

筑波森林水文試験地における流出水中の安定同位体比 および浮遊土砂濃度の時間変化

壁谷直記・清水晃・延廣竜彦（森林総研）・張建軍（北京林業大）

Abstract : Two-component hydrograph separation using oxygen-18 concentrations was conducted at S sub-catchment installed a sediment discharge observation weir in Tsukuba Experimental Watershed. As for a storm on 20-21 May 2003, new-water percentages at the hydrograph peak were 60%. 77% of total discharge during the storm was formed of old-water component. When the discharge of new-water component was the maximum, suspended sediment concentration also showed maximum value.

Key words : suspended sediment, hydrograph separation, stable isotope tracer, storm runoff

要旨：筑波森林水文試験地内の土砂濃度観測用簡易堰を設置したSサブ流域において2003年5月20日から21日にかけての降雨イベント（総雨量52.1mm、最大時間雨量25.7mm、降雨継続時間19時間）について安定同位体比による洪水ハイドログラフの2成分分離（新しい水と古い水）を行った。その結果、出水ピーク時では60%が新しい水により形成されていた。一方、洪水全体では77%の水が古い水によって形成されていた。新しい水の流出成分のピーク時に、浮遊土砂濃度も最大値を示した。

キーワード：浮遊土砂、成分分離、安定同位体トレーサー、洪水流出

I はじめに

流域からの流出する浮遊土砂濃度と流出量の間にはヒステリシスが存在することが知られているが、浮遊土砂濃度形成に寄与する要因に関して流域間で統一的な理解および整理は進んでいない(2)。流域からの浮遊土砂流出予測モデルの予測精度を高めるためには、各流域における水流出機構と浮遊土砂の供給・輸送過程の両方の理解をさらに深める必要があると考えられる。

一方、安定同位体トレーサーを用いて流域からの水流出機構を解明する研究は非常に進展している。例えば、流出水とイベント雨水の安定同位体比を測定することで洪水流出水の古い水と新しい水の二成分に分離することができる(1)。溶存イオン濃度と安定同位体比が同時に観測された報告は多いものの、浮遊土砂濃度を同時に観測したものとなると極めて少ない。本研究では、洪水流出の河川水の安定同位体比と浮遊土砂濃度の時系列変化を同時に観測し、安定同位体トレーサーを用いた洪水流出の成分分離を行うとともに、各流出成分と浮遊土砂濃度の関係を調べた。

II 調査地および方法

1. 調査地 観測は、筑波森林水文試験地内の土砂濃度観測用簡易堰を設置したS流域において行った。筑波森

林水文試験地は、流域面積は3.8ha (S流域は3.3ha), 斜面方位はN, 標高は量水堰堤設置地点で290m, 流域最高点で390m, 平均傾斜は25°である。1979～1990年のうち1988年を除く11年間の年平均降水量および年平均流出量は、それぞれ1429.1mmおよび641.6mmであった。流路は流域内の3箇所の湧水点に発し、利根川水系恋瀬川の支流となる。流域の植生は、スギ・ヒノキの人工林が大半を占め、流域頂上の尾根部にコナラを中心とする広葉樹林が存在する。流域地質は、筑波変成岩類の黒雲母片麻岩が大部分を占め、花崗岩質の岩脈が局的に認められる。基岩の風化物は砂質であり、粘土成分に乏しい。これらの基盤岩石並びにその風化物を覆って関東ローム層が厚く堆積している。

降水量は、水位計室の屋根に設置した転倒ます式雨量計（1転倒=0.1mm；池田計器製）で観測した。流出量は、S地点に設置したVノッチ式簡易堰の水位を磁歪式水位計（サンテスト社製）により観測して求めた。なお、イベント採水は2003年5月17時15分を起点に1時間ごとに行われたので、降水量、流出量データもそれに合わせて15分を起点とする1時間単位の値として整理した。

2. 洪水イベントの観測 河川水の採取は自動採水装置（ISCO社製）を使用して行い、集めたサンプルの浮遊土砂濃度および安定同位体比を分析した。採水

Naoki KABEYA, Akira SHIMIZU, Tatsuhiko NOBUHIRO (FFPRI, Matsunosato 1 Tsukuba Ibaraki 305-8687), ZHANG Jian-Jun (Beijing Forestry University)

Temporal variations of stable isotope ratio and suspended sediment concentration in stream water during a storm event in Tsukuba Experimental Watershed

は、 1.5mm/hr 以上の降雨発生時に、1時間ごとに連続して採水する行うプログラム設定を行った。今回は、2003年5月20日から21日にかけての降雨イベント（総雨量 52.1mm 、最大時間雨量 25.7mm 、降雨継続時間19時間）について流出水中の浮遊土砂濃度および安定同位体比の時系列変化の観測結果を基に解析を行った。なお、当流域の同地点での土砂量観測に関して、既に通年の土砂流出観測(3)、分布型土砂流出モデルの適応(4)、浮遊土砂濃度と10分間降雨強度の相関解析(7)などが行われている。

採水したサンプルは持ち帰って $106\mu\text{m}$ メッシュのふるいに通したのち、安定同位体分析に必要な 20cc を気密性の高いねじ口ガラス瓶に分取し、のこりを 105°C で3時間乾燥させたのち秤量しておいたガラス濾紙($0.47\mu\text{m}$ GF/Fフィルター：ワットマン社製)を装着した吸引濾過器により濾過した。濾過後のガラス濾紙を乾燥機に入れ 80°C で48時間乾燥させたのち、電子天秤で秤量を行った。 80°C 乾燥後流量と乾燥前重量の差がサンプルの中に含まれる浮遊土砂量となる。

降水は水位計室の屋根に設置した直径 21cm のロートを付けた 10L のポリボトルにより採取した。ボトル内に貯まった雨水が蒸発して安定同位体比が変化するのを防ぐために、採取開始時にポリボトル内にシリコンオイルを加えて油膜を作った。採集用ポリボトルを研究室に持ち帰ったのち、分液ロートを用いて油分を除き、気密性の高い 20cc ねじ口ガラス瓶に保存した。河川水および降水の安定同位体分析用サンプルは、質量分析器(MAT 252、サーモエレクトロン社)を用いて採取した水の酸素安定同位体比($\delta^{18}\text{O}$)を分析した。 $\delta^{18}\text{O}$ 値の分析精度は $\pm 0.02\%$ である。

3. トレーサーを用いた洪水ハイドログラフの流出成分分離 河川水の流出成分は、降雨に伴い新たに流域に附加された“新しい水”(イベント雨水)と降雨開始以前に既に流域内に貯留されていた“古い水(先行水分)”とに分けられる。これらの流出成分が総流出量に対して占める割合を定量的に求める方法が、トレーサーによる洪水ハイドログラフの分離である。降雨時において、新しい水と古い水の間で化学反応がないものとすると、河川水の採水・量水地点において次の2つの收支式が成立つ(5)。

$$Q_t = Q_n + Q_o \quad [1]$$

$$C_t \cdot Q_t = C_n \cdot Q_n + C_o \cdot Q_o \quad [2]$$

ここで、 Q : 流量、 C : トレーサー濃度、添え字の t , n , o はそれぞれ、総流出量、新しい水、古い水を表す。式-1, -2から総流出量に占める古い水の割合は次式にて示される。

$$Q_o = [(C_t - C_n) \cdot (C_o - C_n)^{-1}] \cdot Q_n \quad [3]$$

式-3において Q_n と Q_o は未知数である。 Q_t は河川流量と

して実測可能であり本研究ではS地点の観測流量を用いた。

III 結果と考察

1. 降水量、流出量、浮遊土砂濃度の時間変化 流出量のピークは、降水量のピークと一致した。また、浮遊土砂濃度のピークも降水量・流出量と一致した(図-1)。このことは、当流域の浮遊土砂流出特性が同時型であると報告した既往の研究結果(3および7)と一致している。

2. 安定同位体比による成分分離結果 イベント開始直後(2003/5/20 16:00)の河川水の $\delta^{18}\text{O}$ 値は、イベント終了から約2週間後(2003/6/10 15:00)の河川水の $\delta^{18}\text{O}$ 値と同じく -7.94% であった。このことから、このイ

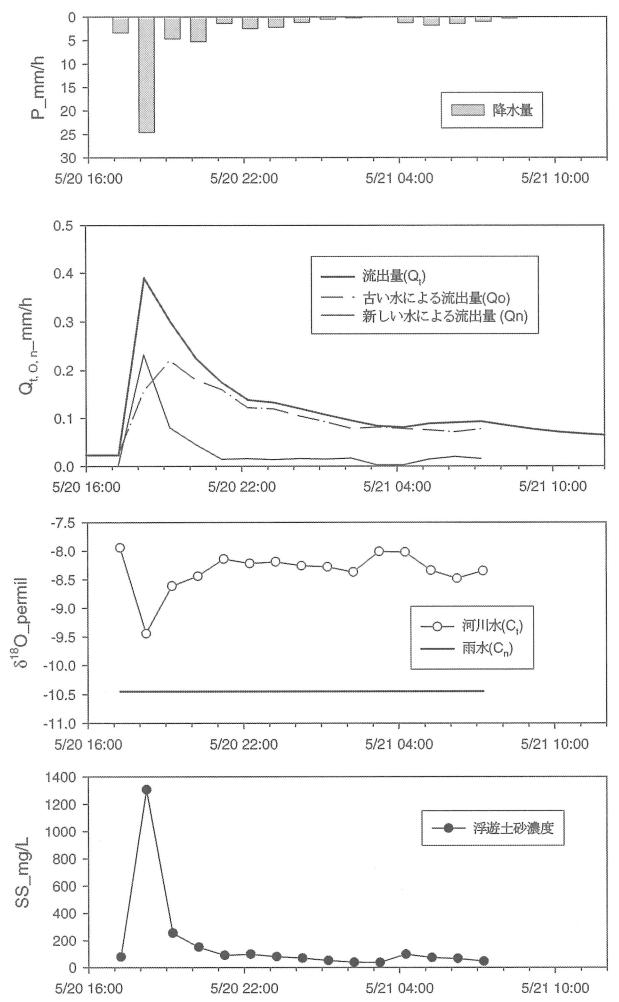


図-1 洪水イベント時の降水量、流出量、浮遊土砂濃度および酸素安定同位体比の時間変化と安定同位体比による成分分離の適応結果

Fig.-1. Temporal variations in precipitation, discharge, suspended sediment concentration and oxygen-18 concentration and the result of hydrograph separation using oxygen-18 concentration.

イベント期間の古い水の $\delta^{18}\text{O}$ 値 (C_o) を $-7.94\text{\textperthousand}$ とした。新しい水の $\delta^{18}\text{O}$ 値 (C_n) は、イベント期間中の降水の同位体比である $-10.45\text{\textperthousand}$ を用いた。

1時間ごとに採水された河川水の $\delta^{18}\text{O}$ 値を C_t として、式3を用いて各時点における流出量を新しい水と古い水の2成分に分離した。その結果、新しい水の寄与割合は降水量・流出量ピーク時に最も高く、60%であった(図-1)。古い水の流出成分はそれよりも一時間遅れてピークになった。イベント期間の総流出量に占める古い水の寄与割合は、77%に達した。これらのことから、新しい水により形成される河道周辺部の地表流(地表付近の流出成分)の方が、地下部の古い水により形成される地下流出成分よりも速やかに流出に寄与して流出ピークを形成するが、その後の漸減時の流量は地下流出成分により維持されていると考えられる。

3. 浮遊土砂濃度と流出量の関係 各時点における浮遊土砂濃度と総流出量(Q_t)、古い水成分の流出量(Q_o)、新しい水成分の流出量(Q_n)との関係を比較し、それぞれに流出成分ごとに浮遊土砂濃度に対する回帰直線を求めた(図-2)。 Q_t の浮遊土砂濃度に対する回帰直線の決定係数は $R^2=0.6508$ だった。一方、 Q_o の浮遊土砂濃度に対する回帰直線の決定係数は $R^2=0.9574$ 、また、 Q_n の浮遊土砂濃度に対する回帰直線の決定係数は、 $R^2=0.1496$ であった。このように、浮遊土砂濃度と新しい水成分の流出量の間に最も高い相関が見られた。このことから、イベント雨水により発生する河道周辺部の地表流(地表付近の流出成分)がピーク時の浮遊土砂濃度形成に重要な役割を果たしていると言える。

V 結論

一般に、浮遊土砂濃度と流出量との間にはヒステリシスが存在することが知られている(7)。今回の研究では、安定同位体により抽出されたハイドログラフの新しい水成分の流出量と浮遊土砂濃度との高い相関が見られた。本研究により、従来の浮遊土砂観測に、トレーサーを用いた流出機構の理解を合わせることで、より直接的な浮遊土砂濃度形成の因子を抽出できる可能性が示された。

引用文献

- (1) KUBOTA, T. and TSUBOYAMA, Y. (2003) Intra-inter-storm oxygen-18 and deuterium variations of rain, throughfall, and stemflow, and two-component hydrograph separation in a small forested catchment in Japan. *J. For. Res.* 8 : 179-190.
- (2) 倉茂好匡 (1996) 浮遊土砂の測定および解析方法(水文地形学－山地の水循環と地形変化の相互作用－). 恩田裕一・奥西一夫・飯田智之・辻村真貴編, 267 pp., 古今書院, 東京). 132~142.
- (3) 清水晃・張建軍・阿部和時・壁谷直記・延廣竜彦・久保田多余子・阿部俊夫 (2005) 森林小流域の通年土砂流出観測. 日本林学会関東支部大会論文集, 56 : 253~254.
- (4) 清水晃・壁谷直記・延廣竜彦・坪山良夫・阿部俊夫・久保田多余子 (2006) GISを使用した土砂流出モデルの森林小流域への適用. 日本森林学会関東支部大会発表論文集, 57 : (印刷中).
- (5) 辻村真貴・田中正 (1996) 環境同位体を用いた降雨流出の研究(水文地形学－山地の水循環と地形変化の相互作用－. 恩田裕一・奥西一夫・飯田智之・辻村真貴編, 267pp., 古今書院, 東京). 79~87.
- (6) WILLIAMS, G. P. (1989) Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events in rivers. *J. Hydrol.* 111 : 89-106.
- (7) ZHANG, J., SHIMIZU, A., KABEYA, N. and NOBUHIRO, T. (2005) Research on suspended sediment of upland small forest watershed in Japan. *Journal of Beijing Forestry University*, 27(6) : 12-19.

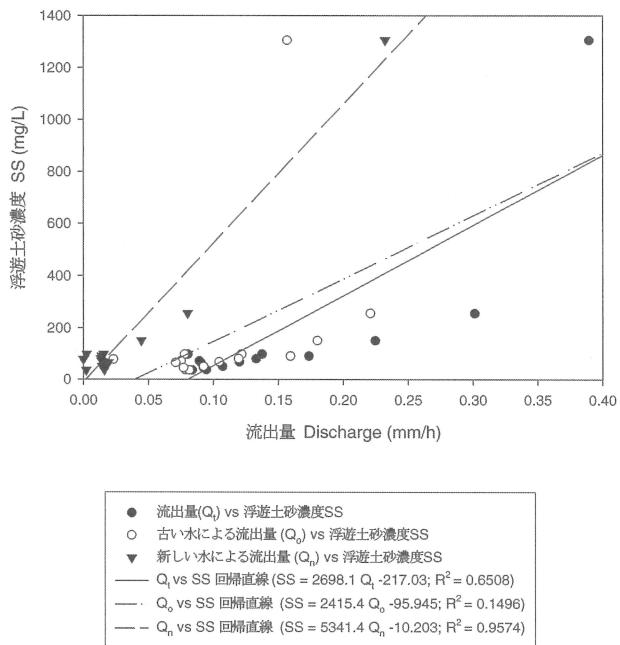


図-2 浮遊土砂濃度と総流出量(Q_t)、古い水成分の流出量(Q_o)、新しい水成分の流出量(Q_n)との関係

Fig.-2. The relationship between suspended sediment concentration and total discharge(Q_t), discharge of old water component(Q_o)and discharge of old water component(Q_n).

- (3) 清水晃・張建軍・阿部和時・壁谷直記・延廣竜彦・久保田多余子・阿部俊夫 (2005) 森林小流域の通年土砂流出観測. 日本林学会関東支部大会論文集, 56 : 253~254.
- (4) 清水晃・壁谷直記・延廣竜彦・坪山良夫・阿部俊夫・久保田多余子 (2006) GISを使用した土砂流出モデルの森林小流域への適用. 日本森林学会関東支部大会発表論文集, 57 : (印刷中).
- (5) 辻村真貴・田中正 (1996) 環境同位体を用いた降雨流出の研究(水文地形学－山地の水循環と地形変化の相互作用－. 恩田裕一・奥西一夫・飯田智之・辻村真貴編, 267pp., 古今書院, 東京). 79~87.
- (6) WILLIAMS, G. P. (1989) Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events in rivers. *J. Hydrol.* 111 : 89-106.
- (7) ZHANG, J., SHIMIZU, A., KABEYA, N. and NOBUHIRO, T. (2005) Research on suspended sediment of upland small forest watershed in Japan. *Journal of Beijing Forestry University*, 27(6) : 12-19.

