

論文内容の要旨

森林科学 専攻

平成 22 年度博士課程 進学

氏 名 江草 智弘

指導教員名 大手 信人

論文題目 Study on relationship between spatial variability in streamwater characteristics and catchment scale in forested headwaters (森林流域における渓流水の流量・水質の空間分布と集水面積との関係に関する研究)

本論文は流域水文学におけるスケール問題に焦点を当て、河川水の流量・水質の空間分布と集水面積との関係性を明らかにしようとするものである。

第一章では、本論文の動機と現在の課題をまとめた。小流域の観測が明らかにした詳細な水文過程を大流域に拡張することは、流域水文学の大きな課題である。この課題を解決するために、多くの研究が集水面積と水文過程の関係性を調査してきた。しかしながら、集水面積増加に伴う、河川流量・水質の混合収束過程（以下収束過程）は未だ明らかとなっていない。本論文では、収束過程における一般則を明らかとし、流域間の差異を産み出す要因を明らかとすることを目的とした。

第二章では、河川水の流量・水質の多点観測結果を示し、集水面積増加に伴う基岩地下水湧出量を推定した。観測は、新第三紀堆積岩流域である千葉県猪川流域（以下猪川）、新第三紀火山岩・深成岩流域である神奈川県世附川流域（以下世附川）、古生層堆積岩・新第三紀火山岩流域である群馬県草木流域（以下草木）の三流域で平水時を選んで行った。猪川全域、世附川流域の火山岩、草木流域の堆積岩について、河川水の流量・水質から、土壌水・基岩地下水の二成分（猪川のみ土壌水と三種類の基岩地下水の合計四成分）に成分分離した。まず、河川水の流量・水質と集水面積との関係については、全ての流域、全ての観測項目において 0.1km^2 未満の小流域で最も大きなばらつきを示し、面積増加とともにばらつきが小さくなっていく傾向が把握された。世附川と草木では単一の地質の観測点

であれば、0.5~1.0 km²程度で比流量・溶存物質濃度は収束したと見なすことができた。猪川では観測項目ごとに異なる傾向を示し、Ca²⁺、Mg²⁺、NO₃⁻、SO₄²⁻については1.0 km²以上で一定の値に収束していたが、比流量、EC、Na⁺、Cl⁻、K⁺については数 km²を超えても濃度上昇が起こっていた。基岩地下水量・割合の集水面積増加に伴う傾向についても、流域間で差が存在していることが把握された。世附川では明瞭な増加は確認されず、草木では0.3 km²程度まで上昇していた。猪川では基岩地下水成分の合計は数 km²を超えても上昇し続けていた。そして、面積増加に伴い、より深部を通過したと考えられる基岩地下水成分が増加していた。小面積の地点においては基岩地下水量・割合に大きなばらつきが存在している。従って、基岩に浸透した地下水が少量である、もしくは浸透した地下水の湧出が制限される流域では、小面積の地点におけるばらつきに隠れて面積増加に伴う基岩地下水量・割合の増加は確認されないことが明らかとなった。この流域間の違いは、基岩の透水係数、不均質性によって形成されると考えられた。従って、本章では基岩地下水と集水面積の関係が基岩地質によって異なることを明らかとし、河川水の流量・水質空間分布の理解において基岩地質が重要な役割を果たすことを示した。

第三章では、源位置添加実験の手法を用いて、河川中における栄養塩（硝酸・リン酸）吸収量について調査した。この手法は河川中に硝酸・リン酸を添加し、河川中での減少量を調べることで、河川中における硝酸・リン酸吸収量を定量的に評価するものである。実験は猪川と和歌山県有田川流域にそれぞれ二リーチずつを設定して行った。そして吸収量と環境要因（水温、流量、拡散係数、As/A、栄養塩濃度）との関連を調べた。このうち、河川の物理性を表現する指標（拡散係数、As/A）については **One-dimensional transport with inflow and storage model (OTIS モデル)**を用いて算出した。また、室内実験によって、光条件の変化による藻類の一次生産量・硝酸吸収量の変化についても調べた。本研究で行った添加実験では、硝酸吸収が確認されたのは全てのリーチを合計して20回中3回に留まり、ほとんどの場合に吸収が起こらないことが明らかとなった。硝酸吸収が起こったときの吸収量は0.39~1.33 mm/minであり、既存の研究で確認された範囲内におさまることが把握された。リン酸の吸収は河川によって異なり、有田川では常に吸収が起こっていたが、猪川では観測回によって異なった。吸収量は有田川の二リーチで1.15~6.46 mm/minであり、猪川では0.77~1.69 mm/minである。硝酸吸収量はいずれの環境要因との関係も見られなかったが、リン酸吸収量は流量、拡散係数、As/Aとの間に正の相関があり、濃度との間に負の相関が見られた。また、室内実験においては、わずかな光の増加によって、藻類による1次生産量、硝酸吸収量が急激に増加することがわかった。河川中での硝酸吸収は生物的要因によるもので、リン酸は生物的要因と物理的な吸着の両方が影響している。従って、本研究の対象地では、硝酸・リン酸の生物学的な吸収がほとんど起こっておらず、リン酸吸収の大半は物理的な吸着によることが示唆された。生物学的な吸収を制約する要因として、劣悪な光環境や攪乱の多さにより、藻類・微生物による硝酸・リン酸要求量が河川水中の濃度に対して著しく低いのではないかと推測された。また、リン酸の物理的

吸着量の決定には、淵構造など河川中でのたまりの多さに加えて、河川水の混合度合い、すなわち河床と接触する程度の影響が示唆された。これらの結果は、急峻な山地河川において、光環境が良い展葉前の季節など、河川中の藻類生産にとって好条件が揃う場合を除き、生物吸収が栄養塩濃度の空間分布に及ぼす影響が小さいことを明らかにするものである。

第四章では、河川水の流量・水質の面積増加に伴う混合収束について、統計的な手法を用い、観測項目間、流域間の共通項と差異の抽出を試みた。用いた統計的な手法は二種類である。一つは移動変動係数 (Asano et al., 2009) から指標化したもので、移動変動係数の最大値(CV_{max})と平均面積が 0.3km^2 の際の移動変動係数値($CV_{0.3}$)を比較するものである。もう一つは、単純混合の理論線 (Woods et al., 1995) である。この理論線は小流域の流量・水質がランダムに分布しており、河川水の混合のみが起こったとした時の、理論的なばらつきの減少を示す。解析結果から、溶存物質間の差は小さいが、比流量と溶存物質の傾向は大きく異なることが把握された。比流量は単純混合の理論線よりも明らかに急な収束を示し、溶存物質は流域によっても異なるが、理論線より緩やかな収束を示した。その傾向は特に二次河川以下の小流域において顕著であった。流域間を比較すると、世附川・猪川の溶存物質は概ね理論線よりも緩やかであったが、草木の溶存物質は理論線に沿った減少を示していた。これらの傾向は流域間の基岩地下水湧出傾向の違いのみでは説明されず、草木の一部の小流域で極端に溶存物質濃度が高く、小流域におけるばらつきが過大評価されているためではないかと推測された。濃度の高い小流域は火山岩流域と隣接しており、火山岩流域からの地下水流入の影響を受けている可能性が高い。本章では、単一の地質を対象とする場合には、溶存物質濃度のばらつきの緩やかな減少、比流量のばらつきの急な減少は、流域によらず共通であり、収束過程における一般的な傾向を示すことが明らかとなった。

第五章では、河川水の流量・水質の収束過程について、概念モデルによる計算値と観測値を比較することで、一般的な知見を得ることを目的とした。モデルコンセプトは以下の三点である。(1)小流域におけるばらつきは土壌水・基岩地下水の二成分混合で説明される(2)混合においては0次谷と側壁の比流量の差を考慮する(3)流域によっては深部を通過した地下水量が面積増加とともに増加する。まず、数値標高地図より算出した0次谷、側壁の割合を集水面積との関係で見ると、0次谷の割合は面積増加とともに減少し、側壁の割合は増加することが把握された。これらの割合の変化は流域によって異なるが、概ね 0.2km^2 程度で一定となることがわかった。次に、小流域におけるばらつきの特性 (ばらつきの分布形、比流量・溶存物質濃度関係、ばらつきの大きさ) は土壌水・基岩地下水の二成分混合で十分に説明されることが明らかとなった。同時に、土壌水・基岩地下水の二成分は独立した分布を持つことが示された。最後に、面積増加に伴う混合収束については、0次谷と側壁の比流量が同じではなく、側壁の比流量が小さいとした方が、比流量・溶存物質濃度の平均値・ばらつきの大きさの面積増加に伴う変化をよく表現できることが明らかとな

った。側壁の寄与率は猪川・草木で0次谷の30%程度、世附川で70~100%と異なり、流域間の差が影響していることが示された。これらのモデル計算結果は河川水の混合収束についての一般的な知見を提示するとともに、流域間の差異が生まれる要因を明らかにするものである。本章で提示した概念モデルはあらゆる流域に適用可能であり、河川水の流量・水質空間分布を考える上で有用な手段となり得る。

以上の章を要約して第六章とした。