

水循環の視点から地下水を捉える

田中 正*

Seizing on groundwater from a hydrologic cycle point of view

Tadashi TANAKA*

要 旨

本稿は、2013年度の日本地下水学会「地下水学術賞」の受賞に際し、2013年春季講演会での「特別講演」の内容に基づいて、筆者がこれまでに取り組んできた地下水研究を中心として、これまでに係わった社会的動向を含めて取りまとめたものである。その内容を振り返って見ると、地下水を水循環の視点から捉えることによって、多方面にわたる幅広い係わりにおいて地下水研究の意義が見出されるように思われる。新たな学問領域への挑戦、国際連携、環境政策との係わり等の記述において、これからの地下水研究への参考になれば幸甚である。

キーワード：水循環の視点、地下水研究の意義、新たな学問領域、国際連携、環境政策

1. はじめに

わが国において、水循環に関する最初の書籍である『水文学』が出版されたのは、今からちょうど80年前の1933（昭和8）年である（阿部，1933）。この中で、著者の阿部謙夫は第三章「地中の水」の冒頭において以下のように述べている。「水文学の中心をなすものは地中の水である。水が地中に浸透し、又之より湧出するといふことがなければ、地表は亜鉛屋根と同様で、雨が降れば直ちに流出し去り、現象は極めて簡単明瞭である。しかし実際の地表並に地下は構造に於いても、又水に対する作用に於いても、極めて複雑で、之がため興味深き諸種の水文学的現象が生ずる。」。また、第一章の「水文学とは何か」の中で、「水文学は科学の分科の内最も新しいもの」であるとし、わが国において水文学が発達しなかった

理由について「...殊に最も重要な地下の状態といふものは、之を知ること最も困難である。之が水文学の発達しなかった主な原因である。」とも述べている。

この阿部の指摘は、水循環を考えるに当たって地下水が重要な役割を果たしていることを暗に示唆しているものと考えられるが、それからちょうど80年を経た今日、地下水研究はそれに応えられたのかどうか、自身の研究を振り返りつつ記してみることにする。

2. 水循環における水田の機能

筆者の学位論文は1977年に東京教育大学に提出した『不飽和帯における水分の挙動について—今市扇状地関東ローム層の水文学的研究—』（田中，1977）である。この研究は、栃木県今市扇状地の

* 筑波大学名誉教授（〒305-8577 茨城県つくば市天王台1-1-1）
Emeritus Professor, University of Tsukuba

水田と畑地を対象として、約8ヵ月間にわたって深度7.2 m までの土壤水分量を中性子水分計によって7日～10日間隔で継続的に測定し、降雨および水田灌漑水の降下浸透過程を明らかにするとともに、水収支法によって水田の貯留機能を解明したものである(田中, 1978;1980)。この地域は、表層7 m までは関東ローム層を構成する軽石層および火山灰層で覆われ、その下に厚さ約30 m の礫層が存在する。

図1は、水田地域における圃場容水量を基準として、それからの偏差を超過保留水分量と定義して、これを mm/10 cm の単位で表したものである。網掛けの部分は5 mm/10 cm 以上の超過保留水分量を維持する範囲を示している。図から明らかのように、水田灌漑が始まる前の4月にはほぼ全層にわたって負の超過水分量、すなわち土湿不足を生じているが、灌漑が始まると同時に地表面下2 m 以深ではこの土湿不足は解消され、この状態が夏期の灌漑期間を通して継続する。そして、8月以降は水田からの灌漑水の供給がなくなるため、地下水水面は徐々に低下し、ローム層中に貯留された水は徐々に排水される様子が分かる。これを水収支の観点から見てみると、灌漑期間中の地下水涵養量は1ヵ月当たり62～940 mm (2～31 mm/日) に達し、灌漑水量に対して換算した場合、その45～98%が地下水として涵養されたことになる。また、地下水として涵養された水は約8ヵ月間にわたってローム層中に貯留され、河川流出としての遅延効果の役割を果たしていることも理解される。この事例から明らかのように、水田は水循環の観点から地下水の人工涵養として機能

しているといえ、さらには水田の貯留機能による河川流出としての遅延効果、強いては河川流量を安定化させる役割を果たしているといえる。また、わが国における水田灌漑水の約90%は河川水であり、その一部は水田からの蒸発散によって大気中に戻るが、残りの大部分は地下水涵養成分となり、半年以上の時間遅れを持って地下水流出として再び河川水となることから、水循環における再利用の代表例ともいうことができる。

また、本研究では、関東ロームの水分特性に関する主要なパラメータを求めているが(田中, 1980)、当時、各パラメータの定義やその算出方法等についての基本テキストともいべき書籍(例えば、Hillel, 1971; Bouwer, 1978; Bear, 1979; Freeze and Cherry, 1979など)が立て続けに出版されるという、土壤水や地下水研究の世界的な成熟期に身を置けたことは幸いであった。

3. 降雨流出過程に関する研究

学位論文を取りまとめた後、1980年に東京都八王子市堀の内に位置する東京農工大学波丘地利用実験実習施設内に流域面積0.022 km²の小試験流域を設置した(以下、八王子試験流域と記す)。この試験流域を設置した目的は、当時世界的に注目を集めていた水流発生機構に関する研究、すなわち流域にもたらされた降雨はどのような経路を経て、どのようなメカニズムによって河川に流出するかを明らかにすることであった。この研究では、降雨流出現象は地表水と地中水を一体とした一つのシステムとして捉える必要があるとの観点から、「斜面水文学(Hillslope Hydrology)」(Kirkby, 1978)と呼ばれる、水循環の基本単位である流域を更に細分化した空間領域を対象とし、詳細な観測網の設置によって流域内の水循環の実態、特に地表流の発生状況を実証的に明らかにする手法を採用した。当時、わが国における森林流域の流出機構を野外観測に基づいて実態論的に論じた研究は少なく、唯一、塚本(1966)の研究が挙げられるにすぎなかった。

図2は、総降水量195.0 mm の流出ピーク時における地表流の発生状況を示したものである。この試験流域の山腹斜面においては、総降水量100

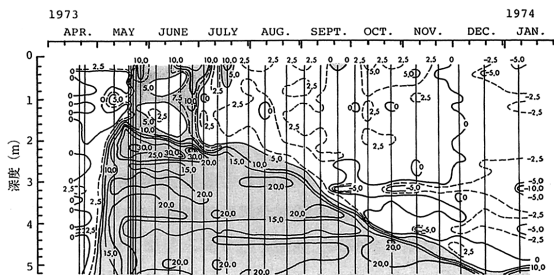


図1 今市扇状地水田地域における超過保留水分量の経時変化 (mm/10 cm)。網掛けの部分は5 mm/10 cm 以上の超過保留水分量を保持する範囲を示す(田中, 1980を修正)。

mm以上の豪雨時においても地表流は発生しないことが野外観測によって確認されている。また、標高150 mに沿う地表流の発生域では、地中水の上向き流れが存在していたことがポテンシャルの縦断プロファイルから確認されている (Tanaka, 1982)。

図2に示された地表流の発生域と窪地貯留を含めた面積は約700 m²であり、これは主谷底面積の約43%、流域面積の約3%を占めるにすぎない。また、この範囲に降った降雨が全て表面流出するものと仮定して求めた直接流出量は、河川総流出量 (あるいは全流出量) の僅か7.9%であった。1980年～1983年の3年間にわたって観測された総降水量50 mm以上の7つのイベントについてとりまとめた結果によると、地表流が発生する面積が流域面積に占める割合は0.9～4.2%でその平均は2.3%、地表流としての直接流出量が全流出量に占める割合は1.8～12.2%でその平均は7.2%であった (Tanaka et al., 1988)。すなわち、表面流出による直接流出成分だけではこの流域からの降雨流出量を説明することができないとの結論を得た。

一般に、中緯度湿潤地域の森林に覆われた自然流域においては、飽和地表流が発生する範囲は流域面積の10%以下、通常は1～5%の範囲を占めるにすぎないとされており (Dunne and Black, 1970)、八王子試験流域での結果はこれと整合的であった。また、わが国において実験的に測定さ

れた森林土壌の最終浸透能は200 mm/h以上の値を示し (例えば、村井・岩崎, 1975; 辻村ほか, 1991)、少なくとも時間雨量が100 mm前後の降雨であっても、森林土壌はその大半を浸透させることが可能であるという想定に照らし合わせても、上記の結論は良く符合するものであった。豪雨時における森林流域での地表流の発生状況をマッピングした研究例は世界的にも少ないらしく、本研究で得た地表流の発生に関する結果は、発表から20～30年を経た今日でも米国やフランスで出版された教科書に引用されている (Brutsaert, 2005; Roche et al., 2013)。

八王子試験流域におけるハイドログラフの構成成分については、流水の電気伝導度をトレーサーとした分離を試みた。その結果、この流域からの地下水流出成分は全流出量の92～96%を占め、降雨に由来する直接流出 (地表流出) 成分は平均するとわずか6%を占めるにすぎなかった (田中ほか, 1984; Tanaka et al., 1988)。また、本試験流域における流出機構については、蛍光染料を用いたトレーサー実験と流域出口における流線網解析とによって、地層中に形成されたパイプを通じた卓越流 (パイプ流) の存在が降雨時の流出に大きく寄与していると結論した (田中ほか, 1984; Tanaka et al., 1988)。

降雨流出時におけるハイドログラフの流出成分については、1970年代以降の同位体技術の向上によって、環境同位体を利用したハイドログラフの分離に関する研究が世界各国で行われるようになった。表1は、中緯度湿潤地域での環境同位体を用いたハイドログラフの分離結果をまとめたものである (田中, 1982)。表1から明らかに、中緯度湿潤地域の植生に覆われた流域においては、対象流域の地域的な違いや対象流域の大小を問わず、総流出に占める地下水流出の割合は60～90%であり、流出ピーク時においても60～80%が地下水流出成分によって占められていることが共通の結論として得られている。

表1は、1982年当時にまとめたものであり、引用された文献年代がやや古いものとなっているが、同様な研究はその後も着実に蓄積されており (辻村・田中, 1996)、八王子試験流域における観測結果と合わせて考えると、河川の源流部では流

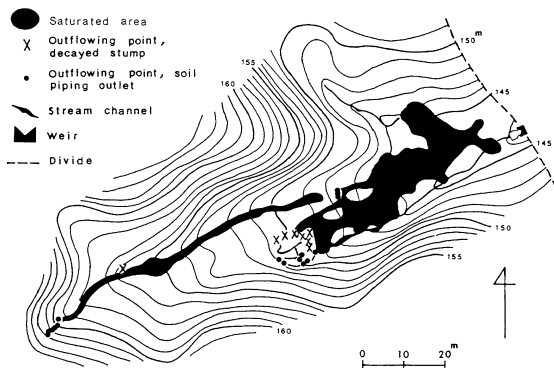


図2 八王子試験流域における総降水量195.0 mmの流出ピーク時(1980年9月12日午前2時)における地表流の発生状況 (Tanaka et al., 1988を修正, 初出はTanaka et al., 1981)。

表1 環境同位体を用いたハイドログラフの分離結果 (田中, 1982 を修正).

研究者	実施場所	流域面積	標高 (a. m. s. l.)	用いたト レーサー	出水時に地下水流出成 分が占める割合	備 考
Fritz et al. (1976)	カナダ (Wilson Creek)	22.0 km ²	400～780 m	¹⁸ O	総流出量の90% ピーク時60%	流域の90%が森林および 草地, 10%が裸地
Sklash・Farvold- en(1979)	カナダ (Ruisseau des Eaux Volées)	1.2 km ²	760～880 m	¹⁸ O	ピーク時60～80%	流域の大部分が密に森林 で覆われる
田中・間島・佐 藤 (1980)	日 本 (筑波研究学園 都市周辺)	19.1 km ²	20～30 m	T	総流出量の42%	都市化流域
		20.1 km ²	20～30 m	T	総流出量の78%	非都市化流域
Rodhe(1981)	スウェーデン (Nästen)	6.8 km ²	18～55 m	¹⁸ O	総流出量の67～78%	融雪出水 流域の83%が森林
Dinçer et al. (1970)	チェコスロバキア (Modry Dul)	2.7 km ²	1,000～ 1,554 m	T	総流出量の63%	融雪出水 流域の70%が草地, 30% が森林
Herrmann・ Sticher (1980)	ドイツ (Lainbach Creek)	18.7 km ²	670～ 1,801 m	D	総流出量の53～65%, 平均58%	夏季出水 3年間の観測値 (1976～1978)
					総流出量の72～86%, 平均77%	冬季融雪出水 3年間の観 測値(1975/76～1977/78)
Martinec et al. (1974)	スイス (Dischama)	43.3 km ²	1,668～ 3,146 m	T	総流出量の37～89%, 平均64%	融雪出水 4年間の観測値 (1969～1972), 流域の 3%が森林, 残りの大部 分が草地

*表中の文献は田中 (1982) を参照.

出に占める地下水流出成分の割合が一般に考えられているよりもはるかに大きく、また、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ホートン地表流が発生することは稀であることが明らかにされたといえる。

上記の事実は、中緯度湿潤地域の植生に覆われた自然流域にもたらされた降水の大部分は、一旦は地中に浸透することを意味する。すなわち、わが国のような湿潤地域では、一部の例外を除くと、基本的な水循環の方向は「降水→土壤水→地下水→地表水 (河川水・湖沼水)」となる (田中, 1996)。このことが、降雨流出過程の研究を通じて筆者がたどり着いた一つの結論である。

4. 流域水循環における基幹循環系としての地下水流動システム

水循環の最も基本的な地域単元は「流域」である。流域は三次元の空間構造から成り、入力としての降水量を出力としての流量と蒸発散量に変換する仕組みを有している。図3は、この流域システム内における水の循環を模式的に表したもの

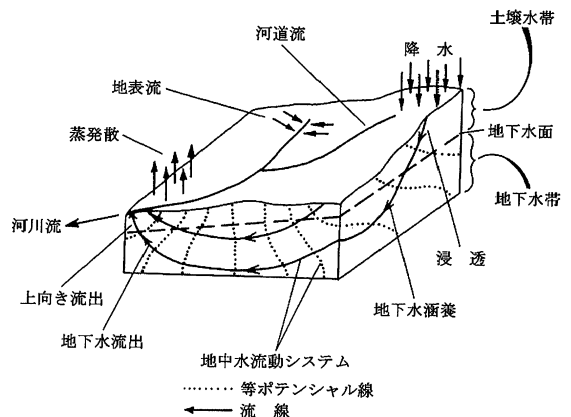


図3 流域の水循環システムを示す模式図 (Freeze, 1974 を修正).

である。地表面下には土壤水帯と地下水帯が存在し、地表面から浸透した水はこの中を物理法則である流体ポテンシャル (fluid potential) に基づいて流動している (例えば、杉田・田中編, 2009)。

また、地下水は「地下水流動系」(Tóth, 1963) と呼ばれる「涵養-流動-流出」という一連の循環系を構成し、流域を単位として流動している。地下水揚水規制によって、わが国の各地域におい

て地下水位が上昇・回復している事実は、この地下水流動システムが普遍的に存在していることを示している。

前節で記したように、わが国を含む中緯度湿潤地域の自然流域における基本的な水循環の方向が「降水→土壌水→地下水→地表水（河川水・湖沼水）」であることは、地表面下で生起する地下水流動系の存在が流域水循環システムの基幹循環系を構成し、流域への入力となる降水と流域からの出力となる地表水とを結びつける重要な役割を果たしていることを意味している。すなわち、わが国のような湿潤地域においては、河川あるいは湖沼といった地表水体は地下水の排水経路として機能している場合が多く、地下水と地表水とは地下水流動系という重層かつ階層構造を持った循環システムによって連結されているといえる。このことは、流域水循環システムを解明するためには、その流域における地下水流動系の解明が基本的に重要であることを意味している。

図4は、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。図から、地下水は帯水層中だけではなく、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。こうした流動系が実際に存在することは、野外での実証的研究によって確認されている(田中, 1996)。

先述したように、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と交流を持つ水として位置づけられることは図4からも読み取ることができる。地下水が単に水資源の対象としてばかりではなく、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。

「地下水流動系 (groundwater flow system)」という概念は、先述したように1963年にカナダ Alberta 大学の J. Tóth 教授によって提唱されたものである。この地下水流動に関する基本概念が発表された1963 (昭和38) 年は、奇しくも東京教育大学理学部地学科地理学教室に、後に筆者が専攻する「水収支論講座」が開設されたその年でもあり、今年2013年は両者にとって節目となる50周年を迎えたことになる。

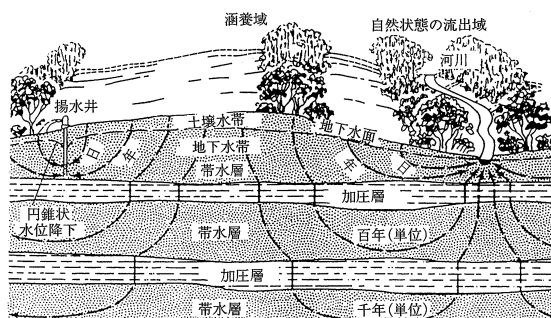


図4 滞留時間を異にする地下水流動系のあり方を示す模式図 (Tóth, 1995 を修正)。

2008年10月に富山で開催された第36回国際水文地質学会に参加するために来日した Tóth 教授が同年11月に筑波大学陸域環境センターを訪問され、同センターの第103回セミナーにおいて、“The Modern Scope of Hydrogeology and the History and Future of its Evolution: A Personal View” と題した講演が行われた (写真1)。この講演内容については田中 (2012a) で既に記したが、地下水を専門とするコミュニティーにとって重要でありかつ意義深い指摘がなされたと思われるので、ここに再録することをお許しいただきたい。すなわち、この講演の中で Tóth 教授は以下のような指摘を行った (筑波大学陸域環境研究センター, 2009)。

... Hydrogeology has come of age. It is now both a basic science and a specialty. Because its maturity no major conceptual developments can be expected in the foreseeable future. Instrumental, analytical, and computer techniques continue to progress; recognition and application of hydrogeology will expand in and to increasing numbers of specialties. ... Birth of specialized (hyphenated) sub-disciplines will continue and accelerate: Contaminant-, Eco-, Petroleum-, Forest-, Karst-, Agricultural-, Environmental-, and so on, “Hydrogeologies”.

この指摘は、先に記した Tóth 教授自身が1963年に発表した「地下水流動系」という概念が如何に記念碑的なものであるかを述べると同時に、この概念が将来にわたって多くの分野に影響を与

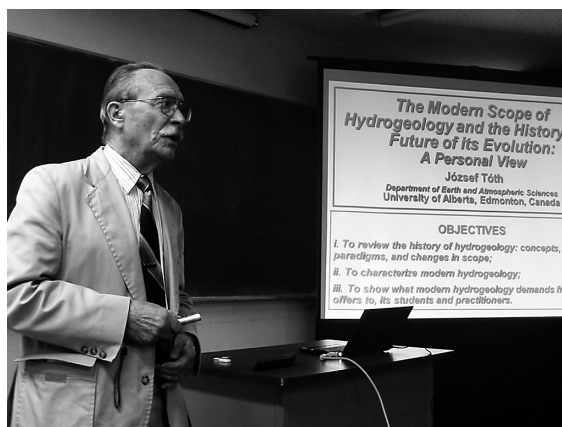


写真1 筑波大学陸域研究センターのセミナーで講演する J. Tóth 教授 (2008年11月14日, 筆者撮影).

え続けることを述べたものである。すなわち、これからの地下水や水文地質に関する研究は、この「地下水流動系」を基本概念とした sub-discipline としての新たな学問領域の確立に向かうことを示唆したものである。なお、権根 (2010) は、「地下水流動系という概念は、地下水循環を「可視化」する基礎となった」と述べている。

5. 生態水文学事始

1990年代に入り、生態系と水循環の相互作用に関する研究、特に生態系が地下水涵養に及ぼす影響に関する研究を開始した。その契機となった最初の論文は、樹幹流の浸透範囲と樹木の地際直径との関係に関するものである (Tanaka et al., 1991)。この研究のきっかけは、無降雨日が連続15日間続いた後の2mmの降雨によって、樹幹流の浸透範囲がほぼ円形状に明瞭に現れていることを発見したことであった。この現象は、街路樹のツバキ、ヒムロ、ケヤキ、サクラといった多くに樹種に共通して見られたものであり、筆者らはその浸透範囲と対象樹木の地際直径を測定してみた。全12サンプルのデータについて、その関係をプロットしたのが図5である。驚くことに、ランダムに測定した両者の関係は高い相関関係を持って二次曲線で回帰することができた。この関係式はその後、Iida et al. (2005) によってリターマー

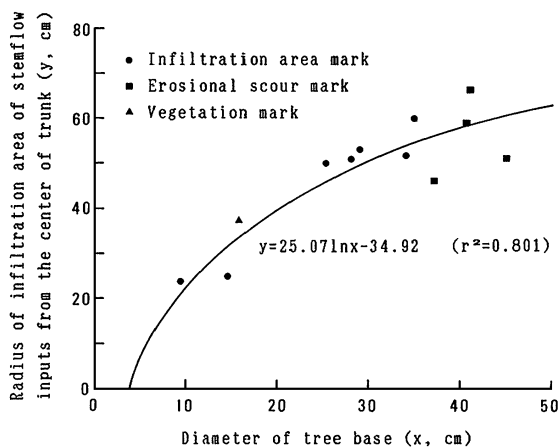


図5 樹幹地際直径と樹幹流の円形状浸透範囲の半径との関係 (Tanaka et al., 1991 を修正).

クの半径と樹幹地際直径との関係式とも良く一致することが確認された。リターマークとは、樹幹流が極めて高い強度で発生する樹木において、樹木地際周辺で小規模な浸透余剰地表流 (いわゆるホートン地表流) が発生する場合があります、その地表流によってリターが移動した結果、樹木地際周辺の土壌面が円形状に露出する現象を指したものである。リターマークを測定対象とした樹木は、フウ、シラカシ、ウバメガシであった。この樹幹流の浸透範囲と樹幹地際直径との関係式を見出したことは、その後続く生態系と水循環との相互作用、特に降下浸透プロセスや地下水涵養プロセス等を研究する上で大いに役立つものとなった。

樹幹流による地下水涵養の量的評価については、平地林であるアカマツ林を対象として、その寄与率の算出を試みた。この算出においては、樹幹流は鉛直方向に円形状に浸透するものと仮定し、樹幹流の円形状の浸透面積のうち、樹幹地際断面積を差し引いた面積をその浸透範囲とした。その結果、全地下水涵養量に占める樹幹流の寄与率は約10～20%と見積もられた (Tanaka et al., 1996)。この値は、同一のアカマツ林を対象として、塩化物イオンをトレーサーとした物質収支式から求められた地下水涵養に占める樹幹流の寄与率がおおよそ10～20%であるという研究結果 (Taniguchi et al., 1996) とほぼ一致するものであった。この一連の結果は、対象アカマツ林の林外雨量に対する樹幹流量の割合はたかだか1%程

度に過ぎないものの、地下水涵養への寄与はその数十倍に相当することを意味しており、地下水涵養源としての樹幹流の果たす役割の重要性を示唆したものとなった。

いわゆる「生態水文学」と呼ばれる新たな学問領域におけるそのほかの研究は、主として指導学生の卒業論文、修士論文、博士論文それぞれの研究課題として実施され、以下のようなテーマについて研究が行われた。すなわち、SPAC (Soil-Plant-Atmosphere-Continuum) に関する研究、土壌中のCO₂の挙動に関する研究、アカマツ林の植生の遷移に関する研究、樹液流速の測定法に関する研究、林地水収支に関する研究、Hydraulic liftに関する研究、降雨時の降下浸透プロセスに関する研究、土壌水の溶質変化に関する研究、樹幹流の浸透形態の可視化に関する研究、浸透プロセスのモデル化に関する研究、などである。

また、この分野での研究の延長として、米国 Delaware 大学の Delphis F. Levia とカナダ Thompson Rivers 大学の Darryl Carlyle-Moses とともに編著者として、『Forest Hydrology and Biogeochemistry: Synthesis of Past Research and Future Directions』(Levia et al., 2011) を Springer 社から “Ecological Studies 216” として出版する機会を得た。この書籍は36章から成り、740ページに及ぶ大著であり、世界各国からの執筆者に混じり5人の日本人研究者に参加していただくことができた。また、本書籍は出版からの2年間において7,826の chapter download リクエストがあり、Springer 社の2012年における eBook Collection の上位25%にランクインしている。

6. 国際連携

流域水循環の研究から流域管理に視点を移した研究は、日本学術振興会二国間共同研究の支援を受け、インドネシアとの共同研究「湿潤熱帯地域の持続可能な水資源開発のための流域管理」を2007年度~2009年度の3カ年にわたって遂行した。この共同研究プロジェクトでは、流域管理をする上で方法論の確立、人材育成や合意形成のプロセスを踏まえた「統合的流域管理」という考え方の下に、3回のワークショップと代表的流域

を対象とした現地調査を実施し、その成果を取りまとめた (Tanaka et al., 2010)。最終年度のワークショップにはインドネシア森林省も加わり、その内容は “Save Watershed, Time to act now” と題してプレス発表が行われた。

このプロジェクトは、筑波大学、千葉大学、京都大学、東京大学の国内4大学が連携し、それぞれの大学で指導したインドネシアの帰国留学生をカウンターパートとして組織し、実施したものであり、帰国留学生のフォローアップという観点からも大きな意味を持つものであった。

「モンゴル国における持続可能な地下水管理 (Sustainable Groundwater Management in Mongolia)」に関する UNESCO Chair が2007年6月に設置された。本 Chair は、モンゴル科学アカデミー地生態学研究所をホスト機関とし、筑波大学を支援機関とする614番目の Chair として設置されたものであり、ユネスコ本部、ホスト機関、支援機関の三者間において協定が締結された最初の Chair である。UNESCO Chair は、ユネスコが大学あるいは大学間の共同ネットワークが持つ知識や技術の協力を得て (知識・技術移転を通して)、途上国の高等教育における高度な研究、研修、プログラム開発等を行うもので、1992年から開始されている。

本 Chair は、2006年7月に松浦晃一郎ユネスコ事務局長 (当時) がモンゴル国を訪問した際に、「科学技術マスタープラン政策支援策」の一環として、地下水の管理に関する Chair の設置を提案し、その後、日本ユネスコ国内委員会 IHP (国際水文学計画) 分科会に対して協力要請があり、筑波大学が対応機関として進めることになったものである。

モンゴル国においては、地球温暖化による降水量の減少、市場経済の導入に伴う家畜頭数の増加、工業化による水資源利用の増加、都市への人口集中等により水不足が深刻になっており、同国の飲料水の90%を占める地下水資源の適正な管理が最重要な課題となっている。本 Chair では、わが国の経験を活かし、地下水管理に必要なモニタリングシステムの構築、地下水調査・解析手法の技術移転、人材育成のためのプログラム開発、ワークショップの開催等が実施された。

本 Chair による2回のワークショップの内容は、UNESCO-IHP VII の研究成果の一部として取りまとめられている (Tanaka et al., 2009a, 2009b)。

最近における地下水に関する世界の動向の中で最も注目すべきことは、2008年12月に開催された第63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「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。この草案採択の経緯は田中 (2012a) に詳しいが、ここではその特徴を記すことにする。

この法典草案の特徴は、ユネスコの国際水文学計画 (UNESCO-IHP) と緊密な連携が行われ、現在における地下水に関する学術的知見が随所に反映されていることである。すなわち、その基本理念は「地下水は石油や天然ガスとともに共有自然資源 (shared natural resources) の一つ」であり、その保全・管理にあたっては「帯水層 (aquifer) を単元とする」である。この「帯水層を単元とする」の意は、先に記した「水循環の最小地域単元は流域である」との考えと軌を一にしたものであり、地下水は水循環の一環として「地下水流域を単位として流動しているものであり、その境界は国境線とは一致しない」という科学的な認識に基

づくものである。

本草案は4部19条より構成されており (表2)、草案に用いる地下水に関する学術的な定義 (definition) が第2条 (Article 2) に記されている点はその特徴として挙げられる。この中で、目を引くのは「aquifer State (帯水層国家あるいは州、仮訳)」という新たな国家用語を定義し、地下水の保全・管理は、共有自然資源の観点から、同一帯水層が分布する国家間が aquifer State として一つとなってその任にあたることを義務としている点である。この新たな定義は、地下水に関する学術的知見に基づいた草案の基本理念を反映したものに他ならない。

ユネスコは、2010年12月にパリの本部において“ISARM2010: TRANS-BOUNDARY AQUIFERS, Challenges and new directions”を開催した。ISARM は“International Shared Aquifer Resources Management”の略で、UNESCO-IHP が2000年から始めた越境帯水層に関する国際プロジェクトである。本プロジェクトの開始から10年が経過し、その第1期事業が終了したことから、国際地下水法典の草案が国連で採択されたことを受けて、その堅実な実施方策を話し合うために開かれた国際会議である。世界各国から水文地質学、地下水学、

表2 越境帯水層法典 (国際地下水法典) 草案の条項一覧 (法典草案に基づいて田中作成)。

PART I INTRODUCTION

- ・ARTICLE 1: Scope
- ・ARTICLE 2: Use of terms (aquifer, aquifer system, TA or TA system, aquifer State, recharge aquifer, recharge zone, discharge zone)

PART II GENERAL PRINCIPLES

- ・ARTICLE 3: Sovereignty of aquifer States
- ・ARTICLE 4: Equitable and reasonable utilization
- ・ARTICLE 5: Factors relevant to equitable and reasonable utilization
- ・ARTICLE 6: Obligation not to cause significant harm
- ・ARTICLE 7: General obligation to cooperate
- ・ARTICLE 8: Regular exchange of data and information
- ・ARTICLE 9: Bilateral and regional agreements and arrangements

PART III PROTECTION, PRESERVATION AND MANAGEMENT

- ・ARTICLE 10: Protection and preservation of ecosystems
- ・ARTICLE 11: Recharge and discharge zone
- ・ARTICLE 12: prevention, reduction and control of pollution
- ・ARTICLE 13: Monitoring
- ・ARTICLE 14: Management
- ・ARTICLE 15: Planned activities

PART IV MISCELLANEOUS PROVISIONS

- ・ARTICLE 16: Technical cooperation with developing States
 - ・ARTICLE 17: Emergency situations
 - ・ARTICLE 18: Protection in time of armed conflict
 - ・ARTICLE 19: Data and information vital to national defence or security
-

水文科学、法学、社会経済学等多分野にわたる約300名の関係者が一同に会し、3日間にわたって討議が行われた(写真2)。法学者や社会経済学者を含む地下水に関する国際会議としては、これまでにない最大規模の国際会議であり、同時に地下水問題の解決には学際的な連携が必要不可欠な時代に入ったとの印象を強くした。

本国際会議のメインテーマは国際的な越境帯水層問題であったが、同様な問題を抱えることのない日本からの参加者は、草案の起草責任者(Special Rapporteur)である元国連国際法委員会委員の山田中正大使と木曾 功ユネスコ特命全権大使を除くと筆者一人であった。しかし、本国際会議で取り上げられたこの越境帯水層に関する問題は、国際的な視点において重要であるばかりでなく、国内的にも同様な問題が内在していることを指摘しておきたい。実際に、本国際会議においても、そのサイドイベントとして“Administrative vs. hydrological boundaries within a given country”と題したセッションが行われていた。これとは別のセッションではあったが、筆者も熊本地域で実施されている「越境地下水資源管理」についての実施例を報告した(Tanaka, 2010)。

また、2012年に入り、世界の地下水資源の保全・管理に係わる新たな動きが開始された。それは、GEF, The World Bank, UESCO-IHP, IAH の共同プロジェクトである“Groundwater Governance Project: A Global Framework for Action”である。



写真2 パリのユネスコ本部で開催された“ISARM2010”の会議場の様子(2010年12月6日、筆者撮影)。

このプロジェクトでは世界を5つの地域に分け、2012年4月から2013年3月にかけてそれぞれの地域における regional consultation が実施された。そのアジア・太平洋地域会議が2012年12月に中国の石家荘(Shijiazhuang)で開催され、筆者もユネスコから招聘されて参加した。この地域会議では、現時点におけるアジア・太平洋地域における地下水資源管理に関する問題点やガバナンスの構築に向けた方策等について討議が行われた。その中でクローズアップされたアジア・太平洋地域での問題点の一つとして指摘されたのが水資源・地下水資源の保全・管理における“one coordinate function”の欠如である。これに関連して、筆者は日本政府が現在立案中の「水循環基本法案」の理念と枠組みについて紹介を行い、基本理念における「水の公共性」と水循環に関する施策を集中的かつ総合的に推進するための新たな組織としての「水循環政策本部」が設置されることの重要性を指摘した。現在考えられているわが国の「水循環基本法案」は理念法ではあるが、世界的な新たな動向としての「管理」から「ガバナンス」への潮流と軌を一にしたものであり、その法案の一刻も早い成立が待たれるところである。

7. 環境政策との係わり

わが国の環境政策は、それまでの「公害対策基本法」に替わって1993年に制定された「環境基本法」と、これに基づいて翌1994年に閣議決定された「環境基本計画」によって大きく前進した。環境基本計画の基本理念は、「循環」、「共生」、「参加」、「国際的取組」であり、それまでの対処療法的な枠組みに対し、循環を基調とした基本理念を明確にすることによって、わが国の環境政策は大きく転換することになった。環境基本計画は現在、2012年4月に閣議決定された「第4次環境基本計画」に移っているが、その基本理念は維持されている。

環境基本計画の理念の一つとして「循環」が掲げられたことは、水循環を基本理念とする水文学や地下水学の進展にとっては好都合であったと言える。これを契機として、わが国においては「水循環」という術語が社会に定着するようになった

と思われる。

この環境基本計画では、水環境と地盤環境の保全に関し、新たな概念として「健全な水循環系の構築」が掲げられた。これを受けて、1997年に当時の環境庁によって「健全な水循環の確保に関する懇談会」が設置された。筆者が委員として参加したこの懇談会では「流域水循環における基幹循環系としての地下水流動系の重要性」が取り上げられ、最終報告書ではわが国のような中緯度湿潤地域における自然流域での基本認識として記載された(環境庁水質保全局, 1998)。さらに、この懇談会の報告を受けて、1999年に中央環境審議会から環境庁長官に提出された『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)においても水循環計画の策定に当たって、「地下水を中心とした流域の水循環を基本単位にする」ことがその冒頭に記載され、以後に続く「総合的流域管理」といった新たな施策を展開する際の基本的な考え方として定着しているものと思われる。

こうした、わが国における環境政策の新たな展開は、第2節で記したように、1970年代半ばからの環境同位体技術の向上と野外での世界的な実証的研究の進展によって、わが国を含む中緯度湿潤地域の自然流域における水循環の方向が、八王子試験流域での調査研究から見出された結果と同様に「降水→土壌水→地下水→地表水(河川水や湖沼水)」であることが明らかになり、さらに1980年代半ばから1990年代にかけてその事実が科学者の間で広く認識されたことを反映しているものと思われる。米国地質調査所(USGS)は1998年に『Ground Water and Surface Water, A Single Resource』というレポートを発表している(Winter et al., 1998)が、このレポートにおいても図4と全く同じ図が掲載されている。

水循環の最小単位は流域であり、流域水循環は地下水流動系によって入出力が結ばれているとの考え方は、その後の環境省による「湧水保全・復活活動支援検討会」においても取り上げられ、筆者が座長を務めたこの検討内容は、『湧水保全・復活ガイドライン』(環境省水・大気環境局, 2010)の一部として公表されている。本ガイドラインでは、「湧水は水循環の過程で地下水が地表

に現れたものであり、地域の生態系を支える重要な環境要素である」とし、同時に、地域の文化資源や観光資源などとしても重要であり、また、災害時における水の確保や環境学習の対象としての重要性等を踏まえ、湧水の保全・復活の手引とすべく解説を行っている。

また、地球温暖化防止の観点ならびに3.11の東京電力福島第一原子力発電所の事故を受け、再生可能エネルギーである地中熱利用の普及に当たって、共有資源の観点からその利用方針について取りまとめを行った(田中, 2012b)。その内容を踏まえた『地中熱利用にあたってのガイドライン』が環境省水・大気環境局(2012)から公表されている。

8. おわりに

本稿は、2013年度の日本地下水学会「地下水学術賞」の受賞に際して、同年5月に開催された春季講演会での「特別講演」の内容に基づき、筆者がこれまでに取り組んできた地下水研究を中心として、これまでに係わった社会的動向を含めて取りまとめたものである。十分な記述ができなかった部分もあるが、その内容を振り返って見ると、地下水を水循環の視点から捉えることによって多方面にわたる幅広い係わりにおいて地下水研究の意義が見出されるように思われる。現在、国家的問題となっている東京電力福島第一原子力発電所の汚染水対策についても、流域を単位とした水循環の視点から地下水の流動状態を解明し、これを可視化した上で、それに基づいた対策を講ずることが緊急の課題であろう。また、冒頭に記した阿部謙夫技師が今から80年前にその著書『水文学』に記した「水文学の中心をなすものは地中の水である。」との指摘は、今振り返ってみると卓見であったように思われる。さらに、Tóth教授が筑波大学陸域環境研究センターの講演で指摘したように、これからの研究は「地下水流動系」という基本概念に基づいた sub-discipline としての新たな学問領域の確立に向かうものと思われる。なお、本文の一部に既発表論文を原文のまま引用した箇所があることをお断りしたい。

おわりに当たり、研究をともにした学生の皆さんや同僚、そして今日まで長年にわたってご支援をいただきました多くの皆様方に心より感謝申し上げます。

最後になりましたが、本稿を記す機会を与えていただいた日本地下水学会会長の嶋田 純先生、同編集委員長の徳永朋祥先生を始め関係者の各位に厚く御礼申し上げます。また、二名の精読者より貴重なコメントをいただきました。記して感謝申し上げます。

参考文献

- 阿部謙夫 (1933) : 水文学. 岩波書店, 70p.
- 榎根 勇 (2010) : 地下水の価値について. 地下水技術, 52 (3), 1-12.
- 環境省水・大気環境局 (2010) : 湧水保全・復活ガイドライン. 125p.
- 環境省水・大気環境局 (2012) : 地中熱利用にあたってのガイドライン. 79p.
- 環境庁水質保全局 (1998) : 健全な水循環の確保に向けてー豊かな恩恵を永続的なものとするためにー. 健全な水循環の確保に関する懇談会報告, 71p.
- 杉田倫明・田中 正編著・筑波大学水文科学研究室著 (2009) : 水文科学. 共立出版, 275p.
- 田中 正 (1977) : 不飽和帯における水分の挙動についてー今市扇状地関東ローム層の水文学的研究ー. 東京教育大学学位論文, 149p.
- 田中 正 (1978) : 今市扇状地における不飽和帯の水収支. 市川正巳・榎根 勇編, 日本の水収支, 古今書院, 114-133.
- 田中 正 (1980) : 今市扇状地における関東ロームの水分特性と比産出率. 地理学評論, 53, 646-665.
- 田中 正 (1982) : 水文学における同位体利用の研究動向ー地中水の循環に関する研究を事例としてー. 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 (1996) : 地下水循環と環境. 地下水技術, 38 (12), 5-14.
- 田中 正 (2012a) : 最近における地下水に関する国内外の動向. 水利科学, 56 (4), 1-26.
- 田中 正 (2012b) : 「地中熱利用にあたってのガイドライン」の公表に寄せて. 地下水学会誌, 54, 157-162.
- 田中 正・安原正也・丸井敦尚 (1984) : 多摩丘陵源流域における流出機構. 地理学評論, 57, 1-19.
- 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) : 山地流域内に起こる水文現象の解析. 東京農工大学農学部演習林報告, 第6号, 1-79.
- 筑波大学陸域環境研究センター (2009) : 2008年度陸域環境研究センターセミナーの記録. 筑波大学陸域環境研究センター報告, 10, 109-110.
- 辻村真貴・田中 正 (1996) : 環境同位体を用いた降雨流出の研究. 恩田裕一ほか編, 水文地形学, 古今書院, 79-87.
- 辻村真貴・田中 正・島野安雄 (1991) : 川上試験流域における浸潤能と浸潤後の水の流動経路について. 筑波大学農林技術センター演習林報告, 7, 137-161.
- 村井 宏・岩崎勇作 (1975) : 林地の水および土壌保全機能に関する研究 (第1報) - 森林状態の差異が地表流下, 浸透および侵食に及ぼす影響-. 林業試験場研究報告, 274, 23-84.
- Bear, J. (1979): *Hydraulics of Groundwater*. McGraw-Hill Inc., 567p.
- Bouwer, H. (1978): *Groundwater Hydrology*. McGraw-Hill Book Company, 480p.
- Brutsaert, W. (2005): *Hydrology: An Introduction*. Cambridge University Press, 605p.
- Dunne, T. and R.D. Black (1970): Partial area contribution to storm runoff in a small New England watershed. *Water Resources Research*, 6, 1296-1331.
- Freeze, R.A. (1974): Streamflow generation. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 12, 627-647.
- Freeze, R.A. and J.A. Cherry (1979): *Groundwater*. Prentice-Hall Inc., 604p.
- Hillel, D. (1971): *Soil and Water*. Academic Press, 288p.
- Iida, S., J. Kakubari and T. Tanaka (2005): "Litter marks" indicating infiltration area of stemflow-induced water. *Tsukuba Geoenvironmental Sciences*, 1, 27-31.
- Kirkby, M.J. ed. (1978): *Hillslope Hydrology*. John Wiley & Sons, 389p.
- Levia, D.F., D. Carlyle-Moses and T. Tanaka eds. (2011): *Forest Hydrology and Biogeochemistry: Synthesis of Past Research and Future Directions*. *Ecological Studies* 216, Springer, 740p.

- Roche, P.A., J. Miquel and E. Gaume eds. (2013): Hydrologi quantitative. Springer, 590p.
- Tanaka, T. (1982): The role of subsurface water exfiltration in soil erosion processes. International Association of Hydrological Sciences Publication, 137, 73-80.
- Tanaka, T. (2010): Transboundary aquifers and groundwater resources management between provinces of Japan: In case of Kumamoto Prefecture, Kyushu Island, Japan. Pre-proceedings of ISARM2010 International Conference, 6p.
- Tanaka, T., H. Sakai and M. Yasuhara (1981): Detection of dynamic response of subsurface water during a storm event with tensiometer and piezometer nests. *ハイドロロジー*, 11, 1-7.
- Tanaka, T., M. Tsujimura and M. Taniguchi (1991): Infiltration area of stemflow-induced water. Annual Report of the Institute of Geoscience, the University of Tsukuba, 17, 30-32.
- Tanaka, T., M. Taniguchi and M. Tsujimura (1996): Significance of stemflow in groundwater recharge. 2: A cylindrical infiltration model for evaluating the stemflow contribution to groundwater recharge. *Hydrological Processes*, 10, 81-88.
- Tanaka, T., R. Jayakumar and B. Erdenechimeg eds. (2009a): Proceedings of UNESCO Chair Workshop on Sustainable Groundwater Management in Arid and Semi-arid Regions. IHP VII Technical Documents in Hydrology, 1, UNESCO Office Beijing 2009 (CN/2009/SC/RP/3), 64p.
- Tanaka, T., R. Jayakumar and M. Tsujimura eds. (2009b): Proceedings of UNESCO Chair Workshop on International Strategy for Sustainable Groundwater Management: Transboundary Aquifers and Integrated Watershed Management. IHP VII Technical Documents in Hydrology, 2, UNESCO Office Beijing 2009 (CN/2009/SC/RP/5), 107p.
- Tanaka, T., H. Pawitan and T. Yamanaka eds. (2010): Integrated Watershed Management for Sustainable Water Use in a Humid Tropical Region: Final Report. Bulletin of the Terrestrial Environment Research Center, University of Tsukuba, 10, Supplement, 1, 106p.
- Tanaka, T., M. Yasuhara, H. Sakai and A. Marui (1988): The Hachioji experimental basin study - Storm runoff processes and the mechanism of its generation. *Journal of Hydrology*, 102, 139-164.
- Taniguchi, M., M. Tsujimura and T. Tanaka (1996): Significance of stemflow in groundwater recharge. 1: Evaluation of the stemflow contribution to recharge using mass balance approach. *Hydrological Processes*, 10, 71-80.
- 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.
- Winter, T.C., J.W. Harvey, O.L. Franke and W.M. Alley (1998): Ground Water and Surface Water: A Single Resource. USGS Circular, 1139, 79p.

(受付：2013年10月8日，受理：2013年11月25日)