

◆ 流域管理特集 ◆

GIS を活用した水循環解析モデルの提案とその適用性
— 山地森林域の河川流域を対象として —

深見和彦* 金木 誠** 廣瀬葉子*** 松浦 直****

1. はじめに

近年我が国においては、人間活動が河川流域の水循環に及ぼす影響が、洪水や低水流出形態の変化、水質悪化といったように目に見える形で現れるようになり、健全な水循環系の保全と創造が焦眉の課題となりつつある。水に関する関係6省庁による「健全な水循環系構築に関する関係省庁連絡会議」では、そのための施策の基本的方向として、1) 流域の視点の重視、2) 水循環系の機構把握、評価及び関連情報の把握、3) 流域における各主体の自主的取り組みの推進の3つを挙げている¹⁾。

したがって、今後の河川・水資源に関する計画とそれらの流域規模での総合的な管理、ひいては国土の持続ある発展を図るための基盤として、河川流域で現実起こっている水循環の実態を必要な精度で把握・評価し、常に改変を受ける流域環境のもとでその水循環の将来変化を予測していくことは重要と考えられる。しかし、現状の水文観測ネットワークで把握できる水循環の項目と時空間スケールには必ずと限界があり、現在一般に用いられている流出解析手法も、流域内で相互に関連しあっている様々な水循環過程を総合的に理解できるものとはなっていない。

本報では、流域内の水循環を構成する森林・農地等における自然系水循環と上下水道・農工業用水等の人工系水循環の中で、特に国土の約70%を占める山地森林域の水循環に着目する。そこでの流域規模での水循環解析手法の研究開発成果の中間報告として、利根川水系渡良瀬川上流の草木ダム上流域(254km²、図-1)にGISを活用できる分布定数型水循環解析手法の適用を試みた結果を報告する。

2. 山地森林域における水循環解析の課題とモデリングの方針

山地森林域は、その占める面積のみならず降水量の多さと地形特性から、洪水流出の発生及び水資源開発の主要な場となっている。しかし、近年



図-1 草木ダム流域位置図

の農林業の衰退に伴い、森林の荒廃や、中山間地における農地転用・宅地化等が、山地森林域が従前より果たしてきた河川流況の平準化機能(洪水ピークの通減、低水流量の増加等)を低下させ、流域の水循環や河川流出特性に負の影響を及ぼす可能性も懸念されている。したがって、森林の流況平準化機能の実態を現場のデータの蓄積から実証的に明らかにする研究を進める一方で、上記の流域における人間活動が、小流域・斜面スケールのみならず、ダム流域、治水・利水基準点上流域全体でのスケールに与える影響の定量的な予測・評価手法を開発することが、山地森林域における水循環モデル開発研究の重要な課題である。

流域スケールでの水循環解析モデル開発の方向性には2つある。貯留関数法やタンクモデル等の既に実績のある集中定数型モデルを発展させる方向と、個々の水文プロセス毎のモデリングやそこでの必要な定数・変数の分布が意味を持つように、流域を個別斜面要素やメッシュに区切り、それぞれの要素・メッシュでの個々の水循環プロセスを、地理情報を介して流域全体で総合化して表現する分布定数型モデルを用いる方向である。前者は、

使用目的が降雨流出解析に絞られているときには有効であるが、パラメータと森林状況や流域改変との関係が明確でない。その意味で、後者は、降雨流出関係にとどまらない流域水循環要素を面的に表現する汎用性を有するとともに、パラメータの物理的意味をより明確にできるため、上で述べた影響評価・将来予測用途に対し、原理的に高いポテンシャルを有する手法である。また、原単位法に基づく水質・環境負荷評価手法と組み合わせることが容易である。実際に都市域小河川においては、地中の土壤水・地下水流動について基礎方程式を解く厳密な物理的モデルをベースとした流域水循環モデルが活用されつつある²⁾。このことから、山地森林流域についても分布定数型のモデリング手法を採用することは有効と考えられる。しかし都市小流域と同じ手法を山地森林流域や中～大河川流域に用いることは、流域規模でのパラメータ設定や計算負荷の問題から実用上問題が多いと考えられる。

したがって、数多いパラメータの設定過程をわかりやすく透明化するとともに、GISを活用して設定手法を簡便化して構築コストを抑える一方で、同時に、その原理通りに幅広い流域条件の下で解析目的に応じて必要な精度を確保できる分布定数型モデリング手法を開発することとした。

一方、森林水文学等の分野においてこれまでに明らかにされてきた山地森林斜面における水循環プロセスの実態を端的に示すと図-2のようになる³⁾。すなわち、森林域の水循環機能は、

- 1) 森林樹冠の水循環機能 = 大きな樹冠遮断・遮断蒸発、及び蒸発散

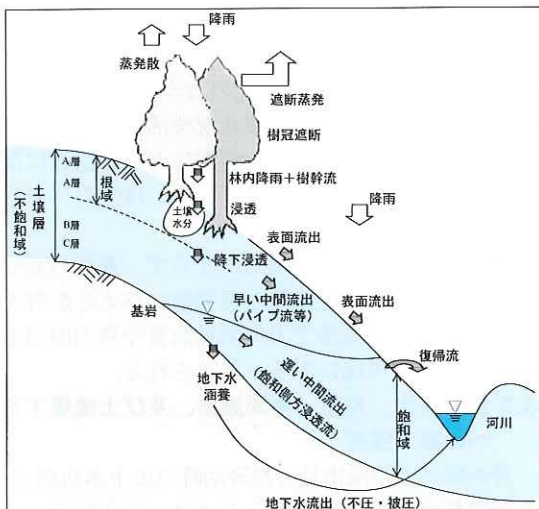


図-2 山地森林斜面における水循環プロセスの概念図

- 2) 森林土壌の水循環機能 = 高い浸透能、大きな不飽和帯水分貯留、効率的な中間流出（パイプ流、飽和側方浸透流）の発生、比較的大きな地下水涵養

の2つに大別できる。これらの個別の水文プロセスが流域内の水流量分布及び洪水・低水流出特性に与える影響を簡便かつ適切に表現できるモデリング手法を開発することが必要である。

3. 本報で採用した分布定数型水循環解析モデル

ここでは、土木研究所が従前より開発を行い国内での適用実績も多い土研分布モデル⁴⁾をベースとしながら、森林を含む地表付近の水循環過程の主要な定数について、衛星リモートセンシング画像や国土数値情報をもとにしたGISを基礎として設定できる修正 Noilhan-Planton スキーム（修正 NP スキーム）を開発した（図-3）。これにより、簡便でありながら恣意的なパラメータ調整を避ける定数設定を可能とした、日単位の長期流出・水循環シミュレーションに適用できる新しい土研改良分布モデルを開発し、それを草木ダム流域に適用した。各種定数・変数分布や河道網を構成するためのメッシュサイズは、国土数値情報等の分解能と、主要な山体スケールでの尾根・谷の構造を再現することを考慮し、200mとした。以下、

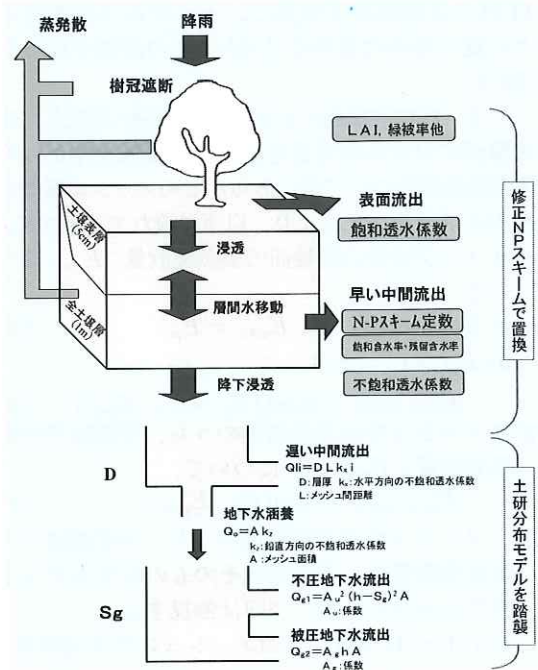


図-3 土研改良分布モデル鉛直構造概念図

その詳細について解説する。

3.1 樹冠遮断、遮断蒸発、蒸発散

従来の土研分布モデルでは、樹冠遮断量を一定値とし、蒸発散量については、気候学的に求まる可能蒸発量時系列分布に、流域の水収支解析から求まる損失量に合わせる補正係数を乗じることによって蒸発散量を求めていた。このため、森林等の変化に伴う洪水時の初期降雨損失量や水資源としての損失量の変化を直接議論することは困難であった。そこで、森林被覆の実態や、気象要素・土壌水分等の蒸発散に影響を与える因子の効果を直接組み込んだモデリングへの改良を試みた。

まず、土壌表面への入力降水量を決める森林樹冠部における樹冠遮断容量 $C_{\max}$ として、Noilhan and Planton(1989)⁵⁾ に倣い、葉面積指数 (LAI ; 単位面積当たりの葉面積) に比例して与える以下の式を適用する。

$$C_{\max} = 0.2LAI \quad (1)$$

流域内の LAI 分布は、一般に入手可能な米国 Landsat 衛星の TM (Thematic Mapper) センサ画像をもとに正規化植生指数 (NDVI) を算出し、石井ら (1999)⁶⁾ が国内の主要な森林樹種や植生による土地利用区分に対して最適化した NDVI から LAI への変換式により評価する。実際には、Landsat-TM 画像について 1993 年 5 月及び同年 11 月の 2 時期分を収集し、それぞれの画像をもとに夏と冬の代表的な LAI 分布の評価を行った (図-4)。

一方、森林被覆面における遮断蒸発・蒸散と、非被覆面における蒸発量を合わせた流域全体からの実蒸発散量については、あらかじめメッシュ毎に緑被率を求めることにより、以下の流れで評価する。

1) 1 メッシュ中の緑被面の実蒸発散量: E_{cov} について

$$i) E_p \leq C \text{ のとき, } E_{cov} = E_p \quad (2)$$

ii) $E_p > C$ のとき、

$$E_{cov} = C + \min\{(E_p - C), E_{pm}\} \quad (3)$$

2) 1 メッシュ中の非緑被面のうち、浸透域での実蒸発散量: E_{cob_perv} について、

$$E_{cov_perv} = \min(E_p, E'_{pm}) \quad (4)$$

3) 1 メッシュ中の非緑被面のうち、不浸透域での実蒸発散量は、不浸透域そのものが草木グム流域では小さいため、今回は無視する。

以上 1)~3) より、当該メッシュの実蒸発散量

$$E_a = cov \cdot E_{cov} + cob_perv \cdot E_{cob_perv} \quad (5)$$

が評価できる。ここに、 cov : 緑被率、 cob_perv : 浸透域率 (= 1 - 不浸透域率)、 C : 樹冠遮断量、 E_{pm} : Penman-Monteith 蒸発散量であり、

$$E_{pm} = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho C_p [e_{sat}(T_a) - e_a] / r_a}{\Delta + \gamma(r_s + r_a) / r_a} \quad (6)$$

R_n : 正味放射量、 Δ : 飽和蒸気圧曲線の傾き、 G : 地中熱流量、 ρ : 水の密度、 C_p : 水の定圧比熱、 γ : 乾湿計定数、 e_{sat} : 気温に対する飽和蒸気圧、 T_a : 気温、 e_a : 蒸気圧、 r_a : 空気力学的抵抗、 r_s : 群落抵抗、である。また、 E_p は大気気象条件で決まる蒸発要求量 (可能蒸発散量) であり、Penman 式 (式 (6) において $r_a = 1$, $r_s = 0$ とした式) で計算できる。 E'_{pm} は裸地面蒸発量であり、式 (6) に土壌水分減少時に働く抑制係数 (土壌水分量の関数) を乗じて求める。

緑被率 cov は、 $0 \leq LAI \leq 1$ において、 $0 \leq cov \leq 100\%$ となるように LAI に比例させ、 $LAI > 1$ では $cov = 100\%$ (一定) として与えた。不浸透面積率は、土地利用として宅地・裸地とされたカテゴリ領域の 25% (農家型住宅域を考慮)⁷⁾ として、メッシュ毎に評価する。なお、土地利用分類図は、国土数値情報の 11 区分を植生被覆をもとにして森林、水田、畑・荒地 (草地)、宅地・裸地の 4 カテゴリに集約したものを用いる。

上記の Penman-Monteith 式を適用する際の問題点は、いかにして群落抵抗 r_s を見積もるかである。ここでは、Noilhan-Planton (NP) 抵抗評価スキーム⁵⁾を採用した。この理由は、NP 抵抗評価スキームが、植生からの蒸散を制御する主要な 4 要素: 光合成有効放射量 (PAR)、土壌水分量、気温及び湿度のフィードバック効果をすべて簡潔に組み込んでいるからである。PAR は R_n と LAI から評価される。既述のように LAI は衛星画像から得られ、森林管理状況や活性度を反映した物理量として流域規模で面的にかつ季節毎に評価できる。これらの詳細は、深見ら (1997)⁸⁾ を参照いただきたい。

以上により、土地利用のみならず、森林の荒廃状況や土壌水分の乾湿等が蒸発散に与える影響を考慮した、流域規模での実蒸発散量や降雨樹冠遮断量の評価が可能になると考えられる。

3.2 表面流出、浸透、中間流出、及び土壌層下部への降下浸透

降雨時の直接流出量や無降雨時の地下水涵養量・蒸発散量を的確に評価するために、地表付近の土壌水分量の変動を適切に再現することは重要であ

る。しかし、従来の土研分布モデルでは、森林土壌 Ao 層に相当する表層モデルから、その直下の A 層に相当する上層不飽和帯モデルへ、水が一方向的に流れる仕組みしかなく、無降雨時に下層から土壌水分が供給される過程を無視していた。このため、蒸発散モデルのみを高度化しても土壌水分量や蒸発散量の再現精度の確保が困難と考えられる。また、モデル定数と現時点で入手できる土壌分布情報との関連が不明確であった。

Noilhan らは、メソスケール大気気象数値シミュレーションモデルの地表面境界条件を与えるために、既述の NP 抵抗評価スキームと一体で Force-Restore 型の土壌水分モデル (NP 土壌モデル) も提案した⁵⁾。このモデルは、1) 無降雨時の蒸発散を契機とした土壌水分の再分配過程を物理的に表現し、主要変数が現地で測定できる物理量と対応していること、2) 土壌の粒径三相 (砂・シルト・粘土) 成分情報をもとにして、モデルに必要な全ての最適定数を与えることができること等の、従来の土研分布モデルにない特長を有していることから、上に述べた表層モデル、上層不飽和帯モデルの 2 者について、この NP 土壌モデルで置換することによって、GIS データとのリンクと土壌水分再現性の向上を図ることとした。但し、国土数値情報で与えられる土壌分類は、その生成史に基礎を置く分類となっており (例えば褐色森林土等)、粒径組成に根ざした土性分類ではない。そこで、いくつかの文献⁹⁾ から各々の土壌の典型的な粒径組成データを収集することにより、土性分類に置換し、NP 土壌モデルの定数を決定した。

一方、NP 土壌モデルの最大の弱点は、降雨時の表面流出量・中間流出量・地下水涵養 (降下浸

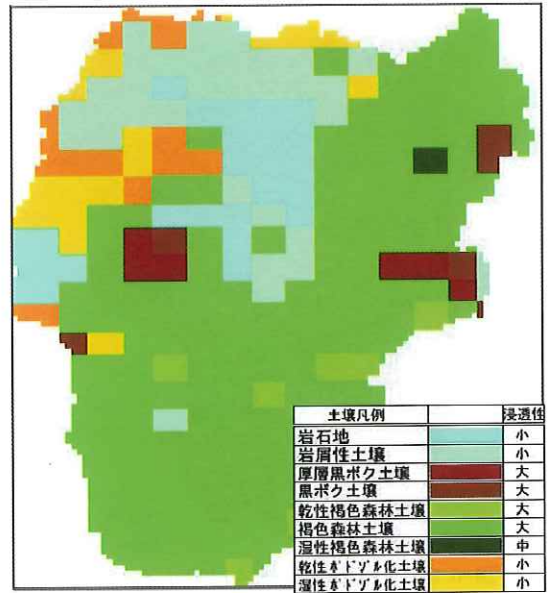


図-5 国土数値情報による土壌図および透水性評価

透) 量といった土壌層からの流出各成分を区別せず、一括して土壌層からあふれた水量を河川に流入するように処理している点である。そこで、降雨時を中心とした土壌水分の挙動について、i) Green-Ampt 式¹⁰⁾ (重力浸透のみを考慮。必要定数は飽和透水係数 K_s) を用いた表面流出と浸透の分離、ii) 2 層間の水分移動量の一定率 (ここでは 0.5 と設定) と、後述する降下浸透分を除いた NP 土壌層あふれ分について土壌中の大孔隙中を流れるパイプ流等に相当する早い中間流出として分離、iii) K_s と NP 土壌層の水分量で決まる不飽和透水係数 K により降雨の有無に関わりなく下部不飽和土壌層への降下浸透成分を算出、といった新しい水移動プロセスを NP 土壌モデルに追加した (修正 NP 土壌モデル)。なお、 K_s と NP 土壌層の有効間隙率については、我が国の森林土壌の実態に合わせるため、現状で流域規模で把握できる国土数値情報の土壌分類ごとに中野 (1976)¹¹⁾ が与えた 3 分類の「地下流出量涵養に対する貢献度」の大小の 3 分類に合わせて設定する。 K_s は、森林土壌表層土の高い浸透能を考慮し、 10^{-2} 、 10^{-3} 、 10^{-4} cm/s と設定した。有効間隙率は、それぞれの浸透能カテゴリ毎の各種林野土壌の土壌吸引圧-土壌水分量関係¹²⁾ の平均的関係をもとに、36、34、30% に設定した (図-5)。

以上、NP 抵抗評価スキームと修正 NP 土壌モデルを合わせたものが、今回採用

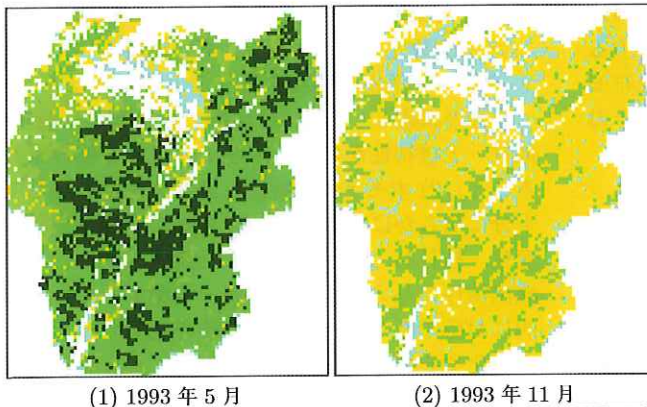


図-4 Landsat-TM 画像の基づく草木ダム流域における葉面積指数 (LAI) 分布



図-6 草木ダム流域落水線図 (200m メッシュ)

した修正 NP スキームの全貌である (図-3)。

3.3 遅い中間流出、地下水流出、及び河道モデル⁴⁾

これらの水循環プロセスを表現するモデルとしては、従来の土研分布モデルをそのまま踏襲した (図-3)。すなわち、通常は不飽和状態にあるが、降雨時に遅い中間流出に対応する飽和側方浸透流が形成される森林土壌の B(～C) 層に対応するものとして、不飽和土壌タンクを置き、さらにその下部に不圧及び被圧地下水流出成分を算出するための地下水タンクを設定する。また、デジタル標高データを基に、200m メッシュ毎の水の流れ方向を決める落水線図 (図-6) を作成し、集水メッシュ数 ≥ 3 で出水時の表面流・中間流が河道に流入するとし河道を設定 (降雨時の復帰流に相当) して Manning 式により河道流を算出する。なお、地下水は集水メッシュ数 ≥ 15 で河道に流入するとした。これらのモデルの諸定数は、土研分布モデルの当初の開発時に設定・最適化した値をそのまま用いた。

4. 草木ダム流域への適用結果

対象期間は 1983 年 1 月 1 日から 1988 年 12 月 31 日に至る 6 年間である。降水量は、流域内及び近傍の 21ヶ所の地上日雨量のティーセン分割雨量により与えた。雨雪判別は地上気温 2.5°C を閾値として行い、積雪面での熱収支に基づいた積雪・融雪流出の評価を行った。気象データは足尾及び日光地点のアメダスデータ、及び宇都宮気象官署データを利用した。

再現計算結果の例として、6 年間のうち後半 3 年間について実測ダム流入量と比較した結果を図-7 に示す。3 月下旬から 5 月上旬にかけての融雪期 (1986 年など)、及び、一部の洪水通減部における計算流量の過小評価が散見される。前者は、冬季の山岳域降雪量の過小評価による可能性もあり今後精査する必要がある。しかし、それらの点を除くと、日単位ベースではあるが、洪水波形のピークや通減部、低水部を含めて全般的に高い適合度を示している。波形あわせのためのパラメータ調整を行わなかったモデリングの結果としては十分な再現精度と言える。6 年間の平均で、年降水量 $1,721\text{mm}$ 、年実測流出量 $1,335\text{mm}$ 、年実測損失量 386mm に対し、年計算流出量 $1,318\text{mm}$ (内訳：表面流出 71mm 、早い中間流出 346mm 、遅い中間流出 525mm 、地下水流出 376mm)、年計算蒸発散量 404mm となっており、水収支計算上もほぼ整合が取れている。

5. まとめ

本研究の成果をまとめると以下ようになる。

- (1) 国内で既の実績のある土研分布モデルをベースとしながら、特に森林樹冠部や森林土壌上部 (Ao 層、A 層) の水循環機能に関連する水循環プロセスモデルについて、衛星画像情報や国土数値情報等の GIS に基づくパラメータ設定が可能なモデルと置き換えることにより、モデル構築やパラメータ設定手法を可能な限り明確化かつ簡便化した、新しい分布定数型水循環解析モデル (土研改良分布モデル) を開発した。
- (2) 草木ダム流域に土研改良分布モデルを適用し、6 年間に及び日単位での長期流出再現計算を実施した結果、調整を行うことなしに初期のパラメータ設定のみによって、高い精度でハイドログラフ・流況の再現を行うことができた。

今後の課題としては、1) 流域の森林状況や地形・地質・土壌特性が異なる流域での追試を積み重ねること、2) 本モデルの特性を感度分析等を通して十分に明らかにすること、3) 森林の樹種や樹齢の変化、枝打ち・間伐等を含めた流域改変が、河川流出特性に与える影響を評価・予測するという目的に対応できるように、改変時の現実のパラメータ変化やその設定法を検討すること、4) 森林状況や流域改変の影響を治水面から見る場合、時間単位以下のスケールでの洪水短期流出特性 (ピーク流量や生起時刻、通減特性等) の変化も評価する必要があることから、本モデルを時間単位の計算

も可能なモデルに発展させること、及び、5) 降雨流出関係のみではなく、面的な流域内の水文学分布の観点からも検証を行っていくこと等が挙げられる。また、全国の山地森林河川流域において、森林の果たしている流況平準化機能(洪水ピークの通減、低水流量の増加等)が、実態として定量的にどの程度なのかを明らかにすることが目標で

あり、実態の把握とモデリングによる現象解明・将来予測を合わせて、総合的に取り組んでいく必要がある。

参考文献

- 1) 国土庁：健全な水循環の構築へ向けて、ホームページ：<http://www.nla.go.jp/mizsei/junkan/index-3.html>
- 2) 河原能久、末次忠司、賈仰文、倪广恒：都市河川流域の水循環解析-モデルの開発と海老川流域への適用-、土木技術資料、vol.41, No.12, pp.38-43, 1999.
- 3) 塚本良則編：森林水文学、永文堂出版、1992.
- 4) 吉野文雄、吉谷純一、堀内輝亮：分布型流出モデルの開発と実流域への適用、土木技術資料、vol. 32-10, pp.54-59, 1990. 等
- 5) J.Noilhan and S.Planton : A simple parameterization of land surface processes for meteorological models, Monthly Weather Review, vol.117, pp.536-549, 1989.
- 6) 石井孝、梨本真、下垣久：衛星データによる葉面積指数 LAI の推定、水文・水資源学会誌、vol.12, No.3, pp.210-220, 1999.
- 7) 千葉県土木部河川課、三井共同建設コンサルタント(株)：海老川水理解析報告書、1980.
- 8) 深見和彦、金木誠、寺川陽：GISを活用した長期水文流出計算手法の一提案-タイ国におけるケーススタディー-、土木技術資料、vol.40, No.2, pp.56-61, 1998.
- 9) 例えば、土壤調査法編集委員会編：野外研究と土壤図作成のための土壤調査法、博友社、1978.
- 10) H.W.Green and G.A.Ampt : Studies on soil physics, Journal of Agricultural Science, vol.4, pp.1-24, 1911.
- 11) 中野秀章：森林水文学、共立出版、228p.、1976.
- 12) 例えば、「日本の森林土壌」編集委員会編：日本の森林土壌、日本林業技術協会、1983.

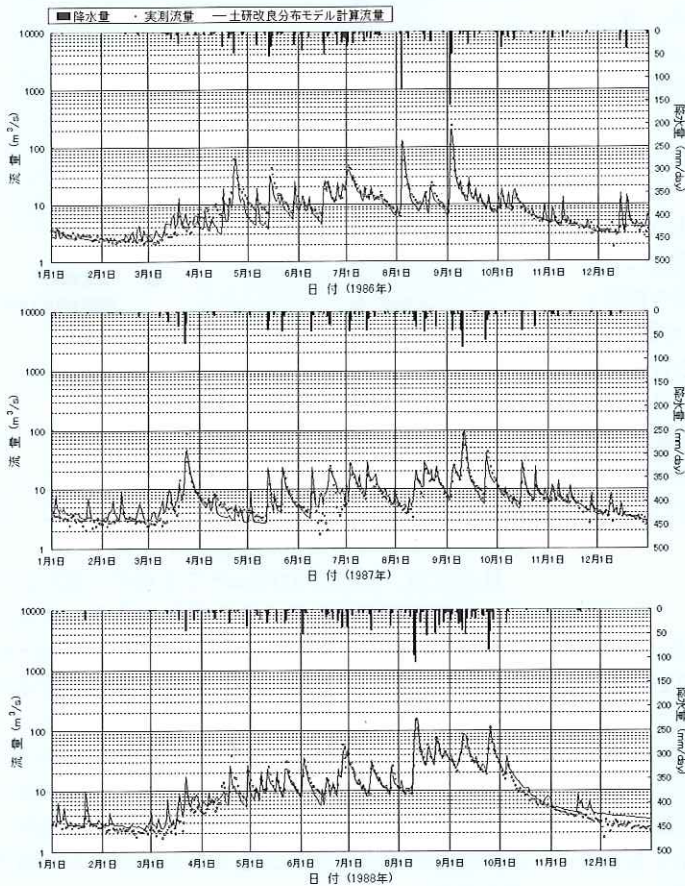


図-7 土研改良分布モデルによる流出再現計算結果(草木ダム流域 1986~88 年)

深見和彦*



建設省土木研究所河川部
水文研究室主任研究員
Kazuhiko FUKAMI

金木 誠**



同 水文研究室長
Makoto KANEKI

廣瀬葉子***



同 水文研究室交流研究員
Yoko HIROSE

松浦 直****



同 水文研究室研究員
Tadashi MATSUURA