ハゲ山に森林を再生した小流域における降雨量-直接流出量関係の長期変化

五 名 美 江^{*1}・蔵治光一郎¹

本研究は東京大学演習林生態水文学研究所の宮試験流域を対象とし、単独流域法を適用して、ハゲ山に砂防植栽を施して森林再生を開始した期間（前期：1935～1946年）と、それから65年が経過して森林に被覆され、土壌が回復途上にある期間（後期：2000～2011年）で、森林の洪水緩和機能の指標の一つである降雨量と直接流出量との関係の違いを定量的に明らかにすることを目的とした。その結果、後期と比べて前期の方が、同じ降雨量に対して推定直接流出量が大きく、その差は、200, 300, 400 mmの降雨量の降雨に対してそれぞれ16.0, 25.8, 33.5 mmと推定された。前期と後期の差は、初期水分条件が乾燥の場合や、最大降雨強度が大きい場合により明瞭に現れた。例えば、初期水分条件が乾燥の場合、後期と比べて前期は、200, 300, 400 mmの降雨に対して推定直接流出量がそれぞれ19.1, 29.1, 36.6 mm大きく、最大降雨強度が大きい場合、後期と比べて前期は、200, 300, 400 mmの降雨に対して推定直接流出量がそれぞれ36.3, 56.7, 71.3 mm大きかった。一方、土壌が湿潤な場合および最大降雨強度が小さい場合は、両者の差は小さかった。

キーワード：直接流出量、降雨量、穴の宮、初期水分条件、降雨強度

Mie Gomyo,^{*1} Koichiro Kuraji¹ (2012) Long-term Variation of Relationship between Rainfall and Direct Runoff in Small Watershed with the Forest Restoration and Succession on Denuded Hills. J Jpn For Soc 94: 214-222 The objective of this case study was to quantify changes in the relationship between rainfall and direct runoff from the early period (1935~1946) to the late period (2000~2011) in the Ananomiya watershed, Ecohydrology Research Institute of The University of Tokyo Forests. The early period was defined as an initial stage of forest restoration on a denuded hill, whereas the late period was defined as a transition stage of forest succession and an initial stage of soil recovery. When total rainfall was 200, 300, and 400 mm, the estimated total direct runoff during the early period was 16.0, 25.8, and 33.5 mm, respectively, higher than that during late period. The difference in estimated direct runoff between the early and late periods was clear when the initial water condition was dry or the rainfall intensity was high. When the initial watershed condition was dry and when rainfall was 200, 300, and 400 mm, the estimated direct runoff during the early period was 19.1, 29.1, and 36.6 mm, respectively, higher than that during late period. When the rainfall intensity was high and when total rainfall was 200, 300, and 400 mm, the estimated direct runoff during the early period was 36.3, 56.7, and 71.3 mm, respectively, higher than that during the late period. However, when the soil condition was wet or the rainfall intensity was low, no difference was detected in direct runoff between the early and late periods.

Key words: direct runoff, rainfall, Ananomiya, initial watershed condition, rainfall intensity

I. は じ め に

森林の洪水緩和機能とは、森林に覆われている山に降った大雨が川に流れてくる際に、枝葉、幹、落葉、土壌、土層、岩盤の亀裂などに一時的に貯留され、その一部は遅れて流出し（平準化作用）、一部は川に流れずに蒸発し（蒸発散作用）、その結果として、下流の洪水の総流出量の減少、ピーク流出量の低下、到達時間の遅れをもたらす自然現象のうち、主として森林を構成する樹木、土壌等が存在していることで発揮されている一連の自然現象を意味している。これまで、森林の洪水緩和機能を明らかにするため多数の個別研究が行われてきた（例えば、中野 1976）。しかし、洪水をもたらすような大雨はまれにしか襲来しないこと、洪水時に生起する素過程が複雑であること、想定外の現象の発生等により正確な観測が難しいこと等の困難があり、個別研究の成果が十分蓄積され、一般化されたとはいえない。その理由の一つは、明治以来、日本の森林は荒廃状態からの土壌の長い回復の途上にあり、河川計画にお

ける流出解析に森林の機能を定量的に盛り込むための基礎的な知見として、この過程で洪水緩和機能がどのように変化したかを定量的に明らかにすることが求められているにもかかわらず、土壌の回復過程という長い時間スケールをカバーできる長期かつ正確なデータがほとんどないことにある（谷 2011）。そのようなデータを保有している数少ない試験地として、東京大学大学院農学生命科学研究科附属演習林生態水文学研究所の宮試験流域（以下、穴の宮流域）があり、1929年から現在まで、ハゲ山に砂防植栽等を施して森林再生を開始した状態から森林に被覆され、土壌が回復し始めるまでの、80年以上にわたるデータが蓄積されている。

李ら（1988）は、穴の宮流域における1935年から1985年までの観測データから25個の出水例を選択し、林況変化に伴う短期流出特性をモデルのパラメータをとおして検討した。その結果、初期損失（降雨量から流出可能雨量を差し引いた値。降雨量から直接流出量を差し引いた値とは異なる）には経年的な変化は見出すことができなかったが、

^{*} 連絡先著者（Corresponding author）E-mail: gomyo@uf.a.u-tokyo.ac.jp

¹ 東京大学大学院農学生命科学研究科附属演習林生態水文学研究所 〒489-0031 瀬戸市五位塚町 11-44 (Ecohydrology Research Institute, The University of Tokyo Forests, Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo, 11-44 Goizuka-cho, Seto 489-0031, Japan) (2012年4月11日受付; 2012年7月12日受理)

可能最大貯留量は経年的に増加しているとし、林相がよくなるにつれて、次第に浸透能が向上して、基底流出量にまわる分が増加した、と結論づけている。しかしながら、李らの研究では、対象期間内の全降雨イベントから解析対象とする降雨イベントを抽出する基準が明確でないこと、解析対象降雨の規模が高々 119.0 mm であり、これよりも大きい降雨イベントは解析対象としていないこと、直接流出量をハイドログラフから求めるのではなく、降雨量から流出可能雨量や有効雨量をモデルで推定する方法を採用していること、モデルのパラメータの同定に使用された直接流出量の算定において、実測ハイドログラフをフリーハンドという属人的手法（フリーハンドとは具体的にどのような方法であるのかについて、原論文では例として 1 出水の図が示されているのみ）で分離しており、追試が不可能であることなどの問題があった。また李らの研究成果が発表されてから 20 年以上が経過したが、その間、観測が継続され、新たに利用可能なデータが増えてきた。

本研究は、穴の宮流域を対象とし、ハゲ山に砂防植栽を施してから 80 年以上が経過し、森林が成長し、土壌が回復しつつあることにより、森林の洪水緩和機能を評価する指標の一つとして降雨量と直接流出量との関係がどのように変化したのかを、単独流域法によって定量的に明らかにすることを目的とする。

II. 対象流域の概要

1. 位置、地形、地質

対象とした穴の宮流域の位置と地形を図-1 に示す。測水所の緯度、経度はそれぞれ $137^{\circ}06'23''\text{E}$ 、 $35^{\circ}15'23''\text{N}$ である。流域面積は 13.9 ha であり、表層地質は白亜紀の深層まで風化した花崗岩質岩石が大部分を占め、流域の東端の一部分では、新第三紀鮮新世の瀬戸層群に属する礫層の薄い層がかぶさっている。

2. 植 生

穴の宮流域は、1922 年に無立木の状態で東京帝国大学

図-1. 穴の宮流域の地形
Topography of Ananomiya watershed.

A. 気象観測露場; B. 量水堰。

A, Meteorological observation field; B, Weir.

図-2. 穴の宮流域におけるハゲ山からの森林再生と遷移に伴う裸地面積率の減少と蓄積の増加

Long-term decrease of bare land ratio and increase of stand volume with the forest restoration and succession on denuded hills in Ananomiya watershed.

に移管された後、農学部附属愛知県演習林（現在の生態水文学研究所）によって 1924～28 年にかけて流域の約半分の地域にアカマツを中心とした砂防植栽が行われた（李 1991）。穴の宮流域におけるハゲ山からの森林再生と遷移に伴う裸地面積率の減少と蓄積の増加の長期変化を図-2 に示す。裸地面積率は 1925 年には 30.3% であるが、1982 年には 3.5% に減少している。一方、森林蓄積は 1953 年には $14 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ であるが、2010 年には $118 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ に増加している。このデータからはマツ枯れによる総蓄積の減少はみられず、マツが枯死する一方で、広葉樹類が蓄積を増やしてきた結果、マツの枯死による蓄積の減少を補って余りある総蓄積の増加が記録されている。

III. 方 法

1. 解析期間、観測方法および使用データ

本論文の目的を達成するため、解析対象とする期間を 1935～46 年の 12 年間と 2000～11 年の 12 年間、計 24 年間とし、それぞれ前期、後期と定義して、比較することとした。前期は流域の森林再生の初期段階であり、土壌はほとんど形成されておらず、流域の一部では深層まで風化した花崗岩の土層が露出した状態、後期は流域が森林で覆われ、土壌の再生がある程度進行した段階である。降雨量の観測は、前期は貯留式指示雨量計での毎日観測（観測時刻は午前 10 時）、後期は転倒マス雨量計で行った。水位観測に用いた水位計は、前期はストップニー社（スイス）製水位計（週巻き）、ヒュース式自記水位計（日巻き）を主とした自記水位計、後期は池田計器製自記水位計、水晶式水位計センサーを主として使用した。

解析に使用する出水は、後述する方法で計算した降雨量が 60 mm を超える降雨イベントとし、ある降雨と次の降雨との間に 6 時間以上、無降雨期間が連続する場合に、別の降雨イベントと定義した。ここで無降雨期間とは、期間

中の総降雨量が0.5 mm以下と定義した。なお、降雨パターンが複雑で、後述の方法による直接流出量の算出が困難であった降雨イベントは解析対象から除いた。また後期については、5分間隔のデータが存在する2001年8月14日以降について、5分間隔の水位データが欠測であった期間中の降雨イベントは解析対象から除いた。このケースに該当する60 mm以上の降雨イベントは3回あった。結果として、対象とする出水の数は、前期、後期それぞれ41出水、26出水となった。

2. 解析方法

1) 降雨量の算出方法

降雨量は、降雨イベントの開始時刻（これを始点とする）から後述する方法で定める終点時刻まで積算することによって求めた。

前期においては、サイホン式雨量計の記録紙から、始点時刻から終点時刻までの降雨量を読み取り、貯水式雨量計の値に換算した。後期においては、始点時刻から終点時刻までの間に、転倒マス雨量計で記録された降雨量を求めた。本研究では降雨量60 mm以上の降雨イベントのみを対象とするため、1降雨イベントごとに発生する貯水式雨量計と転倒マス雨量計の間の差は、降雨量に比べて無視できるほど小さいと仮定して、雨量計の違いによる補正は行わないこととした。

2) 直接流出量の算出方法

流出量は、水位から計算される流量を時間積分して求めた。水位から流出量を計算する式は東京大学大学院農学生命科学研究科附属演習林生態水文学研究所（2012）に示された式を用いた。

流出量を直接流出量と基底流出量に分離する方法については、これまで種々の方法が提案されている（塚本1992）。現在、最も一般的に使用されている方法は、変曲点法といわれるもので、流出ハイドログラフの減水曲線を片対数上にプロットして得られた曲線をつぎの出水の上昇開始点から時間的にさかのぼってピークに向かってたどり、最初の折れ点（変曲点）を求め、これを出水の上昇開始点と直線で結んで、その直線の上部領域を直接流出とする方法であり（中野1976）、国土交通省も採用している。しかし、どの点を変曲点とみなすかには個人差があり、また変曲点が見いだせない場合や、変曲点が複数見いだされる場合に、扱いに困ることとなる。その後も直接流出の分離方法については研究者によって様々な方法が用いられており、確立された方法があるとはいえないのが現状である（真板・鈴木2009）。

本論文では、フリーハンドや変曲点法のような属人的な方法ではなく、機械的で、誰でも追試が可能な方法でハイドログラフの分離を行うこととし、直接流出と基底流出を直線で分離する方法を採用することとした。分離線の始点は降雨量の計算と同様、降雨イベントの開始時刻とし、終点は、ハイドログラフの低減曲線の傾き（流出量減少率）が、あらかじめ定めた基準値になった時刻とした。基準値をど

う定めるかについては既存の知見が存在しないため、複数の基準値を使用して計算を行い、結果の基準値への依存性を調べることにした。基準値は試行錯誤により、1日当たりの流出量減少率1.0, 0.5, 0.25 ($\text{L min}^{-1} \text{day}^{-1}$)を採用した。1日当たりの減少率を用いた理由は、流出量の低減期に日周変動がみられる場合があり、1日より短い時間を採用すると減少率が日周変動の影響を受けてしまうためである。なお、分離線によって推定された基底流出量が全流出量を上回る期間が発生する場合は、その期間内は全流出量が基底流出量であると仮定し、直接流出量はゼロとして計算した。

3) 初期水分条件、最大降雨強度

直接流出量は降雨直前の流域の水分状態（初期水分条件）に大きく影響されることはよく知られている（例えば、真板・鈴木2009）。そこで本研究では、先行研究にならない、流域の初期水分条件の指標として初期流出量を用いることとし、分離線の始点の流出量を初期流出量と定義して解析に用いた。

また同じ降雨量、同じ初期水分条件であっても、直接流出量は大雨時のホートン地表流の発生の有無などに応じて増減する可能性があるため、最大降雨強度も直接流出量に関係する要因の一つとして考えられる。そこで本研究では最大降雨強度を降雨イベント中に観測された最大時間雨量 (mm h^{-1}) と定義して解析に用いた。

IV. 結 果

1. 基準値の違いによる直接流出量の違い

穴の宮流域における2011年9月19日から23日にかけての台風15号の時間雨量、ハイドログラフ、直接流出量の分離線を図-3に示す。2011年9月の台風15号に伴う大雨は、穴の宮試験流域の観測史上最大の降雨量を観測した。降雨量が400 mmを超える降雨イベントは、このイベントと2000年9月の東海豪雨の2回のみであったが、いずれも精度よく降雨量、流出量が観測されたため、本研究の解析対象とすることができた。直接流出量は、終点を決める3通りの基準 ($1.0, 0.5, 0.25 \text{ L min}^{-1} \text{day}^{-1}$) に対して、それぞれ250.4, 265.3, 278.5 mmであった。最大28.1 mmの差があり、この差は総降雨量の約6%に相当した。以下では基準値を $1.0 \text{ L min}^{-1} \text{day}^{-1}$ とした計算結果のみを図で示し、他の基準値の解析結果は図示せず、考察章にて若干の言及を行った。

2. 直接流出量と降雨量の関係の前期と後期の違い

図-4に前期と後期における降雨量と直接流出量の関係を示す。結果はばらついてはいるが、前期、後期とも、降雨量が多くなるに連れて、降雨量のうち直接流出量が占める割合が大きくなっていく傾向がある。また前期よりも後期の方が同じ降雨量に対する直接流出量が小さい傾向も読み取れる。

この結果を定量化するため、回帰式を求めた。回帰式としてこれまで直線、折れ線、2次曲線などが用いられてき

図-3. 森林期における穴の宮流域の2011年台風15号(9月19日～21日)の降水量・流出量の変動

Rainfall and discharge during and after the 15th Typhoon (19–21 Sep. 2011) in Ananomiya watershed.

たが、ここでは保留量曲線を用いることとする。森林水文学では、保留量曲線という言葉は二つの意味で用いられている。一つは1降雨イベント中の累加降水量と累加損失量をプロットした曲線、いま一つは多数の降雨イベントに対して、1降雨イベントの降雨量と損失雨量を求めてプロットし、これを回帰することにより得られる曲線である。ここで損失雨量とは1降雨イベントの総降雨量から直接流出量を差し引いた値である。本論文では、保留量曲線という言葉の後者の意味で用い、その式形として一般に用いられている下記の式(藤枝 2007)を用いた。

$$L = S_B (1 - \exp(-kR))$$

ここで、 L , 損失雨量 (mm); S_B , 最大流域貯留量 (mm); R , 総降雨量 (mm); k , 保留量曲線の変化傾向を示す定数で、流域の地質・土壌の厚さなどの流域特性を反映している。最大流域貯留量 (S_B) は降雨量を無限大と仮定した場合の損失雨量の上限値である。

直接流出量は、降雨量と損失雨量の差であることから、降雨量と直接流出量の関係は次式となる。

$$D_R = R - L = R - S_B (1 - \exp(-kR))$$

ここで、 D_R , 直接流出量 (mm) である。図-4 にプロットされた点に対して、最小2乗法によって前期、後期それぞれの S_B と k を求めたところ、次式が得られた。

$$\text{前期 } D_R = R - 170.9(1 - \exp(-0.0066R))$$

$$\text{後期 } D_R = R - 220.9(1 - \exp(-0.0051R))$$

これらの式が表す曲線(以下、回帰曲線)を図上に示した。図上には、降雨の全量が直接流出量となる線($D_R = R$)および回帰曲線の漸近線($D_R = R - S_B$)も示してある。

200, 300, 400 mm の降雨量に対して保留量曲線から

図-4. 前期(1935～1946)と後期(2000～2011)における降水量と直接流出量の関係

The relationship between rainfall and direct runoff during the early and late periods.

図上には、降雨の全量が直接流出量となる線($D_R = R$)および回帰曲線の漸近線である $D_R = R - S_B$ も示してある。点線および実線は、それぞれ前期と後期である。

The dotted and solid lines on this graph indicate the regression curve and asymptotic line, respectively, of the regression curve during the early and late periods.

求められる推定直接流出量は、前期が後期よりそれぞれ 16.0, 25.8, 33.5 mm 多かった。また、 S_B は、後期が前期より 50.0 mm 多かった。

3. 初期水分条件で区分した前期と後期の違い

図-4 に基づく解析により、前期と後期の違いが定量的に計算できたが、図-4 のばらつきは大きいという結果となった。このばらつきを説明する要因としてまず考えられるのは初期水分条件である。そこで初期水分条件の指標である初期流出量によって降雨イベントを区分することで、ばらつきを説明できるかどうかを検討した。図-5 は前期、後期における降雨量と直接流出量の関係を、(a) 初期流出量が 0.4 L min^{-1} 以上の場合、(b) 初期流出量が 0.4 L min^{-1} 未満の場合、に区別して示したものである。ここで 0.4 L min^{-1} は試行錯誤により決めた閾値である。図-5(a) では前期と後期の差が明瞭でないが、図-5(b) では明瞭になっていることがわかる。それぞれの回帰曲線式として次式が得られた。

(a) 初期流出量 0.4 L min^{-1} 以上

$$\text{前期 } D_R = R - 192.9(1 - \exp(-0.0052R))$$

$$\text{後期 } D_R = R - 196.9(1 - \exp(-0.0055R))$$

(b) 初期流出量 0.4 L min^{-1} 未満

$$\text{前期 } D_R = R - 168.3(1 - \exp(-0.0069R))$$

$$\text{後期 } D_R = R - 219.6(1 - \exp(-0.0054R))$$

初期水分条件が乾燥の場合には、200, 300, 400 mm の降雨量に対して上式より求められる推定直接流出量は、前期が後期よりそれぞれ 19.1, 29.1, 36.6 mm 多かった。それに対して初期水分条件が湿潤の場合には、200, 300, 400 mm の降雨量に対する推定直接流出量は、前期が後期に対してそれぞれ 6.6, 6.7, 6.3 mm 多いが、大差はなかった。

図-5. 前期（1935～1946）と後期（2000～2011）における降水量と直接流出量の関係比較

Comparison of the relationship between rainfall and direct runoff during the early and late periods.

(a) 初期流出量 0.4 L min^{-1} 以上, (b) 初期流出量 0.4 L min^{-1} 未満. 図上には, 降雨の全量が直接流出量となる線 ($D_R = R$) および回帰曲線の漸近線である $D_R = R - S_B$ も示してある. 点線および実線は, それぞれ前期と後期である. The (a) and (b) indicate that the initial runoff is above 0.4 L min^{-1} and below 0.4 L min^{-1} , respectively. The dotted and solid lines on this graph indicate the regression curve and asymptotic line, respectively, of the regression curve during the early and late periods.

また, S_B は, 初期水分条件が乾燥の場合には後期が前期より 51.3 mm 多く, 初期水分条件が湿潤の場合には後期が前期より 4.0 mm 多かった。

4. 最大降雨強度で区分した前期と後期の違い

図-4 にみられたばらつきは図-5 によってある程度説明できたが, 図-5 (b) においても, 特に前期において依然としてばらつきがみられる。初期水分条件とは別に直接流出量に影響を及ぼしうる要因として, 最大降雨強度が考えられる。そこで最大降雨強度の指標である最大時間雨量によって降雨イベントを区分することで, ばらつきを説明できるかどうか検討した。図-6 は前期と後期における降雨量と直接流出量の関係を, (a) 最大降雨強度 30 mm h^{-1} 以上, (b) 最大降雨強度 30 mm h^{-1} 未満に区別して示したものである。図-5 と同様, 図-6 (a) では前期と後期の差が明瞭であるが, 図-6 (b) では明瞭でないことがわかる。それぞれの回帰曲線式として次式が得られた。

図-6. 前期（1935～1946）と後期（2000～2011）における降水量と直接流出量の関係比較

Comparison of the relationship between rainfall and direct runoff during the early and late periods.

(a) 最大降雨強度 30 mm h^{-1} 以上, (b) 最大降雨強度 30 mm h^{-1} 未満. 図上には, 降雨の全量が直接流出量となる線 ($D_R = R$) および回帰曲線の漸近線である $D_R = R - S_B$ も示してある. 点線および実線は, それぞれ前期と後期である. The (a) and (b) indicate that the rainfall intensity is above 30 mm h^{-1} and below 30 mm h^{-1} , respectively. The dotted and solid lines on this graph indicate the regression curve and asymptotic line, respectively, of the regression curve during early and late period.

(a) 最大降雨強度 30 mm h^{-1} 以上

$$\text{前期 } D_R = R - 124.1(1 - \exp(-0.0094R))$$

$$\text{後期 } D_R = R - 221.3(1 - \exp(-0.0051R))$$

(b) 最大降雨強度 30 mm h^{-1} 未満

$$\text{前期 } D_R = R - 229.2(1 - \exp(-0.0046R))$$

$$\text{後期 } D_R = R - 218.6(1 - \exp(-0.0052R))$$

最大降雨強度が 30 mm h^{-1} 以上の降雨の場合には, $200, 300, 400 \text{ mm}$ の降雨量に対して上式より求められる推定直接流出量は, 前期が後期よりそれぞれ $36.3, 56.7, 71.3 \text{ mm}$ 多かった。それに対して最大降雨強度が 30 mm h^{-1} 未満の降雨の場合には, $200, 300 \text{ mm}$ の降雨量に対する推定直接流出量は, 前期が後期に対して $3.5, 1.1 \text{ mm}$ 多かったが, 400 mm の降雨量に対しては逆に前期が後期より 1.5 mm 少なかった。

また, S_B は, 最大降雨強度が 30 mm h^{-1} 以上の降雨の場合には後期が前期より 97.2 mm 多かったが, 最大降雨強度が 30 mm h^{-1} 未満の降雨の場合には逆に後期が前期

より 10.6 mm 少なかった。

V. 考 察

1. 森林再生と森林伐採が直接流出量に及ぼす影響の相違

森林再生が直接流出量に与える影響を実際の観測データから定量的に評価するためには数十年という長い年月の降雨量、流出量のデータが必要であるのに対し、森林伐採が直接流出量に与える影響を評価することは、伐採実験を行うことにより、比較的短期間で実施可能であり、既往研究も多い(例えば Bosch and Hewlett 1982)。真板・鈴木(2009)は対照流域法による森林皆伐実験が行われた東京大学千葉演習林袋山沢流域において、初期流出量と直接流出量の関係が伐採によって変化するのは、伐採によって流域の土壤水分の空間分布特性が変化するためと推察している。流域内の土壤水分や地下水位の観測データから、伐採後、流域の土壤水分の空間分布が変化し、谷部での湿潤化が観測された。森林伐採は、蒸発散量が減少し、土壤水分の空間分布が変化したことの影響が直接流出量を増加させることにつながったと結論づけている。なお、真板らの研究では日流出量データを用いた解析のみを行っており、直接流出量を求める手法が本研究の手法とは異なるため、パラメータの値を本研究で得られた値と直接比較することはできない。

一方、森林再生によって直接流出量がどのように変化したかを観測し、解析した研究例は、わが国では、李ら(1988)以外にはほとんどない。谷(2011)は、花崗岩のハゲ山緑化は、風化基岩への階段設置、水平部への客土、客土の芝・藁による浸食防止、クロマツなどの樹木根系による崩壊防止などによって土壌を急斜面上に維持させる工事であるとし、それが蒸発散増加と降雨波形変換を緩やかにすることによって、洪水緩和機能を発揮することが原因であると総括している。一方、こうした効果を伴わない、単なる森林成長や間伐、樹種変更などの森林整備は、土壌発達を自然に任せており、100年程度の期間で大きな効果が得られるかは明らかになっていないとしている。

本研究は、ハゲ山と森林の洪水緩和機能を比較したものではない。前期は、ハゲ山期ではなく、風化基岩への階段設置、水平部への客土、客土の芝・藁などでの浸食防止、クロマツなどの樹木の植栽が一通り終了した直後の時期である。前期から後期にかけては、上記のような緑化工事、治山堰堤の建設や伐採、林道の作設なども行っておらず、自然の作用に任せる管理、谷(2011)の言葉を借りれば「単なる森林成長」により「土壌発達を自然に任せて」80年間管理してきた結果、直接流出量が抑制されることを明らかにすることができた。その結果は、全体的・平均的に評価すれば、後期の直接流出量は前期よりも顕著に減少したといえる。その減少率は、降雨量によって変わるものの、降雨量 200~400 mm の範囲では、後期の直接流出量に対して 16~27% に達した。後期については 400 mm を超え

る 2 回の降雨イベントに対する精密な流出量観測データを含めているため、推定値の信頼性は高いが、前期については最大 244.6 mm までの観測結果から外挿しているため、後期に比べて推定値の精度が低い可能性がある。

2. 初期水分条件への依存性

本研究の結果から、初期水分条件が乾燥している場合に、後期の直接流出量は前期と比べて、200, 300, 400 mm の降雨に対してそれぞれ直接流出量の 34.7, 23.5, 17.8% も減少した。400 mm という大雨に対して 17.8% も減少したことは、流域が乾燥している場合は、森林の自然再生が直接流出量を減少させる効果は極めて大きいと評価できる。一方で、流域が湿潤であった場合にはこのような大きな差はみられなかった。

初期水分条件が乾燥と湿潤の場合で、結果が著しく異なった理由として考えられるのは、初期流出量が同じであれば流域の初期水分条件が同じであるという「楽観的な仮定」が誤っている可能性である。すなわち、真板・鈴木(2009)も指摘しているように、流出量が低下すると、流出量は深い地下水や、測水所近くの溪流沿いの低湿地帯の貯留水分量だけに依存し、尾根や斜面の水分状態との関係が希薄になると推察される。このような状態で、もし斜面に樹木が繁茂していれば、樹木の蒸散によって、流出にもはや寄与していない土壤水分も蒸散によって消失する。このような「樹木による流域を乾燥させる作用」により、初期流出量が小さい場合は、同じ初期流出量であっても、前期に比べて後期の方が流域の乾燥の度合いが高かった可能性がある。

森林が成長することにより、無降雨期の蒸散量が増加し、降雨イベントの初期水分条件が、森林再生の初期段階に比べて、より乾燥した状態になる確率が高まる。この現象は、森林の洪水緩和機能の一部を担っている素過程であるが、長期水収支や流況曲線、無降雨期間の流出の低減を解析して初めて評価できるものであり、前期と後期を同じ初期流出量で区分した本研究では、この素過程の作用を評価できていない。

なお、先行研究である李ら(1988)では、初期損失(損失雨量ではないことに注意)を定式化し、パラメータである最大初期損失指標について、過去 50 年間の森林再生に伴う経年的な傾向を見いだせなかったとしているが、その理由は、李ら(1988)の提示した式が、最大初期損失指標を流域の標準的な湿潤状態により生ずる流量と定義し、その流量として 1.0 mm day^{-1} を仮定しているためと推察される。長期森林再生の影響を評価することを目的として降雨量から流出可能雨量を求める式のパラメータを用いる場合、同じ 1.0 mm day^{-1} の流量であっても、流域の湿潤状態は前期と後期で異なっているため、仮に累加損失量と流域の湿潤状態の関係が経年的に変化していたとしても、最大初期損失指標には経年的な変化が見いだされなかった可能性がある。

もう一つの可能性は、後述する「最大降雨強度への依存

性」により、見かけ上、初期水分条件が乾燥の場合に前期と後期の差が大きくなった可能性である。最大降雨強度が大きかった降雨イベントが、たまたま、初期水分条件が乾燥していたイベントであった可能性が考えられる。前期については 200 mm を超える三つのイベントのうち二つ、後期については、400 mm を超える二つのイベントの両方が該当する。この点については、今後、降雨強度が大きく初期水分条件が湿潤のイベントや、降雨強度が小さく初期水分条件が乾燥のイベントの数を増やすことができれば検証が可能となると期待される。

3. 最大降雨強度への依存性

本研究の結果から、最大降雨強度が大きい場合に、後期の直接流出量は前期と比べて、200, 300, 400 mm の降雨に対してそれぞれ直接流出量の 62.1, 44.8, 34.4% も減少した。400 mm という強雨に対して 34.4% も減少したことは、最大降雨強度が大きい場合は、森林の自然再生が直接流出量を減少させる効果は極めて大きいと評価できる。この増加率は、全体を平均的にみた場合や、初期水分条件が乾燥であった場合に比べて約 2 倍、大きく、森林の機能の大きさを決める要因として、降雨量と並んで最大降雨強度が最も重要な要因である可能性がある。一方で、最大降雨強度が小さい場合にはこのような大きな差はみられなかった。

これまで行われてきた森林伐採に伴う直接流出量の増加の解釈においては、主として蒸発散による土壌水分の変化により起こるとされてきた。表面流の発生については、伐採、搬出の作業に伴う地表面土壌の物理性の変化により部分的には浸透強度が変化することもあり、この変化により部分的な表面流を生じるが、変化していない森林土壌のところで吸収、浸透することが多く、単純に直接流出成分の増加とならない場合があるとされてきた（小川 1993）。

本研究で、最大降雨強度が大きい場合に、森林再生による直接流出量の減少量が大きかったことは、蒸発散だけでは説明できないと考えられる。すなわち、部分的ではなく全体的な森林土壌の回復により、浸透能の変化や土壌中の大量かつ長時間の一時貯留が発生した可能性がある。

先行研究である李ら（1988）は、流出可能雨量を有効雨量（直接流出量）と地下水かん養量（基底流出として流出する水量）に分離するモデルを提示し、パラメータである流域可能最大貯留指標に増大傾向があることを示した。李らはこの結果を、林相がよくなるにつれて、次第に浸透能が向上し、基底流出にまわる分が増加したと考察している。もし浸透能の増加が主たる要因であれば、最大降雨強度が大きい場合は、土壌がほとんどなかった前期では浸透能が降雨強度を下回り Horton 地表流が発生したのに対して、植生の成熟とともに土壌の回復が進んだ後期では、浸透能が降雨強度を上回るようになり、Horton 地表流が発生しにくくなったと考えれば説明がつく。最大降雨強度が小さければ、Horton 地表流は前期、後期とも発生していないために、差がなかったと解釈できる。

もちろん、浸透能だけですべてが説明できるわけではない。土壌が厚くなったことにより、浸透した雨水が土壌中に大量かつ長時間貯留されるようになり、平準化作用を発揮するようになったことも影響している可能性もある。一方、降雨中の樹冠遮断蒸発による損失雨量については、降雨強度が強い短時間の雨よりも弱い長時間の雨の方が、降雨中の蒸発量が多いために樹冠遮断蒸発量が多いと、かつては考えられていた（Calder 1990）。もしそうだとすれば、最大降雨強度が小さい降雨の方が森林の樹冠遮断蒸発による損失雨量が大きいため、その分、直接流出量が減少することになり、本研究の結果と矛盾していることになる。しかし近年では、樹冠遮断蒸発量は降雨強度に比例して増大するという解釈が主流となってきている（例えば、村上 2012）。Kuraji *et al.* (2001) は東京大学千葉演習林袋山沢で大雨時の樹冠遮断量を観測し、400 mm を超える 2 回の降雨イベントでも、降雨の 7~8% の水量が遮断されたことを示している。この水がどこにいったかについて、Kuraji *et al.* (2001) は幹に貯留された可能性を示しているが、村上（2012）は異なった解釈を示している。いずれにせよ、降雨強度が大きい降雨でも、それに応じた樹冠遮断量が発生していると仮定すれば、本研究の結果とは大きく矛盾しない。

4. 最大流域貯留量の評価

本論文では、最大流域貯留量を推定したが、推定値は、穴の宮流域が花崗岩であるという地質の影響に、植生や土壌の回復による増加分が上乗せされた結果として求めたと推察される。

藤枝（2007）は、国内の 52 流域を対象に、森林流域は降雨中に雨水をどれだけ流域内に一時的に貯留するかを調べた。流域貯留量の最大値は花崗岩・火山灰の流域であり、次いで変成岩類の流域、堆積岩・火山岩の流域の順であることを明らかにしている。本論文で推定された最大流域貯留量の下限値は、前期に最大降雨強度 30 mm h^{-1} 以上である場合の 124.1 mm であった。植生回復の初期段階で土壌がほとんどなく、降雨強度が強い場合、雨水が土壌中へ浸透できないまま下流に流出してしまっていることが、この条件において最大流域貯留量が最小となった理由の一つであると推察される。すなわち、この 124.1 mm という値は、土壌以外の部分（風化した花崗岩からなる土層）の最大流域貯留量に相当すると考えられ、風化花崗岩という地質条件における最大流域貯留量の下限値に近いと考えられる。藤枝（2007）は、地質による最大流域貯留量の違いを議論しているが、最大流域貯留量を決める要因は地質以外に土壌や植生もあり、これらの効果は地質の効果に上乗せされるため、要因の中から地質だけを取り出して整理する場合には、上乗せ分を除外して考察する必要があることを本研究の結果は示唆している。また、地質が異なることで、土壌や植生が最大流域貯留量を増やす効果は、絶対値としても相対値としても異なっていると推測される。これまで最大流域貯留量は絶対値だけが評価されてきたが、それだ

けではなく、それぞれの地質における最大流域貯留量の下限值に対する、植生や土壌による上乘せ分の相対的な評価も必要ではないかと考えられる。

5. 直接流出分離線の終点を決める基準値への結果の依存性

ここまでは、基準値を $1.0 \text{ L min}^{-1} \text{ day}^{-1}$ とした結果のみを示してきた。基準値を 1.0, 0.5, 0.25 に変化させることで、最大流域貯留量 S_B がどのように変化するかを調べた。その結果、初期水分条件を乾燥・湿潤に区分した場合、前期に対する後期の S_B は、基準値 1.0, 0.5, 0.25 に対して乾燥の場合はそれぞれ 51.3, 42.6, 36.4 mm 大きく、湿潤の場合には基準値 1.0 の場合 4.0 mm 大きく、基準値 0.5, 0.25 の場合にはそれぞれ 1.3, 6.4 mm 小さかった。一方、最大降雨強度を強雨・弱雨に区分した場合、前期に対する後期の S_B は、基準値 1.0, 0.5, 0.25 に対して強雨の場合はそれぞれ 97.2, 88.2, 80.8 mm 大きく、弱雨の場合はそれぞれ 10.7, 39.6, 56.9 mm 小さかった。

図-3 に示されているように、基準値を小さくすると、終点の時刻が遅れ、始点から終点までの時間が長くなり、直接流出量が大きく計算され、 S_B は小さくなる。終点を決める基準を 3 通り設定して同じ解析を行った結果、前期より後期の方が同じ雨に対して直接流出量が少なく、最大流域貯留量が多いという結論は、いずれの基準値に対しても不変であった。またこの傾向は初期水分条件が乾燥の場合および最大降雨強度が大きい場合に顕著であることも不変であった。これらの結論については基準値を 1.0~0.25 の範囲で変えても結論は変わらないと結論付けられる。一方、最大降雨強度が小さい場合を抽出した場合、基準値を 0.5, 0.25 と小さくしていくと、前期よりも逆に後期の方が S_B は小さくなるという結果が得られた。 S_B を決める元となるデータに立ち返ってこの点を検討したところ、降雨量が 150 mm を超えているいくつかの降雨イベントにおいて、基準値を小さくしていくと、前期に比べて後期では直接流出量が顕著に増加することがわかった。これらの降雨イベントに対するハイドログラフを詳細に検討したところ、前期に比べて後期では降雨終了後の低減期において流出量の減少率が下がるのに時間がかかり、基準値を下げると始点から終点までの時間が長くなり、直接流出量の増加量が多くなる傾向が認められた。この傾向は、前期と後期の森林や土壌の状態の違いに起因する可能性があり、今後、より詳細に検討する必要がある。

6. 森林再生による降雨から直接流出に至る素過程の変化

これまで述べてきたように、本論文の結果から、同じ降雨量に対する直接流出量や最大流域貯留量が、森林の再生によって減少した観測事実を説明する素過程の可能性として、樹木の蒸散によって同じ初期流出量でも流域全体が乾燥した可能性や、部分的ではなく全体的な森林土壌の回復により、浸透能の増大効果や、土壌中の大量かつ長時間の一時的貯留効果が発揮された可能性を示してきた。

このような素過程の変化が実際に生起しているのかを詳細に検討するためには、水収支法による森林の再生に伴う年蒸発散量の変化や、流出量の低減特性、流況の解析、渇水時流出量の長期変動、流域内部での土壌水分や地下水位の観測などが必要となる。穴の宮試験流域における水収支や渇水時の流出については解析可能なデータが揃いつつあり、今後の研究の進展が期待できる。一方、穴の宮流域内ではこれまで流域内で土壌水分や地下水位等の詳細な計測がされていないため、素過程に踏み込んだ前期と後期の比較をすることは現時点では難しく、今後の課題である。

VI. 結 論

東京大学演習林生態水文学研究所穴の宮試験流域を対象とし、単独流域法を適用して、ハゲ山に砂防植栽等を施して森林再生を開始した期間（前期）と、それから 65 年が経過して森林に被覆され、土壌が回復途上にある期間（後期）で、森林の洪水緩和機能の指標の一つである降雨量と直接流出量との関係の違いを定量的に明らかにすることを目的として解析を行った。その結果、以下のことが明らかになった。

- 1) 後期と比べて前期の方が、同じ降雨量に対して推定直接流出量が大きく、その差は、200, 300, 400 mm の降雨に対してそれぞれ 16.0, 25.8, 33.5 mm と推定された。これらの値はそれぞれの場合における後期の直接流出量の 16~27% を占めており、無視できない大きさであった。
- 2) 前期と後期の差は、初期水分条件が乾燥の場合や、最大降雨強度が大きい場合に、より明瞭に現れた。例えば、初期水分条件が乾燥の場合、後期と比べて前期は、200, 300, 400 mm の降雨に対して推定直接流出量がそれぞれ 19.1, 29.1, 36.6 mm 大きく、最大降雨強度が大きい場合、後期と比べて前期は、200, 300, 400 mm の降雨に対して推定直接流出量がそれぞれ 36.3, 56.7, 71.3 mm 大きかった。これらの値はそれぞれの場合における後期の直接流出量の 18~62% を占めており、無視できない大きさであった。一方、土壌が湿潤場合や、最大降雨強度が小さい場合は、200, 300, 400 mm の降雨に対する前期と後期の推定直接流出量の差は、後期の直接流出量の 6% 未満であった。

本研究に使用した穴の宮試験流域の降雨量、水位の観測データは、東京大学大学院農学生命科学研究科附属演習林生態水文学研究所歴任教員・職員の長年にわたる努力によって取得・整理されてきたものである。1935 年から 1946 年のデータ入力作業には加藤敦美氏の支援を得ている。また匿名の 2 名の査読者の方からは有益なご意見を頂いた。ここに記して謝意を表する。

引用文献

- Bosch JM, Hewlett JD (1982) A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *J Hydrol* 55: 3-23
- Calder IR (1990) *Evaporation from uplands*. John Wiley & Sons
- 藤枝基久 (2007) 森林流域の保水容量と流域貯留量. 森林総合研究所研究報告 403: 101-110
- Kuraji K, Tanaka Y, Tanaka N, Karakama I (2001) Generation of

- stemflow volume and chemistry in a mature *Chamaecyparis obtusa* forest. Hydrol Process 15: 1967-1978
- 李 憲浩 (1991) 林相の経年変化が水流出特性に及ぼす影響. 東京大学農学部演習林報告 86: 77-178
- 李 憲浩・芝野博文・西尾邦彦 (1988) 林況変化に伴う短期流出特性の追跡—東京大学愛知演習林穴の宮流域を対象として—. 東京大学農学部演習林報告 80: 109-128
- 真板英一・鈴木雅一 (2009) 山地森林小流域における直接流出量の定量的解析. 水文・水資源学会誌 22: 42-355
- 村上茂樹 (2012) 樹冠遮断のメカニズムと森林の増雨効果. 水利科学 324 82-99
- 中野秀章 (1976) 水文学講座 13 森林水文学. 共立出版
- 小川 滋 (1993) 森林と流出. (砂防学講座第 2 巻 土砂の生成・水の流出と森林の影響. (社)砂防学会監修, 山海堂). 219-253
- 谷 誠 (2011) 山地流域における自然貯留の洪水緩和機能に関する方法論的考察. 水利科学 318: 151-173
- 東京大学大学院農学生命科学研究科附属演習林生態水文学研究所 (2012) 愛知演習林量水観測結果報告 (VII) 【修正版】. 演習林 (東大) 52: 1-23
- 塚本良則編 (1992) 森林水文学. 文永堂出版