

降雨流出に及ぼす山腹斜面の影響

..いわゆる「緑のダム」の洪水調節効果の流域水文学的検討..

宝 馨・立川康人・児島利治・可児良昭*・池淵周一

*京都大学大学院工学研究科

要 旨

山林の洪水調節効果を流域スケールで定量的に調べた。セル分布型流出モデルを用いて、100km²の流域を約4万個の50m×50mの単位セルに分割して、各セルに透水性の高い山腹斜面表層を想定し、それによって貯留される雨水、貯留されずに流出する雨水の時間的推移を定量的に示した。特に、50年～200年確率というような大雨を想定した場合について調べ、水量の観点から見た「緑のダム」の効果と限界を明らかにした。

キーワード：緑のダム，降雨流出，分布型流出モデル，洪水調節機能，定量的評価

1. はじめに

我が国では、山腹斜面は森林で覆われ、透水性の高い表層土壌をもつことが多い。このような山腹斜面は、降水を貯留し、流出を抑制することが知られている。いわゆる「緑のダム」の保水機能や洪水調節機能と呼ばれる機能である。この機能は定性的には認識され、試験地などの狭い流域では定量的に検討されていても、降雨流出の抑制や洪水の緩和の効果が、いったいどの程度の降雨に対してどれくらいの効果を発揮するのかを流域スケールで定量的に調べた研究は少ない。

本研究では、筆者らがこれまで開発してきた飽和・不飽和速報浸透流を考慮した斜面流出モデル(立川ら, 2004)とセル分布型流出モデル(児島ら, 1998)を用いて、流域からの流出に及ぼす森林山腹斜面の効果を調べた。すなわち、100km²の流域を約4万個の50m×50mの単位セルに分割して、各セルに透水性の高い山腹斜面表層を想定し、それによって貯留される雨水、貯留されずに流出する雨水の時間的推移を定量的に示した。特に、50年～200年確率というような大雨が生じた場合について調べ、水量の観

点から見た「緑のダム」の効果と限界を明らかにした。

2. 山腹斜面といわゆる「緑のダム」

2.1 山腹斜面の機能

我が国の山腹斜面のかなりの部分は森林で覆われている。森林の重要な機能として、以下のようなものが知られている(宝, 1998)。

- ・生態系機能---動物や植物の生息、遺伝子資源の保存
- ・物質循環機能---エネルギー、水と物質の循環の場
- ・地球環境維持機能---気候の安定化、酸素供給、炭素固定(温暖化抑制)
- ・治水機能---流出抑制(洪水流量の減少、土砂生産量の減少)
- ・利水機能---水資源涵養、表流水浄化
- ・地域環境維持機能---自然に満ちた空間、健康で快適な生活環境を提供
- ・レクリエーション機能---キャンプ、オリエンテーリング、森林浴、動植物採取・狩猟

・ 生産機能---木材, 食糧, ゴム, 油, 薬など
その一方で, 悪い (人間にとって迷惑な) 方の機能としては,

- ・ 動物による被害---害虫・害鳥・嫌悪感を与える生物・野獣の生息
 - ・ 植物による被害---スギなどの花粉の散乱, 毒性の植物の繁茂
- などがある。

森林は, 流域に降った雨を遮断, 貯留するとともに地中から水を吸い上げて蒸発散により大気へ水を返す。降雨が終了ししばらく晴れの日が続いても, 山からは清涼な水が河川に供給され, 山地溪流ではその水を楽しむことができる。これは, 表層土壌にしみこんで貯留された雨水, さらに深部に浸透した山体の地下水がゆっくりと河川溪流に流出してくることによる。

一方, 山腹表面に近いところでは, 植生が土中の水分を根から吸い上げ蒸散作用により土中の水分を大気中に排出する。また, 晴天が続くと蒸発により, 山腹の水分が大気に返される。雨量の少ない時期や場所において植生が存在すると, 逆に, 河川に出てくる水が少なくなるのである。

雨が降ると, 山林のある山腹斜面はスポンジのように雨水を吸収し, ゆっくり雨水を流出させる効果があるので, 山林がなく表層土壌が発達していない山腹斜面に比べて河川流量が小さくなり, その分長期にわたって流出が続くことになる。すなわち, 山林の効果により流出現象が比較的穏やかになり時間的にも長く続くことになる。

森林のある山腹斜面には, 空隙が多く透水性の高い A 層と呼ばれる表層土壌がある。この土壌中に浸透した雨水は, 土壌中を斜面に沿って下方に移動する。その際, 斜面を伝って下方に飽和状態であるいは不飽和状態で流れる。これを中間流 (はやい中間流) という。また, 表層土壌に降った雨が浸透流下しその下にある透水性の低い地盤や岩盤に到達して, そこからさらに深部に浸透する。深部に到達した雨水は地下水流としてゆっくりと山体を流下し, 下方の河川・湖沼や扇状地などに流れ出る。このような一連の降雨流出過程において, 雨水が山腹に貯留される効果があるので, 特に山林を「緑のダム」と称し, その洪水緩和や水資源貯留の機能に衆目が集まっているところである。

これらの機能は一見望ましいので, 短絡的に「山に木を植えたら全て解決, 「緑のダムが実現できれば大丈夫」というような議論に終始することも少なくない。蔵治 (2003) は, 「森は緑のダム」という言葉が, 科学的な裏付けなしに情緒的, 観念的に用いられてきているとして, これまで世界や日本でどの

ような研究がなされ, どのような結果が得られているのかを整理・紹介している。

2.2 緑のダム?

平成 13 (2001) 年 11 月に公表された日本学術会議「地球環境・人間生活にかかわる農業および森林の多面的な機能の評価について (答申)」には, 森林の水源涵養機能 (緑のダム論) に関する記述がある。

それによると, いわゆる「緑のダム」機能とは「水源涵養機能」のことであり, 「水源涵養機能」=「洪水緩和機能」+「水資源貯留機能」+「水質浄化機能」としている。そして, 「しかし, 森林整備だけで, 洪水を抑え, 水源を確保することはできません。

(スポンジ論)」として, 洪水緩和機能の限界を「大洪水時には, すでに, 初期の降雨が土壌中に充満しているため, ピーク流量の低減効果は大きくは期待できません。森林は, 中小洪水においては洪水緩和機能を発揮しますが, 大洪水においては顕著な効果は期待できません。」と表現している。ここでは, 流出が緩和されるとしてもどの程度の豪雨にまでその効果が発揮されるのかということ等については, 定量的に言及されてはいない。

上述のような山林の蒸発散が水資源量を減らす効果があることから, 緑のダムに否定的な意見もある。例えば, 榎根 (2002) は, 「森林は『緑のダム』である」という俗説が流布している。しかし実際は, 森林は蒸発散の作用で大気中へ水を余分に失わせるので, 水源涵養という面から見ると『緑のダム』説は間違いである。(中略) つまり森林にはダムのように水をためる能力はない。したがって, 水源涵養機能だけを考えれば森林は『緑のダム』ではなく『緑のフライパン』ということになる。」と述べている。

2.3 山腹斜面と雨水流出に関する過去の研究

山腹斜面の表層土壌が流出に及ぼす影響に関する研究は, 1930 代からなされてきている (たとえば, 金丸・高棹 (1975) pp. 112-114 を見よ)。1960 年代には, 山腹斜面や山林の役割については, 水文学的観点から, 実証的・理論的にまた定性的に知られていた。さらに古くは 1910 年代から, 森林水文学の研究者们によって, 主として試験流域や大学の演習林などにおいて詳細な研究が積み重ねられてきた。いわゆる「森林理水試験」である (たとえば, 中野 (1976) の pp. 159-188)。1980 年代には, 小川 (1983ab), 小林ら (1984), 福嶋 (1987), 鈴木 (1988), 鈴木・福嶋 (1989) らによって, 流出に及ぼす山腹斜面の影響の定量的な評価研究がなされている (塚本, 1992)。

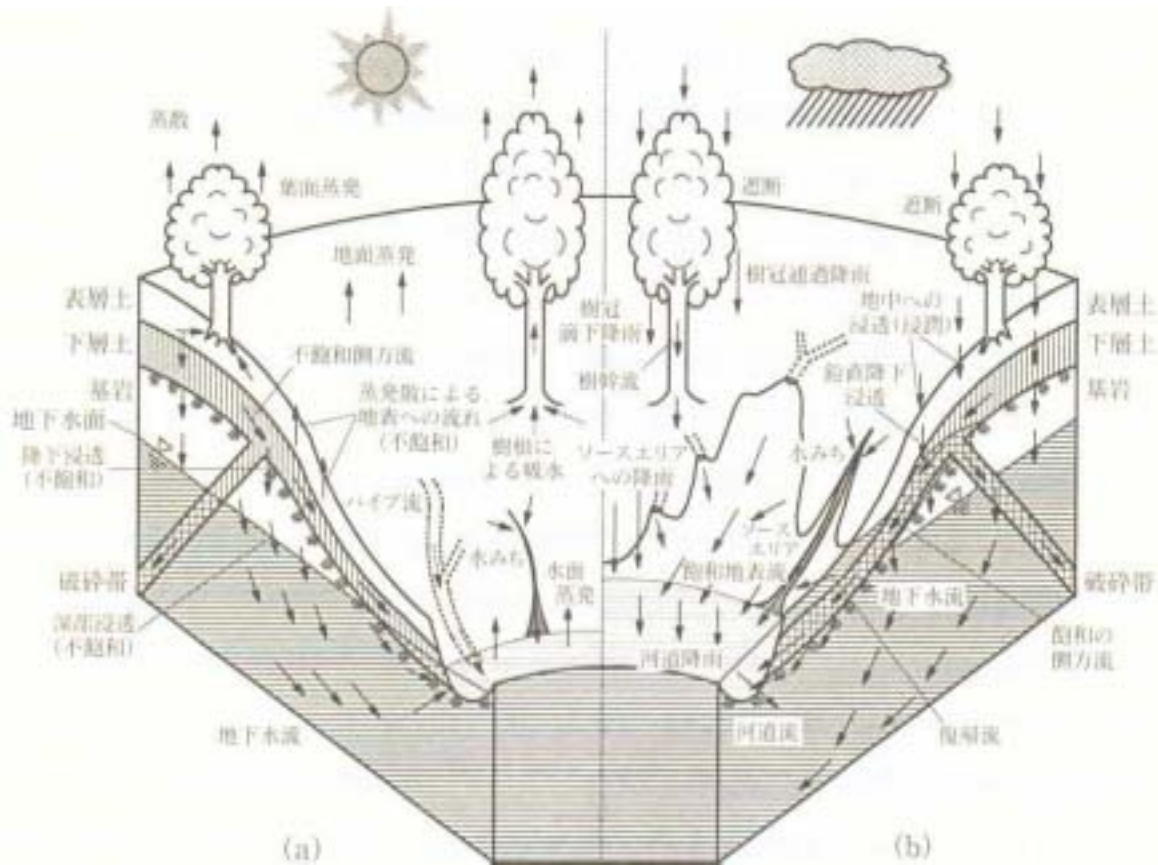


Fig. 1 森林における降雨流出過程 (塚本(1992), p. 126の図を翻案; 宝 (1998))
 (a) 無降雨時 (大雨後1週間程度経過した時期) (b) 大雨時

ただし、従来の山林効果の研究は、斜面レベル・試験地レベルの話が多く、その対象とする流域がかなり狭い(ほとんどが100ha=1km²程度以下の面積)。流域スケールでの定量的な議論がほとんどできていなかったと言える。

また、洪水がたまにしか起こらない現象であり、洪水が起こったとしてもその時に量水堰が土砂で埋まったり、破壊されたりして流量の把握が出来ないことも多いので、中小洪水時の観測データで議論していることが多かった。そして、このような事情により、数十から数百平方キロメートルというようなダム流域レベルでの話がしにくかったのである。

山腹斜面の様相を極めて単純化すると Fig. 1 のようになる。実際には、さらに複雑な様相を示す。Fig. 1 で、若干説明を加えると、左側 (a) は、晴天が続いた場合で、樹木からの蒸散、葉面・地面・水面からの蒸発など、山腹斜面から大気へ水分が出て行く現象が卓越する。一方、右側 (b) は降雨時であり、降雨は樹冠(木の葉や枝など)で一部捉えられ(遮断という)、樹冠を通過した降雨が地面に到達する。

樹木がなければ雨は直接地面に降る。樹木や草で覆われた山腹の地表面には、表層に透水性の高い土壌がある。ここでは、雨水は地中に浸透(浸潤)し、一部はさらに深部に浸透し地下水流となる。地下水流とならなかったものは、山腹斜面表層を斜面に沿って側方浸透流あるいは地中流(専門的には中間流とも呼ばれる)として流下する。地中を流下する過程で、表層を飽和させ地表面に水が出て地表面流となることもある。これを飽和地表流と呼ぶ。飽和地表流が発生しているところでは雨水は極めて早く流出するので、早い流出成分の源泉という意味でソースエリアと呼ばれたり、この発生場所は、場所的に限られているので partial source area (部分寄与域)とか、時間的に変化するので variable source area (変動飽和流出域)などと呼ばれたりする。

山林におけるこうした透水性の高い表土層は、樹木の落ち葉や下草などが腐食してできた土壌であり、樹木の種類やその混在の仕方、年齢などにより、土壌の厚さ、雨水が流れる空隙の多さや透水性は異なる。

また、普段はほとんど水が流れていないが、降雨時に地表面流として水を流す、いわゆる水みちも存在する。このような一時的な水みち、林道、踏地などの透水性の低い地表面や岩石が露出した部分も山腹には存在する。そこでは、降った雨はすぐに流下する。

一口に山腹斜面といっても、上述のように、その中で水の移動は極めて複雑であり、それを厳密に追跡するのは一筋縄ではいかない。水文学、あるいは、森林水文学の分野では、この現象をある程度単純化して、山腹からの雨水流出を定量的に推定する手法やモデルを考案している。いわゆる、山腹斜面の流れを追跡する水理学的モデルであって、特性曲線法、等価粗度法とか kinematic wave 法と呼ばれる雨水追跡型流出モデルである。

これは、Fig. 2(a)のように山腹斜面上の流れを取り扱うものであり、斜面の条件を、その斜面の粗さ（等価粗度：斜面の水の流れにくさを定めるモデル定数）という概念で表して、水理学の開水路流れの比較的簡単な方法で計算する手法である。コンピュータの発達していない時代には、解析的に特性曲線理論を用いて準線型偏微分方程式を解いていたので、特性曲線法と呼ばれた。1954年頃から日本では使われ始めていた（岩垣・末石，1954；末石，1955）のであるが、そのことはあまり知られていない。このモデルを使うと、洪水の到達時間や、流出に及ぼす斜面と河道の役割を、理論的・定量的に明らかにできる（石原・高棹，1959）。

その後、高棹は、1930年代のホートンの研究に端を発する流域地表面における流出機構に関する1960年代初頭までの一連の研究をレビューし、山腹斜面表土層（A層（活性層）と呼ぶ）における中間流の重要性を詳細に検討した（石原・高棹，1962）。また、由良川流域における現地踏査と出水記録から、山腹斜面表土層（A層）の状態を推定する基本的な考え方を提示している（石原・石原・高棹・頼，1962）。こうして、従来、斜面表土層の存在を無視して、斜面の効果を等価粗度という一つのモデル定数に押し込めて取り扱っていたのを、Fig. 2(b)のように、A層を陽に取り入れたような流出解析法として取り扱ったのである（石原・高棹，1962）。上述の変動飽和流出域（1964年のベトソンや1970年のダンらによるソースエリア、パーシャルエリア）の考え方は、Fig. 2(b)に見るように、1962年の段階で我が国において、表面流発生域（occurrence area）という形で既に発表されていたのである。

今日では、Fig. 2(b)のような地中流（いわゆるはやい中間流）と地表面流を一括して、kinematic wave モデルとして、斜面の流れをコンピュータで計算で

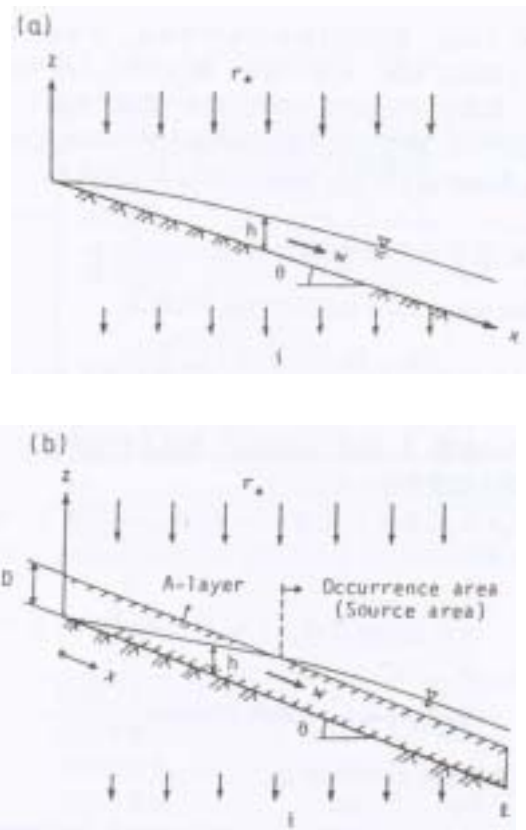


Fig. 2 表面流出系 (a) および表面流出・中間流出系 (b)

きる。また、斜面が、単純な平面ではなく、収束したり発散したりしているような場合にも計算ができるようになっている（高棹・椎葉，1981）。さらに、立川ら（2004）は、斜面表層の飽和浸透流・不飽和浸透流を一括して追跡する kinematic wave モデルへと展開している。

3. 流域からの雨水流出を算定する方法

3.1 貯留型モデルと雨水流モデル

タンクモデル（菅原，1972，1979）は、日単位雨量系列を用いて長い期間の流出解析を行う場合に有用であり、世界的によく用いられてきた。また、時間雨量系列を用いた短期流出計算にも用いられている。ただし、このモデルでは、1つ1つの斜面の構造が全く考慮されていない。山腹土壌の特性は、タンクの穴の高さや大きさを表すモデル定数というに間接的に組み込まれているだけである。土壌の厚さが変わるとどうなるか、流域が開発され森林が農地に、あるいは、宅地になるとどうなるかを解析し

たり予測したりするのは難しい。数十から数百平方キロメートルの流域を、1つのタンクモデル（もう少し一般的に言えば、雨水貯留型流出モデル）で表すことが多いが、その場合には、流域の中身の構造や変化は取り扱えないのである。

我が国の河川実務でよく使われている貯留関数法（木村，1961，1962）も同様の貯留型流出モデルである。当初，数十から数百 km² の流域に対して一つの貯留関数モデルを用いることが多かったが，流域を多数の部分流域と河道システムに分け，それぞれに対して貯留関数モデルを用いられている。部分流域ごとに異なるモデル定数を与えることができるが，タンクモデル同様，モデル定数の値と流域特性との関係が明確でない。星・山岡（1982）は，地表面流 kinematic wave モデルと貯留関数モデルの関係を理論的に導いており，貯留関数モデルの定数と斜面定数との関係を明らかにした。ただし，山腹表層の存在については考慮されていない。

一方，山腹斜面の流れを追跡する水文学的モデルが近年よく使われるようになった。前述のような特性曲線法，等価粗度法あるいは kinematic wave 法と呼ばれる雨水追跡型流出モデルである。ところで，流域の中には多数の斜面があり，多数の河道が存在する。これをいちいち計算していくことができるであろうか。

梶根（1980）は，流出モデルに関して，

- (a) 流出は降雨のあと流域から比較的早く流出してくる直接流出と，持続的に流出のつづく地下水流出に分類できる。
- (b) 直接流出を構成している流れは，水面上の降雨，地表流，側方浸透流（パイプ流を含む）である。
- (c) 地表流の発生域として水流近傍の飽和面が重要で，この面積は時間とともに変化する。
- (d) 一般に森林山地では，降雨直後の流出の主体は側方浸透流であるが，ピーク流量時でも地下水流出の寄与は無視できない。
- (e) 地表流，側方浸透流，地下水流出の寄与率は流域の地形，地質，土壌，植生などによって大きく異なる。

と整理したうえで，さらに次のように述べている。

「流出モデルは以上の結果を再現できるものでなければならないが，すでに菅原（1972）やフリーズが指摘しているように，地表水と地中水を含めた流域内の水循環を微分方程式群で表現し，それらの解として流出量を求めることは，少なくとも現在では自然界に関する情報の不足と理論の不完全さ，および電算機の容量不足のため出来ない。したがって，モデルの不完全さを補うために実用を目的としたパラメタライゼーションがさけられず，既に多数の流

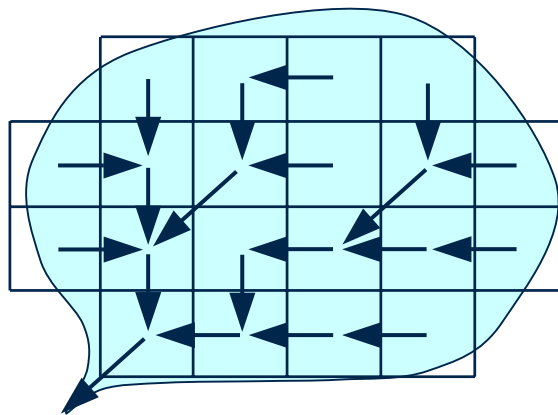


Fig. 3 セル分布型モデルの概念図

出モデルが発表されている。」

その当時から25年経った。前述のように雨水流法で，地中流（中間流）と表面流を統合して計算できる。また，自然界に関する情報として，紙地図からデジタル地図の時代になり，50mの解像度で地形情報が容易に手に入ることとなった。航空機や衛星リモートセンシングにより，土地被覆や植生活性度などがさらに高い解像度で得られるようになった。後で示すように，流域全体で何万個という斜面とそれに接続する河道網を想定して，それら全てに雨水流法で水の動きをパソコンで追跡計算できるほどの時代となったのである。

このような流域全体を考えるモデルによって，いよいよ「緑のダム」の効果が定量化できるようになった。以下では，最近，筆者らが100k m²程度の面積をもつ流域で，50m四方の斜面を流域全体に4万個以上も配して行った洪水計算結果を示し，山腹斜面が降雨流出に及ぼす効果を定量的に示すこととする。

3.2 セル分布型流出モデル

Fig. 3は，筆者らが用いている流出モデル（セル分布型流出モデルと呼んでいる）を単純化して示したものである（児島ら，1998）。流域にメッシュ（網）をかけ，その網の一つ一つの正方形区画（矩形セル）に降った雨を最急勾配方向に追跡する。勾配は各セルの標高差より求まる。雨は最寄りの雨量観測所の値を使う。各セルの中は前述の kinematic wave モデルを用いて雨水流を追跡する。所定の空間分解能の矩形セルによって流域を覆い尽くし，一つ一つのセルが山腹斜面，農地，都市域，河川を含む地域などを表すもので，各セルにおいて雨水が流下し，その直下のセルに流出するというモデルである。

セルのサイズは，利用できる地形情報，地理情報の空間分解能に応じて決める。たとえば，100k m²の流域を50m×50mのセルで覆い尽くす場合，4万個のセルについて雨水流出を追跡することになる。その

計算が今では容易に行いうる。このような詳細な流出計算ツールが手元にあるので、山腹斜面の流出機構を定量的に解明することが今日いよいよ可能になったと言える。

筆者らはこのセル分布型流出モデルによって、河川流域の地形情報、地理情報を10mから250mの空間分解能で取り扱って、我が国の河川流域の流出計算（児島ら，1998）や、インドネシア・ジャワ島の火山性土壌を持つ流域における土砂流出の計算（佐山・寶，2003）を行ってきた。最近では、山腹斜面のセルについては、表層内の地中流を飽和・不飽和浸透流として記述し、地表面流と統合して解析できるようになっている（立川ら，2004）。

3.3 計算手順

降雨流出に及ぼす山腹斜面の影響を解析するため、本研究では、以下の手順を用いる。

- (1) 集水面積 100 km² 程度の森林で覆われた山地流域を対象とする。
- (2) 空間分解能 50 m の数値地形情報 (DEM) を用いそれを UTM 座標に変換し、流域全体を 50m×50m の多数のセルに分割する。
- (3) 各セルの雨水の流れ方向と勾配は DEM および河道網の数値化位置データにより規定される。セルの土地被覆は森林とし、この土地被覆がセルの等価粗度を規定する。
- (4) セルに入力される降雨は近傍の雨量観測所のデータを用いる。
- (5) 過去の雨量・流量データから、斜面表層厚、表層内の空隙率、飽和浸透層厚、不飽和浸透層厚、透水係数、表面流等価粗度などの斜面パラメータを同定・検証する。
- (6) 表層の厚さ、降雨規模などの組み合わせを変えて降雨流出シミュレーションを行い、当該流域の山腹斜面の流出緩和機能を、降雨量、流域全体の斜面表層における貯留水量、出水流量に基づいて定量的に評価する。

本研究では、滋賀県東北部の高時川流域(100 km²)を対象とする。Fig. 4 から Fig. 6 に、50 m メッシュの数値標高データ (DEM) とそれから得られた落水線図、流下方向図を示す。

50m×50m の各セルは表層土壌で覆われるものとし、Fig. 7 に示すように、飽和・不飽和浸透流を考慮する。そのときの kinematic wave 式は Fig. 8 で与えられる（立川ら，2003）。

ちょうど 100 km² の流域を 50 m×50 m のセルで覆い尽くすと、40,042 個のセルに分割された。また、雨量は、3 箇所の地上観測所のものを用い、各セルに最も近い雨量計のデータを、そのセルへの入力と

して用いる。

4 . モデル同定の結果と RRS 図

4.1 パラメータ同定

1998 年 9 月 21 日～23 日の間に生じた洪水事象に対し、セル分布型洪水流出モデルの同定を行った。河道セルを除くすべてのセルが森林で被覆され同一の表層を有しているという条件で、等価粗度を固定（森林で 0.7、河道で 0.05）し、表層厚 D 、不飽和浸透に関するパラメータ β 、透水係数 K 、流域下流端での初期流量 QI をキャリブレーションした。

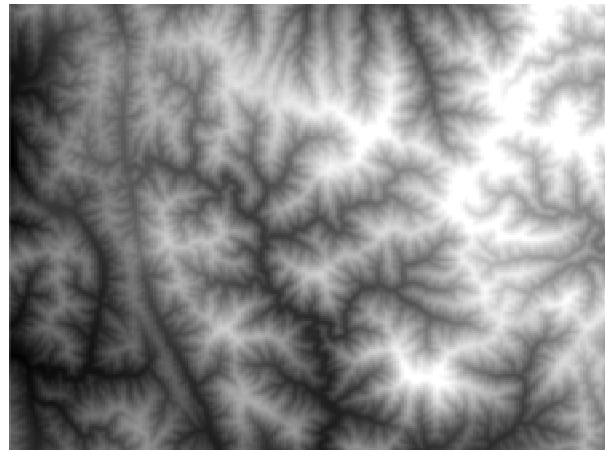


Fig. 4 高時川流域を含む地域の 50 m 分解能の数値標高データ (DEM)



Fig. 5 空間分解能 250 m の DEM から得られた高時川流域の落水線図（実際の計算では 50m の分解能で計算しているが、表示の都合上 250 m のものを例として示す）



Fig. 6 流下方向図

試行錯誤的同定法によって、それぞれ、 $D=850$ (mm), $K=0.005$ (m/s), $\beta=4$, $QI=5.0$ (m³/s) を最適値と見なした (Fig. 9)。

ここで得られたパラメタによれば、表層厚 850mm, 飽和・不飽和浸透層の実質深さは 170mm と推定された。これは、高棹 (2001) が示唆した 160mm, 石原ら (1962) が由良川において導出した 120mm と近い値であると言える。面積 100 km² の流域に一樣に分布する 170mm の表層が充満されるときに水量は 17 百万 m³ となる。

4.2 RSS 図

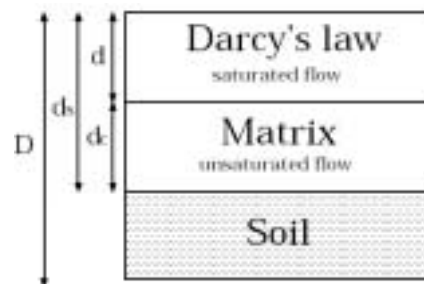
Fig. 9 最下段に注目して頂きたい。4 本のグラフのうち、右側が水平な直線になっているのが、毎時毎時の雨量を順に加算 (累加) していった曲線である。これを累加雨量曲線という。降雨が終了下地点で、累加雨量曲線は水平になり、このときは合計すると 170mm の雨が降ったことがわかる。累加雨量曲線と同様に、ゼロから始まり、途中から上昇しているグラフが流量を累加した曲線である (累加流出曲線という)。流量 (m³/s) を、流域面積を考慮して mm 単位に変換し流出高さで表していることに留意されたい。

その他の 2 つの曲線のうち上側のグラフ (貯留高曲線) は、山腹斜面に貯留されていると推定される雨水の量 (これも mm 単位で表現) の変化を表す。これは流域を覆い尽くす 4 万個以上 (40042 個) の 50m 四方のセルに貯留されている水量をすべて足し合わせて求めたものである。その下側のグラフは、貯留量のうち、不飽和層に蓄えられた分を参考のため示している。

これらのグラフにより、「緑のダム」と言われる森林に覆われた山腹斜面の貯水量と、雨量・流出量が流域規模で直接比較できることになった。「緑のダム」の効果を見るには、この Fig. 9 に示された累加雨量曲線、累加流出曲線、貯留高曲線の三者を比較

表層土壌をもつ斜面流出モデル (立川ら, 2003 京大防災研年報)

土層が右図のように3層からなると仮定した土壌水の飽和・不飽和流れを考慮した Kinematic waveモデル



$$q = \begin{cases} a_c d_c \left(\frac{h}{d_c}\right)^\beta & (0 \leq h \leq d_c) \quad \text{不飽和状態} \\ a_c d_c + a(h - d_c) & (d_c < h \leq d_s) \quad \text{飽和状態(中間流)} \\ a_c d_c + a(h - d_c) + \alpha(h - d_s)^m & (d_s < h) \quad \text{飽和状態(地表面流)} \end{cases}$$

Fig. 7 斜面流出モデル (立川ら, 2003, 2004)

Kinematic wave model

連続式
$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r \cos \theta$$

運動式
$$q = f(h)$$

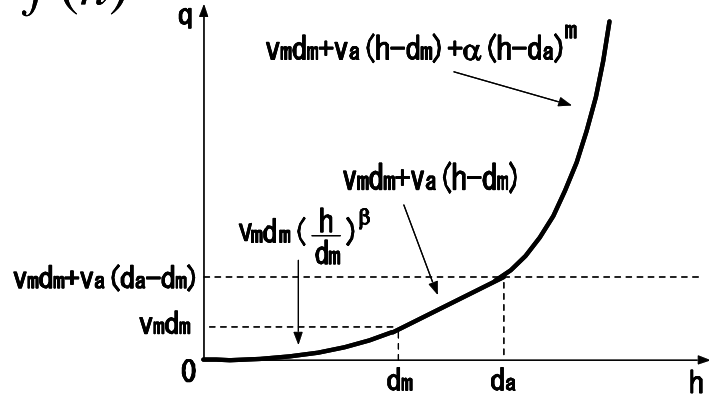
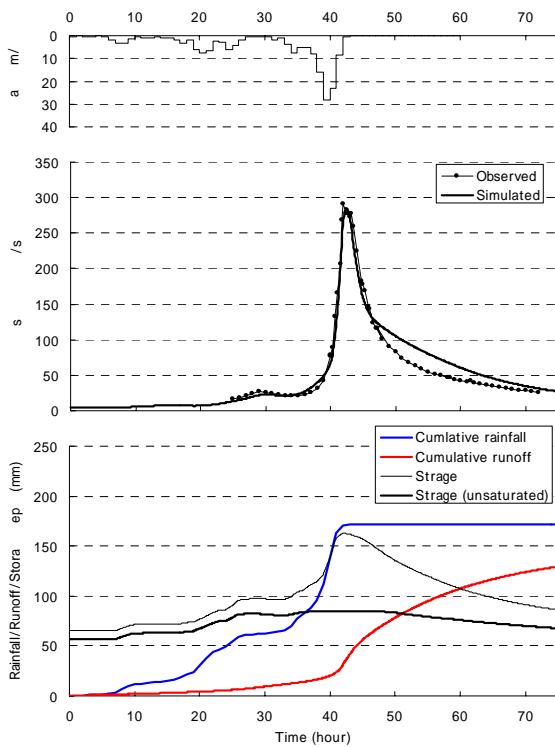


Fig. 8 飽和・不飽和流れの kinematic wave モデル



1998/9/21 - 23

K: 0.005
 Ganmas: 0.2
 Ganmac: 0.1
 Beta: 4
 Asou: 850
 QI: 5.0
 N(forest): 0.7
 N(river): 0.05

Fig. 9 同定されたパラメタによる再現ハイドログラフ (1998年9月21-23日の出水)

すればよい。Fig. 9 の洪水の時には、170mm の雨が降った。Fig. 9 によれば、貯留高曲線は 160mm まで上

昇しており、この時に降った雨は、ほとんど山腹斜面に貯留されたことが見て取れる。「緑のダム」が効

果を發揮した典型的な例である。流域全体が最も湿ったところで、ちょうどたまたま降雨が終了し、貯留高曲線が低減を始める（表層に貯められていた雨水が河川に流出し始める時に洪水ハイドログラフはピークになったことが分かる。

流域に降った雨、流出量と貯留量の関係とそれらの時間的变化をこのように明瞭に表したのはこの図が初めてであり、「緑のダム」の効果を流域レベルで水文学的に明らかにしたことになる。

5. 確率降雨による検討および考察

この流域で想定される50年確率から200年確率の豪雨（2日雨量で350mmから480mmミリ程度）に対して「緑のダム」は、どの程度の洪水緩和効果を發揮するのであろうか。以下では、このことについて考察を加えてみる。

5.1 確率降雨による検討（矩形降雨の場合）

当該流域の50, 100, 150, 200年確率2日雨量は、1896-1996年の101年間の年最大2日雨量に一般化極値（GEV）分布をあてはめて、それぞれ、357, 415, 451, 478 mmであることが知られている。

この雨量が2日間のうちに時間的に一定強度で降るとするとどうなるであろうか。50年確率の357mmが2日間に降るとすると、Fig. 10のようになる。時間が経過すると、与えた平均雨量強度に相当する洪水流出の値に到達し、ハイドログラフが水平（流出量が一定）になる。すなわち、ある程度時間が経つと、表層土壌に雨水が十分に溜まりきってしまい、降った雨量の分がそのまま流出してくるのである。2日間（48時間）に時間的に一様に357mm降るということは、毎時約7.4mmの時間量があるということになる。これを流量に直すと、206 m³/sとなる。

表層に貯留されている雨水の量の時間変化、流出の変化が、Fig. 10の下段の貯留高、累加流出のグラフを見るとよく分かる。中段のハイドログラフを見ると、流量が増加して100 m³/sに到達するのが降雨開始から13時間後ぐらい、200 m³/sに到達するのが降雨開始から20時間後ぐらいであることがわかる。

さらに強い雨が降る極端な例として、200年確率の降雨（478mm）が2日間にわたって時間的に一様に（毎時約10mm）降るとすると、Fig. 11のようになる。中段のハイドログラフを見ると、流量が増加して100 m³/sに到達するのが降雨開始から10時間後ぐらい、200 m³/sに到達するのが降雨開始から14時間後ぐらいであることがわかる。このとき、ピーク流量は、276 m³/sである。

結局、表層の空隙が、流域全体に170mm相当ある

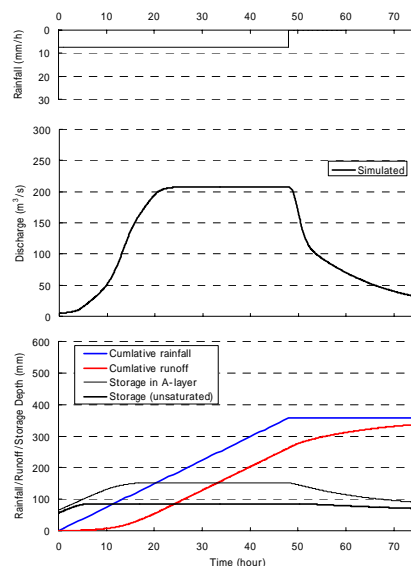


Fig. 10 50年確率雨量（矩形降雨）に対する降雨流出の関係

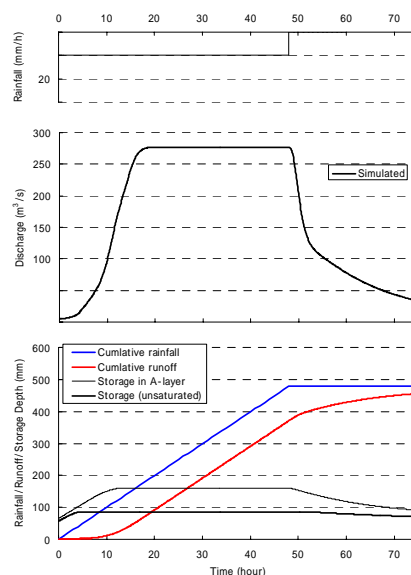


Fig. 11 200年確率雨量（矩形降雨）に対する降雨流出の関係

としても、50年確率の357mmが2日間降り続いたとすれば、そのうちの187mmに相当する雨水は表層に蓄えることができず、流域外に流下する。この水量は、流域面積をかけると、1870万tになる。100年確率、200年確率の場合はそれぞれ、2450万t、3080万tということになる。

この図の上段から順に、ハイドログラフ、ハイドログラフ、RRS図を示している。RRS図（mm単位で表示されている）を見るとわかるように、最終的には総流出量は、累加雨量415mmに漸近するが、表層での貯留は160mmで頭打ちになっており、これがいわゆる緑のダムの貯留しうる上限値であると言える。

5.2 確率降雨による検討（三角形降雨の場合）

雨の実際の降り方を考えると、48時間の間ずっと一定強度で降ることはなく、時間的に変動する。したがって、ピーク雨量はさらに大きくなる。Fig. 12に示すように、時間的に変化する降雨（三角形に時間分布する降雨）を考えると、50年確率では、ピーク時間雨量が14mm程度、ピーク流量が380m³/sとなり、Fig. 10の場合に比べてピーク流量が1.8倍以上になる。200年確率（Fig. 13）では、ピーク時間雨量が20mm程度、ピーク流量が510m³/sとなり、Fig. 11の場合に比べてピーク流量が同様に1.8倍以上になる。

流域全体が、良好な表層土壌を持つ森林で十分に覆われていたとしても、ここで定量的に示したように、100年確率雨量に対して、2450万tという雨水は山腹斜面に貯留することは出来ず、流域外に流下していく。また、440m³/sというようなピーク流量が発生する。すなわち、このような大雨が発生すると、流量はかなり大きい、それをすべて森林の表層土壌に溜め込むことは到底不可能であることがわかる。これを安全に流下させる河道を設計するか、ピーク流量を低減させる貯留施設が必要であるということになる。

また、ここでは流域全体が良好な表層土壌を持つ森林で覆われていると仮定している。実際には、森林以外の土地被覆も存在するので、この仮定は「緑のダム」にとっては有利な設定であると言える。目一杯「緑のダム」の効果を発揮したとしても処理できない雨水の量が、筆者らのモデルによって定量化できることを示したわけである。

なお、山腹表層の厚さや空隙率については、既往の多数の研究があり、結局、有効な空隙は100~200mm程度に相当するようである。（たとえば、石原・高棟、1962や金丸・高棟、1975）

5.3 緑のダムは人工ダムに匹敵するか

ここで取り扱った流域の最下流端には、人工ダムの計画がある。その洪水調節容量は、3300万tなので、この集水域の「緑のダム」の容量の二倍に相当する。ということは、流域がかなり乾燥している状況であれば、人工ダム+「緑のダム」は、200年確率2日雨量（478ミリ）に相当する容量を持つことになる。流域が十分に湿っている状態であれば、3300万tは、50年確率2日雨量（357ミリ）に相当する水量にも満たない。なお、この人工ダムの総貯水容量は1億5000百万tであり、仮に空っぽであれば、100年確率級の雨を3回立て続けに受け止めることができる。森林域の表層土壌のみに頼る「緑のダム」にはこのようなことを期待すべくもない。

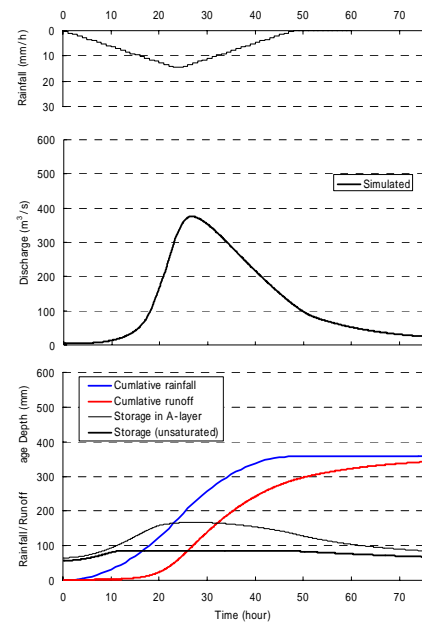


Fig. 12 50年確率雨量（三角形降雨）に対する降雨流出の関係

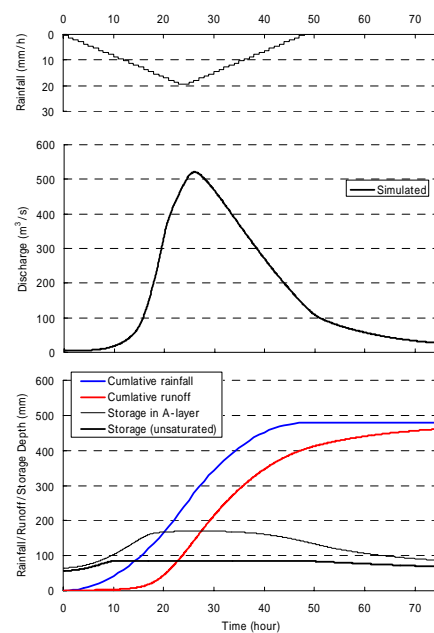


Fig. 13 200年確率雨量（三角形降雨）に対する降雨流出の関係

山林およびその表層土壌は、洪水緩和について一定の効果を発揮するが、大雨時には限界があるということはずっと以前から認識されてきた。実際の洪水防御計画（治水計画）においては、こうした山林の洪水調節効果は織り込み済みで治水施設の計画・設計がなされてきたのである。

「緑のダム」という言葉が、いかにも環境保全の万能薬のように用いられている現状を憂慮している。政治的なプロパガンダに利用されている側面がないとも言えない。

我が国は、面積比率からいえば、森林は諸外国に比べて十分にある。ただし、特に近年、森林の手入れが行き届いていないことがしばしば指摘されている。山林の土壌の発達に損なわれ、保水能力が低くなっているところも多数あると言われている。それらをすべて良好な山林に整備することは大歓迎である。洪水流出緩和（治水）という観点からは、「緑のダム」と称される良好な山林の実現に反対する者は皆無であろう。しかしながら、ここで指摘したいのは、良好な山林に整備し尽くしたとしても、治水の観点からは限界があることに留意しなければならないということである。

本研究では、山林の洪水流出緩和機能に着目し、「緑のダム」の限界貯留量を定量的に評価することを試みた。そのために、物理的基礎を持つ水文学的モデルを山腹斜面系に用いることにより、科学的知見を提示しようとしたのである。セル分布型流出モデルのような、山腹斜面表層を陽に詳細にとらえたモデルとここで提案したような RRS 図を用いることにより、山腹斜面表層に実際に貯留される水量を定量的に時系列の形で表現することができた。

こうした方法を多数の流域に適用して、「緑のダム」の洪水調節効果とその限界をさらに明らかにしていきたいと考える。

謝 辞

本研究は、(財)河川環境管理財団より、平成 15 年度河川整備基金助成を受けて実施したものである。また、ここで用いた降雨流出データは、水資源開発公団（現・水資源機構）が作成した委員会資料ならびに滋賀県より提供されたものである。ここに記して謝意を表する次第である。

- 石原藤次郎・高棹琢馬（1959）：単位図法とその適用に関する基礎的研究，土木学会論文集，第 60 号別冊（3-3），pp. 1-34.
- 石原藤次郎・高棹琢馬（1962）：中間流出現象とそれが流出過程に及ぼす影響について，土木学会論文集，第 79 号，pp. 15-23.
- 小川 滋（1983a）：山林地における水土保持機能の定量的評価について（I）---機能評価のための流出モデル，水利科学，149，pp. 51-73.
- 小川 滋（1983b）：山林地における水土保持機能の定量的評価について（II）---評価モデルと評価方法，水利科学，150，pp. 10-23.
- 金丸昭治・高棹琢馬（1975）：水文学，朝倉土木工学講座 4，朝倉書店，pp. 91-215.
- 榎根 勇（1980）：水文学，自然地理学講座 3，pp. 245-254.
- 榎根 勇（2002）：水と女神の風土，古今書院，pp. 238-239.
- 木村俊晃（1961, 1962）：貯留関数法，土木技術資料，3-2，4-1，4-4，4-5，4-6.
- 蔵治光一郎（2003）森林の緑のダム機能（水源涵養機能）とその強化に向けて，（社）日本治山治水協会，76 pp.
- 児島利治・宝 馨・岡 太郎・千歳知礼（1998）：ラスタ型空間情報の分解能が洪水流出解析結果に及ぼす影響，水工学論文集，土木学会，第 42 巻，pp. 157-162.
- 小林慎太郎・田中丸治哉・丸山利輔（1984）：造成農地の流域および洪水流出特性---農地造成に伴う流出特性の変化（I），農業土木学会論文集，第 113 号，pp. 241-247.
- 佐山敬洋・寶 馨（2003）：土木学会論文集，第 726 号/II-62，pp. 1-9
- 菅原正巳（1972）：流出解析法，水文学講座，共立出版 257 pp.
- 菅原正巳（1979）：続・流出解析法，水文学講座別巻，共立出版，269 pp.
- 鈴木雅一（1988）：山地流域の流出に与える森林の影響評価のための流況解析，日本林学会誌，70（6），pp. 261-268.
- 鈴木雅一・福嶋義宏（1989）：風化花崗岩山地における裸地と森林の土砂生産量---滋賀県南部，田上山地の調査資料から，水利科学，190，pp. 89-100.
- 高棹琢馬・椎葉充晴（1981）：Kinematic Wave 法への集水効果の導入，京都大学防災研究所年報，第 24 号 B-2，pp. 159-170.
- 宝 馨（1998）：森林の流域への影響，岩波講座・地

- 球環境学第7巻, 水循環と流域環境 (高橋裕・河田恵昭 編), pp. 40-69.
- 立川康人・永谷 言・寶 馨 (2003) : 分布型洪水流出モデルにおける空間分布入力情報の有効性の評価, 京都大学防災研究所年報, 第46号B, pp. 233-248.
- 立川康人・永谷 言・寶 馨 (2004) : 飽和不飽和流れの機構を導入した流量流積関係式の開発, 水工学論文集, 土木学会, 第48巻, pp. 7-12.
- 塚本良則 (編) (1992) : 森林水文学, 文永堂出版, 現代の林学6, 319 pp.
- 中野秀章 (1976) : 森林水文学, 共立出版, 水文学講座13, 228 pp.
- 福嶋義宏 (1987) : 花崗岩山地における山腹植栽の流出に与える影響, 水利科学, 177, pp. 17-34.
- 星 清・山岡 勲 (1982) : 雨水流法と貯留関数法の相互関係, 第26回水理講演会論文集, 土木学会, pp. 273-278.

Flood Control Function of Mountain Slopes Covered with Forests
--- Quantitative assessment of the effects of so-called 'green dam' from the viewpoint of basin-scale hydrology ---

Kaoru TAKARA, Yasuto TACHIKAWA, Toshiharu KOJIMA, Yoshiaki KANI* and
Shuichi IKEBUCHI

* Graduate School of Engineering, Kyoto University

Synopsis

This paper describes the effectiveness and limit of so-called 'green dam' against floods. A grid-cell based distributed rainfall-runoff model with 50-m spatial resolution is used for evaluating storage capacity of the soil layers on mountain slopes as well as flood runoff from a river basin with a catchment area of 100 km². The RRS (rainfall-runoff-storage) diagram is very useful to evaluate the storage/flood control function of the mountain slope as typically indicated here.

Keywords: green dam, rainfall runoff, distributed runoff model, flood control function, quantitative evaluation

