出水時における森林河川の溶存有機炭素濃度と斜面の水文過程

芳賀 弘 和^{*,**} 西田 継^{*} 坂本 康^{*}

Dissolved Organic Carbon Concentrations in a Forest Stream and Hydrological Processes in a Hillslope during Storm Flow Periods

Hirokazu HAGA^{***}, Kei NISHIDA^{*} and Yasushi SAKAMOTO^{*}

^{*} Interdisciplinary Graduate School of Medicine and Engineering, University of Yamanashi, 4-3-11 Takeda, Kofu, Yamanashi 400-8511, Japan

^{**} Faculty of Agriculture, Tottori University, 4-101 Koyama-Minami, Tottori 680-8553, Japan

Abstract

On the basis of hydrological processes in a well-characterized hillslope (0.65 ha), we analyzed the effects of flow paths on dissolved organic carbon (DOC) concentrations in a headwater stream (catchment area, 103 ha) during storm flow periods. In the hillslope, our previous findings of water flow paths and an analysis of the relationship between soil pore water pressure and hillslope discharge enabled us to classify the hillslope discharge representing water flow paths. During storm flow periods, the occurrence of upslope-derived water had the effect of keeping the stream DOC concentration low, reflecting that the DOC concentration of the upslope-derived water was very low. However, this effect was not observed during nonstorm flow periods, when the stream DOC concentration was nearly constant regardless of the occurrence of upslope-derived water. We inferred that the major reason that the effects of upslope-derived water on stream DOC concentration were different between storm and nonstorm flow periods was the difference in the timing of DOC export from a riparian area. We concluded that information on hydrological processes in hillslopes is helpful for elucidating the formation mechanism of stream DOC concentration in forested headwater catchments.

Key words: hillslope, headwater catchment, dissolved organic carbon concentration, storm flow, Mizugaki Mountain

1. はじめに

溶存有機炭素 (DOC) は河川における炭素循環やエネルギー収支¹⁾, あるいは河川水の酸性化や金属による汚染物質の輸送に関わる重要な物質である^{2,3)}。このため、河川水のDOC濃度を左右する要因の解明は、ノンポイント汚染研究において大きな課題となっており^{4,5)}, 近年積極的に研究がなされている。例えば、河川水のDOC濃度の空間変動に影響する要因として、流域内に占める湿地の面積割合⁶⁾や水の滞留時間⁷⁾が挙げられている。また、河川水のDOC濃度の時間変化をもたらす要因として、融雪期における河畔域での地下水位上昇⁸⁾や降雨に伴う斜面での水の流出寄与域の拡大⁹⁾が挙げられている。

著者らはこれまでに、山梨県北部の森林流域 (瑞牆山試験流域) において、斜面における水の流出経路が平水時の河川水のDOC濃度に及ぼす影響について定性的に明らかにしてきた¹⁰⁾。具体的には、詳細な水文・水質観測¹¹⁾により斜面での水の流出経路を把握し、斜面最下端の湧水域から流出する水 (斜面流出水) として上方斜面を起源とする水が卓越している場合の平水時 (斜面影響下の平水時) とそうでない場合の平水時 (通常の平水時) を区別し、それぞれの平水時において観測される河畔域の地下水位や河

川水のDOC濃度にどのような違いが現れるか調べてきた。その結果、平水時の河川水のDOC濃度は、上方斜面からの流出がもたらすDOC濃度の希釈作用と、地下水位上昇に伴う河畔域からの流出がもたらすDOC濃度の上昇作用のバランスによって決定されると推察された。さらに、集水面積が36 ha以上の地点であれば斜面影響下の平水時と通常の平水時との間に明瞭な濃度差がないことを見出している。しかし、この研究では出水時の事象は対象としておらず、出水時における河川水のDOC濃度に斜面流出水が及ぼす影響について解析することが課題となっている。

そこで本研究では、上述の瑞牆山試験流域における斜面の水文過程に関する知見¹¹⁾に基づき、水の流出経路が出水時の河川水のDOC濃度に及ぼす影響について明らかにすることを目的とした。

2. 調査地

瑞牆山試験流域は山梨県北部の秩父山系西端に位置している¹³⁾ (Fig. 1)。この流域は、花崗岩を基岩とし、カラマツ、モミ、シラカンバ、ミズナラが優先する針広混交林である。流域の中央部を流れる河川 (主流路) の左岸側には、凹型地形を呈した観測斜面が設定されている^{11,12)}。観測斜面の最下端 (地点SP) と試験流域の最下端 (地点

^{*} 山梨大学大学院 医学工学総合研究部 土木環境工学科・環境動態研究室 〒400-8511 甲府市武田4-3-11

^{**} 現所属: 鳥取大学農学部 生物資源環境学科・緑地防災研究室 〒680-8553 鳥取市湖山町南4-101

Fig. 1 Study site.

M103)における集水面積は、それぞれ0.65, 103 haである。両地点には圧力式水位計を備えた量水堰が設置されており、地点SPでは斜面流出水の流量が測定され、地点M103では河川水の流量が測定されている^{11,12)}。また、流域中央部の林冠の開けた場所において、転倒マス雨量計を用いて降雨量が測定されている^{11,12)}。これらの観測は現在も継続中であり、データは10 min間隔で整理されている。

2003年6月~12月まで、観測斜面のほぼ中心線上に位置する地点SP, P1~P4において、土壌水分計 (Campbell, CS615), テンシオメータ (大起理化学工業, DIK-3021), あるいは井戸が埋設され、土壌の体積含水率、土壌間隙水圧、地下水位が集中的に観測されていた¹¹⁾ (Fig. 1)。著者らは、これらの観測データを用いて、斜面流出水の降雨-流出応答特性、流域の先行湿潤条件、土壌と基岩の境界面上に発生する飽和域の拡大パターン、及び斜面流出水と地中水の水質特性に関する解析を行い、観測斜面における水の流出経路を明らかにしている¹¹⁾。

また、観測斜面と主流路の間にある河畔域では、地下水位の時間変化や土壌水DOC濃度の鉛直分布の特徴が調べられており、河畔域の表層土壌が河川に対する重要なDOCの供給源であることが推察されている^{10,13)}。

3. 方 法

3.1 出水時の定義

出水時は河川水のハイドログラフの逓減解析¹⁴⁻¹⁶⁾に基づいて定義した。この解析は、グラフの横軸と縦軸にそれぞれ経過時間と対数変換した流量をとり、流量の減衰曲線がある一定の傾きを持つ直線で近似できる区間 (逓減部) を特定するものである。すなわち、河川の流量が上昇し始める点から逓減部に入るまでの期間を出水時と定義した。解析には、地点M103の流量データを用いた。

3.2 採水とDOC濃度の測定

河川水は、2004年7月29日~10月20日の期間に、地点M103で採取した。具体的には、9個の出水イベントを対象に合計80個の出水時サンプルを得た。このうち、5個の出水イベントでは自動採水器 (ISCO, Model 6712) を用いて1時間間隔で採水しており、7~24 h連続したサンプルであった。

採水した試料は、ポリプロピレン容器に入れ、冷蔵して実験室に持ち帰り、ガラス繊維濾紙 (ADVANTEC GS-25) を用いて濾過した後、分析まで冷凍保存した。DOC濃度の測定では、酸性化-通気処理により無機炭素を除去した後、

燃焼触媒酸化-NDIR方式の全有機炭素計 (Shimadzu TOC-5000A) を用いた。DOC濃度の検出限界は、 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ であった。

3.3 斜面における水の流出経路の特定

著者らはこれまでに、観測斜面における雨水の流出過程が飽和域の分布パターンによって2つに大別できることを見出している¹¹⁾。1つは、飽和域が斜面下端の湧水域 (地点SP) 近傍に制限されるパターンにおいて、斜面流出水の大部分がその飽和域を起源とする地表流によってもたらされる流出である。他方は、飽和域が湧水域近傍から上方斜面へと拡大しているパターンにおいて、斜面流出水の大部分が上方斜面の飽和域を起源とする飽和地中流によってもたらされる流出である。さらに、この飽和域の分布パターンの違いは、地点P1 (Fig. 1) の基岩直上における土壌間隙水圧を調べることにより判別できることも見出している。すなわち、地点P1の基岩直上 (深さ1.0 m) の土壌が不飽和の状態であれば前者のパターンであり、飽和の状態であれば後者のパターンとなる。また、斜面流出水の流出率は、上方斜面を起源とする水が卓越する時の方が、卓越しない時よりも、1~2オーダー大きいことを明らかにしている。

これらのことから、地点P1における土壌間隙水圧の大きさと斜面流出水の流量との間には密接な関係があると考えられ、この関係を利用すれば地点P1の土壌間隙水圧が調べられていない期間 (本研究で河川水のサンプルを得た期間; 2004年) であっても、斜面流出水の流量から流出経路を特定することができる。したがって、この関係を明らかにするために、2003年のデータを用いて地点P1の土壌間隙水圧と斜面流出水の流量との対応を解析した。

3.4 斜面における水の流出経路が出水時の河川水のDOC濃度に与える影響に関する解析

河川水のサンプルは、斜面において卓越する流出経路に基づいて区分した。そして、区分ごとにDOC濃度の分布を調べ、その分布の特徴を比較した。これにより、斜面における水の流出経路が河川水のDOC濃度に与える影響を調べた。また、この解析では、できるだけ出水時の水文条件を揃えるために、採水時刻が降雨中である場合とそうでない場合とを分けて考えた。降雨中であるか否かは、採水時刻を含む直前の30 min雨量で判断した。ここで、直前30 minとした理由は、芳賀ら¹²⁾を参考に、降雨に対する河川水の流量の応答時間を考慮したためである。

Fig. 2 Relationship between hillslope discharge at SP and soil pore water pressure just above the soil-bedrock interface at P1 in the gauged hillslope. For SP and P1, see Fig. 1.

4. 結果と考察

4.1 斜面における水の流出経路

地点P1の基岩面上における土壌間隙水圧は、斜面流出水の流量が大きいほど高くなる傾向にあった (Fig. 2)。特に、斜面流出水の流量が $0.0002 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 未満であれば土壌間隙水圧はほとんど負 (土壌は不飽和状態) であったのに対し、 $0.0008 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 以上であれば常に正 (土壌は飽和状態) であった。すなわち、上方斜面を起源とする水は、斜面流出水の流量が $0.0002 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 未満の時には発生せず、逆に、 $0.0008 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 以上の時には常に発生していたと解釈できる。また、それらの中間的な範囲 ($0.0002 \sim 0.0008 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) では、上方斜面を起源とする水は発生する場合と発生しない場合の両方が考えられる。したがって、斜面流出水の流量は、斜面において卓越する水の流出経路によって次の3つに区分できる。

- i. $Q_H < 0.0002$: 湧水域近傍の飽和域から直接的にもたらされる流れ
- ii. $0.0002 \leq Q_H < 0.0008$: i) と iii) のいずれか
- iii. $0.0008 \leq Q_H$: 基岩面上において上方斜面まで拡大した飽和域から土壌中を経由して湧水域へともたらされる流れ

ここで、 Q_H は斜面流出水の流量 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) である。

4.2 斜面における水の流出経路が出水時の河川水のDOC濃度に与える影響

斜面における水の流出経路の違いを考慮し、上述の区分に応じて河川水のDOC濃度を整理した (Fig. 3)。まず、採水時刻が降雨中でない場合についてみると、斜面流出水の流量が大きいほど河川水のDOC濃度は低い傾向にあった (Fig. 3a)。例えば、 $0.0008 \leq Q_H$ の区分における分布範囲は $Q_H < 0.0002$ の区分の10パーセンタイル値 ($4.2 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$) よりも低い位置にあり、上方斜面を起源とする水が発生することにより明らかに低いDOC濃度となっていた。このことは、上方斜面を起源とする水が極めて低いDOC濃度 ($< 1.5 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$) を持つという知見¹¹⁾を踏まえると妥当な結果であり、上方斜面を起源とする水の発生により河川水のDOC濃度は低い値に抑えられたと解釈できる。ただし、その値 (約 $3 \sim 4 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$; Fig. 3a) は、平水時のDOC濃度 (90パーセンタイル値は約 $2.5 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$)¹⁰⁾よりは高く、出水時には潜在的に河川水のDOC濃度が高まると考えられる。

Fig. 3 DOC concentration of stream water at the time (a) without and (b) with rainfall during storm flow periods in each hillslope discharge class. Numbers above the boxes denote the number of samples.

次に、採水時刻が降雨中である場合、各区分におけるDOC濃度の分布範囲は広く、区分間で重なる部分が多かった (Fig. 3b)。また、区分毎に降雨中でない場合と比較すると、DOC濃度の平均値や中央値は高くなっており、降雨が直接的に関与する流出 (例えば、河道降雨や飽和地表流) がDOC濃度に影響していることが推察される。そこで、採水時の降雨条件を考慮して水の流出経路の影響を検討するために、その区分毎に採水直前30min雨量と河川水のDOC濃度の関係を調べた。その結果、 $Q_H < 0.0002$ の区分に属する点のほとんどは、 $0.0008 \leq Q_H$ の区分の点に基づいて描いた回帰直線よりも上側にプロットされており、同程度の雨量であれば $Q_H < 0.0002$ の区分の方が $0.0008 \leq Q_H$ の区分よりもDOC濃度は高い傾向にあった (Fig. 4)。例えば、直前30min雨量が $2 \sim 3 \text{ mm}$ であれば、 $Q_H < 0.0002$ の区分は $4 \sim 11 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ であったのに対し、 $0.0008 \leq Q_H$ の区分は $3 \sim 6 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ であった。これらのことは、降雨によって河川水のDOC濃度は高まったものの、降雨中でない場合と同様、上方斜面を起源とする水によって河川水のDOC濃度は低く抑えられたと解釈できる。

4.3 平水時との相違点

本試験流域において平水時を対象とした芳賀らの既往研究¹⁰⁾によると、河川水のDOC濃度の形成にとって、斜面からの流出のみならず河畔域からの流出の重要性が指摘されている。この研究では、河畔域の地下水位は、通常の場合、降雨があってもほとんど変化しないが、上方斜面を起源とする水が発生する場合には、降雨に伴って上昇することが確認されている。ただし、その上昇は、河川水の流量上昇に比べ非常に緩やかであり、降雨のピーク時にはまだ十分に地下水位は上昇しておらず、地下水位がピークに達するのは降雨ピークから約4日後の平水時であった¹⁰⁾。すなわち、地下水位上昇に伴う河畔域から河川への流出については、出水時よりもむしろその後の平水時において考慮する必要があると考えられる。

また、芳賀らの研究¹⁰⁾では、上方斜面を起源とする水が発生する平水時では、前述のようにその水のDOC濃度の低さ ($< 1.5 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$)¹¹⁾から判断し、通常の平水時よりも河川水のDOC濃度は低くなると予想されたが、地点M103において両者に明らかな差はなく、予想に反する結果となった。この時、河畔域の地下水面は土壌水DOC濃度の最も高い位

Fig. 4 Relationships between 30-min rainfall just before sampling and stream DOC concentration in each hillslope discharge class. The regression line is fitted for the largest hillslope discharge class ($0.0008 <$): $y = 0.45x + 3.48$, $r^2 = 0.60$, $N = 15$.

置(深さ0.2 m;濃度範囲4~11 $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$)¹³⁾まで上昇しており、河畔域から高いDOC濃度を持った水が河川へ流出していた可能性があった。つまり、結果が予想に反したのは、斜面流出水による河川水の希釈作用が、河畔域から流出する高いDOC濃度を持った水によって緩衝されたことによると解釈された¹⁰⁾。

一方、出水時については、河畔域の地下水位が十分に上昇していない状況¹⁰⁾を考慮すると、河畔域から高いDOC濃度をもった水が河川へ流出することはほとんどなく、上方斜面を起源とする低いDOC濃度を持った水により河川水は希釈されると予想される。本研究において、上方斜面を起源とする水が発生することにより通常の出水時よりも河川水のDOC濃度は低く抑えられており(Fig. 3a and 4)、この予想と矛盾しない。

したがって、濃度変化という観点でみると、上方斜面を起源とする水の発生が河川水に及ぼす影響は、平水時と出水時とで大きく異なることが指摘できる。さらに、この違いをもたらす主な原因は、地下水位上昇に伴う河畔域からのDOC流出のタイミングであると考えられる。この点については、今後、斜面流出水と河川水の観測に加え河畔域での詳細な地下水動態の観測を行うことにより検証される必要があるが、本研究の結果は、森林流域における河川水のDOC濃度形成機構の解明にとって斜面での水文過程に関する情報の有用性を示していると言える。

5. おわりに

本研究では、観測斜面(0.65 ha)での水文過程に関する知見に基づき、水の流出経路が出水時における河川(103 ha)のDOC濃度に及ぼす影響について検討した。その結果をまとめると、次の通りである。

- 1) 斜面における水の流出経路は、斜面流出水の流量によって区分できた。
- 2) 降雨中であるか否かにかかわらず、上方斜面を起源とする水が発生することにより出水時の河川水のDOC濃度は低く抑えられた。この結果は、平水時における既往の知見¹⁰⁾、すなわち、平水時では上方斜面を起源とする水が発生しても河川水のDOC濃度に影響が現れないという結果と一致しなかった。
- 3) 河川水のDOC濃度に及ぼす斜面流出水の影響が平水時と出水時とで一致しない主な原因は、河畔域からのDOC流出のタイミングの違いにあると推察された。

以上より、斜面での水文過程に関する情報は、森林流域

における河川水のDOC濃度形成機構の解明にとって有用であると結論づけられた。

謝 辞

本研究は、山梨大学工学部土木環境工学科・環境動態研究室の学生諸氏、及び山梨県森林総合研究所の故・松谷順氏に協力していただいた。本研究の一部は、山梨大学・21世紀COEプログラム「アジアモンスーン域流域総合水管理教育」及び日本学術振興会・科学研究費補助金(課題番号18860033)の援助を受けた。ここに記して謝意を表します。

(原稿受付 2007年5月1日)

(原稿受理 2007年8月20日)

参 考 文 献

- 1) Fisher, S.G. and Likens, G.E. (1973) Energy flow in Bear Brook, New Hampshire: An integrative approach to stream ecosystem metabolism, *Ecological Monographs*, **43**, 421-439
- 2) Reuter, J.H. and Perdue, E.M. (1977) Importance of heavy metal-organic matter interactions in natural waters, *Geochim. Cosmochim. Acta*, **41**, 325-334.
- 3) Oliver, B.E., Thurman, E.M. and Malcolm, R.L. (1983) The contribution of humic substances to the acidity of colored natural waters, *Geochim. Cosmochim. Acta*, **47**, 2031-2035.
- 4) Temnerud, J. and Bishop K. (2005) Spatial variation of streamwater chemistry in two Swedish boreal catchments: Implications for environmental assessment, *Environ. Sci. Technol.*, **39**, 1463-1469.
- 5) Brooks, P.D., McKnight, D.M. and Bencala, K.E. (1999) The relationship between soil heterotrophic activity, soil dissolved organic carbon (DOC) leachate, and catchment-scale DOC export in headwater catchments, *Water Resour. Res.*, **35**, 1895-1902.
- 6) Dillon, P.J. and Malot, L.A. (1997) Effect of landscape form on export of dissolved organic carbon, iron, and phosphorus from forested stream catchments, *Water Resour. Res.*, **33**, 2591-2600.
- 7) Wolock, D.M., Fan, J. and Lawrence, G.B. (1997) Effects of basin size on low-flow stream chemistry and subsurface contact time in the Neversink River watershed, New York, *Hydrol. Process.*, **11**, 1273-1286.
- 8) Honninger, G.M., Bencala, K.E. and McKnight, D.M. (1994) Hydrological controls on dissolved organic carbon during snowmelt in the Snake River near Montezuma, Colorado, *Biogeochemistry*, **25**, 147-165.
- 9) McGlynn, B.L. and McDonnell, J.J. (2003) Role of discrete landscape units in controlling catchment dissolved organic carbon dynamics, *Water Resour. Res.*, **39**, 1090, doi:10.1029/2002WR001525.
- 10) 芳賀弘和, 西田継, 坂本康 (2007) 水の流出経路が森林河川の溶存有機炭素濃度に及ぼす影響, 水環境学会誌, **30**, 573-578.
- 11) Haga, H., Matsumoto, Y., Matsutani, J., Fujita, M., Nishida, K. and Sakamoto, Y. (2005) Flow paths, rainfall properties, and antecedent soil moisture controlling lags to peak discharge in a granitic unchanneled catchment, *Water Resour. Res.*, **41**, W12410, doi:10.1029/2005WR004236.
- 12) 芳賀弘和, 西田継, 藤田昌史, 坂本康 (2006) 斜面流出水の降雨-流出応答特性に基づく河川水形成機構の検討, 水工学論文集, **50**, 331-336.
- 13) 芳賀弘和, 西田継, 藤田昌史, 坂本康 (2007) 河畔湿地表流水の硝酸態窒素と溶存有機炭素の濃度変化に対する表層土壌水の寄与, 水環境学会誌, **30**, 213-218.
- 14) Hornberger, G. M., Germann, P.F. and Beven, K. J. (1991) Throughflow and solute transport in an isolated sloping soil block in a forested catchment, *J. Hydrol.*, **124**, 81-99.
- 15) Mulholland, P. J. (1993) Hydrometric and stream chemistry evidence of three storm flowpaths in Walker Branch Watershed, *J. Hydrol.*, **151**, 291-316.
- 16) Uchida, T., Kosugi, K. and Mizuyama, T. (2002) Effects of pipe flow and bedrock groundwater on runoff generation in a steep headwater catchment in Ashiu, central Japan, *Water Resour. Res.*, **38**, doi:10.1029/2001WR000261.