

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月15日現在

機関番号：15101

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21780150

研究課題名（和文）

水の流出経路に基づく森林河川の溶存物質濃度推定法の確立

研究課題名（英文）

Applicability of an estimation method based on flowpaths to dissolved matter concentrations in forested streams

研究代表者

芳賀 弘和 (HAGA HIROKAZU)

鳥取大学・農学部・准教授

研究者番号：90432161

研究成果の概要（和文）：花崗岩地質流域の水文流出過程と溶存有機炭素濃度に基づいて提案された水文ベース濃度推定法を火山地質流域の溶存態窒素濃度に適用し、本手法の有効性を調べた。火山地質流域の洪水流出の発生は土壤中で一時的に生じる飽和地中流によってコントロールされることが示唆された。流出経路の違いを区別して濃度－流量関係を解析した結果、本手法が火山地質流域の溶存態窒素濃度に適用可能であることが示された。

研究成果の概要（英文）： For the purpose of availability analysis of the flowpath-based method developed for estimation of dissolved organic carbon concentration of stream water in a granitic watershed, we applied this method to estimation of dissolved nitrogen concentration in a volcanic sedimentary watershed. The hydrometric observation in the volcanic watershed implied that the stormflow generation could depend on transient saturated subsurface flow via soil mantle. The analysis of concentration-discharge relationships in view of the difference of flowpaths showed that this method can be available for estimation of dissolved nitrogen concentration in the volcanic watershed.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|-----------|-----------|
| 2009年度 | 2,200,000 | 660,000 | 2,860,000 |
| 2010年度 | 800,000 | 240,000 | 1,040,000 |
| 2011年度 | 500,000 | 150,000 | 650,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 3,500,000 | 1,050,000 | 4,550,000 |

研究分野：農学

科研費の分科・細目：森林学・森林科学

キーワード：水資源涵養・水質

1. 研究開始当初の背景

我が国の水道水源（例えば、河川水やダム湖水）を適正に維持・管理するには、上流域の森林や農地から負荷される汚濁物質量を精度良く見積もることが不可欠である。汚濁物質負荷量の算出には、研究サイド、実務サイドを問わず、「単位面積あたり、年

間に負荷される物質質量」を表す“原単位”が使われることが多い。しかし、近年では原単位の値そのものの是非が問われるケースが目立つようになった。これは、原単位の値を大きく左右する出水時の負荷量データが全国的に乏しく、かつ出水時の河川水濃度を推定する合理的な手法が確率されていない

めである。

森林流域からの物質負荷量を見積もるためには、時々刻々と変化する河川水濃度を精度良く推定することが不可欠であり、従来その推定には物質濃度 (C) と流量 (Q) の関係 (C-Q 関係) がしばしば用いられてきた。しかし、近年、C-Q 関係は水の流出経路によって大きく変動することが指摘されている。例えば、Bishop ら (2004) は、河川水を構成している主たる水が土壌表層 (有機物層) から発生する場合は、土壌深層 (鉱物質層) から発生する場合と比較し、河川水の溶存有機炭素 (DOC) 濃度が顕著に高いことを示している。これは、同じ流量でも水の流出経路の違いによって河川水の DOC 濃度が大きく異なることを意味しており、この点を考慮していない従来の濃度推定法 (C-Q 関係に基づく単純な回帰式) には本質的な問題があると言える。

これまでに申請者は山梨県北部の試験流域において有機物汚濁の一つの指標である DOC を対象として、森林河川の DOC 濃度形成に関する水文・水質研究を行ってきた。その結果、出水時の DOC 濃度の時間変動に関するデータと濃度形成プロセスに関する知見を蓄積するとともに、成果を学会誌に発表した。さらに、“水の流出経路に基づく森林河川の溶存物質濃度推定法 (水文ベース濃度推定法)” を提案した。ただし、この推定法の他地域及び他物質への適用可能性は未検証であり、大きな課題となっていた。このことが本研究の起点となった。

2. 研究の目的

本申請研究では、この水文ベース濃度推定法の他地域及び他の溶存物質への適用可能性について検証し、森林河川における溶存物質濃度を水の流出経路に基づいて推定する手法の有効性と限界を示すことを目的としている。具体的には、各地の森林河川において DOC、溶存態窒素、溶存態リン、ケイ酸の濃度を対象に、水文ベース濃度推定法の適用可能性を検討する。

3. 研究の方法

(1) コンセプト

既往の濃度推定法は、単純な回帰式で表した C-Q 関係を用いる場合がほとんどである。また、流出負荷量の推定法では、この C-Q 関係の他に、L-Q 関係 (ここで、 $L=C \times Q$) が用いられることが多い。すなわち、既往の濃度推定法や流出負荷量推定法は、水の流出経路に代表される濃度形成機構が反映されておらず、物理的根拠に乏しい推定法である。本研究の水文ベース濃度推定法は、森林流域における水の流出経路に基づいて C-Q 関係を整理するものであり、水文学的機構を反映する方法である。

また通常、流域における水の流出経路を正確に把握するには、斜面での集中的な水文観測と流域末端での流量観測が必要であるが、本研究は斜面水文学の最新の知見を利用し、流域末端の流量観測 (ハイドログラフの特性解析) のみで対応することも試みる。この点は、手法としての正確性は抑えつつも、汎用性を高めることに直結するものである。

(3) 方法

水文ベース濃度推定法の適用可能性を検証するために、各地の森林流域で観測されているデータ (特に、出水時の河川水の溶存物質濃度と流量) を収集する必要がある。このため、申請者が主導して採水、水文観測、水質分析を行う試験流域 (主導流域)、及び研究協力者等にデータ提供を依頼する試験流域 (協力流域) を計 5 カ所選定した。主導流域では、正確な水の流出経路を知るために詳細な水文・水質観測を行った。協力流域では、概略的な水の流出経路を知るためにハイドログラフの特性を解析することとした。これらの観測と解析結果を利用して、水の流出経路ごとの溶存物質濃度と流量の関係 (C-Q 関係) を調べた。

(4) 主導流域

主導流域として、蒜山 (鳥取大学演習林, 53ha, 大山凝灰角礫岩地質の森林流域)、瑞牆山 (山梨大学工学部, 103ha, 花崗岩地質の森林流域)、及び御手洗水 (九州大学演習林, 9.5ha, 緑色辺岩と蛇紋岩地質の森林流域) の 3 流域を考慮した。蒜山流域は本申請者が管理し、本研究期間を通じてデータを新規に集める流域である。瑞牆山流域は、申請者が主体的に水文・水質観測を進めていた期間 (2003-2007 年) のデータを用いることとした。御手洗水流域は、申請者が流量データを整理した期間 (2001-2005 年) の水文・水質データを用いることとした。

(5) 協力流域

日本水環境学会ノンポイント汚染研究・農林地部会の研究者ネットワークを利用し、森林流域で溶存物質の濃度を観測している、あるいは、観測していた研究者にデータ (流域概況、出水時の濃度、流量) の提供を依頼し、データを収集し、協力流域とする予定であった。しかし、水の流出経路を推定するためのハイドログラフの解析に用いることができる高精度の水文データが十分に揃っていないことが多いことが判明した。ただし、このネットワークのうち、滋賀県立大学が管理している琵琶湖周辺の流域 (朽木 L, 朽木 R) については、V ノッチの量水堰堤を用いて安定した流量データが測定されていることと、今後出水時の濃度変化を観測するというこ

とがあり、協力流域とすることとした。

4. 研究成果

(1) 本研究で得られた主な成果

2009年に主導流域である蒜山流域において30個の降雨イベントについて流出率(=直接流出量/降雨量)を調べたところ、凹型形状をした斜面の末端(地点C0)で観測される地下水位が-1.06mよりも低い場合、流出率は0.03未満であったのに対し、それよりも高い場合には流出率は0.10を越えるイベントが現れることがわかった。つまり、この-1.06mという地下水位は、降雨-流出応答を制御する閾値であると解釈された。さらに、地点C0の地下水位が閾値(-1.06m)に達するのに必要な降雨量について解析すると、降雨開始時に地下水位が低いほど多くの降雨量が必要であることが確認でき、両者の関係は次のように表すことができた。

$$R_c = -357GL - 379$$

ここで、 R_c : 必要雨量(mm), GL : 地下水位(m)である。地下水位が閾値に達しなかった降雨イベントでは、総降雨量が必要雨量のラインを超えなかった。

これらの点は、2010年と2011年の観測データについてもあてはまる結果となり、地点C0の地下水位を基に流出経路の違いを判別できると考えられた。すなわち、地下水位が流出発生の閾値を越えると、土層から地下水(飽和地中流)が生じ、河川水の大部分を構成するのに対し、閾値を超えない時は河道近傍の土壌表層や河道内の河床間隙水が河川水の大部分を構成すると考えられた。

また、蒜山流域において地下水位の代表性を検討するために、凹型形状をした3斜面(このうち1つが地点C0のある斜面)と平型形状をした3斜面において、斜面末端での地下水位を観測した。その結果、降雨ピークに対する地下水位ピークの遅れは、凹型形状斜面の場合は12~24時間程度遅れ、他方、平型形状斜面の場合は、3時間未満の遅れであった(図1)。このことは、降雨-地下水位応答の特徴は空間的に大きく異なり、斜面形状と密接な関係があることを示唆している。つまり、地点C0の地下水位は流域内の凹型形状をした斜面を代表する可能性が高いと考えられた。

以上より、蒜山流域の流出は地下水位と密接に関係していること、及び地点C0に見られるように地下水位の閾値を境に流出規模が大きく変化することが示された。この閾値を境にして、卓越する水の流出経路が変化すると考えられた。

蒜山流域の河川水の濃度形成過程を考えるために、河川水に加えて林外雨、林内雨、土壌水、地下水、河床間隙水の溶存態窒素と溶存態リンの濃度を調べた。その結果、溶存

態窒素は土壌で顕著に高まるが地下水では極めて低濃度であり、飽和域での脱窒作用が

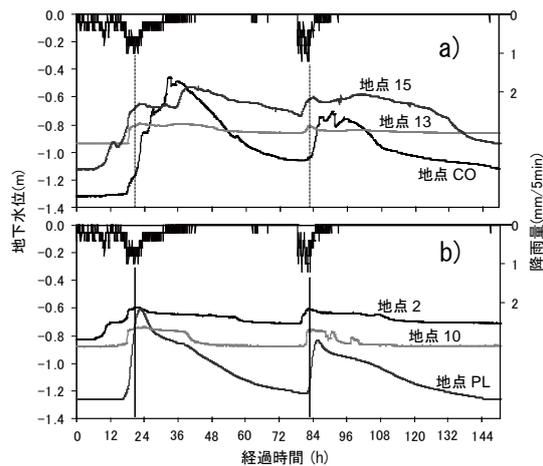


図1 降雨-地下水位応答

a)凹型, b)平型形状の斜面

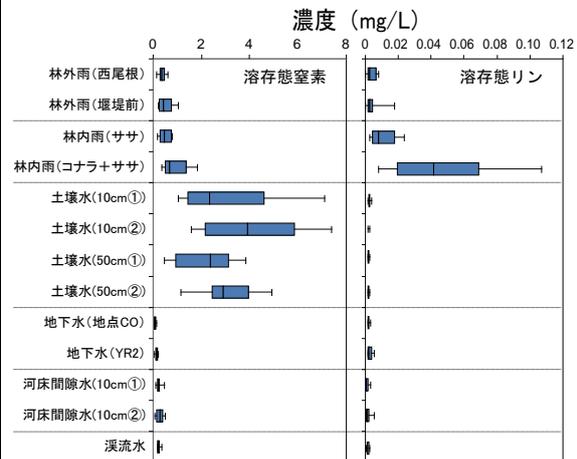


図2 流域内で採取された水の濃度

考えられた(図2)。他方、溶存態リンについては、土壌水でも低濃度であった。蒜山流域の表層土壌は黒ボク土が発達しており、土壌でのリン吸着作用が無視できないと思われた(図2)。

以上に示した流出経路と流域内部の水の濃度の特徴を踏まえ、流出発生の閾値よりも地下水位が低い場合と高い場合を区別し、流域末端における河川水の溶存態窒素濃度と流量に関するC-Qプロットを作成した(図3)。濃度データは、2009年9月から週に1度の定期採水と不定期の出水時採水に基づき、計165個の試料を分析して用いた。その結果、閾値よりも低い場合はC-Q直線の傾きが大きな領域にプロットされたのに対し、閾値よりも高い場合はC-Q直線の傾きが小さな領域にプロットされた。地下水位が閾値を超えることで、平水時の河川水を構成する流出成分に

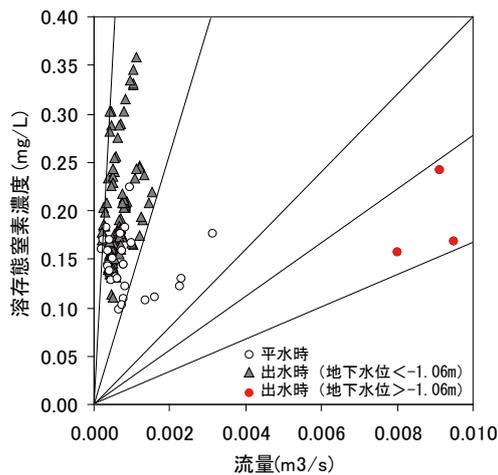


図3 C-Qプロット

斜面土層から生じる低濃度の地下水成分（飽和地中流）が多量に混合するため、閾値を超えた場合は流量が多くても濃度はあまり高くないと解釈できる。逆に、閾値を超えない場合は、低濃度の地下水が混合しないことを意味しているため、河川水は高濃度の土壌水の混合の影響を強く受けると解釈できる。これらは、瑞牆山流域で明らかになったDOCのC-Qプロットと同様の解釈であり、DOCと同様に溶存態窒素濃度も流出経路に強く影響を受けることを示している。

(2) 国内外における位置づけとインパクト

① 降雨-流出応答の不連続性

蒜山流域と同様の降雨-流出応答パターン（地下水位の閾値によって制御されるパターン）は各地で報告されている。閾値を超えて流量が急増する原因としては、土壌の透水性が表層に近いほど高くなること（Kendallら 1999）、パイプ流のような選択的な流れが地下水位の上昇に伴って発生すること（Tromp-van Meerveld and McDonnell 2006）、岩盤面の窪みに点在して貯まっていた地下水が水位上昇にともなって急に連結すること（Buttleら 2004, Hagaら 2005）、あるいは岩盤内部で上昇する地下水位が流出点に達すること（Katsuraら 2008）などが考えられる。蒜山流域の地下水位観測点の近傍における土壌物理性調査（田中ら 1983）によると、深さ 1.3, 1.1, 0.9m における飽和透水係数に大きな違いはなかった（CV=8%）。つまり、-1.06m が閾値となった原因は透水性以外にあり、例えば、水平方向の選択的な流れが起きているのかもしれない。このようなメカニズムを明らかにすることは、降雨-流出研究の核心部と言えるが、従来から流域スケールでの実証的データを得ることは容易ではなく、今後も各地で研究事例が増えることが期待される。

② 流出発生と必要雨量

流域の湿潤度や土層の水貯留量は、斜面崩壊の発生と密接な関係がある。このため、降雨イベント時の短時間雨量と併せて先行降雨の影響を考慮した指標（実効雨量や土壌雨量指数など）が、斜面崩壊の発生予測や土砂災害の警戒避難の基準に用いられることがある（矢野 1990, 林ら 2000, 恩田ら 2006）。これらは、基本的には崩壊発生と非発生の閾値を雨量に基づいて設定するものである。これは、流域や斜面の保水・排水特性が閾値によってコントロールされるという考え方であり、本研究が示した結果（流出発生が必要雨量によって左右されること）と類似する。本研究で用いた斜面末端での地下水位を先行降雨の影響を反映したものと解釈すれば、実効雨量や土壌雨量指数と同様に地下水位データも崩壊予測や警戒避難に役立つ有力な情報となる可能性がある。

③ 水文ベース濃度推定法の適用可能性

河川水の溶存物質濃度は、水の流出経路と供給源の条件に大きく左右されると考えられる。本研究は溶存窒素の供給源として土層や基岩内部での窒素動態を考慮していないので、この意味では不十分な点を残している。また、本研究では、蒜山流域以外の流域に関する解析とDOC、溶存態リン、ケイ酸等の他の溶存物質に関する解析については継続中であり、水文ベース濃度推定法の適用可能性について十分に検討できていない点もある。しかし、蒜山流域における研究により、降雨によってもたらされる土層からの地下水流出（飽和地中流）の発生・非発生による流出経路の違いは、河川水の濃度に強く影響していることが明らかになった。このことは、供給源の動態よりも流出経路の方が強く河川水質に影響している可能性があることを示している。花崗岩地質の瑞牆山流域におけるDOC濃度の研究において提示された水文ベース濃度推定法の考え方が、火山地質の蒜山流域における溶存態窒素濃度に適用できたことは、既往のC-Q関係に基づく濃度推定法（単純な回帰式を導く方法）を一步進めたことになる。

(3) 今後の展望

近年、我が国の水環境研究の分野（特に、森林ノンポイント汚染研究の分野）では、原単位概念や原単位の値そのものを見直す動きが起きている。本研究は、水文過程に基づいた根拠のある濃度推定手法を提示するものであるため、負荷量の推定精度を向上させるとともに、水文学的に意味のある推定値を導くものとして、今後のノンポイント汚染対策、原単位の見直し、さらには水道水源の維持・管理に寄与すると思われる。なお、やや不十分な点となった蒜山流域以外の流域、及

び溶存態窒素以外の溶存物質の解析については、今後も継続したい。また、申請時には予定していなかった流域であるが、JST-CREST 研究（代表、恩田裕一）で実績のある5流域（高知、三重、愛知、信州、東京）で蓄積された水文・水質データの使用が認められたため、これらの流域も協力流域と同様に解析を進め水文ベース濃度推定法の適用可能性を広く検証していきたい。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計3件）

〔学会発表〕（計6件）

- ① 芳賀弘和・古志野豪・佐野貴洋，源頭部小河川における樹木遺体由来ステップの動態，第123回日本森林学会，2012年3月28日，宇都宮大学（宇都宮）
- ② 芳賀弘和・遠藤祐子，森林源頭部における地下水位変動と河川水の栄養塩濃度の関係，第46回日本水環境学会，2012年3月14日，東洋大学（東京）
- ③ 芳賀弘和・遠藤祐子・齋藤隆実・恩田裕一・加藤弘亮・大槻恭一，山地河川の栄養塩濃度と降雨流出特性，第122回日本森林学会，2011年3月27日，静岡大学（誌上発表）
- ④ 古志野豪・窪田哲蔵・遠藤祐子・芳賀弘和，源頭部河川の縦断形状の形成に果たす流木の寄与，第122回日本森林学会，2011年3月27日，静岡大学（誌上発表）
- ⑤ 窪田哲蔵・古志野豪・遠藤祐子・芳賀弘和，山地河川における流木ステップが水の一時滞留に及ぼす影響，第122回日本森林学会，2011年3月27日，静岡大学（誌上発表）
- ⑥ 遠藤祐子・窪田哲蔵・古志野豪・芳賀弘和，蒜山地域源頭部河川における栄養塩の濃度と流出負荷量，第122回日本森林学会，2011年3月27日，静岡大学（誌上発表）

〔図書〕（計1件）

- ① 芳賀弘和，海青社，広葉樹林流域における降雨流出と流路内の流れ，第8章，広葉樹資源の管理と活用，2010年，117-138，ISBN978-4-86099-258-3

6. 研究組織

(1) 研究代表者

芳賀 弘和 (HAGA HIROKAZU)
鳥取大学・農学部・准教授
研究者番号：90432161