

流域生態系モデルを構築する際に考慮すべき水文過程の影響について

大手 信人 京都大学大学院農学研究科

はじめに

陸域生態系における物質循環過程の数値モデルの開発は1980年代から進められ、これまでにいくつかのモデルが提案されている (Running and Coughlan, 1988; Parton et al., 1988; Aber and Federer, 1992). しかしながら、森林流域を対象として、生態系内の物質循環に加えて、養分物質の土壌層から溪流への流出フラックスを計算する機能を持っているものは限られる. PnET モデル (Aber et al., 1997) は、その一つであるが、北東アメリカの森林流域を中心に適用され、観測結果の再現性が確認されている. モデルの構造は、他の生態系モデルに比べてシンプルで、特に降雨-流出過程の表現は、いわゆるバケツモデル的であり、土壌層の保水容量 (water holding capacity) のみが流出場の特性を与えるパラメータとなっている.

本稿で検討したい問題の提起は、これに対する以下のような疑問に端を発している. 現実の森林流域における降雨-流出過程は、一般に複雑で、降水、土壌水、地下水等、種々の成分の混合によって成り立っている. 溪流の水質は、これら固有の溶存物質濃度を持った成分の混合比で決定される. このため、溪流水質のモデル化には、現実的な降雨-流出モデルが必要とされ、通常、一つの貯留項だけでは定式化できない. すなわち、疑問点は、PnET モデル中の降雨-流出過程が、上述のように極めて単純であるにもかかわらず、溪流水質 (特に NO_3^- 濃度) の季節変動が、なぜよく再現できるのかということである.

このことを検討するためには、モデルのパフォーマンスの背後にある、観測データの特徴から考察しなければならないだろう. ここでは、まずこのモデルが適用されている、北東アメリカと、我が国の中央部の森林流域との気候条件とその違いが、 NO_3^- 流出の季節性にどのように影響をおよぼすかを考察することから始める.

日本と北東アメリカにおける溪流水 NO_3^- 濃度の季節変動の違い

森林における生物地球化学的な物質の循環は、当然のことながらその森林がある地域の気候条件の影響を受ける. これまでに温帯ではこれまでに多くの生物地球化学や水文学的な野外研究がなされてきたが、それらの中での、降水量の季節変動のパターンに関する多様性は必ずしも多くはない. これは、こうした公表されている事例研究の大半が北東アメリカと北ヨーロッパで進められてきたからである.

アジアモンスーンは東アジアとオセアニアの一部に非常に特徴的な気候条件をもたらす。モンスーンアジアの温帯では、夏の動植物の生長期に降水量が多く、北東アメリカと北ヨーロッパでは降水量の季節変動が一年を通じてフラットであることと対照的である。夏季に降水量が多いことは、例えば、土壌有機物を分解・無機化するある種の微生物にとって好適な条件を提供する (Mitchell et al., 1997)。また、同時に地下部では、土壌水分の増加や地下水位の上昇によって、土壌圏から地下水帯-溪流への物質の移動が活発になり、栄養塩の流出も増加する。これに対し、北東アメリカや北ヨーロッパでは、夏季に植物による吸収が微生物による無機化速度を上回るために栄養塩の現存量が減少し、一方、土壌水分の減少や地下水位の低下が進み、栄養塩の溪流への輸送は抑制されることになる (Stoddard 1994)。Figure 1 は、北東アメリカのハバードブルック試験林と我が国の滋賀県南部の桐生試験流域での観測データを比較したものである。

我々の野外観測地である桐生試験流域では、溪流の流量と栄養塩濃度の季節変動にアジアモンスーンの特徴的な降水季節パターンの影響が見られる。加えて、桐生試験地の土壌中での NO_3^- 現存量の季節変化が、Mitchell et al. (1997) が指摘しているような夏季に増加するというパターンを示さないことを考慮すると、このことは、上記で示したような水文学的な季節変化、つまり土壌から溪流への栄養塩の輸送が、微生物の活性や植物の吸収で左右される土壌中の栄養塩現存量の変動よりも強く溪流水の季節性に影響を及ぼしていることを物語っている。

桐生試験地における溪流の、 NO_3^- 濃度の季節変動の背後にある流出のメカニズムは、モンスーン気候下では、夏季の地下水位上昇に伴う比較的浅い土壌からの栄養塩流出の促進が溪流中の濃度変動に重要な役割をはたすことを示している (Ohte et al. 2003)。ヨーロッパや北東アメリカにおいては、夏季、植物の吸収が活発で土壌中の無機態窒素現存量が小さくなることと、植物の蒸散の活発化によって土壌水分量の減少や地下水位の低下が生じ、溪流への NO_3^- の輸送能力が低下することの両方が夏季に溪流中の NO_3^- 濃度が減少することの原因であると考えられている。しかし、モンスーン気候下の桐生の知見を参照すると、地下水位や土壌水分条件といった水文学的な条件による影響を軽視しているのではないかという疑義が生じる。

アジアモンスーン条件下の事例への PnET モデルの適用

こうした疑義が正しいとするならば、もし流域を対象とする生態系モデルに、現実的な水文モデルが組み込まれていない場合、 NO_3^- 流出の季節変動が土壌中の窒素のダイナミクスではなくて水文条件に強く左右されるような所では、十分に NO_3^- 濃度をシミュレートすることができないのではないだろうか。

この問題を検討するために、PnET-CN モデルの桐生試験流域内の最上流部に位

置するマツ沢のデータに適用することを試みた。

Figure 2a-d は、PnET モデルの計算に用いた桐生試験地の気候条件を示している。これまで述べてきたように、月別降水量の変動はアジアモンスーンの影響を受けており、北東アメリカのハッパードブルックと大きな違いがある (Figure 1)。モデルで指定できる森林タイプのうち桐生試験地の植生に最も近い "Red Pine" を用いて、現況の窒素循環を再現することを目標に長期シミュレーションを行った。Figure 3a,b は計算された渓流水中の月平均 NO_3^- 濃度と月流出量を示している。これらの計算値は、上述のように、気候値を用いた繰り返しの計算であり、ある特定年のデータを再現するものではないが、2001-2004 年のデータを用いた観測値を Figure 3c に示す。計算された月流出水量は、降水のモンスーンによる季節パターンをそのまま反映している。これと対照的に、 NO_3^- 濃度の計算値は夏季に顕著に低下し、冬季に最高値をとる季節変動を示している。これはマツ沢の観測値の季節性とは全くことなり、明らかに、ハッパードブルックのそれと類似している。この季節性は、上述したように土壤中の NO_3^- の現存量が夏季に、無機化量を植物の吸収が上回るために低下することの影響として説明されるが、マツ沢では、こうした変化は観測されない。

このメカニズムは Ohte et al. (2003) によってすでに明らかにされているが、季節変動を主に制御しているのは表層に近い地下水と、深部の地下水の混合比であった。以上のことは、シンプルな水文モデルしか持たない PnET モデルのシミュレーションでは、地下水の混合が季節的に変化するといったメカニズムが渓流水の NO_3^- 濃度に影響を及ぼすような流域に対しては、十分な表現力を持たないことを示している。また、この短所は、アジアモンスーンの影響が強い水文過程をもつ森林流域ではより顕著に表れるものと考えられる。

流域の水貯留の効果を考慮する流域生態系モデルに向けて

流域水循環を対象にする数値モデルにも多くの種類があるが、それらの多くは、土壌水-地下水の貯留と混合の効果を定式化している。HYCY モデルは、福嶋・鈴木 (1986) によって、森林流域の水循環を再現するモデルとして開発され、源流域の水文過程の中での水の貯留と流れを最もリアルに表現できるモデルの一つである。PnET モデルのような生態系モデルに地下部の水文過程に関するモデルを付加する試みの第一歩として、HYCY モデルを用いて、土壌水・地下水の貯留が溶存物質の流出にどのように影響するかを検討した。

HYCY モデルの構造を Figure 4 に示す。HYCY モデルは地下部に Su と Sb の 2 つのタンクを持っており、前者が土壌層、後者が地下水帯での水の貯留を想定している。ここで、前者は土壌が水で飽和していない状況での水分貯留、後者は飽和した条件を想定している。

上述の PnET モデルによるシミュレーションの結果に従い、次のような仮定をおいた。PnET の出力値として計算される“leaching N”は、大部分の形態は NO₃⁻であり、溶出は、専ら土壌層から生じたものとする。つまり、PnET の定義では計算“leaching N”は、流域からの流出そのものであるが、ここでは窒素ダイナミクスが活発である土壌層から、地下水帯への流出であると仮定する。この“leaching N”に対応する濃度をもった土壌水は、HYCY モデルのタンク Sb に流入し、貯留された後、地下水流出となって溪流に流出する。

水のフラックスは、時間単位の観測値を与える。地下水タンク Sb 内の NO₃⁻のますバランスと、渓流水の NO₃⁻濃度は以下の式に従って計算する。

$$\frac{dS_g C_g}{dt} = Q_{in} C_{leach} - Q_g C_g \quad (1)$$

$$C_{str} = \frac{Q_g C_g + Q_d C_d}{Q_g + Q_d} \quad (2)$$

ここで、 S_g , C_g は、Sb 内の水の貯留量とその NO₃⁻濃度である。 Q_{in} , C_{leach} は、土壌層 (Su) からの流入水フラックスとその NO₃⁻濃度であり、これは PnET の計算結果から与えられる。 Q_g は、地下水タンク Sb からの流出水フラックスである。渓流水は直接流出 (Q_d) と地下水タンク Sb からの基底流出 (Q_g) の混合で成り立っている。

モデルは時間単位の溪流の流量と、その NO₃⁻濃度を計算する。Figure 5a-c は、時間単位の計算 NO₃⁻濃度と、月平均の NO₃⁻濃度、月流出水量の計算値を示している。基底流出の NO₃⁻濃度は季節変化し、6 月初旬にもっとも高くなる。また、降雨がある時の直接流出によって著しく希釈を受けている。こうした現象は、Katsuyama et al. (2001) によって示されている、2000-2004 年の観測結果と定性的には一致している。基底流出時の NO₃⁻濃度が非常に緩やかに変化し、夏季に低下しないことは、明らかに地下水タンクによる貯留の効果によって、土壌水中の NO₃⁻濃度の季節性が抑制されたことによるものと考えられる。Figure 3c に示されている溪流中の観測 NO₃⁻濃度の季節性と比較すると、濃度のレベルは異なるが、変動のパターンはよく再現されている。

このテストシミュレーションの結果は、流域モデルを構築する場合に、地下水帯による水貯留の影響が計算できる水文サブモデルを組み込む必要があることを示している。加えて、地下水貯留の影響は、流出の制御要因として重要であるばかりでなく、還元環境になりやすい地下水帯で生じる脱窒やメタンの生成など、流出水質に影響を与える生物地球化学的反応を左右するという側面からも重要で

ある（伊藤ら 2005; Osaka et al.2006）. 今後, こうした反応を流域生態系モデルの中で取り扱っていくためにも, 地下水のダイナミクスを表現できるサブモデルの追加は必要となる.

引用文献

- Aber, J.D. and Federer, C.A. (1992), *Oecologia* 92, 463-474.
- 福嶋義宏・鈴木雅一 (1986) 京都大学演習林報告 57, 162-185.
- 伊藤雅之・大手信人・勝山正則・木庭啓介・川崎雅俊・谷誠 (2005) 水文・水資源学会誌, 18(3), 244-256.
- Katsuyama, M., Ohte, N., and Kobashi, S. (2001) *Hydrological Processes*, 15, 249-260
- Mitchell, M. J., Driscoll, C. T., Murdoch, P., Likens, G. E., Kahl, J. S. and Pardo, L. (1996) *Environmental Science and Technology* 30, 2609-2612.
- Mitchell, M. J., Iwatsubo, G., Ohrui, K. and Nakagawa, Y. (1997) *Forest Ecology and Management* 97, 39-51.
- Ohte, N., Tokuchi, N., Katsuyama, M., Hobara, S., Asano, Y. and Koba, K. (2003) *Hydrological Processes* 17, 237-249
- Osaka, K., Ohte, N., Koba, K., Katsuyama, M., and Nakajima T. (2006) *Journal of Geophysical Research* (in press).
- Parton, W.J., Stewart, W.B. and Cole, C.V. (1988) *Biogeochemistry*, 5, 109-131.
- Running, S.W. and Coughlan, J.C. (1988) *Ecological Modeling* 42, 125-154.

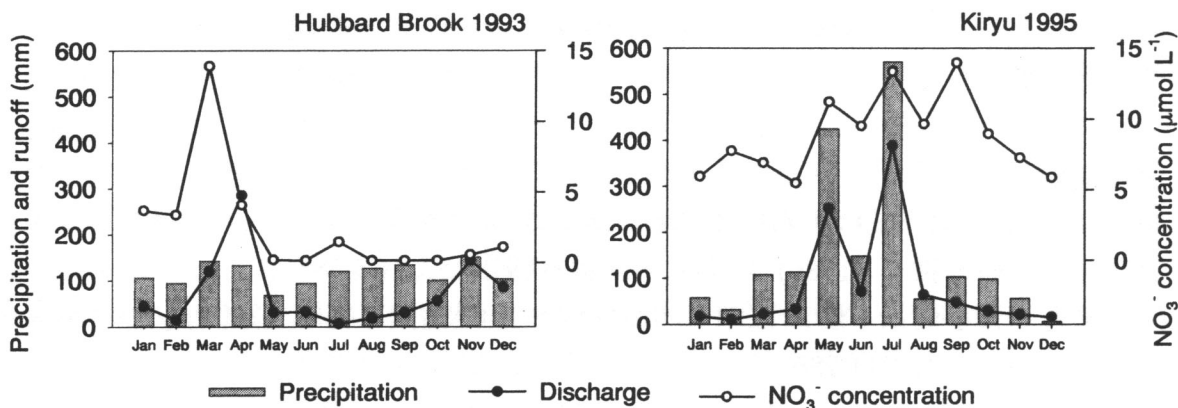


Figure 1. 北東アメリカのハバードブルックと滋賀県南部の桐生試験地における月降水量，月流出量，渓流水の月平均 NO_3^- 濃度. ハバードブルックのデータは Mitchell et al. (1996)による。

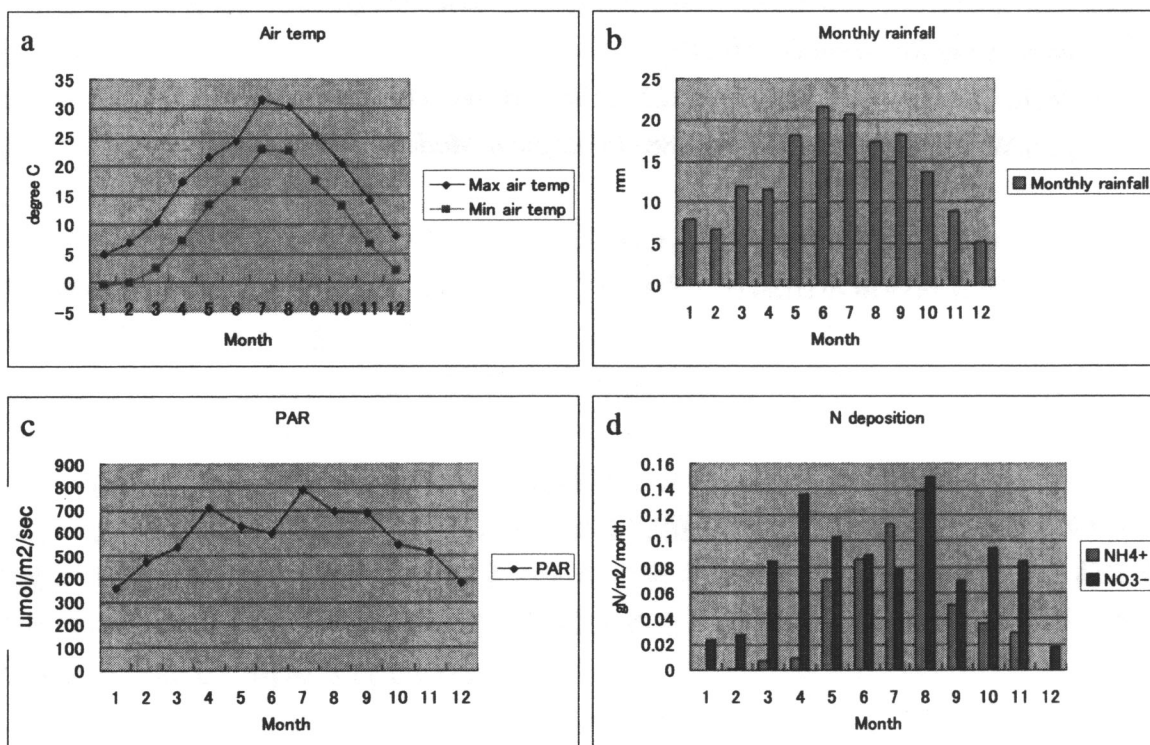


Figure 2. PnET モデルシミュレーションに用いた桐生試験流域の気候データ. a, 月平均日最高・最低気温; b, 月降水量; c, 月平均光合成有効放射量; d, 月積算無機態窒素降下物量.

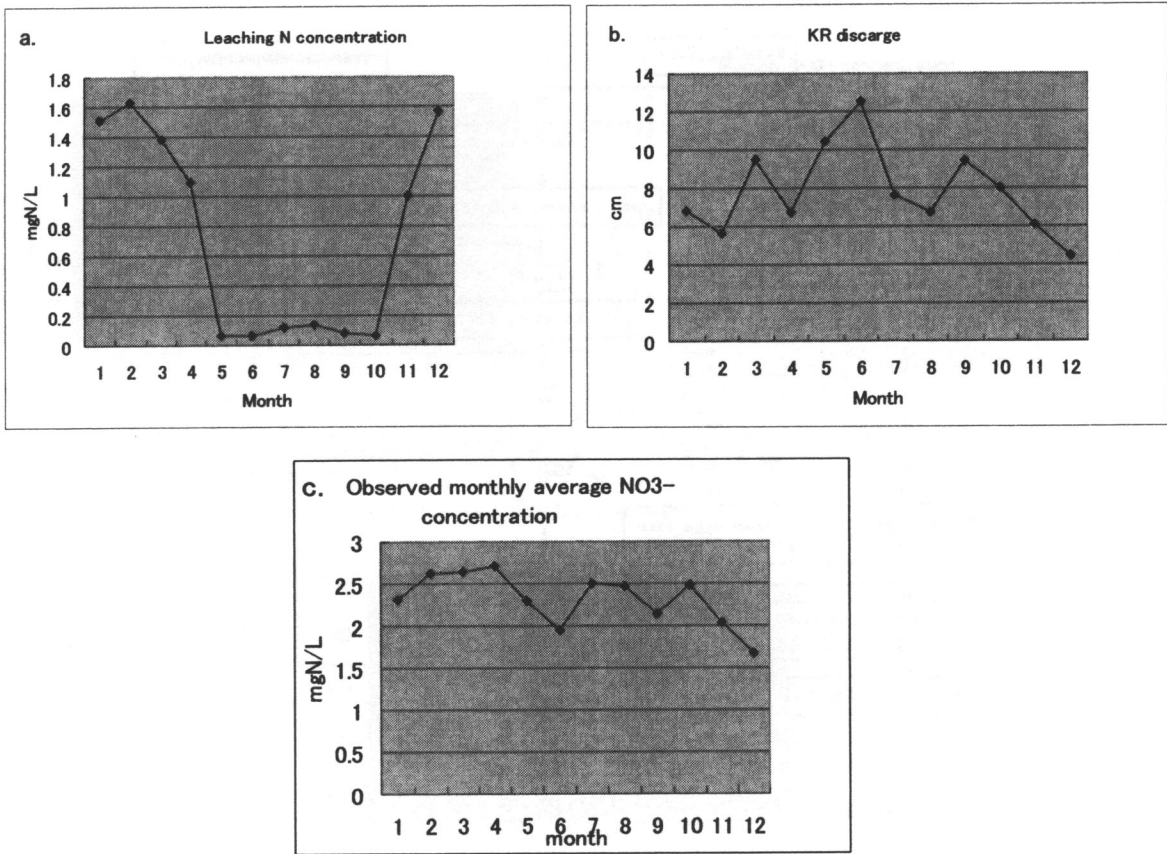


Figure 3. (a) PnET モデルで計算された月平均流出溶存無機態窒素濃度, (b)月流出量, (c) 観測月平均渓流水 NO₃⁻濃度

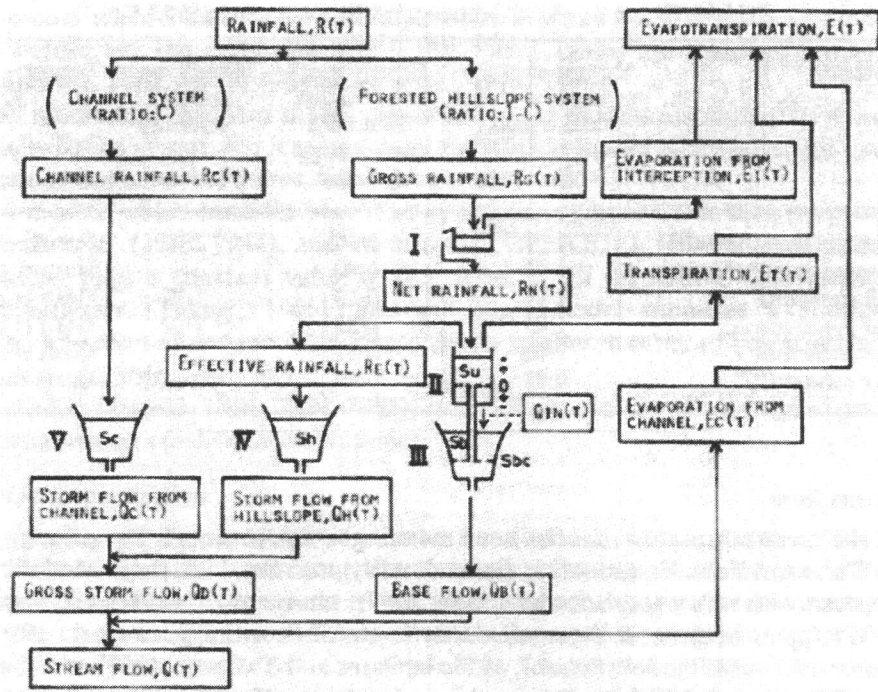


Figure 4. HYCY モデルの構造 (福嶋・鈴木, 1986)

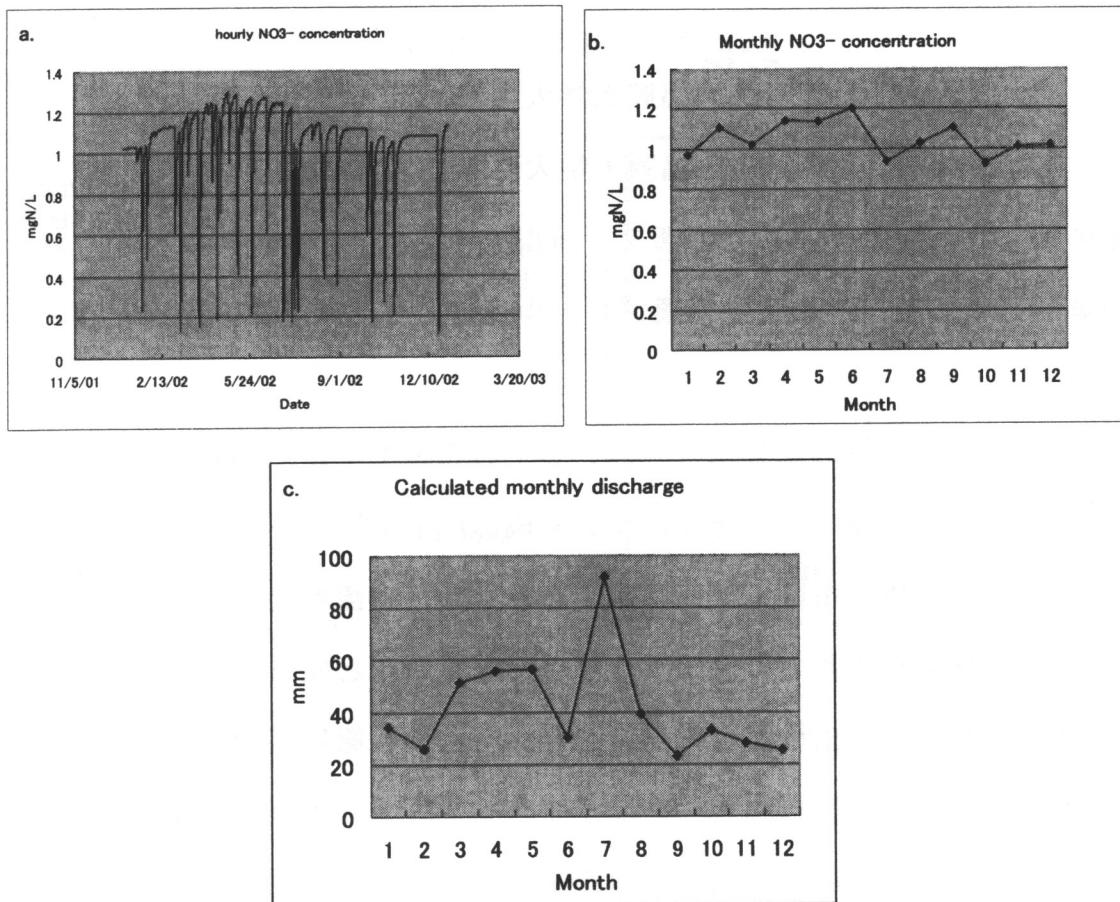


Figure 5. 計算された渓流水 NO₃⁻濃度
 (a) 1 時間単位、(b) 月平均値)、(c)月流出水量