

出水時における森林源頭部の 湧水中有機炭素濃度変動に影響を及ぼす 流出経路と出水前の湧水溶存有機炭素量の検討

ANALYSIS OF THE EFFECT OF FLOWPATH AND THE DISCHARGE
AMOUNT OF DISSOLVED ORGANIC CARBON BEFORE THE STORM
ON THE INCREASE AND THE VARIATION PATTERN OF
DISSOLVED ORGANIC CARBON CONCENTRATION OF SPRING WATER
DURING FLOOD EVENTS IN A FORESTED UNCHANNELED CATCHMENT

松本嘉孝¹, 西田継², 芳賀弘和³, 坂本康⁴

Yoshitaka MATSUMOTO, Kei NISHIDA, Hirokazu HAGA, Yasushi SAKAMOTO

- ¹正会員 修(工) 豊田高専助手 環境都市工学科(〒471-8525 愛知県豊田市栄生町2-1)
²博(工) 山梨大学助教授 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博(農) 山梨大学 日本学術振興会特別研究員(〒400-8511 山梨県甲府市武田4-3-11)
⁴工博 山梨大学教授 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)

The purpose of this study is to analyze the effect of flowpath and the discharge amount of DOC before the storm on the increase and the variation pattern of DOC concentrations of spring waters during storm events in a forested unchanneled catchment. DOC concentrations increased in five storm events while there was no significant change in three events. The pattern showing no significant change in DOC concentration was observed in the events with saturated subsurface flow and large discharge amount of DOC before the storm, and in the events with overland flow and the great cumulative runoff to peak flow, as well. On the other hand, positive correlation between the increase of DOC concentration and the cumulative runoff was observed when overland flow and little cumulative runoff to peak flow occurred. Thus, the discharge amount of DOC before the storm, the flowpath and the cumulative runoff were considered to be major factors affecting the variation pattern of DOC concentrations of spring waters.

Key Words : DOC, The fluctuation of DOC concentration, discharge amounts of DOC before the storm, flowpath

1. はじめに

森林域における河川の溶存有機炭素(DOC)濃度の推定は、陸水域の炭素移動量を把握するためには不可欠である。特に、降雨による森林河川の出水時DOC濃度は平水時に比べ、ダイナミックな変化が短時間で発生する¹⁾ことから、その濃度推定は重要な課題である。

森林河川のDOC濃度は流量と密接な関係にあることが知られている¹⁾。これまで、温、冷帯における森林河川の研究から、河川流量とDOC濃度との間に正の相関があ

ることが報告されている²⁾⁻⁸⁾。しかし、いくつかの調査流域では、負の相関が確認されている^{2), 5)}。このような出水時における河川のDOC濃度変動が異なる原因として、河川DOCの発生源である土壌表層部のDOC量²⁾と陸域から河川への水の流出経路の違い⁵⁾が推測されている。

土壌表層部のDOC量と出水時の河川DOC濃度変動との関係は、融雪期における土壌表層部のDOC濃度減少と河川のDOC濃度減少が関係している⁹⁾ことから、出水前の土壌表層部のDOC量が、出水時の河川DOC濃度変動に大きな影響を与えていると考えられる。しかし、降雨がもたらす出水について、出水前の土壌表層部のDOC量

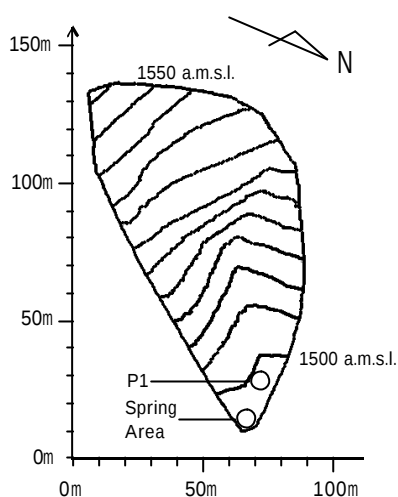


図-1 調査地概要

を直接算出することが困難なため、出水前の土壌表層部のDOC量と出水時の河川DOC濃度変動との関係を解析した報告はほとんどない。これは、出水前の土壌水DOC濃度測定は、出水前に土壌水を採水する設備を整えたうえ、分析に必要な土壌水量を確保せねばならないためである。さらに、測定した土壌水分量が、現場での代表値であることを保証しなければならない。

陸域から河川への水の流出経路の違いと出水時の河川DOC濃度上昇との関係は、Easthouse et al.¹⁰⁾やMulholland and Hill¹¹⁾の研究から定量的に明らかにされている。これらの報告では、各流出経路を流れる水の流量とDOC濃度で河川のDOC濃度の推定が可能であるとしている^{10), 11)}。地表流が卓越する出水では、土壌表層部に存在する高濃度のDOCが地表流により河川へ輸送されるため、河川のDOC濃度は上昇する。飽和地中流が卓越する出水では、DOC濃度の低い水が大量に河川へ供給するため、河川のDOC濃度は減少する。しかし、出水時における河川DOC濃度減少については未検討であり、土壌表層部の他にDOC発生源が存在する場合には、流出経路の違いのみで河川DOC濃度は推定できなかった¹¹⁾。

このように、出水時における河川DOC濃度変動に及ぼす、出水前の土壌表層部のDOC量と陸域から河川への水の流出経路の影響は明確にされておらず、その解析には、出水時の流出経路とDOC発生源の位置が明確な場所での調査が求められる。そこで本研究では、Haga et al.¹²⁾により出水時の卓越する流出経路が明らかにされている小流域の湧水で調査を行う。その理由として、湧水のDOC発生源は、水が地中から地表へ湧き出す際に通過する土壌表層部であることから¹³⁾、その他のDOC発生源の存在をほとんど考えなくてもよいためである。出水前の土壌表層部のDOC量について、河川の年間DOC量と土壌炭素量の間には高い相関性がある¹⁴⁾ことから、今回の解析期間とは異なるが、出水前の土壌表層部のDOC量と関連性がある出水前の湧水DOC量を解析に用いる。

本研究では、出水時の湧水流量の増加に伴う、湧水

DOC濃度変動に及ぼす流出経路の違いと出水前の湧水DOC量の影響について検討をおこなう。

2. 方法

(1) 調査地概要

調査は山梨県北部の奥秩父山系内の標高1500mから1550mに設けた調査地でおこなった。流域面積は0.65ha、植生は林齢49年のカラマツ人工林であり、湧水域が流域の末端部にある(図-1)。湧水点周辺のA層厚は30-40cm、B層は10-20cm、斜面のA層厚の平均値は5-40cm、B層は50-70cmであり、土壌種類はA層が褐色森林土、B層が砂および粘土、基岩は花崗岩である。

(2) 水文観測

水文観測は2003年8月1日から12月25日の期間で行った。湧水流量は量水堰を設け、圧力式水位計で流量を5分間隔で観測した。流域末端から斜面上部に水平距離19m、鉛直高4mの地点をP1とし、地表下100cmにテンシオメータを設置して5分間隔で土壌間隙水圧を観測した。降雨量は調査流域から250m離れた地点で転倒升式雨量計(1転倒雨量0.2mm)により観測した。

(3) DOC濃度の分析

湧水の採水は水文観測と同期間で行った。湧水の採水はほぼ1週間に1回の頻度で行い、降雨による流量増加時は1日間隔もしくはそれよりも短い間隔で採水を行なった。採水した試料は実験室に持ち帰り、直ちに孔径0.2μmのPTFEろ紙でろ過した。DOC濃度は、ICパージ除去-高温燃焼酸化式(島津TOC-5000A)により測定した。DOC測定の検出下限と定量限界は0.3(mg-C/l)である。

(4) 出水解析方法

今回の解析では、出水イベントを降雨量が0.2(mm/hr)以上となった時刻から24時間の累積降雨量が0.2mm以上の時刻までとした。

出水時の流出経路を判断する指標には、地点P1の地表下100cmの土壌間隙水圧を用いた。Haga et al.¹²⁾によると、地点P1の地表下100cmは土壌-基岩境界面上であるため、その土壌間隙水圧が正であれば、飽和地中流が発生したと判断できる。今回の解析では、湧水量の増加に寄与する流出経路を出水イベントの卓越する流出経路とするため、湧水流量がピーク時の土壌間隙水圧で流出経路を判断した。

出水前の湧水DOC濃度は、イベント開始前6日以内に採水したDOC濃度とし、出水前湧水DOC濃度とした。出水時の湧水DOC濃度は出水イベントで採水したうちの、湧水流量が最も大きかったDOC濃度とし、それを出水時DOC濃度とした。そして、出水時湧水DOC濃度と出水

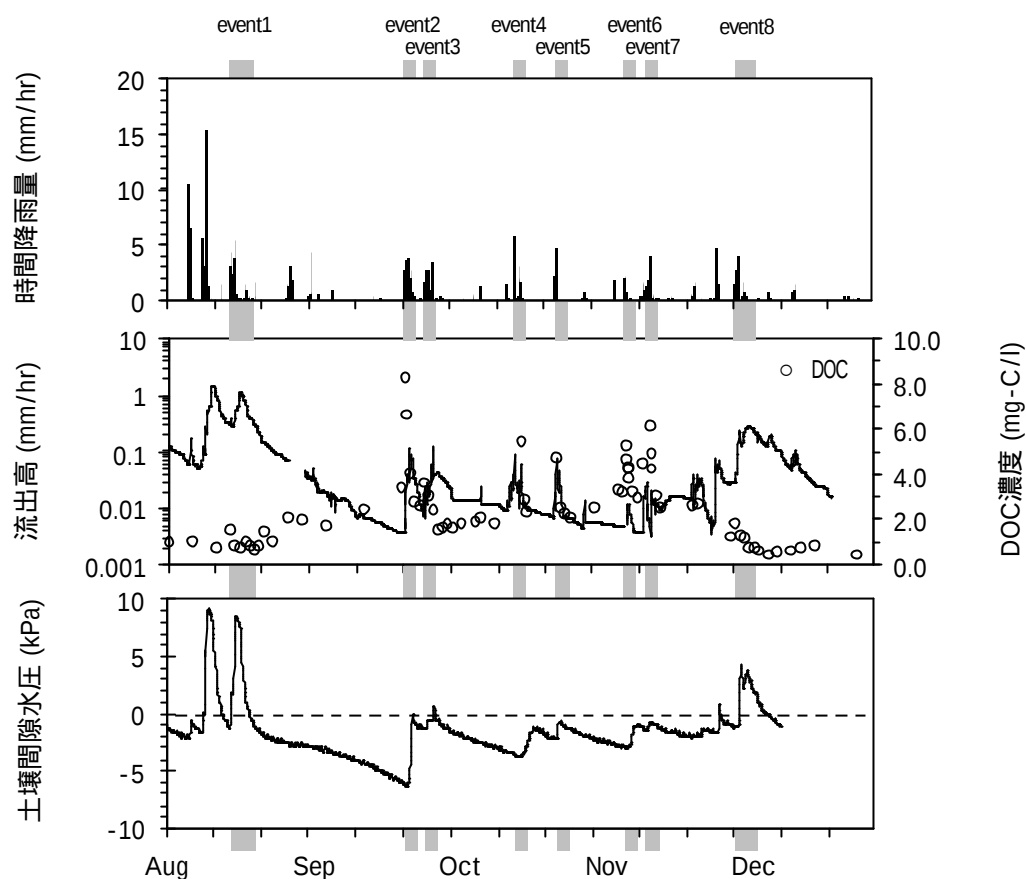


図-2 時間降雨量，流出高，湧水DOC濃度と土壌間隙水圧

表-1 各出水の流量ピークまでの累加流出高，流量ピーク時の土壌間隙水圧，卓越する流出経路
および出水イベント前湧水流量に対する出水時湧水DOCを採水した湧水流量の比率

event	流量ピークまでの 累加流出高 (mm)	流量ピーク時の 土壌間隙水圧 (kPa)	卓越する流出経路	出水時湧水DOCを採水した湧水流量 出水イベント前湧水流量
1	34.3	74.4	飽和地中流	3.4
2	0.7	-63.2	地表流	8.7
3	1.3	-5.8	地表流	4.5
4	0.8	-38.8	地表流	3.3
5	0.3	-23.0	地表流	3.3
6	- ^a	-30.8	地表流	- ^a
7	0.5	-8.3	地表流	5.6
8	10.3	35.3	飽和地中流	7.7

a : event6は流量データ欠損のため結果なし

前湧水DOC濃度の差を湧水DOC濃度差とした．出水前湧水DOC量は出水前湧水DOC濃度に出水イベント前の流量を掛けて算出した．

(1) 時間降雨量，流出高，湧水DOC濃度および土壌間隙水圧

図-2 は調査期間の時間降雨量，流出高，湧水 DOC 濃度および土壌間隙水圧を示している．調査期間における湧水流量の最大値は 1.4(mm/hr)となり，最小値は 0.004(mm/hr)であり，event2 の出水前だった．土壌間隙

3. 結果

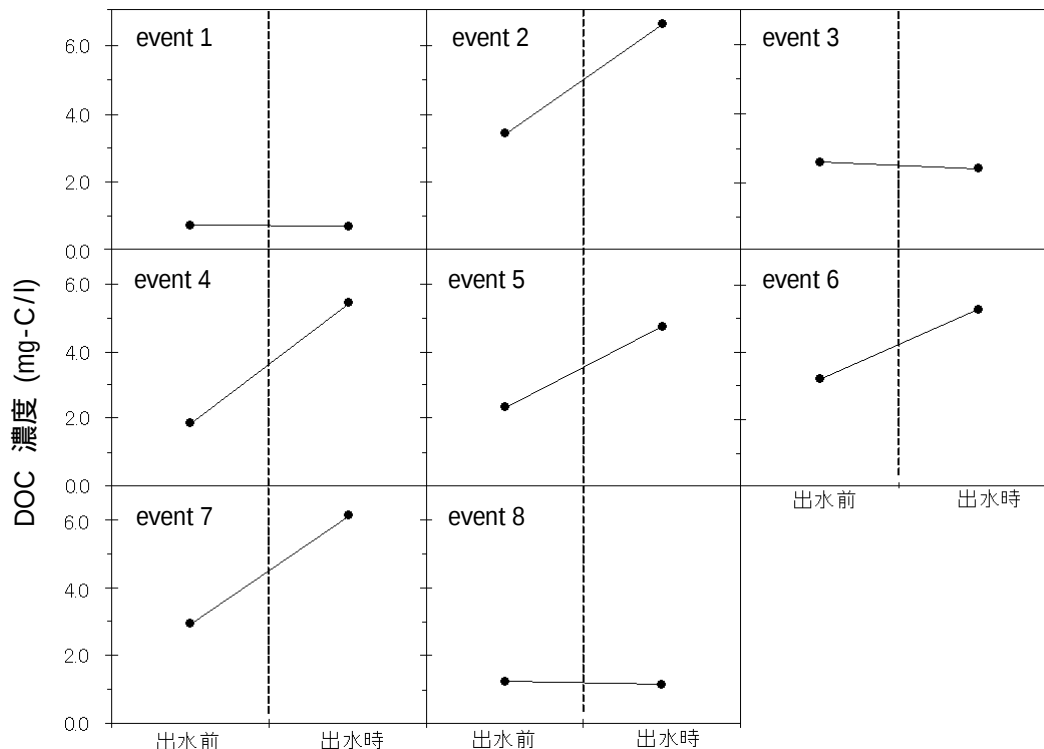


図-3 各出水イベントの出水前湧水DOC濃度と出水時湧水DOC濃度

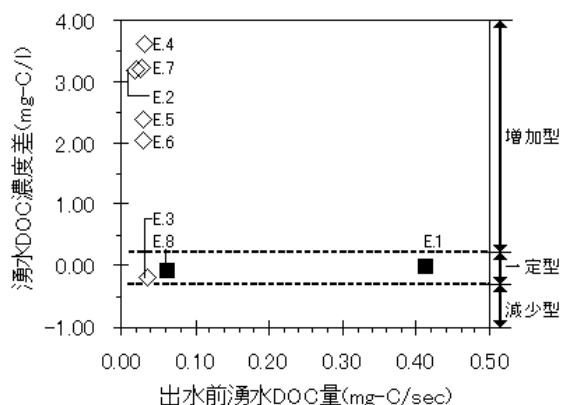


図-4 出水前湧水DOC量と湧水DOC濃度差

マーカーの種類

◇：卓越する流出経路が地表流である出水イベント

■：卓越する流出経路が飽和地中流である出水イベント

水圧の最大値は 9.1(kPa)となり、最小値は-6.2(kPa)であり、event2 の出水前だった。DOC 濃度の最大値は event2 内の 8.3(mg-C/l)で、最小値は 0.4(mg-C/l)であった。

(2) 流量ピークの水文データ

表-1 は各出水イベントの流量ピーク時までの累加流出高、流量ピーク時の土壌間隙水圧、卓越する流出経路および出水イベント前湧水量に対する出水時湧水 DOC を採水した湧水量の比率を示している。ピークまでの累加流出高はevent1, event8 で 10mm 以上だった。そして、event3 が 1.0mm となり、その他のイベントはそれ以下

であった。流量ピークの土壌間隙水圧が正となったイベントは event1 と event8 であり、各出水イベントで卓越する流出経路は event1 と event8 で飽和地中流、その他のイベントでは地表流であると判断した。出水時湧水 DOC を採水した湧水量は、全てのイベントで出水イベント前湧水量の 3 倍以上であった。

(3) 出水時DOC濃度変動

図-3は各出水イベントの出水前DOC濃度と出水時DOC濃度を示している。event1とevent8の出水前、出水時湧水DOC濃度は1.5(mg-C/l)以下となり、他のイベントの湧水DOC濃度に比べ低くなった。出水前に比べ出水時湧水DOC濃度が上昇したイベントはevent2, event4, event5, event6, event7の5回の出水イベントであった。湧水DOC濃度差は2.1～3.6(mg-C/l)であった。このように、出水前に比べ出水時の湧水DOC濃度が上昇した出水イベントの湧水DOC濃度変動パターンをDOC増加型とする。一方、event1, event3, event8は出水前に比べ出水時湧水DOC濃度の方が減少し、湧水DOC濃度差は0.01～0.2(mg-C/l)となった。これらの出水イベントの湧水DOC濃度変動パターンは、出水時湧水DOC濃度が出水前よりも減少したが、その減少差がDOC測定の検出下限よりも小さかったため、DOC一定型とする。

(4) 出水前湧水DOC量と湧水DOC濃度変動

図-4 は湧水 DOC 濃度差と出水前湧水 DOC 量との関係を示している。図では、卓越する流出経路によりマー

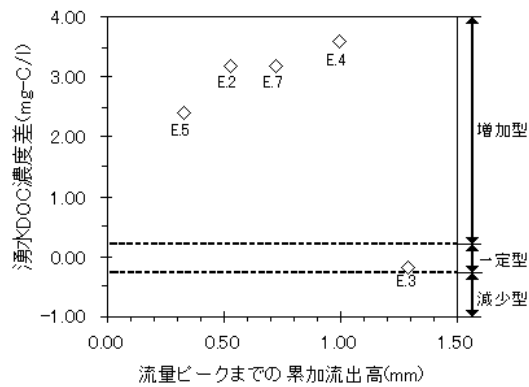


図-5 イベント開始から流量ピークまでの累加流出高と湧水DOC濃度差

カーを変えて示してある．卓越する流出経路の違いを考慮せずに見ると，出水前湧水 DOC 量は event1 がもっとも大きく，次に event8 がその他のイベントよりも 2 倍近く大きかった．event8 よりも出水前湧水 DOC 量が小さなイベントは 0.02 ~ 0.03(mg-C/l)の範囲で 6 イベントあった．湧水 DOC 濃度差と出水前湧水 DOC 量との間には関係が得られなかった．図-4 には，図-3 で示した増加型，一定型，減少型の濃度変動パターンが現れる湧水 DOC 濃度差の範囲も示してある．図のように流出経路から見た湧水 DOC 濃度変動パターンについては，地表流が卓越するイベントは，DOC 増加型もしくは一定型となり，飽和地中流が卓越する 2 つのイベントは DOC 一定型となっていた．

4. 考察

(1) 湧水DOC濃度変動に影響を及ぼす流出経路の違いと出水前湧水DOC量の検討

a) 湧水DOC濃度差

湧水DOC濃度差と出水イベントで卓越した流出経路，出水前湧水DOC量を検討した結果，明確な関連性を抽出することはできなかった．これは，事例の多い地表流が卓越するイベントで，同程度の出水前湧水DOC量であっても，湧水DOC濃度差が大きく異なるためであり，その他の要因が影響していると考えられる．

b) 湧水DOC濃度変動パターン

出水前湧水DOC量が0.02 ~ 0.03(mg-C/sec)の範囲であった6回のイベントの湧水DOC変動パターンは1回がDOC一定型，その他の5回のイベントは増加型になった．その6回のイベントの流出経路は地表流が卓越するイベントであった．地表流が卓越する出水では，土壌表層部の高濃度DOCが地表流により湧水へ輸送されるため，湧水DOC変動パターンは増加型になると予測したが，そのような結果にはならず，変動パターンの違いを流出経路では説明できなかった．しかし，出水前の湧水DOC量がほ

ぼ等しい6回のイベントのうち，1回のイベントのみが一定型となり，その他は増加型であることから，一定型のイベントがなぜ発生したかを把握することが必要であると考えられる．

一方，出水前の湧水DOC量が0.03(mg-C/sec)以上である2回のイベントの湧水DOC変動パターンは，共にDOC一定型となった．飽和地中流の卓越する出水は，飽和地中流により，低濃度DOCが湧水へ供給するため，DOC減少型になると予測した．しかし，飽和地中流が卓越する両イベントがDOC一定型になったのは，出水前の湧水DOC濃度が低濃度であったためだと考えられる．

以上の結果から，次項では予測と異なる原因を探るために，流出経路ごとの流量の影響を検討する．

(2) 流出経路ごとの流量が湧水 DOC 濃度変動へ及ぼす影響

a) 地表流が卓越しDOC増加型のイベントについて

本調査地における出水時の地表流は，湧水域周辺の土壌表層部を通過する経路であることが明らかになっている¹²⁾．ここで，地表流量の影響を反映する指標としてイベント開始から流量ピークまでの累加流出高を用い，これと湧水DOC濃度差との関係を図-5に示した．図のように，event3を除きピークまでの累加流出高が大きいほど湧水DOC濃度変動差が大きくなるという正の線形関係が得られたことから，DOC増加型のイベントでは，地表流によってもたらされる流量の違いが湧水DOC濃度変動差に影響を及ぼしているといえる．これは地表流の流出域が拡大することで，高濃度のDOCが輸送されたことが原因と考えられる．

b) 地表流が卓越し，DOC一定型のイベントについて

event3の流出経路は地表流が卓越するイベントであったが，他の地表流が卓越するイベントに比べ流量ピークまでの累加流出高が大きく，湧水DOC濃度差と正の線形関係にはならなかった(図-5)．本調査地は，地表流の流出域が湧水域周辺に限られている¹²⁾ことから，地表流出域が最大に拡大した後は，土壌表層部のDOC量が減少し，地表流により湧水へ供給されるDOC濃度は低くなると推測される．そのため，event3の湧水DOC濃度差は一定型になったと考えられる．

以上のことから，湧水 DOC 濃度変動パターンは出水前湧水 DOC 量と流出経路，流量ピークまでの累加流出高で説明することができた．出水前湧水 DOC 量が小さく，出水時の卓越する流出経路が地表流の場合，ピークまでの累加流出高が小さいイベント(event2, event4, event5, event7)はDOC増加型となり，流量ピークまでの累加流出高がある程度の範囲までは，流量ピークまでの累加流出高が大きいほど湧水 DOC 濃度差が大きくなった．一方，流量ピークまでの累加流出高がかなり大きなイベント(event3)ではDOC一定型となる．残された課題は，流量ピークまでの累加流出高とDOC濃

度変動パターンとの関係を定量的に解析することである。

5. おわりに

本研究では、降雨による出水時の湧水 DOC 濃度変動に及ぼす流出経路の違いと出水前湧水 DOC 量の影響を把握することを目的とし、以下の結果を得た。

- 1). 出水前湧水 DOC 量のみから湧水 DOC 濃度差と湧水 DOC 濃度変動パターンを説明することは不可能であった。
- 2). 出水前湧水 DOC 量が大きく、流出経路が飽和地中流となる出水時の湧水 DOC 濃度変動パターンは DOC 一定型になった。
- 3). 出水時の卓越する流出経路が地表流であり、出水前湧水 DOC 量が小さなイベントの湧水 DOC 濃度変動パターンは、ピークまでの流出高が小さな出水では増加型となり、かなり大きな出水では一定型となった。
- 4). 出水時の卓越する流出経路が地表流であり、出水前湧水 DOC 量が小さなイベントでは、湧水 DOC 濃度差と流量ピークまでの累加流出高とに正の線形関係がえられた。

本研究により、これまで明確にされてこなかった出水時の流量増加に伴う、湧水 DOC 濃度変動パターンに影響を及ぼす要因として、出水前湧水 DOC 量、卓越する流出経路、及び流量ピークまでの累加流出高を抽出することができた。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、山梨大学大学院医学工学総合研究部 藤田昌史助手からは貴重な意見をいただいた。ここに感謝を申し上げる。また本研究は、文部科学省平成14年度人・自然・地球共生プロジェクト「アジアモンスーン地域における人工・自然改変に伴う水資源変化予測モデルの開発」、文部科学省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研究教育」の助成を受けて行われた。

参考文献

- 1) Hope D., Billett M. F. and Cresser M. S.: A review of the export of carbon in river water: fluxes and processes, *Environ. Pollut.*, Vol.84, pp. 301-324, 1994.
- 2) Sakamoto T., Takahashi M., Terajima T., Nakai Y. and Matsuura Y.: Comparison of the effects of rainfall and snowmelt on the carbon discharge of a small, steep, forested watershed in Hokkaido, northern Japan, *Hydro. Process.*, Vol.13, pp. 2301-2314, 1999.
- 3) 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 catchment, *Biogeochemistry*, Vol.36, pp. 67-88, 1997.
- 4) Moore T. R.: Dynamics of dissolved organic carbon in forested and disturbed catchments, Westland, New Zealand: 1. Maimai, *Water Resour. Res.*, Vol.25, pp. 1321-1330, 1989.
- 5) Moore T. R. and Jackson R. J.: Dynamics of dissolved organic carbon in forested and disturbed catchments, Westland, New Zealand: 2. Larry River, *Water Resour. Res.*, Vol.25, pp. 1331-1339, 1989.
- 6) McDowell W. H. and Likens G. E.: Origin, composition, and flux of dissolved organic carbon in the Hubbard Brook Valley, *Eco. Monogr.*, Vol.58, pp. 177-195, 1988.
- 7) Meyer J. L. and Tate C. M.: The effects of watershed disturbance on dissolved organic carbon dynamics of a stream, *Ecology*, Vol.64, pp. 33-44, 1983.
- 8) McDowell W. H. and Fisher S. G.: Autumnal processing of dissolved organic matter in a small woodland stream ecosystem, *Ecology*, Vol.57, pp. 561-569, 1976.
- 9) Boyer E. W., Hornberger G. M., Bencala K. E. and McKnight D. M.: Response characteristics of DOC flushing in an alpine catchment, *Hydro. Process.*, Vol.11, pp. 1635-1647, 1997.
- 10) Easthouse K.B., Mulder J., Christophersen N. and Seip H.M.: Dissolved organic carbon fractions in soil and stream water during variable hydrological conditions at Birkenes, southern Norway, *Water Resour. Res.*, Vol.28, pp. 1585-1596, 1992.
- 11) Mulholland P.J. and Hill W. R.: Seasonal patterns in streamwater nutrient and dissolved organic carbon concentration: Separating catchment flow path and in-stream effect, *Water Resour. Res.*, Vol.33, pp. 1297-1306, 1997.
- 12) Haga H., Matsumoto Y., Matsutani J., Fujita M., Nishida K. and Sakamoto Y.: Flowpaths, rainfall properties and antecedent soil moisture controlling lags to peak discharge in a granitic unchanneled catchment, *Water Resour. Res.* (in press)
- 13) 川崎雅俊, 大手信人, 南部桂, 保原達, 岡崎亮太, 勝山正則, 金秀珍: 森林流域の水文過程における溶存有機態炭素の動態, *陸水学雑誌*, Vol.63, pp. 361-45, 2002.
- 14) Hope D., Billett M. F., Milne R. and Brown T. A. W.: Export of organic carbon in British rivers, *Hydro. Process.*, Vol.11, pp. 325-344, 1997.

(2005.9.30受付)