地表面下の水循環プロセスの見える化とその展望

嶋田 純^{1*}

Scientific visualization of sub-surface hydrological process and its horizons

Jun SHIMADA^{1*}

I. はじめに

地表面付近において、水は状態変化しながら太陽エネルギーと地球の重力を駆動力として循環しており、この水循環の個別プロセス（水循環プロセス）の実態を把握し、地域特性を理解して当該地域の水循環を踏まえた水利用の在り方を考究することが『水文学』・『水文科学』の目指すところである。20世紀後半から21世紀にかけての半世紀は、著しい科学技術の発展と社会の要請に伴った、まさに『水文(科)学』発展の時代と位置付けることができる。この水文学研究の進展を『水循環プロセスの見える化』という観点から改めて見直し、2018年10月に京都の総合地球環境学研究所で開催された日本水文科学会学術大会の折に行った会長講演をベースに、企画『水文科学(会)について語る』への投稿依頼を受けてとりまとめを試みた。地表面より下（土壌水や地下水）の水循環プロセスを対象とした背景には、自身の研究テーマと密接に関連していたこともさることながら、森（2017）に指摘されているように、本学会の潮流としても主要な研究対象となっていることから、その動向を改めて見極める機会とできればと考えている。

II. 物理的・化学的観測に基づく 水循環プロセスの把握

地下水面計を用いて井戸調査をすることで描かれた地下水面図により平面的な地下水流動が把握できるが、ボーリング孔の深度別水圧や湧水点標高を測定して断面方向の地下水ポテンシャル図を描くことで、断面方向の地下水流動を把握することも可能である。Fig. 1は、熊本県宇土半島の第3紀火成岩山地における半島稜線部から沿岸部およびその先の八代海海底下まで連続している角礫凝灰岩系帯水層における地下水流動を把握するために作成した複数のボーリング孔の深度別水圧や湧水湧出点等の情報を基に描かれた断面方向の地下水ポテンシャル図である。このような岩盤内においても、いわゆる地域流動系の地下水流動が存在していることが明確に示されると共に、このようにして把握された地下水流は、安定同位体比の高度効果特性を利用して推測される涵養標高を基にした地下水流れや年齢トレーサー分布とも極めてよく整合することが確認されている（Shimada et al., 2007; 辻村, 2008）。多孔質帯水層においても、2016年の熊本地震で枯渇した水前寺成趣園池と地下水の関係を見極めるべく Fig. 2に示すような断面2次元のポテンシャル分布を作成して地震前後の地下水状況を比較した。この判読の結果、水前寺成趣園のある詫麻台地中央部に地震に伴って新たに出現した断裂系への地下水の吸い込

1 熊本大学名誉教授・大学院先導機構特任教授 Prof. Emer., Kumamoto Univ.

* 責任著者

Fig. 1 Groundwater flow system confirmed by (a) stable oxygen isotopes, (b) the potential distribution and (c) age tracers at Shiranui tuff-breccia aquifer watershed of Uto Peninsula (Groundwater age shown in the yellow ovals was confirmed by CFCs, Shimada et al., 2007 and Tsujimura, 2008).

み現象に伴う水位低下が湧水池枯渇の原因であることが明らかとなった。

土壌の比抵抗値は、その中に含まれる水分量によって変化するため、同じ測線で比抵抗値を繰り返し測定し、その変化量を時系列比較することで蒸発や浸透に伴う土壌水の動きをとらえることができる。Fig. 3は、九州沖縄農業センターの広葉樹林内に設けた50 mの測線沿いに、50 cm間隔で設置した約100本の電極を用いて6時間毎の繰り返し電気探査を約2年間に渡り実施し、深度13 mまでの土壌の水分量観測を行った研究成果である

(嶋田ほか, 2008)。観測された比抵抗値プロファイルの変化量から換算された水分量変化から、樹木の存在している場所と裸地とは異なる土壌水分の季節変化が存在することを確認すると共に、樹幹直下では降雨に伴う樹幹流による水分量増加の影響を明確にとらえている。地表面での水収支を考えた場合、樹木は蒸散として水を消費するマイナス要因であるが、一方、樹幹流による積極的な水の捕捉作用も存在していることが分かる。

また、塩水と淡水で比抵抗が大きく異なる特性を利用すると、潮汐変化の激しい干潟部に設置し

Fig. 2 Change of groundwater flow system before and after Kumamoto Earthquake 2016 (Shimada, 2018).

Fig. 3 Change of cross-sectional soil water content confirmed by repeated resistivity measurement (Shimada et al., 2008).

た測線による同様の比抵抗繰り返し測定によって、沿岸域における潮汐変化に伴う塩淡水境界の変化を明確にとらえることにも成功している (Fig. 4; Shimada et al., 2007)。沿岸部の海底地下水湧出

Fig. 4 Change of repeated resistivity profile under the tidal flat area to confirm the submarine groundwater discharge during tidal fluctuation (reddish color represents fresh groundwater and bluish color represents sea water, pink triangle indicates the location of coast line, Shimada et al., 2007).

現象は、淡水地下水の持つ地下水ポテンシャル（その背後に存在する地下水流動構造が影響）と、湧出部の上部を覆う海水水圧の変動に伴ってその湧出量が制御されている。

Ⅲ. コンピュータシミュレーションの活用

大気の動きが観測データと過去の記録を基にかなりの精度でコンピュータシミュレーションによって再現できるようになり、台風の進路や局地的豪雨予測はともかくも、通常の天気予報精度が格段と良くなってきたことで分かるように、水文循環場（特に地下水循環）においても、的確な情報が提供されることにより、シミュレーション解析で再現する手法が広く利用されるようになってきている。地表を流れる河川水と地下部分に浸透・流動する土壌水・地下水を統合的にモデル化する解析技術は、降水量と気温を入力データとして河川流量や地下水位の観測値の再現性を向上させることで、地下部分の水の流れの実態を再現す

ることができる。加えて当該地域で得られた保存性の高い環境トレーサー観測履歴を同時にヒストリーマッチングに用いることができれば、流域の地下水流れをより正確に同定できる（嶋田・上野, 2016）。このような優れた流域地下水流動モデルが構築できると、それを利用して土地利用が変化した場合の地下水流動場の変化を掌握することが可能となり、地下水管理政策への積極的な利用につながる素地を持っている。例えばFig. 5は、熊本地域で取り組まれた休耕田を利用した地下水人工涵養事業の効果を確認するために、白川中流域低地の土地利用が異なる4つの時代を対象にして、土地利用の違いが涵養機能にどのように影響するかを比較したものである（Shimada et al., 2012）。結果的に水田あるいは休耕田水張事業が地域の地下水涵養に相応の効果を果たしていることが、相対的に大きな涵養量分布域として明示されている。2004年以降熊本市が中心となって組織的に地域で取り組み、国連の受賞までに至った休耕田水張事業の開始時にはまだ当該モデルが存在して

Fig. 5 Effect of artificial groundwater recharge through abandoned rice paddies in Mid-stream area of Shira river, Kumamoto, confirmed by groundwater flow simulation for different land use scenario (Shimada et al., 2012).

いなかったため、それまでの経験知を基に地域のNPOと進出企業とが地下水保全策の一環として取り組み始めた事業であったが、今後他の地域で類似した事業に取り組む場合には、地域の地下水流動モデルを活用して水理地質学的適地を的確に選定して事業に取り組むことで、より効率の良い事業運営を可能にし得ると考えている。

Ide et al. (2018) は、霧島火山の滞留時間の異なる裾野湧水における地下水年代や涵養標高データを基に、地下水流動に伴う化学的風化プロセスに時間軸を入れた解釈をすることに成功しており、またNakaya et al. (2018) では、琉球石灰岩中に設けた地下ダムによる地下水滞留の程度差が、地下水中の硝酸態窒素の変遷プロセスに影響を与えていることを指摘している。このように明らかになりつつある流動に伴う非保存性の化学物質(SiO_2 や $\text{NO}_3\text{-N}$ 等)の帯水層中での振舞いについても、地下水流動モデルの中で帯水層中における変遷プロセスとしての的確にモデル化できれば、その結果を利用することで硝酸態窒素のような汚染物質の削減対策の構築やその是非を評価するツールとしても活用できる可能性を秘めている(嶋田・上野, 2016)。

現在我々が接している水循環場には、様々な時間スケールで流動している水が存在しており、調査現場から採取した地下水や間隙水の中には、現世とは異なる環境下で捕捉された水が残存していることも十分想定される。Fig. 1の一番下に示した宇土半島における地下水年代分布図を見ると図の右側部分(現在の八代海の海底下50 m)には、炭素14年代で2100–2600年前に相当する古い淡水性地下水の存在が示されている。この部分は、同図の左側に示されている角礫凝灰岩山地域の数十年前から百年程度のオーダーの現世水循環とは全く異なる時間スケールの滞留性地下水と見られ、現在の海底下にある海成粘土層の堆積年代とほぼ一致していることから、恐らく2000年前頃の八代海の海進に伴って海底下に封入された水循環系だと解釈している。類似した過去の水循環場履歴の封じ込め現象は、より堆積速度の速い霞ヶ浦の

湖底堆積物中のコア間隙水でも確認され、コア間隙水の化学成分には場所による差異が大きいことが指摘されている。すなわち、霞ヶ浦地域が陸化したことで形成された淡水性地下水による海成成分の洗い流しの効果が顕著な場所とそうではない場所が存在していることが、湖内2か所の底質コアサンプルの間隙水プロファイルを用いた安定同位体と塩素イオン濃度情報から明らかにされた(高本ほか, 2016)。霞ヶ浦周辺地域におけるこれらの完新世から現在に至る水文環境の変遷を説明するために、過去の海水準変化、堆積速度、隆起・沈降情報等の水文環境推定値をベースにした非定常地下水流動解析を実施することで、地下水流動モデルから湖底堆積物中のコア間隙水質観測データの再現を試みた結果、過去1万年スケールの水文環境変遷がコア観測に基づく解析結果と相応に整合していることが確認され、当該地域の古水文環境の変遷を明らかにすることに成功している(高本ほか, 2017)。Fig. 6はその結果であるが、湖心に近いK-2と出島半島に近いK-1とでは、陸域からの距離が異なるため、海成層堆積時に混入していた海水成分(黄から赤の暖色系)が7300年前から現在に至る間に受けた陸化に伴う湖周辺の陸域部から湖に向かう淡水性地下水流動によって希釈される効果に違いをもたらしている様相(K-1の方がより多く希釈されている)が読み取れる。

2016年4月、熊本地域は $M_j=7.3$ 規模の大きな内陸型地震に襲われ、その後1年近く続いた1万回近い余震と共に、地域に甚大な被害がもたらされた。地下水を水道水源として利用している関係から、地域には30年以上の観測実績のある100本以上の地下水観測井戸があるため、地震前後の期間に対してこれらの地下水位観測結果を詳細に解析することで、地震に伴う地下の変動が地下水帯水層や地下水流動にどのような影響を与えたのかを解明することが可能である。Fig. 2に示したような断面地下水ポテンシャル図による現象把握に加えて、地下水温・環境同位体トレーサー等について地震前後の変化を確認すると共に、それらの

Fig. 6 Temporal variation of the simulated salinity distribution around Lake Kasumigaura in last 10000 years validated by the lake bottom soil water chemical information (Takamoto et al., 2017).

変化を説明することができるように、既に確立されている地域の地下水流動を再現できている流動シミュレーションモデルに地震に伴う地殻の変化を組み込むことで、地震時に出現した地域の水循環変化に係る現象の科学的解明に現在取り組んで

いる。例えばFig. 2のような新たに出現した断裂系への地下水の吸い込み現象についても、基盤部に新たに出現させた亀裂系に吸い込まれた地下水量が帯水層の地下水低下量と十分バランスできることが、新たに構築した基盤部の新規亀裂を含む

ようなモデルによって示されてきている（細野ほか，2018）。

Ⅳ. おわりに

概念として理解されていた水循環プロセスについて、20世紀後半に発達してきた様々な手法を活用することで、『水循環プロセスの見える化』が可能になってきた事例を紹介してきた。地表面下の水の動きを再現できるモデルは、これまでの観測水文学から得られたデータを基に、現実に行っている地表面下の水循環プロセスを再現できるレベルにまで到達してきている。地表付近の水の循環様式は地域性が極めて高いが、それらを適確に把握するツールを活用することで、我が国のような温帯湿潤地域ではその循環様式を踏まえた水資源利用を行うことでその持続的利用を可能にできる。

農林業センサスによれば、わが国の戦後60年間の農家数と農業従事者数の推移は、農家数が604万戸から133万戸へ、農業従事者数が1932万人から340万人へ大きく減少している。さらに1960年当時60歳以上の高齢農家の比率は2割程度だったが、現在では70歳以上が約半分の47%、60歳以上が約8割の77%を占めており著しい高齢化が起きている（山下，2016）。このような流れの中でも食料自給率を確保できるようにこれからの農業を維持してゆくためには、より効率を高めた大規模集約化農業の導入は避けられない。一方、湿潤地域の水循環に大きく影響を及ぼす水田農業や地下水資源への窒素負荷の要因となる畑作農地・畜産地域を流域内の適正な場所に再配置するような形で大規模集約化農業の導入ができれば、水利政策と土地利用政策とをリンクさせた地域経済と環境の双方にやさしい持続的農業・持続的水利用を確保することが可能である。このような農業・水資源・環境の相互関連性を踏まえた新たな抜本的政策の展開が、総人口が低下してきたこれからのわが国にとっての重要な課題である。

全球温暖化に伴う降水の極端化現象の頻発に

よって河川流量の不安定性が増大しており、それに対する抜本的対策は極めて難しい。一方地下水資源は、その貯留特性によりこれらの降水変動に対する脆弱性が相対的に低く、その特性を生かして湿潤温帯の恵まれた水循環特性を十二分に活用した地表水と地下水の統合的水資源利用を確立することが強く求められており、その中で水文学の果たす役割は極めて高い。『水循環プロセスの見える化』の先にあるものは、これらの技術を地域水資源の持続的利用に積極的に活用することにあると考えている。今年度から学会HP上で公開された本誌の前身誌『ハイドロロジー』の創刊号巻頭言では、水文学を庶民の学問と位置付け、『庶民の学問は必要がその存在を保証し、発達を要請する』（山本，1967）と述べている。これからの我が国における持続的な水資源利用にとって『水文学』は不可欠である。

文 献

- 嶋田 純・大角京子・大場和彦・丸山篤志（2008）比抵抗探査法を用いた広葉樹林床土壌における樹幹流の影響把握と地下水涵養効果の評価. 土壌の物理特性, **108**, 19-28.
- 嶋田 純・上野真也編著（2016）持続可能な地下水利用に向けた挑戦—地下水先進地域熊本からの発信—. 熊本大学政創研叢書9, 誠文堂, 294 p.
- 嶋田 純（2018）熊本地震による地域地下水への影響評価. サントリー天然水の森フォーラム 2018, 14.
- 高本尚彦・嶋田 純・徳永朋祥（2016）難透水性湖底堆積物コアの間隙水をういた霞ヶ浦の完新世における古水文状況の復元. 地下水学会誌, **58**(3), 273-288.
- 高本尚彦・嶋田 純・白石知成（2017）非定常地下水流動解析による霞ヶ浦の完新世における古水文環境の復元. 地下水学会誌, **59**(4), 325-343.
- 辻村真貴（2008）マルチ・トレーサー手法による

- 流域水・物質循環プロセスのモデル化に関する研究. 科研費基盤研究C成果報告書, 109 p.
- 細野高啓・山田千聡・柴田智郎・田原康博・嶋田純 (2018) 熊本地震による地下水位変化メカニズム. 日本地球惑星科学連合2018年大会, AHW24-04.
- 森 和紀 (2017) 水文科学：基礎科学としての水文学. 日本水文科学会誌, **47** (1), 17–21.
- 山下一仁 (2016) 農業を魅力ある就業先とするために. 日本労働研究雑誌, **675**, 33–46.
- 山本莊毅 (1967) ハイドロロジーの創刊によせて. ハイドロロジー, **1**, 1.
- Ide, K., Hosono, T., Hossain, S. and Shimada, J. (2018) Estimating silicate weathering timescales from geochemical modeling and spring water residence time in the Kirishima volcanic area, southern Japan. *Chemical Geology*, **488**, 44–55.
- Nakaya, S., Yasumoto, J., Ha, P., Aoki, H., Kohara, F. Masuda, H. and Masuoka, K. (2018) Hydrochemical behavior of an underground dammed limestone aquifer in the subtropics. *Hydrological Processes*, **32**, 3529–3546.
- Shimada, J., Inoue, D., Satoh, S., Takamoto, N., Sueda, T., Hase, Y., Iwagami, S., Tsujimura, M., Ishitobi, T. and Taniguchi, M. (2007) Basin-wide groundwater flow study in a volcanic low permeability bedrock aquifer with coastal submarine groundwater discharge. *IAHS publication*, **312**, 75–85.
- Shimada, J., Ichianagi, K., Kagabu, M., Saita, S. and Mori, K. (2012) Effect of artificial recharge using abandoned rice paddies for the sustainable groundwater management in Kumamoto. In: Proceedings of the 2012 Congress, World Environmental and Water Resources Congress. Loucks, E. D. (Ed.), The American Society of Civil Engineers, 59–69.