地下水分野の近未来を見据えた 新たなハード・ソフトに関する研究構想

愛知正温^{*,***}・富樫 聡^{**,***}

Research concept on new hardware and software for the near future of groundwater science

Masaatsu AICHI^{*,***} and Akira TOMIGASHI^{**,***}

Abstract

Keywords were extracted from 45 original papers and 19 rapid communications published in the Journal of Groundwater Hydrology during 10 years from 2010 to 2019. Based on the extracted keywords, original papers and rapid communications were categorized by research themes, and it was found that many researches on dating, isotope ratio, nitrate nitrogen, denitrification, etc. were reported. Based on these results, this paper describes a research concept on hardware and software that looks 10 to 20 years into the near future, focusing on “Visualization of uncertainties in groundwater modeling technologies”, “Real-time data analysis and information dissemination”, “Estimation and management of groundwater resources for sustainable use”, “Drilling, verification and maintenance of wells”, etc., which have hardly been reported in recent years.

Key Words: uncertainties, modeling, real-time, weather data, well drilling

要 旨

2010年から2019年までの10年間を対象として地下水学会誌に登載された論文45編と短報19編のキーワードを抽出し、研究テーマ別に類型化したところ、年代測定・同位体比等や硝酸性窒素・脱窒等に関する研究が多く報告されていることがわかった。この結果を踏まえて本報では、近年にほとんど報告がなかった分野となる「地下水モデリング技術の不確実性の可視化」、「リアルタイムのデータ解析と情報発信」、「地下水資源の持続的利用のための資源量推計・管理」、「井戸の掘削・検証・維持管理」等に注目して、10～20年後の近未来を見据えたハード・ソフトに関する研究構想について述べる。

キーワード: 不確実性, モデリング, リアルタイム, 気象データ, 井戸掘削

* 東京大学大学院 新領域創成科学研究科

** 国立研究開発法人産業技術総合研究所

*** 日本地下水学会 編集委員会

1. はじめに

2010年に発行した地下水学会誌52巻1号は、日本地下水学会の50周年記念特集号であった。その後、61巻4号（2019年発行）までの10年間に於いて、論文と短報に限定すると合計64編（論文45編、短報19編）が地下水学会誌に登載されている。なお、地下水学会誌投稿規定（令和2年3月7日一部改正）によると、論文は「地下水学に関するオリジナルなもので、他の学会誌、論文集、単行本、その他で掲載されたことのないもの」、

短報は「速報として価値のある内容を含む未発表の短い論文に相当するもの」と規定されている。

したがって、地下水学会誌に登載された論文と短報は、本学術分野において高いオリジナリティを有し、新たな地下水学を切り拓いた研究成果であると言える。

近年の地下水学における研究動向を把握するために、まずは近10年間に地下水学会誌に登載された論文・短報64編を整理した。次に、各論文・短報で五つ程度設定されたキーワードをすべて抽出し、これらを研究テーマ別に類型化した。類型化

表1 2010年～2019年の10年間で地下水学会誌上で組まれた特集
Table 1 special issues in the Journal of Groundwater Hydrology, during 10 years from 2010 to 2019.

種別	巻 (号)	特集名	登載数	
			論文	短報
特集	52(4)	地下水流動系と熱／物質輸送		
小特集	54(1)	東日本大震災と地下水		1
特集	55(1)	震災と地下水		1
小特集	55(2)	これからの地下水資源の利用のあり方		
小特集	55(2)	地下水を語る		
小特集	56(3) 57(3)	地下水流動解析の高度化手法と検証・確認		
特集	56(4)	秋田の多様な地下水－環境・資源－		
特集	57(1)	地盤沈下の現状から見る今後の地下水管理		
特集	57(1)	水循環基本法		
特集	57(4) 58(1)	九州・沖縄地域における帯水層中での硝酸性窒素の動態	6	
特集	58(2) 58(3)	地下水の保全、涵養及び利用に関する法制度化に向けた現状と課題		
特集	59(1)	地下水管理における意思決定に係わる水文地質観測		
特集	59(4) 60(1) 60(2)	水循環基本計画の下での地下水に関する取り組み		
特集	60(2)	地下水－地表水交流過程；その物質輸送および生態系への影響	2	
特集	60(4)	地下水と地熱・地中熱エネルギーの利用	2	
特集	61(1)	津波に伴う地下水影響とその後の回復		1
特集	61(3)	山岳地域の水文地質学－世界の水源を供給する地下水の重要な役割－		

の対象としたキーワード数は326個（論文231個、短報95個）である。なお、本報におけるキーワードの類型化では、たとえばキーワード「地下水シミュレーション」、「非定常地下水流動解析」、「地下水解析」、「浸透流解析」、「数値モデル」等は「地下水シミュレーション・数値解析 等」に、キーワード「硝酸性窒素」、「窒素負荷」、「窒素負荷ポテンシャルマップ」、「窒素収支」、「脱窒」等は「硝酸性窒素・窒素負荷・脱窒 等」に、それぞれ分類している。キーワード分類は筆者が主観で判断したものであることに留意されたい。また、地下水学会誌では近10年間で17の特集が組まれており、特集別の論文数・短報数は表1のようになっている。キーワードの類型化上、同一論文・短報で同じ分類のキーワードが複数挙がることもある。これらについても留意いただきたい。以上の作業を経て、近年の研究トレンドを把握する。

表2は、キーワードの出現回数が上位15位までの研究テーマを整理したものである。表2を見ると、「滞留時間・トレーサー・安定同位体比 等」および「硝酸性窒素・窒素負荷・脱窒 等」がともに出現回数20回で1位となった。3位以降は「地下水シミュレーション・数値解析 等」、「不飽和領域・水分特性曲線・土壌水 等」、「地下水・浅層地下水・深部地下水 等」、「地下水位・地下水面・地下水調査 等」、「地下水流動・地下水流れ・ダルシー流速 等」と基本的かつ古典的な研究テーマが続く。1位となった二つのキーワード群は、特集も組まれており、近10年における地下水分野の明らかな研究トレンドであった。その他、11位の「東日本大震災・東北地方太平洋沖地震・津波 等」や「微生物・生分解・バクテリア 等」も新たな研究テーマである。

以上の整理を踏まえて本報では、近年にほとん

表2 2010年～2019年の10年間で地下水学会誌に登載された論文・短報のキーワード分類結果

Table 2 Categories of keywords of original papers and rapid communications published in the Journal of Groundwater Hydrology, during 10 years from 2010 to 2019.

順位	研究テーマ（類型化したキーワード群）	出現回数
1	滞留時間・トレーサー・安定同位体比 等	20
	硝酸性窒素・窒素負荷・脱窒 等	
3	地下水シミュレーション・数値解析 等	15
	不飽和領域・水分特性曲線・土壌水 等	
5	地下水・浅層地下水・深部地下水 等	14
	地下水位・地下水面・地下水調査 等	
7	地下水流動・地下水流れ・ダルシー流速 等	13
8	地下水汚染・土壌汚染・浄化 等	12
9	塩水化・塩水侵入・湛水レンズ 等	10
10	地下水温・地下温度・地下温暖化 等	8
11	東日本大震災・東北地方太平洋沖地震・津波 等	7
	土壌ガス・土壌ガスの物質移動 等	
	微生物・生分解・バクテリア 等	
14	地下水資源・地下水管理・地下水盆 等	6
15	室内実験・水槽実験・カラム実験 等	5

ど報告がなされていない（表2に挙がっていない、または順位が低い）研究テーマに着目して、10～20年程度先の近未来を見据えたハードとソフトの研究構想について考えてみたい。特にここでは、近未来に深刻化するであろう人口減少と自然災害多発化というわが国が抱える二つの社会課題への対応を考える。具体的には、データの不確実性の評価・可視化（本報では、数値モデリング技術への適用を想定）、リアルタイムのデータ解析と情報発信、地下水資源の持続的利用のための水資源量の推計・管理、井戸の掘削・検証・維持管理技術の各テーマについて、研究構想を述べる。

なお、これら研究テーマはすべて、ハード（観測・計算用の機器・装置等）、ソフト（データ処理・通信・解析技術等）を両輪とした研究開発が必要となる。そのためここでは、ハードとソフトを詳細に区別することなく、両方同時に開発が必要なテーマとして論じていきたい。

2. ハード・ソフトに関する研究構想

2.1 地下水モデリング技術における不確実性の可視化

地下水に関わるさまざまな現象をモデリングする場合に最も困難に直面するのが、地下の物性分布や微分方程式を解く際の境界条件等、モデル構築のための情報が非常に不足している点である。したがって、実際のモデル構築の過程では、情報が不足している部分については、既往の知見に基づいて何らかの仮定をおきながら現実の状態を近似的に表現することを目指し、その後、構築したモデルが地下水位などの観測データを十分に表現できるかどうかに基づいてモデルの妥当性を検証するという手順が典型的である（たとえば Spitz and Moreno, 1996）。観測データに対する再現性が十分ではない場合には、再現性が良くなるようにモデルの設定値を探索する逆解析などを通じてモデルを修正することも行われる（たとえば Hill and Tiedeman, 2007）。しかしながら、最終的な検証用の観測データについても、モデルの妥当性を立証するには十分な質と量が確保できないことが多く、さらには観測データ自体にも誤差が含まれるため、モデルに設定された値やモデルから導

き出された結果に不確実性が伴うことは避けられない。モデルから導かれた結果を、実際に現象の理解や将来予測へと活用する場合には、その不確実性について適切に把握した上で行われるべきであると考えられる（Pappenberger and Beven, 2006）。一方で、不確実性の程度を評価する手法については、いまだ十分に確立・普及していないように思われる（Pappenberger and Beven, 2006）。ここでは、モデル構築および検証のための情報が不足する中でモデルが持つ不確実性としての零空間（null space）の考え方（Doherty, 2015）と、その中で先見情報に基づいて尤もらしい解を得るための正則化に関する手法を紹介しつつ、今後の研究開発の展望について述べたい。

2.1.1 モデルの不確実性と零空間の概念

いま、観測データを並べたベクトル $\bar{y}$ に対し、それを再現することを目的としたモデル $\bar{M}(\bar{\alpha})$ を考える。ここで、 $\bar{\alpha}$ は $\bar{M}(\cdot)$ モデルに必要な入力パラメータを並べたベクトルである。観測データ $\bar{y}$ が、 $\bar{M}(\bar{\alpha})$ と、モデルが考慮していない何らかの自然法則に従うプロセスに由来する系統的誤差 $\bar{u}$ 、ランダム誤差 $\bar{\varepsilon}$ の合計で説明できると考えると、

$$\bar{y} = \bar{M}(\bar{\alpha}) + \bar{u} + \bar{\varepsilon} \quad (1)$$

と表される。ここで、ランダム誤差 $\bar{\varepsilon}$ が正規分布に従うとすれば、最小二乗法により、

$$\Psi(\bar{\alpha}, \bar{u}) = \|\bar{y} - [\bar{M}(\bar{\alpha}) + \bar{u}]\|_2^2 \quad (2)$$

を最小化するような $\bar{\alpha}$ および $\bar{u}$ の値を探索すれば良い。ここに、 $\|\cdot\|_p$ は、 p 乗ノルムを表す。ここでは、 $\bar{\alpha}$ および $\bar{u}$ を勾配法で探索する場合を考える。まず、

$$\bar{y} \approx \bar{M}(\bar{\alpha}_0) + \bar{u}_0 \quad (3)$$

となるような $\bar{\alpha}_0$ および $\bar{u}_0$ に対し、テイラー展開により、微小な修正 $\Delta\bar{\alpha}$, $\Delta\bar{u}$ によって、

$$\bar{y} = \bar{M}(\bar{\alpha}_0) + \bar{u}_0 + A\Delta\bar{\alpha} + I\Delta\bar{u} + \cdots \quad (4)$$

と表せるとする。ただし、 $\mathbf{I}$ は単位行列で、行列 $\mathbf{A}$ の成分 a_{ij} はモデルの i 番目の出力に対する j 番目パラメータの感度であり、

$$a_{ij} = \frac{\partial M_i}{\partial \alpha_j} \Big|_{\vec{\alpha} = \vec{\alpha}_0} \quad (5)$$

により求められる。このとき、ヤコビ行列

$$\mathbf{J} = (\mathbf{A} \quad \mathbf{I}) \quad (6)$$

および解ベクトル

$$\vec{x} = \begin{pmatrix} \Delta \vec{\alpha} \\ \Delta \vec{u} \end{pmatrix} \quad (7)$$

を用いれば、式 (4) は、

$$\mathbf{J}\vec{x} = \vec{y} - \vec{M}(\vec{\alpha}_0) - \vec{u}_0 \quad (8)$$

と変形できる。式 (8) を満たす $\Delta \vec{\alpha}$, $\Delta \vec{u}$ により、

$$\begin{cases} \vec{\alpha}_{new} = \vec{\alpha}_0 + \Delta \vec{\alpha} \\ \vec{u}_{new} = \vec{u}_0 + \Delta \vec{u} \end{cases} \quad (9)$$

の修正を行えば、 $\Psi(\vec{\alpha}_{new}, \vec{u}_{new}) \leq \Psi(\vec{\alpha}_0, \vec{u}_0)$ となるような $\vec{\alpha}_{new}$ および $\vec{u}_{new}$ を得ることができる。この修正を反復することで、 Ψ の最小値を実現するような $\vec{\alpha}$ および $\vec{u}$ を探索することが可能である。しかしながら、式 (6) のヤコビ行列は、横長の行列であり、明らかに逆行列が存在しない。すなわち、式 (8) の解 $\Delta \vec{\alpha}$, $\Delta \vec{u}$ は一意に定まらず、 Ψ の最小値を実現するような $\vec{\alpha}$ および $\vec{u}$ は無数に存在しうる。一方で、 $\vec{\alpha}$ および $\vec{u}$ は何でも良いわけではなく、一定の制約を受けている。いま、 $\vec{\alpha}_0$ および $\vec{u}_0$ が十分に Ψ を小さくするモデルパラメータセットの一つとして得られたとし、同じ Ψ を実現する他のモデルパラメータを追加で探索することを考える。このとき、

$$\vec{M}(\vec{\alpha}_0) + \vec{u}_0 = \vec{M}(\vec{\alpha}_0 + \Delta \vec{\alpha}) + (\vec{u}_0 + \Delta \vec{u}) \quad (10)$$

を満たすような $\Delta \vec{\alpha}$, $\Delta \vec{u}$ の取り得る範囲を探せばよい。ここで、式 (10) の右辺をテイラー展開することにより、微小な修正 $\Delta \vec{\alpha}$, $\Delta \vec{u}$ によって、

$$\vec{M}(\vec{\alpha}_0) + \vec{u}_0 = \vec{M}(\vec{\alpha}_0) + \vec{u}_0 + \mathbf{A}\Delta \vec{\alpha} + \mathbf{I}\Delta \vec{u} + \cdots \quad (11)$$

と表せるとすれば、

$$\mathbf{J}\vec{x} = \vec{0} \quad (12)$$

を満たすような $\Delta \vec{\alpha}$, $\Delta \vec{u}$ の範囲であれば、式 (10) を一次近似の範囲で満たすことが分かる。したがって、このような $\Delta \vec{\alpha}$, $\Delta \vec{u}$ の存在範囲は、ヤコビ行列 $\mathbf{J}$ の零空間

$$\text{Ker}(\mathbf{J}) := \{\vec{x} \in V; \mathbf{J}\vec{x} = \vec{0}\} \quad (13)$$

の内部の任意のベクトルであるが、この空間内に限定されているといえる。この零空間の範囲内では、モデルは観測データ $\vec{y}$ を同じように再現するため、モデルに設定されたパラメータの不確実性の範囲として解釈することが可能である。

一方、この零空間の範囲をモデルの不確実性の数学的な表現として採用するとしても、それをどのように活用するかという点については、まだ洗練されているとは言えない。現状では、零空間内をモンテカルロ法でサンプリングし、多数のモデルアンサンブルを生成することで、パラメータの取り得る範囲や、観測がない時刻・地点の計算結果の取り得る範囲などを可視化する零空間モンテカルロ法 (Doherty, 2015) が提唱されている。零空間モンテカルロ法は、フリーソフトウェアの PEST (<http://www.pesthomepage.org/> より入手可能) などに実装されており、徐々に普及してきている。今後は零空間の境界を探索する手法の開発など、不確実性の範囲をより明確に把握する技術の発展が期待される。

2.1.2 先見情報の活用による不確実性の低減と正則化手法

2.1.1 節の議論では、観測データに対する再現性のみから $\vec{\alpha}$ および $\vec{u}$ を探索するという前提であったが、これでは不確実性の幅が極めて大きい。実際には、計測データや経験則などの先見情報に基づいて $\vec{\alpha}$ および $\vec{u}$ に対して追加の制約条件を課し、より尤もらしいモデルを探索することが多い。制約条件が追加されれば、零空間内でより尤もらしいパラメータセットの領域を示したり、

零空間を小さくしたりすることが可能である。

たとえば、初期に仮定した $\bar{\alpha}_0$ および $\bar{\alpha}_0$ が真値に近いと期待するならば、零空間の中で $\bar{\alpha}_0$ および $\bar{\alpha}_0$ に最も近い $\bar{\alpha}$ および $\bar{\alpha}$ を尤もらしい解として求めることができる。モデル間の距離の計量方法については色々と考えられるが、ここでは、式 (8) を満たす解のうち、 $\|\bar{x}\|_p$ が最小であるような解を探索することを考える。もっとも基本的な考え方はユークリッド距離となる $p=2$ であり、 $\|\bar{x}\|_2$ が最小であるような解は、ヤコビ行列 J に対する特異値分解や Tikhonov 正則化法 (Ridge 回帰) を用いて求めることが可能である。これらの手法は、先述の PEST においても実装されている。 $p=2$ 以外については、あまり実用化されていないのが現状であるが、 $p=1$ すなわち $\|\bar{x}\|_1$ が最小であるような解を尤もらしいとすれば、線形計画法や Lasso 回帰により求解することも可能である (たとえば Elad, 2010)。この場合、 $\bar{x}$ の要素のうち多くが 0 で、感度の高いパラメータの要素のみが有限の値となるようなスパースな解を得ることが期待される。

これらの正則化手法は初期値に近いところを探索するという観点からの手法であり、初期値設定の段階で取り込まれた地下水学の知見は活用できる一方で、一つのパラメータに対して複数の事前情報がある場合などには、それらを十分に活用することはできない。追加の事前情報を活用するためには、ひとつひとつのモデルパラメータについて、どのような値である確率が高いのか、その確率分布はどうなっているのかを検討した上で、最小化すべき量を適切に定式化して正則化項を追加する必要がある (Akaike, 1980)。たとえば、 i 番目のモデルパラメータ α_i について、すでに報告されている値 α_i である確率が最も高く、そこからの誤差が正規分布に従うと考えるならば、 $|\alpha_i - \bar{\alpha}_i|^2$ を最小化するような制約を導入するのが適切であると考えられる。また、モデルで考慮できない現象から発生している $\bar{\alpha}$ についても、その時間的・空間的特徴に基づいて制約条件を考えることが可能である。たとえば、まれにスパイク状の変化があるケース、まれにステップ状の変化があるケース、なだらかに変化するケースなどが考えられる (図 1)。スパイク状の誤差があ

るケースでは $\|\bar{\alpha}\|_1$ の最小化 (Elad, 2010)、まれにステップ状の誤差があるケースでは $\|D_1 \bar{\alpha}\|_1$ の最小化 (Elad, 2010)、なだらかに変化する誤差があるケースでは $\|D_2 \bar{\alpha}\|_2$ の最小化 (Akaike, 1980; Tamura et al., 1991) が有効であることが知られている。なお、 D_n は n 階差分の作用素である。

より一般的な制約条件の目的関数として $\bar{R}(\bar{\alpha}, \bar{\alpha})$ を考えるならば、 $\bar{\alpha}$ および $\bar{\alpha}$ が満たすことが期待される条件式群として、

図 1 モデルで考慮していない現象の特徴の例。a) スパイク状の誤差、b) ステップ状の誤差、c) なだらかに変化する誤差。

Fig. 1 Examples of characteristics of processes which are not included in the model. a) Spike noise, b) Step-function like noise, and c) Drift error.

$$\vec{R}(\vec{\alpha}, \vec{u}) = \vec{0} \quad (14)$$

が得られる。式 (14) を考慮すれば、式 (8) は、

$$\begin{pmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{I} \\ \mathbf{B} & \mathbf{C} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \vec{\alpha} \\ \Delta \vec{u} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \vec{y} - \vec{M}(\vec{\alpha}_0) - \vec{u}_0 \\ \vec{0} \end{pmatrix} \quad (15)$$

となる。ただし、 $\mathbf{B}$ の要素 b_{ij} は式 (14) の i 番目の条件式に対するパラメータ α_j の感度、 $\mathbf{C}$ の要素 c_{ij} は式 (14) の i 番目の条件式に対するパラメータ u_j の感度であり、それぞれ

$$b_{ij} = \frac{\partial R_i}{\partial \alpha_j}, c_{ij} = \frac{\partial R_i}{\partial u_j} \quad (16)$$

である。線形独立な制約条件が十分に増加すれば、式 (15) の係数行列に対する零空間は狭くなり、究極的には優決定方程式系にすることも可能である。その場合には、条件式の数未知数に対して過剰になるため、各条件式に対する信頼性や観測データの信頼性に基づいて、式 (15) の各行に対する重み付けを考えることが必要となる。しかしながら、先見情報に基づく事前分布および観測情報に基づく事後分布に対して、それらの信頼性の比を客観的に評価することは容易ではない。赤池-ベイズ情報量規準 (Akaike, 1980) などの情報量規準を用いることや交差検証法 (Elad, 2010) などが知られているが、前者は周辺尤度の積分計算が解析的にできない場合には数値積分が必要であり、後者はマッチング用のデータと検証データの組み合わせを何通りも試行して検証する必要がある、いずれも計算負荷の面で課題が残っている。

一方、式 (14) の制約条件を追加することは、式 (2) の目的関数に $\vec{R}(\vec{\alpha}, \vec{u})$ のノルムを追加して、

$$\Psi_R(\vec{\alpha}, \vec{u}) = \|\vec{y} - [\vec{M}(\vec{\alpha}) + \vec{u}]\|_2^2 + \|\mathbf{R}(\vec{\alpha}, \vec{u})\|_p \quad (17)$$

の最小化問題と見なすこともできる。これをベイズ統計学的に解釈すれば、

$$\vec{x} \sim \exp[-\Psi_R(\vec{\alpha}, \vec{u})] \quad (18)$$

となるようなパラメータ $\vec{x}$ を分布推定することが、先見情報も含めたモデルの不確実性の評価と

考えることができる。マルコフ連鎖モンテカルロ法 (たとえば 渡辺, 2012) などを用いれば、指定された確率分布に従うモデルアンサンブルを作成することは可能である。この場合、確率分布に従ってモデルが生成されるため、低確率ながら式 (12) の零空間の外にあるパラメータセットを持つモデルが生成される可能性もゼロではないが、そのような $\vec{x}$ については除外するか、零空間上に投影変換することによってサンプリングの効率を上げることができる (Doherty, 2015)。

2.1.3 先見情報および観測情報の収集

2.1.2 節に見たように、有力なモデルのアンサンブルを生成するには、式 (15) の方程式の係数行列のランクを十分な質と量の先見情報および観測情報により増加させることや、式 (18) の確率分布の分散を低減させることが必要である。

先見情報には、ボーリング柱状図データや透水試験データなどの水理地質情報に関するものだけでなく、揚水量や涵養量などの境界条件に関するものや、過去の地下水位など初期条件に関するものもある。現在は、これらの情報を調査して収集するだけで、かなりの労力とコストが必要となっており、さらにその情報の量や不確実性、想定される誤差分布などから、定量的な制約条件を構築していくことは、非常に困難を伴うものである。しかし、近年ではインターネット上の情報を自動的に探索し言語解析や画像解析により必要な情報を抽出・機械学習する技術が身近になってきている (たとえば、加藤, 2017)。最近、電子化・公開が進んできている論文や報告書、地質柱状図データ等に対して、このような技術を応用することができれば、制約条件の構築の一部を自動化していくことが可能となると期待される。また、地下水需要など人間活動や気象条件などの多数の要因によって複雑に変化するものについては、人工知能を用いた機械学習による評価が有効である可能性がある (Jalala et al., 2011)。水理地質情報の確率分布の学習においては、遷移確率地球統計学 (Carle and Foggs, 1997; Lee et al., 2007) の発展と活用が重要であると考えられる。これまでの遷移確率地球統計学に基づく水理地質モデルは、拘束条件不足のために複雑な構造のモデルアンサンブルが生成される傾向があったが、地質学的知

見に基づく事前確率分布やスパースモデリング等による単純な構造に対する選好を促す事前確率分布を導入することで、水理地質モデルの不確実性を低減できる可能性がある。

観測情報量の増加の観点からは、安定同位対比情報などのトレーサー情報の活用が近年進められている（たとえば Jian et al., 2019）。また、干渉合成開口レーダ（InSAR）技術などを用いた広範囲の面的な地盤変形計測結果を用いることで、主に地下水モデルの貯留係数の同定に寄与する情報を得ることが期待されている（Hoffman et al., 2003）。しかしながら、標高は地下水利用のみによって変動するわけではないため、地震に伴う変動などのモデルで考慮していない変形に関する処理が重要である（愛知, 2016）。

2.1.4 モデリング技術の今後の展望

ここまで、主にモデルの計算結果の不確実性を評価すべきであるという観点から、点推定ではなく分布推定を行うことでそれを実現する技術を構築する展望の視点で述べてきた。一方、式 (14) や (18) は、モデルのパラメータや観測データをモデルに設定する段階においても、点設定ではなく分布設定で行いうるということを示唆している。観測データや物性などの情報が必ずしも充実していない段階においては、零空間が広い上に、式 (18) の分布も分散が大きいものになっていると考えられるが、一応それに見合ったモデルアンサンブルの生成と不確実性の可視化を行うことが可能である。

このことには、二つの意義があると考えられる。まず、モデル作成者が不十分な情報の中で値をピンポイントで仮定して初期モデルを構築するのに比べて、範囲や確率分布を仮定するほうがモデル作成者の主観の影響を相対的に緩和することが可能と考えられる。二つ目は、その後、調査や研究の進展に合わせて式 (12) や式 (17) が充実していけば、それに伴って、モデルアンサンブル内の不確実性が徐々に解消していくことが可視化されることである。このことを活用すれば、モデルパラメータの不確実性が高い部分に着目することや、達成した不確実性の水準が目的に照らして十分なものになったら調査を打ち切るなど、調査の効率化に貢献する可能性があると考えられる。

このように、モデルの不確実性を明示化することは、どこまでが分かっているところから分かっているかないかを明示的にするという根本的な部分にも繋がることから、今後の地下水学の発展において非常に重要な技術として、発展させていくことが期待される。

2.2 リアルタイムのデータ解析と情報発信 (水災害への対応)

我々の日常生活を脅かす様々な水問題について、登坂 (2006) は表3のように取りまとめている。この中でとりわけ発生頻度が高く、かつ我々の日常生活を脅かしかねない水問題が、河川氾濫（洪水氾濫）や土砂災害等の水災害である。

洪水氾濫は外水氾濫、内水氾濫に大別でき、さらに外水氾濫は、河川堤防の決壊により生じる破堤氾濫、河川水位が堤防天端高を超えて堤内地へ外水が流れ出る越水氾濫、掘込河道において河川水位が堤内地盤高を越えて溢れる溢水氾濫に分類される。なお、氾濫ボリュームや氾濫流の流体力の観点より、内水氾濫よりも外水氾濫（特に破堤氾濫）で被害規模が大きくなる傾向にある。

河川堤防の決壊メカニズムには、越水（越流水による川裏側法尻の洗掘に起因する崩壊）、浸食（洪水流による川表側堤体の浸食・洗掘に起因する崩壊）、堤体浸透に起因するすべり、堤体・基盤の漏水に起因するパイピングの四つが挙げられる（国土技術研究センター, 2012）。このうち後者二つが地下水と密接に関係し、近年では矢部川水系矢部川（2012年）、鳴瀬川水系洪井川（2015年）、高瀬川水系二ツ森川（2016年）等で、堤体漏水や基盤漏水に起因する破堤氾濫が発生した（石原, 2018）。

河川堤防は、地域住民の生命と財産を洪水から防御する極めて重要な治水施設である。反面、ある一点が決壊すると、氾濫原を同一とする地域において連続構造物としての機能を失ってしまう。また、漏水リスクが高い地点を予見して事前対処できればよいが、河川堤防は長大な構造物であるため、事前のつぶさな調査と精度の良いリスク予測は難しいと言わざるをえない（国土交通省, 2016）。2019年10月12日に伊豆半島に上陸し、関東地方、甲信地方、東北地方等に甚大な被害をも

たらした台風19号は、災害救助法適用自治体が東日本大震災を超えて過去最大の適用数になる等、記録的な豪雨災害となったことは記憶に新しい。被害が甚大となった一因には、各地で河川堤防が決壊して外水氾濫が生じたことが挙げられる。国土交通省が管理する直轄河川で、5県7河川12カ所の堤防が決壊した（国土交通省、2019a）。このうち信濃川水系千曲川（長野県長野市）、阿武隈川水系阿武隈川（福島県須賀川市）、成瀬川水系吉田川（宮城県大郷町）の3カ所は完成堤（計画高水流量を流下させることができる堤防）であったことは驚きをもって報道された（産経新聞、2019）。

今後、気候変動に伴う地球温暖化の進行とともに、水災害の発生頻度は増加し、またその災害規

模は激甚化する可能性が高いと言われている（たとえば、日本学術会議、2011；社会資本整備審議会、2015等）。水災害発生を未然に防いだり、被害規模を小さく抑えるための取り組みは、これまでも国土交通行政主導で推進されてきた。一方で、上述のとおり今後は想定外の外力規模で頻発するであろう水災害に対応するには、人命・財産を守る判断・行動に直結するリアルタイム情報の重要性が、より一層高まるものと考えられる。

2019年現在で運用されている水災害分野のリアルタイム情報公開システムには、高解像度降水ナウキャスト、大雨警報（浸水害）の危険度分布、洪水警報の危険度分布、土砂災害警戒判定メッシュ情報等がある（いずれも気象庁、2019）。また、発災状況をリアルタイムで発信するリアルタ

表3 様々な水問題とその特性（登坂（2006）を基に作成）

Table 3 Various water problems and characteristics (based on Tosaka, 2006).

種類	対処すべき水問題	スケール		被害の程度	傾向	予見可能性	防止可能性	修復可能性
		空間	時間					
水資源	都市の渇水	C	B	B-C	C	B	C	A
	途上国広域干ばつ	B	C	D-E	C	B	E	—
	河川断流	D	D	D-E	D-E	A	C	—
	帯水層水位低下	C	C	B-C	D	A	B	B
水汚染・水環境	乾燥地水利用と塩害	E	E	D-E	D-E	A	B	E
	沙漠化	E	E	D-E	D-E	A	D	E
	湖沼富栄養化	D	E	?	D	A	D	D
	地下水自然汚染	E	E	D-E	C	C	D	—
	農地地下水汚染	D	E	C-D	D	B	D	D
	工場地下水汚染	A	D-E	A-B	D	E	E	D
	ダムによる環境変化	D	E	—	C	B	C	—
	地下構造物の阻害	B	E	—	D	B	C	D
	ヒートアイランド	B	C	—	D	B	C	A
	廃棄物処分場	B	E	—	C	B	A	D
	放射性廃棄物処分	D	E	—	—	C	—	—
水災害	河川氾濫	B	A	C-E	D	A-B	B	B
	都市側洪水	A	A	A-C	D	C	B	A
	土砂災害	A	A	B-C	C-D	D	D	A
	液状化	A	A	B-C	C	B	D	A
	津波	C	A	D-E	D	A	E	C
広域・全地球	地球温暖化	E	E	E	—	C	D	—
	熱帯雨林減少	E	E	D-E	D-E	A	D	D

分類項目	ランク（5段階分類）				
	A	B	C	D	E
空間スケール	工場の敷地内など	都市部分域	都市全体および周辺含む地域	流域全体・県など自治体	国単位・国際的・全地球的
時間スケール	日・週	月単位	季節単位	年単位	長期型
年単位の被害の大きさ	一般に小	市町村で負担できる程度	自治体で負担できる程度	国・自治体で負担	国際協力必要（非常に大）
傾向	顕減	微減	一定	微増	顕増
予見可能性	十分可能	おおよそ可	何ともいえない	信頼性は低い	難一不可
防止可能性	十分可能	おおよそ可	見積もれない	可能性は低い	不可能
修復可能性	可能	おおよそ可	何ともいえない	ある程度可能	可能性小さい

イム浸水予測システム（国土技術政策総合研究所，2019）の他，時々刻々と変化する水災害をリアルタイムで予測するために，指定河川の洪水予報を目的とする洪水予測システム（椿ほか，2013）や，上流から下流まで連続的に洪水の危険度が分かる水害リスクライン（国土交通省，2019b）等が運用されている。

一方で，地下水情報のリアルタイム予測・公開等は現状では皆無である。これは，地下水に関連する問題（汚染，塩水化，湧水枯渇等）は洪水氾濫や土砂災害に比べると問題発現までに時間を要し，情報取得の即時性が求められていないことが一因と考えられる。そこでここでは，地下水分野におけるリアルタイムのデータ取得・解析・情報発信の必要性を改めて考え，水災害に対処するための研究テーマを提案する。

地下水分野でのリアルタイム情報の取得・解析事例には，地盤沈下（たとえば，榊・愛知，2019），山岳トンネル掘削時の周辺地下水環境への影響評価（たとえば，滋野，2012）等があるが，洪水時における河川堤防の漏水に着目した報告は見当たらない。堤体浸透や漏水等に起因する亀裂や法すべり，噴砂の発生をリアルタイムで確認できれば，堤防決壊の危険度を察知できる。しかしながら実際は，降雨条件や河川水位が時々刻々と変化する状況では，堤防決壊につながるデータの取得は難しい。このような実情を踏まえて地盤工学会は，河川堤防の浸透破壊の状態をリアルタイムに可視化する技術の開発と避難支援の必要性を提言している（地盤工学会，2019）。本提言では，「河川水位情報と降雨量情報を連動して準リアルタイムで「堤体内水位」「基盤水位」を予測し，その情報を発信することで避難指示発令の支援など利活用できる仕組みを構築する必要がある。また，低廉でタフな水位センサーや通信手段などの開発も必要で，これら水位センサーを用いて緊急対策箇所などを直接知ることができれば貢献度が大きい。」としており，今後，本分野の研究が進展することに期待する。

また関連して，技術革新により目覚ましい進化を遂げている AI 技術や商用ドローン（小型無人機）の実装にも期待したい。ドローンにサーモカメラを搭載すれば，河川縦断方向の連続的な画像

が取得できる。国土交通省国土技術政策総合研究所は，赤外線サーモグラフィの河川堤防の湿潤部検知への適用性を検討しており（地下，2011），これら研究成果はドローンで取得するリアルタイムデータに適用できる可能性がある。さらに，機械学習，ディープラーニング等の AI 技術を適用した画像解析により，漏水箇所やすべり箇所等を瞬時に把握できる可能性もある。これらデータ取得と解析結果をリアルタイム情報として提供できれば，避難行動や水防活動に大いに役立つものと考えられる。

2.3 地下水資源の持続的利用のための資源量推計・管理

持続可能な開発目標（SDGs: Sustainable Development Goals）で掲げる17の目標のうち，「目標6：すべての人々に水と衛生へのアクセスと持続可能な管理を確保する」，「目標13：気候変動とその影響に立ち向かうため緊急対策を取る」の二つは，地下水を含めた水資源管理との関係が深い。国内外を問わず，会社が永く存続するためにも，SDGs の達成を意識した企業活動が不可欠な時代になりつつある。同時に，機関投資家の動きとして，従来の財務情報のみでなく，SDGs の枠組みも意識して，環境，社会，企業統治等の非財務情報を考慮する ESG（Environment, Social, Governance）投資の動きが加速している。このような社会情勢の中で，英国を拠点として気候変動などの環境分野に取り組む国際非営利活動団体 CDP（Carbon Disclosure Project）は，企業の水リスクに関する情報公開プログラムとして CDP ウォータープログラムを実施している（みずほ情報総研株式会社，2015）。CDP ウォータープログラムは，世界の主要な企業・都市に対して，気候変動や水管理等にどのように取り組んでいるか情報開示を求め，調査・評価を行うものであり，調査結果は機関投資家や SRI インデックスに広く活用されている。CDP ウォーターセキュリティレポート2018（日本版）によると，CDP ウォータープログラムに署名する投資機関数は2013年の530から，2018年の655まで増加した。「水」が企業経営に与える影響に対して機関投資家の関心が高まっていることは明らかである。企業は事業継続

にあたり、機関投資家からの評価を得なくてはならない。したがって、持続可能な水資源利用に関しては、今後さらに企業が主体となって取り組む事例が増えるものと考えられる。

一方で、国内では2014年に施行された水循環基本法の下、国や地方公共団体が一丸となり、地域共有の財産となる地下水の管理や適正利用に努めている。このように行政・企業がともに主体となって水資源管理に取り組む必要がある中で、地域に内在する水資源の量的かつ面的な把握の重要性は今後さらに高まると予想される。

また、地下水の量的管理に着目した場合、地下水の資源量を管理するために我々できることはそれほど多くなく、地下水位や使用量（地下水揚水量）の監視や規制程度である。地下水資源量を増やす取り組みとして人工涵養等もあるが、ここでは地下水資源管理により直結する使用量の監視（地下水揚水量の調査）について考える。

2.3.1 降水量（降雨量・降雪量）データの高度化

水資源は、気象、地形、地質、人間活動等の複合条件により、地域ごとに遍在する資源である。したがって、この遍在性を理解した上で地域に内在する水資源量を推計しなくてはならない。また、地表水、地下水ともに、元をたどれば降雨・降雪に起源があるため、降水量（降雨量、降雪量）を面的に把握する必要性は極めて高い。しかしながら、山岳地帯が国土の約70%を占める我が国において、観測地点の少なさも相まって、山岳地帯の降水量を面的かつ高精度で観測することは、現状では難しい（鈴木, 2018）。特に、雪粒子は雨粒に比べて風の影響を受けやすいため、雨量計の降雪粒子捕捉率は低く、降雪量を正確に測ることは容易でない（大宮・松澤, 2017）。

以上を踏まえると当面は、現状でもっとも平面的な空間解像度が高いデータとなる航空レーザー測量や解析雨量データ（新保, 2010a; 新保, 2010b）の有効利用が現実的である。鈴木（2019）によると、積雪地域の冬季降水量を広域で算定するには、航空レーザー測量による積雪深分布からの推計が有効である。また、富樫・大向（2015）は気象庁が刊行するメッシュ平年値（降水量）を解析雨量データで補正し、高標高地域における面

的な降水量分布の精度向上を図っている。さらに、鈴木ほか（2016）は、JR東日本が保有する雨量計の観測値を用いて解析雨量の精度検証を行っている。これら先行研究において解析雨量データ有効性は示されているが、将来的には現状よりも高度化するであろう航空レーザー測量データや解析雨量データの利用技術を確認して、面的な降水量をより正確に把握することが望ましい。降水量データの精度向上は、おなじく面的な評価が重要な地下浸透量の推計精度向上にも大きく関係する。将来的には、山岳地域を含めた降水量データの高度化・細密化につながる革新的な広域観測システム構築が期待される。

2.3.2 気候変動に伴う地球温暖化が地下水資源量に与える影響と持続可能な地下水利用

持続可能な地下水利用の在り方を考えるには、地球温暖化に伴う将来的な降水量の変化も考慮する必要がある。ここでは、IPCCのRCP8.5シナリオ下での非静力学地域気候モデルによる日本の気候変化予測結果「地球温暖化予測情報第9巻（気象庁, 2017）」を参考にして、新たな研究の可能性を考えてみたい。

まず、現況（1980～1999年）に対する将来（2076～2095年）の降水量予測結果によると、年降水量、季節ごとの3か月降水量、月別降水量は、地域によって増減傾向が異なるものの全国的に有意な変化傾向は見られない。一方、日降水量100mm以上および200mm以上の発生回数は、ほぼ全ての地域・季節で有意な増加が予想される。また、バケツをひっくり返したように降る雨（1時間降水量30mm以上）や滝のように降る雨（1時間降水量50mm以上）の発生回数についても、ほぼ全ての地域・季節で有意に増加すると予測されている。なお、大雨（日降水量200mm以上）と短時間強雨（1時間降水量50mm以上）の年間発生回数は、全国平均でともに現況の2倍以上に増加すると予想された。

以上の予測結果より、年降水量は大きく変わらずとも、日降水量や短時間強雨の発生頻度は増加すると考えられる。このような「降れば土砂降り」となる降雨イベントが継続的または断続的に発生する可能性が高まるが、このときに地下への

浸透量はどのように変化するのか、その予測やモニタリングの必要性はより高まるものと考えられる。表2に示すとおり、不飽和浸透に関する研究成果はこれまでも多く報告されているため、これら研究成果をベースにして、局所的かつ短期的な強雨時の地下浸透量に着目した原位置モニタリング技術や面的な浸透量の推計手法等、地下水資源量評価の高度化に資する新たな研究開発が期待される。

次に、降雪量の将来予測結果に着目する。先述の地球温暖化予測情報第9巻（気象庁，2017）によると、現況（1980～1999年）に対して将来（2076～2095年）の年降雪量と年最深積雪は、北海道内陸の一部地域を除いて全国的に有意に減少し、特に本州日本海側で大きな減少が予測される。月別、地域別に見ても、降雪量・最深積雪ともに、全期間および全地域で有意に減少している。さらに、北日本や東日本日本海側では、降雪や最深積雪のピーク時期が1ヶ月程度早まると予想されている。佐藤ほか（2018）が一級水系江の川流域で実施した水収支の将来予測計算（2100年時点の気温上昇を想定）では、冬季の気温が上昇することで3月の降雪量と積雪量は減少し、現在は主に3月に生じる融雪のタイミングが1ヶ月程度早まる結果が得られている。

積雪期間は水が雪として地表部に留まるため、地下への浸透量が減少する。一方で、3月～5月の融雪期には多量の雪解け水が発生する。雪解け水は、河川からの伏没や水田湛水等により地下に浸透するため、春季に不圧地下水位の急激な上昇がみられることがある（深見，2012）。また、信越地方や北陸地方等、豪雪地帯に位置する多くの地域で、地下水は積雪対策として利用されており、一部地域では冬季の過剰揚水に伴う地盤沈下が社会問題となっている（谷中ほか，1990）。消雪・融雪用の揚水ポンプは、外気温の低下時や積雪が記録されたときに稼働する。したがって、積雪が見込まれる山間部や豪雪地帯では、気候変動に伴う冬季気温の上昇や降雪量変動の影響をより強く受けるものと考えられる。

以上のとおり、降雪・積雪・融雪という一連のプロセスと深く関係する地域の地下水環境は、地球温暖化によって現況から大きく変化する可能性

がある。具体的には、今後予想される降雪量・積雪深の減少や降雪・積雪時期の変化により、地下水位や地下温度（主に、地下浸透の影響を受ける浅部）は現状とは異なる季節変化を生じるものと考えられる。また、消雪・融雪用の地下水揚水量の減少や揚水時期の変化も、従来の地下水環境を改変させる要因となる。

たとえば地下水位や地下温度は、北日本や信越地方で普及が進む地中熱利用システムの性能を左右する重要な要素である。このように気候変動は地下水資源のみならず、地下水の利用形態に対しても大きな影響を及ぼす可能性がある。したがって地中熱利用を推進する上述の地域では、雪に関係する一連の年間変動プロセスを把握するためのモニタリングが重要であると同時に、将来変化を考慮した地下水資源の適正管理が求められる。

2.3.3 地下水揚水量の調査技術の高度化

地下水揚水量の実態を把握するには、経済産業省が実施する工業統計調査、公益財団法人日本水道協会（厚生労働省所管）が実施する水道統計調査を基に、工業用と上水用の地下水揚水量を推定することが多い（たとえば、安曇野市，2017）。これに加えて、農林水産省は不定期に農業用地下水利用実態調査を行っている。その他、地方公共団体が地域別に地下水調査業務を発注することもあるが、毎年の定期調査ではないことが多く、工業用・上水用以外の地下水揚水量の把握は簡単ではない。

ここで、国土交通省の調査結果によると、2015年度の用途別地下水使用の割合は、生活用水（水道用水も含む）28.8%，工業用水28.6%，農業用水27.2%，その他15.5%であり、生活用水、工業用水、農業用水ではほぼ同程度の地下水が使用されている現状にある（国土交通省，2019c）。このように我が国では、農業用の地下水使用量は依然として多く、その揚水量を適切に把握すべきである。しかしながら前述のとおり、工業用、上水用と比較すると農業用の地下水揚水量の調査頻度は低く、また小口利用が多いこともあり、詳細な揚水量の把握が困難な状況にある。また、農業用地下水の過剰揚水が地盤沈下の原因となる可能性も示唆されている（坂井ほか，2002）。農業用の地下水は揚水時に集中的に使用される傾向があるた

め、今後、気候変動に伴い頻発すると予想される渇水に備えて、農業用の地下水揚水量の詳細把握は益々重要になるものと考えられる。

このような状況の中で農林水産省は、2018年に「農業地域における持続的な地下水利用の手引き」を刊行し、この中で農業従事者に対していくつかの地下水観測方法を紹介している（農林水産省、2018）。本手引きでは、地下水の使用量を把握する方法として、量水器による測定と電気使用量等に基づく推計を挙げている。前者は、放水管等に設置する量水器のカウンターに表示される積算流量から、地下水の使用量を求めるものである。後者は、電力会社の請求書明細およびポンプ定格出力、または実際に運転中のポンプで測定した単位時間あたりの吐出量と電力使用量から推計した1kWhあたりの揚水量を用いて地下水揚水量を推計する方法である。将来的には、地域に散在するすべての地下水揚水井にスマートメータ等のIoT技術を実装して、リアルタイムの揚水量測定と適正利用の自動管理を実現し、過剰揚水に備える未来が来るかもしれない。

なお、ここで挙げたようなIoT技術による地下水利用の見える化は、おそらく現時点でも技術的には実現可能だと思われるが、通信・データ処理に強い異業種・異業界は当該分野に参入していない。この理由として、ニーズが認知されていない、興味がない、ビジネスが成り立たない等が考えられる。したがって、当該分野における将来的なIoT技術の開発と普及は、異業種と連携したビジネスモデル構築と並行して推し進める必要がある。

2.4 井戸の掘削・検査・維持管理

2010年～2019年までの過去10年で地下水学会誌に登載した論文・短報のうち、井戸の掘削や維持管理技術の新規開発に関する報告はひとつもなかった。しかしながら、地下水分野の研究やエンジニアリングの現場において、井戸の重要性や必要性はあらためて言うまでもなく、ここでは井戸に関する研究に焦点を当ててみる。

ひとことで井戸と言っても、水資源開発や汚染土壌・地下水を浄化するための揚水井、地下水位・地下水質・地盤沈下等の観測井、地中熱利用のた

めの地中熱交換井等、その用途に応じて求められる機能や構造は様々である。したがって、研究・実務ともに、井戸用途別の機能が適切に発揮できるかどうか非常に重要となる。

たとえば、揚水井の場合は、さく井工事施工指針（全国さく井協会、2013）等に従って、揚水井の性能と帯水層の特性を求める目的で各種検層や揚水試験を実施する。また、地中熱交換井では、一定加熱・温水循環方式熱応答試験（TRT）技術書（案）（地中熱利用促進協会編、2016）等に基づき、地中熱ヒートポンプシステムの設計において必要となる地盤の熱伝導率や地中熱交換器の熱抵抗を推定するために熱応答試験を実施する。これら試験は、井戸施工後にその機能（および地盤特性）を定量的に評価するものである。また、観測井においても、施工後の連続観測によって仕様通りの機能を発揮できているか（たとえば、観測井を介して複数の帯水層間での地下水の交流が生じていないか等）を知ることになる。つまり、井戸の仕上がり具体は施工後・運用後でないとわからないというのが実情である。これらを踏まえると、井戸運用前に所定の機能を検査・検証する技術、井戸性能を最大化するための維持管理・改修技術等の開発ニーズは高いと考えられる。

また、井戸掘削の現場では、使用機材や地質ごとに掘削難度が異なることから、掘削技術者が個別に有するノウハウに基づき最適な技術を適用して掘削している。今後、労働人口の急激な減少が見込まれる中で、熟練技術者を一朝一夕で育成できるはずもなく、掘削技術者の不足も将来的には重大な問題となりうる。当然のことながら、施主からすれば掘削技術者の違いによって、井戸性能に大きく差が生じないことが望ましい。したがって、熟練掘削技術者が暗黙知として保有しているノウハウ・技術を形式知に転換することも喫緊の課題であり、井戸掘削の省力化技術等の開発が期待される。

3. おわりに

本報では、近年ほとんど取り組まれていない研究テーマに着目して、近未来を見据えたハードとソフトの研究構想について述べた。

今後わが国では急激な労働人口の減少が想定される。その中で、限られた人的リソースと費用の下で、パフォーマンスの最大化を目指す「地下水モデリング技術における不確実性の可視化」や「井戸の掘削・検査・維持管理技術」は、労働人口の急減という社会課題の解消に資する重要な研究テーマである。また、「リアルタイムのデータ解析と情報発信」、「地下水資源の持続的利用のための水資源量の推計・管理」は、安心・安全で持続可能な社会の形成につながるものであり、ぜひとも進展が期待される研究テーマである。本報が今後の地下水学の発展に役立てば幸いである。

参考文献

- 愛知正温 (2016) : 地殻変動成分を含む InSAR 地表面変位観測データを用いた地下水・地盤沈下モデル補正の可能性. 日本地下水学会2016年春季講演会講演要旨, 126-129.
- 安曇野市 (2017) : 安曇野市水環境基本計画【マスタープラン】. 38p.
- 石原雅規 (2018) : 最近の堤防の被災事例と特徴. https://www.jiban.or.jp/wp-content/uploads/2018/07/180725saigaiSS2_12ishihara.pdf. (2019.11.1閲覧)
- 大宮 哲・松澤 勝 (2017) : 強風時における雨量計の降雪粒子捕捉率に関する検討. 寒地土木研究所月報, 769, 2-8.
- 加藤耕太 (2017) : Python クローリング & スクレイピングデータ収集・解析のための実践開発ガイドー. 技術評論社.
- 気象庁 (2017) : 地球温暖化予測情報 第9巻. 23-41.
- 気象庁 (2019) : 気象庁 web サイト「防災情報 大雨・洪水警報の危険度分布」. <https://www.jma.go.jp/jp/doshamesh/>. (2019.11.1閲覧)
- 公益社団法人地盤工学会 (2019) : 平成30年7月豪雨を踏まえた豪雨地盤災害に対する地盤工学の課題－地盤工学からの提言－. https://www.jiban.or.jp/file/saigai/houkoku/H30_TeigenSaishu.pdf. (2019.11.1閲覧)
- 国土技術政策総合研究所 (2019) : 国土技術政策総合研究所 web サイト「リアルタイム浸水予測システム」. <http://www.nilim.go.jp/lab/rcg/newhp/seika.files/shinsuiyosoku/>. (2019.11.1閲覧)
- 国土交通省 (2016) : 河川管理者のための浸透・侵食に関する重点監視の手引き (案). 2p.
- 国土交通省 (2019a) : 令和元年台風第19号等による被害状況等について. https://www.mlit.go.jp/saigai/saigai_191012.html. (2019.11.1閲覧)
- 国土交通省 (2019b) : 国土交通省 web サイト「水害リスクライン」. <https://frl.river.go.jp/>. (2019.11.1閲覧)
- 国土交通省 (2019c) : 国土交通省 web サイト「地下水利用の現状」. http://www.mlit.go.jp/mizukokudo/mizsei/mizukokudo_mizsei_tk1_000062.html. (2019.11.1閲覧)
- 財団法人国土技術研究センター (2012) 河川堤防の構造検討の手引き (改訂版). 9-12.
- 坂井 晃・三浦哲彦・八谷陽一郎・陶野郁雄 (2002) : 佐賀平野における地下水位の季節的変動による広域地盤沈下とその管理手法. 土木学会論文集, 715 (Ⅲ-60), 135-146.
- 柿 拓馬・愛知正温 (2019) : 粒子フィルタを用いた漏水性帯水層物性の確率的推定と将来予測手法の開発. 日本地下水学会2019年春季講演会講演予稿, 42-47.
- 佐藤 怜・富樫 聡・吉田広人・加藤ひかる・松岡洋一郎・小野寺真一 (2018) : 豪雪地帯に位置する森林の水涵養機能定量化の試み～「アサヒの森」を例として～. Kansai Geo-Symposium 論文集, 2018, 70-75.
- 産経新聞 (2019) : 2019年10月25日産経新聞 web サイト「【台風19号】完成した堤防も決壊 遅れる河川整備」. <https://www.sankei.com/life/news/191025/lif1910250028-n1.html>. (2019.11.1閲覧)
- 滋野勝稔 (2012) : 京都第二外環状道路北春日トンネルにおける地下水対策について. 平成24年度近畿地方整備局研究発表会論文集 (調査・計画・設計部門), No.11_1-4.
- 地下 調 (2011) : 社会資本の予防保全的管理のための点検・監視技術の開発. 建設の施工企画, 736, 9-12.
- 社会資本整備審議会 (2015) : 水災害分野における気候変動適応策のあり方について～災害リスク情報と危機感を共有し、減災に取り組む社会へ～ 答申. http://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/shaseishin/kasenbunkakai/shouuinkai/kikouhendou/pdf/1508_02_toushinhonbun.pdf. (2019.11.1閲覧)
- 社団法人全国さく井協会 (2013) : さく井工事施工指針

- (平成25年版). 6-7.
- 新保明彦 (2010a): レーダー・アメダス解析雨量 (I). 天気, 48 (8), 579-583.
- 新保明彦 (2010b): レーダー・アメダス解析雨量 (II). 天気, 48 (10), 777-784.
- 鈴木啓助 (2018): 山の気象水文観測の現状と課題. 山の科学, 1, 1-11.
- 鈴木啓助 (2019): わが国の山岳地域における最近の水文学研究. 地下水学会誌, 61 (3), 207-215.
- 鈴木博人・中北英一・高橋日出男 (2017): 1km メッシュ解析雨量の精度検証—関東甲信越地方と東北地方における解析—. 土木学会論文集 B1, 73 (4), I _13-18.
- 椿 涼太・小林健一郎・内藤正彦・谷口 丞 (2013): 洪水予測技術の現状と課題について. 河川技術論文集, 19, 1-6.
- 特定非営利活動法人地中熱利用促進協会 (2016): 一定加熱・温水循環方式熱応答試験 (TRT) 技術書 (案). 6-11.
- 登坂博行 (2006): 地圏の水環境科学. 東京大学出版会, 100-106.
- 富樫 聡・大向弘明 (2015): 長野の地下水資源と保全. 水環境学会誌, 38 (7), 235-239.
- 日本学術会議 (2011): 提言 気候変動下における水・土砂災害適応策の深化に向けて. <http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-21-t130-9.pdf>. (2019.11.1閲覧)
- 農林水産省 (2018): 農業地域における持続的な地下水利用の手引き～地下水観測のススメ～. 14-20.
- 深見浩司 (2012): 積雪寒冷地における積雪期の不圧地下水位の変動について. 北海道大学地球物理学研究報告, 75, 15-24.
- みずほ情報総研株式会社 (2015): 「CDP ウォーター (水)」が企業に求める新しい環境対応. <https://www.mizuho-ir.co.jp/publication/column/2015/kankyo0420.html>. (2019.11.1閲覧)
- 谷中隆明・前川統一郎・永野多美雄 (1990): 消雪用地下水の節水による地盤沈下抑制効果の予測. 地下水学会誌, 32 (1), 27-34.
- 渡辺澄夫 (2012): ベイズ統計の理論と方法. コロナ社.
- Akaike, H. (1980): Likelihood and the Bayes procedure. In: Bayesian Statistics, Bernardo J. M., De Groot M. H., Lindley D. V. and Smith A. F. M. eds., University Press Valencia, Spain, 143-166.
- Carle, S.F. and Fogg, G.E. (1997): Modeling spatial variability with one and multidimensional continuous-lag Markov chains. Mathematical Geology, 29(7), 891-918.
- Doherty, J. (2015): Calibration and uncertainty analysis for complex environmental models. Watermark Numerical Computing.
- Elad M. (2010): Sparse and redundant representations: From theory to applications in signal and image processing. Springer.
- Hill, M.C. and Tiedeman, C.R. (2007): Effective groundwater model calibration. John Wiley & Sons.
- Hoffmann J., D. L. Galloway and H. A. Zebker (2003): Inverse modeling of interbed storage parameters using land subsidence observations, Antelope Valley, California. Water Resources Research, 39(2), 5.1-13.
- Jalala, S., Hani, A. and Shahrour, I. (2011): Characterizing the socio-economic driving forces of groundwater abstraction with artificial neural networks and multivariable techniques. Water Resour. Manage. 25, 2147-2175.
- Jiang, Z., Xu, T., Mallants, D., Tian, H., and Owen, D.D.R. (2019): Numerical modelling of stable isotope (^2H and ^{18}O) transport in a hydro-geothermal system: Model development and implementation to the Guide Basin, China. Journal of Hydrology, 569, 93-105.
- Lee, S., Carle, S.F. and Fogg, G.E. (2007): Geologic heterogeneity and a comparison of two geostatistical models: Sequential Gaussian and transition probability-based geostatistical simulation. Advances in Water Resources, 30(9), 1914-1932.
- Pappenberger, F. and Beven, J. (2006): Ignorance is bliss: Or seven reasons not to use uncertainty analysis. Water Resources Research, 42(5), W05302.
- Spitz, K. and Moreno, J. (1996): A practical guide to groundwater and solute transport modeling. John Wiley & Sons.
- Tamura, Y., Sato, T., Ooe, M., and Ishiguro, M. (1991): A procedure for tidal analysis with a Bayesian information criterion. Geophys. J. Int., 194, 507-516.

(受付: 2019年11月29日, 受理: 2020年5月12日)