

森林流域における物質流出機構の数理モデル化に関する基礎的検討
Mathematical modelling of solute runoff system from forested basin

吉田弘*・田村隆雄**・端野道夫***

By Hiromu YOSHIDA, Takao TAMURA and Michio HASHINO

A mathematical runoff model of solutes from forested mountain basins is developed, based on a tank model comprising a surface tank with soilwater storage systems, and a groundwater tank. The model takes account of two elementary processes, (a) advection owing to the rainwater movement and (b) solute exchange between soil aggregate and adjacent soilwater. The proposed model is applied to observations of streamwater solute concentration (Cl^- and SO_4^{2-}) obtained from a forested mountain experimental basin (main species *Cryptomeria japonica*). The basic model structure is verified by the observation of solute concentrations in both streamwater and soilwater.

Keywords : forested basin, solute runoff, tank model, solute advection and exchange

1.はじめに

近年、市民の水質に寄せる関心の高まりから森林流域の有する水質浄化機能がクローズアップされてきている。これに対して森林流域での降雨による物質流出機構の解析¹⁾に焦点を絞った研究成果が国内外で多数蓄積されてきており、定性的ではあるもののその機構が明らかにされつつある。しかし、例えば樹木の伐採にともなう物質循環機構の変化が河川水質に及ぼす影響の評価というように山林開発あるいは治山事業の現場技術者からの要請に対して、残念ながら現状ではほとんど具体的な方針を提示できていない。これは定性的な知見が豊富に蓄積されているのにもかかわらず、森林流域における物質循環機構の定量評価手法が確立されていないためである。それゆえに定量化手法の確立こそ今日的な急務であるといっても過言でない。流域において物質は時間的・空間的に変化するさまざまな流出経路を経て溪流へ到達すると考えられていることから、なによりも物質の搬送主体となる雨水の流出機構が的確かつ定量的に把握されねばならない。しかしながら土壌－植生－大気連続体として存在する森林流域において、雨水流出機構は降雨遮断、蒸散、浸透・流出といった複数の水文素過程の影響を受ける。このために物質流出機構はもとより雨水流出機構を定量評価しうる手法でさえ未確立なままである。著者らはこの点こそ物質循環機構の

*	正会員	工博	徳島大学助手	工学部建設工学科	(〒770 徳島市南常三島町2-1)
**	学生会員		徳島大学大学院	工学研究科建設工学専攻	(同 上)
***	正会員	工博	徳島大学教授	工学部建設工学科	(同 上)

定量化をはばむ最大の原因であり、こうした現状を打開するには水および物質流出機構の数値モデル化が最も有効な手法であると考えている。ひとたびモデルが構築されれば、現地観測データへの適用とパラメータ感度分析により実務上の問題点に対して有益な情報を提供しうるものと期待される。

著者らは以上のような基本的立場のもとづいて、著者らのグループが開発した森林水循環モデル²⁾を用いて降雨イベントにおける流出成分の分離をおこない、各流出成分の構成比、土壌水濃度の鉛直分布ならびに渓流水濃度の経時変化の相互比較による検討をおこなった³⁾。その結果、森林流域における物質循環機構のモデル化では、雨水流出経路の的確な把握ならびに雨水流動と物質動態とをリンクさせる必要性を確認した。

森林流域における物質循環研究の究極的な目標は、いうまでもなく季節変化を考慮した長期解析である。しかしながら、ここではその第一段階として、生物的影響が少なく、雨水流動が物質動態の主要な支配因子となる短期降雨流出に絞ったモデル化を通して、物質動態モデルのフレームワーク構築を試みた。続いてモデルの基本構造を検討するために、 Cl^- 、 SO_4^{2-} の2つの陰イオンを対象物質として渓流水質の経時変化の再現を試みた。

2. 物質流出タンクモデルの概要

物質流出タンクモデルの概要を図-1に示す。本研究における基本コンセプトは森林土壌内における雨水流動を的確に表現し、それにとまう物質動態を表現することにある。そこで本モデルは雨水の浸透能、保水能、および生物活性の異なる土壌層を表現するために、表層土壌を表現する表層タンクと地下水層を表現する地下水タンクから構成される著者らの直列2段タンクモデルを基礎として構築されている。表層タンクは孔隙に富み、浸透能が他の土壌層に比較して最も大きいA層を表現する上部タンクと、A層に比較して孔隙性に乏しく雨水浸透よりも土壌水分の貯留に貢献するB層を表現する土壌水分タンクから構成されている。更に土壌水分タンクは比較的孔隙が大きく水分移動の活発な場を想定した1次土壌水分タンクと、比較的孔隙の小さく水分移動の小さい場を想定した2次土壌水分タンクで構成され、2つのタンクの水分飽和度の差($S_x/h_x - S_y/h_y$)に比例した土壌水分交換強度 L_T が生じると考える。

今回構築したモデルでは、一雨スケールのような短期降雨流出時における物質動態の表現が対象であり、短期間では比較的影響が少ないと考えられる微生物による無機化のような生物学的作用は考慮の対象から除外されている。土壌中の物質はその雨水流動に対する振る舞いから2種類に大別される。1つは雨水流動にともなう自由に移動しうる溶存態物質(C_s, C_x, C_y, C_g)であり、もう1つは土粒子構造に取り込まれているために雨水流動に対してほとんど応答しない吸着態物質($S_{sa}, S_{ax}, S_{ay}, S_{ag}$)であって、両者は一定の濃度バランスを保つように溶質の交換をおこなうと仮定する。本モデルの基本仮定として、溶存態物質は雨水流動にしたがって土壌中を移流すると考えている。例えば図-1にある1次土壌水分タンクからの地下水かん養成分(q_j)は1次土壌水分タンクの溶存態物質濃度(C_x)を反映することで $C_x q_j$ なる物質フラックスを発生させる。同様にして1次タンクから生じる遅い中間流出成分(q_i)により溪流へ向かう物質フラックスは $C_x q_i$ となる。すなわち溶存態物質は土粒子構造との間で溶出・吸着作用を受けつつ、雨水流動にとまう土壌中での浸透降下過程で各土壌層の溶存態物質濃度、および吸着態物質濃度を形成するとともに、雨水の各流出成分に搬送されて溪流へ流出すると考える。

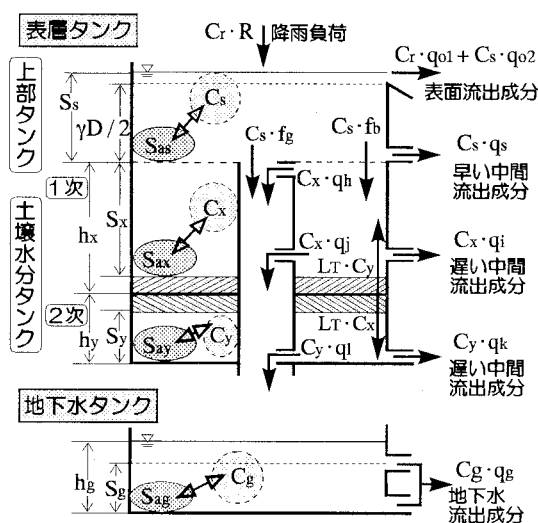


図-1 物質流出タンクモデル

3.物質収支式

図-1 の各タンク内における物質収支式は、溶存態物質と吸着態物質について式(1)～式(8)からなり、各収支式はそれぞれ、雨水流動にともなう移流（浸透、流出）項、ならびに吸着態物質と溶存態物質との間で生じる溶質交換項で構成されている。物質移流量は各浸透、流出量とその成分が発生するタンクの溶存態物質濃度との積で表される。吸着態物質と溶存態物質の間に生じる溶質交換量は、濃度平衡に達する際に土粒子が接している土壌間隙水量に比例して生じるという仮定のもとで各タンクの貯留水深（ S_s, S_x, S_y, S_g ）の関数とした。

$$\frac{d(C_s S_s)}{dt} = C_r R - C_r q_{o1} - C_s (q_{o2} + q_s + f_b + f_g) + v_s (k_s S_{as} - C_s) S_s \quad (1)$$

$$\frac{d\{S_{as}(1-\gamma)D\}}{dt} = -v_s (k_s S_{as} - C_s) S_s \quad (2)$$

$$\frac{d(C_x S_x)}{dt} = C_s f_b - C_x (q_h + q_i + q_j) \mp C_{xy} L_T + v_x (k_x S_{ax} - C_x) S_x \quad (3)$$

$$\frac{d\{S_{ax} h_x (1 - f_x) / f_x\}}{dt} = -v_x (k_x S_{ax} - C_x) S_x \quad (4)$$

$$\frac{d(C_y S_y)}{dt} = \pm C_{xy} L_T - C_y (q_k + q_l) + v_y (k_y S_{ay} - C_y) S_y \quad (5)$$

$$\frac{d\{S_{ay} h_y (1 - f_y) / f_y\}}{dt} = -v_y (k_y S_{ay} - C_y) S_y \quad (6)$$

$$\frac{d(C_g S_g)}{dt} = C_s f_g + C_x (q_h + q_i) + C_y q_l - C_g q_g + v_g (k_g S_{ag} - C_g) S_g \quad (7)$$

$$\frac{d(S_{ag} h_g)}{dt} = -v_g (k_g S_{ag} - C_g) S_g \quad (8)$$

ここに、 t ：時間(hr)， R ：降雨強度 (mm hr^{-1})， C_r ：降雨濃度 (mg mm^{-1})， C_s, C_x, C_y, C_g ：溶存態物質濃度 (mg mm^{-1})， $S_{as}, S_{ax}, S_{ay}, S_{ag}$ ：吸着態物質濃度 (mg mm^{-1})， $q_{o1}, q_{o2}, q_s, q_i, q_k, q_g, q_h, q_j, q_l, f_b, f_g$ ：流出・地下水かん養強度 (mm hr^{-1})， L_T ：1次・2次土壌水分交換強度 (mm hr^{-1})， S_s, S_x, S_y, S_g ：貯留水深(mm)， γ, f_x, f_y ：土壌間隙率， D ：土壌層厚(mm)， h_x, h_y ：土壌水分飽和容量(mm)， $v_s, v_x, v_y, v_g, k_s, k_x, k_y, k_g$ ：溶存態・吸着態物質交換係数である。 C_{xy} は、例えば L_T が1次タンクから2次タンクへ向かう場合には1次土壌水分タンクの収支式で $-C_x$ 、2次土壌水分タンクの収支式で $+C_x$ をとり、逆に L_T が2次土壌水分タンクから1次土壌水分タンクに向かう場合には、それぞれ $+C_y$ 、 $-C_y$ をとる、なお、添字 s, x, y, g はそれぞれ、上部、1次土壌、2次土壌ならびに地下水タンクにおける量であることを示す。

4.計算方法とパラメータ同定手法

計算にあたって、まず森林水循環モデルを構成する降雨遮断タンクモデル⁴⁾によって地表到達雨量を算定する。得られた地表到達雨量に降雨濃度を乗じた降雨負荷量を上部タンクに入力し、逐次各タンク内で水収支と物質収支の計算を行って、溶存態物質濃度と吸着態物質濃度を算定する。続いて各流出成分量に対応する溶存態物質濃度を乗じて各流出成分負荷量を算定し、式(9)に示すように総流出負荷量を総流出高で除することで最終的に渓流水濃度を算定する。なお計算単位時間は1分である。

$$C_{\text{est}} = \frac{C_r \cdot q_{o1} + C_s \cdot q_{o2} + C_s \cdot q_s + C_x \cdot q_i + C_y \cdot q_k + C_g \cdot q_g}{q_{o1} + q_{o2} + q_s + q_i + q_k + q_g} \quad (9)$$

ここに、 C_{est} ：計算渓流水濃度 (mg l^{-1})， C_r ：降雨濃度 (mg l^{-1})， C_s, C_x, C_y, C_g ：各タンクの溶存態物質濃度 (mg l^{-1})， $q_{o1}, q_{o2}, q_s, q_i, q_k, q_g$ ：各流出成分量 (mm hr^{-1})である。

森林土壌に到達する降雨成分としては樹冠通過成分と樹幹流下成分とがあり、一般に両者の物質濃度は異なるが、地表到達雨量の大部分を樹冠通過成分が占めることから降雨濃度 (C_r) には原則として降雨イベント中に観測された樹冠通過成分の平均濃度を用いる。

物質動態に関わる全てのパラメータ ($k_s, k_x, k_y, k_g, v_s, v_x, v_y, v_g$) は次式で定義される渓流水濃度のモデル計算値と観測値の誤差 2 乗和で定義される評価関数 F を最小にする値の組み合わせを最適化手法を用いて探索し決定する。

$$F = \sum_{j=1}^N (C_{obs,j} - C_{est,j})^2 \tag{10}$$

ここに、 $C_{obs,j}$: 観測渓流水濃度 (mg l^{-1})、 $C_{est,j}$: 計算渓流水濃度 (mg l^{-1})、 N : データ数である。

溶存態物質および吸着態物質濃度の初期値 ($C_{sini}, C_{xini}, C_{yini}, C_{gini}, S_{asini}, S_{axini}, S_{ayini}, S_{agini}$) は現地観測で得られた降雨前の土壌水濃度の鉛直分布データを参考にするが、その値をそのまま用いるのではなく、いずれも未知パラメータとして同定する。

5.対象流域と観測の概要

本モデルを適用した流域は図-2 に示す国立環境研究所筑波森林試験地⁵⁾であり、流域面積は 67.5ha、標高は約 200~380m、流域の平均斜面勾配は 15° である。地質については、表層付近に関東ローム質粘土を主体とした崖錘が分布しており、それ以深には泥岩を中心とする堆積岩と風化した花崗岩が分布し、GL-10m 付近に基岩の花崗岩が存在している。植生については流域の 85% 以上をスギ、ヒノキ、アカマツが占めている。特にスギは沢を中心に広範囲に分布し、流域の約 53% を占める。渓流流量および林外雨量の観測と採水は図中に示した◆地点

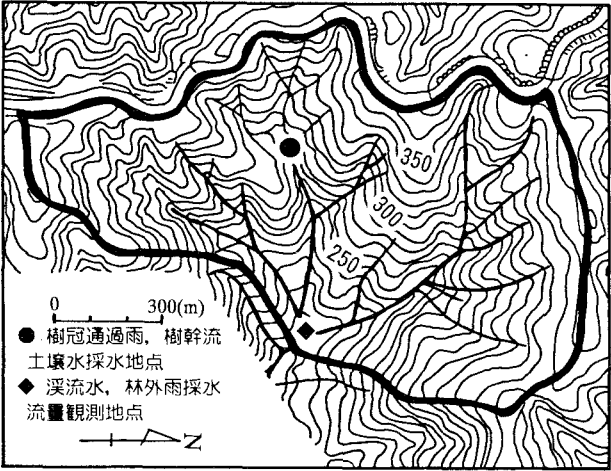


図-2 筑波森林試験地

で、土壤水の採取、樹冠通過雨および樹幹流下雨の観測と採水はスギ林内にある●地点でおこなわれている。なお観測の詳細については参考文献 5) を参照されたい。水質分析項目は、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 、pH、EC(電気伝導度)、および SS である。本論文では、a) 生物学的・化学的作用を受けにくく、b) 負に帯電している土壌コロイドに吸着されにくいために雨水流動に対して敏感、といった特徴⁵⁾に着眼し、対象物質として 2 つの陰イオン (Cl^- 、 SO_4^{2-}) を採用した。そして本モデルによる一降雨イベントで降雨流出における渓流水濃度変化の再現性からモデル基本構造の妥当性を検討した。

表-1 各降雨イベントの水文条件

降雨 Event	観測期間	総降雨量 (mm)	最大時間雨量 (mm hr ⁻¹)
Event 1	1985. 6. 1-6. 16	48. 0	4. 5
Event 2	1985. 6. 29-7. 3	136. 5	12. 5
Event 3	1986. 6. 25-6. 28	26. 5	8. 5

なお、今回モデルの検討資料としたのは 1985 年から 1986 年にかけて筑波試験地で観測された水文条件の異なる 3 つの降雨イベントにおける SO_4^{2-} 、 Cl^- の渓流水濃度の経時変化である。各降雨イベントの水文条件を、表-1 に示す。

6.解析結果

残念ながら上記の降雨イベントでは樹冠通過成分の濃度が入手できなかったため、ここでは代替として林外雨濃度を採用した。

Event1～Event3 の解析で得られた、共通のモデルパラメータ同定結果を表-2 に示す。これらのパラメータの中では v_s, v_x, v_y が敏感であったので、溶存態と吸着態の間の交換過程を検討するのに重要なパラメータになると考える。

各降雨イベントにおける渓流水 Cl^- 、 SO_4^{2-} 濃度の経時変化についてモデルにより再現した結果を図-3～図-5 に示す。グラフは上から順に降雨イベント中でのハイドログラフ、観測ハイドログラフおよび水循環モデルによる流出成分の分離結果、そして SO_4^{2-} 、 Cl^- の渓流水濃度変化の観測値と本モデルによる計算値との比較例である。各降雨イベントにおいて若干の誤差はあるものの、概して SO_4^{2-} 、 Cl^- ともにモデルによる観測値の再現性は良好である。例えば Cl^- の場合には全てのイベントで遅い中間流出成分が増加すると渓流濃度も増加しており、逆に早い中間流出成分の増加にともなう渓流濃度の減少をうまく説明できている。 SO_4^{2-} の場合、Event3 では Event1、Event2 と異なり早い中間流出成分の増加が渓流濃度上昇に寄与しているが、これは Event3 の前で土壌表層部に SO_4^{2-} が大量に蓄積されていたためと考えられる。このように対象物質を Cl^- 、 SO_4^{2-} の2つに限定し、雨水流動に物質流動を単純にリンクさせただけの簡単なモデルではあるが、森林土壌内からの物質流出の結果として生じる渓流水濃度の経時変化を十分な精度で再現しうることが確認できた。

表-2 同定パラメータ表

	Cl^-	SO_4^{2-}
v_s	0.429	0.400
v_x	2.722	4.973
v_y	0.002	0.009
k_s	0.088	0.200
k_x	0.144	0.250
k_y	0.110	0.248

※ v_g, k_g は共に 0.000

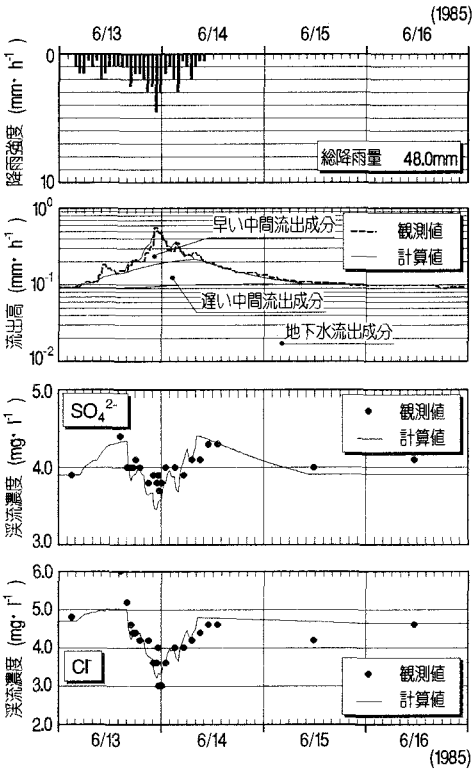


図-3 Event 1 モデル計算結果

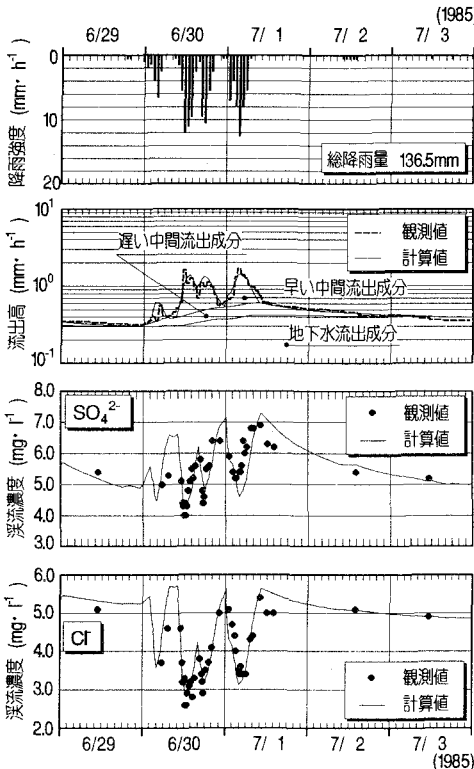


図-4 Event 2 モデル計算結果

7.おわりに

本研究では、森林土壌内における物質流動を水流動にリンクすることで物質流出タンクモデルを構築し、3つの水文条件が異なる降雨イベントでの Cl^- 、 SO_4^{2-} についてモデルによる渓流水濃度の経時変化の再現性からモデルの基本構造を検討した。その結果、溶質の移流と交換という2つの素過程のみを考慮した簡単なモデルでも渓流水質の経時変化を良好に再現できたことから、改めて森林土壌内の物質鉛直分布と、物質の搬送主体となる流出成分量を正確に把握する必要性を確認した。この結果を踏まえて今後、土壌水濃度の鉛直分布の経時変化と各タンク内における物質濃度変化との対応関係から、モデル細部の検討をおこなう予定である。また本モデルでは、地表に到達する降雨負荷量を算定するために、原則として降雨イベント中の樹冠通過雨濃度の平均値を採用しているが、実際には樹冠通過雨濃度も植生の影響を受けて常に変化していることが指摘されている⁷⁾。降雨強度が大きく、酸性雨のように降雨濃度が土壌水濃度より高い場合には渓流水濃度形成に大きな影響を及ぼすことから、降雨遮断過程における物質動態のモデル化を現在進めている。最終的には水質の富栄養化につながる栄養塩 (NO_3^- -N, PO_4^{3-} -P) 流出を対象とするために生物学的・化学的作用を考慮にいったモデルの構築と季節変化を考慮した長期解析へ展開するつもりである。

なお、本研究の一部は、河川環境管理財団による研究助成（平成4、5年度、研究代表者、徳島大学教授、端野道夫）の補助を受けました。また本論文の作成にあたって国立環境研究所平田健正主任研究員には貴重な水質分析データの提供を受けました。ここに記して深謝申し上げます。

参考文献

- 1) 例えば、平田健正・村岡浩爾：森林域における物質循環特性の渓流水質に及ぼす影響，土木学会論文集，399/II-10，pp.131-140，1988。
- 2) 端野道夫・吉田弘・村岡浩爾：森林水循環モデリングと水収支の評価，水工学論文集，36，pp.521-528，1993。
- 3) 吉田弘・端野道夫・田村隆雄・村岡浩爾：山地小流域での渓流水質形成過程に関する基礎的検討，水工学論文集，38，pp.271-276，1994。
- 4) 吉田弘・端野道夫・村岡浩爾：樹幹流データを利用した降雨遮断タンクモデルによる森林蒸発量の推定法，水文・水資源学会誌，Vol.6，No.1，pp.19-30，1993。
- 5) 村岡浩爾・平田健正：渓流水から見た森林の水質浄化機能に関する研究(第1報)，国立公害研究所研究報告，第95号，pp.21-35，1986。
- 6) 例えば、中野政詩：土の物質移動学，東京大学出版会，pp.54-58，1991。
- 7) Uichiro Matsubayashi, Fusetsu Takagi, German T Velasquez, Hisaya Sasuga, Tetsuya Sumi, On The Physical and Chemical Properties of Throughfall and Stemflow, 水工学論文集，38，pp.57-62，1994。

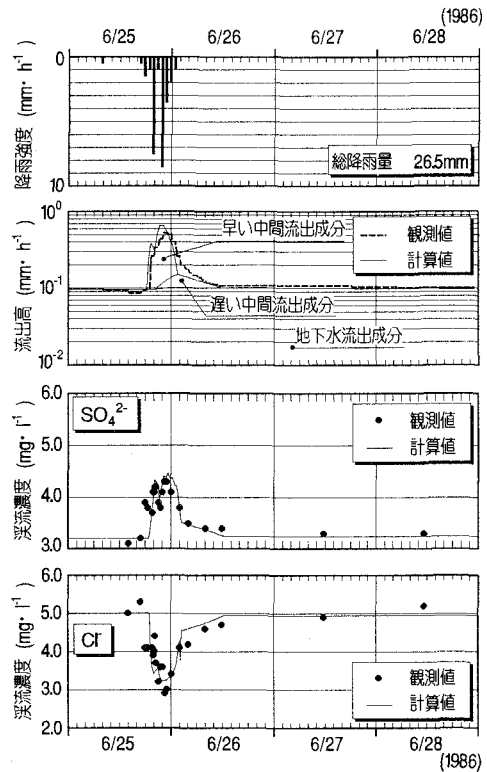


図-5 Event 3 モデル計算結果