

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 28 日現在

機関番号：53901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2016

課題番号：25820254

研究課題名(和文) 森林域からの溶存有機炭素移動モデルの構築と他流域への適用検討

研究課題名(英文) Developing Transportation Model of Dissolved Organic Carbon Discharged from Forested Catchment and Adapting Model to Another Catchment

研究代表者

松本 嘉孝 (Yoshitaka, Matsumoto)

豊田工業高等専門学校・環境都市工学科・准教授

研究者番号：40413786

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、森林流域から流出する溶存有機炭素量の推定を行うための、数値計算モデルの作成、および他の調査地への適用可能性を検討した。その特徴として、既存にある水文モデルに改良を加えたことと、土壌中の溶存有機炭素の移動過程を水文モデルと組み合わせたことにある。その結果、100ha程度であれば、適用モデルの精度は高いことも明らかになった。また、愛知県足助町にて新たな調査地を立ち上げ、そこで気象・水文観測、御内の水質調査も開始した。その結果、出水時にDOC濃度が上昇する同じ現象が観測されたことから、本研究で開発した溶存有機炭素流出モデルの適用が高いことが示唆された。

研究成果の概要(英文)：The mathematical model that can estimate the annual load of DOC, Dissolved Organic Carbon, from the forested catchment was developed on this research, and additionally, the possibility of the adapting that model to another watershed was researched. For the runoff system, a semi-distributed hydrological modeling unit ('modified-TOPMODEL') was installed. The results of storm event calculation showed that the model performed well for the middle stream. For adapting the developed model simulated to another catchment, the investigation was carried at Miuchi experimental watershed in Aichi, Japan. The increasing DOC concentrations were observed in the rain event when the rain caused the increasing discharge. The factor affected on the DOC concentration in the rain event is also considered the amount of DOC in the hot spot. That DOC dynamics in the catchment would be similar at Mizugaki Exp., therefore we supposed the developed model is possible to adapt to another catchment.

研究分野：水質工学

キーワード：DOC 物質流出解析 森林小流域 TOPMODEL 土壌物質移動モデル ノンポイント汚染

### 1. 研究開始当初の背景

水域における有機物質は、汚濁指標の一つであり、流域水管理には欠かせない水質指標である。近年、水道水質基準において、これまで使用されていた BOD から溶存有機炭素 (Dissolved Organic Carbon, DOC) へと汚濁物質の指標が変更され、河川や湖沼など環境水においても DOC 指標の重要性は高まっている。その DOC について、森林域から河川を経由し下流へと移動する量を算出することは、湖沼や内湾で有機物汚濁を評価する際に必須となる情報である。しかし 2012 年度、日本水環境学会のノンポイント汚染研究委員会のメンバーを中心に、森林からの年間溶存炭素量の文献調査を行ったが（研究課題名：【RFb-11T1】非特定汚染源からの流出負荷量の推計手法に関する研究）、国内は分野の限られた研究者等の発表が数件であり、国外においても、調査結果に基づく算出は特定の地域に限られた十編ほどであった。このように、詳細かつ継続的な知見が得られていないにも関わらず、行政機関等では現状を十分に反映していないデータを用いて流域管理等が行われている。そのことが、閉鎖水域の環境対策に有効な手立てがとれない原因の一つであり、その結果、主に湖沼の環境基準達成度は依然として低く（約 50%）推移している。

ここで、森林域からの溶存炭素移動量の推定研究は、調査から流域毎に求めた L-Q（流量流出量近似）式（例 Hinton et al., 1997）やその結果をもとに算出した原単位法が行政機関等で用いられている（図 1）。ただ、流域の勾配や土壌状態、降雨量などが地域で異なるため、ある流域で構築したモデル式を、他流域へ用いることはかなりの誤差を含むことになる。近年、地形や土壌、河道を考慮した統合流域モデル INCA (Futter et al., 2007) によりモデルの精度および対象流域は拡大しているものの、パラメータが複雑であったり、解析対象が数年と長期間である。ただ、流域からの物

質移動量を算定する際には、上記の森林部委員会での見解として「年間負荷量の算出は、流量の増減を考慮しなければならない」としており、降雨時の調査手法を熟知した研究者による年間移動量の算出モデルの構築が期待されている。

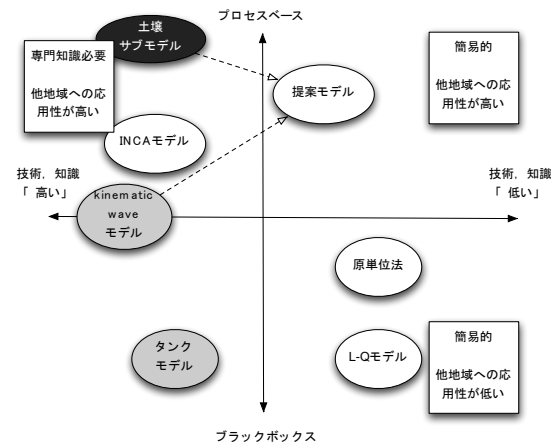


図 1 炭素移動量モデルの位置づけ概要

### 2. 研究の目的

ここで、これまでの溶存炭素移動量の課題を整理すると、①ブラックボックス型モデルによる一般性が低いモデルを使用している現状、②信頼性、詳細性の高いデータを用いたモデル検証の欠落、③降雨時など不規則なイベントの水質データの蓄積が不十分が挙げられる。報告者等は、次の溶存炭素移動量モデルは、「物理プロセスをベースとして流域の炭素移動モデルを構築すること」と確信しており、そのモデルの構築を研究目的とする。これにより、パラメータ数を土壌タイプ、地形勾配、植生状況と少なくすることができ、モデルの一般化への道筋も立てることができる。特に、地形勾配を考慮する点においては、溶存炭素発生源が比較的緩やかな勾配地に存在していることを示したホットスポットの考え方 (Philippe V. et al., 2010) が反映でき、流域内の炭素発生および移動のプロセスを考慮した本モデルの汎用・応用性は高いと思われる。ただ、このモデルを構築する際の注意としては、モデル化可能な空間スケールの把握であり、比較的均質な流域条件である

数 ha から、それらが複合した数 km<sup>2</sup> のレベルへと順に展開，検討することで解決を図る。

### 3. 研究の方法

#### 3. (1) 研究手順

上記の課題①のモデルの現状については、汎用性、応用性を有したプロセスベースでの物質移動モデルの構築を目指すことを解決の方策とする。これは、研究手順(図2)の中の、1) サブモデルの統合による新たなモデルの構築に相当する。課題②のモデル検証については、長期かつ、降雨時などの詳細な調査データを有する地点でのモデル検証の実施により解決をはかる。これは、研究手順の2) モデル計算結果と実測値の比較および3) モデルの他流域への適用検討にあたる。課題③については、水文・水質調査のIT化により人的作業を効率化し、不規則イベントに対応できる調査体制の確立により解決し、その結果は手順2) および3) へと活かされる。

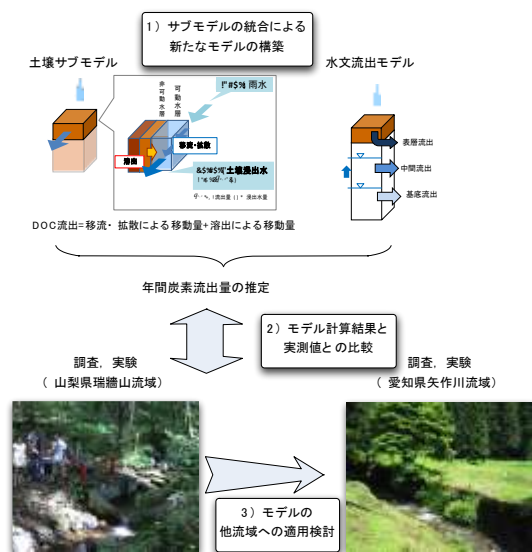


図2 研究手順の概要

#### 3. (2) 研究体制

本研究の体制として、モデルの構築については申請者が主担当で行うと共に、これまで同様、モデルの構築を共同して研究してきた山梨大学の西田准教授に研究協力者を担っていただく。さらに、新たな水文モデルの構築を行うため、水文モデルが専門である京都大

学の市川准教授に研究協力者として参画していただく。申請者と協力者とはメール等により逐次研究進捗状況の確認，相談等を行い，研究打ち合わせを行う。

#### 3. (3) 調査場所

##### ① 瑞牆山調査地

瑞牆山調査地は、山梨県北部に位置する瑞牆山流域内で行った(図3)。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。当該調査地上流部は人間活動が行われていないため人為影響が少なく自然状態の水の流動を考察することが可能である。調査地の標高は、1175 から 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℃、年降水量は約 1,150mm 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(芳賀ら 2007)。また、流域内上流部の河川本流沿いには、河畔湿地(面積は数 m<sup>2</sup> から数百 m<sup>2</sup>) が散在しており、その河畔湿地で表層土壌水を採取した。調査は、同流域内において流域面積の異なる 3 地点(地点 L3:15ha, 地点 MD:98ha, 地点 K2:1800ha)を選定し行った。



図3 瑞牆山調査流域要

##### ② 御内調査地

御内調査地は、豊田市御内町の豊田市有林内を流れる溪流を対象とする。調査地は豊田高専から東に約 30km の地点に位置し、流域面積は 2.04km<sup>2</sup>、流域標高は 655m から 1120m の範囲である。この調査流域内も人為

的な活動は行われていない。調査地付近は急峻な崖や露岩がみられ、降雨時には大きな流量変化が起こる河川であり、流域内の植生はスギやヒノキなどの針葉樹人工林である。本調査地には台形の堰が存在するためこの付近に装置を設置した。

### 3. (4) 調査方法

調査は御内調査地にて行った。2週間もしくは3週間に一度調査地を訪れ、その際に一日毎に採水設定された自動採水器から試料の入った 1L のポリプロピレン製瓶を取り出し実験室に持ち帰った。溪流河川近傍における浸出水、湧水の採水に関しては、溪流河川付近において河川に地表の水が河川に流出している地点、および直接的には流出が確認できないが水の流れが確認でき、流出していると考えられる地点計 3 箇所にて採水を行った。これらはすべて 50ml のポリプロピレン製瓶にて 2 回程度共洗いをした後、採水を行った。

調査地では 10 分間隔で水位のデータを連続的に観測し、ここから 1 日の平均水位を算出した。また、調査時での水深と流速の測定は現地にて河川横断面で行い、幅約 5.7m の砂防堰上の水深を 1m 間隔で測定し、同時に測定した水深の中間点にて流速を測定した。水深の測定には標尺を使用した。また流速の測定には電磁流速計 (SF-5511) を使用し、3 回測定した平均値を各地点での流速として用いた。

### 3. (5) 水質分析方法

水質分析は、御内調査地にて採取した試料に対して行った。採水した試料は実験室に持ち帰り、前処理として孔径 1.0 $\mu$ m ガラス繊維ろ紙 (Whatman GF/F) によりろ過をした。その後、analytik jena multi N/C 3100 を用いて燃焼酸化触媒方式 NPOC 測定法にて DOC 濃度の測定を行った。

## 4. 研究成果

### 4. (1) サブモデルの統合による新たなモデルの構築

サブモデルの構造としては、水文モデルとして TOPMODEL を用いると共に、DOC 発生源から移動層である水へ負荷される過程を土壤モデルで表し、その両者を統合することとした。

まず、水文モデルである TOPMODEL については、従来の TOPMODEL から流出経路として subsurface flow を加えた修正型 TOPMODEL の構築を試みた。この subsurface flow は図 4 中では  $Q_{sf}$  と表現されており、出水により河川近傍の流出寄与域が拡大する現象を示すことを表すことになる。

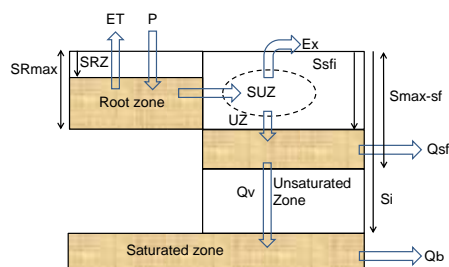


図 4 水文モデル (修正型 TOPMODEL) の概要

次に、土壤の DOC を土壤水へ負荷する土壤モデルについて記す。DOC が負荷される現象については、固相である土壤から、移動層である土壤水に、物理的拡散現象で移動すると仮定した (図 5)。ただし、その移動現象が両相間で行われているとせず、両者の間に移動しない土壤水相を仮定した。そして、この現象を、固液相分子移動現象を考慮し、図 6 中の式で表すこととした。左辺は土壤水中の DOC 濃度の時間変化を示し、右辺第一項は移流による DOC 濃度の変化を、右辺第二項は分子拡散による DOC 濃度変化を、右辺第三項は液液相間の濃度勾配に伴う物質拡散による DOC 濃度変化を示している。

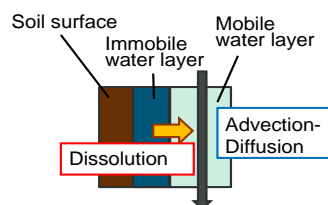


図 5 土壤モデルの概要

**Soil unit for DOC generation**

$$\frac{\partial(\theta C)}{\partial t} = \frac{\partial(u\theta C)}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_c \frac{\partial C}{\partial z} \right) D_d (C - C_m)$$

$\theta$ : Volume of water content  
 $C$ : DOC concentration in soil water (mg/L) Integrated with seasonal effect  
 $U$ : Flow velocity in soil (m/h)  $D_d^* = D_d \times \exp(kT)$   
 $D_c$ : Dispersion coefficient (m<sup>2</sup>/h)  $D_d = 2.38 \times 10^{-9}$   
 $D_d^*$ : Dissolution coefficient (h<sup>-1</sup>) (Calibration in 2007)  
 $z$ : Vertical column length (m)  $k = 0.035$   
 $t$ : time (h)  $T$ : Daily average temperature (°C)

**Input data**  
 - Rainfall (mm/h)

**Output data**  
 - DOC conc. in soil (mg/L)  
 Step of calculation: 1h

Parameter	Unit	Value
Crain	mg/L	4.12
Dd	h <sup>-1</sup>	3.5 × 10 <sup>-9</sup>
Cim	mg/L	95.1

図6 土壌モデルで用いた式およびパラメータ、変数の説明

土壌モデルで求めた DOC 濃度に対して、土壌表層部において、ゼロテンションライシメータにて採水した土壌水の DOC 濃度との比較を図7に示す。シミュレーションは、温度を考慮しないモデル（点線で表示）と温度を考慮した場合（実線で表示）の両方で行った。その結果、温度を考慮した場合の方が、パラメータを合わせた際（図7上段）においても、観測結果との差が小さくなった。そのパラメータ値を用いて検討した結果（図7下段）、こちらも温度を考慮したモデルの方が観測値との差が小さくなった。また、この結果は、土壌の乾燥と湿潤サイクルを表現しており、年間を通した土壌 DOC のシミュレーションが可能であることを示している。

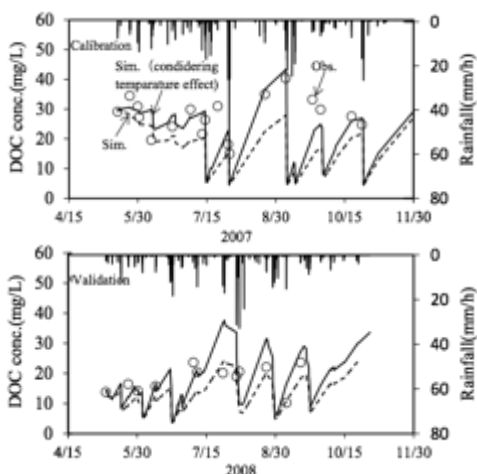


図7 土壌モデル DOC 濃度と表層土壌水 DOC 濃度との比較

4. (2) モデル計算結果と実測値の比較  
 水文モデルと土壌モデルとを統合した DOC

流出モデル結果と実測結果との比較を行った。図8は瑞牆山調査地の出水時におけるモデルでシミュレーションした DOC 負荷量（実線）と観測結果（丸印）を示している。流量増加時には、DOC 負荷量も増加する傾向にあるが、モデルでもその現象が再現できていることがわかる。そのため、今回構築した、物理プロセスをベースとして流域の炭素移動モデルは出水時も再現できるものであるといえる。

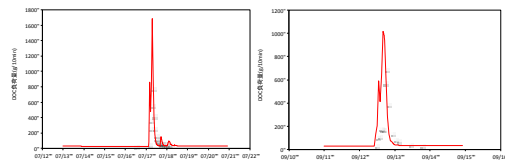


図8 瑞牆山調査地の出水時におけるモデル DOC 負荷量と調査結果との比較  
 （左：2009年7月，右：2009年9月）

次に、図9は1年間における累積流量と累積 DOC 負荷量との関係を示している。この図より、晴天時すなわち base flow が多くを占める流量は 60%程度であるが、その際、DOC 負荷量は約 40%と読み取ることができる。この

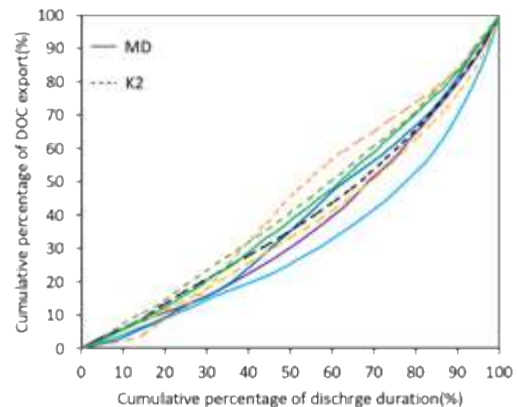


図9 瑞牆山調査地の累積流出水量と累積 DOC 負荷量との関係

ことは、出水時は年間流量の約 40%を占めることになるが、その際に年間の約 60%の DOC 負荷量が発生することを示しており、年間の DOC 負荷量を考える際には、出水時の DOC 流出が大きく、その負荷量算出、モデルシミュレーションの精度向上が必要であることがわかった。



#### 4. (3) モデルの他流域への適用検討

瑞牆山調査地にて構築した森林域からの DOC 流出モデルを他流域へ適用検討するため、愛知県豊田市足助町の御内地区に調査地を設置した。図 10 は 2015 年の流量と降水量および流量と DOC 濃度変化を示している。これによると、御内調査地も降雨による出水時に DOC 濃度が上昇している傾向が見て取れる。ただ、大きな出水の後では、降雨が発生しても DOC 濃度が上昇しない現象も見られた。

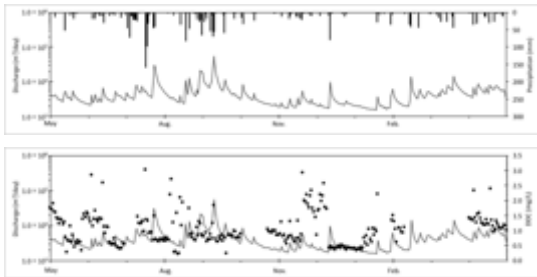


図 10 御内調査地の 2015 年から 2016 年の水文観測結果および DOC 濃度

年間の DOC 濃度は 0.8(mg/L)、最大 DOC 濃度は 3.0(mg/L)となり、瑞牆山調査地に比べどちらも 2 から 3(mg/L)低い値となった。これは、御内調査地が瑞牆山調査地に比べ、急峻な地形であり、DOC 発生源となりうる河川近傍の河畔湿地が少ないためだと考えられた。

御内調査地では、河畔湿地の DOC 濃度の測定も行った(図 11)。これによると、河畔湿地の DOC 濃度変動は大きいことがわかった。ただ、平水時の DOC 平均時である 0.8(mg/L)よりも大きな値を示すことがあるため、これらが hot spot としての役割を示すことも考えられた。すなわち、河畔湿地の水は、出水時に overland flow により陸域から水域へ運ばれる DOC の発生源 (hot spot) と考えられた。本研究で構築したモデルはこのような、河畔湿地の DOC を取り込む水文過程、発生源の DOC 濃度変化を反映した土壌モデルの統合モデルであり、そのことから他流域への適用が可能であると考えられた。

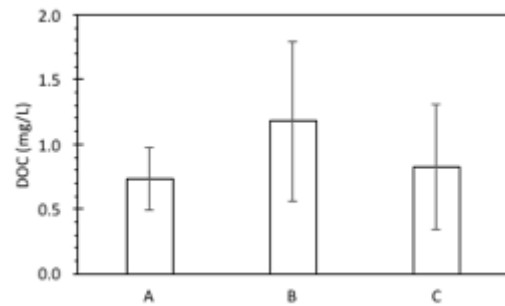


図 11 御内調査地の河畔湿地平均 DOC 濃度 (線は標準偏差, n=10)

#### 5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 6 件)

- ① Kazunori Ebata, Yutaka Ichikawa, Hiroshi Ishidaira, Yoshitaka Matsumoto, Kei Nishida (2016): A runoff model of dissolved organic carbon considering soil infiltration and river runoff processes in a forested watershed, AGU, Fall Meeting2016.
- ② Yoshitaka Matsumoto, Yoshimasa Sato, Yousuke Awata (2016) : The characteristic of DOC concentrations in season and rain event at mountainous river in Japan, The 4th Joint Seminar of Japan and Indonesia Environmental Sustainability and Disaster Prevention, Indonesia. 【招待講演】
- ③ 佐藤吉将, 松本嘉孝 (2016) 森林渓流水の溶存有機物質濃度に影響を及ぼす要因の検討, 平成27年度土木学会中部支部研究委員会.
- ④ 松本嘉孝 (2015) 山地河川の溶存有機炭素モデルの開発-流域の壁をこえていく-, 第 18 回日本水環境学会シンポジウム. 【招待講演】
- ⑤ Kazunori Ebata, Yutaka Ichikawa, Yoshitaka Matsumoto and Kei Nishida (2015) Developing and improving a simple runoff model of dissolved organic carbon considering soil infiltration and river runoff processes in forested watershed., AGU Fall Meeting2015.
- ⑥ 江端一徳, 市川温, 松本嘉孝, 西田継 (2014) 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, 環境工学フォーラム.

[図書] (計 1 件)

- ① 日本陸水学会東海支部会編集 (2014) 身近な水の環境科学 [実習・測定編] -自然の仕組みを調べるために-, 朝倉書店

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

松本 嘉孝 (Yoshitaka Matsumoto)

豊田工業高等専門学校 環境都市工学科  
准教授

研究者番号 : 40413786