

|           |                                                                                                                                                              |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 氏 名       | さい とう たか し<br>齋 藤 隆 志                                                                                                                                        |
| 学位(専攻分野)  | 博 士 (理 学)                                                                                                                                                    |
| 学 位 記 番 号 | 論 理 博 第 1395 号                                                                                                                                               |
| 学位授与の日付   | 平 成 13 年 7 月 23 日                                                                                                                                            |
| 学位授与の要件   | 学 位 規 則 第 4 条 第 2 項 該 当                                                                                                                                      |
| 学位論文題目    | Anaiysis of runoff characteristics in forested mountain basins by the use of<br>hydrogen and oxygen stable isotopes<br>(水素および酸素の安定同位体を利用した森林山地流域における流出特性の研究) |
| 論文調査委員    | (主 査)<br>教 授 奥 西 一 夫    教 授 木 田 秀 次    教 授 諏 訪    浩                                                                                                          |

### 論 文 内 容 の 要 旨

申請者は滋賀県の琵琶湖北西に位置する石田川源頭部の小流域で、降水および流出水の2つの安定同位体 ( $^{18}\text{O}$  および  $\text{D}$ ) を独立した環境トレーサーとして用い、過去の降水がどのように混合されて流出水を形成しているかを解明した。無降雨期および降雨開始時の流出水の同位体組成は年間降水の加重平均組成に極めて近く、その不変性から、地下水が流出するものと判断される。降雨イベント中には、当然予想されるように、event water (イベント中の降水) が流出する事が確かめられたが、流出水の同位体組成は地下水とイベント水の混合としては説明できず、第三の水塊の寄与が明らかである。これは従来の2成分モデルでは無視されているが、申請者はこの水塊が降雨イベントの前2、3ヶ月程度の期間に流域に与えられた降水 (pre-event water) であり、ひとつの流出成分と見なせることを見出した。この流出成分はイベント前の基底流出卓越時にはほとんど流出しないが、イベント中に再び出現することから、不飽和土壌水として貯留されていたものが、河道に出現するものと考えた。観測事例の中で、この水塊が均一な同位体組成を持つと考えられる場合が1例あった。この事例では、3つの流出成分を構成する水塊は  $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$  ダイアグラム上で三角形を構成し、降雨イベント中の流出水の安定同位体組成はその三角形の内部にプロットされるので、簡単な代数計算により、流出ハイドログラフをこれら3つの流出成分に一意的に分離することが出来た。その他の場合も、土壌水の平均同位体組成を複数の pre-event water の混合と仮定することにより、近似的な3成分分離が可能である。

この小流域における水文地形学的な現地観測の結果、森林土壌の形成と表土層の大きな浸透能が、この流域の直接流出および中間流出に大きな影響を与えており、湿润温暖地域の森林流域の典型と見なせることがわかっている。流出ハイドログラフは通常、降雨に対する応答時間特性によって定義される直接流出、中間流出、および基底流出に分離され、その代表的な分離方法のひとつであるタンクモデルによる分離が土の流域でおこなわれている。そこで、本研究で安定同位体組成による流出成分に分離した結果を、タンクモデルによる分離結果と比較した。これによって、同位体組成でラベルされた各流出成分の流動特性と流動経路が推定され、また降雨に対する応答特性が明らかになった。すなわち、event water は河道近くでは表土層に浸透し、短時間で河川に流出して直接流出となる。それ以外の斜面部位に降った event water はゆっくり流出して中間流出を構成するか不飽和土壌水として流域内に留まる。最近の斜面地中流に関する野外観測から、降雨開始時に圧力伝播により不飽和土壌水の底層が急速に飽和して河川に向かって流動し、降雨に対する早い応答が起こることが知られている。この知見にもとづくと、降雨前から土壌水を構成していた pre-event water は雨水浸透によって飽和し、河道に向かって流動するものと考えられる。これは基本的には中間流出となるが、河道近くの土壌水は降雨に対して速い応答を示す。これは、従来はピストン流として、定性的かつ断片的に知られていたものに対応する。河川に流出する地下水は1年間の雨水を重み平均したような同位体組成を示し、流量に定常性があり、基底流出を構成するが、降雨開始時に、土壌水の流出と同様、ピストン流的な一時的増加を示す。また、地下水流出の同位体組成の安定性は、地下水形成過程において、長期間にわたる雨水が均一に混合されることを意味するが、移流分散方程式を用いて検討した結果、このような均一混合が起こる条件が、流域の流出特性に関わるパラメーターで表現されることを明らかにした。

## 論文審査の結果の要旨

降雨流出ハイドログラフは、その応答時間特性に基づいて直接流出、中間流出、および基底流出に分離され、それぞれについて、流れの物理特性と流出経路の地学的特性に基づいた検討が理論的、実験的に行なわれてきた。しかし、その流れは分散流であって、応答時間は一定値ではなく、ある範囲に分布するものであるため、理論的な曖昧さが常につきまっていた。このような問題を解決するため、溶存物質や同位体による化学的環境トレーサーを用いたハイドログラフ分離が行なわれ、注目されている。従来の研究によって、「古い水」の流出が降雨に速く応答する事例が明らかになり、ピストン流と現象論的に名付けられ、応答時間特性に基づく解析からは得られない知見として注目されているが、そのメカニズムに迫る研究はまだ不十分である。また多くの研究事例では流出水を「新しい水」と「古い水」の2成分に分離できるに過ぎず、良好な森林を有する山地斜面で卓越する中間流出の存在を無視せざるを得ないので、その知見には大きな制限があった。

申請者は、降水および河川水に含まれる重水素(D)と重酸素( $^{18}\text{O}$ )を独立した2つの環境トレーサーとして取り扱うことにより、河川流出を3つの成分に分離できることに注目し、試験流域で約1ヶ月ごとに降水と河川水を採取し、さらに降雨イベント時には1時間ごとの自動採水をおこなって同位体分析をおこなった。その結果、降雨イベント時の河川流出水は1年程度にわたる降水の加重平均、イベント降水、およびイベントに先行する2、3ヶ月程度の期間に流域に与えられた降水の、3つの独立した水塊の混合であり、これらの水塊を基本的な流出成分として取り扱えることを明らかにした。また、これらの水塊の経過時間特性に基づき、長期の平均降水と同じ同位体組成をもつ流出水塊は地下水によって、先行降水と同じ同位体組成を持つ流出水塊は土壤水によって、それぞれ涵養されているものと推定した。

先行降水の同位体組成が $\delta\text{D}$ - $\delta^{18}\text{O}$  ダイアグラム上でひとつの点で表され、土壤水の同位体組成が一樣であると考えられる1事例については、流出ハイドログラフをこれら3つの流出成分に一意的に分離することができた。またこれと平行して、応答時間特性に基づくタンクモデル法を用いた流出解析をおこない、それぞれの水塊が流出する経路と、その経路に沿う流れを検討した。その結果、従来ピストン流として現象論的に、かつ断片的に知られていた現象が広範に起こっていることが明らかになった。これは event water の浸透によって土壤帯の底部が急速に不飽和状態から飽和状態になり、流動速度が大きくなって河道に流出するという最近の知見によって説明される。さらに申請者は、ひとつの降雨流出イベントを降雨強度と土壤水分量の変化に応じて6つの時間帯に区分し、各時間帯における各流出成分の変化特性から、斜面上の不飽和土壤帯、河道近くの土壤帯底部、および飽和地下水帯の流れを、上述のいわゆるピストン流の発生場に重点をおいて解釈している。その結果、従来の流出解析で用いられてきた、浅い循環経路の流出ほど応答時間が短いという暗黙の仮定が必ずしも正しくないことを指摘した。

以上のように、申請者は安定同位体を用いてその意味の明確な流出分離をおこない、対象流域内外での観測・調査の成果をふまえて、従来の流出分離と各流出成分の流れの特徴に関する知見には大きな修正が必要であることを示し、従来仮想的な説明しかされていない「ピストン流」に明確な説明を与えた。以上の理由により、本申請論文は博士(理学)の学位論文として十分な価値のあるものと認められる。また、公聴会において申請論文および参考論文について質疑をおこない、十分な学識を有することを確認した。