつれ、地下水位が低下する結果が得られ、Case.4の場合最も地下水位の観測値に近づく。第一帯水層の透水係数をCase.4の 0.001 cm/s 以上に高くとした場合、地下水位が上昇する結果が得られた。従って、Case.4の透水係数の

パラメータを用いて比貯留係数の感度分析を実施した。

次に、比貯留係数を変化させ、透水係数と同様に感度分析を行った。図-7 は Case.6 から Case.10 における「石金」, 「豊田」, 「奥田北」の3か所の観測井の解析結果と地下水位の比較である。解析結果は1981年の気候値データを用いた解析結果を示す。図-6と比較して図-7はCase.8を除いた全てのCaseで地下水位の右肩上がりではなく、年間を通して一定値であった。一方、Case.8のパラメータで計算した結果、図-6と比較して、上昇量の傾きは抑えることが出来たが、図-6と同様に上昇傾向であった。従って、比貯留係数は0.01以上に設定する必要があることが明らかになった。観測地点毎に比較した場合、「奥田北」と「豊田」の地点では地下水位の解析値と観測値が概ね同様な値であった。一方、「石金」の地点では解析値と観測値を比較した場合、解析値の方が13m高い結果が得られ、扇央部では、地下水位の再現性が低いことが分かった。

なお、冬季の揚水量を考慮していないため、冬季の地下水位の変動は再現できていない。

6. まとめ

本研究の目的は富山規制地域を対象に非定常3次元地下水モデルの透水係数、比貯留係数のパラメータを同定することである。降水量、気温、日射量の気候値はSI-CATの中で実施された1981年のデータを使用した。なお、使用した気候モデルはMRI-CGCM3である。

地下水解析で得られた地下水位の妥当性を評価するために、「石金」, 「奥田北」, 「豊田」の3地点の地下水位の観測データを用いて実施した。3地点の観測井の地下水位は11月から4月にかけて、消雪揚水の影響により地下水位の変動が大きく、5月から10月の地下水位の変動は少ない季節変動が確認された。従って、本研究では、消雪ポンプの影響がない、5月から10月の観測値を用いて感度分析を実施した。

地下水位の観測値を基に、透水係数と比貯留係数のパラメータを感度分析した結果、全層比貯留係数を 1.0×10^{-4} で一定にし、透水係数のみを変えて感度分析をした結果、すべてのCaseで上昇傾向にあり、透水係数よりも比貯留係数の方が影響を及ぼすことが分かった。

比貯留係数の感度分析では、比貯留係数を0.01以下

にした場合、地下水位の解析値は上昇傾向にあることが分かった。一方、それ以上の比貯留係数にした場合は全観測地点で、年間の地下水位の変動が少なく、地下水位をおおむね再現できた。

今回の感度分析では、比貯留係数が1に近いパラメータが水位上昇を抑えるのに効果的であったが、周知の比貯留係数の値と比較すると、大きく上回っている。また、揚水量を地下水モデルの境界条件として設定しておらず、精度の高いモデル構築をしていく必要がある。

謝辞：本研究では文部科学省のSI-CAT(気候変動適応技術社会実装プログラム)による1kmメッシュ気候変動シナリオ(NARO2017)を用いた。合わせてここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 斎藤雅彦, 川谷健: 透水係数の空間分布モデルの適用性に関する一考察, 土木学会論文集, No.694, pp.245-258, 2001.
- 2) 藤間聡, 中田満洋: 空間分布構造を有する透水係数の統計的推定法, 日本地下水学会会誌, Vol.28, No.1, pp.15-24, 1986.
- 3) 北隆平, 手計太一: 黒部川扇状地における透水試験と数値実験による透水係数マップ, 土木学会第42回関東支部技術研究発表会要旨集, II-34, 2015.
- 4) 柿沼忠男, 岸陽介, 井内国光, 都築克明: 分散を考慮した海岸地下水の挙動に関する研究(I)—那賀川河口および喜木川河口における分散係数と縮尺効果—, 陸水学会誌, 44, pp.174-184, 1985.
- 5) 尾田茂彦, 松浦拓哉, 下坂将史, 手計太一: 富山県における降雪量と積雪深の長期トレンド解析, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.74, No.5, I_73-I_78, 2018.
- 6) 富山県: 富山県地下水指針, p.67, 2018.
- 7) 松浦拓哉, 手計太一, 富樫聡, 緒方陸: 分布型水収支モデルを用いた土地利用変化と気候変化が富山県域の水資源に与える影響評価, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.74, No.4, pp.I_37-I_42, 2018.
- 8) 竹内正信, 村田文人, 片山健, 中村茂, 中嶋規行, 山口晴夏, 馬場亜希: グリッド型水循環系解析モデルによる黒部川伏没・湧出機構の解明, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.68, No.4, pp.I_481-I_486, 2012.