

森林流域における水質形成機構解明と変動予測のための 水文化学モデルの開発

Development of the integrated hydrochemical model for description and forecast of hydrochemical system in a forest catchment

代表研究者 京都大学農学研究科助教授 大手信人

Associate professor, Graduate School of Agriculture, Kyoto Univ. Nobuhito OHTE

An integrated hydrochemical model for description and forecast of biogeochemical responses in a forest catchment has been developed based on intensive observation in a temperate forest catchment. As the prototype of the basin-scale hydrochemical modeling taking the saturated-unsaturated infiltration into the soil chemical process, a numerical model for SiO_2 concentration generation was proposed. The process oriented 1-D pH simulation model and nitrogen/carbon dynamics model were also proposed. The basin-scale model has multiple subunits with each soil depth that is determined by actual soil depth distribution. A coupling calculation of saturated-unsaturated infiltration and convection-diffusion process is conducted for each subunit using observed rainfall quantity and quality data set. Using the properly estimated chemical weathering rate, the model can reproduce the observed timesequential change of the SiO_2 concentration of stream and subsurface groundwater for the duration of both storm event and base flow periods. The 1-D pH simulation model is based on the observed information of buffering systems in actual soil layer. The model simulates the CO_2 gas profile and alkalinity of soil solution. It can successfully reproduce the seasonal changes in pH of groundwater and streamwater.

研究目的

近年の水資源保全に関する社会的関心は、その量的側面のみならず質的保全の必要性にも向けられてきている。特に環境問題のクローズアップとともに酸性雨の森林流域に対する影響評価や、森林の緩衝機能の評価に対するニーズが高まっている。本研究の目的は、森林流域の水循環過程における水質の変化過程に生物化学的要因と地球化学的要因がどのように影響しているかを考察し、流域スケールの水文化学モデルを構築することである。ここで生物化学的要因とは、森林植生や土壌微生物等の作用によって生じる水質変化過程をさし、植物根系の水分吸収・呼吸、有機物の土壌への供給・分解、硝化、脱窒の影響等をさす。地球化学的要因とは化学的風化による土壌粒子の溶解や粘土鉱物の生成等の作用を指す。本研究では、モデリングを念頭に置いて、水質形成の統合的な指標としての pH の決定メカニズムに焦点をあてて現地観測を行った。この観測データに基づいてモデルの構築を試みた。

研究経過

著者は温帯森林流域の水質形成機構を明らかにし、モデルの構築に必要なデータを整備するため、1990年夏期から滋賀県南部の桐生水文試験流域において種々の水文過程において水質のモニタリングを実施してきた。この集中観測の過程で、主要な溶存イオンの各水文過程での変化や、降雨イベント時の水文現象に対応する水質の変動が明らかになった。これらの知見に補足する項目として、計画に従い、以下の新たな観測・実験を行った。

1. 土壌 CO_2 濃度の時空間分布の測定
2. ライシメーターを用いた表層上壌中の窒素ダイナミクスの測定
3. 降雨イベントにおける SiO_2 と NO_3^- の濃度変動についての集中観測

これらから得られた観測データに基づき、以下のモデルを構築した。

1. 土壌 CO_2 のプロファイル、土壌水中のアルカリ度から地下水・渓流水の pH を予測する一次元数値計算モデル
2. 窒素ダイナミクスを炭素の消費過程とカップリングさせた数値計算モデル
3. 流域水文過程における種々の溶存物質の濃度変動と降雨イベントにおける変動予測のための濃度計算モデル

さらに、植生の異なる近隣の流域の観測データを用いた、水質形成に関する植生発達の影響についての比較解析や、世界の森林流域における水質観測データを用いた緩衝過程の地理的多様性に関する比較解析も行った。

研究成果

1. 森林における土壌 CO_2 の時空間分布

図-1 は流域の縦断面図上に示した 3 点における土壌 CO_2 濃度の鉛直分布 (図-1a) と、最深部の土壌 CO_2 濃度とその地点の地下水の溶存 CO_2 濃度との対応 (図-1b) を示している。土壌中の CO_2 濃度は深部ほど高い傾向を示し、その分布はソースが表層に偏っていることを示唆していた。また、図-1b は飽和地下水中の溶存 CO_2 濃度が地下水面上の土壌 CO_2 濃度ばかりでなく、地下水の流動と混合の影響を受け、上流部の CO_2 環境の影響を強く受けていることがわかった (浜田ら, 1996)。

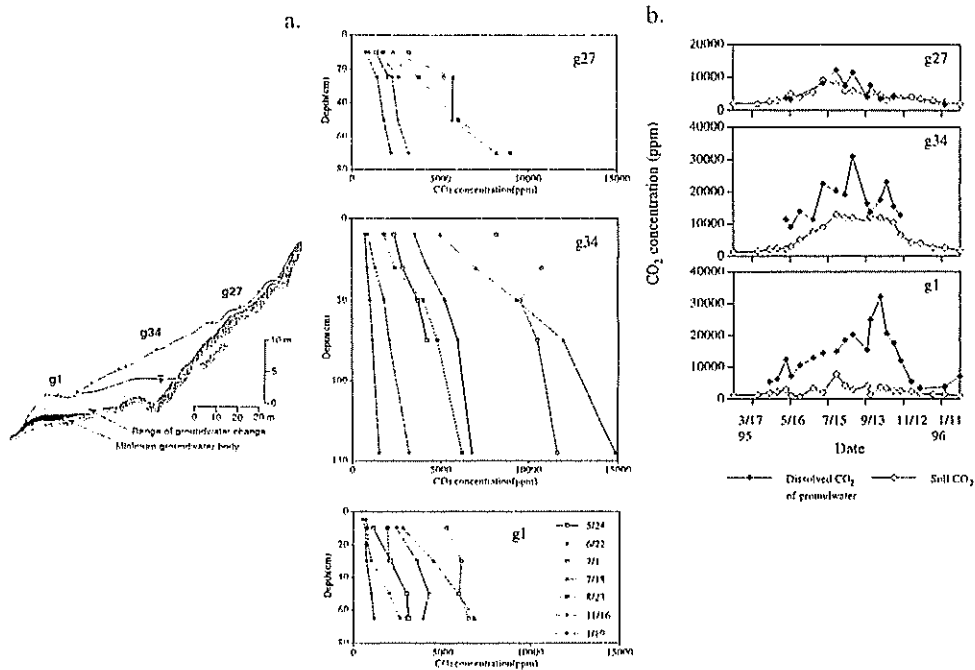


図-1 土壌 CO₂ ガス濃度観測点の位置と観測結果
 a. 土壌 CO₂ ガス濃度の鉛直プロファイル b. 地下水面近傍の土壌 CO₂ ガス濃度と地下水の溶存 CO₂ 濃度との対応

これらの知見と、アルカリ度の空間分布とその決定要因に関する観測データ(図-2)を踏まえ、地下水・渓流水の pH を予測する一次元数値計算モデルを構築し、観測結果の再現を行った。モデルは鉛直一次元系における水分移動と Na⁺の溶質移動、CO₂ ガス拡散の各数値計算モデルからなる。図-3a,b は土壌深さ 200cm までについて計算された土壌水中 Na⁺濃度、CO₂ ガス濃度の時空間変動を示している。また、図-4 は計算された地下水と渓流水の pH 変動を観測値とともに示している。計算結果は観測値の季節変化をおおむね良好に再現しており、観測から得られた pH の決定要因の確かさが確認された。

2. ライシメーターを用いた窒素ダイナミクスに関する原位実験

研究成果は発表論文 Ohte et al. (1997)と中西ら(1997)に詳述されているが、ここで得られた主要な知見の一つは、土壌表層に有機物が過剰に供給された場合、NH₄⁺プールの増大と NO₃⁻プールの増大にタイムラグが観察されること、硝化速度が水分条件にコントロールされることである。これらの知見をもとに、図-5 に示す構造の窒素循環に関する数値モデルを構築し、モデルのパフォーマンスを既存のインキュベーションデータを用いてテストした(図-6a-d)。この結果適切なパラメータの設定によって、実験結果を再現することが

でき、野外実験でも観測された硝化開始のタイムラグも計算可能であることがわかった。

3. 降雨イベント時における SiO₂ と NO₃⁻濃度の変動様式

比較的降雨量の少ない3回の降雨イベントに対し観測された渓流水中の SiO₂、NO₃⁻濃度の短時間の変動から、NO₃⁻はイベント以前の流域の水分条件によって異なる変動パターンを示すことがわかった(勝山ら, 1997)。

4. 流域モデルの構築

以上のプロセスモデルを統合して流域レベルの水質形成を予測するモデルを構築するため、各水文過程の影響を組み込んだ水文・化学モデルを構築し、観測 SiO₂ 濃度を流量、地下水位の変動とともに計算した(図-7)。観測結果から推定された SiO₂ の土層内での溶出速度を用い、観測ハイドログラフが良好に再現されるよう調節された水文過程モデルによって、年間の地下水、渓流水の SiO₂ 濃度の変動が良好に再現された。また、短期出水に伴う敏感な濃度変化もシミュレートできることが示された。

今後の課題と発展

Biogeochemical な過程を考慮したモデルの開発という意味では、一次元の pH 予測モデルの構築は観測事実を踏まえたシステムを持っており、当初計画の目標をある程度達成できたと考えている。しかしながら、流域レベル

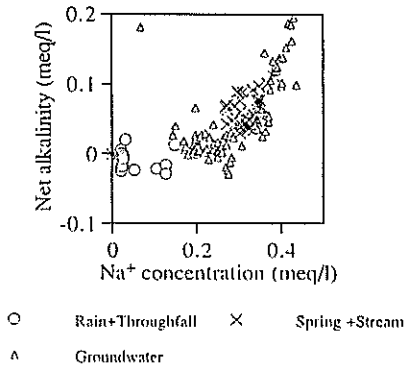


図-2 Na⁺濃度とアルカリ度との関係

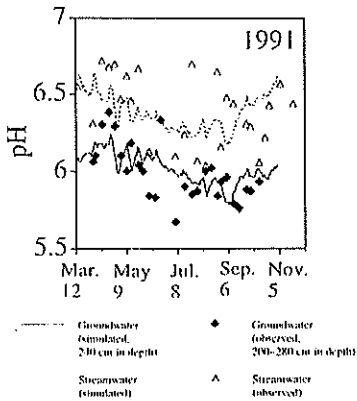


図-4 計算された地下水・溪流水のpH季節変動

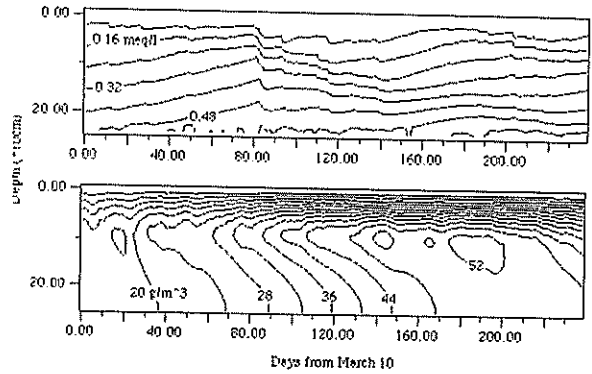


図-3 計算された土壌水中のNa⁺濃度とCO₂ガス濃度のプロファイル

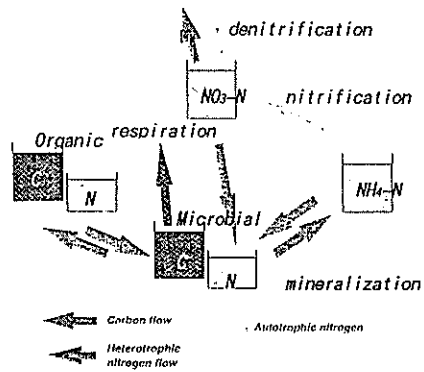


図-5 炭素の消費を考慮する窒素循環モデルの概念図

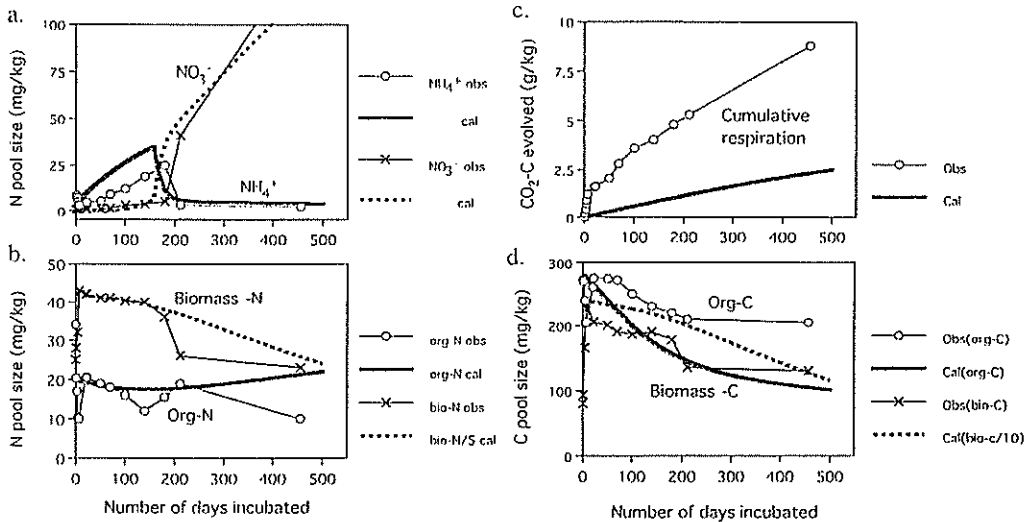


図-6 インキュベーションデータに関する再現計算
a. NH₄⁺, NO₃⁻のプールサイズ, b. Biomass-N, Org-Nのプールサイズ, c. 積算呼吸量, d. Biomass-C, Org-Cのプールサイズ

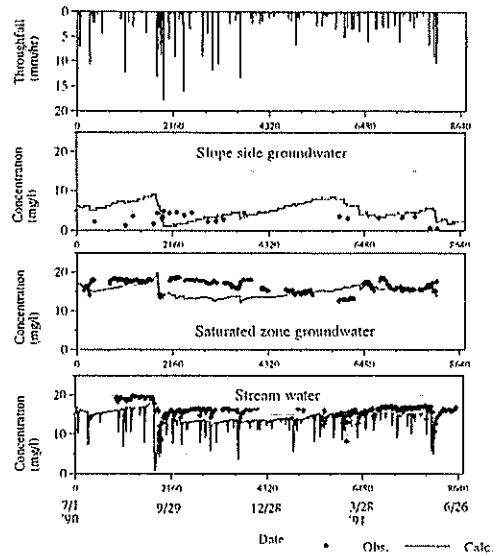
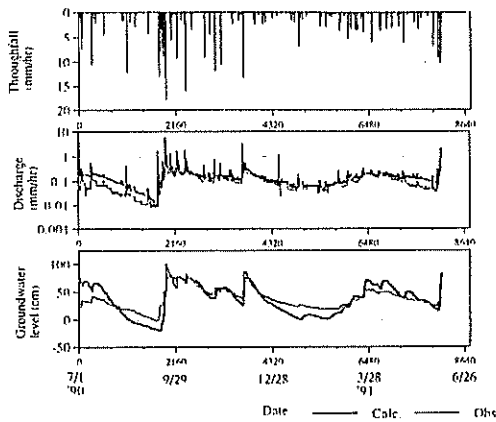


図-7 流域スケールモデルによる地下水位、流出量、各水文過程での SiO₂ 濃度の計算結果

にモデルを総合化することが課題として残された。次のステップとして SiO₂ に関して構築・適用した流域レベルの水質形成モデルをベースにして、浸透過程に窒素の動態モデルと上層 CO₂ ガスの濃度形成モデルとを組み込む必要がある。

本研究の過程で新たな方向性が示された側面として以下のことがあげられる。モデルの開発に付随して流域の緩衝機能の評価について概念モデルを提示することができた(大手・徳地, 1997)。また、桐生試験地で明らかになった酸緩衝システムと植生の異なる流域のそれを比較することによって、植生の発達緩衝システムの形成に与える影響について論ずることができた(浅野ら, 1996)。さらに、世界の種々の気候条件に成立する森林流域における緩衝プロセスを比較解析することによって、その地理的多様性に土壌生成の過程に関与する地形学的な差異が影響していることを指摘することができた(Ohte & Asano, 1997a,b)。

発表論文リスト

浅野友子・大手信人・小橋澄治(1996): 森林の成立過程における水質形成機構の変化—植生の発達段階の異なる流域における水質・水文観測—。京都大学演習林報告, No. 68, 25-42.
 浜田美鈴・大手信人・小橋澄治(1996): 森林流域における土壌 CO₂ ガス濃度の鉛直分布。日本林学会誌, No.78, 376-383.
 勝山正則・大手信人・浅野友子・小橋澄治(1997): 森林流域からの流出水質に降雨イ

ペントが影響を与えるメカニズム。京都大学演習林報告, 印刷中

中西麻美・徳地直子・大手信人(1997): 森林表層土壌における無機態窒素の動態とカチオン濃度の対応—土壌水分条件を考慮するライシメータ実験—。京都大学演習林報告, 印刷中

Ohte, N. and Asano, Y. (1997a): Global comparison of the pH determining factors of the streamwaters in world forest basins. IAHS publication, No. 244, 253-265.

大手信人・徳地直子(1997): 森林流域における酸緩衝機構の空間的多様性: 花崗岩小流域における緩衝過程の鉛直分布。水文・水資源学会誌, 印刷中

Ohte, N., Tokuchi, N. and Suzuki, M. (1997): An in situ lysimeter experiment on soil moisture influence for inorganic nitrogen discharge from forest soil, Journal of Hydrology, No. 195, 78-98.

解説

大手信人(1997): Biogeochemical にみる森林流域の水質形成過程。森林立地, 印刷中

著書

大手信人(1996): 地中水の水質形成機構。恩田裕一他編『水文地形学』, 古今書院。

Ohte, N. and Asano, Y. (1997b): Comparison of the pH determining factor of the streamwater in world forest watershed. Edited by M. Taniguchi et al. "Subsurface Hydrological Responses to Land Cover and Land Use Changes", Kluwer Academic Publishers, 105-120.