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

児島 利治^{1*}・Edwina ZAINAL²・大池 永子³・大橋 慶介³・篠田 成郎⁴

¹岐阜大学流域圏科学研究センター (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)

²岐阜大学大学院工学研究科 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)

³岐阜大学工学部 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)

⁴岐阜大学総合情報メディアセンター (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)

* E-mail: kojima@green.gifu-u.ac.jp

森林による水源涵養機能の重要性は、我が国では緑のダムとして一般にも認知されているが、定量的評価は不十分である。岐阜県中津川市の森林集水域を対象とし、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、緑のダム機能の解明、評価を行った。第1段タンクの側方流出孔係数は森林の生長に伴い減少傾向を示し、洪水緩和機能の向上を確認した。一方、森林の生長による変化は主に表土層厚、粗大孔隙の増加であり、地下水帯への浸透に関する基岩の割れ目等は増加しないと、タンク下部浸透孔の係数が経年変化しなくとも側方流出孔係数の経年変化のみでピーク流量を低減し、地下水涵養量増加させる効果があることが示された。

Key Words : *aquifer recharge, water resource conservation, forest soil, percolation, climate change*

1. はじめに

平成12年の農林水産大臣の日本学術会議への諮問¹⁾において言及されているように、国土・自然環境の保全等の森林の多面的機能は国民生活及び国民経済の安定に重要な役割を果たしているが、その価値を定量的に評価することは困難である。森林の多面的機能の中でも、水源涵養機能は緑のダムとも呼ばれ、一般にも広く認知された森林機能の一つである。上述の諮問を受けた日本学術会議の答申「地球環境・人間生活にかかわる農業及び森林の多面的な機能の評価について」²⁾では、森林の持つ多面的機能のうち、水源涵養機能を洪水緩和、水資源貯留、水量調節、水資源浄化機能としている。特に、洪水緩和機能は森林が洪水流出ハイドログラフのピーク流量を減少させピーク流量発生までの時間を遅らせ減水部を緩やかにする機能であり、水資源貯留機能は無降雨日に河川流量を確保する機能である。これら2つの機能から森林を「緑のダム」と称する根拠と説明している。森林における水源涵養機能は様々な水文過程の組み合わせにより発生するものでありその定量化は極めて困難であるが、森林水文分野の研究者らによって、主に山腹斜面に

おける流出に対する影響の定量的な評価研究がされている^{3),4)}。水源涵養機能は、i) 森林の表層土壌の空隙にスポンジのように雨水を貯留し降水後に徐々に浸み出すことにより直接流出のピークを低減する機能、ii) 樹冠部における降水の遮断蒸発現象により降水の2割程度⁵⁾を直接流出より低減する機能、iii) 地下水帯への浸透貯留により降雨時の直接流出の低減及び無降雨時の河川流量を保持する機能、iv) 無降雨時における樹冠部からの蒸発散により山地森林域に貯留された水分を減少させる機能等の組み合わせによって発生していると筆者らは考えている。i)の表層土壌の空隙の効果に関して、宝ら⁷⁾は森林表土層の空隙に貯留可能な水量は多く見積もっても170mm程度であり、100年確率程度の豪雨に対してはあまり有効な洪水緩和機能を発揮できないとしている。一方、森林に携わる専門家の中でも、この表層土壌の空隙の効果が緑のダム機能の大半を占めていると認識している場合があり^{8),9)}、シンポジウム等を通して一般市民の緑のダムのイメージへの影響が大きい。しかし、緑のダムが洪水緩和機能において限定的な効果しかないことは、日本学術会議の答申²⁾でもまとめられており、緑のダムのメカニズムを誤解して過剰な期待を持つことは防災上

危険である。ii)の樹冠による遮断蒸発は忘れられがちであるが洪水流量の低減に確実に影響があり、また樹冠の生長による増加も見込まれる重要な機構の一つである。樹冠遮断による洪水緩和機能の定量化については、樹冠疎密度分布図と微気象情報により流域スケールでの損失量を推定する研究が行われている¹⁰⁾。一方、中根ら¹¹⁾は森林流域での長期水文観測データと直列3段タンクモデルを用い、森林の生長に伴い第1段タンクの下部浸透孔の係数が増大することを確認し、森林の生長に伴い地下水帯への浸透量が増大すると説明している。また小杉¹²⁾は、森林流域での流出ハイドログラフの波形パターンと地下水位の関連性が指摘されており、iii)の地下水帯への浸透は、森林の水源涵養機能に影響が高いと考えられる。ところが、森林の生長に伴う森林土壌の変化は主に表層のA0層やA層における土層厚や有機物含有率の増加、落葉等のリター層の形成、増加と考えられ、鉱物質が多く、母岩の風化によって形成される中下層のB、C層は大きく変化しない。皆伐後等の表層土壌流出後の天然林の状態への回復は、A0層だけで100年程度、A0層と鉱質土壌の合計では400~600年必要¹³⁾と言われており、森林の生長に伴う地下水帯への浸透貯留、及び河川への流出特性が大きく変化するかについては疑問が残る、さらなる検討が必要である。またiv)の無降雨時の蒸発散による貯留水の損失は、緑のダムとしての機能として話題となる重要な要素である。

以上のように、緑のダム機能は非常に複雑な水文過程の組み合わせであり、森林の生長、回復に伴う流出特性の変化、回復の全容は未だ解明されていない。本研究では、300haの山地森林集水域を解析対象とし、長期水文観測データとタンクモデル係数の長期変動の解析により、森林の生長に伴う山地森林流域の流出特性の変化について検討を行う。

2. 対象集水域の水文・植生状況

(1) 対象集水域の概要

岐阜市中津川市福岡地区(旧福岡町)、ニツ森山東斜面のガマン沢集水域(3km²)を対象集水域とする。本集水域は、1983年度より実施された林野庁の水土保持機能強化総合モデル事業の対象地域に含まれ、5年間の事業期間において、森林の有する水土保持機能と森林資源の有効活用を同時かつ調和的に達成できるよう、複層林の造成、浸透促進施設の設置、路網の整備等の基盤整備、及び雨量計、量水堰等の水文観測施設の設置が行われた。モデル事業実施後は、設置された観測施設を用いて水文調査、水質調査、及び5年ごとの林況調査が岐阜県により実施されている¹⁴⁾。図-1に対象集水域の概要を示す。対象集水域内には、ガマン沢下流(GS)、ガマン沢上流(GU)、森

ヶ洞(MR)の3カ所に量水堰が設置され、水位、流量の観測が実施されている。また、この3カ所では降雨量の観測も行われている。モデル事業対象地域は東濃ひのきで有名な地域であり、樹種構成はスギ4.3%、ヒノキ67.0%、アカマツ4.5%、その他の針葉樹4.3%、広葉樹19.9%であり、人工林、天然林の比率はそれぞれ69%、31%である。モデル事業が実施された1983年~1988年の間は、複層林形成のため図-2に示すような森林管理施策が実施されていたが、その後は若干の下刈り、間伐等の施策が実施されたのみであり植生は増加していると予想される¹⁴⁾。

(2) 観測流出量の経年変化解析

1984年から2002年までの観測水文データの解析により、年降雨量に対する流出率が70%弱から50%程度まで減少していること、ピーク流量発生所要時間がモデル事業実施中では200分以下であったが、200分から600分程度まで遅くなっていることが報告されている¹⁵⁾。また、筆者らは1984年から2007年の水文データを用いた各降雨イベントの直接流出率の経年変化の解析を行っている¹⁶⁾。直接流出率は、各降雨イベントにおける直接流出成分を観

図-1 対象集水域と水文観測地点の概要

図-2 モデル事業対象域における森林管理状況

表-1 使用衛星センサと観測日

観測日	衛星/センサ	空間分解能
1984/11/10	Landsat-4/MSS	80m
1987/11/11	Landsat-5/MSS	80m
1992/11/24	Landsat-5/Tm	30m
2005/11/4	Terra/ASTER VNIR	15m
2007/11/19	Terra/ASTER VNIR	15m
2010/11/11	Terra/ASTER VNIR	15m

図-3 対象集水域におけるNDVI画像

図-4 対象集水域における植生量(領域平均NDVI)の経年変化

測ハイドログラフから分離して求めた直接流出量と雨量計で観測されたイベント総降雨量の比である。総降雨量400mm以上のイベントでは $-0.00508 [y^{-1}]$ 、最も変化が少

ない総降雨量50mm以下のイベントでも $-0.00424 [y^{-1}]$ で減少傾向にあった。さらに、対象集水域に最も近い中津川の気温データを用いた各降雨イベントの平均気温と流出率の解析を行い、流出率の減少と気温上昇の関連性は低いと報告している。

(3) 衛星画像による植生経年変化の解析

森林の生長状況確認のため表-1に示す衛星画像を用いた植生解析を行った。Landsatは、1号が1972年に打ち上げられた初期の地球観測衛星である。Multispectral Scanner System (MSS)は空間分解能80m、Thematic Mapper (TM)は30mと最新の地球観測衛星と比べると精度が若干劣るが、比較的長期の高解像度データを利用可能である。2000年以降は衛星の運用中止、センサ劣化によりLandsat衛星データの利用が困難であるため、観測波長帯が比較的近く入手が容易なTerra/ASTERを用いた。季節変動による誤差をなるべく回避するため、1984年以降の11月に撮影された画像のうち、雲の影響が比較的少ない画像を収集した。各衛星画像は、それぞれの輝度値変換式を用いてセンサ入射光をデジタル化したDN値(Digital Number)より分光輝度値 $[Wsr^{-1}m^2\mu m^{-1}]$ に変換し¹⁷⁾、大気補正ソフト6S¹⁸⁾を用いて観測日に対応した大気補正を行い、各観測波長帯の分光反射率に変換した。2005年以降のASTER画像に対しては高山、岐阜、飯田における視程観測結果を用いてエアロゾルに関する補正パラメータを算出し、それ以前の衛星画像は観測情報が無い場合一律に視程30kmと仮定して大気補正を行った。大気モデルは標準の中緯度冬型を用いた。次にNormalized Differential Vegetation Index(NDVI)を算出し植生量の解析を行った。NDVIは可視赤色光を光合成のため吸収するが近赤外光は吸収しないという植物の生理活動を利用して植生量を調査する指標であり、以下の式で求められる。

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (1)$$

ここで、 NIR : 近赤外波長帯の反射率、 R : 赤波長帯の反射率である。NDVIは式(1)のように、 NIR と R の合計によって正規化された指標であり、斜面方向や太陽高度による入射光変動の影響を比較的受けにくいという特徴を持っている。図-3に対象集水域におけるNDVI画像の例を示す。図-3(a)はLandsat-4/MSSにより撮影された1984年の、図-3(b)はTerra/ASTERにより撮影された2007年のNDVI画像である。黒い枠線は集水域界を示す。空間分解能が大きく異なるが、集水域内のNDVI値は図-3(b)の方が若干高く見える。図-4にNDVIの集水域内での領域平均値の経年変化を示す。若干のばらつきはあるもののNDVI平均値は増加傾向にあり、解析期間を通して森林は生長していると考えられる。

3. タンクモデルによる流出特性の経年変化の解析

前章で述べたとおり，対象集水域では森林の生長，及び流出率の減少傾向は確認できているが，その原因，緑のダム機能との関係はよく分かっていない．本章では，タンクモデル係数の解析により，本集水域での森林の生長に伴う流出特性の経年変化の要因について検討を行う．

(1) 解析方法

タンクモデルは流域をいくつかの貯留型タンクの組み合わせに置き換えて考える流出計算法である。最上段タンクからの流出は表面流出に、第2段タンクからの流出が中間流出に、第3段以下のタンクが基底流出に相当しているといわれている¹⁹⁾。本研究では、図-5のような第1段タンクに2つの側方流出孔を持ち、第2段以下は側方流出孔を1つずつ持つ一般的な4段タンクモデルを解析に用いた。第1段タンク側方流出孔からの流出高 q_1, q_2 [mm/d]及び下層タンクへの浸透高 i [mm/d]は、それぞれ以下の式で算出される。

$$q_1 = a_1(h_1 - c_1) \quad (2)$$

$$q_2 = a_2(h_1 - c_2) \quad (3)$$

$$i_1 = b_1 h_1 \quad (4)$$

ここで、 a_1, a_2 : 第1段タンクの流出係数[d¹], b_1 : 第1段タンクの浸透係数[d¹], c_1, c_2 : 第1段タンクの側方流出孔の高さ[mm], h_1 : 第1段タンクの水深[mm]である。また、第1段タンク水位の連続式は以下の通りである。

図-5 タンクモデルの概念図

$$\frac{dh_1}{dt} = r_e - q_1 - q_2 - i_1 - Et \quad (5)$$

ここで、 t : 時間[d], r_e : 有効降雨量[mm/d], Et : 蒸発散量[mm/d]である.

以下に解析の手順を示す.

- i) 1984～2007年の観測水文データを用いて、全期間を通した最適モデル係数を同定する。ただし、1995～1997年はデータ欠損が多いため解析から除外する。
- ii) 観測水文データを1984～1987年、1988～1994年、1998～2002年、2003～2007年の4期間に分割する。
- iii) 第1段タンクの側方流出孔の係数 a_1 、 a_2 以外の係数を固定し、各期間における a_1 、 a_2 の最適値を同定する。
- iv) 蒸発散量を0とした場合と、日平均気温と日照時間を用いてハモン式により算出された日可能蒸発散量を蒸発散量としてモデルに与えた用いた場合について解析を行い、気温上昇による流出特性の変化について検討を行う。

中根ら¹⁰⁾は、直列3段タンクを適用し、全ての係数の調節を各期間で行っている。その結果、表土層の鉛直浸透速度や鉛直透水係数に関係する第1段タンクの下部浸透孔の係数が増大したことから、森林の生長に伴い地下水帯への涵養量が増大したと結論づけている。しかし、森林の生長による森林土壌の変化は、主に表土層厚の増加、有機物の混合による粗大孔隙の増加と考えられる。地下水帯への涵養、鉛直浸透速度に関しては基岩層の風化、割れ目が大きく影響されると考えられるが、これらの特性はたかだか100年程度では大きく変化しないと考えられる。そこで、本研究では表土層の鉛直透水係数は森林の生長に伴い大きく変化しないと仮定して、下層のタンクの係数と同様に第1段タンクの下部浸透孔の係数 b_1 を固定し、 a_1 、 a_2 の変化のみに注目し、表土層の鉛直透水係数が変化せずとも地下水帯への涵養量の増大、及び直接流出量、洪水ピークの減少という緑のダム機能が説明可能かどうか検討を行う。

(2) 解析結果と考察

図-6に1984年の夏季(6月～8月)の観測ハイドログラフと推定ハイドログラフを示す。計算時間間隔は日である。タンクモデルはピーク流量の再現が難しいという特性があり、図-6に示した期間でもいくつかの降水イベントでピーク流量に若干の誤差が見られるが、基底流量は概ね良い精度で推定できていると思われる。表-2に本研究で同定したタンクモデル係数を示す。解析期間の観測流量と推定流量の平均二乗誤差と歪度を算出が最小となる値を試行錯誤的に求めた。表-2に示すように、第3、4段タンクの側方流出孔係数 a_4 、 a_5 の値は上位タンクの側方流出孔係数に比べて小さい値が与えられており、第3、4段タ

図-6 1984年夏季における観測・推定ハイドログラフ

表-2 同定された各期間のタンクモデル係数

係数	1984-1987	1988-1994	1998-2002	2003-2007
a_1	0.900	0.718	0.660	0.653
a_2	0.425	0.320	0.295	0.284
a_3	0.510	0.510	0.510	0.510
a_4	0.001	0.001	0.001	0.001
a_5	0.001	0.001	0.001	0.001
b_1	0.30	0.30	0.30	0.30
b_2	0.30	0.30	0.30	0.30
b_3	0.01	0.01	0.01	0.01
c_1	20.0	20.0	20.0	20.0
c_2	10.0	10.0	10.0	10.0
c_3	10.0	10.0	10.0	10.0
c_4	3.0	3.0	3.0	3.0

ンクはほとんど流出に寄与していない。これは、対象流域が最上流の比較的小集水域であり、観測流量に深層地下水帯からの流出の寄与が極めて小さい事が原因と考えられる。第3, 4段タンクの深層地下水帯は、対象流域のさらに下流地点の流出に寄与するものと考えられる。本研究では4段タンクモデルを採用しているが、実際は主に上部の2つのタンクの挙動が流出ハイドログラフに影響していると考えられる。一般的には、直列4段タンクモデルは前述の通り第1段タンクが表面流出、第2段タンクが中間流出、第3段以下のタンクが基底流出を表現していると言われている¹⁹⁾が、本研究のモデルでは無降雨時の流出は主に第2段タンクからの流出が大きく寄与しているため、図-5に示すように第1段タンクからの流出が表面流出と速い中間流出の合計である直接流出、第2段タンク以下の流出が遅い中間流出と基底流出に相当していると考えられる。タンクモデルのモデル係数の同定には不確実性が存在し局所解に収まっている可能性が高いため、全てのモデル係数を自由にして最適化を行った場合各期間の同定結果は別々の局所解に陥り、その経年変化の考察は困難である。しかし、本研究のようにある特定の係数以外を固定した場合は同等の局所解に収まっている可能性が高く、特定のモデル係数の経年変化の考察は十分可能と考えられる。

次に、第1段タンクのモデル係数について考察する。

図-7に示すように、 a_1 、 a_2 ともに徐々に減少しており、ピーク流量が減少し、洪水緩和機能が向上していると考えられる。一方、ハモン式は日平均気温より蒸発散量を求める式であり、近年の気候変動による気温上昇の影響を受けているが、蒸発散量を0とした場合との違いは、下部流出孔の係数 a_2 の値が約0.3異なるだけで、その経年変化傾向はそれほど変わらない。蒸発散量0の場合 a_2 の値が少し小さくなる理由は、実際には存在する蒸発散量による第1段タンクの水位の減少に合わせて下部流出孔からの流出を抑えようとした結果と考えられる。したがって、本集水域では、1984～2007年間の流出特性の変化に気候変動の影響は、森林の生長による緑のダム機能の向上に対して極めて小さいと考えられる。ただし、最近10年間においては、蒸発散量を考慮した結果で若干係数値が増加している。これは気温上昇に伴う蒸発散量の増加により下がった第1段タンクの水位に対応して流出量を増加させようと係数を最適化した結果と考えられる。今後気温上昇が継続することにより、流出特性の経年変化に気候変動の影響が大きくなる可能性は高い。

次に、同定されたパラメータ値を設定した各期間のタンクモデルに対し、50 mm/日、100 mm/2日、200 mm/2日、150 mm/3日、300 mm/3日の矩形のモデル降雨を与え流出シミュレーションを行った。第1段タンクの側方流出孔からの総直接流出量と総降雨量より流出率を算出した(図-8参照)。総降雨量が少ないモデル降雨の方が低い流出率を示し、豪雨のモデル降雨の方が高い流出率を示しているが、全体的に減少傾向にあることが分かる。全体としては、 $-0.0029 [y^{-1}]$ で減少しており、本集水域における長期水文データの解析による流出率の経年変化¹⁵⁾とほぼ同等な傾向を示し、洪水流出を緩和する機能が向上していることが分かる。

(3) 緑のダム機能の評価

本研究では、森林の生長によって基岩層の特性は変化しないと考え、鉛直透水係数に関係するタンク下部孔の係数は経年変化しないとして解析を行ったところ、森林の生長に伴う側方流出特性の変化だけで、地下水涵養量も増加することが分かった。この現象は図-9のような模式図で説明できる。表土層の生長に伴う土層厚、粗大孔隙の増加、樹冠の生長に伴う遮断量の増加等により、表面流の発生が抑えられる等により、ピークの低下が発生する。表面流出が遅れ、表土層内に一時的に貯留される雨水が増加する。この現象は第1段タンクの降雨イベント中の一時的な水位の増加としてタンクモデル上では表現される。表土層と第1段タンクが対応関係にあると仮定すると、表土層に一時的に貯留される雨水が増加することにより、式(4)に従って、地下水帯への浸透が増加する。結果として、森林の生長に伴う鉛直浸透に関する

特性の変化が無くとも、直接流出量の減少、地下水涵養量の増加という緑のダム機能の向上が見られる。また、以下のように式(2)～(5)を簡略化させた1段タンクを用いて説明できる。式(2)より側方流出孔からの流出高 q [mm/d] を流出孔の高さを0とし式(6)のように簡略化する。タンク下部からの浸透高 i [mm/d]は式(3)と同様に式(7)で示す。ここで、 a , b はそれぞれ側方流出孔、浸透孔の流出、浸透係数 $[d^{-1}]$ である。タンクの水位 h [mm]の時間変化は、雨量、蒸発量を0と仮定すると式(8)のように定義できる。

$$q = ah \quad (6)$$

$$i = bh \quad (7)$$

$$\frac{dh}{dt} = -q - i \quad (8)$$

したがって、式(8)は、式(6), (7)を用いて次式のように変形できる。

$$\frac{dh}{dt} = -(a + b)h \quad (9)$$

式(9)の常微分方程式を変数分離法で解くと、式(10)のような一般解が得られる。

$$h = Ce^{-(a+b)t} \quad (10)$$

ここで C は積分定数である。したがって、式(7), 式(10)より、浸透高 i は、式(11)のように表せる。

$$i = bCe^{-(a+b)t} \quad (11)$$

ここで、 I を表土層からの総浸透量 [mm]とすると、 $t = 0$ から無限大までの浸透高 i の積分として式(12)のように表せる。

$$I = \int_0^{\infty} bCe^{-(a+b)t} dt \quad (12)$$

よって、式(12)より表土層からの総浸透量は、 a , b , C の関数として式(13)のように表すことができる。また同様に表土層からの総流出量 Q [mm]も式(14)のように表すことができる。

$$I = \frac{bC}{a + b} \quad (13)$$

$$Q = \frac{aC}{a + b} \quad (14)$$

ここで、流出係数 a は、森林の生長に伴う表土層の増大による流出速度の遅れを表現するモデル係数として考えられる。森林の生長によって流出係数 a が減少し、流出速度が遅くなると、浸透能に変化が無く浸透係数 b が固定であっても、総浸透量 I は増大することが式(13)より明白である。一方、式(14)はさらに以下のように変形することができる。

$$Q = C - \frac{bC}{a + b} \quad (15)$$

したがって、流出係数 a の減少に伴い、総流出量 Q も減少することは明白である。以上のモデルによる考察は、表土層による側方流出の遅れを流出係数という簡便な係

(a) 上部流出孔係数 a_1

(b) 下部流出孔係数 a_2

図-7 流出係数の経年変化

図-8 モデル降雨に対する直接流出率の経年変化

図-9 森林の生長に伴う流出特性の変化の模式図

数で代表させた概念モデルであるが、森林の生長によって鉛直浸透能が増加せずとも総浸透量は増大するという図-8の現象を簡易に説明できている。

4. おわりに

本研究では、岐阜県中津川市の山地森林小集水域を対象として、24年間の水文観測データ及びタンクモデルを用いた解析により森林の生長に伴う流出特性の変化、緑のダム機能の評価を行った。得られた知見は以下の通りである。i) 衛星データの解析により対象集水域において森林の生長が確認できた。ii) タンクモデル係数の経年変化解析により、側方流出孔の係数値が減少傾向にあり、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が分かった。iii) 蒸発散量の考慮の有無に対してタンクモデル係数の経年変化傾向に大きな差は無く、気温上昇の流出特性への影響は比較的小さいと考えられる。iv) モデル降雨を与えたタンクモデルによる流出解析により、流出率が $-0.0029 [y^{-1}]$ の傾向で減少していることを示した。この傾向は、長期水文データの解析結果とほぼ同等である。v) 森林の生長に伴う森林集水域の変化は、表土層の土層厚や粗大孔隙の増加であり地下水帯への浸透能に影響する基岩層の割れ目の増加等は発生しないと考え、第1段タンク下部の浸透孔係数を固定した解析を行ったところ、側方流出孔係数の経年変化のみで洪水緩和機能、水資源貯留機能の向上が表現できることを示した。中根らの研究¹⁰⁾では、第1段タンク下部の浸透孔の係数の増加により、地下水涵養量が増加すると結論づけているが、森林成長に伴う森林土壌の100年程度の期間における変化では、下層の地下水帯への鉛直浸透係数の増加は説明できないが、本研究の成果により、鉛直浸透係数が向上せずとも地下水涵養量の増加は見込めることが示唆され

た。今後は本研究で得られた知見を物理モデルに適用し、緑のダム機能のより深い理解を進める。

謝辞：本研究の一部は、地球環境再生プログラム「中部山岳地域の環境変動の解明から環境資源再生をめざす大学間連携事業」の補助を受けて実施されました。また、岐阜県及び林野庁より対象地域のデータ提供を受けました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 農林水産大臣 諮問：「地球環境・人間生活にかかわる農業及び森林の多面的な機能評価」，日本学術会議答申：地球環境・人間生活にかかわる農業及び森林の多面的な機能の評価について，pp.99-100, 2001.
- 2) 日本学術会議 答申：地球環境・人間生活にかかわる農業及び森林の多面的な機能の評価について，pp.80-82, 2001.
- 3) 小川 滋：山地における水土保持機能の定量的評価について (I)ー機能評価のための流出モデル，水利科学，Vol. 26, No. 6, pp. 51-73, 1983.
- 4) 小川 滋：山地における水土保持機能の定量的評価について (II)ー評価モデルと評価方法，水利科学，Vol. 27, No. 1, pp. 10-23, 1983.
- 5) 鈴木雅一：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，Vol. 70, No. 6, pp. 261-268, 1988.
- 6) 塚本良則(編)：森林水文学，文永堂出版，pp.82-85, 1992.
- 7) 宝 馨，立川康人，児島利治，可児良昭，池淵周一：降雨流出に及ぼす山腹斜面の影響ーいわゆる「緑のダム」の洪水調節効果の流域水文学的検討ー，京都大学防災研究所年報，No. 47 B, pp. 171-182, 2004.
- 8) 水源涵養保安林を考えるシンポジウム パネルディスカッション「横内水源地の水源涵養保安林を考える」概要版，15p, http://www.city.aomori.aomori.jp/contents/suido/7_6-suidodayori/7_6_P11panel.pdf, 2004.
- 9) 川辺川ダム事業に関する有識者会議（第3回）議事録，44p, <http://www.pref.kumamoto.jp/soshiki/18/kwb-08yushikisy-a-03.html>, 2008.
- 10) 児島利治，篠田成郎，Mahboob M. G., 大橋慶介：降雨遮断モデルによる実時間洪水予測精度の高度化に関する検討，河川技術論文集，Vol. 18, pp. 435-440, 2012.
- 11) 中根周歩，嶋津輝之：タンクモデルの係数と流域の保水機能：流域の焼失と植生変遷を例として，日本林学会大会学術講演集，Vol. 114, p. 207, 2003.
- 12) 小杉賢一郎：河川源流域の山体地下水が降雨流出に与える影響，水文・水資源学会 2011 年度研究発表会要旨集，pp. 50-51, 2011.
- 13) 塚本良則：森林・水・土の保全，朝倉書店，138pp, 1998.
- 14) 関東・中部林業試験研究機関連絡協議会水源整備研究会 編：調査報告書「水源林の整備：試験研究成果と事業的な取

- り組みの事例」, pp. 37-38, 2008.
- 15) 岐阜県：水土保全機能強化総合モデル事業(森林理水機能調査)木曽川地区 事業効果と効果調査, 20p., 2004.
- 16) Edwina Z., Ohashi K., Sakurai M., Kojima T. and Shinoda S.: Long term variable properties of runoff process in a mountainous forested catchment, *Advances in River Engineering*, JSCE, Vol. 18, pp.471 -476, 2012.
- 17) 日本リモートセンシング学会(編)：基礎からわかるリモートセンシング, 理工図書, pp.157-159, 2011.
- 18) Vermote E., Tanre D., Deuze J. L., Herman M., Morcrette J. J., and Kotchenova S. Y.: Second simulation of a satellite signal in the solar spectrum-vector(6SV), 6S User Guide Version 3, 2006.
- 19) 土木学会水理委員会水理公式集改定小委員会水理公式集例題プログラム集編集部会(編)：水理公式集例題プログラム集(平成 13 年版), 土木学会, 例題 1-12, 2001.
- (2013. 4. 9 受付)
- (2013. 8. 5 受理)

Evaluation of Green Dam in a Forested Small Catchment with Long Term Hydrological Data and Tank Model

Toshiharu KOJIMA¹, Edwina ZAINAL², Hisako OIKE³, Keisuke OHASHI³ and Seirou SHINODA⁴

¹River Basin Research Center, Gifu University

²Graduate School of Engineering, Gifu University

³Faculty of Civil Engineering, Gifu University

⁴Information and Multimedia Center, Gifu University

Although the importance of water conservation function of forest is widely recognized as “Green Dam” in Japan, its quantitative evaluation and clarification are insufficient. The authors evaluated the green dam’s function by long term analysis of tank model parameter’s variation with long term hydrological data in the forested catchment, Nakatsugawa city, Gifu, Japan. The side hole sizes of the first tank are on a decreasing trend along forest growth, and it is showed that the forest’s flood mitigation function is improved. On the other hand, major changes of forest characteristics by forest growth are increase of surface soil layer thickness, big pore spaces and so on. Therefore characteristics about percolation such as cracks in bed rocks are not so much change. The authors showed the tank model, which has fixed bottom hole size and variable side hole size, can explain the improvement of Green Dam’s function as a reduction of peak discharge and increasing of ground water recharge.