

δ¹⁸Oをトレーサーとした短期流出特性把握における サンプリング方法の検討

内山 佳美*・相原 敬次*・飯田 勝彦**・板寺 一洋***

Sampling Method for Short-Term Runoff Characteristics Grasp Using by the δ¹⁸O Tracer

Yoshimi UCHIYAMA^{*1}, Keiji AIHARA^{*1}, Katsuhiko IIDA^{*2}, Kazuhiro ITADERA^{*3}

要 旨

内山佳美・相原敬次・飯田勝彦・板寺一洋：δ¹⁸Oをトレーサーとした短期流出特性把握におけるサンプリング方法の検討 神自環保セ報 6:63-68, 2009 δ¹⁸Oをトレーサーとした森林の短期流出特性把握の手法開発を目的として、2つの小流域において降水と河川水のδ¹⁸Oを分析し、河川水のうちの直接流出成分と地下水流出成分を分離、比較することによって、サンプリングの方法から手法を検討した。その結果、降水のδ¹⁸Oでは、地域差よりも降雨イベントごとの差が大きかったため、短い時間間隔でサンプリングする必要があると考えられた。また、降雨時の河川流出量の変動が急激な時は、サンプリングの時点により河川水のδ¹⁸Oの値が左右されるが、河川流出量の変動が緩やかであるとサンプリングの時点に数時間程度の差があっても河川水のδ¹⁸Oの値に大きく差がないことがわかった。

はじめに

神奈川県の水源地域では、間伐等の手入れが不十分のために林床植生の乏しい人工林や二ホンジカの影響で林床植生の衰退した森林が近年増加している。このような森林では、降った雨が地中へ浸透しにくく地表流として速やかに流れ出してしまうため、保水力の低下が懸念されている。

このような水源地域における課題に対して、現在、間伐等による光環境の改善に加えて、二ホンジカの生息数と植生量の相対バランスを改善する対策が試みられている。水源環境保全・再生の観点から、今後はこれらの対策の直接的効果である林床植生量の増加だけでなく、二次的効果である降った雨が地表流として下流に流出する割合が低減するといった短期的な流出特性についても検証していく必要がある。

従来の森林水文研究では、量水堰で正確な水文観

測を行い、蓄積データを解析することにより降雨流出特性を定量的に把握してきた。しかし、この手法では、量水堰の適地が限定されるうえ、長期観測が不可欠である。

近年、水分子の安定同位体をトレーサー（追跡子）として、降雨時と無降雨時の降水と河川水を分析することにより、河川水に含まれる降雨前から流域内に存在していた「古い水」と降雨によって新たに供給された「新しい水」の混合比を把握することが可能になっている。神奈川県においても、降雨例がすくないものの中嶋ら（2001）がこの手法によって大洞沢における河川水の成分分離を試みている。

本研究では、県内水源地域の森林の短期流出特性を簡易に把握するモニタリング手法を確立するために、酸素安定同位体（δ¹⁸O）を用いて、林床植生状態の異なる大洞沢流域と貝沢流域における「新しい水」と「古い水」の混合比を比較することによって、サンプリン

* 神奈川県自然環境保全センター研究部（〒243-0121 神奈川県厚木市七沢 657）

* 元環境科学センター（〒254-0014 神奈川県平塚市四之宮 1-3-39）

* * 神奈川県温泉地学研究所（〒250-0031 神奈川県小田原市入生田 586）

グ方法からの手法の検討を試みた。

調査地と方法

1 調査地

宮ヶ瀬湖上流に位置する東丹沢の大洞沢流域（愛甲郡清川村煤ヶ谷）と相模湖上流に位置する貝沢流域（相模原市相模湖町与瀬）を調査地として設定した。（図1）

大洞沢は、全流域面積 58ha、標高 430～878m、地質は、新第三紀層丹沢層群に属し、急峻な地形を呈している。年平均降水量は、3,000mm 程度である。林相は、スギやヒノキの人工林や広葉樹林、混交林などがモザイク状に配置している。近年ニホンジカが過密に生息しているために林床植生が衰退し土壌侵食が見られる。県内の山地溪流で唯一水文観測を継続している流域であり、中嶋ら（2001）が河川水の流出成分分離を行っている。

貝沢は、全流域面積 96ha、標高 170～633m、地質は、白亜紀から古第三系の小仏層群に属す。年平均降水量は、1,600mm 程度である。林相は、大部分がスギ・ヒノキの人工林であり、一部が広葉樹林である。人工林は適度に間伐されており、林床植生も比較的豊富でニホンジカの採食影響もほとんど認められない。

2 大洞沢における降水量及び流量観測

大洞沢では、降水量と河川流出量の推移を把握するために、流域下流部の量水堰付近において転倒ます型雨量計（ウイジン社製 U - Dot）を使用し、データロガーにより連続して 10 分間隔で降水量を観測した。流量は、量水堰において水位センサー（ハイネット社製 HM - 910）を使用して 10 分間隔で連続して水位をデータロガーに記録し、水位 - 流量換算式を用いて流量を算出した。

3 無降雨時の河川水のサンプリング

「古い水」の $\delta^{18}\text{O}$ を把握するため、2～3 日以上降雨の無い平水時に河川水のサンプリングを実施した。サンプリングは、大洞沢が 2008 年 5 月 8 日、7 月 17 日、及び 8 月 8 日で、貝沢が 2008 年 5 月 8 日、7 月 23 日に行った。サンプリング場所は、大洞沢は、量水堰から 10m ほど上流（集水面積 48ha）、貝沢は、



図1 大洞沢及び貝沢の位置図

流域内河川の取水堰跡付近（集水面積 60ha）である。

4 降雨時の降水と河川水のサンプリング

降雨のあった 2008 年 6 月 3 日、同 7 月 4 日、同 8 月 28 日に河川水と降水のサンプリングを実施した。河川水は手動及び自動（ISCO 社製 3700 型）により一定間隔（30 分あるいは 2 時間）でサンプリングを行った。降水は、河川水近傍の降水とともに札掛（大洞沢の南約 1km）において自動雨水採水器（小笠原計器製作所製 US - 330H 型）によりサンプリングを行った。

5 $\delta^{18}\text{O}$ の分析と河川流出成分分離

採取した試料は、冷蔵保存して温泉地学研究所の軽元素質量分析装置（VG（現 Micromass）社、PRISM）及び自動平衡装置（ISOPREF18）により $\delta^{18}\text{O}$ を分析した。

降雨時の河川水における新しい水と古い水の混合比は、以下の式（1）、（2）で表わされる。（大手，2008）

これを元に降雨中の河川水における新しい水の割合を求めた。

$$Q_t = Q_g + Q_r \quad \cdots (1)$$

$$\delta_t Q_t = \delta_g Q_g + \delta_r Q_r \quad \cdots (2)$$

ここで、 δ_t は河川水の $\delta^{18}\text{O}$ 、 Q_t は河川流出量、 δ_g は周辺の地下水流出成分（古い水）の $\delta^{18}\text{O}$ 、 Q_g は地下水流出量、 δ_r は降水の $\delta^{18}\text{O}$ 、 Q_r は地中にしみ込まずに直接流出した降水成分（新しい水）の量である。

なお、大洞沢の古い水の $\delta^{18}\text{O}$ は、6 月 3 日については、無降雨時河川水 $\delta^{18}\text{O}$ の平均値、7 月 4 日及び

表1 降水の $\delta^{18}\text{O}$ の分析結果

箇所	日付	採取方法	採取場所	採取時間	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)
大洞沢	6/3	漏斗とボトル	入り口車止め	10:00 - 13:00	-15.0
	7/4	漏斗とボトル	県道脇の道標	7/2 14:00 - 7/4 11:00	-5.9
	7/4	漏斗とボトル	石碑の後方	7/2 14:00 - 7/4 11:00	-6.0
	7/4	漏斗とボトル	札掛森の家	7/2 14:00 - 7/4 11:00	-5.9
	8/26-9/1	採取装置	札掛森の家	8/26 12:00 - 9/1 11:30	-7.5
貝沢	6/3	漏斗とボトル	取水堰跡の近傍	10:00-14:00	-14.8
	8/28	ポリ容器	取水堰跡の近傍	11:00 - 13:00	-5.3

8月28日については、当該降雨の開始前の河川水の $\delta^{18}\text{O}$ を採用した。大洞沢の7月4日の降水の $\delta^{18}\text{O}$ は、札掛で採取したものを採用した。貝沢の地下水流出成分の $\delta^{18}\text{O}$ は、無降雨時河川水 $\delta^{18}\text{O}$ の平均値を採用した。

結果と検討

1 降水の $\delta^{18}\text{O}$ とその変動

表1に降水の $\delta^{18}\text{O}$ の分析結果を示す。大洞沢と貝沢の地域による降水の $\delta^{18}\text{O}$ の違いについては、同じ時の降雨では、その差が0.2‰(パーミル;千分率)とわずかであった。また、大洞沢周辺では、約1km離れた札掛森の家でもほとんど差がなかった。また、この大洞沢周辺の3地点のうち、石碑の後方だけ広葉樹の樹冠が被さっており、採取できた降水の量も他の2地点の8割程度であった。しかし、 $\delta^{18}\text{O}$ にはほとんど差がなかったことから、林内と林外ではあまり差が出ない可能性がある。

このような場所ごとの差に比べて、降雨イベントごとの降水の $\delta^{18}\text{O}$ には大きく差があった。降水の $\delta^{18}\text{O}$ が小さかったのは、6月3日の-15.0~-14.8‰、逆に大きかったのは、7月4日、8月26日~9月1日の-7.5~-5.3‰であった。

また、大洞沢における8月26日~9月1日における降水サンプルは、8月28~29日と30日の2度の降雨イベントの降水を含んでいるが、貝沢における8月28日の降水サンプルにはそのうちの一部の期間のものしか含まれていない。両者の降水サンプルの $\delta^{18}\text{O}$ の差が比較的大きかったことは、前述の結果からも、地域による差よりも降雨イベントごとまたは

降雨イベント中における降水の $\delta^{18}\text{O}$ の変動が大きかったことが影響したと考えられる。

降水の $\delta^{18}\text{O}$ は、海水の蒸発や水蒸気塊からの雨滴の形成といった水の相変化に伴い変化するため、降雨イベントごとや1つの降雨イベント中でも大きく変動することが分かっている(大手, 2008)。たとえば、水蒸気塊から雨滴が形成されるときには、重い安定同位体を含む水分子が選択的に凝結するため、気塊に残った水蒸気の $\delta^{18}\text{O}$ は低下し、これが繰り返されるうちに降水の $\delta^{18}\text{O}$ も低下する。また、この作用によって、地域スケールでは、降水の $\delta^{18}\text{O}$ は内陸に行くほど低下し(内陸効果)標高が高いほど低下する(高度効果)(大手, 2008)。

このような降水の $\delta^{18}\text{O}$ の特性から、今回の降雨イベントごとの降水の $\delta^{18}\text{O}$ の違いは、降水が生成されるまでの水の相変化の履歴が反映したものであり、水蒸気塊や雨滴の生成時の気象条件の差によって $\delta^{18}\text{O}$ の値の差も大きかったと考えられる。なお気象庁(2008)によると、6月3日は梅雨前線による雨、7月4日は、気圧の谷が通過したことによる短時間の激しい雨、8月28日は、日本海沿岸の前線に南から湿った空気が流入して大気不安定になったことによる大雨とされている。このことから、7月4日と8月28日は、水蒸気塊や降水の生成が急激であったため降水の $\delta^{18}\text{O}$ が高くなり、6月3日は、ゆっくりであったため低くなったと思われる。

2 無降雨時の河川水の $\delta^{18}\text{O}$ とその変動

無降雨時の河川水の $\delta^{18}\text{O}$ について、大洞沢で3回、貝沢で2回採取した結果では、それぞれ-8.8~-8.7‰、-9.0~-8.8‰であり、各地域での変動は小さかった(表2)。

表2 無降雨時の河川水の $\delta^{18}\text{O}$ の分析結果

箇所	日付	採取方法	採取場所	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)
大洞沢	5/8	手汲み	量水堰の10m上流	-8.7
	7/17	手汲み	量水堰の上流	-8.8
	8/8	手汲み	量水堰の上流	-8.7
貝沢	5/8	手汲み	取水堰跡の上流	-8.8
	7/23	手汲み	取水堰跡の上流	-9.0

降水が地中に浸透して地下水として流出する過程では、もともと地中にあった水が降水と混じり $\delta^{18}\text{O}$ が徐々に平準化し、河川の基底流出では $\delta^{18}\text{O}$ が安定することが分かっている(大手, 2008)。

神奈川県内における無降雨時の河川水の $\delta^{18}\text{O}$ の測定事例では、大洞沢における -8.3‰(中嶋ら, 2001)、酒匂川水系における -9.4 ~ -8.0‰(板寺, 1999) などがある。板寺(1999)には、酒匂川水系では、基底流出時の河川水に降水の高度効果が最大 100m に付き -0.2‰の割合で反映されていることが報告されている。

これらの事例を踏まえると、今回の大洞沢と貝沢の $\delta^{18}\text{O}$ では、比較的一定した値であったが、これらの試料がどの程度の時間・空間スケールを代表しているかまでは明らかでない。これについては、降水の供給量と $\delta^{18}\text{O}$ の変動、標高差による高度効果などの影響を加味するために、地域内での立体分布や季節変動と年変動などを把握することでより解釈が深まると考えられる。

3 降雨時の河川水の $\delta^{18}\text{O}$ とその変動

降雨時の河川水の $\delta^{18}\text{O}$ は、無降雨時の $\delta^{18}\text{O}$ の値と比較して、降雨に伴い降水の $\delta^{18}\text{O}$ の値の方に変動する傾向があった(表3)。変動の範囲は、全体として -11‰ ~ -8‰の範囲内であった。

降雨時の河川水の $\delta^{18}\text{O}$ は、多くの場合、無降雨時河川水の $\delta^{18}\text{O}$ と供給された降水の $\delta^{18}\text{O}$ の間の値をとる。前述の新しい水と古い水の $\delta^{18}\text{O}$ の関係式(2)もそれが前提となっている。しかし、7月4日の降雨前河川水の -9.1‰と降水の -5.9‰に対して、河川水の $\delta^{18}\text{O}$ では、降雨直後に -9.4‰まで低下していた。これは、7月4日より前に降った $\delta^{18}\text{O}$ の低い降水の成分が、流域内の土壌水などに存在しており、それが新しい降雨によって押し出されたと考えられ

表3 降雨時の河川水の $\delta^{18}\text{O}$ の分析結果

箇所	日付	採取方法	採取場所	採取時間	累計降水量(mm)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)
大洞沢	6/3	手汲み	量水堰の10m上流	10:00	57.5	-10.6
				10:30	60.0	-10.6
				11:00	62.5	-10.5
				11:30	64.5	-10.5
				12:00	67.0	-10.5
				12:30	70.0	-10.4
				13:00	73.0	-10.4
				22:00	0.0	-9.1
				0:00	0.5	-8.9
				2:00	7.0	-8.8
	7/3	採水器	量水堰	4:00	25.5	-8.6
				6:00	66.5	-9.0
				8:00	66.5	-9.4
				12:00	66.5	-9.3
				20:00	0.0	-9.1
貝沢	8/28	採水器	量水堰	18:00	4.0	-8.8
				20:00	29.5	-8.6
				22:00	54.5	-8.1
	6/3	手汲み	取水堰跡の上流	10:30	-	-9.8
				11:00	26.5	-9.9
				11:30	-	-9.8
				12:00	30.0	-10.0
				12:30	-	-10.0
				13:00	35.0	-10.0
	8/28	手汲み	取水堰跡の上流	11:30	-	-8.9
				12:00	13.0	-8.7
				12:30	-	-8.5
				13:00	17.0	-8.4

る。このように、単純に新しい水と古い水の2成分の混合比を算出するには適さない事例もみられた。

降雨イベントの規模と変動量の関係については、中嶋ら(2001)の報告では、降水量 5.0mm の時の河川水の $\delta^{18}\text{O}$ では、無降雨時河川水の $\delta^{18}\text{O}$ とわずかな差しかなく、降水量 68.8mm(累計 110mm)では、最大 1.2‰の変動となっている。今回の結果において、大洞沢よりも貝沢において、降雨時の河川水 $\delta^{18}\text{O}$ の変動量が少なかったことは、試料採取時の降水量が少なかったことも影響している可能性がある。

4 降水量、河川流出量と河川水 $\delta^{18}\text{O}$ の変動

大洞沢において河川水を採取した6月3日、7月4日、8月28日の降水量と河川流出量の推移を図2~4に示した。各降雨イベントの総降水量は、80.5mm、66.5mm、113.0mmであったが、河川水の採取を終了した時点での累計降水量は、73.0mm、66.5mm、54.5mmであり、降雨の規模に大きな差はなかった。

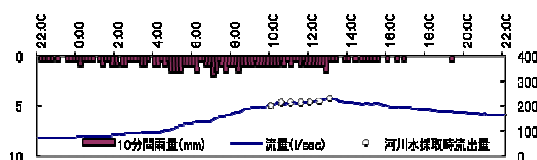


図2 6月3日前後の降水量と河川流出量の推移

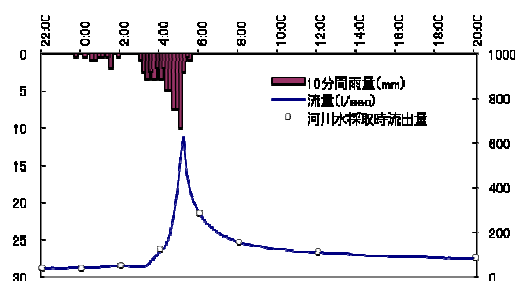


図3 7月4日前後の降水量と河川流出量の推移

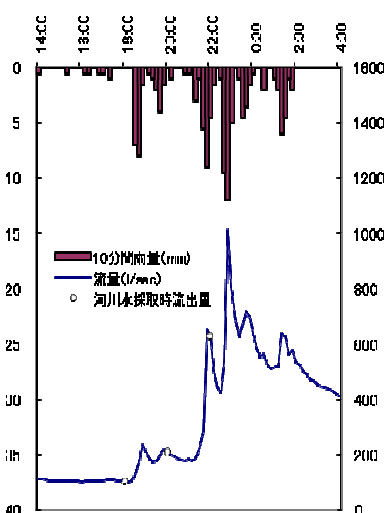


図4 8月28日前後の降水量と河川流出量の推移

しかし、降雨強度に差があり、弱い降雨強度で長時間連続した6月3日の降雨では、河川流出量が緩やかに変化した。河川水を採取した3時間は、河川流出量のピークにあたり、河川流出量と河川水の $\delta^{18}\text{O}$ の変動はともに小さかった。逆に、強い降雨強度で短時間で終息した7月4日の降雨では、河川流出量も急激に増減し、河川水の $\delta^{18}\text{O}$ も降雨中及び降雨後にかけて-8.6~-9.4‰まで大きく変動した。ただし、急激な流出量の変動に対して、河川水の採取間隔が2時間であったため、流出量のピークにおける河川水が採取できなかった。8月28日の降雨では、降雨強度の強弱の変化が連続し、それに伴い河川流

出量も増減を繰り返した。降雨前から最初の流出量のピークにかけて河川水の $\delta^{18}\text{O}$ が-8.8‰から-8.1‰へと比較的大きく変動した。

5 河川流出成分の分離結果

降水と河川水の $\delta^{18}\text{O}$ から、各降雨時の河川水における新しい水の混合割合を算出した。6月3日の降雨では、大洞沢の河川水で26~29%、貝沢の河川水で15~19%、8月28日の降雨では、大洞沢の河川水で11~52%、貝沢の河川水で1~14%が新しい水成分であった。どちらも大洞沢のほうが貝沢より新しい水の割合が多くなったが、林床の植生被覆状態だけでなく降水量や降雨強度の差も影響していると考えられる。今後は、貝沢においても規模の大きな降雨イベントを対象に測定する必要がある。

また、新しい水の混合割合の算出に採用する古い水と降水(新しい水)の $\delta^{18}\text{O}$ の値によっても新しい水の混合割合の算出結果が左右されることから、特に $\delta^{18}\text{O}$ の変動が大きい降水については、短い時間間隔でサンプリングする必要があり、最低でも一度の降雨イベントごとにサンプリングする必要があると考えられた。

まとめ

$\delta^{18}\text{O}$ をトレーサーとした短期流出特性把握のためのサンプリング方法を検討するため、東丹沢大洞沢と相模湖町貝沢を対象に、いくつかのサンプリング方法により降水と河川水を採取し $\delta^{18}\text{O}$ を分析した。その結果、降水の $\delta^{18}\text{O}$ では、地域差よりも降雨イベントごとの差が大きかったため、降雨イベントごとに短い時間間隔でサンプリングするか、最低でも一度の降雨イベントごとにサンプリングする必要がある。また、降雨時の河川流出量の変動が急激な時は、サンプリングの時点により河川水の $\delta^{18}\text{O}$ の値が左右されるが、河川流出量の変動が緩やかであるとサンプリングの時点に数時間程度の差があっても河川水の $\delta^{18}\text{O}$ の値に大きく差がないことがわかった。また、7月4日のように、それ以前の降雨の影響から新しい水と古い水の2成分の混合比率を求めるのに適さない場合もあった。

地表流が流域の降雨流出に及ぼす影響を把握する

ためのトレーサーとして、カリウムやシリカ、塩素などを用いた研究事例もあることから(恩田,2008) 今後は、これらも含めてより効率的な手法を検討していく必要もあるだろう。

引用文献

板寺一洋(1999) 酸素同位体比を指標とした地下水
涵養源推定の試み・酒匂川右岸地域の自噴地下
水を例として・神奈川県温泉地学研究所報告 31,
(1): 53-56.
大手信人(2008) 水の同位体比を利用した水循環の
評価・33-55・流域環境評価と安定同位体・永田

俊・宮島利宏編, 476pp, 京都大学学術出版会,
京都市・

恩田裕一(2008) 人工林荒廃と水・土砂流出の実態・
245pp, 岩波書店, 東京・

気象庁(2008) 日々の天気図・気象庁・Online Available
from internet:

[http://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/hibiten/index](http://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/hibiten/index.html)
.html(downloaded on 2009-1-30)

中嶋伸行・板寺一洋・藤森博英(2001) $\delta^{18}\text{O}$ をトレ
ーサーとした規模の異なる降雨における河川流
出成分の分離結果の比較, 神自環保セ研報 28:
1-6.