

B-30 森林流域における浸透・流出過程を考慮した 溶存有機炭素の負荷量推定モデルの開発

○江端 一徳^{1*}・市川 温²・松本 嘉孝³・西田 継²

¹山梨大学大学院医学工学総合教育部 (〒400-8511 山梨県甲府市武田4-3-11)

²山梨大学大学院医学工学総合研究部 (〒400-8511 山梨県甲府市武田4-3-11)

³国立豊田工業高等専門学校環境都市工学科 (〒471-8525 愛知県豊田市栄生町2-1)

* E-mail: g14de001@yamanashi.ac.jp

1. はじめに

森林域からさまざまな生元素が河川を通じて海域へと運ばれる。河川中の溶存有機炭素 (DOC) は、河川における炭素循環や水生生物の餌資源となり、生物活動の維持に欠かせない物質である¹⁾。DOC濃度およびフラックス推定を目的とした研究で、Liu et al.²⁾ は、3タイプの森林からそれぞれ林内雨、樹幹流、土壌浸出水のDOC濃度の比較を行い、林内雨と樹幹流のDOC濃度が同程度であることを示した。また、Hope et al.³⁾ は、英国での85の集水域でDOC負荷量を調査し、DOC負荷量と集水域の平均傾斜角に相関があったことを示した。

これまで、DOC流出量を推定するため代表的な手法である、渓流水中のDOC濃度またはDOC負荷量を河川流量により回帰するモデル⁴⁾が用いられてきた。しかし、両者の関係から得られた回帰直線が、降雨イベントによって変化するなど、時間的に大きな誤差が含まれている。このような状況を背景として、回帰モデルに代わる推定手法として、DOCの変動プロセスを考慮したモデルの開発が試みられている。現在までの研究で、土壌中でのDOCの供給⁵⁾と、土壌から河川への流出^{6,7)}の2つがDOC流出量を推定するために重要なプロセスであることが分かっている。近年、これらの現象を組み合わせたモデル (例えばINCA-C⁸⁾やDOC-3 model⁹⁾) が報告されるようになった。しかし、これらのモデルは、非常に多くの入力データを要求するのに加え、アジアモンスーンのように短期間で集中的に発生する降雨流出を対象としていないなどの課題が残されている。

これまで、筆者らは、土壌プロセスにおける乾湿サイクル及び季節変動を移流拡散と溶出で定式化し、短期および長期の変動傾向の再現と推定精度の向上に成功した (土壌サブモデル)。そして、流出プロセスでは、流出

成分を流域の湿地率を基により分離し、それぞれの流出成分に対して土壌サブモデルの結果を入力値としてDOC負荷量を計算した (流出サブモデル)。その結果、中流域では推定精度が高かったが、下流域では特に通減期間で誤差が大きくなった¹⁰⁾。その原因として、基底流出成分とそれに伴うDOC流出が過大評価されていること、DOC流出寄与域としての河畔湿地面積の定量誤差が考えられた。そこで、本研究では、下流域での適用性の改善を図るため、流出サブモデルの改良を行う。具体的には、広く知られる水文モデルであるTOPMODEL¹¹⁾¹²⁾を導入することで、成分分離の精度を向上させることを目的とした。更に、DOC流出寄与域を地形指標に置き換え、DOCの流出寄与域の消長をより定量的に表現することを試みた。これまで、TOPMODELを用いてDOC負荷量の算出を行った研究例¹³⁾があるが、年間の季節変化を示したものの降雨流出のような短い時間スケールは、解析の対象としていない。本研究では、観測期間中の一部の降雨イベントを抽出して、モデルの計算精度を検証した。

2. 調査方法

(1) 調査地概要

調査は、山梨県北部に位置する瑞牆山試験流域を調査対象地とした。調査は、同流域内において流域面積の異なる2地点 (地点 MD:98ha, 地点 K2:1800ha) を選定し行った (図-1)。調査地は秩父山系西端に位置し、山梨県を南北に流れる塩川の上流部である。調査地の標高は、1175~1555mである。植生は、ミズナラ、シラカンバ、カラマツ、モミが優先し、基岩は花崗岩である。年平均気温は、7.1°C、年降水量は約1150mmであり、例年、10月から11月にかけて落葉期となり、12月下旬から4

月上旬ごろまで林内は雪で覆われる。

(2) 水文観測

水文観測は圧力式水位計を備えた量水堰を設置し観測した。水位データは10分間隔でロガー（日置電機製電圧ロガー 3645）に記録し、水位-流量曲線を用いて流量に換算した。観測期間は2007年-2013年である。降水量は調査地から100mほど離れた林冠の開けた場所と調査各地点において、転倒マス雨量計（Davis製、Rain Collector）を用いて観測した。

(3) 試料の採取および分析方法

試料の採水は、2008年から2013年の間、隔週で行い、林内雨・林外雨、表層土壌水および河川水を採取した。降雨時には、自動採水器を用いて1時間毎に試料を採水した。採取した試料のうち、河川水は、採水時に500°Cで1時間焼いた孔径0.7μm、径47mmのガラス繊維濾紙（Whatman, GF/F）を用い、採水地で濾過処理を行った。それ以外の試料については、ポリプロピレン容器に入れ実験室に持ち帰り、同上の濾紙を用いて、濾過処理を行った。濾過処理後、全有機炭素計（GE Sievers900）を用いてDOC濃度を測定した。

3. 溶存有機炭素負荷量推定モデルについて

本研究では、DOC負荷量を推定する際、土壌サブモデルと流出サブモデルを組み合わせてモデル計算を行った。

(1) 土壌サブモデル

土壌サブモデルは湿地土壌表層での水分移動に伴うDOC濃度の変動を表現させたモデルである。溶質移動における移流・分散現象と非可動水から可動水への溶質の湧き出し現象の2つの物理現象を組み合わせて作成した。式-1は、土壌サブモデルの計算式を示している。これにより、土壌中のDOC動態を表現している。

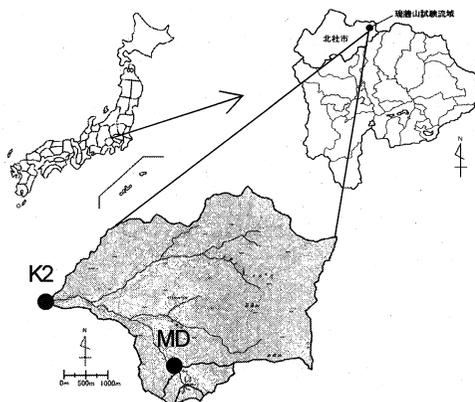


図-1 調査地点

$$q = u \cdot \theta \cdot C + \theta \cdot D_c \frac{\partial C}{\partial z} + D_d \frac{\partial C}{\partial r} \quad \text{式-1}$$

q: DOC flux (mg-C/m²・h), C: 土壌水中のDOC濃度 (mg-C/m³)
 θ: 体積含水率, D_c: 土の流体力学的分散係数 (m²/h), D_d: 非可動水から可動水へのDOC拡散係数 (h⁻¹)

(2) 流出サブモデル

DOC流出サブモデルは、修正型TOPMODELを用いて流出成分を分離し、これから算出される中間流をDOC流出寄与域から直接伝わる成分と見なして、DOCが土壌から河川へ流出する動態を表現した。

(3) DOC負荷量計算

DOC負荷量は、中間流部分では修正型TOPMODELで得られた中間流量と土壌サブモデルで得られたDOC濃度を掛け合わせる。そして、基底流部分では、基底流に実測で得られた地下水の平均DOC濃度を掛け合わせ、最終的にDOC負荷量を算出している。

4. モデル結果

(1) 土壌サブモデル

図-2に2009年の土壌サブモデルによる結果を示した。サンプル数は21で、実測の平均DOC濃度は、24.76mg/L、計算の平均DOC濃度は、24.71mg/Lであった。両者の二乗平均平方根誤差（RMSE）は、5.55であり、推定精度は、良好であった。また、計算されたDOC濃度は、降雨の継続により減少し、無降雨期間の長期化に伴って上昇するという乾湿サイクルによる濃度変化を示した。

(2) 流出サブモデル

図-3に2009年10/6~10/12、地点K2の降雨イベントにおける修正型TOPMODELの流量算出結果を示した。総降雨量は76mmであった。流量の計算値と実測値での二乗平均平方根誤差（RMSE）は、地点MDで0.95、地点K2で、0.83となった。地点K2の値が地点MDより低くなったのは、逓減部の誤差によるものだと考えた。図-4にDOC負荷量の計算結果を示した。下流域では流出サブモデルの改良の前後で、逓減期間において推定精度が不良であるという問題の解決には至らなかった。また、改良前は過大評価していたが、改良後は過小評価する結果となった。

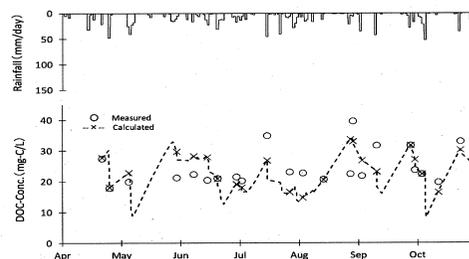


図-2 土壌サブモデルによるDOC濃度の結果 (2009年)

更に、流量ピーク時は、改良前の推定精度は良好であったが、改良後は誤差が大きくなった。逓減期間において誤差が大きくなったのは、中間流出の時間遅れの表現がうまくいっておらず、逓減期間に流出する水の大部分が基底流となっているため、DOC負荷量も低く見積もられたと考えられる。さらに、流量ピーク時は修正型TOPMODELにより中間流成分は分離できたものの、全体に対して地形指標を考慮したため、DOC流出寄与域以外の成分を含んでいる可能性があり、DOC負荷量が過大に評価されてしまったと考えられる。今後は、中間流の流出時間を遅らせるようにキャリブレーションを行い、逓減期間の計算流量の推定精度を向上させる。また、流量ピーク時の過大評価については、DOC流出寄与域に関与しない流出成分を排除するための地形解析を行う必要がある。

5. まとめ

本研究により、土壤プロセスでは、乾湿サイクルを示し、推定精度が良好であった。また、流出プロセスでは、修正型TOPMODELを用いて、DOC負荷量を算出した結果、改良の前後で逓減期間の推定精度向上には至らなかった。また、流量ピーク時においても誤差が大きくなった。今後は、中間流の流出時間を遅らせるようにキャリブレーションを行い、逓減期間の計算流量の推定精度を向上させる。また、流量ピーク時の過大評価については、DOC流出寄与域に関与しない流出成分を排除するための地形解析を行う必要がある。

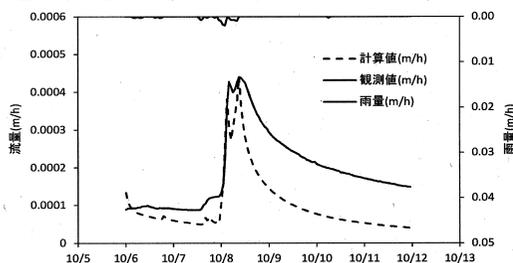


図-3 修正型 TOPMODELによる河川流量の算出
(地点 K2)

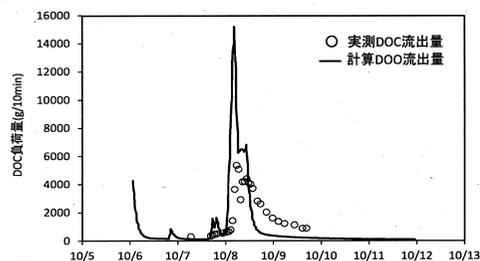


図-4 流出サブモデルによる DOC 負荷量の算出
(地点 K2)

参考文献

- 1) Fisher, S. G. and Likens, G. E.: Energy flow in Bear Brook, New Hampshire: An integrative approach to stream ecosystem metabolism, Ecological Monographs, Vol. 43, pp.421-439, 1973.
- 2) Chiung Pin Liu, Bor Hung Sheu: Dissolved organic carbon in precipitation, throughfall, stems, soil solution, and stream water at the Guandaoshi subtropical forest in Taiwan, Forest Ecology and Management, Vol. 172, pp.315-325, 2003.
- 3) HOPE D., BILLET M. F., MILNE R. AND BROWN T. A. W.: EXPORTS OF ORGANIC CARBON IN BRITISH RIVERS, HYDROLOGICAL PROCESSES, Vol. 11, pp.325-344, 1997
- 4) Hinton M. J., Schiff S. L. and English M. C.: The significance of storms for the concentration and export of dissolved organic carbon from two Precambrian Shield catchments, Biogeochemistry, Vol. 36, pp.67-88, 1997.
- 5) Evans C. D., Freeman C., Monteith D. T., Reynolds B., Fenner N.: Terrestrial export of organic carbon, Nature, Vol. 415, pp.861-862, 2002.
- 6) Grieve, I. C.: Concentrations and annual loading of dissolved organic matter in a small moorland stream, Freshwater Biol., Vol. 14, pp.533-537, 1984.
- 7) Inamdar S. P., Mitchell M. J.: Contributions of riparian and hillslope waters to storm runoff across multiple catchments and storm events in a glaciated forested watershed, Journal of Hydrology, Vol. 341, pp.116-130, 2007.
- 8) Futter M. N., Butterfield D., Cosby B. J., Dillon P. J., Wade A. J. and Whitehead P. G.: Modeling the mechanisms that control in-stream dissolved organic carbon dynamics in upland and forested catchments, WATER RESOURCES RESEARCH, Vol. 43, W02424, 2007
- 9) Marie-France Juras, Mina Nasr, Mark Castonguay, Christopher Pit, Joseph H Pomeroy, Todd P Smith, Cheng-fu Zhang, Charles D Ritchie, Fan-Rui Meng, Thomas A Clair, Paul A Arp.: Dissolved organic carbon concentrations and fluxes in forest catchments and streams: DOC-3 model, Ecological Modelling, Vol. 222, pp.2291-2313, 2011
- 10) 石倉俊, 森林流域の土壤浸透と流出寄与域を考慮した溶存有機炭素流出モデルの開発, 平成 22 年度修士論文, 2010
- 11) Beven K., Kirkby K. J.: A physical based, variable contributing area model of basin hydrology, Hydrological Sciences-Bulletin-des Sciences Hydrologiques, Vol. 24, No.1, 1997.
- 12) Scanlon T. M., Raffensperger J. P., Homberger G. M.: Shallow subsurface storm flow in a forested headwater catchment: Observations and modeling using a modified TOPMODEL, water resources research, Vol. 36, No.9, pp.2575-2586, 2000.
- 13) Boyer E. W., Homberger G. M., Bencala K. E., Mcknight D. M.: Overview of a simple model describing variation of dissolved organic carbon in an upland catchment, Ecological Modeling, Vol. 86, pp.183-188, 1996.