

広葉樹混交林を主体とした小流域における 樹冠遮断と流域水収支の検討

Interception loss and water balance at small basins by mixed broad-leaved forest

吉田 豊[†]、赤堀 良介^{††}、新実 智嗣^{†††}

YOSHIDA Yutaka[†]、AKAHORI Ryosuke^{††}、NINOMI Tomotsugu^{†††}

Abstract , To clarify the water balance in a mixed evergreen-deciduous broadleaf forest watershed, we analyzed gross precipitation, throughfall, and stream flow in a small watershed in the Kaisho Forest, Seto City, Aichi Prefecture. First, to quantify canopy interception, we analyzed throughfall at a site with *Quercus serrata* in the upper layer and *Camellia japonica* in the lower layer. The time period was 2009-2024, and one event was defined as a 24-hour rainfall-free period. The annual interception rate ranged from 50 to 80% from 2009 to 2016, and from 10 to 30% from 2017 onward, a difference of 2 to 3 times. The rainfall at the onset of rainfall through the canopy during the period of difference is almost the same, and the difference in the interception rate during the defoliation and leaf set periods is also slight. The direct runoff was analyzed for the 2009-2011 period (Period I) and the 2021-2023 period (Period II), and the increase in direct runoff relative to gross precipitation was smaller in Period II than in Period I, suggesting that runoff suppression is occurring. Furthermore, the water balance after 2017 showed that about 30% of the annual precipitation was lost through evapotranspiration and the remaining 70% was runoff, of which 70% was basal runoff. Continued observation is necessary because the distribution of moisture in the watershed may change in the future due to forest growth and the dominance of evergreen broad-leaved trees.

1. はじめに

降雨として森林上に供給された雨水は、そのすべてが森林土壌に供給されるわけではなく、その一部が樹冠(樹木の葉、枝、幹などの表面)や、リタ・層(地表に堆積した落葉・落枝)によって補足される。そして、樹冠やリタ・層によって遮断された雨水の一部は、そのまま蒸発して大気中へ戻される。これを遮断損失という¹⁾。この遮断損失量の定量化は、森林における水循環過程の実態を正確に把握し、その影響を定量的に評価するために必要不可欠な課題であり、水資源の管理や土砂災害、渇水・洪水の予測のためにも重要な指標となる。また、遮断損失は森林の状態で変化し、森林の状態の変化が流域からの流出特性に対しどのように影響を与えるかを定量的に評価することも、森林水文学にとって古くからの課題である²⁾。

森林が、流域の降雨・流出応答に与える影響については数多くの既往研究が存在する。李ら³⁾は風化花崗岩山地での昭和 10 年から 60 年の山腹植栽によるの林相変化が高水流出に及ぼす影響を検討し、林相の良好化とともに直

接流出成分が減少し地下水が豊富になることを示した。

また児島⁴⁾らは 300ha の山地森林集水域を対象として、長期水文観測データを用いたタンクモデル係数の長期変動の解析により、側方流出孔の係数値が減少傾向で、森林の生長に伴い洪水時のピーク流出が抑制されること、またそれは第 1 段タンク下部の側方流出孔係数のみで説明できるとしている。しかし我ら⁵⁾は愛媛県の森林小流域で長期間の森林の変化が流出特性、蒸発散量に大きな変化を与えないことを指摘している。これらの研究は 30~60 年スパンでの流域全体あるいは大部分において森林状態が変化した条件下で行われている。

また、本研究グループでは、愛知県瀬戸市「海上の森」の一部が、2005 年の愛知万博の瀬戸会場建設による造成工事を受け、その後の流域の保水能力や降雨・流出特性の変化を確認するために、2008 年より林外雨量、林内雨量(写真-1)、河川流量等の観測を行っている。これらの観測結果から樹冠遮断特性・流出特性について以下のことが明らかになっている。

- 1) 樹冠遮断率について、造成工事前の 2003 年、2004 年は 20%~30%で推移するが、工事後の 2008 年~2016 年は平均で 50%以上となる。また 2017 年以降は 10%~30%に低下し、近年まで継続している。
- 2) 直接流出率においては工事後に一時的に増加するも

[†] 愛知工業大学大学院 建築システム工学専攻

^{††} 愛知工業大学 工学部 土木工学科 (豊田市)

^{†††} (株)水地盤研究所 (瀬戸市)

の 2008 年以降では工事前の値と同様の値で、短期流出特性は回復傾向とみられる⁹⁾。

- 3) また植生に関しては大径化した落葉樹の下層に常緑樹が優先してきている^{7, 8)}。

近年では樹冠遮断率の減少とともに直接流出率の増加が経年変化から読みとれ、植生の変遷が樹冠遮断量に変化を及ぼし、それに伴う・降雨・流出特性(特に直接流出)に与える影響を評価しようという流れがある。しかし、従来の研究では樹冠遮断量の解析手法が統一されていないことや、過去の開空度やその他樹木のデータがそろっていないこともあり、遮断率の変化をうまく説明できない。また流出率の増加も定性的評価にとどまる。よって直接的に遮断と流出の関係を結論付けるのは難しい。したがって本研究では、2009 年からの水文データから、統一手法による樹冠遮断率と降雨・流出特性の再検討を行い、それらを踏まえて流域の水収支を定量評価することを目的とした。



写真-1 造成工事直後と現在の林内の様子
(上：2004.11.12、下：2023.12.18)

2. 対象地域の概要

愛知県瀬戸市庄内川流域(1010km²)の中流域に位置する都市近郊林である「海上の森」(約 530ha)、その中でも愛知工業大学に近い特定の小河川流域を対象とした(図-1)。流域面積は約 1.66ha である。流域の標高は 130m-150m、年平均降水量、平均年流出量はそれぞれ約 1400mm、約 1000mm であり、平均約 7 割が河川に流出する(後述)。基盤地質は風化花崗岩である。

江戸時代末期には焼きものの生産のための森林伐採ではげ山と化したのが、明治初期から現在まで約 100 年の間に二次遷移が進行し、現在は陽樹のコナラやアカマツ、陰樹のヤブツバキが混在する落葉・常緑広葉樹混交林である⁸⁾。

また、本流域の一部(約 10%)が、2005 年に開催された愛・地球博(愛知国際博覧会)の会場となり、会場設営のための切土・盛土工事が行われ、その過程で新たに植林され、再度遷移が進行する部分もある。

このサイトで得られた 2009 年~2024 年までの観測データを解析対象とした。

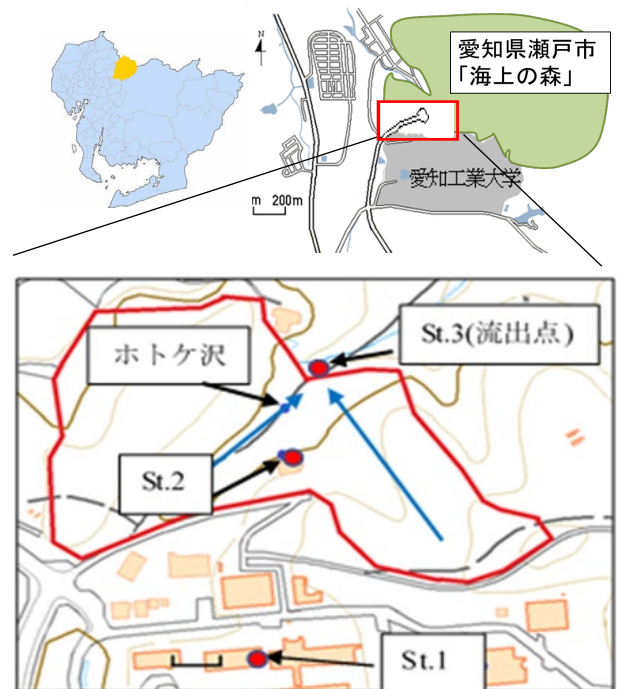


図-1 対象地域拡大図

3. 観測方法

3・1 St. 1：林外雨量の計測

周辺に障害物が無く、降雨を遮蔽するものがない林外であるとし、7号館屋上に 0.5mm 転倒マス雨量計を設置し降雨量を計測した(写真-2)。もともとは 2003 年~2017 年 12 月まで、耐震実験センタ-裏で 0.5mm 転倒マス雨量計を設置していたが、周囲に遮蔽物が増加したため、その後

広葉樹混交林を主体とした小流域における樹冠遮断と流域水収支の検討

7号館屋上に移っている。集水部の目詰まりを防止するため、定期的な保守・点検を行った。デ-タログ-は「おんどとり Jr TR-55 j -P」を使用していた(写真-3)。

3・2 St. 2：林内雨量、土壌水分及び樹幹流の計測、

林内で1.0mm転倒マス雨量計を1台(樹幹流A)と0.5mm転倒マス雨量計を6台(1/6:樹幹流B、5/6:樹冠通過雨)設置し、樹幹流と樹冠通過雨をそれぞれ10分間隔で自動計測を行った(写真-4、5)。樹冠通過雨はA～Eの5地点在り、それぞれ上空の環境が異なっている(写真-6)。樹木から落下してくる枝や葉が落着するため、定期的な清掃、点検を行いつつ、毎週デ-タ回収をした。デ-タはすべてデ-タログ-「おんどとり Jr TR-55i-P」に記録した。樹冠通過雨と樹幹流を足したものを正味林内雨量とされているが⁷⁾、本研究では継続して観測が行われているA地点の樹冠通過雨を対象として解析を行い、通過雨を林内雨とした。

樹幹流は、雨量計に影響を及ぼすと考えられる樹木2本(落葉樹(コナラ)A:24.5m²と常緑樹(ヤブツバキ)B:12.8m²)を選び、木の幹に流れる水をせき止めるためにプラスチックホ-スとシリコンシ-ラントを巻き付け、転倒マス雨量計に流れるようホ-スをつなぎ雨量として計測した(写真-5)。

土壌水分量については、樹幹直下と自然地盤の深さ10cmの2か所で観測した(写真-7)。

3・3 St. 3：河川流量・ECの計測

対象地域に降った雨は集水域の雨を集めホトケ沢へと流出する。この流量を出水が見込まれる際に随時計測した。流出点ではJIS規格に定められた直角三角堰を設置しており水位は投げ込み式水位計(Onset社:HOBO U20-001-04)により10分間隔で自動計測を行った。また同機種を付近の樹木にも取り付け、大気圧も同様に計測を行い、水位計の補正に用いた(写真8, 9, 10)。得られた水位デ-タは、水位-流量曲線により流量に変換し、その後流域面積で除して流出高(mm)に変換した(後述)。出水が見込まれる際には現地で流量と越流水深を実測し、前述の連続値の補正に用いた。観測点は降雨ごとに葉や土砂が溜まるため、定期的な除去、清掃、点検を行った。また、観測は容器法で行った。

また2022年よりEC(electric conductivity:「電気伝導度(mS/m)」)を実測流量と共に計測し、さらに2024年5月よりECの10分観測を行った。観測機器は「ガラス電極式水素イオン濃度計(HORIBAKOREALTD.製)」を実測で、連続観測はホボ24電気伝導率ログ-(Onset社:HOBO

U24-001)(写真-11)を用いた。電気伝導度とは水が電気を通す能力をいい、水中の電解質濃度(イオンになって溶ける塩類濃度)を一括して推定する指標である。



写真-2 林外雨量計(0.5mm 転倒マス雨量計)



写真-3 デ-タログ-「おんどとり Jr TR-55i-P」



写真-4 林内雨量計 A



写真-5 樹幹流測定



写真-6 A～E 地点の転倒マス雨量計設置個所と雨量計直上の林冠構造



写真-7 土壌水分計(自然地盤 10cm)



写真-8 HOBO U20 水位ロガ-(U20-001-04)絶対圧力



写真-9 HOBO U20 水位ロガ-(U20-001-04)大気圧



写真-10 ホトケ沢における直角三角堰



写真-11 HOBO 24 電気伝導率ロガ-

4. 水文資料

4・1 降雨データ

降水量は基本的に林内雨量計から約 140m 離れた 7 号館屋上の 0.5mm 転倒マス雨量計の 10 分データをを用いるが、機械不備で欠測になった場合は、アメダス豊田観測所(豊田市高町東山)の 10 分データで補完した。

4・2 樹冠通過雨量・樹冠遮断率

樹冠通過雨は、5 地点ある林内雨量計のうち、2008 年から継続して観測している A 地点(上層：コナラ、下層：ヤブツバキ)の 10 分データを用いて、一雨ごとに解析を行った(図-2)。林外雨量の降雨終了時刻から 24 時間無効雨期間を持つものを一雨のイベントとして分離した。

本研究では、継続的に樹幹流量の観測を行っていないことから、樹冠通過雨量を正味林内雨量とし、林冠の水収支式である(1)式⁹⁾から樹冠遮断損失量(以下樹冠遮断量)を求めた。また樹冠遮断量を林外雨量で除したものを樹冠遮断率とした。

$$I_c = P_g - T_f \quad (1)$$

$$\text{樹冠遮断率} = \left(\frac{I_c}{P_g} \right) \quad (2)$$

ここで、 I_c ：樹冠遮断量(mm)、 T_f ：樹冠通過雨量(mm)、 P_g ：林外雨量(mm)である。

樹冠遮断率は、温帯の混交林で約 20~30%であることが分かっており¹⁰⁾、常緑樹林では季節によらず 20~40%、落葉樹林ではおおむね 0~35%に分布することが分かっている¹¹⁾。

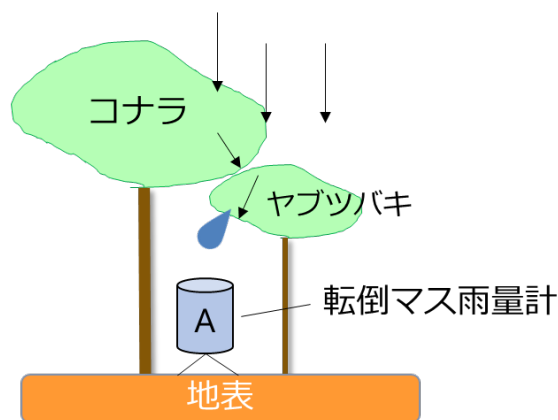


図-2 林内雨量計 A における樹冠構造と雨水の移動イメージ

4. 3 流出高・直接流出成分の算出

流域からの雨水流出はその流下してくる場を概念的に区分することにより、表面流出と中間流出、地下流出に分類される。ハイドログラフ上で見れば、これらの各成分は降雨に対する応答の早いものから遅いものへと順次移っていく¹²⁾。流出解析では表面流出と中間流出を合わせて直接流出、地下水流出を基底流出という。本研究では短期流出を対象とするため、直接流出成分の分離を行った。

まず、HOBO ソフトにより、大気圧補正された越流水深を得た。得られた水位データを堰の流量公式により流量に変換した。

$$Q = KH^{5/2} \quad (2)$$

$$K = 1.354 + \frac{0.004}{H} + \left(0.14 + \frac{0.2}{\sqrt{D}} \right) \left(\frac{H}{B} - 0.09 \right)^2 \quad (3)$$

ここで、 Q ：流量(m^3/s)、 K ：流量係数、 H ：越流水深(m)、 B ：水路幅(m)、 D ：堰高さ(m)であり、寸法は $B=0.88(\text{m})$ 、 $D=0.128(\text{m})$ とした。

(3)式は JIS の流量公式であるが、実際には実測流量と差が生じるため、以下の経験式を用いて流量とした。

$$Q = 0.86H^{0.25} \quad (4)$$

ただし Q ：流量(m^3/s)、 H ：越流水深(mm)

さらに単位を(m^3/min)とし、流域面積で除して流出高を求めた。

$$\dot{Q} = Q \times 60 \quad (5)$$

$$q = \frac{\dot{Q}}{16500} \times 1000 \quad (6)$$

ただし q ：流出高(mm/min)、 $\dot{Q}$ ：流量(m^3/min)、16500：流域面積(m^2)である。

流出高が求めれば、雨量と流出高を片対数グラフに書き、ハイエト・ハイドログラフを作成し、直接流出成分の分離を行う。分離法にはさまざまあるが、本研究では、ハイドログラフの減速部にはっきり変曲点を確認できるものを、3 点法で¹³⁾、確認できないものを水平分離法で分離した。

また、観測された林外雨量と流出量、およびそれらの差によって求まる損失量(林外雨量-流出量)を年単位で集計したものを図-3 に示す。直角三角堰での流量観測では、大雨時の流木による堰のつまりや、データログの不具合な

どで欠測が生じるため、流出の欠測期間が 50 日未満である 2010、2011、2012、2014、2015、2016、2019、2020、2021、2024 年の 10 年を抽出した。この期間の年林外雨量および年流出量、その差の年損失量の平均と標準偏差を求めると、林外雨量は $1397.75 \pm 183\text{mm}$ 、年流出量は $1044.84 \pm 185.7\text{mm}$ 、年損失量は $352.91 \pm 139\text{mm}$ であり、年によって変動はあるものの降水のうち約 65%~75%が流出していることがわかる。損失量は樹冠遮断による蒸発や植物の蒸散、深部地下水への流出などによるものと考えられ、降水のうち、我々人間の利用が難しい部分である。

図と標準偏差からも、期間の年林外雨量と年流出量は年によって大きく変動するが、その変動パターンは似ており、年損失量の変動は前者に比べ小さい。2011 年において年降水量<年流出量となっており損失量が負になっているのは、何らかの要因で堰での観測流量の過剰見積もりが起きてしまったからであると考えられる。

5. 結果と考察

5・1 樹冠遮断に関する解析

5・1・1 樹冠遮断率の経年変化

解析期間は造成工事後の 2009 年から、2024 年の 16 年間である。それぞれの年で林外雨量の 24 時間無降雨期間を持つとき降雨イベントを分離し、イベントごとに林外雨量と樹冠通過雨量を積算して求める。樹冠通過雨が発生しているのに明らかに林外雨量がない場合は、機械不備としてアメダス豊田雨量を用いて林外雨量とした。そのように求めたイベントごとの林外雨量と樹冠通過雨を合計し年林外雨量、年樹冠通過雨量とし、その差の年遮断量、また年遮断量が年中央水量に占める年平均遮断率を求めたものを表-1 に示す。それぞれで年間約 60 イベント存在するが、欠測期間があり少数のイベントしか抽出できない年も存在する(例：2013 年：17 個、2014 年：8 個、2015 年 3 個)。特に欠測期間が長かった 2014、2015 年を欠測扱いとする。

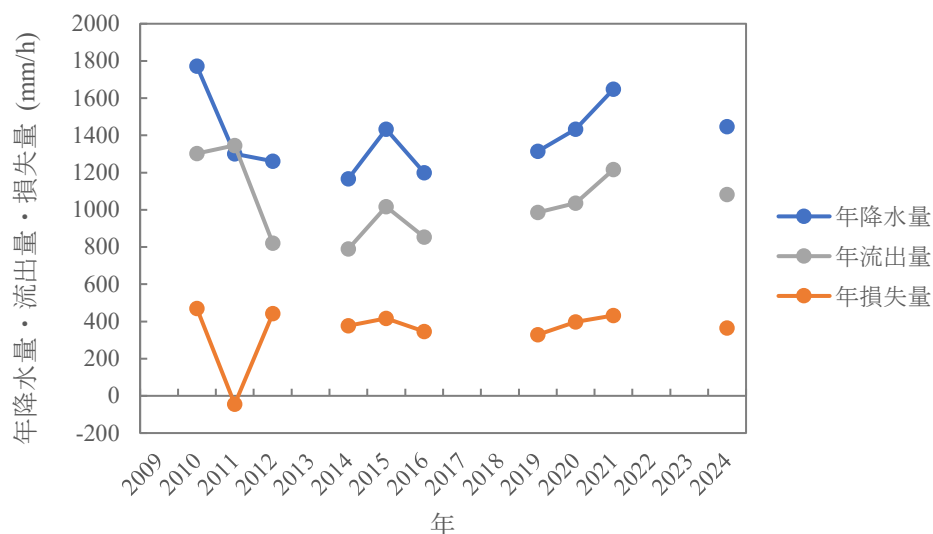


図-3 観測された年林外雨量と年流出量、および年損失量

図-4 より 2009 年から 2016 年の期間では遮断率は 54%~88%で推移しており、平均値は 66.25%、2017 年以降は 3.3%~29.6%で推移しており、平均は 17%であり、約 50 ポイント低下している。すなわち観測初期に比べ 2017 年以降、年降水量に対して遮断される量は半分以下になっていることがわかる。また、本研究グループの過去の樹冠遮断率の経年変化を図-5 に示す。点のプロットは各年のイベントごとの遮断率であり、青い点はイベント遮断率の平均値である。図-4 と図-5 では、平均遮断率を、年間の

合計から算出した林外雨量と樹冠通過雨で求めるか、イベントごとの遮断率を平均するかで異なっているが、おおむね傾向は類似しており、2017 年以降の大幅な減少を確認できる。これは、過去のデータが偏ったイベントを見ていたのではなく、各年で通過特性が決まっていることを示唆しており、2017 年を境に大きく通過特性が変化している。

ここで、アカマツ高木層の下に低木類を含む状態における年間遮断率はおおよそ 31%であり、これは下層植生を含まない状態の遮断率が約 20%でそれより大きい¹⁴⁾ことを

考えれば、初期の 60%はかなり大きい値であることがわかる。また、常緑広葉樹のマテバシイ林の年平均遮断率は 63%であるとの報告もある¹⁵⁾。さらに、温帯の混交林で遮断率が約 10~20%、常緑樹林では季節によらず 20~40%であることを考えれば、2009 年~2016 年までは常緑広葉樹の性質を持っており、17 年以降は混交林の代表値へと変化していることがわかる。2017 年以降に急激に変化している要因の一つに林内雨量計の変更があげられる。転倒マス雨量計には変わりがないものの、2016 年までは 0.2mm、2017 年から 0.5mm 転倒マス雨量計に変更されている。設置位置に大きな変更はないものの、微妙な位置変更と、通過雨の空間的なばらつきが重なり、通過雨が以前よりも多いポイントでの観測となった可能性がある。

また、樹冠の発達とともに遮断率は増加増加すると予想されるが、真逆の結果となっている。これに関して考えたい。R.F. Keim ら¹⁶⁾は落葉樹林と針葉樹林における樹冠通過雨の空間分布を解析し、針葉樹に比べ落葉樹林は樹冠通過雨の空間的不均一性が高いことを示した。また針葉樹(常緑樹)は局所的な集水があり、その雨量は 300mm と落葉樹林より大きい、それはごく一部であり、ほとんどはまんべんなく通過する。このことから 2009 年ごろ A 地点では遷移初期の競争段階であり、コナラが優勢で通過雨の空間不均一性が高い状態で、観測点が 1 つだったことも在り、通過雨が少ないポイントを拾った。また下層の常緑樹が光を求めて葉を伸ばすようになると、樹冠が複層化し樹冠内の雨水の移動プロセスが変化することで集水機能が高まり、通過雨が増えたと考えられる。そこに観測機器の変更が重なり、今回のような大きな減少が確認されたと考えられる。

5・1・2 林外雨量に対する樹冠遮断率

5・1・1 項は年降水量と年樹冠通過雨量を用いて年平均遮断率を求めた。次はイベントごとの遮断率に着目する。2009、2010 年、2017、2018 年、2023、2024 年の各 2 年ずつのイベント降水量と樹冠遮断率の関係を図-6 に示す。図から得られたイベントの規模についてみると、イベント降水量は約 200mm まで、遮断率は、2009、2010 年では 0%~100%、2017 年以降では-120%~100%の範囲に分布している。また各年での分布にばらつきはあるものの、おおむね林外雨量が小さいときは遮断率のばらつきが大きく、雨量が大きくなるにしたがって年平均値に収束する傾向があることがわかる。

2009、2010 年においてはほとんどのイベントで遮断率

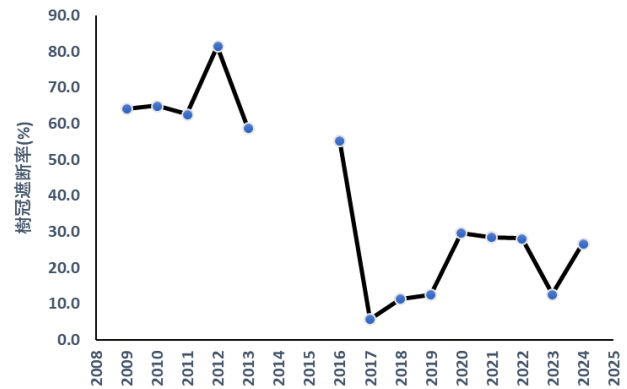


図-4 A 地点における樹冠遮断率の経年変化

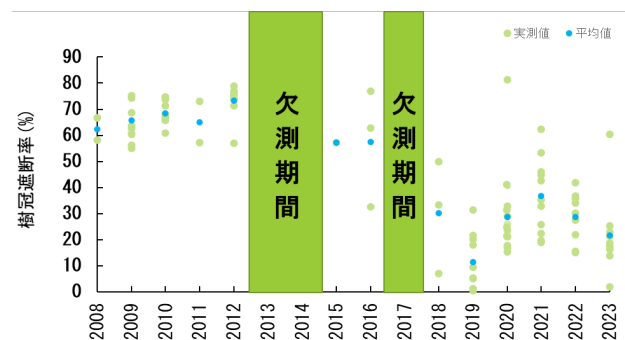


図-5 A 地点における樹冠遮断率の経年変化(223 年当研究グループ作成、プロットは各年のイベントごとの遮断率を表す)

50%を超える結果となり、2017 年以降においては 50mm 程度までのイベントでも負の値や 0%を記録し、小・中降雨時でのばらつきがより大きい性質を持つ。したがって、成長期である 2009 年頃は、雨量に対する遮断量の増加はどの規模のイベントでもほぼ一定だが、樹冠が発達し、樹冠内の雨水の移動プロセスが複雑になった現在は、小・中規模のイベントでは同じ林外雨量に対して遮断量がばらつき、林外雨量のみで遮断量が予測困難であることを示唆してる。

特に小降雨時のばらつきについて、0.5~30mm の小規模のイベントでは、2009、2010 年より、2017 年以降のほうがばらつきが大きく、50mm を超えてくると徐々に収束していく傾向にある。2009、2010 年も±20%くらいのばらつきはあるものの、2017 年以降と比較するとかなり小さい。これは、樹冠が 2009 年ごろは一層構造であり、雨水の移動プロセスが単純で、遮断特性に雨量の影響が出にくかったが、樹木の成長とともに下層のヤブツバキが発達し、雨水の移動プロセスが複雑化することで小規模のイベントにおいて通過雨のばらつきが生まれたと考えられる。

表-1 各年の林外雨量と樹冠通過雨量・樹冠遮断量及び樹冠遮断率(2009 年～2024 年)

年	イベント数	林外雨量(mm)	樹冠通過雨量(mm)	樹冠遮断量(mm)	樹冠遮断率(%)
2009	62	1533.5	550.2	983.3	64.1
2010	58	1572	552	1020	64.9
2011	62	1169.5	438.4	731.1	62.5
2012	40	866	227.8	705.2	81.4
2013	17	286	117.8	168.2	58.8
2014	8	108.5	12.2	96.3	88.8
2015	3	40.5	18.6	21.9	54.1
2016	38	702	313.4	388.6	55.4
2017	28	639.5	602.5	37	5.8
2018	66	1442	1279	163	11.3
2019	67	1159.5	1121.5	38	3.3
2020	66	1430.5	1007	423.5	29.6
2021	60	1570.5	1124	446.5	28.4
2022	66	1318	895	371	28.1
2023	60	1304.5	1098	164.4	12.6
2024	54	1174	973.5	200.5	17.1

5・1・3 着葉期と落葉期の樹冠通過雨量

A 地点では、上層にコナラ、下層にヤブツバキを持つ 2 層構造で、冬季にコナラの落葉が通過雨に影響を与えると考えられる。5～10 月を夏季(着葉期)、1～3 月、11、12 月を冬季(落葉期)として 2009 年～2011 年(I 期)と 2021 年～2023 年(II 期)の各 3 年ずつのイベントごとの林外雨量に対する樹冠通過雨を図-7 に示す。

林外雨量に対する通過雨の傾きは I 期が約 0.35、II 期は約 0.75 と、近年のほうが 2 倍以上多く通過させているが、どちらの期間も着葉期と落葉期で傾きはほぼ一致する。平均遮断率はどちらも着葉期で大きくなる傾向があるが、遮断率の差は I 期で 1%、II 期で 4%ほどと、落葉による遮断量の減少は小さいことがわかる。

5・1・4 樹冠通過雨発生開始雨量の解析

図-4 に示すように、観測初期の 2009 年付近で樹冠遮断率が高い原因の一つとして、樹冠に貯留される雨水の差が考えられる。前期(2009、2010 年)、後期(2022、2023 年)として、樹冠通過雨が発生するのに必要な林外雨量を、10 分ごとの観測結果から算出した(表-2)。

どちらも最小値が 0.5mm と、降雨の開始と同時に樹冠通過雨が発生している。又、平均値では後期が上回り、後期のほうが少し時間遅れが発生している。また標準偏差は前期が 1.8mm、後期が 1.38mm であり前期のほうがイベントごとでのばらつきが大きいことがわかる。しかし全体的に通過雨発生開始雨量の変化量は小さく、降雨と同時に通過雨が発生しているため、植生の生長が初期遮断特性に与えた影響は小さいと考えられる。

広葉樹混交林を主体とした小流域における樹冠遮断と流域水収支の検討

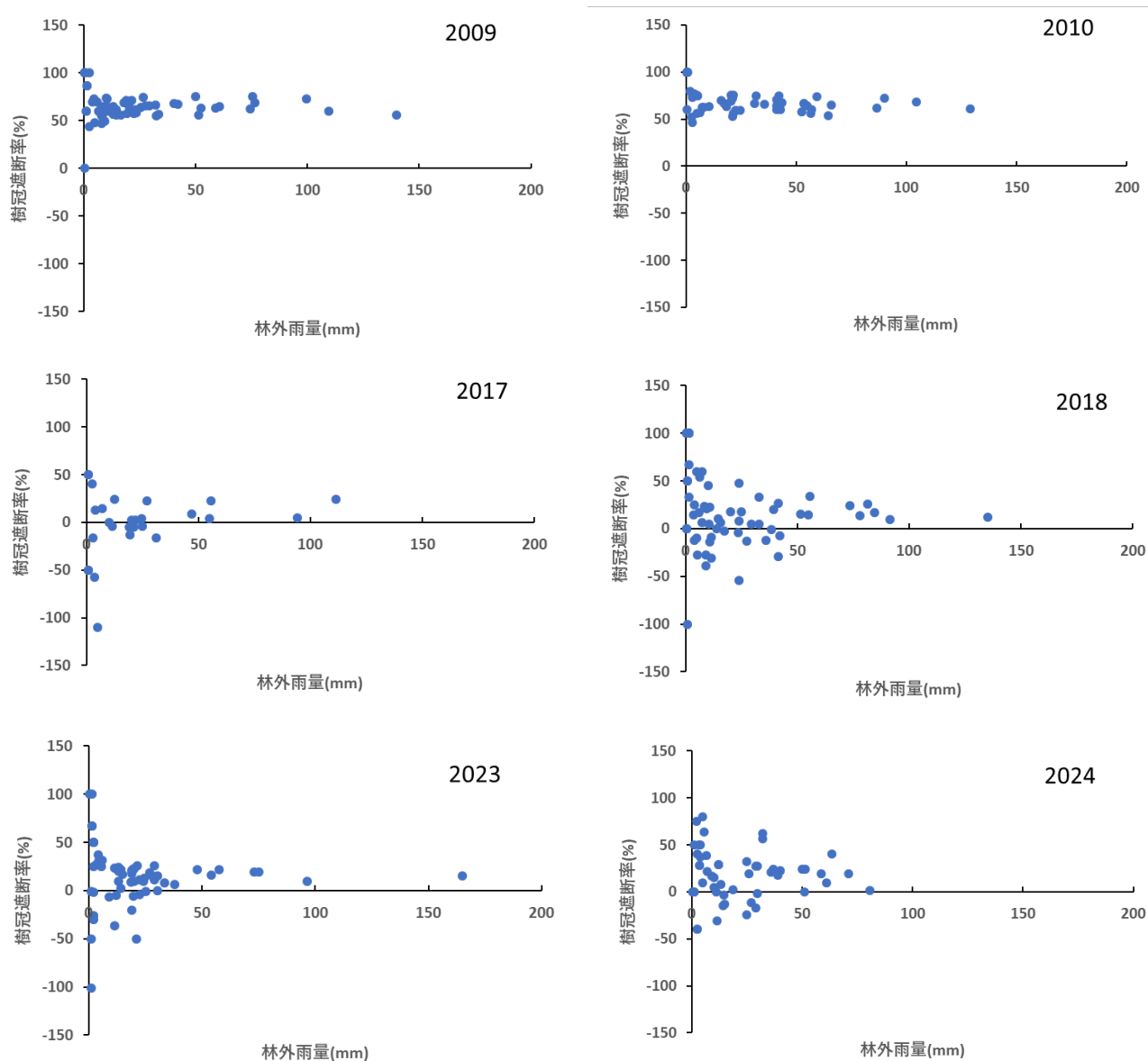


図-6 2009年～2024年におけるイベントごとの林外雨量と樹冠遮断率の関係

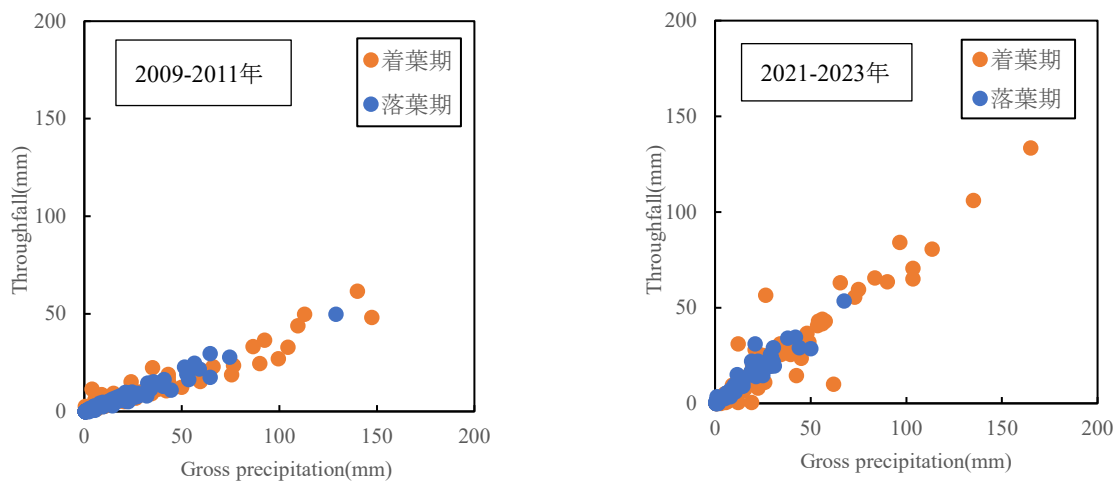


図-7 着葉期と落葉期における林外雨量と樹冠通過雨量の関係(左：2009-2011年、右：2021-2023年)

表-2 前期(2009、2010 年)と後期(2022、2023 年)の樹冠通過雨発生開始雨量比較

	前期	後期
平均 (mm)	1,08	1,54
最大 (mm)	13,5	8,5
最小 (mm)	0,5	0,5

5・1・5 樹冠貯留量について

図-8 に、2009 年と 2023 年の夏季のイベントにおける、累積の林外雨量と樹冠通過雨量、および樹冠貯留量を示す。樹冠貯留量は累積林外雨量から樹冠通過雨の積算和を引くことで求められ、この量は一定時間中に植生による貯留量と蒸発によって失われる量の和として考えられる¹⁴⁾。

2009 年は 6/10、18:10~6/11、8:20 までの 14 時間 10 分、2023 年は 5/19、7:40~5/19、22:20 の 14 時間 40 分降雨であり、イベント雨量は 2009 年：50mm、2023 年：48mm である。

どちらも雨の降り始めからしばらくたってから通過雨が現れ、樹冠通過雨の発生開始雨量は 2009 年が 1.5mm、2023 年は 2mm である。どちらも林外雨量の増加に従って通過雨が漸増するが、2009 年の降雨では通過雨の増加が緩やかであり、貯留量の増加がより早く起きており、最終遮断量は 37.6mm に収束する(遮断率 75%)。一方 2023 年降雨では林外雨量の増加に伴い通過雨が素早く反応して貯留量の増加は緩やかで最終遮断量は 11.5mm である。

植生による貯留量の最大量は枝葉の全面積の付着水量と一致するはずであり¹⁴⁾、2009 年のほうが樹齢は幼かったことから、結果は予想に反する。同強度の雨で貯留量が異なるのは、降雨中の蒸発や樹冠の複層化による滴下雨の差が考えられる。

5・1・6 樹冠遮断の総括

2016 年以前に比べ 2017 年以降は樹木の成長に伴いの遮断量が増加するはずだが、逆に 2017 年以降のほうが約 4 倍大きくなっている。その要因の一つは通過雨の空間的不均一性が変化したことや 1 つの観測点のみなどの観測上の問題が原因と考えられる。したがって両期間の遮断率・量データからは、直接経年変化比較を議論するのは難しいと考えられる。一方で後期の遮断量が林分の平均的な遮断率として妥当である。

5・2 流出特性の解析

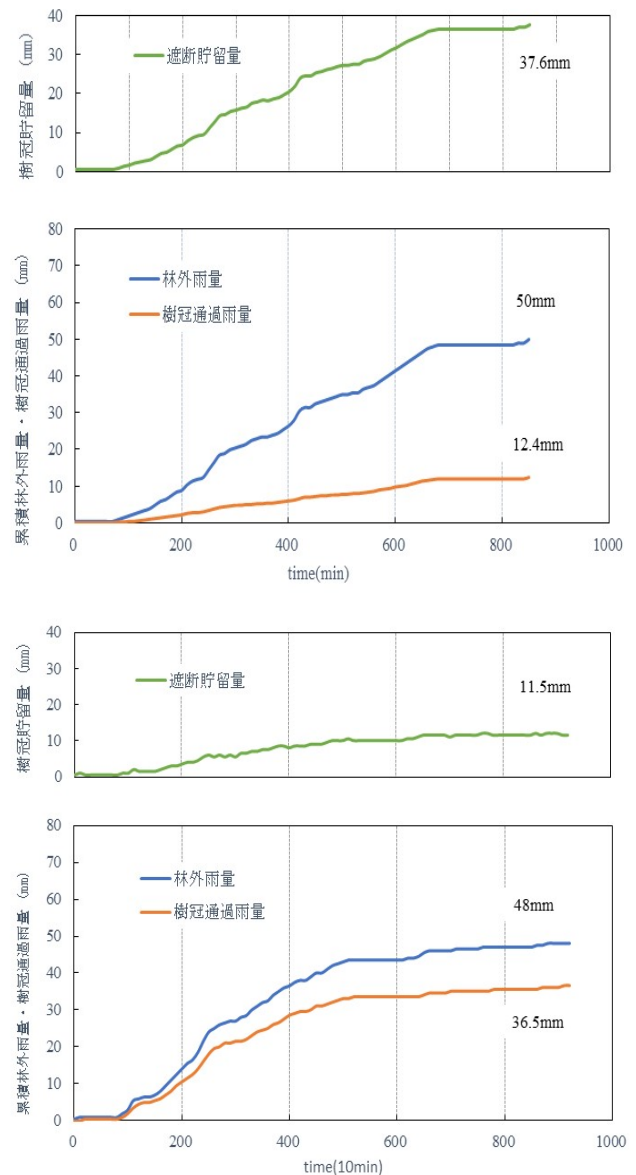


図-8 類似強度・同季節における累積林外雨量・樹冠通過雨量と樹冠貯留量の関係(上:2009 年 4 月 25~26 日の降雨、下:2023 年 5 月 12~14 日の降雨)

次は降雨イベント(以下イベント)時の流域の流出量に関して検討する。山地森林流域からの流出は直接流出と基底流出に概念上大別される。直接流出は降雨に対して鋭敏に反応し、数時間ないしは数日という短期間に比較的多量の水が流出する成分である。

5・2・1 直接流出率の経年変化

直接流出量を 1 イベントの総雨量で除して直接流出率(以下流出率)を求め、2009 年から 2024 年までのイベントごとの流出率を経年的に示した(図-9)。

広葉樹混交林を主体とした小流域における樹冠遮断と流域水収支の検討

2009 年～2011 年までは中央値が 10%付近だが、2012 年以降には 5～7%に減少し、2018 年以降 3～4 ポイントの上昇で、近年は最大値が 30%を超えるイベントがあるものの、中央値は 10%付近で比較的安定している。また年によって最大値の変動は大きいものの、最小値の変動は小さい。また 2013 年～2017 年間で最大値及び中央値がほかの年と比較して小さくなっているのは、100mm クラスの大きいイベントが欠測になっており計算できなかったことが要因の一つと考えられ、この間に大幅な流出特性の変化が起きたとは考えにくい。

5・2・2 林外雨量と直接流出量・率の関係

2009 年～2011 年の 3 年を I 期、2021 年～2023 年の 3 年を II 期としてイベント降水量に対する直接流出量、流出率を図-10、11 に示す。直接流出量については、I、II 期それぞれに保留量曲線(6、7 式)¹⁷⁾を回帰式で求めて描いている。得られた出水例は期間 I (3 ヶ年)が 35 例、期間 II (3 ヶ年)が 76 例である(表-3)。1～3 月のイベントがない年もあるものの、全般的には解析対象期間を通じてほぼまんべんなく出水例を得ることができた。

直接流出量は両期間で林外雨量に対する増加傾向は類似した傾向を示した。林外雨量に対する流出率の分布も前後期とも類似した傾向を示し、ほとんど流出特性に差がないように思える。そこで、両期間の直接流出量を Mann-Whitney の U 検定を用いて有意水準 5%で検定を行ったところ、 $P=0.027(p<0.05)$ であり、両期間の直接流出量に有意な差が認められた。特に図-5 からわかるように、100mm あたりまでのイベントなら、両期間でほとんど差がないものの、150mm の降雨の場合 I 期が II 期より 19mm 多くなり (I 期：流出率 43%→II 期：流出率 30%)、I 期が II 期に比べ直接流出量がより大きくなる傾向がある。これは流域で水源涵養機能の一つである洪水調節機能が機能していると考えられる

$$L = Lf(1 - e^{-kP}) \quad (6)$$

$$Q = P - Lf(1 - e^{-kP}) \quad (7)$$

ここで L:損失雨量(mm)、Lf:降雨直前の流域水分不足量(mm)、P:イベント降水量(mm)、k:曲線の曲がり具合を表すパラメータ、Q:直接流出量(mm)である。

表-3 出水例の数

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Total
2009	1	0	2	0	0	2	2	2	0	1	1	1	12
2010	0	0	0	1	1	2	3	1	1	2	0	2	13
2011	0	0	0	2	1	1	1	2	2	0	1	0	10
2012	0	1	2	1	0	1	1	1	2	2	1	1	13
2013	0	0	0	0	1	3	0	1	0	0	0	0	5
2014	0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1	0	6
2015	1	0	1	1	0	3	2	3	2	0	0	0	13
2016	1	0	0	1	2	2	2	0	0	0	0	1	9
2017	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0	4
2018	0	0	1	0	2	2	2	2	1	4	0	0	14
2019	0	0	0	0	1	3	4	3	1	4	0	0	16
2020	1	0	3	0	1	5	6	1	2	2	0	0	19
2021	2	2	5	5	4	6	3	3	4	2	3	2	41
2022	0	0	3	3	2	2	4	2	3	2	0	0	21
2023	0	1	1	2	3	1	0	0	0	2	2	2	14
2024	1	1	3	2	3	1	1	1	3	1	0	0	17

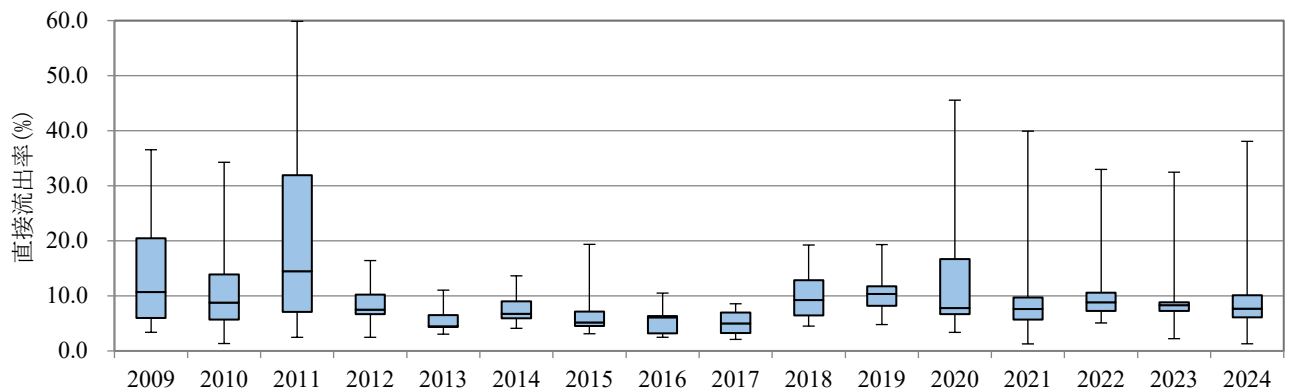


図-9 直接流出率の経年変化

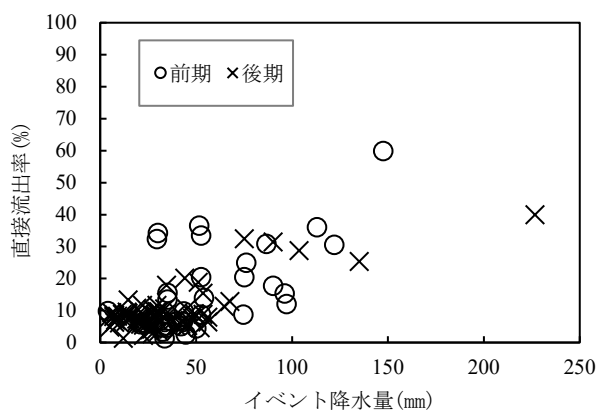


図-10 イベント降水量と直接流出率の関係

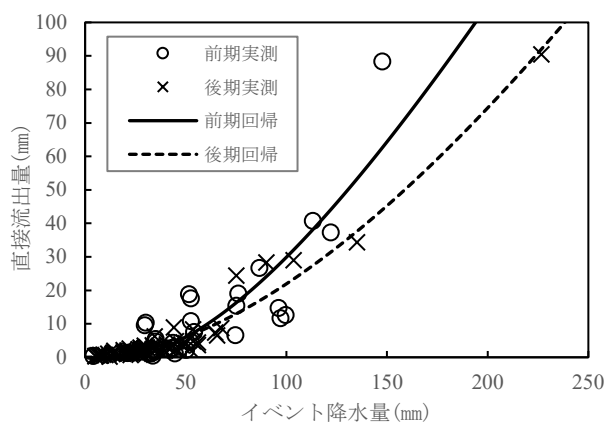


図-11 イベント降水量と直接流出量の関係(曲線の実線: I 期、破線: II 期)

5・2・3 初期流量と直接流出量

直接流出量は流域の乾湿状態に依存すると考えられるため、前期・後期において初期流量が 0.02mm/min 以上のイベントと、それより小さいイベントに分け、解析を行っ

た。この結果を定量化するため回帰式を求めた。前章と同様に保留量曲線の式形として一般に用いられる保留量曲線(6)と水収支式 $P=Q+L$ を用いて最小二乗法で回帰曲線をもとめた(図-12)。あてはめの結果得られた L_f と k を表-4 に示す。また降雨のうち、直接流出せずに一時的に流域に貯留される分は損失雨量または保留量と呼ばれる¹⁷⁾。

どちらの期間も、初期流量が大きいイベントほど直接流出量も大きくなるのがわかる。また初期流量が大きいグループほど L_f は小さく、 k は大きい傾向がある。また両係数ともほとんど差がない。しかし初期流量が小さいグループでは、I 期では回帰曲線が直線的になり、II 期の同条件と比べて L_f は約 10 倍であり、降雨に対して流出が増加しにくい傾向がみられた。すなわち初期流量が小さい場合は、I 期に比べ II 期が回帰曲線の傾きが大きく、流域が先行降雨の影響を受けていない場合、より流出しやすい可能性が示唆された。

李ら³⁾は 50 年間の間に山腹植栽による林相変化が高水流出に及ぼす影響を検討し、林相の良好化とともに直接流出成分が減少し地下水が豊富になることを示したが、本流域は初期流量のグループ分けによる直接流出量の増加傾向は確認できなかった。初期流量が少ない場合は、むしろ近年のほうが曲線の傾きが大きい。この結果の違いは、流域面積のスケールや解析の時間的スケールが異なっているからや、森林管理がなされている本流域の 15 年間では植生の変化が直接流出に与える影響は小さいためだと考えられる。また戎⁹⁾らは長期水文観測による森林状態の変化が流出特性、蒸発散量に大きな変化を与えないことを指摘しているが、これは本研究結果と似ている。今後 20~30 年後には、森林の発達による直接流出量の減少が顕著に表れると予想する。

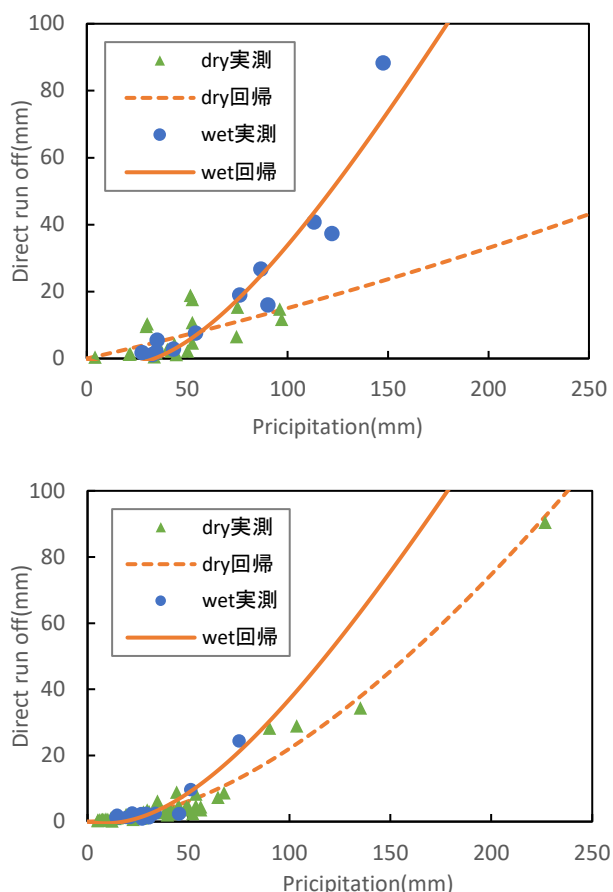


図-12 初期流量 q_0 で区別したイベント降水量と直接流出量の関係(上: I期、下: II期、図中の曲線は各グループに(7)式をあてはめたもの、曲線の実線: 初期流量 $q_0 \geq 0.02 \text{ mm/min} = \text{wet}$ 、破線: 初期流量 $q_0 \leq 0.02 \text{ mm/min}$)

表-4 初期流量で場合分けしたデータに対する(7)式のあてはめ結果

期間	初期流量クラス	Lf(mm)	k
I期	$q_0 < 0.02 \text{ mm/min}$ (dry)	2465.2	0.000351
	$q_0 \geq 0.02 \text{ mm/min}$ (wet)	85.4	0.014894
II期	$q_0 < 0.02 \text{ mm/min}$ (dry)	198.5	0.004987
	$q_0 \geq 0.02 \text{ mm/min}$ (wet)	87.2	0.012823

5・2・4 直接流出量の定量的解析

5・2・3項において、初期流量によって、流域の降雨直前の水分不足量(最大損失量) L_f , k が変化することを示した。ここで、初期流量と直接流出量に与える影響を定量的に解析した研究に、真板ら¹⁷⁾、芝野¹⁸⁾がある。芝野は東京大学愛知演習林の白坂・数成・穴宮の3流域における出水例の解析により L_f と初期流量 $q_0 (\text{mm/day})$ は(8.1)式の関係が見いだされることを示し、また真板らは芝野の式を修正した(8.2)式を示した。本解析では(8.2)式を用いる。また、8・2・3項より、 L_f と k の関係はほぼ $L_f \cdot k = 1$ の関係が成り立つので、 $L_f \cdot k = 1$ と仮定し、(7)式から k を消去した(9)式を用いる。フィッティングパラメータは l_s , l_0 の2つである。

$$Lf(q_0) = \frac{l_s}{\sqrt{q_0}} \quad (8.1)$$

$$Lf(q_0) = \frac{l_s}{\sqrt{q_0}} + l_0 \quad (8.2)$$

$$Q = P - L_f(q_0) \left(1 - e^{-\frac{P}{L_f(q_0)}} \right) \quad (9)$$

ここで l_s , l_0 : 流域の初期損失量の特性を表現するパラメータ(単位はそれぞれ $\text{mm}^{3/2} \text{min}^{-1/2}$, mm)。

(8.2)式および(9)式を、期間別にデータをあてはめ、最小二乗法で l_s , l_0 を求めた。その結果を表-5に示す。また推定式によって計算された直接流出量と観測値の比較を図-13に示した。I期ではややばらつきが大きい、II期では点の分布は1:1ラインの上に沿っており、推定値に特定の偏りは見られなかった。推定値と観測値の決定係数はI期で0.83、II期で0.97である。

表-5の最適パラメータを見ると、期間Iから期間IIで l_s は約1.6倍、 l_0 は-25と減少した。 l_s と l_0 は初期流量 q_0 と流域水分不足量 L_f に関連付けられるパラメータであるので、 l_s と l_0 の変化は、 q_0 と L_f の関係の変化を意味する。流域の水分分布特性が変化したと考えられる。

表-5 (8.1)式および(9)式のあてはめた最適パラメータ

期間	$l_s [\text{mm}^{3/2} \text{min}^{-1/2}]$	$l_0 [\text{mm}]$
I	15.16	25.55
II	23.34	0

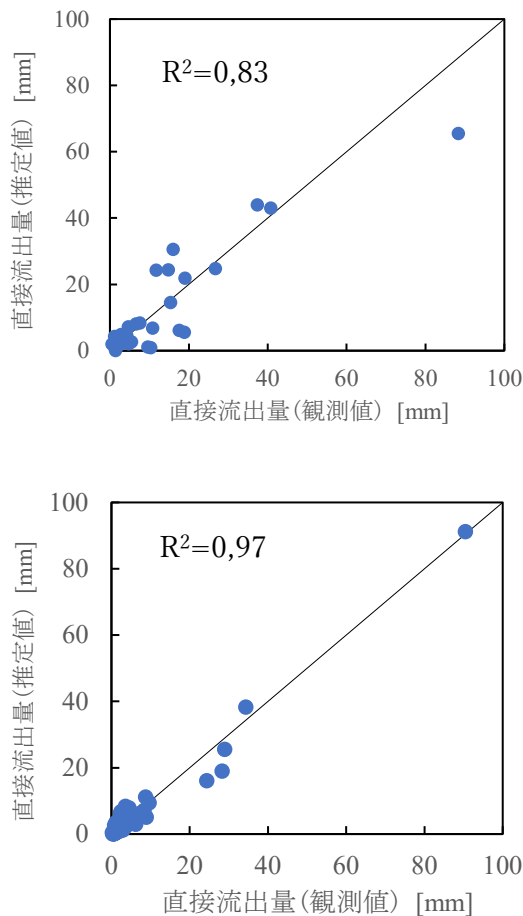


図-13 直接流出量の観測値と推定値(上: I 期、下: II 期)
(図の直線は 1:1 ライン)

5・2・5 EC を用いた降雨流出ハイドログラフの成分分離

降雨流出ハイドログラフの成分を検討することは、流出発生機構を理解するうえで基本であり、従来から様々な概念モデルが構築された。さらに、降雨流出プロセスとともに水質も変化する¹⁹⁾。本稿では、降雨流出を構成する水そのものが持つトレーサー情報の 1 つである、EC を用いた降雨流出ハイドログラフの降水成分(直接流出成分)と地下水成分(基底流出成分)の 2 成分分離を考える。

降雨時に、ある任意の河川断面を通過する流出水の成分は、降水成分と地下水成分によって構成されると仮定すると、以下の物質収支式であらわされ、(10.1)式を連立し(10.2)式を得る。

$$\begin{aligned} Q_t &= Q_n + Q_o \\ C_t Q_t &= C_n Q_n + C_o Q_o \end{aligned} \quad (10.1)$$

$$Q_o = \frac{C_t - C_n}{C_o - C_n} Q_t \quad (10.2)$$

ただし Q : 流量、 C : トレーサー濃度、 t : 総流出水、 n : 降水成分、 o : 地下水成分である²⁰⁾。

本稿では、 n を降水、 o を基底流出時の河川水により代表させ、 Q_n 、 Q_o 以外の各項を実測値により総流出水に占める地下水成分の割合を推定する。またトレーサーとしては、降雨期間内において時間変動しないことが求められ、 ^2H や ^{18}O などの安定同位体が理想的だが、降雨によっては降水と地下水でほぼ同じ安定同位体組成を示すことがある。したがって、保存性の観点からは不完全であるものの、降水と地下水との間で、トレーサー濃度が顕著に異なる条件に当てはまる電気伝導度(EC)を用いる。

図-14 に EC をトレーサーに用いたハイドログラフの 2 成分分離図を示す。降雨は 2024/7/12 のイベントを用い、イベント降水量は 25mm である。また、 $C_o = 5.115[\text{mS/m}]$ 、 $C_n = 0.3[\text{mS/m}]$ である。降雨 ECC_n は、本来は降雨初めの観測値が望ましいが、今回は 16 時時点の実測値を用いる。図から、降雨開始の 3 時間後までは地下水成分と総流出水はほぼ一致し約 0.07mm/min までは増加する。その後は総流出のほうが大きくなり、その後の変動は総流出にそうように推移し、ピーク時を除き全体的に地下水成分が降雨中も卓越することがわかる。既往研究では花崗岩からなる山地流域において基盤岩地下水の流出が降雨流出過程に重要な役割を果たしていることが示されており²¹⁾、本流域でも地下水成分が卓越していることから、降雨流出時の地下水成分が重要であると考えられる。

また、従来の直接流出成分分離と、今回のトレーサーによる分離方法での成分量の比較を表-5 に示す。表から、基底流出成分はトレーサー解析の結果が、従来の結果の約 2.5 倍であり、直接流出率は従来の方法より 2 ポイント小さくなった。したがって本流域における直接流出量(総流出-基底流出)は多く見積もられている可能性があることが示唆された。

5・3 流域の水収支について

5・1・6 項で述べたように後期における樹冠遮断量は既往研究からも林分を代表する値であるといえる。さらに直接流出量の解析により後期における年間直接流出量が求まる。したがって水収支式(11)²²⁾より、本流域の水収支を定量的に求めることができる。

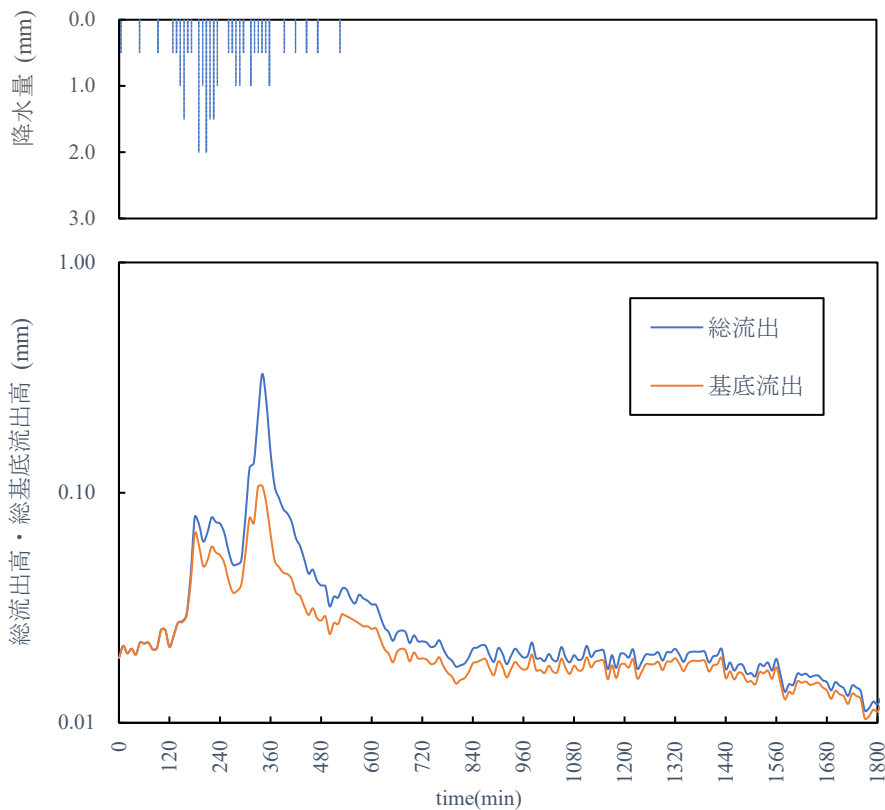


図-14 EC をトレーサーとしたハイドログラフの二成分分離図
(2024/7/12 降雨，雨の降りははじめを 0 分とした)

表-5 同じイベントにおける 2 種類のハイドログラフの成分分離方法による成分量比較(2024/7/12 降雨)

	3 点法	トレーサー分離
総雨量(mm)	25	25
総流出(mm)	3.38	5.16
直接流出(mm)	2.00	1.54
基底流出(mm)	1.38	3.62
流出率(%)	8.00	6.16

$$P = Q + E \pm \Delta S \tag{11}$$

ここで R:降水、流出：Q、蒸発散：E、ΔS：対象期間の前後における流域の貯留水量差である。

今回は年単位での水収支を考えるため ΔS を無視できるものとする²²⁾。本流域の年平均降水量は 1400mm(P)、年平均流出量は約 1000mm(Q)である。したがって、(11)式より推定される蒸発散量は 400mm である。さらに、図-4 と樹冠遮断率が妥当とされる 2017 年以降の年で抽出した

2019～2021 年、2024 年の計 4 年間の年平均樹冠遮断量は 277mm であることから、植生の蒸散量は 123mm と推定される。年降水量に占める蒸発散量の割合は約 28.6%である。ここで、森林の蒸散量は 250mm～430mm の範囲に位置する²³⁾ことを考慮すると本流域では小さい。ただ、広葉樹林の蒸散量が年降水量に占める割合が 26%である²⁴⁾ことや、落葉広葉樹が多いほど蒸発散量が小さくなる²⁵⁾を踏まえると、遮断蒸発と蒸散を含めた森林の蒸発散量については妥当だといえる。

また、2021 年の総直接流出量を代表し、年平均直接流出量を 200mm とすると、基底流出量および総雨量に占める基底流出量の割合は 800mm、57%である。また、年流出量に占める基底流出量の割合は約 80%で、直接流出量の約 5 倍である。したがって本流域において基底流出成分が卓越しており、ホトケ沢への安定した供給源として確保される。

年降水量に対して、少なくとも半分以上は安定して利用できる水資源が確保される。年降水量に占める蒸発散、直接流出量、基底流出量の割合を図-15 に示す。

仮に年間 1400mm の降雨が降ったと仮定すると、樹冠遮断によって 1123mm が林床に達し、そのうちの 123mm は蒸散となって森林が使用し損失となる。したがって 1000mm は流出となるわけだが、そのうちイベント時に直接流出として流れ出るのが 200mm あり、流域に涵養または基底流出として存在するのが約 800mm である。

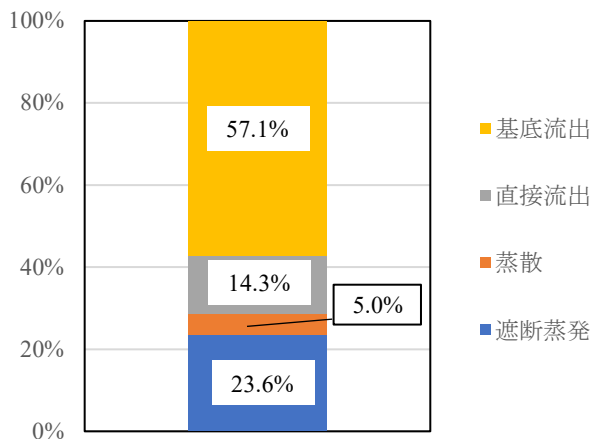


図-15 本流域における年単位での年降水量に占める基底流出、直接流出、遮断蒸発、蒸散の割合

6. まとめ

海上の森の小流域を対象として、2009 年からの水文観測データの再解析の結果以下のことがわかった。

- 1) 上層に落葉広葉樹(コナラ)、下層に常緑広葉樹(ヤブツバキ)の樹冠を持つ樹木の樹冠遮断率は、2009～2016 年において約 60～80%、2017～2024 年で約 10～30%であり経年的に減少傾向である。しかし一般に森林の成長に伴い遮断率は低下するため、本研究は逆の結果である。これは通過雨の空間的不均一性が変化したことや観測上の問題が原因と考えられる。また 2017 年以降の遮断率のほうが妥当な値であり、比較的林分を代表する値と言える。
- 2) また樹冠貯留量の時系列変化から、同規模の降雨において 2009 年のほうが 2023 年に比べ全体的に通過雨の増加が抑えられており、最終的には 3 倍の差が生じる。さらに林外雨量に対する遮断率の分布から、2009、2010 年はどの大きさのイベントでも高い遮断率を保つが、2017 年以降においては 1～50mm 程度の小中規模のイベントにおける遮断率のばらつきが大きくなっている。これらの要因は当時の樹冠構造がわからないため断定できない

が、下層の常緑樹の発達によって複層構造になることで、樹冠内の水移動プロセスが変化した可能性が示唆される。

- 3) 2009～2011 年をⅠ期、2021～2023 年をⅡ期として直接流出量を分析した結果、両期間ともおよそ 60mm 規模のイベントまでは緩い傾きで推移するが、それ以上の規模のイベントではⅡ期がやや流出量が少ない傾向にあった。また両期間ともに初期流量が大きいほど直接流出量が大きく、初期流量が大きいグループでは両期間に差はないものの、初期流量が小さいグループではⅡ期>Ⅰ期と、初期流量で区別しない場合の直接流出量と異なる結果となった。また直接流出率は両期間ともに有意な差がなく、流出特性に顕著な変化を見いだせなかった。
- 4) (9)式によって直接流出量の定式化を行い、Ⅰ期で $R^2=0.83$ 、Ⅱ期において $R^2=0.97$ の精度で推定できた。
- 5) 本流域では年間降水量に対して 70～75%が流出し、そのうち約 70%が基底流出成分である。また EC の解析結果より、基底流出成分が少なく見積もられていることを踏まえ、本流域に降った雨水のうちホトケ沢への安定した供給源として確保される水資源量が少なくとも 50%存在すると考えられる。

7. 今後の発展

本研究では複層構造の樹冠を持つ地点の樹冠通過雨量の実測データから、2017 年以降の遮断の妥当性を検討し、それを用いて流域の水収支を検討し、基底流出成分が卓越することがわかった。今後は基底流出量の評価や、流域における樹冠遮断量のモデル化またはパラメータの関連付けを行うことや、水収支法で求めた蒸散量は気温、湿度、土壌水分などに依存するため、ペンマン式等²⁶⁾によってパラメータの関連付けを行い、本流域での水文量を精度よく評価していく必要がある。

また本流域は庄内川流域の中間山地の広葉樹流域であり、この部分的な流域の水収支から、流域治水における流出抑制効果等の治水対策の知見として発展させていくことを期待する。

謝辞

本研究は、海上の森における観測がメインであった。観測機器の設置や度重なる機器の修理をはじめ、長期間にわたり継続的な水文観測と資料の蓄積に尽力された、本学の河川・環境研究室卒業生の先輩方、また機器の設置を許可いただいた愛知県海上の森センタ-の職員の皆様に厚く御礼申し上げます。さらに、名古屋大学大学院生命農学研究科の五味高志先生に、森林水文学の観点から研究について多大なご助言をいただきました。ここに感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 森林水文学編集委員会編：森林水文学-森林の水のゆくえを科学する，p14，森北出版株式会社，2007.
- 2) 太田，高橋，竹内：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・水資源学会誌第3巻1号，pp.17-25，1990.
- 3) 李憲浩，芝野博文，西尾邦彦：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-，東大農学部園主林報告，80，109-128，1988
- 4) 児島利治，Edwina ZANAL，大池永子，大橋慶介，篠田成郎：タンクモデルと長期水文観測データを用いた森林小集水域における緑のダム機能の評価
- 5) 戎 信宏，佐藤嘉展，高瀬恵次：山地森林小流域の長期観測による年間水収支に関する考察
- 6) 赤堀良介，池戸正和，重野雄大，新実智嗣：海上の森の造成地周辺における水文量の変化。平成26年度愛知県海上の森調査報告：p209-229，2015.
- 7) あいち海上の森センタ-(愛知県)：森林モニタリング調査，海上の森調査報告，第4号平成26年度.
- 8) 稲垣晴己：海上の森における樹冠遮断に着目した水文調査，令和4年度愛知工業大学工学部土木工学科河川・環境研究室卒業論文集，2022.
- 9) 筑波大学水文科学研究室(杉田倫明・田中正)：水文科学，p106，2009
- 10) 筑波大学水文科学研究室(杉田倫明・田中正)：水文科学，p105，2009
- 11) 渡邊信剛，児島利治，篠田成郎，大橋慶介，玉川一郎，斎藤琢：常緑樹林および落葉樹林における樹冠遮断現象の現地観測とそのモデル化，土木学会論文集 B1(水工学)Vol68，No4，I_1759-I_1764，2012.
- 12) 塚本良則：森林水文学，文永堂出版，p173.
- 13) 若手水文学研究会：現場のための水文学(1)-流出解析その1，開発土木研究所月報第485号，1993.
- 14) 村井宏：森林植生における降水のしゃ断についての研究，林試研報 Bull, Gov, For, Exp, Sta, No.232，pp25~64，1970.
- 15) 佐藤嘉展，久米篤，大槻恭一，小川滋：樹冠構造の違いが樹冠通過雨の分布特性に及ぼす影響-スギ林とマテバシイ林における樹冠通過雨特性の比較-，水文・水資源学会誌 Vol16，No6(2003)，pp.605-617
- 16) R.F.Keim，A.E.Skaugest，M.Weilter：Temporal persistence of spatial patterns in throughfall，2005.3.18.
- 17) 真板英一，鈴木雅一：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，Vol22，No5，Sep.2009，pp.342-355.
- 18) 芝野博文：水源帯における流出過程に関する研究(I) 流出過程の分析，東京大学農学部演習林報告，78号，p.305-378
- 19) 筑波大学水文科学研究室(杉田倫明・田中正)：水文科学，p169,2009
- 20) 筑波大学水文科学研究室(杉田倫明・田中正)：水文科学，p170,2009
- 21) 辻村真貴，田中正：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
- 22) 杉田倫明，田中正：筑波大学水文科学研究室，水文科学，p11，2009
- 23) 塚本良則：森林水文学，文永堂出版，p91
- 24) 久田重田，千家正照，伊藤健吾：人工針葉樹林流域と落葉広葉樹林流域における水収支特性の比較，農業農村工学会全国大会講演要旨集 pp.224-225，2009
- 25) 森林水文学編集委員会編：森林水文学-森林の水のゆくえを科学する，p137，森北出版株式会社，2007.

(受理 令和7年3月19日)