

## 山地森林流域における地下水流動量は流域面積に依存する

静岡大学大学院農学領域の江草智弘 助教は、国立研究開発法人森林研究・整備機構森林総合研究所との共同研究で、日本全国の森林水文試験地のデータを基に、流域界を越えて移動する地下水の量(地下水流動量; 注 1)と流域面積の関係を明らかにしました。

### 【研究のポイント】

- ・日本全国の 152 の山地森林流域の水収支データ(注 2)を用いて、地下水流動量に流域特性が与える影響を調べました。
- ・地下水流動量は流域面積に強い影響を受けており(注 3)、1 ha 以下の小流域では地下水は主に基岩を通して地下深くに浸透し、10 ha 以上になると基岩に浸透した地下水の多くは河川に流出することを明らかにしました。
- ・本研究で明らかになった山地森林流域における地下水流動特性は、河川流量の予測精度向上につながることを期待されます。

### 【背景】

森林は我が国の国土の 2/3 を占めており、山地域に広く分布しています。山地森林流域からの河川流出は、飲料水・生活用水・農業用水・工業用水として使用され、我々の生活を支えるものです。従って、山地森林域の河川流出量の形成メカニズムを理解し、予測を行うことは重要です。これまでに、山地森林流域においては、地下深部を流れて流域に出入りする流域間の地下水流動が河川水の流出形成に大きな影響を与えることが知られています。地表面を流れる水は地形に従って標高が低い方へ移動します。他方、地下に存在する地下水は、水を通しにくい岩石の層(基岩)よりも浅いところに存在するだけではなく、基岩の亀裂を通じてより深部に移動することが知られています。さらに、地下水は地層の傾きの影響を受けるため、必ずしも地表面の地形に沿って動きません。そのため地下水の動きは複雑で予測が難しいことに加え、地下水流動を直接計測できないためデータが不足しており、どのような流域特性、例えば流域の地形、地質、植生が流域間の地下水流動量を規定しているかは明らかになっていませんでした。

そこで、本研究では、日本の多くの山地森林流域において地下水流動量を推定し、流域特

性が地下水流動量に及ぼす影響を明らかにすることを目的としました。日本ではこれまで様々な組織によって全国で森林流域試験が実施され、精度の高い降水量・河川流出量・気象データが蓄積されています。私たちの研究チームはこうした日本全国の山地森林流域の水収支データを収集し、それらの地下水流動量を推定しました。そして、地形・地質・植生等の流域特性が地下水流動量に及ぼす影響の評価を行いました。

## 【内容】

本研究では、日本全国 152 地点の森林水文試験地における水収支データを用いて地下水流動量を算出しました (図 1)。水収支データ、すなわち、年降水量と流出量、蒸発散量、地下水流動量の間には図 2 に示す関係があります。まず、年間の蒸発散量を気象データより推定しました。次に、年降水量から流出量と蒸発散量を差し引くことで、年間の地下水流動量を推定しました。そして機械学習を適用し、流域の地形、気候、地質、植生や面積といった特性と地下水流動量の関係を調べました。

結果として、流域面積が最も重要な要素であり、地形的特性が気候や地質よりも地下水流動に大きな影響を与えることが明らかになりました (図 3)。具体的には、1 ha 以下の小流域では、多くの流域で流域外への地下水流出が見られ、基岩深部への地下水の浸透による流域外への水の損失が卓越していることが示されました。一方で、流域面積が増加するにつれて地下水流動量は減少し、10 ha 以上の流域では地下水流動量が 0 に近づき、流域の水収支において地下水流動の影響が小さくなる傾向が確認されました (図 4)。この結果は、小流域では地下深部への地下水の浸透により流域から水が失われるため河川流量が少なくなるのに対して、流域面積が 10 ha 以上の流域では上流で基岩に浸透した地下水の多くは地表に湧出し、河川に流出することを示しています。また、地質や植生、気候条件が異なっても、この流域面積と地下水流動量の関係に大きな違いが無いことが明らかになりました。

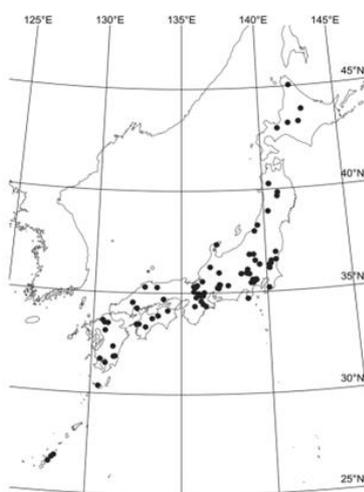


図 1. 日本の 152 の森林水文観測地

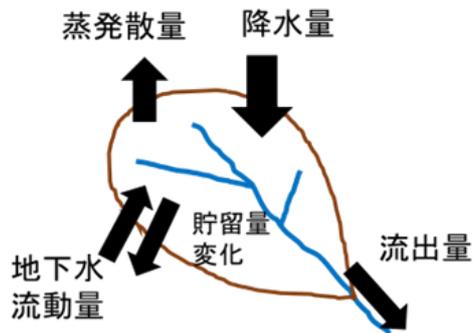


図2. 森林流域における水収支。降水量は蒸発散量、流出量、貯留量変化、地下水流動量に配分される。1年以上の期間では貯留量変化は無視できると考えられるため、地下水流動量は降水量から蒸発散量と流出量を差し引くことにより推定される。

$$\text{地下水流動量} = \text{降水量} - \text{流出量} - \text{蒸発散量}$$

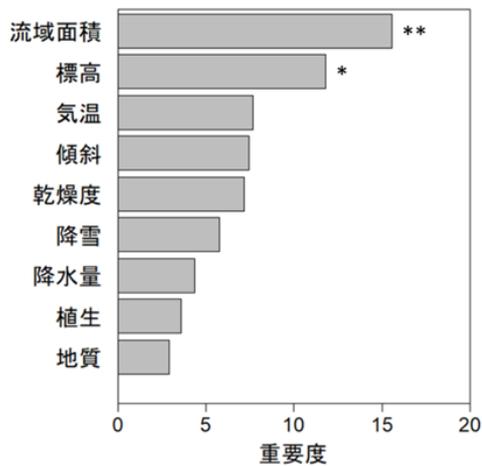


図3. 機械学習 (ランダムフォレスト) を用いて算出された、流域間の地下水流動に関する要因の重要度推定値。\*および\*\*はそれぞれ有意水準 0.05, 0.01 で有意であることを示している。

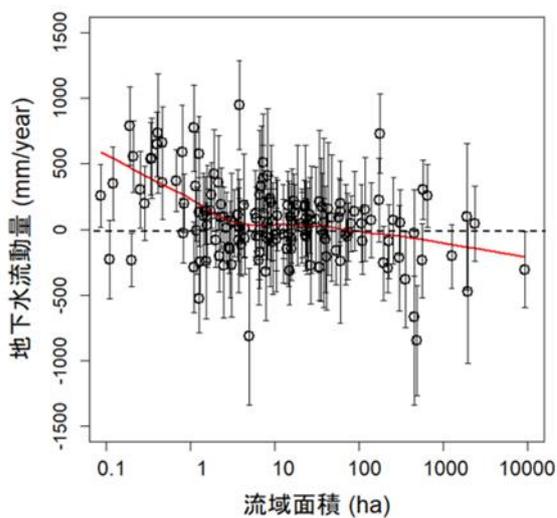


図4. 流域面積と地下水流動量の関係。各流域での地下水流動量とその誤差範囲を示している。地下水流動量が正の値の時は地下を通じて地下水が流域外に流出していることを示し、負の値の時は流域外から地下水が流入していることを示している。赤線は平準化された曲線を示している。

## 【今後の展開】

本研究では、日本全国の森林水文試験地のデータを使って、地下水の流れと流域面積の関係を明らかにしました。これにより、森林流域での水の流れをより詳しく予測し、洪水や干ばつのリスクを評価する際の不確かさを減らすことができます。特に、10 ha以上の流域規模では流域間の地下水の移動が少なくなるという新しい発見は、これまで実態把握が困難であった地下水の動きを理解する手助けになり、河川流出量をより正確に予測するために役立ちます。また、流域の流出特性を理解するための観測や解析に適切な流域面積を決定する上で貴重な情報となると期待されます。

## 【用語解説】

### 注1 流域・流域界・流域面積・流域界を越える地下水流動

流域は、対象とする河川に水を集めてくる範囲を指します。水を集めてくるというのは、水が地形に沿って標高が高い場所から標高が低い場所に流れ、最終的に対象とする河川に流れ込むことを意味します。そして、流域と流域の境目が流域界と呼ばれます。流域界は主に尾根だと考えて差し支えありません。つまり、流域と流域界は地表面の地形で決まるものです。一方で、地下水の流れは、地層の傾きや岩盤の亀裂等に依存することが予想され、必ずしも地表面の地形と一致しません。その結果として、地下水が流域界を越えて隣の流域に出入りする、地下深くに浸透するといったことが起こります。残念なことに、地表面を流れる河川とは異なり、地下水の流れを「見る」ことは困難です。井戸を多点に掘削することで、地下水面の高さを把握し、水の流れる方向と量を推定する研究もありますが、不確か性が大きい上に、多大な労力とコストを要します。

### 注2 水収支

とある期間に、とある空間に出入りする水量の収支を水収支と呼びます。対象とする期間と空間は任意のものを選択できますが、本研究では1年の、流域の水収支を考えます。流域水収支において考える項目は、雨や雪によって流域にもたらされる水（降水）、河川を流れて流域外に流出する水（河川流出）、蒸発や樹木による蒸散によって大気に放出される水（蒸発散）、流域内に貯留されている水（流域貯留）、流域界を越えて流域外に流出または流域内に流入する地下水（地下水流動）です。これらの水の収支が合うため、降水量 = 河川流出量 + 蒸発散量 + 流域貯留量の時間的変化 + 地下水流動量という関係が成り立ちます。本研究では1年という比較的長い期間を考えているので、これらの項目のうち、流域貯留量の時間的変化は他の項目に比べて十分に小さく、無視できることが想定できます。従って、降水量・河川流出量・蒸発散量が求められれば、残った地下水流動量を算出することができます。

### 注3 地下水流動量の単位

水文学においては、水量の単位を mm という水の高さで表すことが一般的であり、上述の水収支も全て mm の単位を用いて計算されます。mm で表すことにより、流域面積の影響を除いて、大きいサイズの流域と小さいサイズの流域を比較することができます。もし、水の体積で考えたい場合は、水の高さに流域面積をかけることにより、体積に換算します。地下水流動量の単位 mm/year は 1 年に何 mm の水が移動したかを表しています。図において正の地下水流動量は流域外への流出を示しており、負の地下水流動量は流域外からの流入を示しています。

### 【論文情報】

掲載誌名: Water Resources Research 誌

論文タイトル: Scale dependent inter-catchment groundwater flow in forested catchments: analysis of multi-catchment water balance observations in Japan

著者: 小田智基<sup>1</sup>、岩崎健太<sup>1</sup>、江草智弘<sup>2</sup>、久保田多余子<sup>1</sup>、岩上翔<sup>1</sup>、飯田真一<sup>1</sup>、靱山寛樹<sup>1</sup>、清水貴範<sup>1</sup>

1 森林総合研究所

2 静岡大学

DOI: 10.1029/2024WR037161

### 【問い合わせ先】

#### 【研究に関するお問い合わせ】

森林総合研究所 森林防災研究領域 水保全研究室

主任研究員 小田智基

Tel : 029-829-8234 E-mail : tomokioda@ffpri.affrc.go.jp

静岡大学農学部

助教 江草 智弘

Tel : 054-238-4847 E-mail : egusa.tomohiro@shizuoka.ac.jp

#### 【報道に関するお問い合わせ】

静岡大学 総務部 広報・基金課 広報係

Tel : 054-238-5179

E-mail : koho\_all@adb.shizuoka.ac.jp