

総 説 (Review Article)

森林流域試験と今後のあり方

野口 正二^{1) *}・藤枝 基久^{1) 2)}

Forest-Watershed Experiment and proposal for future experiments

NOGUCHI Shoji^{1) *}・FUJIEDA Motohisa^{1) 2)}

Abstract

About 40% of the forest in Japan is specified for the protection forest, and protection forest for headwater conservation and recharge improvement accounts for 73.1% of that percentage. The necessity of conducting the hydrological research related to forest management has increased, and the role that the forest hydrology plays has become increasingly important. We selected six experimental watershed sites (Kamikawa Experimental Watershed in Hokkaido: HKW, Kamabuchi Experimental Watershed in Yamagata: YKW, Takaragawa Experimental Watershed in Gunma: GTW, Hitachi Ohta Experimental Watershed in Ibaraki: IHW, Tatsunokuchi-yama Experimental Watershed in Okayama: OTW, Sarukawa Experimental Watershed in Miyazaki: MSW) which run by Forestry and Forest Products Research Institute. Then, we summarized current status of knowledge on influence of vegetation changes including forest management (HKW: selective logging, influence of damage by wind, YKW: clear cutting, partial deforestation, establishment of terrace work, GTW: selective cutting, strip cutting, IHW: clear cutting, tractor logging, OTW: selective cutting, influence of pine withering and forest fire, MSW: clear cutting, partial deforestation). There are various methods of the forest management in forestry. In addition, because we must clarify the function for water and soil conservation based on the forest watershed experiment in different climate regions (i.e. snowy and cold region; a little precipitation region; heavy rainfall region), it is not accurate to use only one forest experimental watershed in order to evaluate the changes in the function for all forests. We proposed that the further forest watershed experiments should be conducted for the following research topics: 1) the hydrological observations for a long term; 2) a comparison of hydrological studies in different climate regions; 3) hydrological process studies; 4) evaluation of hydrological studies in large catchments; and 5) joint research with scientists in other fields such as forest ecology, forestry machine, and social economics.

Key words : forest-watershed experiment, forest management, long term hydrological observation, hydrological process study, large catchment, other fields

要 旨

我が国における森林面積の約 4 割が保安林に指定され、その中で水源涵養保安林は 73.1% を占めている。森林施業に関わる水文研究の必要性が高まり、森林水文学が果たす役割は大変重要である。ここでは、森林総合研究所が関わってきた流域試験地から 6 つの水文試験地 (北海道上川森林理水試験地: HKW、山形県釜淵森林理水試験地: YKW、群馬県宝川森林理水試験地: GTW、茨城県常陸太田水文試験地 IHW、岡山県竜の口山森林理水試験地: OTW および宮崎県去川森林理水試験地: MSW) を選び、森林施業など植生の変化 (HKW: 択伐、風害の影響、YKW: 皆伐、部分伐採、階段工設置、GTW: 択伐、帯状伐採、IHW: 皆伐、トラクター集材、OTW: 択伐、マツ枯れと山火事の影響、MSW: 皆伐、部分伐採) による水源涵養機能に関する既往の研究について整理した。森林施業の方法は多種多様であり、また、各試験地において積雪寒冷地域、寡雨地域、多雨地域など気候が異なる。従って、一つの森林流域試験地の結果から各地の水源涵養機能に関する評価を行うことは不可能である。今後の森林流域試験地のあり方として、1) 長期水文観測の継続、2) 比較水文研究の実施、3) 水文プロセス研究の実施、4) 広域流域の評価、5) 他分野との共同研究、について提言した。

キーワード: 森林流域試験、森林施業、長期水文観測、比較水文研究、水文プロセス研究、広域流域、他分野

原稿受付: 平成 18 年 3 月 31 日 Received March 31, 2006 原稿受理: 平成 19 年 2 月 9 日 Accepted Feb. 9, 2007

* 森林総合研究所東北支所 〒020-0123 岩手県盛岡市下厨川字鍋屋敷 92-25 Tohoku Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute 92-25 Nabeyashiki, Shimo-Kuriyagawa Morioka, Iwate 020-0123 Japan ; e-mail: noguchi@affrc.go.jp

1) 森林総合研究所東北支所 Tohoku Research Center, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

2) 現森林総合研究所企画調整部 Research Planning and Coordination Division, Forestry and Forest Products Research Institute (FFPRI)

I. はじめに

森林は雨水を土壤中に一時的に貯留し、ゆっくりと河川へと流出させるため、降雨時における河川流量のピークと流出量を減少させる。このような森林がもつ水源涵養機能について、世の中に広く知られてきた。この森林の水源涵養機能について、流域試験（または量水試験、理水試験）によって研究されてきた。この流域試験が最初に行われたのは、1899年にスイスのエーメンタールで2つの流域（1つは97%がモミ、トウヒ、ブナから構成される林地、もう1つが1/3が溪流沿いの林地で他が草地）の流出量を比較するというものであった。詳細は野口（1974）を参照されたい。一方、日本では、林業試験場（現森林総合研究所）場長白沢保美がこのエーメンタールの流域試験を視察後、山林局に同様な流域試験を実施することを進言し（玉手，1953）、1906年から1912まで茨城県常陸太田、笠間および栃木県足尾の国有林にて流域試験が実施された（木村・山田，1915）。その後、東京帝国大学（現東京大学）では1914年に千葉演習林（蔵治・芝野，2001）および1924年に愛知演習林で（諸戸，1933）、盛岡高等農林学校（現岩手大学）では1929年に御明神演習林で（武田，1968）、それぞれ流域試験が開始された。日本で流域試験が開始されてまもなく、山本徳三郎氏と平田徳太郎博士との間に森林の水源涵養機能に関する論争が行われた。いわゆる平田－山本論争である。この論争は、水源涵養保安林の効力に関する「森林の湿潤抵抗に関する論争」と1933年の岡山地方における少雨の年に生じた水不足に関する「岡山県下の溜池の貯水量に関する論争」の二つからなり、その関係論文は1915年から1942年にかけて計45編に及ぶ（遠藤，2003）。すでに実施された常陸太田での流域試験やアメリカ、スイスの流域試験結果から森林の水源涵養機能について示されていたが（例えば、白沢，1933）、この論争を解決するのに十分な科学的なデータが当時は蓄積されていなかった。この論争がきっかけとなり、1937年に岡山県竜の口山森林理水試験地において流域試験が開始された。さらに、同年、群馬県宝川森林理水試験地において、1939年に北海道上川森林理水試験地および山形県釜淵森林理水試験地において流域試験が開始された。

森林流域試験は、並行流域法（植生状態などが異なる複数の流域からの流出量を比較して、これに及ぼした植生状態などの影響を判定する方法）、単独流域法（1流域を対象に森林に対する処理前後のある期間の流出量の比較から、森林施業の影響などを見いだす方法）及び対照流域法（2流域・2期間のデータから森林施業の影響などを判定する方法）に区分される。この中で、降水量の変動の影響を受けずに植生の違いを評価するために、対照流域法が一番適していると言われている。このような森林流域試験によって、森林伐採による河川の流出量の変化などが明らかにされてきた。しかし、当初、流域

内部の水文現象についてはブラックボックスとして取り扱われていた。1960～70年代になると、流域試験に加え、流域内部の水循環に関する研究が活発に行われた。流域内部の複雑な雨水の挙動を説明するために、塚本（1961;1963）によって流出発生域（source area）の変動性、Kirkby and Chorley（1967）によって部分的寄与域の概念（partial-area concept）、Hewlett and Nutter（1969; 1970）によって動的流出発生域（dynamic source area）の概念、Hewlett and Hibbert（1967）によって変動流出域概念（variable source area concept）などが記述された（Kirkby, 1978）。日本において、流域の内部を考慮した研究が盛んになってきたのは1970～80年代である。小川（1977）は表層土中での水みちと透水係数の深さ方向の減少を考慮したモデルを示し、福嶋（1981）はKinematic wave法（高棹，1963）を使用し、山地流域の小出水から大出水まで適用を広げ、直接流出の発生場を考慮した。さらに、流域への降雨を流路系と林地斜面系に分配し、林地斜面系の降雨は遮断・蒸散が差し引かれ、残りの土壌層への降雨は表面流出、中間流出、基底流出へと分ける水循環モデルを提唱し、長期・短期のハイドログラフを再現した（福嶋・鈴木，1986; Fukushima, 1988）。太田（1984）は洪水流の雨水流出経路について、鉛直不飽和浸透と基岩上の飽和側方流の組み合わせで表現し、総雨量だけでなく、初期水分条件による洪水流の規模の違いを説明した。また、窪田（1987）は不飽和ダルシー則を簡略化し、地形の3次元形状を考慮した斜面流出モデルを用いて、ハイドログラフばかりでなく、流域内の土壌水分変動および土壌水分の平面分布を再現した。変動流出域概念の次なる斜面水文過程の概念構築に向けた最近の研究については、浅野ら（2005）が整理している。

近年、「緑のダム」としての森林の水源涵養機能について注目が高まっている（例えば、蔵治，2004）。我が国における森林面積の約4割に当たる1,019万haが保安林に指定されているが、その中でも水源涵養保安林が最も多く、全保安林の73.1%を占めている。また、国土面積の約3分の2が森林（約2,500万ha）であり、その面積の4割が人工林で、そのほとんどをスギ、ヒノキ、カラマツ等の針葉樹が占めている。これらの森林では、間伐の推進、長伐期化、複層林や針広混交林への導入など個々の自然的条件や地域のニーズに応じた望ましい施業が必要になっている（林野庁，2005）。このような状況下で、森林施業に関する水文研究の必要性も高まっており、日本の森林に対して、森林水文学が果たす役割は大変重要である。

森林総合研究所は、全国に北海道定山溪森林理水試験地、山形県釜淵森林理水試験地、群馬県宝川森林理水試験地、茨城県常陸太田試験地・筑波水文試験地、京都市山城水文試験地、岡山県竜の口山森林理水試験地、熊本県鹿北水文試験地および宮崎県去川森林理水試験地で水文観測を実施している（志水，1997）。ここでは、森林

施業に関する流域試験として、皆伐、部分伐採、帯状伐採などの森林施業が実施された試験地だけでなく、風害、マツ枯れによる被害などの植生変化があった試験地を対象とし、すでに観測が中止された北海道上川森林理水試験地を含む6つの流域試験地を選び、今までに行われた試験研究について振り返る。さらに、それらの結果を踏まえて、今後の流域試験のあり方について提言する。

II. 森林流域試験

1. 上川森林理水試験地

上川森林理水試験地は北海道上川郡上川町の石狩川水源流域内(北緯: 43°51'、東経: 142°48')に位置し、南谷(645.4 ha)と北谷(572.9 ha)流域からなる。地質は中・古生層と深層風化した花崗岩体で構成されている。分布面積が広いのは、流紋岩・熔岩で、これについて安山岩碎屑物、火山泥流の互層と水成沈殿物などである。1938年から1956年における年平均気温は4.9℃、年平均降水量は1,269 mmで(農林省林業試験場, 1961)、年平均降水量の40%は降雪による(遠藤ら, 1961b)。北谷流域は、1935年、エゾマツ・トドマツを主とする針葉樹が40%、ミズナラ、カバ、ハリギリなどの広葉樹が60%の針広混交林で、林床は主にクマイザサに覆われていた(井上ら, 1956)。1926年に僅かの伐採が行われたが、南谷流域と異なって原生林のまま残された。南谷流域は、北谷流域と構成樹種は大差ないが、1926年頃から1936年までに2回にわけて伐採されたため、北谷と比較して立木密度が疎である。1944～1948年に45%の択伐が実施された。また、1954年の台風15号によって風害を受けて、南・北谷流域ともに90%の倒木被害を受けた。本試験地の降水量と2流域の流出量について、1938年から1958年まで資料として報告されている(農林省林業試験場, 1961)。

勝見(1955)は、択伐前(1942～1943年)と択伐後(1950～1951年)における融雪時の流量と積算気温との関係について対照流域法によって比較検討した。基準流域の北谷流域における4年間と択伐前の南谷流域の2年間では、両者は同様な累乗式で近似された。しかし、択伐後の南谷流域において、択伐前より積算気温1℃の増加に対して0.2mmの積算流量の増加が認められた。勝見(1956)は水年を11月から翌年の10月とし、択伐前(1940～1944年)と択伐後(1949～1953年)で対照流域法により年流出量を比較した。その結果、解析期間中での基準流域の北谷流域では、年降水量に対する年流出量に変化はなかったが、伐採流域の南谷流域では、年流出量の増加が認められ、その増加量の平均値は夏期(7～10月)で32.2mm、冬期(11～6月)で87.7mmであった。遠藤ら(1960a; 1961ab)は、風害による倒木の影響について流出解析を行った。夏期(6～10月)の流出量と降雨量に対する回帰計算をおこなったところ、被

害直後は69～100mmの流出量の増加が認められた(遠藤ら, 1961a)。一方、冬期(12～3月)の被圧地下水の減水曲線の初期流出量と低減係数の値を比較したところ、大きな違いは認められなかった(遠藤ら, 1960b)。また、出水時の立ち上がりタイミングおよびピーク流量についても違いは認められなかった(遠藤ら, 1961b)。以上の事について、風害によって生じた倒木による植生の変化は、蒸発散量と融雪の仕方に影響があったと考えられるが、解析期間が厳冬期に限定されたために倒木の影響が認められなかったと思われる。また、出水時の出足とピーク流量に影響がなかった理由は、土壌の攪乱が小さかったことが原因と推定される。

2. 釜淵森林理水試験地

釜淵森林理水試験地は山形県最上郡真室川町釜淵(北緯: 38°56'、東経: 140°16')に位置し、隣接した1号沢(3.060 ha)・2号沢(2.482 ha)の2流域について1939年に観測が開始され、後に隣接する3号沢(1.530 ha)流域および鶴下田沢をはさみ対岸に位置する4号沢流域(1.117 ha)では1961年に観測が開始された。地質は主として第三紀中新統と考えられる凝灰岩・頁岩質凝灰岩から成り、わずかに礫質凝灰岩・凝灰質頁岩を挟んでいる(丸山・猪瀬, 1952)。年平均気温は約10℃で、年平均降水量は2456mmである。年平均降水量の40%は降雪で、1939～2001年における最大積雪深は平均で164cmであった(細田・村上, 2002)。この地域の植生はもともと広葉樹を主とした天然林であり、1912年(明治45年)に試験地内の製炭者による伐採跡地にヒノキが植栽され、その後、1913～1916年(大正2～5年)にスギ・ヒノキの捕植(一部にアカマツ)が行われた(丸山・猪瀬, 1952)。1号沢は基準流域として自然放置されている。2号沢では、1947～1948年に皆伐され、跡地は下刈り・火入れが行われた。その後、1960年に雪崩防止階段工が施工され、スギが植栽された(小野・川口, 1967a)。1961年から3号沢と4号沢で観測が開始され、当時の植生は、3号沢ではブナ、ナラ等の広葉樹林で、4号沢ではスギの針葉樹林であった。1964年に3号沢において、沢を含む流域の下半分を、4号沢において峰どおりを含む流域の上半分を伐採した。その後、3・4号沢は自然放置され、1970年に残りの部分を皆伐し、スギが全面植栽された(小野・川口, 1989)。本試験地の降水量と1・2号沢における流出量について、1939年から2000年まで資料として報告されている(農林省林業試験場, 1961; 東北支場山形試験地, 1980; 細田ら, 1999; 細田・村上, 2006)。

中野・菊谷(1956)は、2号沢の皆伐によって融雪期前半(2月下旬～3月)は、雪代水からの流出量が増加し、後半(4月～5月)は流出量が減少することを指摘した。鈴木(1985)は無積雪期(6月～10月)を対象とし、短期水収支法を用いて皆伐による蒸発散量の低下を

示した。2号沢では皆伐後5年目に小規模な崩壊が発生し、7年目に雪崩が発生し、12年目には流域の半分が常習的な雪崩地となった(高橋ら, 1968)。この雪崩によって、流域の谷部に大量の雪が堆積するようになり、皆伐当初とは逆に融雪末期の流量が増加する現象が観測された(小野・川口, 1968)。また、小野・川口(1967a)は、階段工施工前後(前: 1956～1959年、後: 1961～1964年)の水流出特性を比較した。その結果、年流出量、洪水流量および規準減水曲線(：無降雨日の0～4時までの流出量と4～8時までの流出量の関係から求める)には、施工前後で差が認められなかった。一方、 r_p を(2号沢のピーク流量/1号沢のピーク流量)とすると、施工前において $r_p=1.07 \pm 0.30$ 、施工後において $r_p=0.88 \pm 0.25$ となり、施工後に2号沢のピーク流量が小さくなったことが示された。 r_q を(2号沢の日流量/1号沢の日流量)とすると、2号沢の階段工施工後、気象露場での消雪後の融雪水の流出について、雪崩発生期間(1955～1960年)は、 $r_q>1$ の期間が長く、最大値は2を越える。一方、雪崩発生前期間(1948～1952年)と階段工施工直後(1961～1965年)は、 $r_q=1$ 前後で推移した。その理由は、階段工によって、雪崩が発生せずに流域の谷部に大量の雪が堆積しなくなり、融雪水の流出も雪崩発生前と同様となったためと推定される。また、小野・川口(1967b)は、2号沢の皆伐による流出量の増加は、降雪遮断量の減少による流出増加および流域外からの雪の吹き込み量が著しく増加したことが原因としている。降雪遮断量の変化については、実証的に検証されていないが、流域外からの雪の吹き込みによる影響は、冬期の積雪調査によって確認されている。特に、2号沢と隣接する流域で伐採が実施された後、2号沢流域へ吹き込む雪が増加したことは、小流域でも流域にもたらされる積雪量を把握する難しさを示している。

3号沢では沢を含む流域下半分の伐採とその後に皆伐が実施され、4号沢では峰どおりを含む流域上半分の伐採とその後に皆伐が実施された。気象露場での消雪日を基準として前40日間と後20日間を融雪期とし、その期間の融雪流出について見ると、3号沢および4号沢での上半分・下半分の場合ともに流出の発生が早められ、融雪期前半の流量の増加が顕著に示された。その傾向は、その後の皆伐によってより顕著になった(小野・川口, 1978)。融雪期の流出率(：流域からの流出量/融雪開始直前の積雪水量+融雪期降水量)は、3号沢において伐採前3年平均値が92.5%、下半分伐採後の4年平均値が107.1%、皆伐後の4年平均値が111.5%であった。4号沢において伐採前の3年平均値が64.8%、下半分伐採後の4年平均値が75.6%、皆伐後の4年平均値が84.8%であり、両流域ともに半伐採、皆伐によって流出率は増加した(小野・川口, 1975)。無積雪期(5月～10月)について見ると、半伐採によって3号沢では直接流出量が増加し、日流出量の減水が緩やかになっ

たが、4号沢ではそれらの傾向が弱かった。その後の皆伐によって、両流域で明瞭に直接流出量が増加し、日流出量の減水が緩やかになった(小野・川口, 1979)。また、伐採前(1961～1963年)、半伐採後(1964～1969年)および皆伐後(1970～1978年)の平均流出率は、3号沢で67.8%、74.1%および80.2%と増加し、4号沢で51.6%、53.7%および61.7%と同様に増加した(小野・川口, 1989)。半伐採によって3号沢の方が4号沢より直接流出量が増加した理由は、3号沢では谷部を含む下半分を伐採したため、河道周辺でのソースエリアが増加したことが原因と推定される。また、水流出の減水傾向は、4号沢の方が3号沢より急勾配であった。一方、太田・城戸(1986)は、流出の減水を支配するのは森林斜面下部の蒸発散であることを数値計算によって示し、斜面下部のみが森林である斜面の方が斜面上部のみが森林である斜面より流出の減水曲線が急になることを指摘している。本試験地での半伐採試験は、太田・城戸(1986)による斜面スケールでの数値実験結果を流域スケールでの観測で実証する結果となっている。

本試験地では、長期水文観測から森林の成長に伴う流出特性の変化について検討されている。川口・小野(1983)は、1号沢で44年間の観測から前期7年間(1939～1945年: 若齢林)と後期7年間(1976～1982年: 壮齢林)の無積雪期(6～11月)を比較し、1) 総流出量が90mm程度増加したこと、2) 1連続降雨における直接流出量について、流域が乾燥状態のとき40mm、湿润状態のとき95mm程度の雨の場合、若齢林 \geq 壮齢林であり、それ以上の降雨の場合、壮齢林が大きくなること、3) 1時間最大流出量は、40mm以上の降雨がある場合、壮齢林の方が大きいこと、4) 無降雨期間の減水曲線は、壮齢林の方が緩やかなことを示した。川口・小野(1985)は46年間の観測における無雪期間(5～10月: 184日間)に対して、日流出量を降順に並べた流況曲線から豊水流量(1～70日: 70日間)、平水流量(71～115日: 45日間)、低水流量(116～158日: 43日間)、渇水流量(159～184日: 26日間)を求め、観測前期10年間(1939～1948年)と後期10年間(1975～1984年)を比較した。その結果、降水量に対する各流出量は前期より後期の方が増加し、その傾向は低水量、渇水量で高かった。しかし、これらの森林成長に伴う流出量の変化は、定性的な解析に留まり、流域内部の土壌水分の動態など水循環に関する実証的な検討が行われていない。中野(1985)は45年間(1939～1983年)の観測結果から、森林の成長による蓄積量増加につれて、年最大日流出量と年最小日流出量の比は、減少する傾向があり、かつ、年々変動が小さくなっていることを指摘した。さらに細田・村上(2002)は、60年間(1939～2001年)の観測結果について、年間の日流出量を降順に並べ、大きい方からそれぞれの期間の積算値を豊水出流量(1～95番目)、平水出流量(96～185番目)、低水出流量(186

～275番目)、渇水流出量(276～355番目)とし、年降水量に対する各流出量の比の年々変動を検討した。その結果、森林成長に伴って各流出量が増加する傾向を示した。しかし、これらの森林成長による流出量の年々変動に関する研究は、積雪期の降水量の把握が困難であったことや融雪水量の測定が未確立だったことがあり、降水量の変動を十分に考慮していない。また、流域内で流出に影響があるような斜面崩壊の有無など立地環境の変化について長期間にわたって確認していない。これらの点を考慮して森林の成長に伴う流出特性の変化について明らかにする必要がある。

3. 宝川森林理水試験地

宝川森林理水試験地は群馬県利根郡水上町藤原字宝川の利根川水源域(北緯:36°51'、東経:139°01')にあり、ほぼ全地域を本流(1,905.66 ha)・初沢(117.90 ha)の大小2流域で分かち、初沢流域の一部に1号沢(6.48 ha)・2号沢(4.42 ha)・3号沢(5.17 ha)流域が含まれている。地質はほぼ本流の北半分の高度(1,500～2,000m)の一带に花崗岩類、比較的低高度(1,400～800m)のほぼ南半分に第三紀層の凝灰岩が分布し、これらを貫く諸種の小貫入岩体およびこれらの崩壊推移によってできた第四紀層より成る。年平均降水量は2,134mmである。植生は、ブナを優先種とする天然林で、海拔1,500m以下の全域に分布している。本流では、観測開始前の1934年から1938年までに流域下部で伐採が行われた。その後、再度流域下部で1961年から1979年まで伐採が断続的に実施された。初沢流域では、1948～1951年まで50%択伐が実施され、その後、1961～1963年に1～3号沢を残し皆伐され、スギが植栽された。1～3号沢は、初沢流域で50%択伐が実施された後の1957年から試験が開始された。1号沢は1987年に帯状伐採(伐採面積:52.5%)が実施され、1995年に皆伐された。2号沢は1963～1964年に更に60%択伐され、1972年に皆伐された。3号沢は、1962～1963年に30%択伐が追加された(志水, 1997)。本試験地の降水量と本流と初沢における流出量に関して、1937年から1990年まで資料として報告されている(農林省林業試験場, 1961; 宝川試験地・防災部理水第一研究室, 1979; 藤枝・志水, 1994)。

吉野・菊谷(1984)は、本流における1938～1978年のデータを対象に、伐採影響期(1938～1947年)、無処理期間(1948～1961年)および伐採期間(1962～1978年)に区分し、積雪の影響がない暖候期(8～10月)についてDouble-mass curveによる流出量変化を解析した。その結果、各期間流出量を無処理期間と比較すると、伐採影響期間で47.7mm(12.7%)、伐採期間で78.3mm(23.2%)高い値を示した。また、吉野・菊谷(1985)は、積雪の影響がない暖候期(初沢流域:8～10月、2号・3号沢:7～10月)において、択伐・皆伐の影

響を明らかにするため、初沢流域、2号沢および3号沢を対象に同様にDouble-mass curveによる流出量変化を解析した。初沢流域では、無処理期間(1938～1947年)、50%択伐期間(1948～1960年)および皆伐期間(1961～1978年)に区分し、期間流出量を比較した。その結果、50%択伐期間は16.6mm(8.2%)、皆伐期間は41.8mm(22.3%)無処理期間より高い値を示した。2号沢では、50%択伐期間(1957～1962年)、80%択伐期間(1963～1971年)および皆伐期間(1972～1981年)に区分し、3号沢では、50%択伐期間(1957～1962年)と65%択伐期間(1963～1971年)に区分した。その結果、その期間流出量は、伐採を増加させても顕著な変化が認められなかった。Shimizu *et al.*(1992)は、初沢流域を対象に広葉樹林期(1939～1948年)、皆伐影響期(1966～1975年)、針葉樹林期(1979～1988年)について流出の経時的変化について解析した。無積雪(8～10月)において、期間降水量に対する期間流出量は、皆伐影響期>針葉樹林期>広葉樹林期の順で多く、平均的な減水曲線は、皆伐影響期<針葉樹林期<広葉樹林期の順で早かった。広葉樹林と針葉樹林との差は、大きい林分材積の広葉樹林が小さい林分材積の針葉樹林より蒸発作用の影響が大きいと考察されている。また、融雪期(3～5月)において、総融雪流出量は植生の違いに差は認められず、融雪開始前の積雪深に正比例した。一方、融雪流出期間は、広葉樹林期>針葉樹林期>皆伐影響期の順で長かった。この初沢における皆伐によって、融雪とそれに伴う流出が早まり、また、消雪が早まり、それに伴い融雪流出が早く終了し、融雪流出期間が短くなる傾向となった。特にその傾向は積雪深が小さい年に顕著であった(志水, 1990)。1号沢において、1987年10月～1988年6月に帯状伐採が実施された。その伐採前後5年間の温暖期(6～10月)について水流出特性が解析された。その結果、直接流出量の流出率(：直接流出量／一連続降水量)について、6～13%の増加が認められた。また、一連続降水量が100mmを超える場合、ピーク比流量は伐採前と比較して1.16～1.41倍となった。(Shimizu, 1994)。その温暖期の平均流出率は、21.1%から35.0%に増加した(Shimizu *et al.*, 1994)。また、流況曲線の解析から、平水流出量(60日目)、低水流出量(98日目)および渇水流出量(133日目)について、温暖期の流出量に占める割合が、伐採前より伐採後の方がそれぞれ7.6、4.2および1.0%増加することが認められた。加えて、短期水収支法を適用し蒸発散量を推定したところ、伐採後に平均で蒸発散量が66.3mm減少した(Shimizu *et al.*, 1994)。積雪・融雪期(12～6月)について見ると、伐採後の流出率は64.5%から70.9%へ増加し、融雪流出が早く始まり早く終了するが、融雪流出期間は平均で8日間長くなった。また、気温のピークに対する融雪流出のピークの遅れ時間は、初期流量が小さいとき($<0.16m^3sec^{-1}km^{-2}$)に約2時間、初期流

量が大きいとき ($\geq 0.16 \text{ m}^3 \text{ sec}^{-1} \text{ km}^{-2}$) に約 40 分間伐採後の方が伐採前より短かった (志水・吉野, 1996)。

4. 常陸太田試験地

常陸太田 (太田) 試験地は、常陸太田市近郊の水戸事業区 118 林班り小班 (北緯 $36^{\circ}34'$ 、東経 $140^{\circ}35'$) に位置する。流域試験は、1906 年から 1912 年にかけて、広葉樹林区 (15.68ha)、針葉樹林区 (36.56ha)、幼齡林区 (21.07ha) の 3 つの流域で水文観測が実施された。その後、広葉樹林区を対象に水文観測が再開され、1919 年 11 月まで続けられた。1915 年の皆伐時は、ホオノキ、サクラ、カエデ、リョウブ、ナラ等からなる林齢 20 年前後、材積 $130 \text{ m}^3/\text{ha}$ の広葉樹林であった。その後、1980 年に、以前と同じ量水観測地点で水文観測が再開された (志水, 1983)。1983 年における林況は、林齢 59 年生のスギ (面積率: 23%)・ヒノキ (面積率: 77%) からなり、材積は $250 \text{ m}^3/\text{ha}$ であった (志水, 1983)。再開後、本試験地は、集水面積が異なる ($75.53 \text{ ha} \sim 0.25 \text{ ha}$) 6 つの流域から構成される (久保田・坪山, 2002)。その 1 つの流域 (15.38 ha) を対象に 1985 年 4 月～1986 年 2 月にかけて流域の一部 (2.48 ha) を残して皆伐・トラクタ集材が実施された。伐採跡地には、1987 年にスギ・ヒノキの植栽された (藤枝 ほか, 1996)。地質は中生代変成岩の角閃岩類からなり、月別降水量は、梅雨期 (5～6 月) と台風の時期 (8～10 月) にピークを持ち、年平均降水量は $1,429 \text{ mm}$ (1981～1998 年) である。冬季に降雪があるが、水収支に構成される量としてその影響は小さい。また、月別平均気温は、 2.4°C (1 月) から 23.3°C (8 月) の範囲で、年平均気温は 12.3°C (1992～1999 年) であった (Tsuboyama, 2006)。

1906 年から 1912 年にかけて、広葉樹林区、針葉樹林区、幼齡林区の 3 つの流域で水文観測が実施された結果、年流出率は針葉樹林区 < 幼齡林区 < 広葉樹林区の順であった。一方、同じ時期に実施された笠間における流域試験結果は、逆の針葉樹林区 > 広葉樹林区であった (木村・山田, 1915)。これらの結果は、並行流域法によるもので、広葉樹と針葉樹による水源涵養機能の違いを検出することができなかったことを示唆する。その後、広葉樹林区を対象に 1915 年 8 月から 1916 年 6 月にかけて皆伐し、水文観測は 1919 年 11 月まで実施された。これが日本で行われた単独流域法による初めての伐採試験である。この結果、皆伐により年流出率の増加が認められた (玉手, 1923)。その後、志水ら (1983, 1984) は林種転換が流出特性に及ぼす影響を明らかにするために、広葉樹林期 (1911～1915 年)、無林期 (1916～1919 年)、針葉樹林期 (1981～1984 年) において流出特性を比較した。標準低減曲線による 20 日間の無降雨期間後の広葉樹林期、無林期および針葉樹林期の日流出量は、 0.84 mmd^{-1} 、 0.71 mmd^{-1} 、および 0.86 mmd^{-1} であった。針・

広葉樹林期の低減傾向は、どちらも皆伐後の無林期に比べ小さいが、広葉樹林期と針葉樹林期との間に大きな違いは認められなかった (志水ら, 1983)。また、1 時間最大流出量は広葉樹林期と針葉樹林期において差が認められなかったが、直接流出量に関して、針葉樹林期の方が広葉樹林期の 1.5～1.8 倍になることが報告されている (志水ら, 1984)。その他、藤枝ら (1996) はトラクタによる皆伐が及ぼす流出特性を水文モデルによって検討した。その結果、伐採によって年直接流出量と年基底流出量がそれぞれ年降水量の 5% および 4% 増加し、年遮断量は約 10% 減少したことを示した。森林施業で林道と作業道の作設は必要不可欠であり、この研究は、林道と作業道の面積を水文モデルのパラメータとして取り入れた点が独創的である。

5. 竜の口山森林理水試験地

竜の口山森林理水試験地は岡山県旭川下流左岸の丘陵地 (北緯: $34^{\circ}42'$ 、東経: $133^{\circ}58'$) に位置し、隣接した北谷 (17.274 ha) と南谷 (22.611 ha) の 2 流域からなる。地質は北谷の約 1/3 が石英斑岩などの火成岩から成り、他はすべて秩父中・古生層からなる。秩父中・古生層の大部分が硬砂岩からなるが、北谷の北部には一部緑色岩をはさむ (農林省林業試験場, 1961; 地学団体研究会, 1996)。年平均気温は 14.3°C で、年平均降水量は約 $1,200 \text{ mm}$ である。しかし、観測が開始された 1937 年から 2005 年までに $1,000 \text{ mm}$ 以下の寡雨年が 11 回観測されている (後藤ら, 2006)。植生は、観測が開始された 1937 年当時、南谷の大部分 (17.55 ha) が天然性アカマツ林 (林齢 100～120 年生) で、一部に 1926 年の皆伐跡地 (5.06 ha) でアカマツ天然更新地 (3.88 ha) とヒノキ植栽地 (1.18 ha ; 谷筋) から成った。一方、北谷は天然性アカマツ林 (9.80 ha ; 林齢 100～120 年生) とアカマツ・ヒノキの幼齡林 (7.47 ha) から成った (農林省林業試験場, 1961)。1940 年から虫害が発生し、1944～1945 年にかけてアカマツ林が皆伐・搬出された。1946～1953 年にかけて自然放置され、当時、上層林木はなくマツの幼樹とコナラ・クヌギなどの雑木やササで林地は被覆されていた。南谷は、1954～1958 年にかけて、筋刈り地ごしらえがなされ、ヒノキ・クロマツが植栽されたが、1959 年 9 月にヒノキ林分 (0.3 ha) を除き山火事によってほぼ全域が焼失した。その後、1960 年にクロマツが植栽された。1973 年にマツ枯れ被害が始まり、1974 年に山火事によって溪流沿い (2.7 ha) が消滅し、源頭部 (3.8 ha) が類焼した。残った約 15.6 ha のクロマツ人工林は、1980 年に全て枯損した。 (玉井ら, 2004)。現在、北谷の森林は、1944～1945 年に皆伐されて以降大きな攪乱を受ける事無く、階層構造が発達し地上現存量が大きい広葉樹林が成立している。一方、南谷では、山火事やマツ枯れによる頻繁な攪乱を受けて、未成熟な広葉樹林が成立している (後藤ら, 2006)。本試験地の 1937

年から2000年までの降水量と流出量は、既に資料として報告されている（農林省林業試験場, 1961; 関西支場防災研究室・岡山試験地, 1979; 防災研究室・岡山試験地, 1981; 後藤ら, 2005）。

白井ら (1954) は伐採前後（前：1937～1943年、後：1946～1951年）の年流出率を比較し、その平均値は、北谷で22.4%から39.8%、南谷で23.6%から33.7%に増加したことを報告した。阿部ら (1982) は、1959年の山火事によって森林が消失した時、直接流出量およびピーク流量が平均的にそれぞれ2.0倍および2.2倍に増加することを示した。同様に、南谷のクロマツがマツ枯れによって枯損した場合、阿部ら (1983) は平均的に直接流出量が1.3倍、ピーク流量が1.2倍に増加すること、阿部・谷 (1985) は年流出量が110mm増加し基底流出量が、冬期に1.5倍、夏期に2.0倍増加し、日流出量も増加することを示した。また、谷・阿部 (1987) はタンクモデルを改良した流出モデルを用いて、マツ枯れによる森林変化が流出に及ぼす影響について評価した。これら流出量の増加の原因は、マツ枯れによる蒸発散量の減少と推定される。一方、藤枝ら (1979) および藤枝・阿部 (1982) は、1959年の山火事後、山火事影響期（1960～1964年）と林相健全期（1971～1975年）において、直接流出量、年基底流出量、年消失水量を比較した。その結果、山火時による森林消失から林相健全期への移行に伴い、直接流出量は一降雨80mm以上の大出水時で10～15mm減少した。これは、林冠、下層植生およびA₀層の発達による植被変化に起因すると推定された。また、山火事影響期から林相健全期において、年降水量1,200mmに対する基底流出量は30mm減少し、年損失量は60mm増加した。これらは、クロマツの成長による蒸散量が増加したことが原因と推定された。その後、玉井ら (2004) は、66年間（1937～2002年）の観測結果から、森林火災とマツ枯れによる攪乱影響がある森林衰退期（1960～1966年；1981～1994年）と森林火災の影響が発生した1959年やマツ枯れの進行過程である1978～1980年を除いた残り36年間を森林健全期とし、両期間の流況曲線を比較した。その結果、森林衰退期の方が森林健全期より日流出量が増加することを同様に報告している。その増加割合は、流況曲線で表現される1～40日目で約15%、140～320日目で約35%、320日目以上で約43%であった。

6. 去川森林理水試験地

去川森林理水試験地は、宮崎県宮崎市和石（北緯：31°51'、東経：131°13'）に位置し、隣接したI号沢（6.556 ha）とII号沢（9.174 ha）およびこれらの流域から約1km離れたIII号沢（8.181 ha）の3流域からなる。地質は中生代に属する四万十累層郡で、おもに頁岩が分布し、礫岩・石灰岩および厚い砂岩を含む（丸山ら、1960; 地学団体研究会, 1996）。本試験地は多雨地域

に位置し、年平均降水量は2,939mmである（竹下ら, 1994）。I・II号沢の植生は、1920年頃の皆伐後、天然下種更新によってシイ類、カシ類を上木とする常緑広葉樹林であった。その後、I号沢は、1965年7月～1966年5月に皆伐され、翌年1967年にヒノキが植栽された。II号沢は、1982年に沢筋を中心に3.79 ha（流域面積の43%）を部分皆伐し、自然放置されている。III号沢は、当初、50年生以上のスギを主林木とする針広混交林で、1965年7月～1966年7月に皆伐され、翌1967年に上部にヒノキ、下部にスギが植栽された（竹下ら, 1996）。なお、本試験地の降水量と流出量は、1967年から1986年まで資料として報告されている（九州支場防災研究室, 1982; 竹下ら, 1996）。

竹下 (1977) は、皆伐による年流出量について検討した。伐採前のデータは1959年の1年間のみで、その時の3つの流域の年流出率は同様な値（I号沢：60.1%；II号沢：59.9%；III号沢：60.2%）であった。皆伐後7年間の平均年流出率は、I号沢、II号沢およびIII号沢でそれぞれ70.3%、64.3%および74.3%で、皆伐されたI・III号沢流域は基準流域のII号沢より高い値を示した。その後、流出量についてI号沢では植栽後10年で、III号沢では植栽後14年で基準流域のII号沢と同程度の流出率になった（竹下, 1990）。竹下ら (1994) はこの2流域に対して、皆伐後の流出量と降水量の関係を5年ごとに区分し経過年数による損失量を求めた。II号沢では伐採後5ケ年は700mm、その後6～15年では1,000mm、さらにその後の16～25年では1,200mmに増加した。III号沢では、伐採後5ケ年は600mm、その後6～15年では900mm、さらにその後の16～25年では1,000～1,200mmと増加した。その理由は植栽木の成長による蒸発散量の増加と推定した。また、II号沢で部分伐採をした結果、伐採前4年間の平均年流出率はI号沢の方がII号沢より1.2%高い値を示したが、伐採後3年間の平均年流出率は、反対にII号沢の方がI号沢より3.2%高い値を示した。（竹下ら, 1987; 1996）。その原因は、蒸発散量の減少と考えられ、短期水収支法を適用し解析した結果、7月～9月の期間に蒸発散量が減少していることが示された（水谷ら, 1988）。

本試験地では、流域からの土砂流出量について観測が実施された。皆伐前の7年間（1958～1964年）における平均流出土砂はI・II・III号沢でそれぞれ、0.8593 m³・ha⁻¹、0.5769 m³・ha⁻¹、および0.1557 m³・ha⁻¹で、皆伐後の7年間（1967～1973年）における平均流出土砂はI・II・III号沢でそれぞれ、0.8873 m³・ha⁻¹、0.7311 m³・ha⁻¹、および0.4216 m³・ha⁻¹であった。皆伐が実施されたIII号沢で土砂量の増加が認められるが、基準流域のII号沢で増加し、皆伐されたI号沢では大きな変化がなかった（竹下, 1975）。近年、森林伐採によって河道に流出する土砂量について注目されており、特に、作設される林道や集材路の連結性や流域での配置が

浸食量に大きな影響があることが指摘されている (Sidle *et al.*, 2004; Gomi *et al.*, 2006)。竹下 (1975) の結果は、皆伐を実施しても流域内部の状況によって、流域からの土砂流出量が必ずしも増加するとは限らないことを示唆している。その後、各流域の土砂流出を継続測定した結果、9 年間 (1974 ~ 1982 年) における平均流出土砂は I・II・III 号沢でそれぞれ $2.0675 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ 、 $1.5560 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ 、および $0.5067 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ で、II 号沢で土砂量が増加した理由は、林齢が 65 年生以上のため林冠のうっ閉が進み、林内照度低下による影響で林床の裸地化が進行したことが原因だとした。また、III 号沢で土砂生産量が増加せず小さいことは、スギ林適地が多く分布し、地表での土砂生産が少ないためだと考察している (竹下ら, 1985)。三浦 (2002) は、林床の被覆率の低下と反比例して土壌浸食量が増加し、スギ、アカマツ、落葉広葉樹林の林床被覆率は、林齢によらず常に 90% 以上であったのに対し、ヒノキ林では 50 ~ 80% と低かったことを示した。竹下ら (1985) は、I 号沢の土砂生産量が高いことについて言及していないが、試験流域の植生は、リターが燐片化し、地表被覆効果が小さいヒノキ林であることが要因の 1 つかもしれない。

III. 森林流域試験の今後のあり方

森林施業には、植栽、保育 (除伐、つる切り、間伐)、主伐 (択伐、漸伐、皆伐) の過程があり、使用する林業機械も目的に応じて異なり (例えば、トラクター集材、架線集材)、その方法は多種多様である。また、先に記したように森林施業が水源涵養機能に及ぼす影響は、積雪寒冷地域、寡雨地域、多雨地域など気候によっても異なる。一つの森林流域試験地で、全ての森林施業に対して水源涵養機能の変化を評価することは不可能である。土木学会水理委員会水文小委員会 (1984) は、全国で 115 の試験流域について調査表をまとめている。また、これまでに全国 18 大学の 29 演習林において、74 の試験流域が設けられてきた (蔵治・芝野, 2001)。各試験流域の設置目的や測定項目などは、大学や研究機関によって異なり、流域試験地のあり方は多様化している。以下に今後の流域試験地のあり方について著者らの考えを提言する。

1. 長期水文観測の継続

東京大学愛知演習林森林試験地は、日本で長期水文観測が実施されている試験地の一つである。蔵治・芝野 (2002) は、1930 年以降の 70 年間の観測データを用いて禿山状態から砂防造林が実施され森林が回復するまでの渇水時流出について解析した。その結果、夏の最小流出量は増加傾向にあり、冬の最小流出量は減少傾向にあり、これらの変動はおおむね降水量の変動で説明できることを指摘している。現在、山形県釜淵森林理水試験地では 67 年間、群馬県宝川森林理水試験地本流と岡山県

竜の口山森林理水試験地では 69 年間、宮崎県去川森林理水試験地では 47 年間、それぞれ観測が継続されている。流域試験地を維持するためには、観測機器の保守・維持ばかりでなく、観測施設の維持管理など多大な人力・経費が必要である。林野庁は森林施業の 1 つの方針として、長伐期化を推し進めている。そこで、森林の成長による水保全機能を評価するためには、長期観測が必要不可欠である。また、森林の成長に伴う水流出特性の変化ばかりでなく、気候変動による森林からの水流出特性の影響を評価するためにも、数少ない長期間継続されている流域試験地で水文観測を継続することは非常に重要である。

森林生態学の分野では、日本での LTER (Long Term Ecological Research) の設立が進められ、体系的な野外研究体制を作るための予算獲得には、国民の理解と支持が必要なことを述べている (田中・堀, 2001)。また、正木・柴田 (2005) は、過去の森林生態に関する長期観測プロットの状況を振り返り、森林における広域・長期的な観測を継続するためには、観測方法の簡便さと林業の産業としての再生が重要な点だと述べている。長期水文観測を継続するためにも、国民の理解と支持を得ること、さらに、林業が産業として維持されることは重要なことである。

2. 比較水文研究の実施

森林流域の水文特性は、地上の植生被覆状態のほか、気象、地形、地質に影響される。日本は、多様な気象、地質、植生条件を持ち、ある地域の結果を同様に他の地域に適用できるとは限らない。そこで、異なる地域の結果を比較検討することは、水文特性を明らかにするために有効な手段である。

中野 (1971) は 6 試験流域 (上川試験地北谷、釜淵試験地 2 号沢、宝川試験地初沢流域、竜の口山試験地南・北谷流域およびアメリカ国コロラド州ワグエンホーエルギャップ試験地 B 流域) での森林伐採前後における長期水文データを使用し、年流出量、豊水・平水・低水・渇水各流出量、月流出量、ピーク流量を比較し、森林伐採が流出に及ぼす影響を検討した。鈴木 (1985) は、森林総合研究所の理水試験地のデータなどを利用し、日本各地の流域蒸発散量を推定した。その結果、蒸発散量とその季節変化が各流域の気象と植生に反映されていることを示した。志水 (1980) は、建設省河川局編集の多目的ダム管理年報と流量年表を用いて、第三紀・第四紀の火山岩類、花崗岩類を地質とする流域は、中・古生層、第三紀層を地質とする流域よりも渇水量が豊富になることを指摘している。また、志水 (2001) は北海道から沖縄までの 16 試験地を対象に水収支特性と流況特性について比較している。この研究は、森林総合研究所、大学および県の実施した結果を活用している。異なる機関が収集したデータをお互いに共有することは簡単では

ない。一方、森林総合研究所は、各森林理水試験地の水文観測データは印刷公表しており、1967年3月発行以降の報告書について、ホームページ (<http://www.affrc.go.jp/labs/kanko/paper.html>) 上でも公開している。同様に、東京大学愛知演習林森林試験地のデータも印刷公表およびホームページ (<http://www.uf.a.u-tokyo.ac.jp/kishou/suimon/exshirasakatop.html>) 上でも公開している。データの公表に当たり、データの時間分解能 (日・時・10分) とデータを取得してから公開までのタイムラグが問題となる。データを使用する側は、時間分解能が高くリアルタイムに近い形でデータを利用できることを望む。しかし、データを提供する側は、研究を業務として直接観測に従事している場合やコンサルタントに観測を外注している場合など各機関や体制によって状況が異なる。よって、どの機関も例えば気象庁のように気象データを on time で提供することは困難であろう。まずは、日データについて、すみやかに公開することが実現可能なことだと考える。各機関で収集しているデータの共有化を推進するために、データの公表について高く評価する必要がある。

志水 (2001) は、森林総合研究所、大学、県によって流域試験で整備された情報が異なり、特に植生情報とその変遷についてのデータが乏しいことを指摘している。また、県の報告書には、試験流域の情報として土壌の飽和透水係数 (K_s) の値を 100cc の円筒を用いて不攪乱土壌を採取し、測定しているケースがある。森林土壌は多孔質体で、マクロポアを含むことから、100cc の円筒を用いて採取した不攪乱サンプルで求めた K_s の値は 1～2 オーダー小さくなるため、直径 150～200mm の採土円筒を用いて採取することを奨励している (太田・片桐, 1988)。この結果と測定機器の汎用性を考慮すると 400cc (直径: 113mm) の採土円筒を用いて複数個を採取し測定することが適当と考える。森林総合研究所、大学のみで全国の水文データを収集することは不可能である。今後、県の役割は大きくなるだろう。立地研究の分野で森林土壌の炭素蓄積量調査に当たって、統一的な調査を行うために、森林総合研究所が都道府県、民間調査団体等とともに全国の森林土壌を調査するため、林野庁の委託事業が開始されている (<http://www3.affrc.go.jp/ReNewHP/labs/fsinvent/>)。今後、比較水文研究を推進するために、水文試験地でのデータ収集に関して、同じスキームで研究を実施することが重要である。

3. 水文プロセス研究の実施

流域での降水量と流出量の観測だけでは、森林施業による水源涵養機能の変化について定量的に明らかにすることに限界があり、流域内部の水文プロセスを理解する必要がある。常陸太田試験地は、森林流域からの水流出機構に関する研究が活発に実施されてきた試験地の一つである。森林土壌は多孔質で、多くのマクロポアが存在

することが特徴であり、Noguchi *et al.*, (1997; 1999) は、森林土壌が有するマクロポアの起源や形態学的特徴について示した。Sidle *et al.*, (2001) は、それらの結果を用いて、斜面スケールにおける選択的流出経路の空間分布について概念モデルを提示した。また、Tsuboyama *et al.*, (1994) は、土壌断面からの流出に対して混合置き換え実験を実施し、マクロポアが周辺土壌と相互に拡大・縮小および斜面方向への伸長するモデルを示した。さらに、Noguchi *et al.*, (1999) は、染色試験によって、マクロポアが選択的流出経路として機能している土壌マトリックスと連結して流出に寄与していることや基岩直上に側方流が発生し流出していることを確認した。降雨流出応答に関して見ると、Noguchi *et al.*, (2001) は、土壌断面からの流出は一律でなく、その不均質性は、土壌水分、降水量、降雨強度および基岩地形に要因があることを観測結果から示した。Tsuboyama *et al.*, (2000) は、0 次谷流域における流出量、間隙水圧および地温の観測から平面的な斜面地形と比較して 0 次谷流域における流出応答が付加的な変動と非線形を形成することを示した。また、Sidle *et al.*, (1995) は、異なるスケール (斜面、0 次谷、1 次谷流域および 2 次谷流域) からの流出量の観測から、先行降水量が各スケールからの流出量に強く影響を与え、乾燥時には斜面断面のマクロポアからの流出はほとんど生じず、洪水流を発生させる場所は河道周辺の領域に限定されること、一度、飽和状態の閾値を越えると、0 次谷流域やマクロポアからの流出が洪水流に寄与することを示した。さらに、Sidle *et al.*, (2000) は、湿潤になるにつれて、0 次谷流域における浅層地下水位の蓄積後に開始される出水の閾値応答と選択的流出経路の自己形成と拡大が、地中水の流出を促進することを指摘し、洪水流の増加に関して、溪畔域、線形的な斜面および谷頭における時間・空間的な連結と水文学的挙動に依存する概念モデルを提示した。基底流出量に関して見ると、久保田・坪山 (2002) は、集水面積 (0.82～75.53ha) と植生が異なる 5 流域において、溶存無機イオン濃度と $\delta_{18}O$ をトレーサとして、集水面積が大きくなるほど、より風化の進んだ古い水が混入していることを示唆した。一方、竜の口山森林理水試験地では、斜面からの水流出量とテンシオメーターによる土壌水分の観測から、雨水が湿潤状態において鉛直方向へ素早く伝播し、また乾燥状態から湿潤状態へ変化するに当たって基岩上に横方向への地中流が発達することが指摘されている (Tani, 1997)。以上のように流出機構に関する知見は蓄積されているが、今までにこれらの研究の成果を活用して、森林施業を実施するための指針を提示するまでには至っていない。

過去、各森林理水試験地において、森林伐採による流域試験が実施されたとき、同時に水文プロセスに関する研究が実施されなかった。今後、森林施業による水源涵養機能の変化を定量的に評価するため、研究計画と森林施業計画をうまくあわせ、降水量と流出量の観測のみで

なく、水文プロセス研究を同時に実施する機会を設けることが必要である。また、過去に伐採試験を実施した森林理水試験地において、新たに水文プロセスに関する知見を蓄積し、その知見を踏まえて水文モデルを適用し、過去の伐採試験結果を再評価することも有効な手段の一つである。そのような観点から、先に述べた各森林理水試験地において、過去の研究結果を再評価することが必要である。

森林総合研究所では、北海道から九州まで全国6カ所（現在、5ヶ所）の森林でフラックス観測を実施し、森林総合研究所フラックス観測ネットワーク（FFPRI FluxNet；<http://ss.ffi.affrc.go.jp/labs/flux/index.htm>）を構築し観測結果が束ねられている（大谷，2001）。森林の樹冠上に設置された気象タワーでの微気象観測は、測定方法の問題から地形が平坦もしくは緩傾斜地であることが好ましい（小南ら，2003）。一方、上記のネットワーク観測地である熊本県鹿北試験地と京都府山城試験地は複雑地形に位置し、同時に流域試験も実施されている。清水ら（2004）は鹿北試験地において、蒸発抑制の発生や推移について詳細に検討するためには、微気象観測と流域試験との相互補完の必要性を述べている。今後、気象タワーによる微気象観測と流域試験との相互研究を活発に展開することが必要である。

4. 広域流域の評価

森林総合研究所の森林理水試験地は、宝川森林理水試験地の本流（1905.7ha）と初沢（117.9 ha）および観測を中止した上川森林理水試験地の南谷（645.4 ha）・北谷（572.9 ha）流域を除き、数～数十 ha スケールの小流域を対象としたものである。全国的に見ても森林を対象とした流域試験地の多くが1ha～100ha（1km²）の流域面積を対象としたものである（土木学会水理委員会水文小委員会，1985）。100haを越える流域試験地が少ないことは、観測施設の設置・維持に莫大な予算が必要であることが大きな理由であろう。しかし、森林施業が実施される面積は、実施されている森林流域試験地の流域の面積より大きい。一方、広域流域としては、ダム流域を対象にした研究アプローチが行われている（太田ら，1990；志水，2005）。広域な流域を対象とすると、小流域スケールと同等に流域内部での水文データを収集することは困難である。Tani(1996)は、宝川森林理水試験地の本流と初沢流域を対象とし、降水量（雨・雪）の広域な空間分布を考慮し年水収支を推定した。この研究は、労力が十分あった時代の冬期における広域を対象とした積雪調査の結果を活用している。今日、同様な労力を投資することは不可能と言えよう。しかし、そのような問題を解決する手法の一つとして、航空レーザスキャナを適用し、山地の積雪深分布を計測することが実施されている（岡本ら，2004；坪山ら，2006）。また、リモートセンシングとGIS技術を応用し、水文プロセスを明ら

かにすることが行われつつある（近藤，2003）。このように、従来入手が困難だった広域流域を対象とした水文データの取得が可能になってきた。今後、リモートセンシングやGISなどを活用し、小流域試験の成果をスケールアップすると同時に、広域な流域を対象とした研究展開が望まれる。このような観点から、宝川森林理水試験地は、広域流域を対象とした水文特性の評価をするために活用される貴重な試験地となる。

5. 他分野との共同研究

森林には様々な機能が備わっており、単一の機能のみで評価するものでないことは多くの研究者の意見である（鈴木，1994；窪田，2004）。蔵治（2001）は、水文学研究を発展させるため、他分野研究間の学際的協調とそれに基づく長期研究サイトの戦略的再編成の必要性を述べている。以下に森林水文学と他分野との共同研究について、いくつかの研究事例を挙げて著者らの考えを述べる。

森川（1994）は生理生態学的アプローチから間伐による蒸散量の一時的な減少について報告し、樹木レベルから林分レベルの研究の必要性を述べている。竹内（2001）は、造林学的な知見で、蒸発散量の抑制を考慮した森林施業の検討を提示している。村上（2002；2003）は、LAIと林齢との関係に着目し、既往の造林分野の成果を取り入れ、スギ・ヒノキ林の蒸発散量と林齢依存性を推定した。一方、太田・城戸（1986）は、数値実験によって森林斜面において上部の森林より下部の森林による蒸発散が水流出により影響を及ぼすことを示した。この結果は、LAIをパラメータとして蒸発散量を推定した結果のみを森林施業に活用することについて注意が必要なことを示唆している。

森林立地の分野では、流域試験で保水容量の推定（有光ら，1995；Ohnuki *et al.*, 1999）や水質モニタリング（金子ら，2002；森林総合研究所，2006）が行われ、森林水文の分野と共同研究が進みつつある。また、荒木ら（2002）はヒノキ林における皆伐および間伐が表層土壌水分と土壌孔隙組成に及ぼす影響について測定し、森林施業の影響より地形の影響が大きいことを示した。篠宮ら（2004）は、間伐がヒノキ林の表層土壌水分に及ぼす影響について、土壌型と林齢が異なる2つの林分において、間伐の影響によって表層土壌水分が増加することを指摘した。しかし、流域または斜面からの水流出との関係まで言及されておらず、今後の研究の発展が期待される。

森林工学の分野では、林道作設に関しては、集材技術や経済性を重視した路網密度や林道規格に関する研究が実施され（井上，1987；1989；大川畑，1988；澤口，1996ab）、水流出特性に及ぼす影響については重視されていない。林道・集材路の作設は、森林施業にとって必要不可欠であり水流出特性に影響を及ぼす（藤枝ら，

1996; Sidle *et al.*, 2004)。今後、林道・集材路の作設と水文特性に関する研究事例の蓄積が望まれる。

戦前は森林の木材生産機能と水源涵養機能の両者を調整し森林経営が行われたが、戦中・戦後になると、木材が必要であることから、水源涵養機能の維持よりも木材供給が優先された（泉, 2000; 2002）。近年、手入れ不足による森林荒廃が土壌浸食を引き起こすことが指摘され、間伐や間伐材利用の話題がテレビや新聞で取り上げられている。林野庁は、平成 12～16 年に緊急間伐 5 ヶ年対策を実施し、さらに平成 17～19 年に間伐等推進 3 ヶ年対策を実施している（石橋, 2005）。このように森林施業のあり方は、社会事情と密接に関係している。佐藤 (2002) は、ある自然現象が解決されるべき問題かどうかは、その時々、社会的文脈が規定しており、環境問題の分析や解決には自然科学だけでなく社会科学の分野が必要だと述べている。一方、自然科学の知見を考慮しない社会政策は、子孫に負の遺産を残す可能性がある。今後、森林水文学の分野は、国民の利益に目を向けるために社会科学との共同研究が必要不可欠である。

謝辞

玉井幸治・細田育広・中井裕一郎各氏には文献の提供を協力して頂いた。三浦寛氏および二名の査読者の方々から建設的かつ有益なコメントを頂いた。皆様に感謝の意を表します。本研究は、独立行政法人森林総合研究所交付金プロ FS「間伐が水土保持機能に及ぼす影響評価のための問題点の整理と課題化に関する研究」の一部として実施された。内容の一部は、2005 年 9 月 8 日に開催されたワークショップ「間伐が水土保持機能に及ぼす影響評価」で発表したものである。

引用文献

- 阿部敏夫・岸岡孝・谷誠 (1982) 山火事の直接流出に及ぼす影響について, 日本林学会関西支部第 33 回大会講演集, 197-200.
- 阿部敏夫・谷誠 (1985) 松くい虫による松枯れが流出に及ぼす影響, 日林誌, **67**, 261-270.
- 阿部敏夫・谷誠・岸岡孝・小林忠一 (1983) 松くい虫被害の直接流出に及ぼす影響について, 日本林学会関西支部第 34 回大会講演集, 337-340.
- 荒木誠・加藤正樹・宮川清・小林繁男・有光一登 (2002) ヒノキ林における皆伐および間伐が表層土壌水分状態に及ぼす影響, 森林立地学会誌, **44**, 1-8.
- 有光一登・荒木誠・宮川清・小林繁男・加藤正樹 (1995) 宝川森林理水試験地における土壌孔隙間量をもとにした保水容量の推定—初沢小試験流域 1 号沢および 2 号沢の比較—, 森林立地学会誌, **37**, 50-58.
- 浅野友子・内田太郎・ジェフリー マクドネル (2005) Variable Source Area Concept の次なる斜面水文過程の概念構築に向けた近年の試み: 斜面に降った雨はどこへ行くのか?, 水文水資源学会誌, **18**, 459-468.
- 防災研究室・岡山試験地 (1981) 竜の口山量水試験地報告, 林業試験場関西支場年報, **22**, 56-62.
- 地学団体研究会 (1996) 新版地額辞典, p559; p819.
- 土木学会水理委員会水文小委員会 (1985) 全国試験流域調査表, 242p.
- 遠藤泰造 (2003) 森林の水源涵養機能に関する論争史 (II), 水利科学, **269**, 78-116.
- 遠藤泰造・勝見精一・舟木敏夫 (1960a) 無降雨期間の地下水流出について, 林業試験場北海道支場年報 1959, 136-144.
- 遠藤泰造・勝見精一・舟木敏夫 (1961a) 夏期間の流量におよぼす伐採の影響について, 林業試験場北海道支場年報 1960, 181-214.
- 遠藤泰造・勝見精一・高田岩次 (1960b) 冬期渇水期間の流出について, 林業試験場北海道支場年報 1959, 126-133.
- 遠藤泰造・勝見精一・鶴田武雄 (1961b) 出水におよぼす森林の伐採の影響について, 林業試験場北海道支場年報 1960, 150-180.
- 藤枝基久・阿部敏夫 (1982) 竜の口山試験地における森林の成立が流出に及ぼす影響, 林業試験場研究報告, **317**, 113-138.
- 藤枝基久・岸岡孝・阿部敏夫 (1979) 竜の口山南谷流域における山火事が流出におよぼす影響, 日林誌, **61**, 184-186.
- 藤枝基久・野口正二・小川真由美 (1996) 森林流域における土地被覆変化が水文環境に与える影響—皆伐・トラクタ集材を例にして—, 日林誌, **78**, 43-49.
- 藤枝基久・志水俊夫 (1994) 宝川森林理水試験地観測報告—本流・初沢試験地流域 (1978 年 1 月～1990 年 12 月) 森林総合研究所研究報告, **368**, 207-245.
- 福嶋義宏 (1981) 山地小流域の短期流出に関する研究, 京都大学学位論文, 76p.
- Fukushima, Y. (1988): A model of river flow forecasting for a small forested mountain catchment. Hydrol Processes, **2**, 167-185.
- 福嶋義宏・鈴木雅一 (1986) 山地流域を対象とした水循環モデルの提示と桐生流域の 10 年連続日・時間記録への適用, 京都大学演習林報告, **57**, 162-185.
- Gomi T., Sidle, R. C., Noguchi, S., Negishi, J. N., Abdul Rahim, N., Sasaki, S. (2006) Sediment and wood accumulations in humid tropical headwater streams: Effects of logging and riparian buffers. Forest Ecology and Management, **224**, 166-175.
- 後藤義明・玉井幸治・深山貴文・小南裕志・細田育広 (2006) 竜の口森林理水試験地における広葉樹二次林の階層構造に及ぼす攪乱の影響観測報告, 森林

- 総合研究所研究報告, **400**, 215-225.
- 後藤義明・玉井幸治・小南裕志・深山貴文 (2005) 竜の口森林理水試験地観測報告 (1981 年 1 月～2000 年 12 月) 森林総合研究所研究報告, **394**, 87-133.
- Hewlett, J.D. and Hibbert, A.R. (1967) Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas, In: W.E. Sopper and H.W. Lull (eds), *Forest Hydrology*, Pergamon Press, 275-290.
- Hewlett, J.D. and Nutter, W. L. (1970) The varying source area of streamflow from upland basins. *Proceedings of the Symposium on Interdisciplinary Aspects of Watershed Management*, Montana State University: 65-83.
- 細田育広・村上亘 (2002) 釜淵森林理水試験地 60 年間の水流出年々変動, 第 6 回水資源に関するシンポジウム論文集, 241-246.
- 細田育広・村上亘 (2006) 釜淵森林理水試験地観測報告—1・2 号沢試験流域— (1994 年 1 月～2000 年 12 月), 森林総合研究所研究報告, **398**, 99-118.
- 細田育広・大丸裕武・村上亘・北田正憲・斎藤武史 (1999) 釜淵森林理水試験地観測報告—1・2 号沢試験流域— (1979 年 1 月～1993 年 12 月), 森林総合研究所研究報告, **376**, 1-52.
- 井上源基 (1987) トラクタ集材路網の配置に関する研究 第 1 報 トラクタ集材のための地形区分, 林業試験場研究報告, **348**, 47-108.
- 井上源基 (1989) トラクタ集材路網の配置に関する研究 第 2 報 トラクタ集材のための集材路網計画法, 林業試験場研究報告, **353**, 1-126.
- 井上桂・高田岩次・勝見精一・増田久夫 (1956) 上川試験地林の伐採による流量変化, 林業試験場北海道支場業務報告, 特別報告, **7**, 121-147.
- 石橋岳志 (2005) 国は今後の間伐をどう推進していくのか, 森林科学, **44**, 9-12.
- 泉桂子 (2000) 東京市水源林における戦前・戦中期の経営展開, 東京大学農学部演習林報告, **104**, 157-245.
- 泉桂子 (2002) 東京市水源林における戦後期の経営展開, 東京大学農学部演習林報告, **107**, 29-92.
- 勝見精一 (1955) 融雪期の増水に及ぼす伐採の影響, 日本林学会大会講演集, **64**, 272-274.
- 勝見精一 (1956) 上川試験林における伐採後の流出量の変化 (第 1 報), 林業試験場北海道支場業務報告 特別報告, **5**, 181-214.
- 金子真司・服部重昭・後藤義明・玉井幸治 (2002) 竜の口山森林理水試験地の渓流水質, 水文水資源学会誌, **15**, 472-485.
- 川口利次・小野茂夫 (1983) 釜淵森林理水試験地 1 号沢における森林成長が流出に及ぼす影響, 林業試験場東北支場年報, **24**, 106-113.
- 川口利次・小野茂夫 (1985) 森林成長が無雪期間の各種流出量に及ぼす影響, 日本林学会東北支部会誌, **37**, 321-323.
- 関西支場防災研究室・岡山試験地 (1979) 竜の口山森林理水試験地観測報告 (研究資料), 林業試験場研究報告, **308**, 133-195.
- 木村喬顕・山田喜一 (1915) 有林地と無林地とに於ける水源涵養比較試験, 林業試験場研究報告, **12**, 1-84.
- Kirkby, M.J., and Chorley, R.J., (1967) Throughflow, overland flow and erosion. *Bulletin of the International Association of Scientific Hydrology*, **12**, 5-21.
- 小南裕志・深山貴文・玉井幸治・後藤義明 (2003) 複雑な地形にある森林の二酸化炭素収支の計測, 森林総合研究所平成 15 年度研究成果選集, 26-57.
- 窪田順平 (1987) 山地源流域の流出形成機構に関する研究, 京都大学学位論文, 89p.
- 窪田順平 (2004) 森林と水—神話と現実, 科学, **74**, 311-316.
- 久保田多余子・坪山良夫 (2002) 低次から高次の流域までの渓流水質の変化と水の混合について, 第 6 回水資源に関するシンポジウム論文集, 37-42.
- 蔵治光一郎 (2001) 森がもどり水がもどる時間, 科学, **71**, 57-66.
- 蔵治光一郎・芝野博文 (2001) 大学演習林試験流域における水文観測, 水文水資源学会誌, **14**, 489-498.
- 蔵治光一郎 (2004) 世界の「緑のダム」研究事情, 蔵治光一郎・保屋野初子編, 緑のダム, 築地書館, 56-59.
- 蔵治光一郎・芝野博文 (2002) 森林の成長が渇水時流出量に及ぼす影響—東京大学愛知演習林森林試験流域の例—, 第 6 回水資源に関するシンポジウム論文集, 241-246.
- 九州支場防災研究室 (1982) 去川森林理水試験地観測報告 (1967 年 1 月～1976 年 12 月), 林業試験場研究報告, **317**, 45-68.
- 近藤昭彦 (2003) 水文学へのリモートセンシングと GIS 技術の応用, 地理学評論, **76**, 788-799.
- 正木隆・柴田銃江 (2005) 森林の広域・長期的な試験地から得られる成果と生き残りのための条件, 日本生態学会誌, **55**: 359-369.
- 丸山岩三・遠藤尚・吉筋正二・浅田正朗 (1960) 去川森林理水試験地第 1 回報告 去川試験地の地形と地質, 林業試験場研究報告, **123**, 45-68.
- 丸山岩三・猪瀬寅三 (1952) 釜淵森林理水試験第 1 回報告, 林業試験場研究報告, **53**, 1-44.
- 三浦覚 (2002) 森林の林床被覆が有する土壌浸食防止機能の評価手法に関する研究, 東京大学博士論文, 150p.
- 水谷完治・竹下幸・河合英二 (1988) 部分伐採が流出に及ぼす影響—年損失量と短期水収支法による蒸発散量について—, 日林九支研論集, **41**, 207-208.
- 森川靖 (1994) 間伐と林分蒸散量—生理生態的見方から

- , 水利科学, **215**, 58-66.
- 諸戸北郎 (1933) 治水在治山に就て, 山林, **605**, 2-5.
- 村上茂樹 (2002) スギ・ヒノキ人工林における LAI と蒸発散の林齢依存性およびその水源林管理への応用の可能性, 水文水資源学会誌, **15**, 461-471.
- 村上茂樹 (2003) 森林からの蒸発散と林齢・葉量・林分構造との関係—水源林管理への応用に向けて—, 水利科学, **269**, 1-28.
- 中野秀章 (1971) 森林伐採および伐跡地の植被変化が流出に及ぼす影響, 林業試験場研究報告, **240**, 1-251.
- 中野秀章 (1985) 森林と水—流出の平準化と総量—, 水利科学, **162**, 1-34.
- 中野秀章・菊谷昭雄 (1956) 森林伐採と融雪, 日林誌, **38**, 314-316.
- Noguchi, S., Tsuboyama, Y., Sidle, R.C. and Hosoda, I. (1997) Spatially distributed morphological characteristics of macropores in forest soils of Hitachi Ohta Experimental Watershed, Japan. J. For. Res., **2**, 207-215.
- Noguchi, S., Tsuboyama, Y., Sidle, R.C. and Hosoda, I. (1999) Morphological characteristics of macropores and the distribution of preferential flow pathways in a forested slope segment. Soil Soc. Ame. J., **63**, 1413-1423.
- Noguchi, S., Tsuboyama, Y., Sidle, R.C. and Hosoda, I. (2001) Subsurface runoff characteristics from a forest hillslope soil profile including macropores, Hitachi Ohta, Japan. Hydrol. Processes, **15**, 2131-2149.
- 野口陽一 (1974) 森林影響研究の歩み—森林水文学の将来を模索して—, 水利科学, **98**, 1-15.
- 農林省林業試験場 (1961) 森林理水試験地観測報告 (日降水量・日流出量), 農林省林業試験場, 225pp.
- 小川 滋 (1977) 山地小流域における出水解析の基礎的研究, 九州大学演習林報告, **50**, 1-58.
- 大川畑修 (1988) 架線集材における路網計画に関する研究, 林業試験場研究報告, **351**, 1-79.
- 小野茂夫・川口利次 (1967a) 釜淵森林理水試験第 3 回報告 山腹切取階段工の理水機能, 林業試験場研究報告, **240**, 1-251.
- 小野茂夫・川口利次 (1967b) 森林伐採が積雪からの流出に及ぼす影響, 林業試験場東北支場年報, **8**, 204-211.
- 小野茂夫・川口利次 (1968) なだれ地からの流出, 日本林学会東北支部会誌, **19**, 161-164.
- 小野茂夫・川口利次 (1975) 小流域における貯雪量推定と「森林の影響」の解析, 林業試験場東北支場年報, **16**, 114-119.
- 小野茂夫・川口利次 (1978) 融雪経過に及ぼす森林伐採の影響—釜淵理水試験地の例—, 日本林学会東北支部会誌, **29**, 163-164.
- 小野茂夫・川口利次 (1979) 森林伐採が直接流出量、渇水流出量に及ぼす影響 (釜淵森林理水試験地), 林業試験場東北支場年報, **20**, 104-111.
- 小野茂夫・川口利次 (1980) 森林の生長が流出に及ぼす影響—無降雨期間の減水のしかた—, 日本林学会東北支部会誌, **32**, 293-294.
- 小野茂夫・川口利次 (1989) 森林の部分的伐採および皆伐が流出におよぼす影響, 森林総合研究所支所年報, **30**, 46-49.
- Ohnuki, Y., Yoshinaga, S., and Noguchi, S. (1999) Distribution and physical properties of colluvium and saprolite in unchannelized valleys in Tsukuba Experimental Basin, Japan. J. For. Res., **4**, 207-215.
- 太田猛彦・城戸毅 (1986) 森林の蒸発散が斜面流出に及ぼす影響—不飽和浸透理論を用いた数値実験—, 日林誌, **68**, 490-498.
- 太田猛彦・片桐真 (1988) 大型透水試験器による森林土壌の透水係数の測定 (I), 日林誌, **70**, 367-370.
- 太田岳史 (1984) 山腹斜面における出水機構に関する研究, 京都大学学位論文, 81pp.
- 太田岳史・高橋智己・竹内美次 (1990) ダム流域における森林状態が流出特性に与える影響の流出モデルによる評価, 水文水資源学誌, **3**, 17-25.
- 岡本隆・黒川潮・松浦純生・浅野志穂・松山康治 (2004) 山地の積雪深分布計測における航空レーザスキャナの適用性に関する検討, 水文水資源学会誌, **17**, 529-535.
- 大谷義一 (2001) 二酸化炭素フラックス, 森林科学, **33**, 10-17.
- 林野庁 (2005) 平成 16 年度森林・林業白書, 222pp.
- 佐藤仁 (2002) 稀少資源のポリテクス: タイ農村にみる開発と環境のはざま, 東京大学出版会, 254p.
- 澤口勇雄 (1996a) 山岳林における林道路線評価と林道規格に関する研究 (第 1 報)—林道路線評価パラメータの特性—, 森林総合研究所研究報告, **372**, 1-110.
- 澤口勇雄 (1996b) 山岳林における林道路線評価と林道規格に関する研究 (第 2 報)—林道路線評価による林道規格の決定—, 森林総合研究所研究報告, **372**, 111-160.
- 清水貴範・清水晃・大丸裕武・宮縁育夫・小川泰浩 (2004) 夏季の晴天日における暖温帯人工林からの蒸発散量の比較, 九州森林研究, **57**, 273-274.
- 志水俊夫 (1980) 山地流域における渇水量と表層地質・傾斜・植生との関係, 林業試験場研究報告, **310**, 109-128.
- 志水俊夫 (1983) 林種転換に伴う長期的流出変化, 林業試験場場報, **233**, 1-3.
- 志水俊夫 (1997) 森林伐採が融雪流出に及ぼす影響, 雪

- 氷, **52**, 29-34.
- Shimizu, T. (1994) Effects of contour-line strip-cutting on streamflow (II) Short-term runoff characteristics during the warm season. *J. Jap. For. Soc.*, **76**, 492-499.
- 志水俊夫 (1997) 宝川森林理水試験地における水研究の歩み, *水利科学*, **233**, 1-29.
- 志水俊夫 (2001) 試験流域の概況と水文特性, *水利科学*, **260**, 7-26.
- 志水俊夫 (2005) 日本における山地河川の流出特性, *水利科学*, **281**, 6-17.
- 志水俊夫・菊谷昭雄・河野良治 (1983) 林種転換が小流域の流出に及ぼす影響 (I) —無降雨期間の地下水通減曲線について—, 第 94 回日林論, 593-594.
- 志水俊夫・菊谷昭雄・河野良治 (1984) 林種転換が小流域の流出に及ぼす影響 (II) —無降雨期間の地下水通減曲線について—, 第 95 回日林論, 551-552.
- Shimizu, T., Kikuya, A. and Tsuboyama, Y. (1992) Influence of changes in vegetation upon the runoff characteristics of mountainous drainage basins. 森林総合研究所研究報告, **363**, 21-39.
- Shimizu, T., Tsuboyama, Y., Hosoda, I. (1994) Effects of contour-line stripe-cutting on stream flow (I) Long-term runoff characteristics during the warm season. *J. Jap. For. Soc.*, **76**, 393-401.
- 志水俊夫・吉野昭一 (1996) 等高線にそった帯状伐採が融雪流出に及ぼす影響, *雪氷*, **58**, 3-10.
- 篠宮桂樹・稲垣善之・深田英久 (2004) 間伐がヒノキ林の表層土壌水分に及ぼす影響, *森林応用研究*, **13**, 139-143.
- 森林総合研究所 (2006) 酸性雨等の森林・溪流への影響モニタリング, 森林総合研究所交付金プロジェクト研究成果集, **7**, 284p.
- 白井純郎・近藤松一・大原忠一 (1954) 竜ノ口や間水水源涵養試験第 4 回報告 伐採による流量変化の総合的考察, *林業試験場京都支場業務報告*, **3**, 95-122.
- 白澤保美 (1933) 水源涵養の辯, *林学会雑誌*, **15**, 39-47.
- Sidle, R. C., Tsuboyama, Y., Noguchi, S., Hosoda, I., Fujieda, M., Shimizu, T. (1995) Seasonal hydrologic response at various spatial scales in a small forested catchment, Hitachi Ohta, Japan. *J. Hydrol.*, **168**, 227-250.
- Sidle, R. C., Tsuboyama, Y., Noguchi, S., Hosoda, I., Fujieda, M., and Shimizu, T. (2000) Stormflow generation in steep forested headwaters: a linked hydrogeomorphic paradigm. *Hydrol. Processes*, **14**, 369-385.
- Sidle, R. C., Noguchi, S., Tsuboyama, Y. and Laursen, K. (2001) A conceptual model of preferential flow systems in forested hillslopes: evidence of self-organization. *Hydrol. Processes*, **15**, 1675-1692.
- Sidle, R. C., Sasaki, S., Otsuki, M., Noguchi, S., Abdul Rahim, N. (2004) Sediment pathways in a tropical forest: effects of logging roads and skid trails. *Hydrol. Processes*, **18**, 703-738.
- 鈴木雅一 (1985) 短期水収支法による森林流域からの蒸発散量推定, *日林誌*, **67**, 115-125.
- 鈴木雅一 (1994) 水・エネルギー循環と森林, 「'94 森林整備促進の集い」報告書, 日本治山治水協会, 日本林道協会, 54-72.
- 高橋喜平・小野茂夫・川口利次 (1968) 伐採跡地のなだれ発生経過, *雪氷*, **30**, 26-30.
- 高樺琢馬 (1963) 出水現象の生起場とその変化過程, *京都防災研年報*, **6**, 166-180.
- 宝川試験地・防災部理水第一研究室 (1979) 宝川森林理水試験地観測報告 本流・初沢試験流域 (1959 年 1 月～1977 年 12 月), *林業試験場研究報告*, **302**, 97-154.
- 武田進平 (1968) 御明神森林治水試験地の紹介, *水利科学*, **59**, 83-89.
- 竹下幸 (1975) 流域皆伐処理前後の流出土砂の変化について, *日林講*, **86**, 403-404.
- 竹下幸 (1977) 流域伐採前後の年流出量変化について, *日林九支研論集*, **30**, 293-294.
- 竹下幸 (1990) 森林伐採による流出量の変化, *日林九支研論集*, **43**, 197-198.
- 竹下幸・大谷義一・河合英二 (1985) 去川森林理水試験地における流出土砂量の経年変化, *日林論*, **96**, 589-590.
- 竹下幸・大谷義一・河合英二 (1987) 山地小流域の流出機構 (IV) —皆伐処理と部分伐採処理による流出量の変化—, *日林論*, **98**, 577-578.
- 竹下幸・清水晃・宮縁育夫 (1994) 山地小流域の流出機構 (X) —流出の一様性の比較—, *日林九支研論集*, **47**, 223-224.
- 竹下幸・清水晃・宮縁育夫 (1996) 去川森林理水試験地観測報告 (1977 年 1 月～1986 年 12 月), *森林総合研究所研究報告*, **370**, 31-75.
- 竹内郁雄 (2001) 水源かん養機能を維持・向上させる森林施業の検討, *水利科学*, **261**, 57-71.
- 玉井幸治・後藤義明・深山貴文・小南裕志 (2004) 林野火災とマツ枯れによる森林の衰退が流出量と流況曲線に及ぼす影響 —岡山市竜の口山量水試験地の場合—, *日林誌*, **86**, 375-370.
- 玉手三稟寿 (1923) 有林地と無林地とに於ける水源涵養比較試験, *林業試験場研究報告*, **23**, 63-100.
- 玉手三稟寿 (1953) 水の研究の歩み, *林業技術*, **138**, 1-3.
- 田中健太・堀真人 (2001) 日本における開かれた野外研究体制の整備にむけて, *日本生態学会誌*, **51**, 255-259.
- Tani, M. (1996) An approach to annual water balance for small mountainous catchments with wide spatial

- distributions of rainfall and snow water equivalent. *J. Hydrol.*, **183**, 205-225.
- Tani, M. (1997) Runoff generation processes estimated from hydrological observation on a steep forested hillslope with a thin soil layer. *J. Hydrol.*, **200**, 84-109.
- 谷誠・阿部敏夫 (1987) 森林変化の流出に及ぼす影響の流出モデルによる評価, 林業試験場研究報告, **342**, 41-60.
- 東北支場山形試験地 (1980) 釜淵森林理水試験地観測報告 1・2 号沢試験流域 (1959 年 1 月～1978 年 12 月), 林業試験場研究報告, **311**, 129-188.
- Tsuboyama, Y. (2006) An experimental study on temporal and spatial variability of flow pathways in a small forested catchment. 森林総合研究所研究報告, **399**, 135-174.
- 坪山良夫・清水晃・久保田多余子・阿部俊夫・壁谷直記・延廣竜彦 (2006) 宝川森林理水試験地における積雪深分布の航空レーザー測量について, 日本森林学会大会発表データベース, 117: 226.
- Tsuboyama, Y., Sidle, R.C., Noguchi, S., and Hosoda, I. (1994) Flow and solute transport through the soil matrix and macropores of a hillslope segment. *Water Resour. Res.*, **30**, 879-890.
- Tsuboyama, Y., Sidle, R.C., Noguchi, S., Murakami, S., Shimizu, T. (2000) A zero-order basin — its contribution to catchment hydrology and internal hydrological processes —, *Hydrol. Processes*, **14**, 387-401.
- 塚本良則 (1961) 中間流についての一実験, 日林誌, **43**, 62-67.
- 塚本良則 (1963) Storm discharge from an experimental watershed, 日林誌, **45**, 186-190.
- 吉野昭一・菊谷昭雄 (1984) 高海拔流域における森林伐採と暖候期間の流出量変化 第 1 報, 宝川試験地の本流流域について, 宝川森林治水試験第 4 回報告, 林業試験場研究報告, **331**, 127-145.
- 吉野昭一・菊谷昭雄 (1985) 高海拔流域における森林伐採と暖候期間の流出量変化 第 2 報, 宝川試験地の初沢流域、初沢 2 号沢および初沢 3 号沢流域について, 宝川森林治水試験第 5 回報告, 林業試験場研究報告, **333**, 37-65.

