

森林水循環モデリングと水収支の評価

Modelling of Forest Hydrologic Cycle Incorporated with SPAC
and Evaluation of Water Budget

端野 道夫*・吉田 弘**・村岡 浩爾***

By Michio HASHINO, Hiromu YOSHIDA and Kohji MURAOKA

A hydrologic cycle model is developed in order to evaluate water budget and the mechanism of the cycle of water movement within a forested watershed. This model is built by four basic processes; rainfall interception, transpiration, soil moisture and runoff, taking account of SPAC(Soil-Plant-Atmosphere Continuum).

This model is applied to a small forested watershed in Tokushima Prefecture. It is concluded that this model can explain the diurnal and long-term hydrologic trends of soil moisture whose behavior is related to rainfall interception, transpiration and rainfall-runoff.

Keywords:SPAC, hydrologic cycle, forested watershed, water budget, soil moisture

1. まえがき

森林流域の水収支ならびに水循環機構を定量的に評価することは、水資源の開発・管理はもとより森林の有する水源かん養機能（洪水緩和機能、渇水緩和機能、水質浄化機能）を定量評価する上で必要不可欠である。しかしながら森林流域は土壌・植生・大気の連続体として構成されているが故に、雨水の流動機構は複雑である。例えば蒸散抑制作用は樹幹内における樹液の流動が樹冠での気象条件のみならず根系付近での土壌水分状態の影響も受けることで生じる。また、しばしば夏季に流出量の日周期変動が観測されるが、これも根系の吸い上げによる土壌水分の蒸散や溪岸付近で滲み出した地下水の蒸発、溪流付近の根系による蒸散の影響を受けて生起することが指摘されている。¹⁾したがって、森林の構成要素である土壌、植生、大気間の相互作用を考慮した上で水循環システムを捉えなければならない。

本研究では、森林水収支の定量的評価を目標として、土壌・植生・大気連続体（Soil-Plant-Atmosphere Continuum:SPAC）において土壌水分構造を考慮した直列2段タンクモデルをベースに蒸発、蒸散の各水文素過程を表現するサブモデルを用いて総合化することにより森林水循環モデルを構築し、これを実森林データに適用した結果について検討する。

* 正会員 工博 徳島大学教授 工学部建設工学科 (〒770 徳島市南常三島町2-1)

** 正会員 工修 徳島大学助手 工学部建設工学科 (同 上)

*** 正会員 工博 大阪大学教授 工学部土木工学科 (〒565 大阪府吹田市山田丘2-1)

2. SPACを考慮した水循環モデルの構造

2.1 モデリングのポイント

森林流域における水移動機構は大別して、(1)樹冠に付着した降雨の遮断蒸発過程、(2)根系による土壤水分の吸水(蒸散)過程、(3)地中に浸透した雨水が土壤水分として森林土壤層に保水される過程、および(4)地表に到達した雨水の流出過程の4つの素過程から成ると考える。

降雨の遮断蒸発過程では、樹冠の濡れ具合が降雨中ならびに降雨終了後の蒸発過程に多大な影響を及ぼすことから、濡れ具合、すなわち樹冠への付着水量を評価する必要がある。降雨遮断量を考慮しない場合には、流域蒸発量を過大評価することになり、水源かん養機能を考える上で非常に重要な土壤水分量の変化を精確に評価し得なくなる。

蒸散過程は、従来、実測が困難であったことから蒸発過程と併せて取り扱われてきた。しかし、湿潤な樹冠面からの蒸発過程と乾燥した樹冠面からの蒸散過程は、本来区別して取り扱われるべきものである。蒸散過程では、活動の起動要因である樹冠付近での気象条件に加えて、根系での吸水と密接に関連する土壤水分量が重要となる。また、いわゆる渇水緩和機能を評価するためには蒸散活動にともなう土壤水分の日周期変動を表現できることが必要である。

流出過程では、水源かん養機能の本質である森林土壌の特性を取り入れたモデリングが必要である。すなわち、表面流出、中間流出、地下水流出の各成分ほかに、蒸散過程や流出量の日周期変動に関連すると考えられる土壤水分構造をモデル化する必要がある。

本論文では紙数の関係上これらのモデルの概要を述べるにとどめる。各モデルの詳細については参考文献を参照されたい。

2.2 降雨遮断モデルの概要

降雨遮断モデル²⁾は図-1のように森林樹木の樹冠と幹をそれぞれ表現する2つのタンクから構成される。構造上の特徴は、降雨中と降雨終了後とではモデルパラメータの値が変化するとしたことである。また、前述のように蒸発量は樹冠の濡れ具合に支配されると考えられることから、葉面への付着水高に蒸発強度は比例すると仮定している。なお、蒸発強度の算定上、純放射量の推定が必要となる。このため、気温、湿度、風速ならびに日照時間から岡上³⁾の方法によって斜面上の全天日射量を算定し、小池ら⁴⁾の方法により1時間あたりの直達、散乱放射量に分離して全天日射量を時間配分した。純放射量の評価にはChangの式を用い、蒸発強度はPenman式から求めた。

2.2 SPACを考慮した直列2段タンクモデルの概要

直列2段タンクモデル⁵⁾は図-1のように一つの表層タンクと一つの地下水タンクからなる。上部タンクにおいて表面流出はkinematic wave理論に従い、流出量の増減に応じて表面流発生場を変化させる。早い中間流出および地下水の補給は、Darcyの法則に従うとして定式化してある。

下部タンクでは遅い中間流、浸透降下および土壤水分の変動過程を表現している。なお下部タンクには土壤水分を考慮するため、1次、2次の2つの貯留部からなる土壤水分構造が設けられている。ここで1次の貯留部とは蒸発散や浸透降下ならびに2次との水分のやりとりなどに関連して比較的水分移動の早い場であるが、2次の貯留部は主として1次の貯留部との水分のやりとりに関連することから水分移動の穏やかな場であると想定した。蒸発、蒸散量は抑制作用を考慮し、土壤水分量により変化すると仮定してある。

山地流域においては、深層地下水に対応する被圧型地下水と浅層地下水に対応する不被圧型地下水が存在すると考え、それぞれにモデル化する。なお地下水流出の減係数には季節変化や日変化の見られる事が報告されている。その原因の一つとして溪岸付近の植生による蒸散ならびに地下水流出のしみ出しによる蒸発である可能性が示唆されていることから、本モデルでは地下水タンクからも蒸発散があるものと考え、溪岸植生による蒸散量、しみ出しによる蒸発量をモデルに組み入れた。

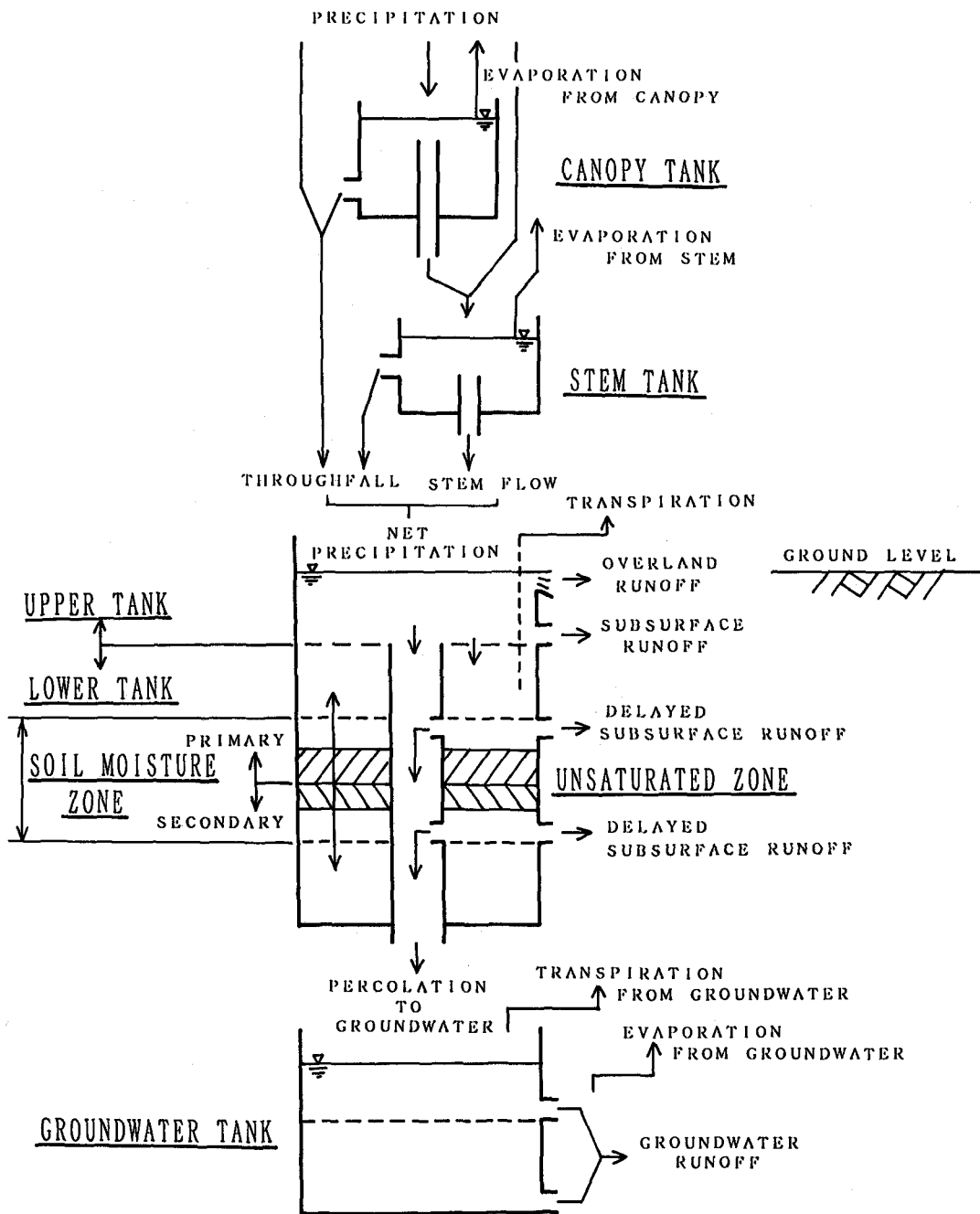


図-1 水循環モデルの構造

3. 白川谷森林試験地へのモデルの適用

3. 1 対象試験流域の概要

対象試験流域は図-2に示す徳島県白川谷試験地で、流域面積は23ha、標高740m~1140m、流域平均勾配 $\theta = 21.5^\circ$ である。地質は三婆川帯に属し、砂質片岩または砂質片岩と泥質片岩の互層からなる。流域の土壤のほとんどは褐色森林土で占められているが、尾根部には黒色土などの分布も見られる。林相については本流域の2/5程度の面積に天然林広葉樹林

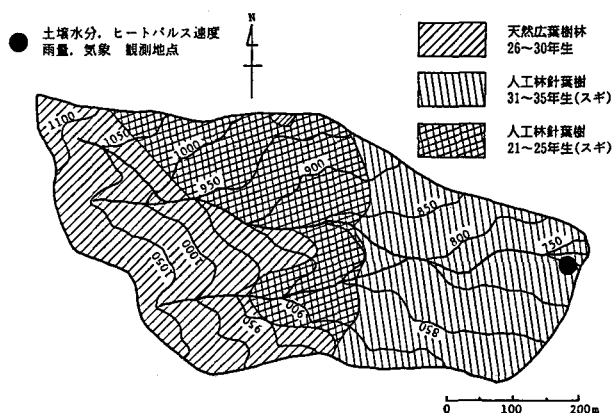


図-2 徳島県白川谷試験地

(21~25年生)が流域中央から上流にかけて存在し、流域中央より下流ではスギの人工樹林(16~30年生)となっている。雨量は林外雨、林内雨ならびに樹幹流を転倒マスト型雨量計で、流出量はフロート式自記水位計で観測されている。微気象要素としては、気温、湿度、風向ならびに風速の観測を行っている。日照時間およびその他の要素でデータが欠落している期間は水資源公団池田ダム統合管理事務所での観測値を補正して用いた。また、土壌水分量の観測をテンシオメータにより行っている。解析期間は1991年3月1日から1991年9月30日までの7カ月である。

3. 2 パラメータとその同定方法

直列2段タンクモデルにおいて同定すべきパラメータは21個であり、降雨量と流出量データを用いて同定する。降雨遮断モデルに関するパラメータ9個については降雨量と樹幹流下量データを用いて行う。いずれのモデルパラメータとも非線形最小二乗法のプログラムを利用して、それぞれの誤差評価基準を最小にするものを求めた。

降雨遮断モデルによる地表到達雨量の計算では複数のケースで同定したパラメータの平均値を代表として用いることにした。計算は1分単位で進め、1時間ごとの集計値を直列2段タンクモデルによる流出計算への入力値とした。流出計算にあたっては、降雨の有無にかかわらず計算時間を1時間単位とし、その日の午前0時より1時間ごとの流出量を計算する。

4. モデルの適用結果と流域水収支の評価

4. 1 ハイドログラフの再現計算

本モデルを適用して得られたハイドログラフを図-3に示す。ハイドログラフの再現性は全般的に良好である。本結果ならびに昨年度に筑波森林試験地での観測データへ適用した結果⁵⁾とから本モデルの基本構造は妥当であると結論づけられる。

4. 2 降雨遮断量の妥当性

降雨遮断過程は流出解析において最も基礎的な水文量である地表到達降雨量の算定に関わるため非常に重要である。そこで、降雨遮断量の妥当性を検討するため、観測値と推定値の両者について総降雨量に対する総遮断量の関係を示したのが図-4である。従来からの整理法によれば、総降雨量と総遮断量はほぼ線形関係にあるとされている。若干のばらつきは見られるが、本解析でも定性的には同様の結果が得られている。ただし、総降雨量に対する総遮断量の比率は筑波での値に較べて小さくなっている。

4. 3 土壌水分の変動特性

本水循環モデルにより推定した土壌水分状態の変化特性について検討する。全般的な傾向について見ると、

土壌水分飽和度は1次、2次ともに春先から初夏にかけて若干減少傾向を示した後、梅雨期の降雨によってかなり上昇している。夏季は日照時間が比較的に長いことから蒸散量の増加に伴い減少するが、再び台風期の降雨により増加傾向に転じている。

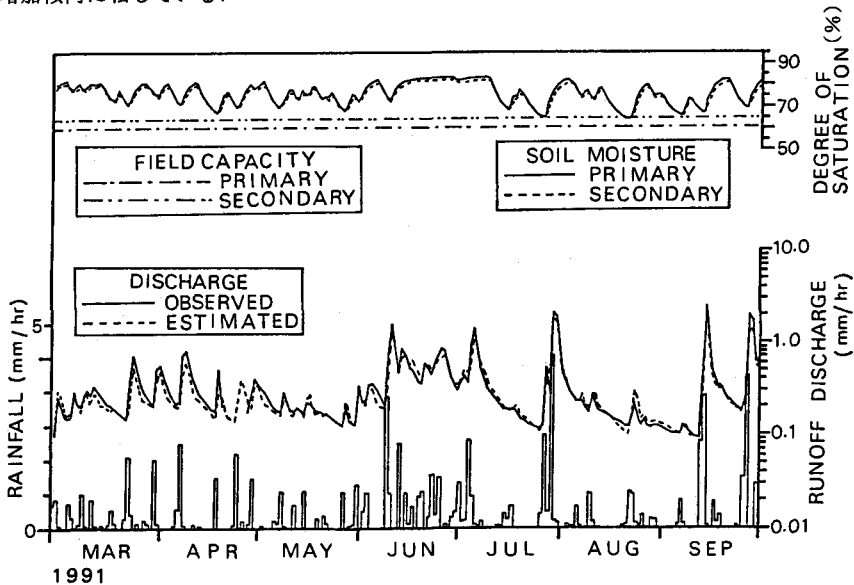


図-3 ハイドログラフの適合度

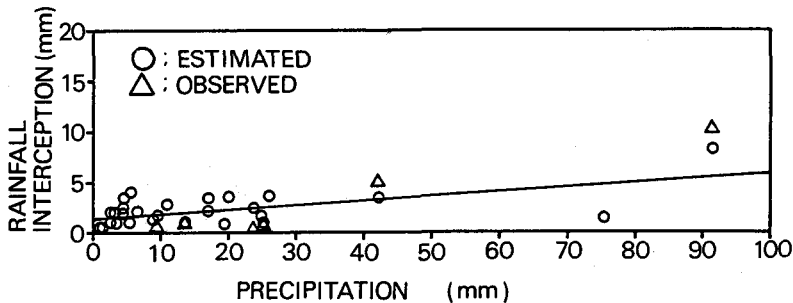


図-4 降雨量と遮断量の関係

テンシオメータにより行った土壌水分張力の観測結果とモデルによる計算結果を8月について比較したのが図-5である。土壌水分張力は深さ30cmでの観測値を別途作成した土壌水分特性曲線により体積含水率へと変換して表示してある。全般的に観測された体積含水率と推定された土壌水分飽和度との対応は良好である。ただし降雨に対する応答は観測値の方がモデルによる推定値よりもかなり早く現れる傾向にあるが、これは雨水がテンシオメータのパイプを伝って浸透し、ポーラスカップ付近に一時的に滞留するためであると考えられる。そこで蒸散量の変化率に対する土壌水分量の応答特性を検討するために、推

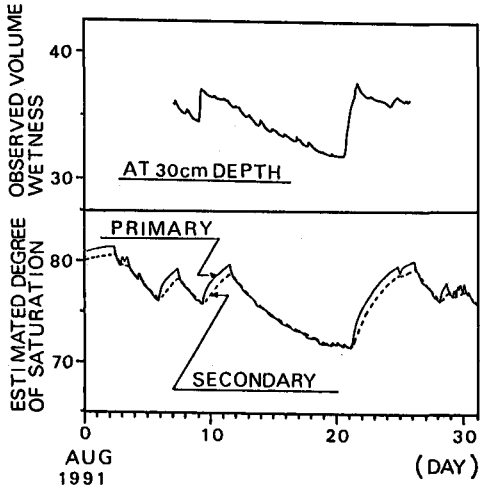


図-5 推定土壌水分飽和度と観測体積含水率の比較

定蒸散量，樹幹内の樹液流れに対応するヒートパルス速度⁶⁾ならびに実測土壌水分飽和度の関係を描いたのが図-6である。日中において植生の蒸散活動に伴い土壌水分量は減少するが，午後から夜間にかけて回復しているのが判る。便宜的に降雨終了24時間後の土壌水分を重力による水分移動の限界値（圃場容量量）の指標とした場合，本流域ではおおよそ50%となる。これより土壌水分の減少は重力による移動ではなく，根系による吸水が原因と推察される。しかしながらモデルによる土壌水分の推定値は圃場容量量を下回っていないため，この点は今後検討を要する。土壌水分に関する定量的な妥当性を検証するため，8月のデータについて土壌水分飽和度と体積含水率の関係を検討したのが図-7である。土質試験結果がないことから直接に絶対量どうしを比較することはできないが，両者の相関は非常に高く，定量的に見てもモデルによる再現性は高いといえる。

4. 3 流域水収支の評価

本モデルにより得られた森林流域の水収支を図-8に示す。これによると，総降雨量約1900mmのうち約85%にあたる1630mmが総流出量となっている。このうち表面流出量が約200mm，早い中間流出量が約400mm，遅い中間流出量が約10mmで残りの約1020mmが地下水流出量となっている。

一方，蒸発散量として大気中へ還元されるのは総降雨量の約10%にあたる210mmである。このうち約90mmが降雨遮断にともなう蒸発量であり，約90mmが蒸散量と推定されていて，蒸発量と蒸散量は相半ばしている。なお地下水タンクからの溪岸における蒸発散量は合わせて約30mmである。したがって3月の始めに比べ9月末では土壌水分量は絶対量に換算して約2.1mmの減少となる。他流域での蒸発散量と比較

してみると，筑波森林試験地では約420mm（蒸発量180mm，蒸散量240mm，ただし6月～11月），桐生試験地（滋賀県大津市）では約740mm（蒸発量330mm，蒸散量380mm，溪岸蒸発量30mm）であるのに対し，本流域では少なめとなっている。詳細については現在検討中であるが，その理由の一つとして，例えば観測流域の半分が北向き斜面にあって日陰になる場合の多いことが考えられる。

地下水タンクの増加量は36mmで，地下水流出量と遅い中間流出量を合わせた基底流出量は1030mmとなることから，基底流出量は総降雨量1900mmのうち約53%を占めており，筑波の場合に推定された約47%より若干大きな割合となっている。雨水をなるべく流域に貯留させ，流出を緩やかにする，いわゆる洪水・渇水緩和機能は本流域において比較的高いようである。

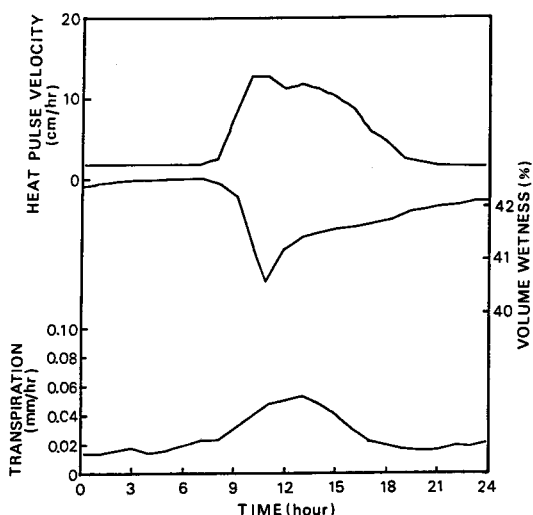


図-6 蒸散量，ヒートパルス速度と体積含水率の関係

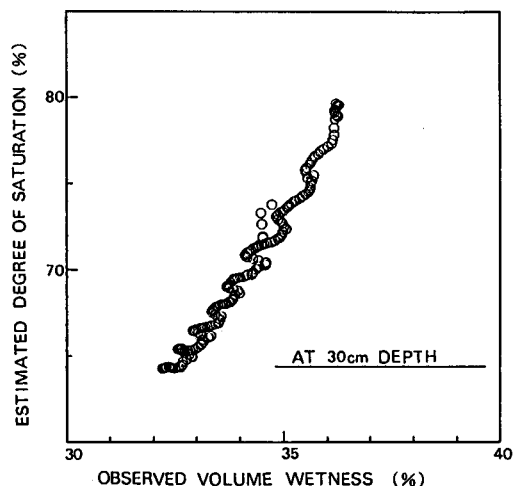


図-7 推定飽和度と観測含水率の関係

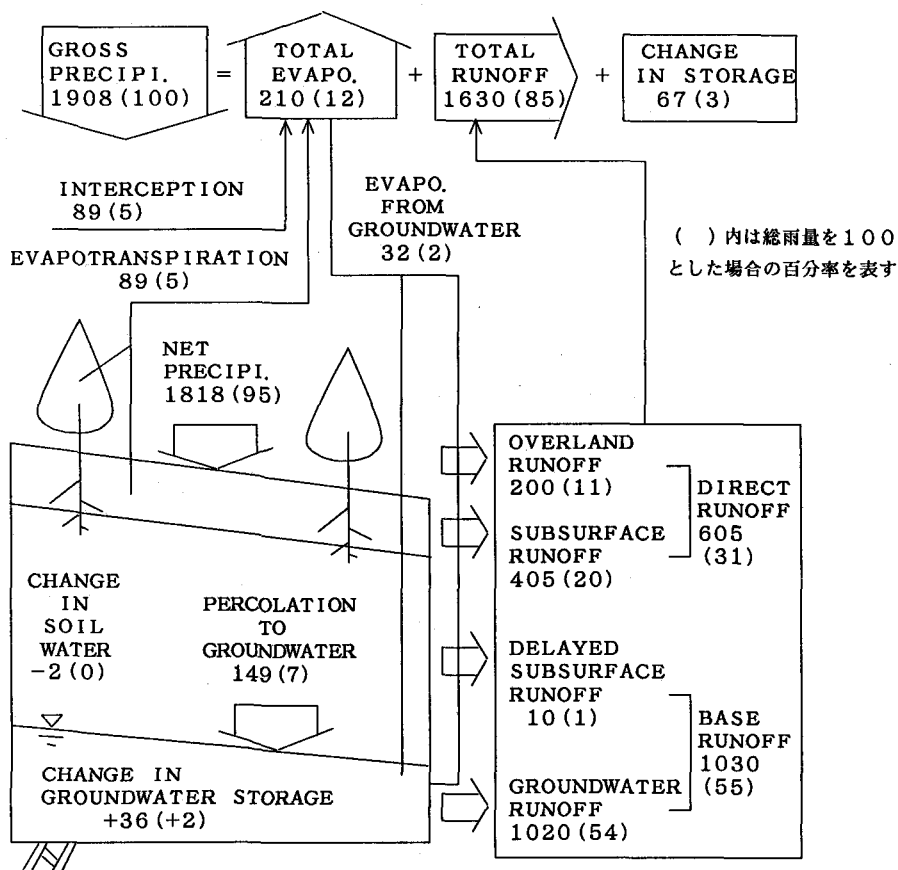


図-8 流域水収支図

5. まとめ

本研究は、森林流域における水循環の各成分の定量評価を目標として降雨の遮断蒸発、蒸散ならびに流出といった各素過程を総合化したモデルの構築を行い、実森林データへの適用を試みたものである。

本モデルによるハイドログラフの再現性は全般に良好である。植生による降雨の遮断蒸発量、蒸散量をサブモデルにより評価した結果、土壌水分の推定値は実測した季節、日周期変動を良好に表現できたと思われる。しかしながら、蒸散が盛んと考えられる時期において、推定値が圃場容水量を下回ることがない点は今後の検討事項である。

流域規模における長期水収支を把握する上では、本モデルのように流域をトータルシステムとして解析することが求められる。また、例えば、ヒートパルス法を適用した蒸散モデル⁷⁾のように流域のサブシステムとして位置づけられるマイクロモデルから推定される蒸発量、蒸散量を用いれば本モデルの蒸発・蒸散機構の定量的な検証が可能である。今後は土壌水分構造の改良に加え、今回は検証できなかった蒸散抑制作用についても検討を行う予定をしている。

謝辞

本研究は日本生命財団（代表：大阪大学 村岡浩爾教授）の援助を受けて行われた研究成果の一部であり、心より感謝の意を表します。徳島県農林部治山林業課ならびに財団法人徳島県森林土木協会からは試験地の提供を受けました。国立環境研究所平田健正主任研究員には土壌水分計について助言をいただきました。また本学大学院生、市原秀樹君、中谷達志君、木村誠君にはデータの整理、解析で多大な協力を得ました。ここに記して深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 塚本良則：森林と地下水，地学雑誌，Vol.98-2，pp.13-24，1989.
- 2) 端野道夫・吉田弘・中谷達志：実森林樹幹流データによる降雨遮断モデルの比較検討，水工学論文集，Vol.35，pp.87-92，1991.2.
- 3) 岡上正夫：斜面の受ける日射量を求める簡単な一方法，日本林学会誌，第39号，pp.435-437，1957.
- 4) 小池俊雄・佐渡公明・橋本大・坂本和則・西館昌行：AMeDAS日照時間による日射量推定の総合化，水文・水資源学会1991年研究発表会要旨集，pp.26-29，1991.
- 5) 端野道夫・吉田弘・市原秀樹：降雨遮断およびSPACを考慮したタンクモデルによる長期流出解析，水工学論文集，Vol.35，pp.93-98，1991.2.
- 6) 森川靖：ヒノキの樹液の流れ－林分の水分収支に関連して－，東京大学農学部演習林報告，Vol.66，pp.251-297，1974.
- 7) 端野道夫・吉田弘：ヒートパルス速度による森林蒸散量推定モデルについて，水工学論文集，第35巻，pp.15-20，1991.2.