

課題別総括：流域水循環過程

Summary of Studies on Catchment Hydrological Processes

田中 正*・山中 勤**

Tadashi TANAKA* and Tsutomu YAMANAKA**

I はじめに

陸域環境研究センターの前身である水理実験センターでは、蒸発散・不飽和浸透・地下水涵養等の諸過程に関するプロットスケールの研究が主に熱収支・水収支観測圃場を利用して推進されたが、2000（平成12）年の改組にあたり、流域スケールのエネルギー・物質循環研究を強化することとした。そこで、熱収支・水収支観測圃場のほかに、隣接するアカマツ林や農林技術センター川上演習林の試験流域なども利用しながら、水文素過程と流域水循環過程を結び付ける様々な観測研究が展開された。こうした研究は、国際的な学術動向と歩調を合わせる形で、生物地球化学あるいは生態水文学といった新しい学際研究領域へと発展した。主たる成果は、McDonell and Tanaka (2001) や Levia *et al.* (2011) などの成書に既に取り纏められているが、本稿では本センターで行われた研究を中心にその概要を総括する。

II 流域規模の水質形成過程

本センター発足に先立つ2000年2月に開催された日米科学セミナー「森林流域の水文・生物地球化学に関する合同セミナー」において、日米に

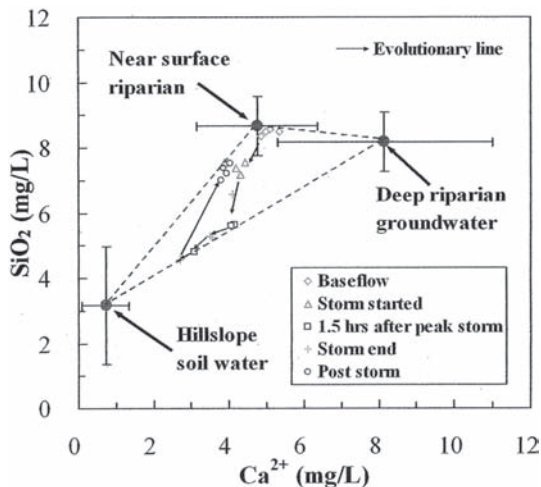
おける気候・地形・地質といった自然条件の違いが流域からの水流出プロセスや窒素動態に及ぼす影響が指摘され、特に我が国では急峻な地形による水文物理過程や地下水の挙動が重要であることが示された。また、水質変化に際して森林～河川移行帯である河畔域が重要であることや流路内での水質変換プロセスの重要性も討議された。

こうした流れを受けて、川上試験流域において河畔域の地中水が渓流水の水質形成過程に果たす役割に関する研究が行われた。この研究では、5.2 haの一次流域を調査対象として密な観測網が敷かれ、約1年間にわたって採取された降水・渓流水・土壌水・地下水等のサンプルについて、一般水質分析ならびに溶存有機炭素分析などが実施された。その結果、降雨流出および融雪流出の双方において、河畔域の浅い地下水と斜面土壌水が渓流水の水質形成に重要な役割を果たしていることが明らかにされるとともに、斜面土壌水の流動経路とその成分濃度は、河畔域に存在する地下水によってリセットされることなく溪流に流出するという新たな知見が得られた (Subagyono and Tanaka, 2002, 2003a, 2003b, 2004, 2005; Subagyono *et al.*, 2002, 2003, 2005; 第1図)。

また、これに関連して沖積扇状地 (Chikirbene *et al.*, 2009) や沿岸帯水層 (Jelassi *et al.*, 2011),

* 筑波大学国際部（前 陸域環境研究センター長）

** 筑波大学陸域環境研究センター



第1図 川上演習林における渓流水の三成分混合モデル解析結果 (Subagyono and Tanaka, 2003b)

さらには中国華北平原 (唐ほか, 2002), スーダン北東ガッシュ沖積盆地 (Bireir, 2002), モンゴル東部ヘルレン川流域 (Tsumimura *et al.*, 2007) などにおいても地下水の水質進化や河川との交流関係に関する研究が実施され, 気候・地形・地質条件による水質形成過程の差異が改めて浮き彫りとされた。

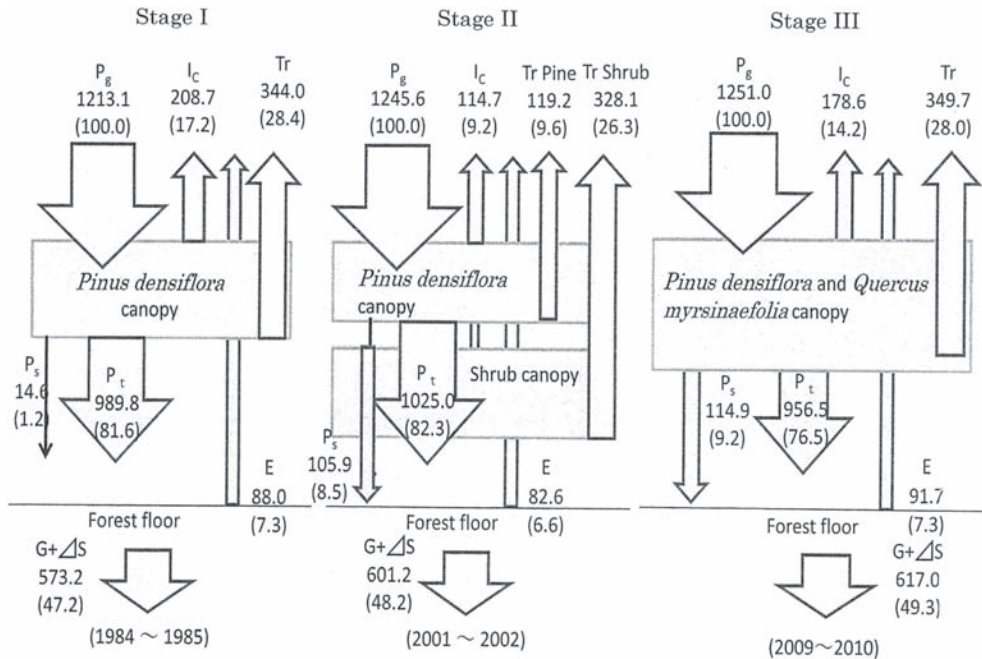
III 植生遷移が流域水循環に及ぼす影響

酸性雨・富栄養化・硝酸性窒素汚染などの水質に関わる諸問題が人間活動の弊害として注目される一方, 人間活動に起因する地球温暖化が引き起こす(であろう)流域水循環の変化もまた喫緊の課題である。そこで本センターでは, 文部科学省特別教育研究経費「地球温暖化に伴う植生の変化が地下水涵養機構に与える影響に関する研究」(平成17～22年度)を重点的に実施した。

本研究課題では, 陸域環境研究センターに隣接するアカマツ林地を対象として, 植生遷移に関する調査が詳細に実施された。対象林地では1985年以降, 二次林であるアカマツの衰退が著しく,

これに替わってシラカシやヒサカキといった常緑広葉樹林へと, 植生遷移が急速に進んでいることが明らかにされた (Iida *et al.*, 2005a)。この植生遷移に伴う蒸散と降雨遮断プロセスの変化に関する研究 (Iida *et al.*, 2004a) や樹幹流発生の変化に関する研究 (Iida *et al.*, 2004b) が行われ, 植生遷移に伴って林地の水収支を構成する要素間に量的変化が生じていることが明らかにされた。これらの研究結果を受け, 本研究課題では樹幹流の浸透プロセスに焦点を当てた研究が数多く実施され, その実態が明らかにされた (Tanaka *et al.*, 2004; Iida *et al.*, 2005b, 2005c; 松本, 2007)。また, 樹種の違いによる樹幹流の差異が土壌水のポテンシャル分布に及ぼす影響や降下浸透, 地下水涵養プロセスに与える影響に関する研究が精力的に行われた (角張, 2004; Tanaka *et al.*, 2005a, 2005b, 2006, 2008)。これらの研究の延長として, 樹種の違いが不飽和帯における水質分布に与える影響についての研究も実施され (Kakubari, 2007; 宮澤, 2007), 樹種の違いによる無機イオン濃度の差異とともに, 樹幹流量の差異が不飽和帯の水質分布に大きな影響を与えていることが明らかにされた (Tanaka *et al.*, 2009)。さらに, 単木スケールの水収支評価や20年以上の時間スケールにわたる林分水収支の年代間比較(第2図)を通じて, 樹種ごとに地下水涵養の時空間構造が異なり, 個体数の変化も複雑であるものの, 林分スケールとして見た場合には地下水涵養量がほぼ一定に保たれるという一種のホメオスタシス(恒常性)が見出された (Hayashi, 2012)。こうした知見は, 近年世界の潮流になりつつある「生態水文学」に新たな局面を開くものと言える。

なお, 本課題と密接に関係する不飽和プロセスに関しては, 本センターの主催で “International Workshop on Research Progress and Current Issues of Unsaturation Processes in Vadose Zone” を開催し, 国内外における研究動向について議論を深めた (Tanaka, 2005)。



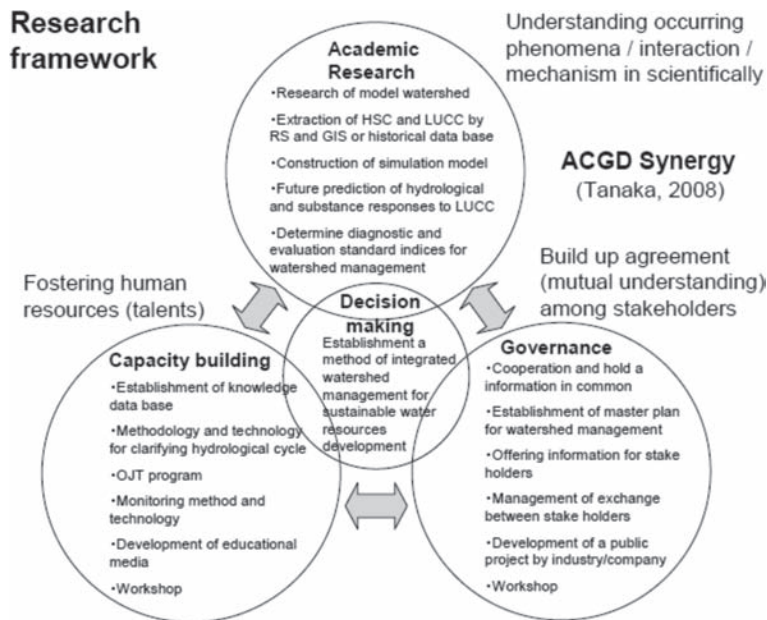
第 2 図 陸域環境研究センターに隣接するアカマツ林における植生遷移ステージごとの水収支 (Hayashi, 2012)

また、地球温暖化影響の別の側面として、冬季降水量の変化が土壤凍結深を左右し、その結果土壤 CO_2 濃度が夏季以上に上昇することがあることなどを、農林技術センター川上演習林における長期観測によって明らかにした (濱田・田中, 2010)。この研究は、2011 年に水文・水資源学会論文賞を受賞している。

IV 湿潤熱帯地域における流域管理

湿潤気候下に位置し、かつ火山国でもあるインドネシアは、熱帯と温帯の差はあるものの、水文学的に我が国との共通点が少なくない。このため、我が国の知見を近年発展の著しいインドネシアに適用し、両国の自然的・文化的差異を踏まえながら持続可能な流域管理に応用することは極めて意義深い。そこで、日本学術振興会から研究経費の配分を受け、平成 2007 ~ 2009 年度の 3 年間

にわたってインドネシアとの共同研究「湿潤熱帯地域における持続可能な水資源開発のための流域管理」を実施した。そこでは、老朽化の著しい観測施設の更新・維持とともに、リモートセンシング・GIS・同位体トレーサー・数値シミュレーションといった様々な手法が駆使され、首都・ジャカルタを貫通するチリウン川流域における水・物質循環特性と人間活動との関わりが明らかとされた (Tanaka, 2008 ; Tanaka *et al.*, 2010)。また、「Integrated Watershed Management」(2007 年)、「Water Governance」(2008 年)、ならびに「Capacity Building」(2009 年)といったテーマを設定して国際ワークショップを本センターの主催・共催で開催し、急速な人口増加とそれに伴う土地利用の変化が流域の水循環システムに与える影響に焦点を当てながら、持続可能な水資源開発のための流域管理に必要な合意形成や人材育成に関して具体的な方策の検討が行われた (第 3 図)。



第3図 インドネシアにおける持続可能な流域管理に向けたフレームワーク (Tanaka *et al.*, 2010)

V まとめ

本センター発足当時、気候変動予測を主目的とする数値モデルの開発と検証が急務とされていたが、検証用の野外観測データは圧倒的に不足していた。そのような中であって、プロットスケールから流域スケールの水循環過程を、野外観測をベースとして詳細に取り扱う本課題は、時宜に合ったものと言える。一方、この10年余の間に物理的な水文学と化学・生物学との融合が進むと同時に、流域管理といった社会科学との接点が急速に拡大した。本センターでは、数多くのワークショップを開催して国際的な研究動向をいち早く察知するとともに、期別総括で紹介された数々の国際貢献・社会貢献活動を通じて、社会的に要請のある科学的知見の提供を心掛けてきた。国際的に開かれた研究環境と時代の要請に対する柔軟性は、健全な学問の発達に不可欠と言える。その点において本センターは、当該課題において一定

の役割を果たしたと言ってよいのではないだろうか。

参考文献

- 角張順一 (2004): 樹種の違いが地下水涵養プロセスに及ぼす影響. 筑波大学卒業論文, 54p.
- 唐 常源・近藤昭彦・嶋田 純・新藤静夫・佐倉保夫・田中 正・陳 建耀・沈 彦俊・宋 献方 (2002): 中国, 河北平原の地下水における硝酸態窒素汚染の現状について. 第6回水資源に関するシンポジウム論文集, 223–228.
- 濱田洋平・田中 正 (2010): 中部山岳地域における土壌凍結および冬季土壌CO₂濃度の年々変動とそれに及ぼす気象条件の影響. 水文・水資源学会誌, **23**, 398–407.
- 松本 剛 (2007): 樹幹流の浸透範囲の時空間分布について. 筑波大学卒業論文, 42p.

- 宮澤隆則 (2007): 樹種の違いが樹幹流の無機水質成分に及ぼす影響. 筑波大学卒業論文, 43p.
- Bireir, F. E. A. (2002): A study on the hydrogeological characteristics and the geochemical evolution of groundwater in Gash alluvial basin, semi-arid area, north east Sudan. Ph.D Thesis, University of Tsukuba, 200p.
- Chikirbene, A., Tsujimura, M., Charef, A. and Tanaka, T. (2009): Hydro-geochemical evolution of groundwater in an alluvial aquifer: Case of Kurokawa aquifer, Tochigi prefecture, Japan. *Desalination*, **246**, 485–495, doi: 10.1016/j.desal.2008.04.057.
- Hayashi, A. (2012): Effects of vegetation succession on forest water balance at single-tree and forest-stand scales. Ph.D. Thesis, University of Tsukuba, 140p.
- Iida, S., Tanaka, T. and Sugita, M. (2004a): The change of transpiration and interception process due to the succession from Japanese red pine to evergreen oak. In Sidle, R.C. *et al.* eds. *Forest and Water in Warm, Humid Asia*, DPRI, Kyoto Univ., 41–44.
- Iida, S., Tanaka, T. and Sugita, M. (2004b): Change of stemflow generation due to the succession from Japanese red pine to evergreen oak. *Ann. Rep., Inst. Geosci., Univ. Tsukuba*, **30**, 15–20.
- Iida, S., Tanaka, T. and Sugita, M. (2005a): Change of interception process due to the succession from Japanese red pine to evergreen oak. *Jour. Hydrol.*, **315**, 154–166.
- Iida, S., Kakubari, J. and Tanaka, T. (2005b): “Litter marks” indicating infiltration area of stemflow-induced water. *Tsukuba Geoenviron. Sci.*, **1**, 27–31.
- Iida, S., Suzuki, A. and Tanaka, T. (2005c): Infiltration area of stemflow-induced water around Formosa Sweet Gum and Japanese Zelkova. *Proc. Int. Workshop on Research Progress and Current Issue of Unsaturation Processes in Vadose zone*, TERC, Univ. Tsukuba, 21–24.
- Jelassi, H., Tanaka, T., Yamanaka, T. and Bedir, M. (2011): Geochemical processes regulating groundwater quality in coastal aquifer in Odawara region, Kanagawa Prefecture, Japan. *水文・水資源学会誌*, **24**, 37–49.
- Kakubari, J. (2007): Effect of vegetation species difference on percolation and soil solution processes. Ms. Thesis, University of Tsukuba, 70p.
- Levia, D.F., Carlyle-moses, D. and Tanaka, T. (2011): *Forest Hydrology and Biogeochemistry: Synthesis of Past Research and Future Directions*(Ecological Studies). Springer-Verlag, 740p.
- McDonnell, J.J. and Tanaka, T. eds. (2001): *Hydrology and Biogeochemistry of Forested Catchments*. John Wiley & Sons, 400p.
- Subagyono, K. and Tanaka, T. (2002): The role of riparian zone in controlling stream water chemistry in Kawakami forested headwater catchment. 筑波大学分析センター報告 2001, 29–34.
- Subagyono, K. and Tanaka, T. (2003a): Subsurface hydrologic flowpaths and biogeochemical controls of NO_3^- transport in Kawakami forested headwater catchment, central Japan. IUGG 2003, Abstract B, B344.
- Subagyono, K. and Tanaka, T. (2003b): Transport of dissolved silica in Kawakami forested headwater catchment: implication for tracing flow pathway. *Ann. Rep., Inst. Geosci., Univ.*

- Tsukuba*, **29**, 11–16.
- Subagyono, K. and Tanaka, T. (2004): Subsurface hydrologic flowpaths and NO₃- transport in Kawakami forested headwater catchment, central Japan. *Sci. Rep., Inst. Geosci., Univ. Tsukuba*, Sec. A, **25**, 1–16.
- Subagyono, K. and Tanaka, T. (2005): The role of slope and soil thickness on dynamic of soil water and its chemistry in hillslope area. *Proc. Int. Workshop on Research Progress and Current Issue of Unsaturation Processes in Vadose zone*, TERC, Univ. Tsukuba, 45–50.
- Subagyono, K., Tanaka, T. and Hamada, Y. (2002): The importance of near surface riparian on storm runoff generation and stream chemistry in Kawakami forested headwater catchment. 筑波大学陸域環境研究センター報告, **3**, 75–88.
- Subagyono, K., Tanaka, T. and Hamada, Y. (2003): Spatial controls on the episodic stream water chemistry in Kawakami forested headwater catchment, central Japan: the role of solute flushing., *Proc. 1st Int. Conf. Hydrol. and Water Resour. in Asia Pacific Region, APHW 2003*, **1**, 444–450.
- Subagyono, K., Tanaka, T., Hamada, Y. and Tsujimura, M. (2005): Defining hydrochemical evolution of streamflow through flowpath dynamics in Kawakami headwater catchment, central Japan. *Hydrol. Process.*, **19**, 1939–1965.
- Tanaka, T. ed. (2005): *Proceedings of International Workshop on Research Progress and Current Issue of Unsaturation Processes in Vadose Zone*. TERC, Univ. of Tsukuba, 64pp.
- Tanaka, T. ed. (2008): *Proceedings of International Workshop on Integrated Watershed Management for Sustainable Water Use in a Humid Tropical Region*. *Bull. Terrestrial Environment Research Center, Univ. of Tsukuba*, **8(Suppl. 2)**, 78p.
- Tanaka, T., Iida, S., Kakubari, J. and Hamada, Y. (2004): Evidence of infiltration phenomena due to the stemflow-induced water. *Ann. Rep., Inst. Geosci., Univ. Tsukuba*, **30**, 9–14.
- Tanaka, T., Iida, S., Kakubari, S. and Hamada, Y. (2005a): The role of stemflow inputs in infiltration/percolation and groundwater recharge processes in a forested catchment. *Hydrology, Ecology and Water Resources, Int. Conf. Headwater Control VI*, CD-ROM, 9p.
- Tanaka, T., Kakubari, J., Iida, S. and Hamada, Y. (2005b): Effect of succession from Japanese red pine to evergreen oak on unsaturation process in a vadose zone. *Proc. Int. Workshop on Research Progress and Current Issue of Unsaturation Processes in Vadose zone*, TERC, Univ. Tsukuba, 51–54.
- Tanaka, T., Iida, S., Kakubari, J. and Hamada, Y. (2006): Effect of forest stands succession on groundwater recharge process due to global warming. *Proc. Int. Conf. on Hydrology and Ecology: The Groundwater/ Ecology Connection, Czech Association of Hydrogeologist*, 87–90.
- Tanaka, T., Iida, S., Kakubari, J. and Hamada, Y. (2008): Effect of forest stand and succession from conifer trees to broad-leaved evergreen trees on infiltration and groundwater recharge processes. *IAHS Publ.*, **321**, 54–60.
- Tanaka, T., Kakubari, J., Hamada, Y. and Iida, S. (2009): Effect of plant species on distribution of water quality in a vadose zone. *Proc. 2nd Int. Multidisciplinary Conf. on Hydrol. and Ecology: Ecosystems Interfacing with*

Groundwater and Surface Water, 49–52.

Tanaka, T., Pawittan, H. and Yamanaka, T. eds.
(2010): Final Report of JSPS-DGHE Joint
Research Project "Integrated Watershed
Management for Sustainable Water Use in
a Humid Tropical Region". *Bull. Terrestrial
Environment Research Center, Univ. of*

Tsukuba, **10(Suppl.)**, 106p.

Tsujimura, M., Abe, Y., Tanaka, T., Shimada, J.,
Higuchi, S., Yamanaka, T., Davaa, G. and
Oyunbaatar, D. (2007): Stable isotopic and
geochemical characteristics of groundwater
in Kherlen River basin, a semi-arid region in
eastern Mongolia. *J. Hydrol.*, **333**, 47–57.