

地下水学の進展と地下水ガバナンス

田中 正*

Progress of groundwater hydrology and the groundwater governance

Tadashi TANAKA*

要 旨

本稿は、2019年7月28日に日本大学文理学部百周年記念館国際会議場において開催された公益社団法人日本地下水学会主催のセミナー「地下水ガバナンスの理論・事例分析と実践のプロセスへの示唆」において講演した内容に基づいて、これを加筆・修正したものである。わが国における地下水学や水文学に関する学術研究がスタートしたのは1910～1920年頃と考えられ、それからほぼ一世紀が経過したことになる。本稿では、この間における地下水学の進展について、主として水循環の視点からその過程を記すとともに、2000年以降における地下水に関わる国内外の動向を踏まえて、2014年7月1日に施行された「水循環基本法」との関連において、地下水保全管理の新たな概念である「地下水ガバナンス」について世界の動向とわが国の現状についてその概要を記した。

キーワード：地下水学、環境基本法、水循環基本法、第五次環境基本計画、SDGs、共有自然資源、持続可能性、地下水ガバナンス、パラダイムシフト

1. はじめに

わが国において、書籍のタイトルに「地下水」という用語がつけられた最初の学術書は丸善から1919年出版された君島八郎著「地下水及地表水」(君島, 1919)ではないかと思われる。本書は、丸善の河海工学第2編として出版されたものであり、土と地下水、浸透や坑内湧水、土質・水質試験などの章も記載されている(日本地下水学会HP, 2018)。1931年には鈴木昌吉著「地下水概論」(鈴木, 1931)が、1933年には福富忠男著「地下水」(福富, 1933)がいずれも岩波書店から出版されている。また、同じく1933年にはわが国にお

いて初めての水文学に関する学術書である「水文学」(阿部, 1933)が阿部謙夫氏によって岩波書店から出版されている。

わが国において、米国から導入した「ロータリー鑿井機」が使われ始めたのが1913(大正2)年(遠藤, 2005)であることと上記の学術書出版年を考慮すると、わが国における地下水学や水文学に関する学術研究がスタートしたのは1910～1920年頃と考えられ、それからほぼ一世紀が経過したことになる。限られた紙数の中で、この間における地下水学の進展過程を全て網羅することは出来ないため、ここでは主として水循環の視点からその進展過程を記すとともに、2000年以降にお

* 筑波大学名誉教授

Emeritus Professor, University of Tsukuba

ける地下水に関わる国内外の動向を踏まえて、2014年7月1日に施行された「水循環基本法」との関連において、地下水保全管理の新たな概念である「地下水ガバナンス」について国内外の動向とわが国の現状についてその概要を記すことにする。

なお、地下水ガバナンスといった政策課題を議論するためには、その対象となる地下水についての科学的情報を提示する必要がある。そして、この科学的情報はアジェンダ・セッティングの契機となり、政策形成を促進し得るとされている(千葉, 2020)。こうした意味から、本稿においてはその前半部分において流域水循環に果たす地下水の役割を中心として、それにかかる地下水学の進展過程についてその背景を含めてやや幅広く記載することとする。

2. 地下水流動理論の確立

地下水に関する定量的な研究は Darcy (1856) に始まるが、いわゆる Darcy の法則は実験結果に基づいた経験則として発表されたものであり、当時において物理法則から演繹されたものではない。Darcy 則の物理的な裏づけは、Hubbert (1940) による「流体ポテンシャル (fluid potential)」理論の確立まで84年の歳月を待つ必要があった。この理論は、物理法則としての多孔媒体中の飽和流の運動、すなわち地下水流動を支

配する物理則を記述するものである。最終形としての流体ポテンシャルは水柱高で表され、次式のようになる。

$$h = z + \psi$$

ここで、 h は水理水頭 [L]、 z は重力水頭 [L]、 ψ は圧力水頭 [L] である。均質等方性の媒体中では、水は等ポテンシャル線と直交する方向へ移動する。

地下水の流れは、この物理的に定義される流体ポテンシャルに基づいてポテンシャル流として記述することができる。この理論に基づいて Tóth (1963) は定常流の地下水流動方程式を境界値問題として解析的に解き、鉛直二次元断面におけるポテンシャル分布に基づいて広域地下水流動に関する検討を行った。図1は、均質等方性帯水層で地下水面に起伏がある場合の二次元定常流解析解における等ポテンシャル線と流線を示したものである。図から分かるように、地下水の流動は地下水面の起伏、すなわち地形の起伏に規制されて、局地・中間・地域と呼ばれるそれぞれ規模の異なる流動系を形成し、広域地下水流動の空間構造は重層かつ階層構造を呈することが明らかにされた。

一連の解析結果に基づいて Tóth (1963) は、「地下水流動系 (Groundwater flow system)」という概念を提示した。この概念は、地下水の流れ

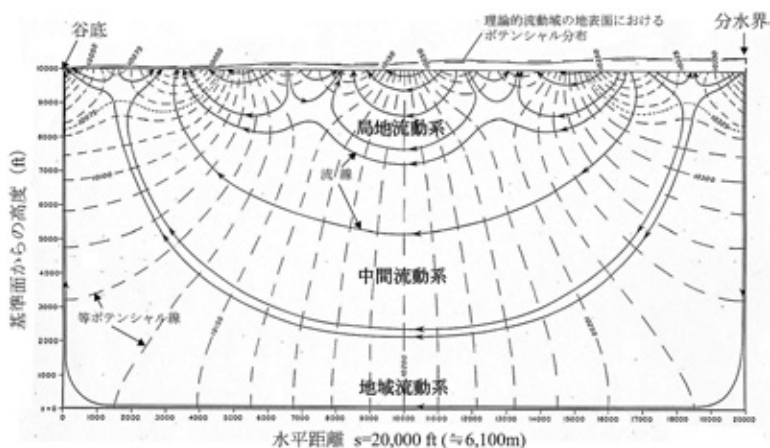


図1 均質等方性帯水層で地下水面に起伏がある場合の二次元定常流解析解における等ポテンシャル線と流線 (Tóth, 1963 を修正して加筆)。

を「涵養—流動—流出」という空間的な拡がりを持つ連続した系と認識し、地下水を水循環の一環として捉えようとする点にその科学的な意味がある。こうした流動系が実際に存在することは、ピエゾメータ群による水理水頭の三次元分布の観測や後述する環境同位体をトレーサーとする野外での実証的な研究によって確認されている（例えば、権根, 1980）。

また、Tóth による地下水流動系という概念の提示は、地下水の流れを「可視化」することが可能になったという点において重要な意味を持つ。図2は、帯水層と加圧層の水理学的連続性を踏まえて、滞留時間を異にする地下水流動系のあり方を模式的に示したものである（Tóth, 1995）。この図から、地下水は帯水層中ではなく、帯水層—加圧層群中を三次元的に流動している様子を読み取ることができる。また、地下水が涵養—流動—流出という水循環プロセスを介して土壌水や河川水・湖沼水といった地表水体と交流を持つ水として位置づけられることは図2からも想定され、地下水が単に水資源の対象としてばかりでなく、地表水体と交流を持つ循環する水の一部として地表環境や地中環境の保全等に深く関与していることが示唆される。

一方、Freeze and Witherspoon (1967) は数値シミュレーションによってTóthのモデルを発展させ、均質帯水層とともに不均質異方性帯水層についての解を可能にし（図3）、1970年代以降に

おける数値シミュレーション全盛時代の先駆けとなった。この数値シミュレーション技術は、今日では三次元非定常流や「統合型流域モデリング」による地下水流動解析にまで拡張されている（例えば、森ほか, 2015；森, 2016）。図4は、統合型流域モデリングによる地表水—地下水結合流れの数値シミュレーション結果を示したものであり、地表水と地下水の三次元流動を可視化したものである。この図の地下水の流線は、地表面から粒子を発生させ、その流動経路を描画したものであり（森, 2016）、水理水頭から導かれる地下水の流線ではないことに注意を要するが、この図は、Tóth (1995) が模式図（図2）として示した地下水と河川水との関係を良く表現しているといえる。

地下水を保全・利用する際の基礎的情報となる広域地下水流動の実態把握は、それをまず可視化することが重要であり、その手法となる基礎は1960年代末には整備されたことになる。

3. 計測技術の進展

1970年代に入ると、液体シンチレーションスペクトロメーターや質量分析計といった測定機器の分析精度が飛躍的に向上し、環境同位体を地下水循環の追跡子（トレーサー）とする研究が世界的に進展した。また、中性子水分計やガンマ線密度計といったRI（Radio Isotope）を装備し

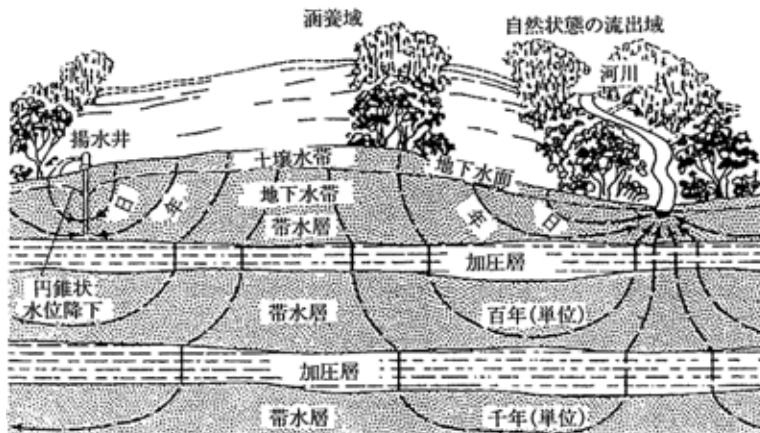


図2 滞留時間を異にする地下水流動系のあり方を示す模式図（Tóth, 1995を修正）。

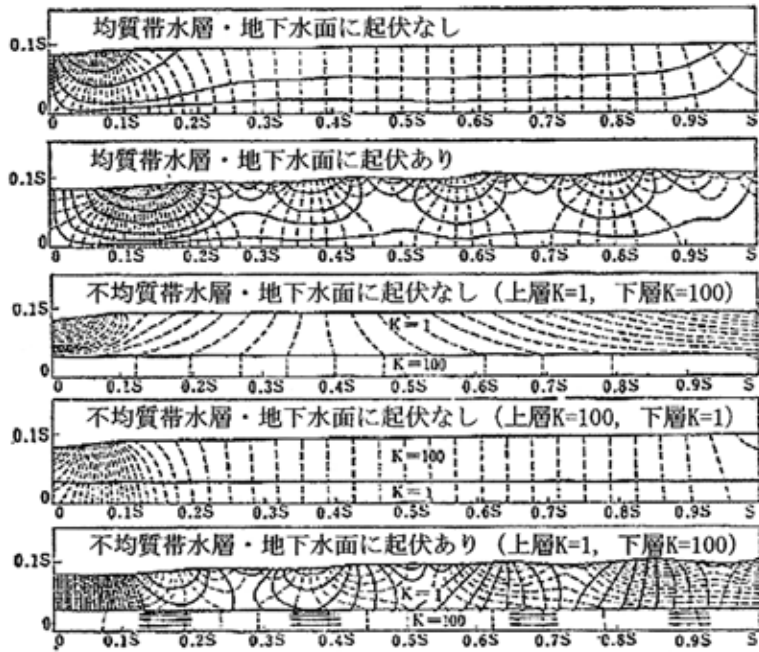


図3 均質・不均質帯水層についての数値シミュレーション結果 (Freeze and Witherspoon, 1967 に加筆).
 図中のKは透水係数で相対値で示す. 縦軸, 横軸も相対値.

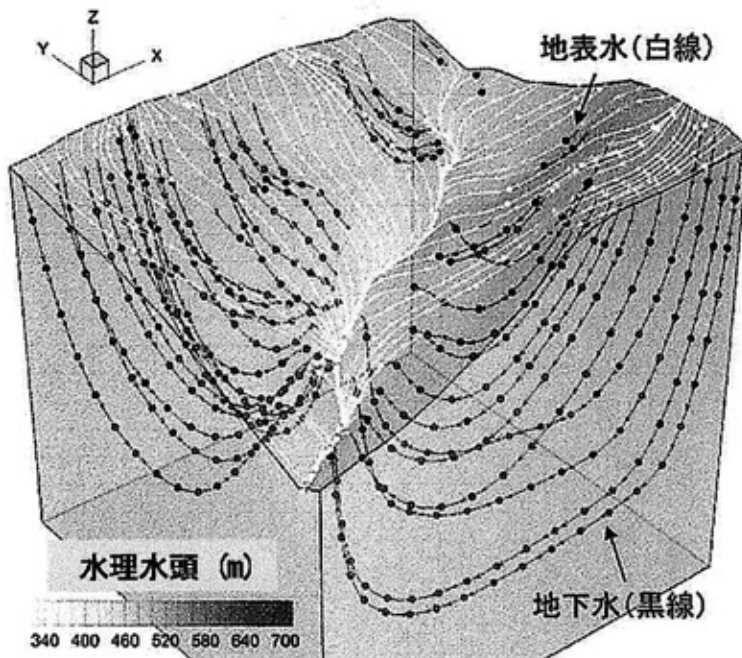


図4 統合型流域モデリングによる地表水-地下水結合流れの数値シミュレーション結果 (森ほか, 2015 を修正).

た測定機器の開発も進み（例えば、土質工学会、1974）、IAEA（国際原子力機関）を中心に「同位体水文学（Isotope Hydrology）」（例えば、IAEA、1970）という新たな研究分野が確立した。水分子を構成する同位体である ^2H （重水）、 ^3H （トリチウム）、 ^{18}O （酸素-18）は理想的なトレーサーとして水循環の追跡に利用されている。

環境同位体としての放射性同位体（ ^3H 、 ^{14}C （炭素14）など）は時間情報を、安定同位体（ ^2H 、 ^{18}O など）は空間情報を有することから、地下水についての時間情報と空間情報を読み取ることが可能となり、地下水の年代や滞留時間、地下水の涵養高度や涵養域の推定、流動系を異にする水の地中での混合状態等を解明する研究が進展するようになった。また、これらの測定技術や観測装置を用いることによって、不飽和帯における降下浸透メカニズムの解明が進展するとともに、わが国を始めとして世界的に地下水涵養機構の解明が試みられた時期である。この地下水涵養機構の解明結果は、わが国においては2000年前後にとりまとめが行われている（雨水浸透技術協会、1998；日本地下水学会編、2001）。

榎根（1986）は「水文学研究の動向—地中水を中心に—」において、「水循環の素過程における新しい現象の発見は野外計測技術の進歩によるところが大きい。中でも特筆すべきは同位体技術の応用であろう。」と述べている。1970年代から80年代にかけての計測技術の進歩は、地下水学の進展にとって大きな役割を果たしたものと見える。

4. 水流発生機構に関する研究の進展

1970年代後半から1980年代にかけて、古くから水文学の中心的研究課題とされた「流出解析」、すなわち「降雨流出過程」あるいは「水流発生機構」に関する研究が「斜面水文学（Hillslope Hydrology）」（Kirkby ed., 1978）と先に述べた同位体水文学の進展によって世界的規模で展開され、流出プロセスそのものが野外での実証的研究から明らかにされるようになった。

従来、河川水の流出機構については、研究対象流域の気候・地形・地質・土壌・植生・土地利用等の自然的・人為的な影響を受けて複雑である

ことと、1930年代に発表されたHorton 地表流説（Horton, 1933）が広く受け入れられたことから、1960年代半ばまでは多くの場合、降雨に対する流域の応答はブラックボックスとして取り扱われ、入出力解析による流出モデルの構築が研究の中心をなしていた。

しかし、客観的手法としての環境同位体を用いたハイドログラフの分離に関する研究結果と現地野外での実証的研究から、わが国を含む中緯度湿潤地域の自然植生に覆われた山地流域における降雨流出過程においては、降雨以前に流域内に貯留されていた水（pre-event water と呼ばれる）である地下水（あるいは地中水）流出成分がハイドログラフに寄与する割合が一般に考えられているよりもはるかに大きいこと（総流出の60～90%、流出ピーク時において60～80%）が明らかにされた（例えば、田中、1982）。同様な研究はその後も着実に蓄積されており（例えば、辻村・田中、1996；Genereux and Hooper, 1998など）、また、自然植生に覆われた山地流域では、斜面の全ての部分から一様に Horton 地表流が発生することは稀であることも明らかにされた（例えば、Betson, 1964；塚本、1966；Dunne and Black, 1970a, 1970b；Tanaka et al., 1988など）。そして、この事実は近年（20世紀）における水文学の新たな発見の一つであるとされている（榎根、1992）。なお、降雨流出時における pre-event water の流出メカニズムについては、これまでに多くの概念が提示されているが、それらについては田中（1989, 1996a）を参照されたい。また、わが国においてこれまでに実施された斜面水文学と降雨流出過程に関わる主な研究成果については、飯田ほか（2019）が取りまとめを行っているので合わせて参照されたい。

上記のことは、中緯度湿潤地域の自然植生に覆われた流域（扇状地河川や天井川を除く）においては、降水のかなりの部分は一旦は地中に浸透することを意味し、中緯度湿潤地域における水循環の方向は「降水→土壌水→地下水→地表水体（河川水・湖沼水など）」となる（田中、1996b）。したがって、地下水循環系は流域への入力となる降水と出力である河川水とを結びつける重要な基幹循環系を構成していることになり、この事実は後

の河川行政や水環境行政に大きな影響を与えることになった。

5. 環境基本法の制定

1980年代の初めには当時の環境庁の調査により、わが国における地下水汚染の実態が判明し、1970年に制定された「水質汚濁防止法」が1989年に改定されている。また、1967年に制定された「公害対策基本法」に替わって、「循環」、「共生」、「参加」、「国際的取組」を基本理念とした「環境基本法」が1993年に制定され、翌1994年に「環境基本計画」が閣議決定された。この環境基本計画において、水環境や地盤環境の保全に関し、「環境保全上健全な水循環系の確保」が謳われ、以後の環境行政や河川行政、また今日の水循環行政の推進に当たっても大きな影響を与えることになった。

すなわち、1997年に「河川法」が改正され、それまでの線としての河川行政から「流域」を単位とした河川行政への転換が図られるとともに、新たな視点として「生態系の保全」と「住民参加」が加えられた。また、環境庁においては、1997年に有識者による「健全な水循環の確保に関する懇談会」を設置し、翌1998年に「健全な水循環の確保に関する懇談会報告」（環境庁水質保全局、1998）を取りまとめている。この報告においては、先に記した1970年代後半からの水流発生機構

に関する世界的な研究成果を踏まえて、「地下水を中心とした流域の水循環を基本単位とする」ことの重要性が提言された。また、翌1999年に環境庁長官に提出された中央環境審議会「環境保全上健全な水循環に関する基本認識及び施策の展開について（意見具申）」（中央環境審議会、1999）では、この懇談会報告の提言を踏まえて「自然の水循環系とそれに果たす地下水の重要性」がその冒頭において記載された。また、時を同じくして、USGS は “Ground Water and Surface Water: A Single Resource” を1998年に公表している (Winter et al., 1998)。図5は、USGS の報告書の中で使われている地下水と河川水との交流関係を模式的に示したものである。この図は、先に示した図2と全く同様な図であり、地下水が単に地中の水としてだけではなく、先述したように、河川水や湖沼水といった地表水体と交流を持つ水循環の一環を占める水として認識されたことの証であるといえる。

上記したように、1994年の環境基本計画の閣議決定から1999年の中央環境審議会の意見具申までの頃にかけて、わが国の水関連行政や環境行政等において「健全な水循環系の構築」がキーワードとなり、また、「水循環」という用語が広く一般に普及した時期に当たると考えられる（田中、2014a）。

また、環境基本法の制定を受けて、わが国においては地方自治体による条例や要綱の制定によっ

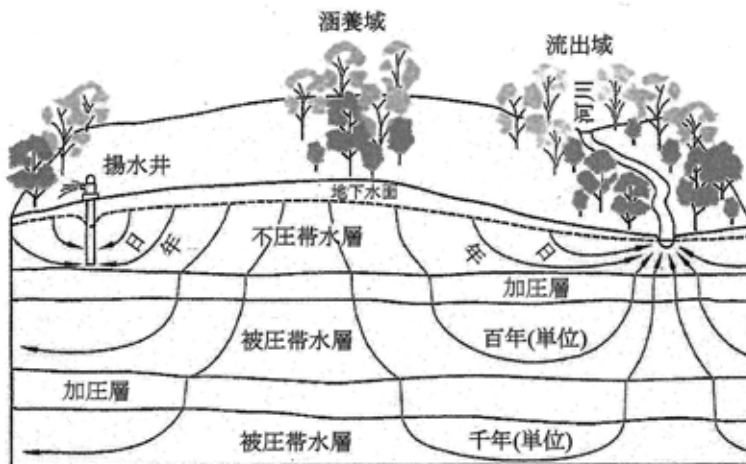


図5 地下水と河川水との交流関係を示す模式図 (Winter et al., 1998 を修正)。

て独自に地盤沈下の防止や地下水の利用と保全を図るための施策が行われているが、これらの中には地下水を「公水」あるいは住民の「共有資源」と位置づけ、国の施策に先んじて「地下水公水化」を謳っている事例が少なくない（例えば、田中、2008）。こうした傾向は2000年に入った頃から顕著となり、2013年4月の時点で同様の地下水条例を制定している地方自治体は15自治体に達している（千葉、2014）。

6. 2000年以降における地下水に関わる国内外の動向

21世紀に入って、地下水に関わる世界の動向として大きな動きがあった。まず始めに、2008年12月に開催された第36回国連総会において、世界初となる地下水に関する国際法である「越境帯水層法典 (The Law of Transboundary Aquifers)」の草案が満場一致で採択されたことである。その経緯や背景の詳細については田中 (2012) を参照されたい。この法案の基本理念は「地下水は共有自然資源 (Shared natural resources)」であり、その保全・管理に当たっては「帯水層 (aquifer) を単元とする」である。すなわち、地下水に関する国際法の観点から、地下水の保全・管理は、共有自然資源として「同一帯水層が分布する国家間が一つ (aquifer State)」となってその任に当たる必要があることを法的に義務づける内容となっている (Stephan ed., 2009)。こうした考え方は、「水循環の基本単位は流域である」とする学術的な基本認識 (例えば、杉田・田中編著、2009) と軌を一にしたものであるといえる。

共有資源あるいは共有財産と類似の用語に「コモンズ」がある。2009年のノーベル経済学賞は、このコモンズに関する研究業績によって、女性で初となる Elinor Ostrom 女史にその一人として授与された。女史は、共有資源を保全管理するための有効な方法は、「国家統制」や「市場原理」ではなく、第三の方法として「セルフガバナンス (自主統治)」が必要であることを明らかにした。また、そのために必要な条件の一つとして「モニタリング」の重要性を指摘している (岡田、2009)。

2009年には、日本地下水学会が設立50周年を迎

え、その記念行事が開催された。また、記念事業の一環として、一般向けの地下水に関する学術書「見えない巨大水脈 地下水の科学」(日本地下水学会・井田、2009) が出版され、2011年には「地下水用語集」(日本地下水学会編、2011) が刊行されている。前書の「地下水の科学」は、わが国における科学批評の第一人者である海部宣男氏によって「世界を知る百一冊—科学から何が見えるか—」(海部、2011) に取り上げられ、以下のように評されている。「地下水は回復が難しい。そこで、地下水を可視化し動態も含めて総合的に理解する「地下水の流域管理」という概念が生れた。目に見えなかった地下水にも、川や空気同様「公共のもの」という考えが育っている。私たちにとって、大事な水だ。その重要な部分を担う地下水が見えてきたことは、ともかくも大きな進歩である。」と。ここに至り、「地下水学」がようやく「科学」として認知されたものといえるのではないだろうか。本書「地下水の科学」は、2018年3月23日現在、第5刷が刊行されている。科学としての地下水学の普及に多大の貢献をなしているといえるであろう。国外においても、2002年に“Groundwater Science” (Fitts, 2002) と冠したテキストが Academic Press から出版されている。

2010年12月にパリの UNESCO 本部において、“ISARM2010: TRANSBOUNDARY AQUIFERS, Challenges and new directions” (ISARM は International Shared Aquifer Resources Management の略) が開催されている。この国際会議には世界各国から水文地質学、地下水学、法学、社会経済学等多分野にわたる約300名が参加し、これからの地下水問題の解決には「越境性」と「多分野学際性」が必要不可欠な時代に入ったことを印象づける会議となった (田中、2012)。

2011年には、GEF (地球環境基金)、FAO (国連食糧農業機構)、The World Bank (世界銀行)、UNESCO-IHP (ユネスコ国際水文学計画)、IAH (国際水文地質学会) の国際共同プロジェクトである“Groundwater Governance: A Global Framework for Action” (以下 Groundwater Governance Project: GGP) が開始された (田中、2015a)。これについては次章で記すが、ここに来て、地下水の資源管理についての世界の潮流は、

「地下水管理(groundwater management)」から「地下水ガバナンス(groundwater governance)」へ向かっていることを読み取ることができる。

2013年には、熊本市を含む13市町村(合併により現在は11市町村)からなる市域を越えた地下水域を単位とした地下水保全活動が国連の「生命の水(Water for life)」水管理部門の「最優秀賞」を受賞している。この保全活動は2004年度から始められ、先に記した越境帯水層法典の草案の理念を反映した国内版であり、その保全活動が世界で認められたことになる(田中, 2015a)。

2014年には「水循環基本法」が制定され、翌2015年には「水循環基本計画」が閣議決定された。本法律は、地下水を含む循環する水が「国民共有の財産であり、公共性の高いものである」ことを謳い、全ての国民がその恵沢を将来にわたって享受できる環境を確保することなど五つの基本理念を掲げている。特に地下水については、規制法としてのいわゆる「用水二法」(「工業用水法」と「建築物用地下水の採取の規制に関する法律」(略称「ビル用水法」, 以下略称で記す。))を除いて、地下水政策全般についての理念やその方向性を定める法律が存在していなかった中で、その法的根拠ができたことは画期的なことである(田中, 2015a)。

水循環基本計画では、水循環に関する施策についての基本的な方針の一つとして「持続可能な地下水の保全と利用の推進」を掲げている。この「持続可能な」あるいは「持続可能性」という考え方は、1987年の国連「環境と開発に関する世界委員会」(ブルントラント委員会)で「持続可能な開発」として提唱された概念であり、2015年9月に開催された「国連持続可能な開発サミット」において「持続可能な開発のための2030アジェンダ」が採択され、その行動計画として「持続可能な開発目標(Sustainable Development Goals: SDGs)」が定められた。このSDGsは17の目標と169のターゲットからなり、2030年までに持続可能な開発のための目標達成を目指している。

図6は、ストックホルム・レジリエンス・センターによるSDGsの3層構造を示したものであり「ウェディングケーキ」と呼ばれている(Stockholm Resilience Center, 2016)。土台となっ

ているのが「水・衛生(目標6)」、「気候変動(目標13)」、「海洋資源(目標14)」、「陸上資源(目標15)」からなる「生物圏(環境)であり、その上に「社会」や「経済」が乗る形になっている。土台となっている地球環境が整っていないければ、社会や経済の課題を解決することが出来ない、ということの意味している(朝日新聞, 2019)。そして、その土台を支える中心をなしているのが「水」と「気候変動」であり、とりわけ「地下水」は人類を含めた陸上生物には欠かすことの出来ない資源であり、その「持続可能な保全と利用の推進」はSDGsの目標達成には欠かすことの出来ない命題であるといえる。図7は、環境省が環境研究総合推進費戦略研究プロジェクト「持続可能な開発目標とガバナンスに関する総合的研究」に基づいて、環境、社会、経済の関係を3層構造で示した木の図である(環境省, 2017)。環境、社会、経済の3層構造は図6と同じであるが、その発展を支えるためにはガバナンスの構築が必要であることを示している。木の幹に例えられているガバナンスは、SDGsが目指す環境、社会、経済の三側面の統合的向上を達成する手段として不可欠なものとして示されている。

国連は、SDGsの目標を2030年までに達成するために、2018～2028年の10年間で「水の国際行動の10年(Water Action Decade 2018-2028)」とすることを決め、2018年3月22日から開始した(国際連合広報センター, 2018)。この正式名称

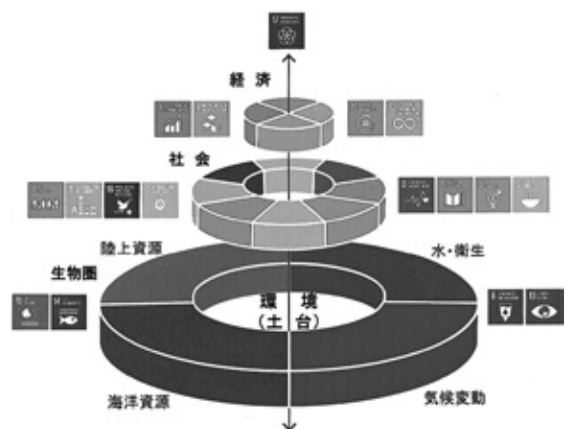


図6 SDGsの3層構造「ウェディングケーキ」(Stockholm Resilience Center, 2016を修正して加筆)。

は「国際行動の10年「持続可能な開発のための水」(International Decade for Action “Water for Sustainable Development”）」であり、1981年に始まった「国際飲料水の10年」、2015年に終了した「命のための水」に続く第3次「水の10年」に当たる。この第3次水の10年では、水管理方法の転換を支援する行動を促すとともに、水資源の持続可能な開発と統合的管理、関連するプログラムやプロジェクトの実施と推進にさらに注力すべきものとされている(国際連合広報センター、2018)。

また、UN-Water(国連水関連機関調整委員会)は、SDGs目標6「水・衛生」の進捗状況についてその中間評価を2018年に行い、これを公表した(UN-Water, 2018)。この中で、水に関するガバナンス(water governance)の構築はSDGs6の目標を達成するための柱石(essential pillar)であるが、現時点ではその構築の程度は十分ではなく、多くの国において未だ断片的な状態であるとしている。

国内においては、上記のSDGsと2015年の「パリ協定」採択後に初めて策定された「第五次環境基本計画」が2018年4月17日に閣議決定された(環境省、2018)。この基本計画では、SDGsの考え方も活用し、複数の課題を統合的に解決していく

ことが重要であるとして、従来から提唱されている「環境・経済・社会の統合的向上」を具体化することを目指すとしている。また、「地域循環共生圏」という考え方を新たに提唱し、自然と人間との共生や地域間の共生を図り、「循環共生型の社会」を構築することが目指すべき「持続可能な社会」の姿であるとしている。そして、2015年を起点とした世界の大きな潮流は、新たな文明社会の構築を目指す「大きな転換(パラダイムシフト)」であるとしている。

また、第五次環境基本計画では、パリ協定の実現に向けて、再生可能エネルギーの最大限の導入を掲げている。この再生可能エネルギーの一つである地下水の熱の利用に関し、最近における技術開発の向上にともなって「帯水層蓄熱システム」の実用化が図られ、これに関連した「ビル用法」の規制緩和が2019年8月27日に公布され(内閣府と環境省の共同命令)、同日から施行された(環境省、2019)。

地下水の過剰採取は地盤沈下の原因となることから、「ビル用法」の政令で定める指定地域においては、冷暖房の用に供する地下水の採取が規制されているが、近年、地球温暖化対策に寄与すると期待される地下水の熱を利用した新たな空調システムとして、採取した地下水の全量を同一の帯水層に還元する帯水層蓄熱技術の実証試験が大阪市うめきた2期地区で行われ(大阪市、2019)、地盤沈下を抑制しつつ、同技術の活用が可能であることが確認されたことから、地下水の採取に関する特例措置を設けることにしたものである(環境省、2019)。この特例措置は、2019年9月30日に開催された「第41回国家戦略特別区域諮問会議」において、大阪市うめきた2期地区がその適用を受けた(首相官邸、2019)。

今回の特例措置の対象は、実証試験が行われた大阪市うめきた2期地区のみであるが、今後この種の規制緩和提案が増えることが予想され、持続可能な地下水の保全と利用について、省エネルギー、温暖化対策等に大きな効果を有する地下水の熱利用を両立させるための仕組づくりが必要となってくるものと思われる。また、当該法律(「ビル用法」)が制定されてから57年が経過して初めての規制緩和であり、これまでの規制一辺倒の



図7 環境、経済、社会を3層構造で示した木の図(環境省、2017を修正)。

「事後的管理」から将来リスクを見据えた「順応的管理」に舵を切った意義は大きく、今後より一層きめ細かいモニタリングの実施等、行政、有識者、事業者、地下水利用者、地域住民等が一体となった地下水保全管理体制を構築することが求められるものと思われる。

ここ5年間における、水循環基本法の制定(2014年)、水循環基本計画の策定(2015年)、国際機関によるGGPに関するレポートの公表(2015年)、パリ協定とSDGsの採択(2015年)、第五次環境基本計画の策定(2018年)、ビル用水法の規制緩和(2019年)等は、国あるいは国際レベルでの環境政策に関わる基盤整備が急速に進展したことを物語っている。そして、これらの施策に共通する方向性は「持続可能な社会」の構築である。

7. 最近における地下水ガバナンスに関する国内外の動向

21世紀に入ってからの地下水に関わる国内外の動向からは、「共有自然資源」、「持続可能性」、「ガバナンス」がキーワードとなっていることが読み取れる。地下水保全管理においては、科学的不確実性、地域固有性、越境性、多機能性、多様な主体(利害関係者)との関わりといった多くの課題が存在し、「持続可能な地下水の保全と利用」を目指して地下水保全管理政策を進展させるためには、整備されつつある上記した諸環境政策の推進力を活かし、活用するとともに、国、地方自治体、企業、民間団体(NPO/NGO等)、市民といった多様なステークホルダーが参加する「協働型統治」としての地下水ガバナンス体制を構築することが重要であると思われる。本調査研究グループにおける現時点での地下水ガバナンスは、「多様なステークホルダーが垂直的・水平的に協働しながら、科学的知見に基づき、地下水の持続可能な利用と保全に関して意思決定し、地下水を保全管理していく民主主義的プロセスである。同時に、地下水とその関連領域における法制度的・政策的対応の包括的なフレームワークである」と定義される(千葉, 2019)。水循環基本法第8条に記載してある「関係者相互の連携及び協力」は、これからの水行政においてはこの協働型統治が重

要であるとの認識を示したものと考えられる。

翻って、わが国におけるこれまでの流域管理あるいは地下水管理の状況を見てみると、いずれの場合も中央集権制の下に、国、地方自治体という行政区域の範疇内においてトップダウン型の垂直的な管理体制が維持され、かつ、事後的な管理形態となっている場合が多い。こうした管理体制の弊害として、管理目的が限定されること、そして管理体制が限定されることが挙げられ、現在ではその限界を露呈する状況となっていることが指摘されている(例えば、谷内, 2009; 大塚, 2010など)。こうした問題を克服すべく提起された新たな概念が「ガバナンス」である(田中, 2018)。

地下水ガバナンスに関する研究は、その前身にあたる流れはあるものの比較的新しく、前述したように国際機関によるGGPが開始されたのが2011年である。このGGPの活動は2014年まで継続され、その主たる目的は、健全な地下水資源管理のための一般的理念および行動のための包括的な枠組みの構築とガイドラインの構築であり、これまでの「地下水管理」から更に一步進めた「地下水ガバナンス」の確立を目指すものである(UNESCO-IHP, 2012; Tanaka, 2014; 田中, 2015a; 田中, 2018)。その成果は2分冊にまとめられ(FAO, 2015a, 2015b)、2015年に韓国で開催された「第7回世界水フォーラム(World Water Forum 7)」で公表された。また、2016年には“Global Diagnostic on Groundwater Governance”としてまとめられている(FAO, 2016)。

GGPでは、地下水ガバナンスを四つの構成要素、すなわち、a)「アクター(主体)」、b)「法・規制・制度」、c)「目標・政策・計画」、d)「情報・知識・科学」、によって捉えられており、この4要素に基づいて地下水ガバナンスの現状が評価されている。また、地下水ガバナンスの指導原則と五つの2030年ビジョンが取りまとめられており、これらの成果は、世界各国の専門家・実務家の知見を集約した地下水ガバナンスに関する総合的な国際研究として現時点では唯一のまとまった成果であるとされている(千葉, 2019)。

2018年に入り、“Groundwater Governance”を冠した世界初の書籍である“Advances in Groundwater Governance”(Villholth et al. eds.,

2018) が Springer から出版された。本書は、55名の著者による28編の論文から構成され、総ページ数594ページから成る大著である。関連する書籍として、“Transboundary Hydro-Governance: From Conflict to Shared Management” (Ganoulis and Fried, 2018) や “Interactive Approach to Water Governance in Asia (Otsuka ed., 2019) が相次いで出版されている。また、わが国においても書名に「地下水ガバナンス」を初めて冠した書籍「日本の地下水政策—地下水ガバナンスの実現に向けて—」(千葉, 2019) が2019年3月に出版された。

わが国においては、流域ガバナンス研究が先行し(例えば、和田監修・谷内ほか編, 2009), 地下水ガバナンスについての研究は緒についたばかりである(例えば、田中, 2018)。しかし、上記した国際的な潮流を受け、わが国においても地下水保全管理体制にガバナンスの考え方を取り入れようとする動きが見られている(千葉, 2019)。例えば、水循環基本法では第3条2項において「水が国民共有の貴重な財産であり、公共性の高いものである」ことを基本理念の一つとして掲げ、第4条～第7条において「各ステークホルダーの責務」、第8条に「関係者相互の連携および協力」、第22条に「水循環政策本部の設置」が規定され、ガバナンスの観点から重要な事項が盛り込まれている。また、水循環基本計画では、地下水の保全と利用に関し、関係者相互の連携の調整を行うための組織として「地下水協議会」の設置が定められている。

また、水循環基本計画の閣議決定を受けて、環境省が2016年4月に公表した「「地下水保全」ガイドライン」(環境省, 2016) では、「連携による体制づくり」の課題として「これまでの地下水管理手法は、地盤沈下防止という目標に対して揚水量を規制する公害防止の観点から行われており、これからは、地下水域の総合的な保全・管理を行うガバナンスの考え方で見直す必要がある。」と記載されている。そして、この前年の2015年3月に公表した「「地下水保全」事例集」(環境省, 2015) では、そのまえがきにおいて「水循環の重要な構成要素である地下水についてもガバナンスの考えに立った体制づくりと行政、事業者、民間団体、住民の連携による総合的な保全管理が求め

られる」とし、わが国における地下水利用と保全に関して先進的な取組事例を収集し、公表している。この事例集では、42の事例と二つのケーススタディを掲載しているが、これを11の「大項目」に分類し、それぞれについて3～6事例を取り上げている。この大項目を先述したGGPによる地下水ガバナンスの四つの構成要素との対応関係を示したのが表1である。表から明らかのように、環境省事例集の大項目分類はほぼ地下水ガバナンスの構成要素に対応しているものといえる。このことは、わが国における先進地域においては、相当の程度既に地下水ガバナンスの素地が形成されていることを意味しているものと考えられる。

なお、水循環基本計画では、「地下水については一般的に地域性が極めて高いため、地下水の利用や挙動の実態把握と分析等に関する合意形成やその内容を実施する地下水マネジメントを地域の関係者が主体となり取り組むように努めるものとする」としていることから、水循環基本法に基づいて内閣府に設置された水循環政策本部においては、2017年4月に「地下水マネジメント導入のススメ」(内閣官房水循環政策本部事務局, 2017)、2018年7月に「地下水マネジメントの合意形成の進め方」を作成し、公表した。その後、後者を統合した形で2019年8月に「地下水マネジメントの手順書」(内閣官房水循環政策本部事務局, 2019)を作成し、公表している。

一方、公益社団法人日本地下水学会では、水循環基本法の制定と水循環基本計画の閣議決定を受けて、学会活動の一環として地下水に関する社

表1 GGPによる地下水ガバナンスの構成要素と環境省「事例集」の「大項目」分類との対応関係(八木, 2019を参考にして作成)。

GGPによる地下水ガバナンスの4つの構成要素	環境省「事例集」の「大項目」分類
a) アクター(主体)	②体制づくり, ③地域連携
b) 法・規制・制度の枠組み	④涵養, ⑤資金管理, ⑥地域づくり
c) 目標・政策・計画	④保全計画, ⑦管理目標
d) 情報・知識・科学	①水収支把握, ⑤モニタリング, ③水文化の継承, ⑩教育と学習

「大項目」中の○数値は分類番号を示す。

会科学的な観点から調査・研究を行う「地下水ガバナンス等調査・研究グループ」(グループ代表: 田中 正筑波大学名誉教授)を2017年4月に学会内に設置した。本調査・研究グループの設立経緯ならびに活動体制とその目的等については、本特集号のまえがきに記した通りであり(田中, 2020), 本特集号は同グループの約2年半にわたる活動内容をとりまとめたものである。2019～2020年度の学会会長に就任した徳永朋祥氏は、巻頭言「会長を拝命するにあたって」において、「…公共性の高い資源としての地下水という観点から、「地下水ガバナンス」について議論を行うグループを学会内に設置し、検討を進めている。…これらの活動は、学会としての新しい方向の提示とその実践であり、今後とも学会の重要な活動として継続・発展させていくことが有意義である」と考える。」(筆者抜粋要約)と述べている(徳永, 2019)。また、この間において日本地下水学会が主催した地下水ガバナンスに関するシンポジウム(日本地下水学会企画委員会, 2019a)とセミナー(日本地下水学会企画委員会, 2019b)および学会60周年記念講演会として実施した「SDGs 持続可能な地下水利用」(日本地下水学会, 2019)においては、大学関係者のみならず、地方自治体や企業、民間団体からの講演も同時に行われ、60周年記念講演会では、次世代を担う高校生からの発表も行われた。

上記のように、持続可能な地下水の保全と利用を図るためにはガバナンスの構築を土台とする世界的潮流があり、わが国においてもその考え方を今後の施策・体制に反映しようとする動きが「産・学・官・民」の間に見え始めている。

8. パラダイムシフトとしての「地下水ガバナンス」—おわりに代えて—

本稿で記したように、21世紀に入ってからの国内外における水資源や地下水管理のあり方については、新たな理念や概念が提起されつつある。こうした新たな潮流が生れる背景には、地下水学や水文学、水文地質学といった関連学問分野の「近代科学」としての科学的知見の積み重ねが大きな役割を果たしたものと見える。

第五次環境基本計画で指摘されているように、環境政策の面において、今現在は「大きく考え方を転換(パラダイムシフト)」していく時に来ていると考えられる。また、学術研究面においても2013年頃を境として、国際的研究の新たな枠組みが提示され、「ポスト近代科学」としての「複雑系の科学」、すなわち「関係性、多様性、持続可能性」を重要視するパラダイムシフトが起きている(例えば、田中, 2014b, 2015b)。

地下水保全管理においては、本稿で記したように多くの課題が存在し(科学的不確実性、地域固有性、越境性、多機能性、多様なアクターとの関わり等)、これらを統合的に解決するためには、従来の法的規制や事後的な管理形態を中心とする行政主導だけでは対応することが困難であり、新しい理念に基づく地下水保全管理体制の構築が必要である。また、法制度や政策の枠組みに留まらず、「合意形成」を踏まえて「意思決定」を行い、それを実行していくアクターを含んだ「ガバナンス」の検討が必要とされている(例えば、田中, 2015a; 千葉, 2019など)。

地下水研究においても、自然科学と人文・社会科学との多分野学際連携を強め、アクターを含む超学際性の観点から「自然—人間—社会系」の関係性を解明する研究を推進する必要があるものと思われる。

社会面、学術面、行政面の全ての面において、今現在は「時代の転換点」であることに間違いはない。こうした時代性を背景として、地下水保全管理に関わるパラダイムシフトとしての「地下水ガバナンス」を如何に構築し、どう社会に実装していくのか、今、そのことが問われているのである。

なお、本稿では多くの既発表論文を引用し、一部には原文のまま引用した箇所があることをお断りしたい。

参考文献

- 朝日新聞(2019): SDGs: 温暖化 食い止めるには、2019年1月30日付朝刊。
阿部謙夫(1933): 「水文学」, 岩波書店, 70p。
飯田真一・玉井幸治・野口正二・小林政広(2019): 森

- 林における水文過程の解明:プロットから流域スケールの手法による知見と今後の展望. 日本水文科学会誌, 49 (3), 135-159.
- 雨水浸透技術協会 (1998): 特集/地下水の涵養. 雨水技術資料, 28, 7-73.
- 遠藤 毅 (2005): 荒川下流域における地盤沈下の展開とその社会的影響. 「荒川下流誌」, 803-822.
- 大阪市 (2019): 「大阪市域における地盤環境に配慮した地下水の有効利用に関する検討報告書」. 大阪市域における地盤環境に配慮した地下水の有効利用に関する検討会議, 61p.
- 大塚健司 (2010): 中国の水環境問題の解決に向けたガバナンス—太湖流域へのアプローチ—. 大塚健司編 (2010): 「中国の水環境保全とガバナンス—太湖流域における制度構築に向けて—」, アジア経済研究所, 序章, 3-32.
- 岡田 章 (2009): エリノア・オストロム教授のノーベル経済学賞の意義. PDF4p. http://www.econ.hit-u.ac.jp/~aokada/kakengame/Dr.Elinor%20Ostrom_NobelPrize%in%20Economics.pdf (2009.10.30閲覧).
- 海部宣男 (2011): 「世界を知る101冊—科学から何が見えるか—」. 岩波書店, 251p.
- 梶根 勇 (1980): 「水文学」. 大明堂, 272p.
- 梶根 勇 (1986): 水文学研究の動向—地中水を中心に—. 地学雑誌, 95 (7), 9-14.
- 梶根 勇 (1992): 「地下水の世界」. NHK ブックス [651], 日本放送出版協会, 221p.
- 環境省 (2015): 「「地下水保全」事例集—地下水保全と持続可能な地下水利用のために—」. 環境省水・大気環境局, 106p.
- 環境省 (2016): 「「地下水保全」ガイドライン—地下水保全と持続可能な地下水利用のために—」. 環境省水・大気環境局, 65p.
- 環境省 (2017): 平成29年版環境白書. <http://www.env.go.jp/policy/hakusyo> (2019.11.16閲覧).
- 環境省 (2018): (第五次)「環境基本計画」. 107p.
- 環境省 (2019): 建築物用地下水の採取の規制に関する法律の規制緩和について. <http://www.env.go.jp/press/107137.html> (2019.8.30閲覧).
- 環境庁水質保全局 (1998): 「健全な水循環の確保に向けて—豊かな恩恵を永続的なものとするために—」. 健全な水循環の確保に関する懇談会報告, 71p.
- 君島八郎 (1919): 「地下水及地表水」. 河海工学第2編, 丸善, 429p. (丸善出版書目録による).
- 国際連合広報センター (2018): 水の国際行動の10年—2018-2028世界的な水危機を回避するために—. プレスリリース18-014-J. https://www.unic.or.jp/news_press/features_backgrounders/27687/ (2019.9.5閲覧).
- 首相官邸 (2019): 第41回国家戦略特別区域諮問会議(議事要旨). PDF7p. <https://www.kantei.go.jp/jp/singi/tiiki/kokusentoc/dai41/gijiyoushi.pdf> (2019.10.7閲覧).
- 杉田倫明・田中 正編著・筑波大学水文科学研究室著 (2009): 「水文学」. 共立出版, 275p.
- 鈴木昌吉 (1931): 「地下水概論」. 岩波書店, 79p.
- 田中 正 (1982): 水文学における同位体利用の研究動向—地中水の循環に関する研究を事例として—. 京都大学防災研究所附属水資源研究センター研究報告, 2, 3-22.
- 田中 正 (1989): 流出. 気象研究ノート, No.167, 「水循環と水収支」, 67-89.
- 田中 正 (1996a): 降雨流出過程. 恩田裕一・奥西一夫・飯田智之・辻村真貴編 (1996): 「水文地形学—山地の水循環と地形変化の相互作用—」, 古今書院, 56-66.
- 田中 正 (1996b): 地下水循環と環境. 地下水技術, 38 (12), 5-14.
- 田中 正 (2008): 地下水利用の現状と規制. 空気調和・衛生工学, 82 (10), 3-10.
- 田中 正 (2012): 最近における地下水に関する国内外の動向. 水利科学, No. 327, 1-26.
- 田中 正 (2014a): 水循環の視点から地下水を捉える. 地下水学会誌, 56 (1), 3-14.
- 田中 正 (2014b): 水文学についての認知マップとこれから. 日本水文学会誌, 44 (2), 79-95.
- 田中 正 (2015a): これからの地下水ガバナンス. 地下水学会誌, 57 (1), 73-82.
- 田中 正 (2015b): 地下水50年の変遷と展望—水循環の視点から—. 地下水技術, 57 (4), p. 28再掲載版, 1-17.
- 田中 正 (2018): 地下水学から見た水循環に関する施策の推進を図るための現状と課題. 地下水学会誌, 60 (1), 17-28.
- 田中 正 (2020): 創立60周年記念特集「地下水ガバナンス」の掲載にあたって. 地下水学会誌, 62 (2),

- 163-166.
- 千葉知世 (2014) : 地下水保全に関する法制度的対応の現状 : 地下水条例の分析から. 水利科学, No.337, 33-113.
- 千葉知世 (2019) : 「日本の地下水政策—地下水ガバナンスの実現に向けて—」. 京都大学学術出版会, 355p.
- 千葉知世 (2020) : 地下水ガバナンスの意義とその推進に向けた課題. 地下水学会誌, 62 (2), 191-205.
- 中央環境審議会 (1999) : 「環境保全上健全な水循環に関する基本認識及び施策の展開について (意見具申)」. 34p.
- 塚本良則 (1966) : 山地流域内における水文現象の解析. 東京農工大学農学部演習林報告, No.6, 1-79.
- 辻村真貴・田中 正 (1996) : 環境同位体を用いた降雨流出の研究. 恩田裕一・奥西一夫・飯田智之・辻村真貴編 (1996) : 「水文地形学」, 古今書院, 79-87.
- 徳永朋祥 (2019) : 会長を拝命するにあたって. 地下水学会誌, 61 (3), 181-182.
- 土質工学会 (1974) : 「土工管理とラジオアイソトープ表面型密度計・水分計の取扱いの手引き」. 127p.
- 内閣官房水循環政策本部事務局 (2017) : 「地下水マネジメント導入のススメ」. 32p.
- 内閣官房水循環政策本部事務局 (2019) : 「地下水マネジメントの手順書」. 98p.
- 日本地下水学会 (2019) : 「60周年記念講演会予稿集」(講演 PPT の印刷版).
- 日本地下水学会企画委員会 (2019a) : シンポジウム「わが国における地下水ガバナンスの現状と課題—社会系科学の側面から—」開催報告. 地下水学会誌, 61 (2), 163-166.
- 日本地下水学会企画委員会 (2019b) : セミナー「地下水ガバナンスの理論・事例分析と実践のプロセスへの示唆」開催報告. 地下水学会誌, 61 (4), 338-339.
- 日本地下水学会編 (2001) : 「21世紀の地下水管理 雨水浸透・地下水涵養」. 理工図書, 160p.
- 日本地下水学会編 (2011) : 「地下水用語集」. 理工図書, 150p.
- 日本地下水学会 HP (2018) : 地下水ブックガイド. (2018.10.5閲覧).
- 日本地下水学会・井田徹治 (2009) : 「見えない巨大水脈 地下水の科学」. 講談社ブルーバックス, B-1639, 267p.
- 福富忠男 (1933) : 「地下水」. 岩波書店, 88p.
- 森 康二 (2016) : 統合型流域モデリングによる地下水流動の数値シミュレーション. 嶋田 純・上野真也編 (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, 成文堂, 第 6 章, 101-127.
- 森 康二・田原康博・多田和弘・山田 正・登坂博行 (2015) : 流体・熱・化学物質・土砂の同時輸送過程を考慮した統合型流域モデリング. 第23回土木学会地球環境シンポジウム講演集, 23-26.
- 谷内茂雄 (2009) : 環境政策と流域管理. 和田英太郎監修・谷内茂雄・脇田健一・原 雄一・中野孝教・陀安一郎・田中拓弥編 (2009) : 「流域環境学—流域ガバナンスの理論と実践—」, 京都大学学術出版会, 第 1 部第 1 章, 3-13.
- 八木信一 (2019) : 私信 (2019.1.25 「シンポジウム」において).
- 和田英太郎監修・谷内茂雄・脇田健一・原 雄一・中野孝教・陀安一郎・田中拓弥編 (2009) : 「流域環境学—流域ガバナンスの理論と実践—」. 京都大学学術出版会, 564p.
- Betson, R.P. (1964): What is watershed runoff? *Journal of Geophysical Research*, 69, 1541-1551.
- Darcy, H. (1856): Les Fontaines Publiques de la Ville Dijon. In Hubbert M.K. (1969) *The Theory of Groundwater Motion and Related Papers*, Hafner Publishing Co. Inc., NY, 305-311.
- Dunne T. and Black R.D. (1970a): An experimental investigation of runoff production in permeable soils. *Water Resources Research*, 6, 478-490.
- Dunne T. and Black R.D. (1970b): Partial area contributions to storm runoff in a small New England watershed. *Water Resources Research*, 6, 1296-1311.
- FAO (2015a): *Global Framework for Action to achieve the vision on Groundwater Governance*. Special Edition for WWF 7, 111p.
- FAO (2015b): *Groundwater Governance a call for action: A Shared Global Vision for 2030*. Special Edition for WWF 7, 12p.
- FAO (2016): *Global Diagnostic on Groundwater Governance*. 194p.
- Fitts, C.R. (2002): *Groundwater Science*. Academic Press, 450p.

- Freeze, R.A. and Witherspoon, P.A. (1967): Theoretical analysis of regional groundwater flow: 2. Effect of water-table configuration and subsurface permeability variation. *Water Resources Research*, 3, 623-634.
- Ganoulis, J. and Fried, J. (2018): *Transboundary Hydro-Governance: From Conflict to Shared Management*. Springer, 216p.
- Genereux, D.P. and Hooper, R.P. (1998): Oxygen and hydrogen isotopes in rainfall-runoff studies. In Kendall C. and McDonnell, J.J. eds. (1998): *Isotope Tracers in Catchment Hydrology*, Elsevier, 319-346.
- Horton, R.E. (1933): The role of infiltration in the hydrologic cycle. *American Geophysical Union, Transaction*, 14, 446-460.
- Hubbert, M.K. (1940): The theory of groundwater motion. *Journal of Geology*, 48, 785-944.
- IAEA (1970): *Isotope Hydrology 1970*. 918p.
- Kirkby, M. ed. (1978): *Hillslope Hydrology*. John Wiley & Sons, 389p.
- Otsuka, K. ed. (2019): *Interactive Approaches to Water Governance in Asia*. Springer, 225p.
- Stephan, R.M. ed. (2009): *Transboundary Aquifers: Managing a Vital Resources. The UNICL Draft Articles on The Law of Transboundary Aquifers*. UNESCO-IHP, 23p.
- Stockholm Resilience Center (2016): <https://www.stockholmresilience.org/research-news/2016-06-14-how-food-connect-all-the-sdgs.html> (2019.6.21閲覧).
- Tanaka, T. (2014): Groundwater governance in Asia: present state and barriers to implementation of good governance. *IAHS Publ.*, 364, 470-474.
- Tanaka, T., Yasuhara, M., Sakai, H. and Marui, A. (1988): The Hachioji experimental basin study—Storm runoff processes and the mechanism of its generation. *Journal of Hydrology*, 102, 139-164.
- Tóth, J. (1963): A theoretical analysis of groundwater flow in small basins. *Journal of Geophysical Research*, 68, 4795-4812.
- Tóth, J. (1995): Hydraulic continuity in large sedimentary basins. *Hydrogeology Journal*, 3 (4), 4-16.
- UNESCO-IHP (2012): Information paper on GEF Project “Groundwater Governance: A Global Framework for Action” Regional Consultation for Asia and the Pacific Region. UNESCO-IHP, Division of Water Sciences, UNESCO HQ, Paris, 2p.
- UN-Water (2018): Executive Summary: Sustainable Development Goal 6, Synthesis Report 2018 on Water and Sanitation, 15p.
- Villholth, K.G., Rópez-Gunn, E., Conti, K., Garrido, A. and van der Gun, J. eds. (2018): *Advances in Groundwater Governance*. CRC Press, 594p.
- Winter, T.C., Harvey, J.W., Franke, O.L. and Alley, W. M. (1998): *Ground Water and Surface Water: A Single Resource*. USGS Circular, 1139, 79p.

(受付：2019年12月12日，受理：2020年3月3日)