

流出解析における流出成分の分離の意味に関する研究

On the meaning of the separation of run-off components

名古屋大学工学部	松 林 宇一郎 Uichiro Matsubayashi
名古屋大学工学部	高 木 不 折 Fusetsu Takagi
北陸電力	渡 辺 茂 Sigeru Watanabe

It is usually considered that the runoff discharge consist of two components i.e. direct runoff and groundwater runoff. In this paper, these runoff are separated by Kinematic Wave Method and tracer method using $\delta^{18}\text{O}$ data observed in Kanedaira test basin.

The results show that $\delta^{18}\text{O}$ of precipitation has found only in channel precipitatin runoff and the rest of direct runoff and ground water runoff have $\delta^{18}\text{O}$ value of groundwater. This implies that the meanings of runoff models especially physically based ones should be checked, because they usually consider that the direct runoff are originated from precipitation at that time.

Keywords: runoff components, tracer, Kinematic Wave method, test basin

1. まえがき

山地流域からの流出をモデル化する場合、普通その発生場によって表面流出・中間流出・地下水流出に分けて取り扱われる。この流出成分に対する認識はモデルを物理的なものとして取り扱う上での最も基本的・基礎的なものとなっている。しかしながら、これらの成分を実際に分離する際には単に流出波形を基礎とし、そこに現れた特性、例えば低減曲線の折れ点などをもとに、いわば便宜的に分離されるのが常である。これは流量が多数の山腹斜面と河道網から構成される複雑な流域での積分値であること、しかも大部分の流出現象が山腹斜面内という目に見えない所で起こっているためである。

そこで本研究においては、流域の最小単位とも言える小試験流域を対象にし、物理的に比較的明らかな現象から解析し、残りの部分を推論してゆくことによって、流出成分の分離ならびに各成分の意味を改めて議論したものである。用いた手法は、最も物理的に明らかな現象として河道部分の Kinematic Wave 法による解析、および降雨と流量に含まれる酸素同位体 ^{18}O の濃度のデータを用いた流出成分分離である。

2. 流域の概要

解析の対象とした兼平試験流域（岐阜県恵那郡山岡町、庄内川水系小里川左支川兼平川）は、流域面積 0.078km^2 、主河道長約 500m、河道勾配 14° で、最上流部はやや扇状であるが、全体に主河道を中心とした流域幅一定の流域である。（図-1）流域の地質は、近くの防災ダムの工事に伴う調査結果から、かなり深層まで風化の進んだ花崗岩であることがわかっている。斜面の表層は上から黒褐色の多孔質な有機土壌から次第に茶色の粘性土へと変化し、ほぼ 1m より下は固くしまったマサ土となっている。また地表～マサ土まで、層の厚さは斜面下部から頂部にゆくに従い薄くなっている。流域の植生は斜面崩壊による裸地が一部に存在するほかは、スギ、ヒノキの人工林に覆われている。河道は河床が粘性土の場合は幅 40～50cm の掘り込まれた水路を形成し、礫や砂の部分では比較的平らな河床となり、幅約 1m の範囲を広がって流れる。

解析に用いた水文データは、雨量と流域中流及び下流に設けたバーシャルフリュームによる流量（以下、各々上流流量、基準流量と呼ぶ）である。

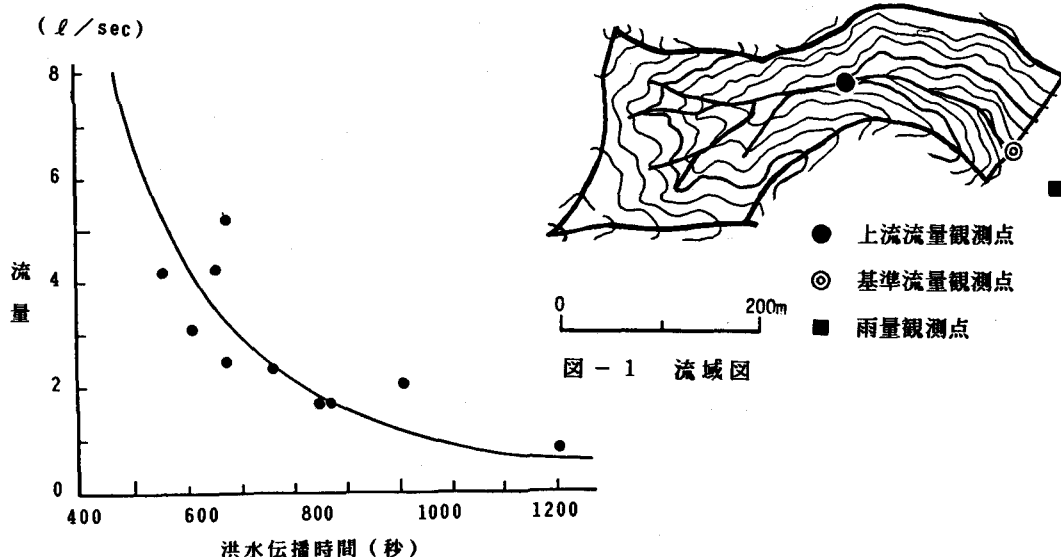


図 - 2 洪水伝播時間

3. 解析の方法

(1) Kinematic Wave 法による斜面からの横流入の分離

河道部及びその近傍に降った降雨はそのまま流下し河道降雨として流出する。そこで現象的に比較的明かで計算し易い河道降雨のKinematic Wave法での計算を試みた。河道として、ここでは側方流入が一様と考えられる上流流量観測点と基準流量観測点の間の区間を対象とする。

kinematic wave 法(河道部のみ)は連続式(1)と運動方程式(2)とを連立させて解かれる。

$$\partial A / \partial t + \partial Q / \partial x = r \cdot B + q_{\ell} \quad \cdots (1) \quad A = k Q^p \quad \cdots (2)$$

ここに、 A ：流水断面積、 Q ：流量、 k, p ：定数、 r ：降雨、 B ：水路幅、 q_{ℓ} ：斜面からの横流入量である。 k, p は(2)式から導かれる洪水波の伝播時間 t_{ℓ} とその時の流量の関係(3)式を上流点から基準点までの実測のデータ図-2に一致させるように求めた。

$$t_{\ell} = L \cdot k \cdot p \cdot Q^{p-1} \quad \cdots (3)$$

ここに L は上流点から基準点までの距離(230m)である。

実際の洪水時には上流点と下流点のピークの見かけの遅れは、その間での横流入によって影響を受けるため、一般に小さくなる。図中のデータは人工的に擾乱を起こして、伝播時間を実測したものである。得られた値は、 $k = 1.18$ 、 $p = 0.606$ である。

水路幅 B の値も本来時間的場所的にばらつくが、ここでは一定と仮定した。この河幅 B は河道降雨の量を決めるので重要であるが、一方で遅れには k, p が関係するため、 B を大きく取りすぎると流出の初期に大きなピークが計算され不合理な結果となる。ここで用いた値は実際の河道を念頭におきながらこのような条件も考慮して求められている。初期条件は側方流入が上流点から基準点の間で一定と考え初期流量を直線的に内挿し、これから A の値を求めた。境界条件は上流点での実測流量を与えた。

側方流入量 $q_{\ell}(t)$ は場所的に一定と仮定し、下流の基準点で計算流量と実測流量が一致するように繰り返しにより逆推定した。

(2) $\delta^{18}O$ による成分分離

表面流出、中間流出、地下水流出の各成分が質的にそれぞれ異なった一定の値を持つという際だった特徴

がある場合には、流出水の持つ性質をトレーサーとしてその濃度により流出流量を各成分に分離することが出来る。このトレーサーとしては、流出の途中で化学的変化を受けたり地中に固定されたりしないものが望ましい。今回用いた自然水中に含まれる酸素の同位体 ^{18}O はその影響がほとんど無いことが明らかにされており、流出成分の分離には理想的なトレーサーである。 ^{18}O の濃度は通常次式で定義され $\delta^{18}\text{O}$ と書かれる。

$$\delta^{18}\text{O} = \{ (\delta^{18}\text{O} / \delta^{16}\text{O})_{\text{sample}} / (\delta^{18}\text{O} / \delta^{16}\text{O})_{\text{SMOW}} - 1 \} \times 1000 \quad \cdots(4)$$

ここに、SMOW は平均標準海水の値であることを示す。

一般にトレーサーを用いた流出成分の分離は、雨の成分を持つ直接流出と地下水の成分をもつ地下水流出を対象にして、流量の連続式(5)式とトレーサーの保存式(6)とから(7)式のように計算される。

$$Q_T = Q_S + Q_G \quad \cdots(5) \quad C_T \cdot Q_T = C_S \cdot Q_S + C_G \cdot Q_G \quad \cdots(6)$$

$$Q_S = Q_T \cdot (C_T - C_G) / (C_S - C_G), \quad Q_G = Q_T \cdot (C_T - C_S) / (C_G - C_S) \quad \cdots(7)$$

ここに、 Q は流量を、 C は濃度を表し、添え字 S, G, T はそれぞれ直接流出、地下水流出、及びその合計であることを示している。 C_G を低水時の濃度によって、 C_S を降雨の濃度によって与え、 Q_T と C_T を実測して Q_S と Q_G を求めるわけである。

ところでこの方法は C_S と C_G が出水中一定であることが前提となっている。このうち C_G については出水前後の低水状態で値が一致することから出水中も一定値をもつものと仮定した。 C_S は降雨の濃度であり、水蒸気が凝結するときの気象条件に依存する。これについては、実測データを調べると時間変化がみられ(7)式が用いられない場合が出てきた。そこで、本研究では降雨の時間遅れが考慮できるように改良を行った。流出の遅れ系としてはいろいろなものが考えられるが、ここでは、 $Q_S(t)$ 、 $Q_G(t)$ を最も簡単な線形応答モデル(8)、(9)式で表し(5)、(6)式に代わるものとして(10)、(11)式を考えた。

$$Q_S(t) = \int K_S(t-\tau) \cdot r(\tau) d\tau \quad \cdots(8)$$

$$Q_G(t) = \int K_G(t-\tau) \cdot r(\tau) d\tau + Q_0 \quad \cdots(9)$$

$$Q_T(t) = \int K_S(t-\tau) \cdot r(\tau) d\tau + \int K_G(t-\tau) \cdot r(\tau) d\tau + Q_0 \quad \cdots(10)$$

$$C_T(t) \cdot Q_T(t) = \int K_S(t-\tau) \cdot C_S(t) \cdot r(\tau) d\tau + \int K_G(t-\tau) \cdot C_G \cdot r(\tau) d\tau + C_G \cdot Q_0 \quad \cdots(11)$$

ここに、 $K_S(\tau)$ 、 $K_G(\tau)$ はそれぞれ C_S と C_G を持った流出成分に対する応答関数である。(10)、(11)式より Q_G の項を消去すると次式が得られる。

$$Q_T(t) \cdot (C_T(t) - C_G) = \int K_S(t-\tau) \cdot (C_S(t) - C_G) \cdot r(\tau) d\tau \quad \cdots(12)$$

この式は、 $K_S(\tau)$ を未知関数とする積分方程式であり、単位図法と同様の手法で決定することができる。そして、 $K_S(\tau)$ が求まると(8)式により $Q_S(t)$ が計算でき、流出成分が分離できる。また、同時に、分離された Q_G より(9)式から K_G も同様に求めることができる。ここで(8)、(9)式の表現には物理的根拠を持たせず、特に地下水流出成分に対しても降雨に対する応答と考えるなど、単なる数学的表現として用いた。この点に関しては第4節で考察する。

さて、この $\delta^{18}\text{O}$ を用いた成分分離においても流出の機構が明瞭な部分については(8)、(9)式のような black box ではなくその構造を入れる方が望ましい。そこで、降雨の濃度を持つ成分に焦点を当て、河道での遅れを考慮して、(5)式の Q_S を(13)式によって表した。

$$Q_S(t) = \int_0^{L_c} \{ r(t-\tau_c(x)) \cdot B + 2 \cdot \int_0^{L_s} f(s) \cdot r(t-\tau_c(x) - \tau_s(s)) ds \} dx \quad \cdots(13)$$

ここに L_c, L_s は河道及び斜面の長さであり、 $\tau_c(x)$ は x の地点から下流端までの遅れ時間、 $\tau_s(s)$ は斜面上 s の地点から斜面下端までの遅れ時間であり、 $f(s)$ は斜面上各点に降った雨の流出率である。(13)式を用いると地下水流出成分を除いた(12)式に対する式は次式で表される。

$$B \cdot R(t) + 2 \cdot \int_0^{L_s} f(s) \cdot R(t - \tau_s(s)) ds = Q_T(t) \cdot (C_T(t) - C_G) \quad \cdots(14)$$

$$R(t) = \int_0^{L_c} C_T(t - \tau_c(x)) \cdot r(t - \tau_c(x)) dx \quad \cdots(15)$$

この式で、到達時間 $\tau_c(x)$ は河道での流れが到達時間内で定常とすると、次式で表される。

$$\tau_c(x) = \int_{x^L}^x (1/v(x)) dx \quad \dots(16)$$

ここで各点での流速を評価するための流量の分布を、下流端流量を Q_0 として $Q(x) = Q_0 \cdot (x/Lc)$ と仮定し、(2)式と $Q = A \cdot v$ の関係を用いることによって $\tau_c(x)$ は次式で表される。

$$\tau_c(x) = (k/p) \cdot (Q_0/Lc)^{p-1} \cdot (Lc^p - x^p) \quad \dots(17)$$

この $\tau_c(x)$ を用いると(14)式の左辺第1項が計算でき、第2項の性質を検討することが出来る。

4. 解析結果の考察及び流出場についての推論

ここでは1986年9月17-18日の出水を例として取り上げる。この出水は総雨量34mmの比較的小さな出水であるが、3度にわたる降雨の $\delta^{18}O$ の濃度に変化した例である。図-3はそのハイドログラフと降雨およびそれぞれの $\delta^{18}O$ を示したものである。

(1) Kinematic Wave法による成分分離結果

2. で仮定したBの値を用いると、上流点と基準点の間での河道降雨は $7.8m^3$ であり、同区間の降雨による流出量の26%に当たる。また、計算過程での波形の観察から遅れは短く、各ピークの立ち上がり部を構成していることが分かった。

横流入量は、河道長を掛けて流量で表示すると図-4のように分離さ

れる。この横流入量は2つの成分すなわち基底流出とその上に重なった、明らかに降雨に応答しているとみられる成分から成っていることが分かる。後者の時間変化は非常に早くこれを見る限り従来の流出成分の分類で言えば表面流出ないしは早い中間流出に相当すると考えるのが自然であろう。

(2) $\delta^{18}O$ による成分分離

図-5は(8)~(12)式による分離の結果として求めた $K_s(\tau)$ と $K_g(\tau)$ を示したものである。また、この K_s を用いて Q_s を算定し Q_T から分離した Q_g が図-3に一点鎖線で示されている。これらから、降雨の濃度を持つ成分と地下水の濃度を持つ成分を比較すると、最も注目すべき点として後者が非常に大きいことが挙げられる。また K_g と K_s を比べて、その時間遅れが意外に小さく K_s との差が10分しかないことも特徴である。

降雨の濃度を持つ成分については、その総量は $13m^3$ であり、基底流出以上の流出量 $83m^3$ の16%となっている。この流出では9/17(13:00-22:00)の間に31mmの降雨があったから、河道長を500mとすると Q_s が全て河道降雨であったとしても河幅は0.8mであり、この $13m^3$ は少しも大きい値ではない。これは降雨の濃度を持った流出成分が全て河道降雨によるものであることを意味している。この河道降雨の流出に関し、図-6は(14)式を用いた解析における同式の各項の値を示したものである。ここで河幅Bは0.4mを用いている、これは、 $B=1m$ とすると $B \cdot R$ の項が $Q_T \cdot (C_T - C_g)$ より大きくなるという不都合が生じるからである。図中点線は(14)式第2項であるが、降雨の濃度を持った流出成分は全て河道降雨であったから、この項ももはや斜面流

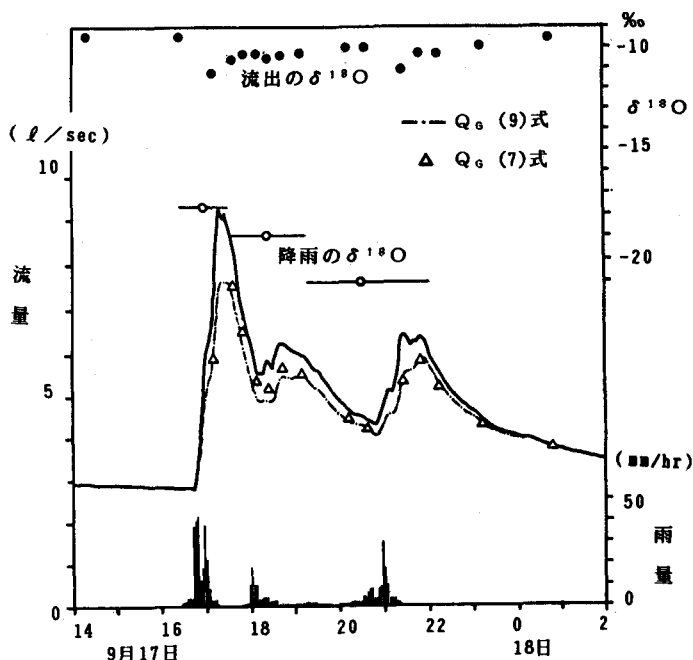


図-3 観測データ (1986年9月17-18日)

出ではなく河道降雨の一部と考えなければならない。この項は、B・Rより30分～1時間遅れて生じており、しかもその遅れは流量が多いほど短い。これらから、この部分は、河道近傍に於てすぐに流出しないでとどまっている成分と考えられる。この点はKW法では考えられていなかった。この様に $\delta^{18}\text{O}$ の情報を用いると、河道流についてもより詳しい検討が可能となる。

つぎに、 C_6 の濃度を持つ流出成分を見てみると、これはKW法による横流入量にほぼ対応しており、同一の成分と考えられる。しかしながら、このことは流出現象の解釈を非常に難しくする。すなわち、KW法での議論ではその流出の速さから横流入量は表面流出もしくは早い中間流出であると推論したが、 $\delta^{18}\text{O}$ の解析は、それに対応する成分が地下水の濃度を持つ流出であると述べているからである。

本流域でのこの結果は、従来の流出モデルでは説明できないものである。すなわち、これまでの流出モデルでは、短期流出は基底流出を除けば「その出水時に降った雨」が流出してきたものと考えてきた。black box モデルである単位図法でさえ、基底長にわたる積分値が1であるという条件がつけられ、実測流量との一致は有効降雨を考えることによって処理されている。物理的なモデルではなおさらである。それにたいし、ここで得られた結果は、降雨と斜面からの流出水とは同一ではなくたとえ降雨に対応して流出が生じたとしても、もはやそれは「応答」として現れたとしか言えない。極論すれば、1の降雨があって地下水帯を刺激して2の流出が地下水帯から流出してきても一向に構わないわけである。この刺激の力学的メカニズムは今後明らかにして行かなければならないが、ここでは次に流出場としてどの範囲の地下水帯(C_6 の濃度を持った水の母体)が Q_6 を生み出しているかを検討する。

まず1回の出水で地下水がどれだけ流出するかを見るため9/17(9:00)から9/18(6:00)の21時間について各成分を計算したものを表-1の①に示す。この中で()のついた値は積分した時間(21時間)に依存する。

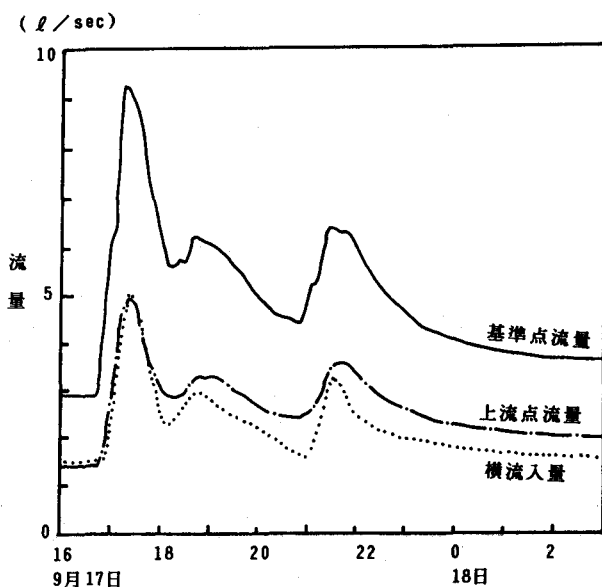


図-4 KW法による成分分離

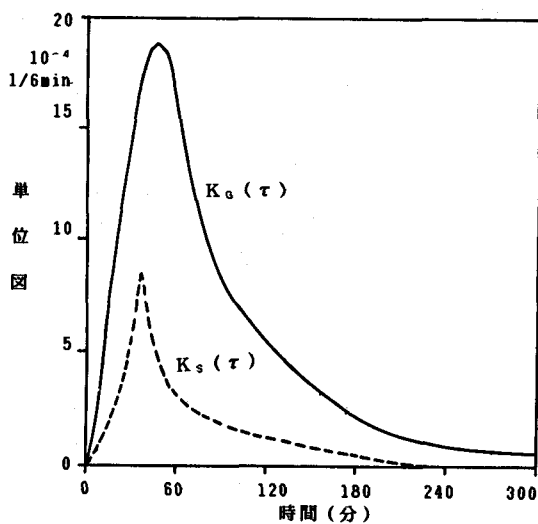


図-5 $K_0(\tau)$, $K_s(\tau)$

この内、地下水の成分である第2・3項の和298 m³から単位長さ当り片側斜面からの流入総量を有効間隙率 ($\gamma=0.2$) により見かけの貯留量として表したものは約1.5m²となる。即ち1度の出水でばこの範囲の地下水が流出することになる。これは実際に生じても不合理な値ではない。次に、移動速度を見積るためピーク付近 (9/17, 17:15) における流出量の各成分を表-1の②に、河道単位長さ当り片側斜面のみかけの貯留水移動量を③に、更に地下水帯水深を2mと仮定して求まる流速を④に示す。地下水帯の透水係数は斜面のマサ層で10⁻⁵m/secのオーダーの値であり、河道近傍であることからもう少し大きいと考えればこの10⁻⁵m/secの浸透速度は説明でき無くはない。

また、2. で $K_g(\tau)$ を降雨の応答と置いて意味のある値が得られたのは、この成分が地下水流出ではなく直接流出に対応していたためと考えられる。

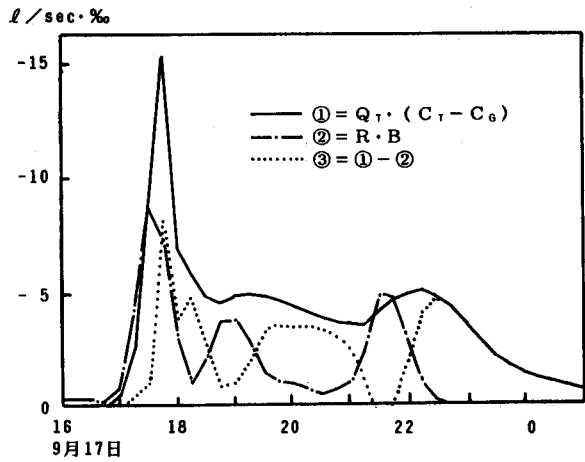


図-6 河道降雨の分離

表-1 地下水流出の可能性

	河道降雨	地下水流出	基底流出	合計	単位
①	13	70	(228)	(311)	m ³
②	1.5	4.5	3.0	9.0	10 ⁻³ m ³ /sec
③	-	2.25	1.40	-	10 ⁻⁵ m ² /sec
④	-	1.13	0.70	-	10 ⁻⁵ m/sec

5. 結論

本研究は、流域面積が0.078Km²と非常に小さく、しかも、降雨による直接流出が降雨の3%という非常に浸透性の良い風化花崗岩地帯の山地小流域において行ったもの

である。この点を前提として本研究の主な結論をまとめると以下のようである。

① $\delta^{18}O$ 解析から、短期流出においても降雨そのものが流出してくるのは河道降雨成分のみであり、いわゆる直接流出としての応答特性を持つ成分も、実際には地下水の形で現れてくることが分かった。本流域でのこの結果は、従来考えられてきた流出の物理過程では説明できない場合もあることを示唆している。

②河道降雨の流出に占める割合は小さく直接流出のうち16%である。この流出機構は比較的明かであるが、それでも $\delta^{18}O$ 解析から推論されるように、水路外での滞留等のまだ不明な現象も存在する。

③本研究の主な議論はトレーサー $\delta^{18}O$ を用いたものである。この様にトレーサーは流出水の持つ情報を増し、従来は認識し得なかった現象を明らかにする糸口を与えてくれる点で、流出現象の解明に非常に有用であることが分かった。

なお、 $\delta^{18}O$ 濃度の測定には名古屋大学水圏科学研究所の加藤喜久雄助教授に多大の御助力を頂いた。ここに深く謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 渡辺・高木・松林：山地小流域における斜面流出と河道流出、42回年講
- 2) 日野・長谷部：地球化学的トレーサ ($\delta^{18}O$) とフィルタ分離AR法による流出成分分離について、28回水講