

気候変動への適応に向けた森林の水循環機能の高度発揮のための観測網・予測手法の構築

農林水産省 林野庁 国立研究開発法人 森林研究・整備機構 森林総合研究所		
森林防災研究領域	水保全研究室	清水貴範・飯田真一・岩上 翔・ 小田智基・靄山寛樹
研究ディレクター	(国土保全・水資源研究担当)	玉井幸治
森林防災研究領域	チーム長(水流出管理担当)	久保田多余子
同	気象研究室	小南裕志
森林立地研究領域	土壌特性研究室	小林政広・伊藤優子
同	土壌資源研究室	山下尚之
震災復興・放射性物質研究拠点	拠点長	篠宮佳樹
北海道支所	寒地環境保全研究グループ	澤野真治
同	植物土壌系研究グループ	今村直広
同	チーム長(北方林生態環境担当)	橋本 徹
東北支所	地域研究監	阿部俊夫
同	森林環境研究グループ	野口亨太郎・延廣竜彦
関西支所	森林環境研究グループ	岡本 透・高梨 聡
同	チーム長(森林水循環担当)	細田育広
四国支所	森林生態系変動研究グループ	稲垣善之
九州支所	山地防災研究グループ	黒川 潮・北村兼三・壁谷直記
同	チーム長(土壌資源管理担当)	稲垣昌宏

平成31年度－令和4年度合計予算額 77,774千円

(うち、令和4年度当初予算額 19,813千円)

【要旨】 本研究では、北海道から九州まで様々な植生や施業履歴を有する森林流域を対象に、水収支(降水量・水流出量)と水質(降水・渓流水のpH、電気伝導度、各種溶存イオン濃度)および気象環境要素(全天日射量・気温・湿度)の変動を調査・監視する観測網を設定し、既存の観測データとともにデータ整理を行い、経年変化や地域間の差異を検討するためのデータベースを構築した。降水量と気象観測要素については、山地森林での直接測定値とアメダスなどに基づく外部機関による推定値との誤差比較を行い、特に降水量と日射量については山地での直接観測が重要であることを把握した。また、長期観測地点を中心に、観測地点・機器の概要と森林施業の履歴と影響について情報収集と整理を行い、公開情報として学術誌に公表した。

水収支および水循環諸量に関しては、豪雨・渇水などの極端現象や長期的な環境変化が、水流出量・蒸発散量に及ぼす影響について詳細な解析を行った。長期間の観測を継続している釜淵森林理水試験地(山形県真室川町)では、約80年間をカバーするデータを用いた分析

と解析の結果、伐採による水流出量の増加が定量的に示されたほか、近年の二酸化炭素濃度の増加が、植生の水利用効率を上昇させ、それにより単木蒸散量の増加傾向が停滞していることが判明した。また、長期観測地点の観測データと米国で公表されているデータの比較解析を行った結果、皆伐による水流出量への影響は比較的長期（10年程度～それ以上）に及ぶことが多く、さらに気候と植生の違いが森林伐採後の水流出量の変化・復旧過程に影響を与えていることが明らかになった。

水質に関しては、特に人為的な影響による窒素負荷に着目して地域間の比較と変動解析を実施した。その結果、都市域に近い森林では、数十年に及ぶ過剰な窒素負荷による硝酸態窒素の流出が継続しており、その影響は都市に近いほど顕著であることが明らかになった。また、近年の大気からの窒素負荷には、硝酸態窒素に加えてアンモニウム態窒素が大きく寄与していることが判明した。間伐を実施した桂試験地（茨城県城里町）では、間伐以前には減少傾向を示していた硝酸態窒素の流出が、間伐の際に作設した作業道からの土壌流出に伴って一時的に増加していたことが明らかになり、森林施業の際に配慮すべき事項として示された。さらに、懸濁物質の流出について観測を進めていた試験地でのデータを解析し、豪雨時の動態を把握した。

洪水・渇水とそれに伴う物質流出の予測評価のために、汎用的なシミュレーションモデルであるSWAT（Soil & Water Assessment Tool）モデルを全国各地の森林流域に適用し、水収支および水質の観測データを用いて、予測精度の検証を行った。水収支の予想評価に際して、特に重要と考えられる森林土壌に関する物理的な特性値（土層厚・容積密度・透水係数など）を観測と文献調査から収集し、SWATモデルで決定されるパラメータとの比較を行った。その結果、元来SWATモデルでは適用を想定していない急峻な斜面を含む小流域であっても、水流出量は十分な精度で予測できることが明らかになった。一方、その際に決定したパラメータは本来の物理的な特性値から乖離してしまうことが判明し、SWATモデルを利用する際の留意点が明らかとなった。

さらに、観測・解析支援体制の構築とデータの共有化を目的として、これまでに共同研究実績のある地方自治体（秋田県・沖縄県）と発展途上国（カンボジア王国）を対象に、研究交流を行った。秋田県・沖縄県に対しては、降水量・水流出量および気象観測データの取得・補正・解析方法に関する提案や知見の共有を行うとともに、共同での発表・講演を行った。また、本課題実施期間に試験地の間伐が実施された秋田県では、間伐後の樹木の蒸散の挙動について協力して観測・解析作業を行った。カンボジア王国に対しては、コロナ禍での森林水文観測状況を把握するために、渡航を行って機器の点検・維持管理作業を実施し、共同観測の再開とデータの共有を行った。

[キーワード] 水循環、森林の水源涵養機能、洪水災害抑止、水質保全、変動予測

1. はじめに

IPCC 第6次評価報告書 第1作業部会報告書によると、大気、海洋および陸域で生じている温暖化が人間の影響によるものであることに疑いの余地はなく、その影響は大気、海洋、雪氷圏および生物圏において広範囲かつ急速に現れている。また、今後温室効果ガスの排出

量がある程度抑制された場合でも、気候変動の影響による災害リスクは将来にわたって高くなると考えられる。人類が他の生命体と持続的に共存していくためには、気候変動による環境の変動と、これによる自然生態系の推移を精確に把握し、社会システムを適応させていく必要がある。

我が国は国土面積の 2/3 が森林に覆われており、その分布域は山地から住民の生活圏の近くにまで広がっている。そのため、気候変動が森林生態系に及ぼす影響は、直接的に人々の生活に波及しうる。近年頻発している豪雨による洪水や土砂災害は、主に森林に覆われた上流域が発生源とみなされており、これは山地の急峻な地形が大きな要因となっている。しかし、斜面に森林が生育していることで、豪雨が流出する前に緩衝帯となる土壤の維持に寄与している。さらに森林の植生は、「遮断蒸発」によって降水が生じている間に地表面に到達する雨・雪量を減じ、「蒸散」によって土壤中の水分を消費することで、降水に備えて土壤層の水分貯留能力を調整している。すなわち、健全な森林の存在は、防災や減災に貢献しているといえる。一方、気候変動下では総降水量は大きく増えず、豪雨のみが増加していく可能性が高いため（降雨の極端化）、洪水のリスクに加えて、無降雨期間の長期化による渇水の危険性も高まるおそれがある。しかし、森林は土壤の浸透・保水能力によって下流域への流出水量を調節することで、洪水とともに渇水を緩和する機能も発揮すると期待されている。

また、森林植生からの落葉・落枝と樹木の根系の存在によって維持される土壤層は、山地の地表面侵食を恒常的に抑えるとともに、降水に対するフィルターとして作用している。さらに森林では、蒸発散による熱エネルギーの吸収と植生の被陰によって、周辺気温の上昇と地温の変動が抑制されることで、比較的安定した温度環境が維持されている。これらにより、森林は積雪地域での融雪出水の制御にも寄与するほか、地域を限定せずに渓流水質の形成に貢献している。

以上より、森林は極端な気候環境を緩和しつつ、下流への流出水の水量・水質を安定化する機能を果たしており、気候環境の変動に対して適応策を検討する際に活用されるべき、水循環に関わる重要な諸機能を具備しているといえる。一方、近年では、ほぼ毎年のように日本の各地で豪雨による洪水災害や土砂災害などが生じており、下流域への影響は甚大化してきている。このことは、近年の集中的な豪雨が、森林が有する防災機能を大きく超えてきていることを示しており、こうした災害の発生頻度は気候変動下でさらに増大する可能性が高い。また、我が国には今後伐期を迎える人工林が存在しており、そのタイミングや施業後の取り扱いによっては、水循環に関する諸機能が一時的、もしくは長期に渡って十分に発揮されなくなることが懸念される。そのうえ、そもそも現在の森林植生が、将来の気候環境の変動に対して十分な耐性を有していない場合には、森林生態系自体の劣化がますます進行すると考えられる。こうした状況により、増大する気候変動リスクに対する森林の水循環に関する諸機能は、相対的に小さくなっていく可能性がある。この状況への対策を立案するためには、全国各地の森林を対象に、水循環過程に関する適切かつ強力な観測・監視網を構築して、現在の状況を正しく把握するとともに、観測値を集積して将来予測のためのデータベースを整備し、合わせて、観測値に基づく高精度かつ汎用性を有する予測手法を提示していくことが急務となっている。

2. 研究目的

森林総合研究所では国内の5か所の森林流域を対象として、降水量・水流出量（水収支）の観測を、最も古い地点では1930年代から継続的に行ってきた。また、7地点の水質観測地点では、降水・渓流水の採水と無機イオン動態の分析を実施してきた。これらについては、本課題の開始前から、観測データを随時出版資料やWebサイトを通じて公表してきた。ただし、本課題採択以前においては、これらの観測とデータベースは必ずしも強固とはいえない予算基盤や推進体制の下での運用を余儀なくされており、そのために観測機器やデータ更新の頻度は観測地点ごとにばらつきがあり、利用者の利便性への配慮にはやや欠ける状況であった。また、我が国の国土の広がりや森林の分布域を考慮すると、データベース化を実施してきた地点数は必ずしも十分とは言えないが、その増補を行うことは難しい情勢であった。

そこで本課題ではまず、森林総合研究所における既存の取り組みをベースラインとして、比較的近年に観測を開始した観測地点も加えて、より広域的かつ充実した森林観測網を構築し、水文・微気象・水質に関するデータを精度管理・集積して、できるだけ広範囲・長期間をカバーするデータベースを整備する。合わせて、全天日射量・温湿度などのデータの取得を開始し、データの多要素化と精度の確認を行う。そのうえで、これらのデータに基づいて、気候変動の影響を高精度に評価・予測するための手法を開発・公開し、これを広く提供するための基盤の構築を行う。具体的には、森林域とアメダスなどの観測値に基づく推定値との差異を定量的に評価するとともに、水収支データに基づく長期変動解析や、地域間での水文・水質特性の比較解析を実施する。また、将来に予想される気候変動に対して、全国各地の森林における水流出・水質の動態を予測するためのモデルを開発する。さらに、これらの成果や知見を豪雪地域と亜熱帯地域の自治体、さらには東南アジアの発展途上国に提供し、本課題における森林の水循環に関わる諸機能のモニタリングと予測手法の適用を協力支援（橋渡し）する。以上の取り組みを通じて、洪水災害の低減、農工業・生活用水の量的な確保、水質の維持など、森林の水循環に関して地域ごとに優先順位の異なる機能を、高度に発揮させるための情報基盤を整備することが本課題の目的である。

3. 研究方法

本課題で観測網を構成するのは、北海道から九州まで計12地点の森林観測地点である（図1）。各観測地点では、森林の水循環過程に関する重要な要素である降水量－水流出量（水収支、11地点：鷹取山試験地（高知県梶原町）は課題期間中の観測データに十分な精度が得られなかったため、既存データの整理のみ実施）、水質（7地点＋御岳の降水）に関する観測を実施した。

観測地点では、これまで数年～最長で80年以上の期間において個別に観測データを取得してきており、観測要素には観測開始から現在に至るまでの環境変動の影響が現れていると考えられる。そこでまず、既存の観測データを集積するとともに、観測地や機器・植生の履歴などの情報を整理し、これらをデジタル化することで広汎に利用できるデータベースとした。そのうえで、気候変動の指標となりうる環境要素として日射量・温湿度・水温について、全国の観測地点で網羅的な比較が可能となるように機器の整備を進めて観測を実施した。

また、本課題では、上記で構築したデータベースを用いて、長期間の変動解析および地域

間の比較解析を行った。さらに、汎用性の高い水循環モデルへの適用を試行し、観測データを検証値としてパラメータを同定して、水・物質流出における経年変化の予測精度を検討した。以下に各サブ課題において実施した研究について、その方法の詳細を記す。

(1) 降雨の時間分布の偏在化が森林の防災・水源涵養機能に及ぼす影響の評価

森林小流域からの水流出量は、森林総合研究所の森林理水試験地データベース

(FWDB) に登録されている長期試験地（5地点：図1の●）に、観測期間が断続的な試験地と比較的近年に観測を開始した試験地（6地点：図1の●と★：★は観測タワーを有する集中観測地点）を加えて、北海道から九州まで合計11地点で、降水量・水流出量（水収支）の観測を実施した。降水の観測は、比較的開空度の高い地点に設置した転倒マス雨量計とデータロガーを用いて行い、観測地点によっては、貯留式の雨量計での観測結果で適宜補正を行った。水流出量は、基本的に溪流内に設置したコンクリート施設（堰堤や水路）を用いて観測した水位値から、換算式を用いて算出した。特に本課題の実施期間については、全観測地点の降水量・水流出量の観測データを、日データとしてデータベースに掲載できる形式で整理した。長期試験地では、水収支に関する観測値とともに、植生履歴や観測機器の履歴などの情報を整理し、これらの情報をまとめて公表した。

観測地点では水収支に加えて、全天日射量・気温・湿度の測定機器を整備し、観測を実施した。これらの気象観測値も日データとして整理して、降水量とともにアメダスなどに基づく推定値と比較することで、山地の森林における直接測定値との差異を検証した。気象観測タワーを有する集中観測地点のうち、スギ・ヒノキが植栽されている2地点（筑波森林水文試験地、茨城県石岡市、以下「筑波」および鹿北流域試験地、熊本県山鹿市、以下「鹿北」）では、全天日射量から正味放射量を推定する際の関係式とその推定精度を検討した。また、集中観測地点において、蒸発散量や降水・渓流水の同位体比などの観測を適宜実施した。

上記で整理した情報やデータを利用して、降水量・水流出量に関する比較解析を実施した。長期試験地である釜淵森林理水試験地（山形県真室川町、図1も参照、以下「釜淵」）のデータから、皆伐が水流出量に及ぼす影響と、長期の気候変動が森林流域からの蒸発散量に及ぼす影響を検討した。さらに、試験地内の樹齢約100年のスギから年輪の炭素同位体比を調べることにより、水利用効率の長期変化について解析し、気候変動と樹木の成長が蒸散量の変化に与えてきた影響について考察した。また、長期試験地のデータとアメリカで取得されたデータを用いて線形混合モデルによる統計解析を行い、森林伐採後の年流出量変化、伐採前の流量に戻るまでの回復時間と回復パターンに対する気候要素や植生の影響を評価した。



図1 水文・水質観測網を構築する観測地点

(2) 高温環境と豪雨・濁水の頻発が森林の水質形成機能に及ぼす影響の評価

水質の観測は、森林総合研究所の森林降水渓流水質データベース（FASC-DB）に登録されている観測地点のうち、現在に至るまで測定を継続している試験地（7地点：図1の■）に、筑波森林水文試験地（茨城県石岡市、図1の■、以下「筑波」）を加えた計8地点を対象に、降水・渓流水中のpH、電気伝導度（EC）と Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 NH_4^+ 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} の溶存イオン濃度の観測を継続的に実施した。観測は月1～2回の頻度で行い、林外に設置したポリロートとポリタンクからなる採取装置を用いて降水を採取し、量水堰付近の水流から渓流水を採水した。実験室に持ち帰った試料から、ガラス電極法でpHを、白金電極法でECを、中和滴定法で HCO_3^- 濃度を測定した。さらに、孔径0.45 μm のメンブレンフィルターでろ過後、イオンクロマト法で溶存イオン濃度を、ICP発光分析法でFe、Si、Al濃度を、乾式燃焼法で溶存有機炭素濃度を、アルカリ性ペルオキソニ硫酸カリウム分解-紫外線吸光度法で溶存性全窒素濃度を測定した。アクセスの困難な御岳試験地（長野県木曾郡王滝村、図1も参照、以下「御岳」）でも、降水については同様な観測・分析を実施した。これらに加えて、水質に直接影響を及ぼす要素として、本課題では特に、渓流水温の測定を実施した。また、集中観測地点では、豪雨時における懸濁物質（Suspended Solids：SS）流出の挙動を把握するための現地観測を実施できるよう設定を行い、豪雨時のSSデータを取得した。上記に基づく観測データは、既存のデータベースに順次統合した。

また、特に人為的な活動が渓流水の水質に及ぼす影響に着目して、観測データを用いた比較解析を行った。森林施業による影響については、間伐作業時を含む20年間に渡って水質およびSSの測定を実施してきている桂試験地（茨城県城里町、図1も参照、以下「桂」）を対象に、水質やSSへの間伐作業の影響について経年変動データに基づく解析を行った。さらに、集中観測地点のうち人為活動の活発な都市域近郊に位置している筑波を中心として、大気からの窒素負荷に由来すると考えられる渓流水中の硝酸イオン（ NO_3^- ）濃度について、観測地点間の比較解析を実施した。

(3) 気候環境の変動が森林生態系の水循環諸機能に及ぼす影響の予測評価

主にサブ課題(1)で整理した全国各地の観測地点における降水量と微気象要素の観測データを入力値、水流出量の観測データを検証値として用いて、汎用性の高い水文モデルのパラメータを決定した。本課題で試行対象とするモデルは、水文・水質形成の総合的なモデルとして、土地利用状況が混在する比較的広範囲の流域を主な予測対象として開発が進められてきたSWAT（Soil Water Assessment Tool）モデルとした。最適パラメータはNash-Sutcliffe係数を指標として、SWATモデルでの水流出量などの推定値が実測値を最も良く再現するための組み合わせを抽出した。解析対象とする試験地は順次拡大していき、最終的には水収支の観測データが得られている全試験地でSWATモデルによるシミュレーションを試行した。SWATモデルには現地で採取した土壌から直接測定できる物理値を模したパラメータが多く設定されているため、各試験地でこれらの値を測定もしくは文献から測定値を収集し、SWATモデルによって決定したパラメータとの比較を行った。また、SWATを用いた森林流域からのSSの流出について、サブ課題(2)で取得・整理してきた桂の観測データを用いて、シミュレーションを試行した。

(4) モデル自治体への観測・予測技術移転の支援

森林水文観測・解析支援体制の構築とデータの共有化を目的として、秋田県・沖縄県との情報交換と技術支援を継続的に行った。両県に対して、降水量・水流出量および気象要素について観測データの取得・補正・解析方法に関する提案や知見の共有を行うとともに、共同での発表・講演などを実施した。秋田県については、共同で観測を実施してきた長坂試験地で課題期間中に間伐が実施されたため、熱消散法を用いた樹液流速に観測に基づいて、間伐の前後における樹木の蒸散量の変動傾向について検討を行った。また、共同研究を実施してきたカンボジア国には、コロナ禍での森林水文観測状況を把握するために観測データの収集を継続的に依頼し、データの共有を行った。さらに、令和4年度は同国に渡航し、観測機器の現況把握を行い、雨量計の再設定と水流出量測定の詳細に関する再確認を行った。

4. 結果・考察

森林の水収支観測とデータ解析

本課題期間中の森林の水収支に関わる観測網は11地点で構成しており、降水量・水流出量に関する「森林理水試験地データベース(FWDB)」に長期試験地として登録していた5地点(図1の●)に加えて、これまで継続的もしくは断続的にデータを取得していた観測地点(6地点)もデータベースに登録した(図1の●と★)。長期試験地のデータについては、未整理となっていた既存の観測データを集積し整理するとともに、本課題期間も観測を継続した。また、新規に登録した観測地点は、主に本課題期間に取得した観測データを中心に整理を行うとともに、長期試験地と同様に試験地の諸元を整理し、データ提供・共有の窓口と合わせてWeb上で公開した(図2)。

本課題実施期間中の長期試験地・新規登録の観測地点における観測データはともに日値にまとめ、データベースへの掲載と比較解析のために同一形式で整理した(図3)。各試験地では積雪の有無・降水の多寡に加えて、特に豪雨時には先行降雨による流域の湿潤度合いと流域の土層の厚さによって、降水に対する水流出の様態が大きく異なることが確認できた。長期試験地に加えて筑波・鹿北の7つの試験地については、施業などによる植生の変化履歴や水収支データの年々変化などについて図化し、データノートとして国際誌に公開するとともに(Shimizu et al., 2021)、補助情報としてデータベースのWebページから参照できるよう



図2 森林理水試験地データベースのWebサイト表紙
右側が新たに登録した観測地点

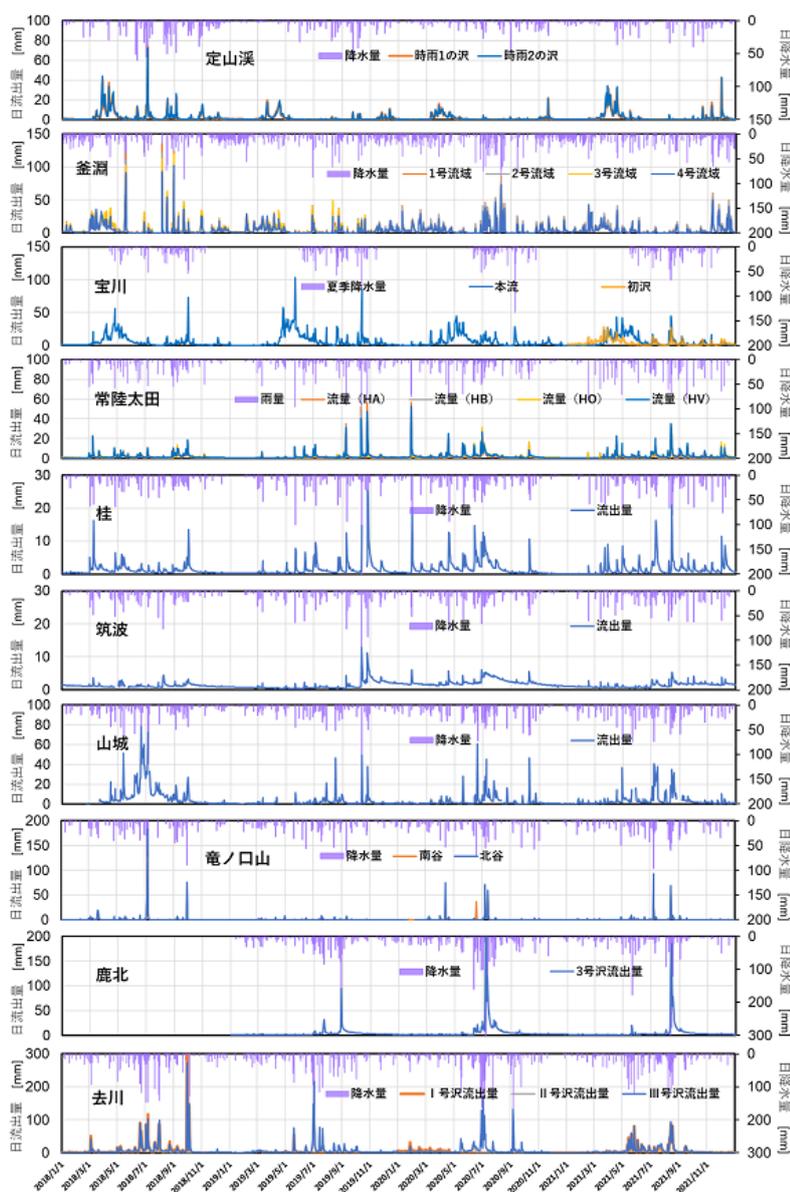


図3 全国各地の観測地点における日単位の降水量・水流出量観測データ

る 1km メッシュでの推定値である「メッシュ農業気象データ」との差異を検証した（図 6）。その結果、降水量に関しては災害予測に用いられる解析雨量ベースの値でも、時に数 10mm/日の差異が生じることが判明し、さらに高精度の推定のためには源流域となる山地での測定を充実させる必要性が示された。また、地上での 1 時間程度ごとの測定地点が少ない日射量は、気温および水蒸気量に比べて推定にばらつきが生じることが明らかになり、この値も山地での測定が重要であると考えられた。

観測タワーを有する観測地点では、日射量とともに、森林での蒸発散量を推定する際に特

に設定した。図 4 はそれらの情報から、長期試験地における施業や虫害などによる植生状態の変遷を図案化してまとめたものである。また、図 5 は試験地の平均的な年間の水損失量（年降水量から年水流出量を差し引いた値：森林の蒸発散量に対応する）をまとめて、観測地点の緯度で整理したものである。高緯度の地域では気温が低いことによって蒸発散量が小さくなっている一方で、年平均気温に大きな差がない低緯度の 3 地点では、降水量が大きい順に水損失量が大きくなっており、樹木が降水を遮断して蒸発させる「遮断蒸発」の影響が見て取れる結果となった。

昨今はアメダスなどの観測値から、日本全国の降水量や気象要素の値が推定されている。しかしながら、これらの推定値と山地にある森林の観測地点での直接測定値との間に、どの程度の誤差が生じるかについては、ほとんど議論がなされていない。そこで、本課題で観測した降水量・日射量・気温・湿度から換算される水蒸気量について、農研機構が提供してい

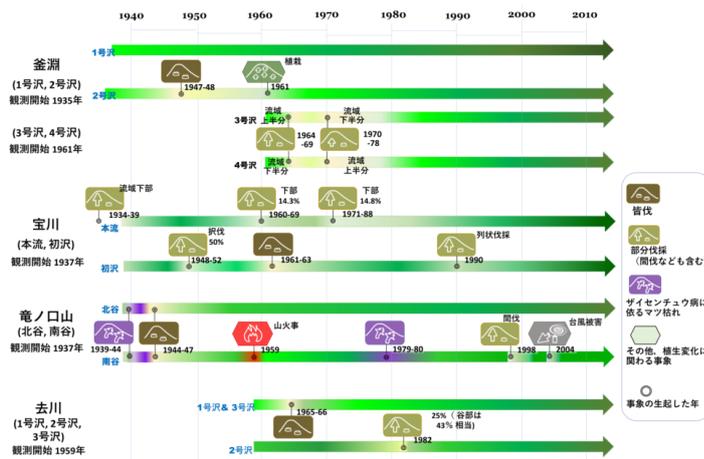


図4 長期試験地における植生の変遷履歴

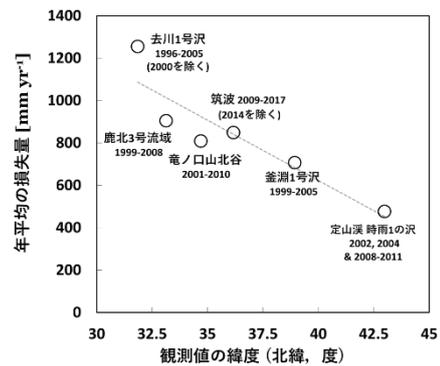


図5 観測地点の緯度と平均的な年水損失量との関係

に重要な値となる正味放射量を測定している。これらの比較結果から、正味放射量は日射量の測定値から高精度で推定可能となることが判明した(図7)。ここで示した筑波と鹿北はともにスギ・ヒノキの人工林であり、この2地点で1時間ごとの日射量から正味放射量を推定する際の換算式の係数はほぼ一致した。この結果は、スギ・ヒノキ人工林での簡便かつ時間分解能の高い正味放射量推定手法として、広汎に利用できる可能性が高いと考えられた。また、図8は筑波で測定した顕熱交換量および潜熱交換量の季節変化であり、後者の値は蒸発散量に対応している。夏季の蒸発散量は冬季の約3-4倍の値になるが、冬季でも0.6mm/日(潜熱交換量で $17Wm^{-2}$ に相当)程度の蒸発散が生じていることが明らかになった。さらに鹿北では、降水および流出水の酸素同位体比から、降水が溪流に流出するまでの平均的な通過時間を推定し、同様に

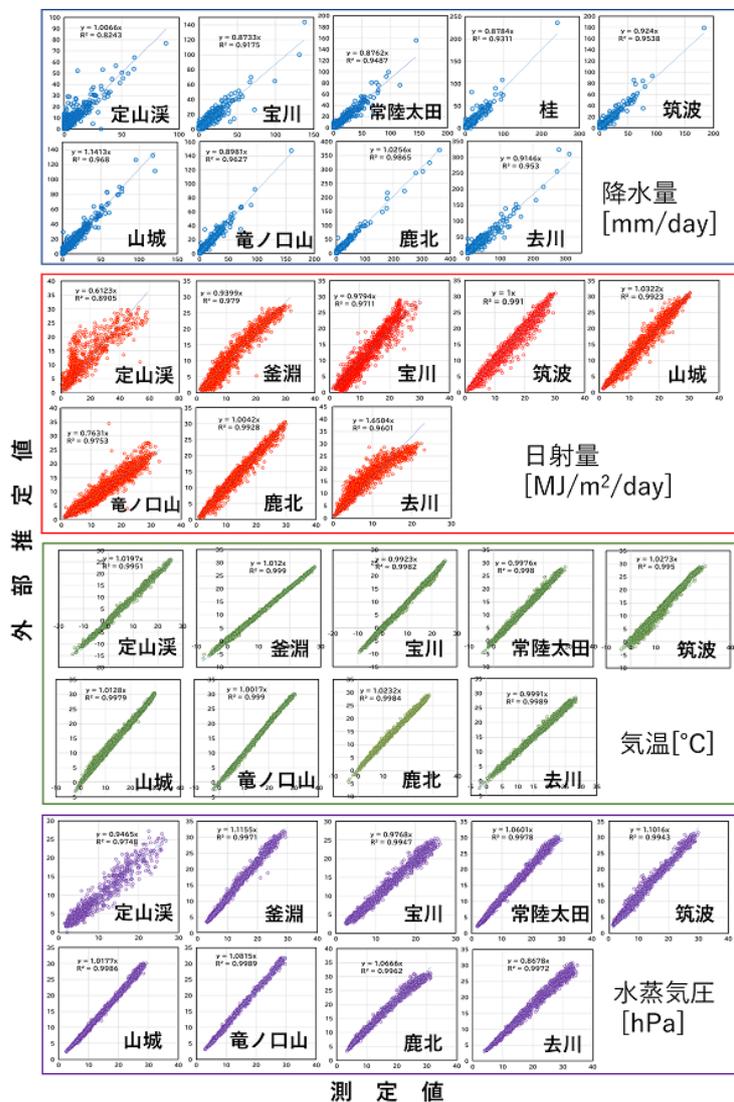


図6 各試験地における気象要素の測定値と外部推定値との比較

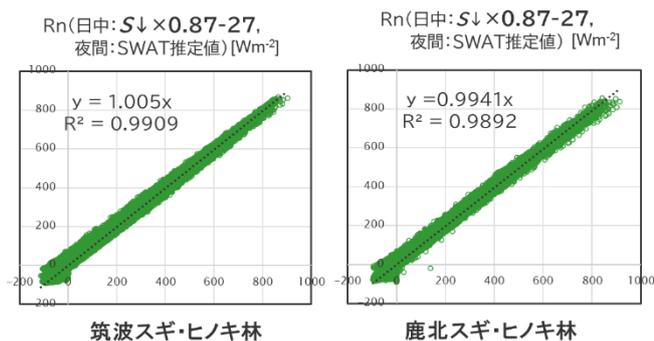


図7 スギ・ヒノキ人工林（筑波・鹿北）で全日射量から正味放射量を推定する際の推定式

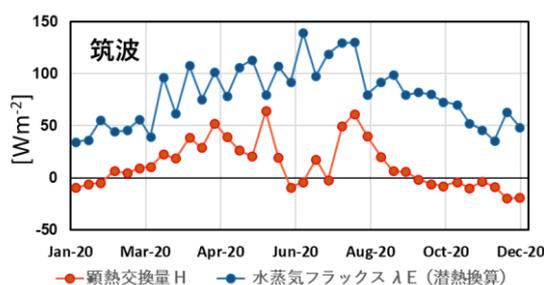


図8 筑波での樹冠上の熱交換量の季節変動

推定された既存の研究結果（筑波と滋賀県の風化花崗岩地質の試験地の値）と比較した（図9、壁谷ら 2023 より）。鹿北の平均通過時間は415日となり、風化花崗岩の流域よりは長く、土層の極めて厚い筑波よりは短い結果となり、流域の特性の違いが明瞭に把握できた。

水収支の長期試験地の中では最も古くから観測を継続している試験地のうちのひとつである釜淵のデータを用いて、気候変動および皆伐や樹木の成長が森林流域の水収支に与える影響について、詳細な解析を行った（Kubota et al., 2021）。釜淵は約1-3haの4つの近接した小流域で構成されており、1号沢のみ1915年にスギを植栽して以降、森林の施業を行っていない（図4も参照）。そこで、無処理の1号沢と伐採された流域との水流出量の差異について、経年的な変化を追跡して比較を行う「対照流域法」によって、伐採が水流出量と水損失量に及ぼす影響を抽出した。1号沢と皆伐した2号沢・3号沢の6-10月の総流出量の関係を調べると、流量が100mm以上増えていた期間が、2号沢では約28年間、3号沢では約23年間あり（図10）、釜淵では皆伐が森林からの流出に与える影響が20年以上に及ぶことが明らかになった。

次に、1-3号沢の水損失量について比較を行った（図11）。3流域では異なる施業履歴に関わらず水損失量に共通の変動が見られることから（図11d）、日射量や気温などの変動に起因する気象環境の変化が大まかな変動を支配していたと考えられる。一方、皆伐を行った2号沢と3号沢では、伐採によって水損失量が減少し、

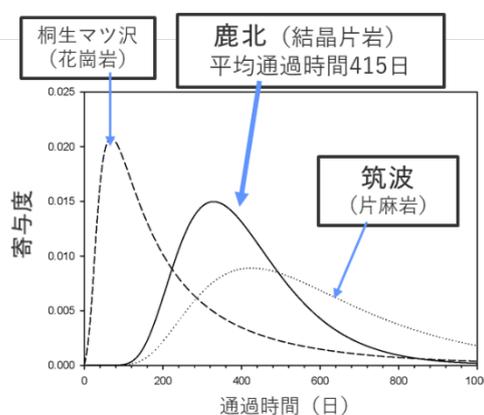


図9 鹿北・筑波での酸素同位体比観測に基づく降水の流域内での平均滞留時間の推定

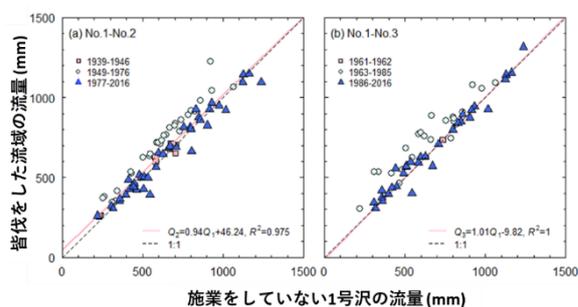


図10 釜淵での無伐採流域（1号沢）と伐採流域（2号沢：左，3号沢：右）との年水流出量の経年比較

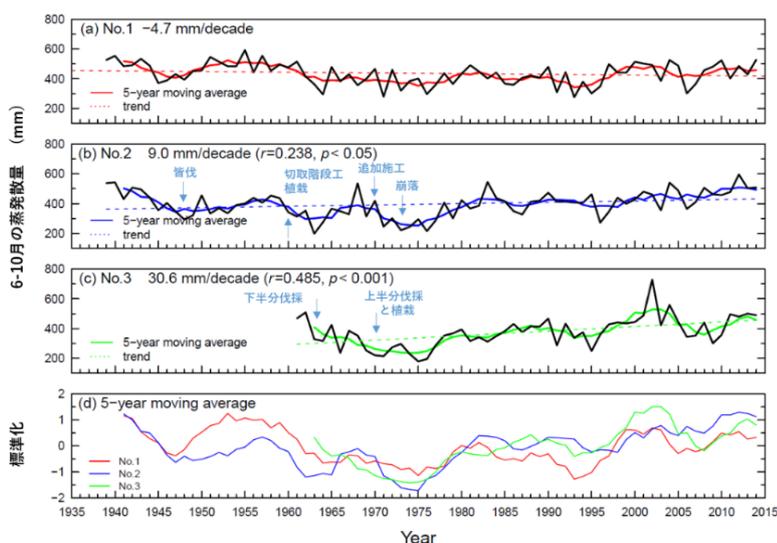


図 11 釜淵での 6-10 月の蒸発散量の変動. (a) 1 号沢、(b) 2 号沢、(c) 3 号沢の値、(d) 標準化した値

蒸生の回復に伴う蒸発散量の増加によって水損失量が増加している (図 11b、c)。このように一般的に森林の蒸発散量は伐採によって減少し、植生の回復により増加する。しかし、施業を行っていない 1 号沢では森林の樹木が成長しているにも関わらず蒸発散量が減少していた。この現象について、年輪の炭素同位体比を用いてさらに詳細に検討を行った。

水利用効率とは、ある期間の植物の成長量とその成長に要した水量 (= 蒸散量) の比の値であり、樹木の場合、年輪の炭素同位体比から水利用効率を 1 年ごとに算定できる。釜淵のスギの水利用効率は、大気中の CO₂ 濃度の上昇とよく似た傾向で上昇していた (図 12)。一方、大気中の CO₂ 濃度が高くなると、樹木は気孔を大きく開かなくても光合成に必要な CO₂ を取り込むことができるようになるため、蒸散量を抑制でき、水利用効率は上昇する。これを裏付けるために、安定同位体比から計算した水利用効率と年輪幅を用いて推定した成長量から、1 号沢のスギの蒸散量を推定して比較を行った。単木当たりの蒸散量は、樹木の成長に伴って 1980 年代まで緩やかに上昇しており、樹齢約 80 年 (1990 年頃) 以降でほぼ一定値となった。そこで、大気中の CO₂ 濃度が一定で、水利用効率が 1960 年以前の傾向を保持し続けたと仮定した場合の蒸散量も試算したところ、実際の状況に比べて蒸散量が大きくなるのが推定された (図 13)。このように、無処理の 1 号沢では樹木の成長とともに単木当たりの蒸散量は増加していたものの、増加の程度は大気 CO₂ 濃度の上昇によって抑制されており、このことと森林の成熟による立木密度の減少によって、流域当たりの蒸散量と遮断蒸発量が減少していることが推察された。

水利用効率とは、ある期間の植物の成長量とその成長に要した水量 (= 蒸散量) の比の値であり、樹木の場合、年輪の炭素同位体比から水利用効率を 1 年ごとに算定

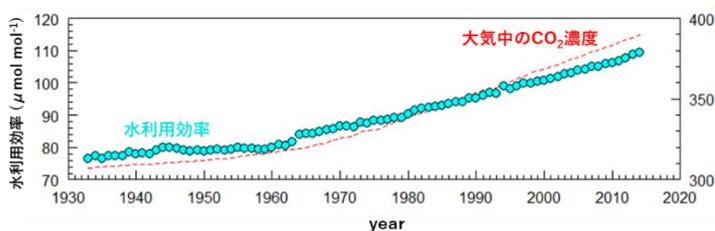


図 12 年輪のセルロース中の炭素同位体比から計算

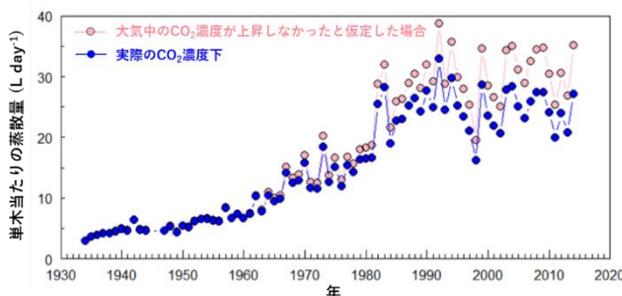


図 13 年輪の炭素同位体比と年輪幅をもとに計算した樹木 1 本当たりの蒸散量

本課題ではさらに、森林の伐採から植栽後に、生育地ごとの気象環境や植生の成長過程が流出量の変化に及ぼす影響を明らかにするために、多地点のデータを用いた比較解析を行った。解析は、日本とアメリカで対照流域法を用いて観測を行っていた19流域（図14）のデータを用いて実施した。日本の試験地のうち釜



図 14 日米で検討に用いた森林水文観測地

淵、竜ノ口山森林理水試験地（岡山県岡山市、図1も参照）、去川森林理水試験地（宮崎県宮崎市、図1も参照）のデータは、本課題のデータベース（FWDB）によるものである。検討に用いた指標のうち、伐採後の水流出量の変化は、対照流域と伐採流域の流出量の差の増加量とし、水流出量が復旧する（＝一旦減少した水損失量が元に戻る）までの時間は、変化が最大となる年から95%復旧するまでの年数とした。日本とアメリカの各流域の水流出量の変化の3年移動平均を図15に示す。全ての流域で伐採後に水流出量が増加（＝水損失量が減少）し、その変化量は17mm/年から618mm/年であった。また、森林の成長に伴う復旧時間は数年から40年程度の範囲にあり、上述した通り釜淵では20年以上となった。森林伐採後の水流出量の復旧過程では全ての流域で、伐採直後に急速に復旧→一旦復旧が停滞→その後再び急速に復旧に向かうという、共通した傾向が見られた。統計解析の結果、水流出量の変化には降水量の季節性が関係しており、冬雨型の地域において流量変化が大きいという結果が得られた。また、この復旧過程は伐採後の植生と関係しており、伐採後の植生が広葉樹である場合、針葉樹に比べて伐採直後の流量の復旧が大きいという結果が得られた。これは、今回検討に用いた冬雨型の流域のほとんどが針葉樹林であり、降水量における降雪の割合が大きいため、伐採による遮断蒸発量（＝降雪遮断量）の低下が流量変化に大きな影響を及ぼしていたことによると考えられた。また、水流出量が復旧していく過程の詳細は、針葉樹林と落葉広葉樹林とで違いが生じており、これは、蒸発散量のうちの2成分（蒸散量と遮断蒸発量）の回復に時間差がある

ことが主な要因であると考えられた。すなわち、蒸散量は植栽後すぐの幼齢林でも、成長によるLAI（葉面積指数）の増加よりも早く回復すると考えられ、それに対して遮断蒸発量は、LAIよりも遅れて回復するとされている樹高に大きく依存する。一般に落葉広葉樹は針葉樹よりも年間の蒸発散量

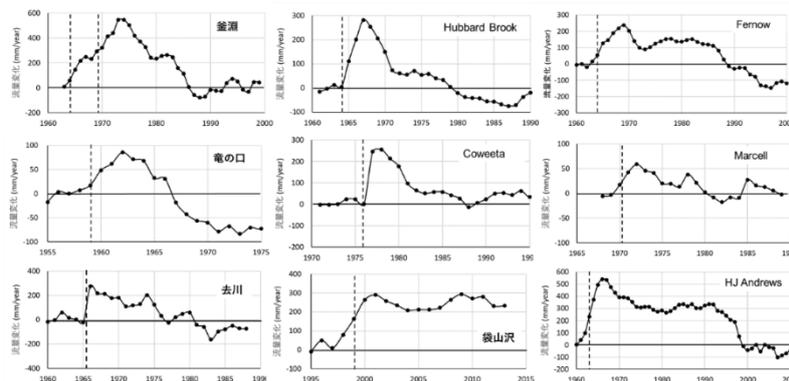


図 15 日本とアメリカの流域試験地における森林伐採後の水流出量変化（破線は伐採年）

における蒸散量の割合が大きいいため、落葉広葉樹で伐採から比較的短時間で流量が復旧するという本研究の結果は、幼齢期の蒸散量の急速な回復と遮断蒸発量の緩やかな回復によって説明できると考えられた（図16）。

本課題では、長期観測データを用いて、森林施業に加えて気候環境の経年的な変化や地域間での差異が、森林の水流出力や蒸発散量に与える影響を明らかにした。これらの視点で長期間の水収支観測データを利用した研究例は意外にもまだまだ少なく、データの整備と公開によって比較研究を進めることで、森林攪乱や気候変動に対する水流出の応答について、さらなる知見が得られると考えられる。

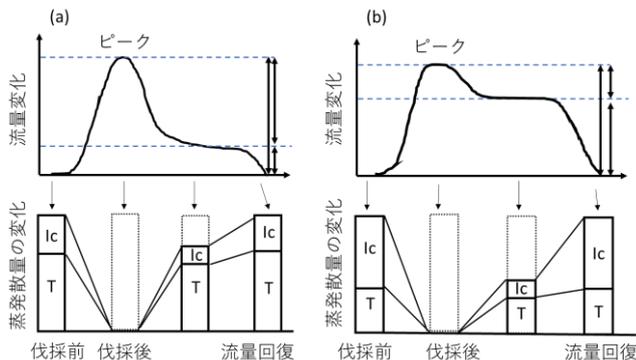


図 16 落葉広葉樹林 (a) と針葉樹人工林 (b) における流出量変化と蒸発散量変化（蒸散量(T)と遮断蒸発量(Ic)）の概念図

降水・溪流水の水質分析とデータ解析

降水および溪流水の水質については、これまで「森林降水溪流水質データベース (FASC-DB)」に登録されていた7地点（図1の■）に、筑波（図1の■）を加えた8地点で観測を実施した。各観測地では月に1~2回の頻度で降水と溪流水の試料採取を行った（御岳では降水の水質観測のみを継続）。採水した試料は順次分析し、分析値の整理を行ってデータベースに追加した。現在のところ全ての観測地で2021年に取得した試料まで分析・整理が済んでおり（図17）、観測地点でのデータの蓄積は、最長で20年分に達している。

また、現地観測データの充実を図るため、水質要素の一つであり水質形成機構にも関わる

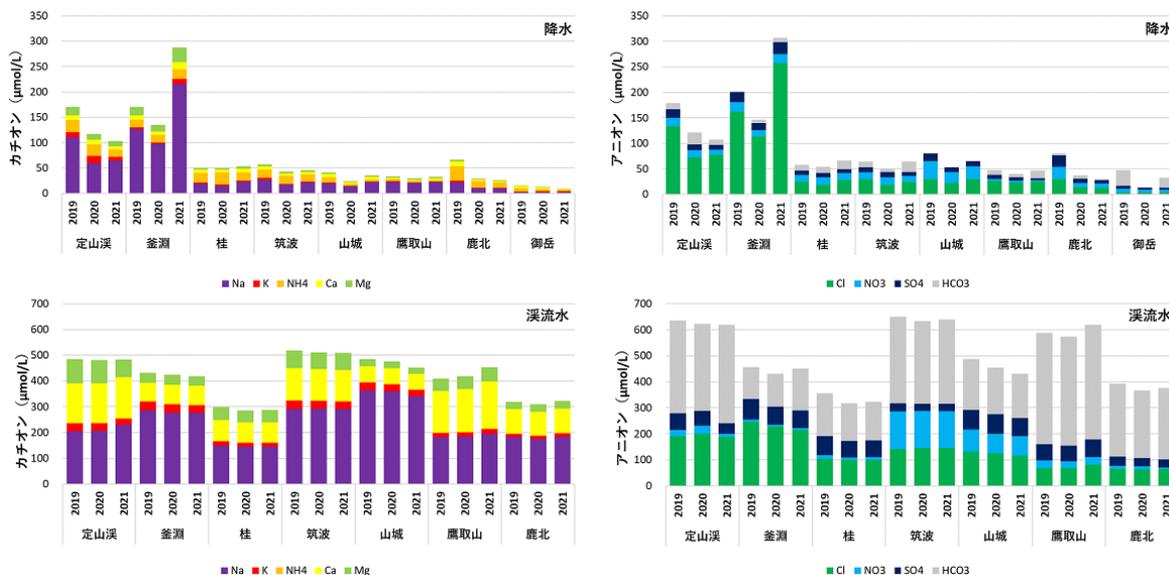


図 17 全国各地の森林観測地点における降水・溪流水の水質分析結果

水温についても、連続観測を実施した。図 18 は 4 地点（釜淵、筑波、山城試験地：京都府木津川氏、以下「山城」、鹿北）における 2021 年の水温測定値の季節変動であり、基本的に気温の高い低緯度の観測地点で水温も高いことが把握できた。

降水と渓流水の水質については、環境変動とともに人為活動の影響も考慮する必要がある。それらの要素のうち重要なものの一つとして、人為活動により多量に大気中に放出されている窒素が挙げられる。そこで、これまでに全国各地の観測地点で採取した試料による分析結果から、大気からの窒素流入量に焦点を当てて経年変動を抽出した（図 19）。多くの試験地で共通する傾向として、近年になるに従って窒素流入量に占めるアンモニウム態窒素（ $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ）の割合が硝酸態窒素（ $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ）よりも卓越しつつあることが挙げられ、いくつかの試験地では流入量の大小関係が逆転している。硝酸態窒素の流入量は 20 年間を通じて漸減傾向をしめす観測地点が多く、その

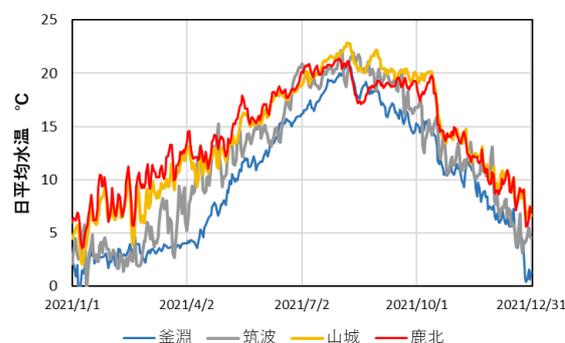


図 18 釜淵・筑波・山城・鹿北における
渓流水の水温の季節変化

要因としては化石燃料の燃焼に伴う窒素酸化物排出の抑制技術が進んだことが考えられる。一方、アンモニウム態窒素の寄与が増大した要因としては、農地に施用される肥料や家畜糞尿に由来するアンモニアの大気への放出が増加したこと、自動車の排気ガス対策としての触媒技術の進歩により硝酸態窒素の排出が減少した半面で、還元されて生成されるアンモニアの排出が増加したことが考えられる。都市域を中心に測定値の公表が進んでいる硝酸態窒素

に比べて、アンモニウム態窒素は日本全域でほとんどモニタリングが進んでいないため、森林域での測定値は極めて貴重であり、その経年変動傾向の把握は重要である。両者とも降水とともに森林に流入し、過負荷になった場合には渓流水の水質に強く影響を及ぼすため、観測地点周辺の気環境の状況と関連付けた解析を行うことが必要である。

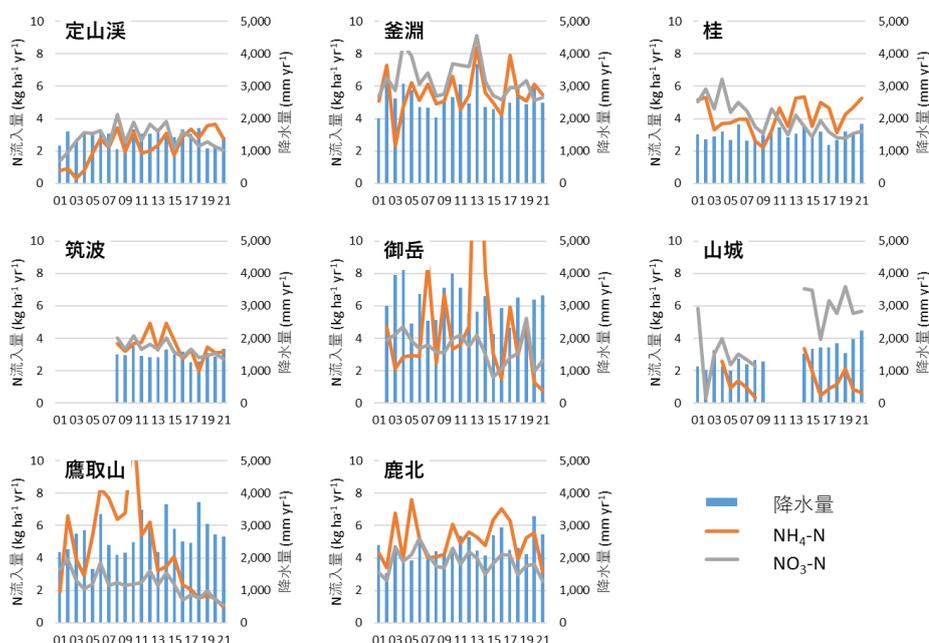


図 19 全国の観測地点における 2000 年～2021 年の降水による硝酸態窒素およびアンモニウム態窒素の年間流入量の経年変化

森林施業が渓流水の水質に及ぼす影響を把握するため、間伐が実施された桂での観測データを詳細に解析した。桂では2012年に流域面積の17%、2013年には30%に相当するスギ林を対象として作業道の作設を伴う林業機械を用いた列状間伐（間伐率33%）が実施された。そこで、この期間を含む20年間における渓流水中の硝酸イオン濃度の年平均値について観測データを整理

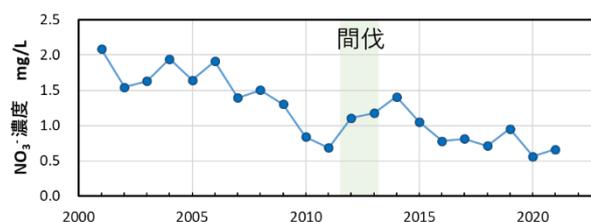


図 20 桂試験地における渓流水中の硝酸イオン濃度の年平均値の変化

した（図 20）。20 年間の観測データからは、基本的には硝酸イオン濃度の低下傾向が認められるが、2012 年から 2014 年にかけては、間伐の影響によって一時的に濃度が上昇していた。桂での間伐の際の作業道は無降雨時に水流のない谷に沿って作設され、この部分では土壌のかく乱が生じたが、それより上部の斜面では土壌のかく乱は認められなかった。伐採によって樹木による窒素吸収が減少し硝酸イオンの流出が増加することは、皆伐を行った際にはよく観測される現象である。一方、桂における間伐実施年の硝酸イオン濃度の上昇は、間伐による樹木の窒素吸収の減少も影響したと考えられるが、作業道の作設に伴うかく乱により硝酸イオンを豊富に保持している表層土壌が溪流に入り込んだことが、より強く影響したと推察された。間伐が実施された 2012 年および 2013 年とその前後の期間には、懸濁物質（SS）の流出についても観測を実施していた。そこで、間伐作業前後の比流量と比 SS 負荷量（単位面積当たりの積算流量と積算 SS 負荷量）の関係についても解析を行った（Shinomiya et al., 2020 : 図 21）。比流量、比 SS 負荷量とも、流出ハイドログラフを洪水流出と基底流出の期間に分離し、各洪水流出期間について積算した値である。間伐直後の 2013 年および 2014 年（図 21a）は、間伐前と比較して同じ流量の洪水流出によって発生した SS 負荷量が大きくなった。その後の時間の経過に伴い、流量に対する SS 負荷量の関係は間伐前とほぼ同じになった（図 21b, c）。同試験地における間伐作業では、斜面での土壌かく乱はほとんど生じておらず、作設された作業道とその近傍に生じた裸地面が間伐直後に増加した SS の主な発生源と考えられた。間伐の翌年から裸地面には草本植物が定着しはじめ、2 年後には植被率がほぼ 80%に達していた。この速やかな裸地面の減少により、間伐から 4 年後には SS の発生が間伐前の水準に戻ったと考えられた。

た。なお、桂では 2019 年 10 月の台風 19 号による大出水の際に自動採水装置を用いた観測システムが大きく損傷したため、以降は SS の観測を休止した。

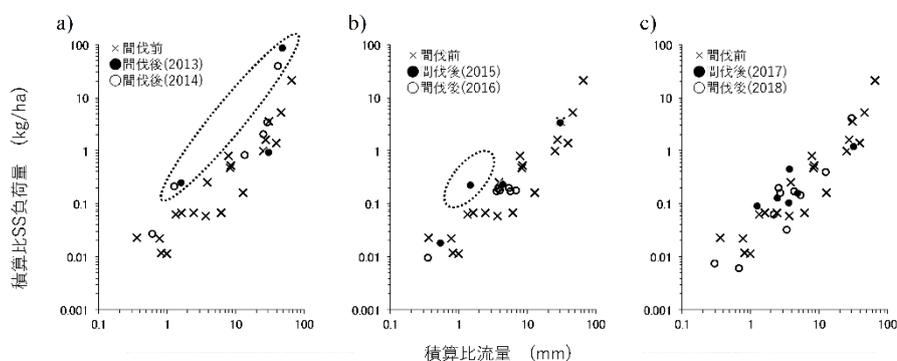


図 21 桂試験地における間伐前後の積算流量と積算 SS 負荷量の関係
Shinomiya et al. (2020) の図を基に作成

一方、本課題で集中観測地点として位置付けた筑波と山城では、新たに豪雨時の SS 観測を実施した。山城では、2021 年の夏季に降雨強度が 30 mm/h に達する豪雨時の SS 流出データが複数回取得できた（図 22）。また、筑波では 2022 年に濁度および SS 濃度について、通年での観測データを取得できた（図 23）。山城・筑波とも、観測で得られたデータから、洪水時の水流出量と SS の流出量との関係について解析を進め、SS の流出量推定に繋げていく予定である。山城での試料分析の結果、降雨強度が 10 mm/h 程度までの範囲では SS 濃度に占める有機物濃度（SS 試料を 550℃で熱したときの質量減少分として評価）は 50%程度であることが多いが、降雨強度が 30 mm/h に達した際には、有機物濃度の占める比率は 30%程度と低いことが判明した。これは、豪雨時の強い水流により密度の大きい鉱物粒子が浮遊しやすくなったためと考えられた。このような SS の組成への水流出量の影響は、下流への物質負荷を見積もる際に考慮する必要があると考えられた。

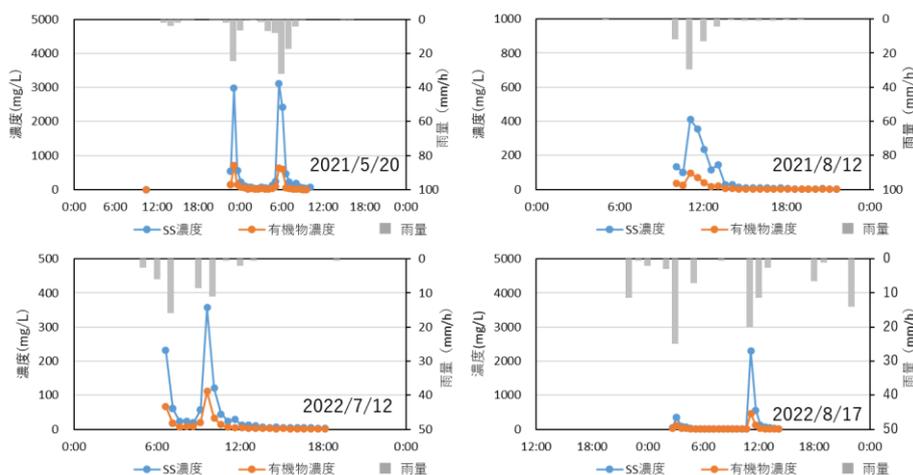


図 22 山城における 2021 年・2022 年夏季の降雨イベント時の SS 観測値

渓流水の水質について硝酸イオン濃度に着目して全国の観測地点のデータを比較したところ、本課題の観測期間である 2018 年から 2021 年の間では、一貫して大都市に近い筑波と山城で渓流水中の硝酸イオン濃度が高かったことが分かった（図 24）。これは、都市近郊にある森林で、長期にわたって人為由来窒素の過剰流入が続いたことにより、「窒素飽和」(Aber et al., 1989¹⁾; 徳地ら, 2011²⁾) の状態になっ

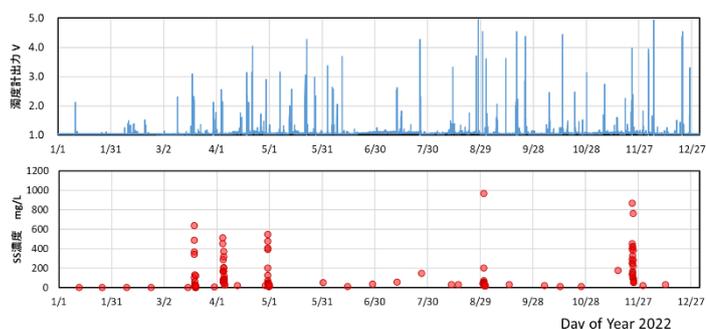


図 23 筑波における 2022 年の濁度計の出力値と SS 濃度の季節変化濃度

ていることが反映した結果であると考えられる。図 19 より、筑波と山城での 2001 年以降の窒素流入量は他の観測地点と比較して著しく多いわけではないことから、それ以前の窒素負荷の影響が現在まで残り続けていることが分かった。筑波の渓流水中の NO_3^- 濃度は桂と比較して約 10 倍であり、同じ茨城県内でも筑波より約 40km 北北東に位置していることによって、かつての都市域からの窒素負荷がかなり軽減されていたことが推察された。

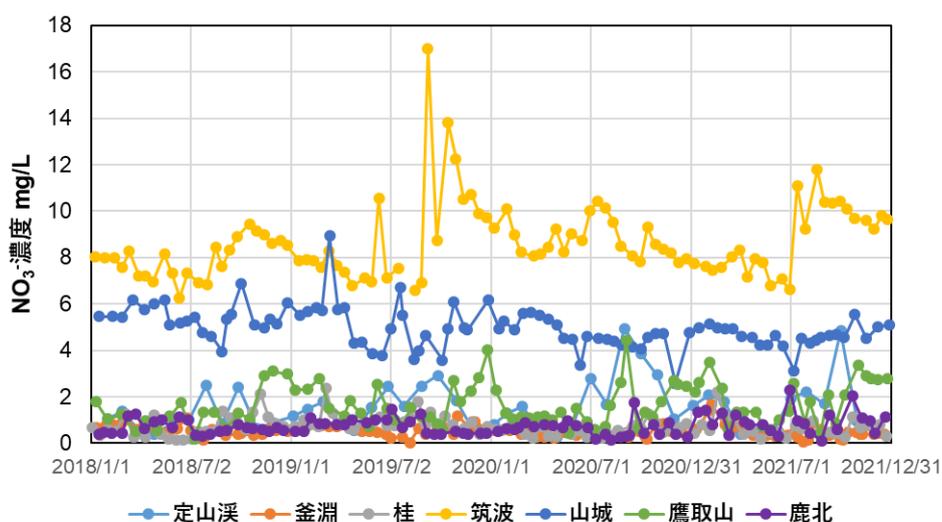


図 24 全国の水質観測地点における 2018 年から 2021 年の渓流水中の硝酸イオン濃度

このように人為的な活動の影響は大都市から遠ざかるほど小さくなると考えられることから、筑波と桂を含む首都圏周辺の多点の森林で採取した渓流水中の硝酸イオン濃度を、大気への窒素化合物の排出が多い東京湾岸から採取地点までの距離を基準として比較を行った。その結果、両者には明瞭な負の相関関係が認められた（図 25：Itoh et al., 2021）。

窒素飽和が進行すると、土壌が酸性化して養分の溶脱につながることや、下流の湖沼・貯水池の富栄養化を促進することが危惧される。今日では全球的に大気への窒素化合物の排出が増加しており、ここで示したように過去の過剰な窒素負荷がその後の渓流水質に長く影響することからも、降水と渓流水の水質に関する継続的なモニタリングの重要性は高まっている。また、上述の多点調査を実施してから 20 年が経過しており、渓流水中の硝酸イオン濃度が全体として上昇していないかを再調査することも窒素飽和化の進行の監視において有効な手段であると考えられる。

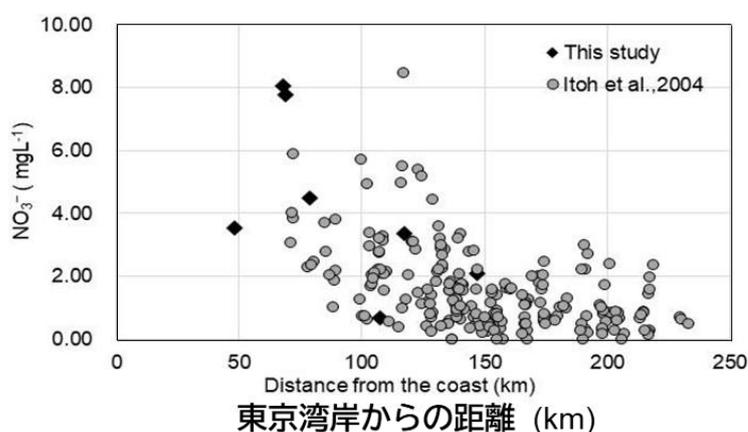


図 25 渓流水中の硝酸イオン濃度と東京湾岸からの距離の関係 Itoh et al. (2021)の図を基に作成

モデルを用いた予測評価

気候環境の変動が森林の水流出・水質形成に及ぼす影響を評価するために、森林からの水流出量や水質形成過程を予測するためのモデルを選定し、これを試行した。溪流への水流出量を対象としたモデルとしては、これまで HCYMODEL (福嶋・鈴木, 1986³⁾) や TOPMODEL (Beven et al., 1995⁴⁾) が日本の森林流域に適用された事例がある。また、懸濁物質(SS)の流出につ

いては、GeoWEPP (Amaru and Hotta, 2018⁵⁾) などが、森林流域で用いられてきた。ただし、これらのモデルでは、水の流出量と流出に伴う水質の変動を同時に予測評価することが難しい。そこで本課題では、森林からの水、窒素、懸濁物質などの流出を統一的に予測可能なモデルとして、SWAT モデル (Arnold et al., 1998⁶⁾, 以下「SWAT」) の導入を試行した。

SWAT には、DEM や土地利用図などの、入手が比較的容易な情報を用いて計算に着手できるという利点がある。また、SWAT 自体も無料で入手可能であるうえに、フリーソフトである QGIS 版も選択可能であり、導入の際のコストの点でも自治体などでの利用に適しているといえる。さらに、森林の伐採など、土地利用の変化を仮定したシナリオを組み込むことも可能である。一方、SWAT は、アメリカの農地流域を対象に開発されてきたモデルであるため、急峻な地形の小流域への適用事例は極めて少なく、森林のみで覆われた流域への適用事例も限られている (例えば Durlo et al., 2016⁷⁾)。また、土壌中の水移動に関わるパラメータが多岐に渡り、そのなかには観測・推定できる値との対比が困難なものもある。そのため、複雑かつ急峻な地形のうえに成立している日本の森林小流域に SWAT を適用するためには、現地の状況とモデルの構造に合わせたパラメータの抽出と決定が必要となる。

本課題では、FWDB と FASC-DB の水文、水質モニタリングのデータを SWAT モデルに適用した。水流出量については FWDB に登録した全ての観測地点でのシミュレーションを試行した。モデル計算の準備として、まず各観測地点を含む 10m の DEM を準備し、SWAT を用いて流域範囲を作成した。次に、この流域に土地利用と土壌、傾斜区分を与えた。土地利用は定山溪では針広混交林、他の流域は針葉樹林とした。流域の土壌データは、可能な限り現地での観測データを文献から収集し (例えば大貫ら, 2014⁸⁾)、土層厚、容積密度、有効水分、飽和透水係数、粒径区分を初期値として与えた。文献から観測データが得られなかった観測地点では、現地での測定と直接採取した土壌試料の分析から、これらの値を収集し整理した。表 1 は観測地点における土壌 A 層 (表層) の物性値である。

観測流域は DEM を用いて数 10 個～数 100 個以上の Hydro Response Unit (HRU) に区分した。各々の HRU を対象に、観測値、もしくは近隣のアメダスなどによる補完値から気象要素データ (降水量、気温、湿度、全天日射量) を入力し、表面流出量、蒸発散量、浸透量、側方流量を計算し、各々の HRU における水流出量を算出した。なお SWAT 内の放射サブモデルでは森林植生のアルベドを過大評価していることが検討より明らかになったため、蒸発散量の算出に際しては

実状に即した正味放射量を適用できるように、入力する日射量 (日値) に係数 1.18 を乗じて調整した。パラメータフィッティングプログラム SWAT-CUP を用い

表 1 全国各地の森林観測地点における土壌 A 層の物性値

観測地点	土層厚 (mm)	容積密度 (g/m ³)	有効水分 (mm/mm)	飽和透水係数 (mm/hr)	粘土含有率 (%)	シルト含有率 (%)	砂含有率 (%)	礫率 (%)
定山溪	202	0.96	0.04	360	17	33	50	24
釜淵	155	0.51	0.17	1053	40	30	31	2
常陸太田	210	0.83	0.11	955	40	36	24	1
桂	216	0.52	0.1	1172	28	33	39	5
筑波	273	0.46	0.15	839	30	32	38	6
宝川	152	0.31	0.15	1078	33	26	41	2
山城	72	0.55	0.12	263	11	11	79	4
竜ノ口山	155	0.84		314	17	41	44	3
鷹取山	175	0.77	0.07	1943	37	25	39	13
鹿北	100	0.84	0.2	1008	30	30	40	5
去川	270	0.47		870	16	21	63	14

て、SWAT で計算した水流出量が実際の観測値をよりよく再現するように、パラメータの最適化を行った。

以上の過程を経て、全国各地の森林流域を対象として流出ハイドログラフの再現を試みた（図 26）。図で橙色のラインの左側は最適化パラメータを得るための調整（Calibration）期間であり、右側は最適化されたパラメータを用いた検証（Validation）期間である。検証期間における水流出量の再現性は基本的に良好であり、SWAT によるパラメータ決定プロセスを経ることで、山地の森林流域でも、少なくとも数年間の流出量予測が可能であることが示唆された。また、モデルの適用結果として算出された各観測サイトの水収支を整理したところ、北から南にかけて蒸発散量が小さくなる妥当な傾向が得られた（表 2）。鹿北では別途観測タワーの測定値から年間の蒸発散量は約 830mm であるという結果が得られており（Shimizu et al., 2015⁹⁾）、SWAT による推定値（863mm）とかなり良い一致をみた。

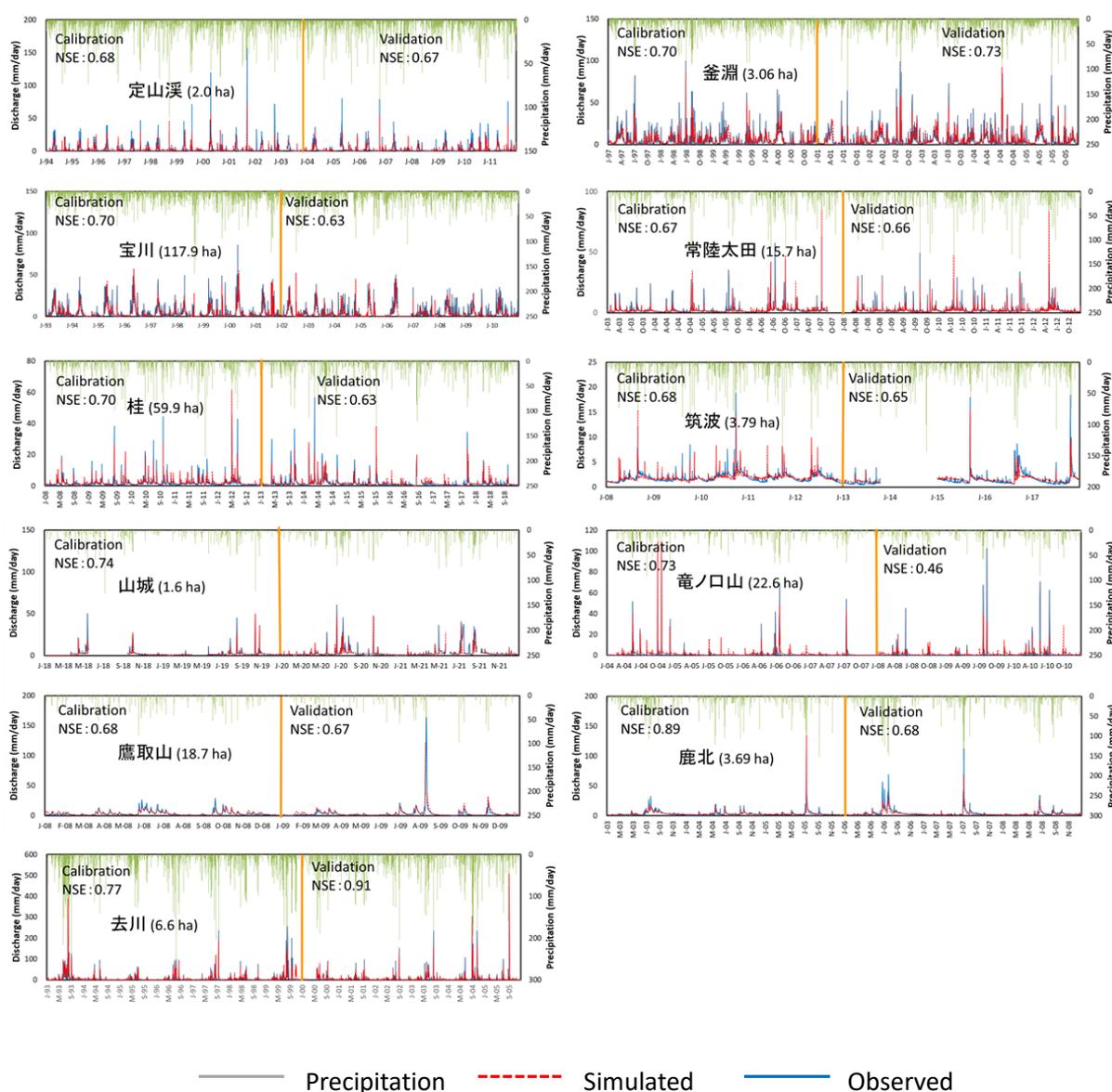


図 26 SWAT モデルを用いた各試験地の水流出量とその日変化の推定結果

表 2 SWAT の適用結果として得られた各観測サイトの水収支（単位は[mm/year]）

Site	定山 溪	釜淵	常陸 太田	桂	筑波	宝川	山城	竜ノ 口山	鷹取山	鹿北	去川
降水量	1387	2757	1555	1527	1494	1964	1576	1099	2160	2219	3274
表面流量	140	167	78	228	39	289	273	128	122	171	326
中間流量	156	467	277	193	201	292	45	93	586	366	564
表層地下水量	310	992	302	269	289	700	478	216	377	542	919
深層地下水量	270	526	92	81	101	148	168	181	190	174	470
蒸発散量	400	577	766	705	861	471	611	479	713	863	858
PET	609	664	862	883	1108	602	991	1042	978	1006	1080

SWAT では水流出とともに栄養塩や土砂の流出についてのシミュレーションが可能である。気候変動下では豪雨の頻度が増加する傾向にあり、さらに伐期を迎えた森林では今後施業が実施されることを考えると、森林からの水流出量とともに、土砂流出量の予測も重要となる。しかしながら、森林源流域からの SS の流出をモデルで再現した例はほとんど存在しない。そこで、SS の観測データが蓄積されている桂を対象に、日ベースの SS 流出量の再現を SWAT で試行した(図 27)。桂では間伐の影響で一時的に SS が増加していたが、今回の試行ではこの増加過程は対象とせず、SS の流出がほぼ間伐前の状態に戻ったと考えられる 2017 年以降の観測データを対象として SWAT を試行した。SWAT における SS の発生量は Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE) を用いて計算され、河道での侵食や堆積を含む河道内循環を示すパラメータが調整対象となる。最適化の結果は相応の再現精度が得られ、SWAT によって山地森林流域からの水流出に加えて、SS 流出の予測も可能であることが示された。

以上により、SWAT は適切なパラメータの調整により、我が国の森林流域の水流出量予測に利用可能であることが判明した。一方、最適化された土壌パラメータは表 1 の観測による値とは大きく乖離しており、特に飽和透水係数の値は初期値とした観測値よりも 90%以上小さな値として設定しないと水流出量が再現できないことが分かった。これは、SWAT 内のサブモデルの設定では我が国の山地のような急斜面が広い範囲に存在する流域をほとんど想定していないことに起因している。そのため今後は、SWAT 内における斜面での水移動過程の設定について詳細に検討を加え、急斜面の山地に対して整合的なサブモデルに修正していく必要があると考えられた。

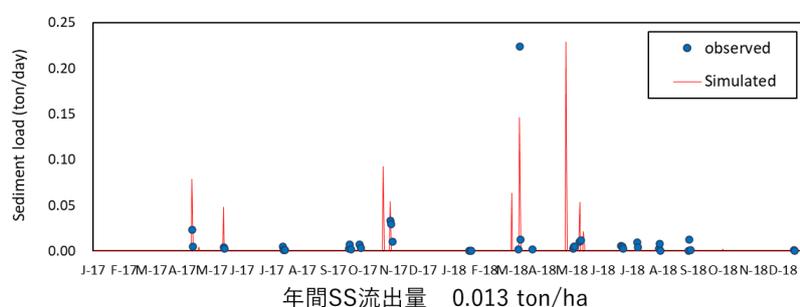


図 27 SWAT モデルを用いた桂の SS 流出量の再現結果

地方自治体・発展途上国との共同観測・解析

本課題では、これまでに森林総合研究所と森林水文過程に関する共同研究の実績を有する秋田県と沖縄県に対して、観測データ・観測技術に関する情報の共有と、データに基づく予測・評価手法の提供を行ってきた。秋田県林業研究研修センターが森林水文観測を実施している長坂試験地(大館市)を対象に、森林調査の一環として光学的手法による葉面積指数(LAI)と全天空写真による開空度の調査を共同で実施したほか、水文および気象要素の測定機器について維持管理や機器交換・更新に関する助言を行った。長坂試験地では本課題の実施期間中に間伐が行われており、間伐前後の樹木の蒸散量の変動について定量的に解析するために、熱消散法に基づく樹液流速測定による樹木の蒸散量計測を共同で行った。その結果、大気飽

差(飽和水蒸気圧と現地水蒸気圧との差)を変数としたモデルによる推定から、本数率で40%の間伐の1年後に林分蒸散量は30%程度減少し、2-3年後には元の水準に戻ることが明らかになった(図28)。また、樹木内部の樹液流速の変動傾向から、蒸散量の回復の主要因は間伐後の葉量の回復ではなく、残存木の光環境の改善による樹木下層の葉からの蒸散の増加であると考えられた。沖縄県に対しては、沖縄県森林資源研究センターとの協力の下で観測を行ってきた試験地(チイバナ流域試験地:国頭村)で、水位計の設置・稼働状況を確認するとともに(図29)、水位観測を実施しているボックスカルバートの底面の定期的な維持管理や雨量計周辺の開空度の確保に関する作業と助言を行った。また、同センターの研究者を九州支所に迎え、観測作業や機器の維持管理、および流出土砂の粒度分析についての研修を行った。両県では、随時観測データの解析と研究成果の取りまとめを支援し、県の研究担当者を筆頭としてシンポジウムや学会で共同発表を行った。

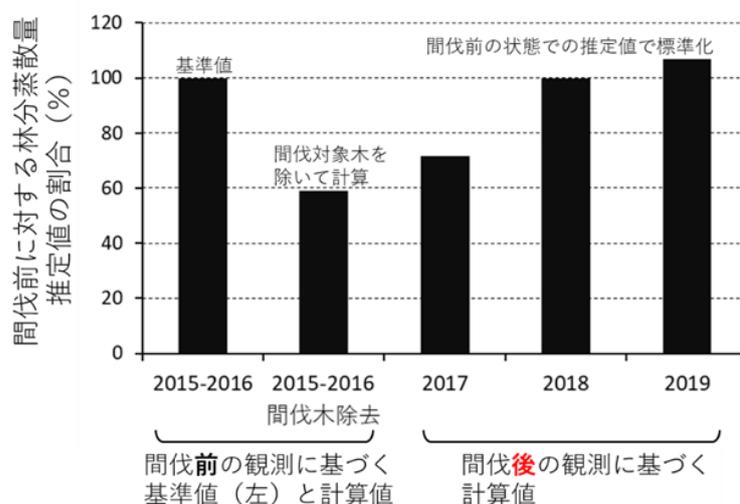


図 28 秋田県長坂試験地における間伐後の林分蒸散量の回復に関する観測に基づく推定結果



図 29 沖縄県国頭村チイバナ試験流域の観測水路の状況

カンボジア王国へはコロナ禍のために渡航が困難であり、その間は同国の森林野生生物開発研究所の共同研究者が現地を取得しているデータを入手して、降水量や森林流域からの水流出量観測の現況確認を行った。これにより、現地では観測を継続してはいるものの機器の劣化や現地雇用者の士気の低下が生じていることが把握できていた。本課題最終年度にあたる令和4年度に同国に渡航し、現地での水文・気象要素の観測状況を視察し、降水および水流出量の観測について、機器の再設定を行うことができた（図30）。同国とは本課題終了後も交流を実施し、水収支や森林の気象要素に関するデータ取得と合わせて、観測継続の意義や解析手法についての共有を進めていく予定である。



図30 カンボジア王国への渡航時に再設定した雨量計（左）と水位観測のための標尺（右）

5. 成果

本課題によってこれまでに得られた成果は、以下の通りである。

全国各地の森林で降水量・水流出量、水質の変動に加えて、日射量、温湿度、水温の観測を継続的に実施する観測網を構築した。さらに集中観測地点では水蒸気交換量、降水・渓流水の安定同位体比、豪雨時のSSの流出量の観測データを収集し、観測結果を公表した。これらの観測データを既存のデータおよび観測地点の情報とともに整理・公表し、データベースのWebページからアクセスできるように設定した。特に森林での水流出量と水質については、基礎的な情報であるにも関わらず我が国で他に利用できるデータベースは存在しておらず、本課題では貴重な情報基盤の整備を大きく進展させることができた。また、森林での降水量・日射量は外部機関による推定値の精度を上昇させる観点からも、極めて重要なデータとなることを示した。

上記データベース内の長期試験地のデータに、樹木年輪内の炭素安定同位体比の分析結果を加えて、皆伐と長期的な気候変動が水流出と水収支に及ぼす影響を抽出し、考察を行った。さらに、我が国で取得した長期データを北米のデータと合わせて、森林施業以降の水流出量の変動について、比較解析を行った。水質の変動に関しては、間伐が実施された試験地での観測データから、その影響を抽出するための解析を行った。また、特に人為活動の影響によって増大してきた窒素負荷量とそれによる渓流水への硝酸態窒素の流出量について、試験地における経年変化と試験地間の広域比較を行った。

これらの解析とその結果を通じて、森林施業や植生の成長、人為活動による大気環境の変化や気候環境の変動などが、森林の水循環に及ぼす影響を詳細に追跡する際に、長期間にわたる森林での観測データが極めて有効であると示すことができた。

水循環諸量の変動評価を行うためのモデルとして、森林小流域の観測結果に対して、汎用性の高いSWATモデルの適用を試行した。その結果、急峻な地形を含む森林からの水流出量は、元来そのような地点での予測評価を想定していないSWATモデルを用いて、かなり精度よく予測できることを明らかにした。一方、SWATモデルによる最適化パラメータは土壌試料や現地での実測値を反映しないことが明らかになった。この結果により、我が国の森林流域での水循環諸量予測に対する汎用モデルの利用に一定の保証を与えることができたほか、モデル自体の高精度化に資する知見を得ることができた。

本課題では、自治体（秋田県・沖縄県）や発展途上国（カンボジア王国）に対して、上記の観測技術や解析結果に基づく交流を実施し、水循環諸量のデータと観測や解析手法に関する情報を提供・共有したほか、共同での観測・解析および結果の公表を実施した。本課題で築いた協力関係を継続的に発展させていくことで、今後さらに広域をカバーする強力な観測網の構築を志向していくことが可能な状況となった。

6. 引用文献

- 1) Aber J.D., Nadelhoffer K.J., Steudler P., Mellilo J.M. (1989) Nitrogen saturation in northern forest ecosystems. *BioScience*, 38, 378-386.
- 2) 徳地直子、大手信人、臼井伸章、福島慶太郎 (2011) 窒素負荷に伴う森林生態系の窒素循環過程の検討. *日本生態学会誌*, 61, 275-290.
- 3) 福嶋義宏、鈴木雅一 (1986) 山地流域を対象とした水循環モデルの提示と桐生流域の10年連続日・時間記録への適用. *京都大学農学部演習林報告*, 57, 162-185.
- 4) Beven K., Lamb R., Quinn P., Romanowicz R., Freer J. (1995) Topmodel. In *Computer models of watershed hydrology*, Singh, V. P. (ed.). 627-668. Water Resources Publications, Colorado.
- 5) Amaru A., Hotta N. (2018) Application of GeoWEPP for evaluating sediment yield in a mountain area: Agatsuma Watershed, Japan. *International Journal of Erosion Control Engineering* 11(1):1-14
- 6) Arnold J.G., Srinivasan R., Muttiah R.S., Williams J.R. (1998) Large area hydrologic modeling and assessment part 1: model development. *Journal of the American water resources association*, 34, 73-89.
- 7) Durło G., Jagiełło-Leńczuk, K., Małek, S., Banach, J., Dudek, K., Kormanek, M. (2016) Hydrological responses to forest cover change in mountains under projected climate conditions. *International Journal of Environmental & Agriculture Research*, 10, 60-68.
- 8) 大貫靖浩、吉永秀一郎、釣田竜也、荒木誠、伊藤江利子、志知幸治、松浦陽次郎、小野賢二、岡本透 (2014) 桂試験地における土層厚の分布と土壌物理特性. *森林総合研究所研究報告*, 13(2), 43-59.
- 9) Shimizu T., Kumagai T., Kobayashi M., Tamai K., Iida S., Kabeya N., Ikawa R., Tateishi M., Miyazawa Y., Shimizu A. (2015) Estimation of annual forest evapotranspiration from a coniferous plantation watershed in Japan (2):

Comparison of eddy covariance, water budget and sap-flow plus interception loss, *Journal of Hydrology*, 522, 250–264.

[研究成果の発表状況] (平成31年／令和元年度～令和4年度)

(1) 誌上発表 (学術誌)

- 飯田真一、玉井幸治、野口正二、小林政広 (2019) 森林における水文過程の解明：プロットから流域スケールの手法による知見と今後の展望. *日本水文科学会誌*, 49, 135–159.
- 稲垣善之 (2019) 四万十川流域のモミ天然林で養分の吸収量を推定する. *森林科学*, 87, 47.
- Iida S., Shimizu T., Shonohara Y., Takeuchi S., Kumagai T. (2020) The necessity of sensor calibration for the precise measurement of water fluxes in forest ecosystems. *Forest-Water Interactions, Ecological Studies Series No. 240*, Springer Nature, Switzerland AG, 29–53.
- 久保田多余子, 野口正二, 清水貴範, 細田育広, 村上茂樹, 壁谷直記, 清水晃, 阿部俊夫, 坪山良夫, 玉井幸治 (2020a) 宝川森林理水試験地観測報告 一本流・初沢試験流域一 (1991年1月～2000年12月). *森林総合研究所研究報告*, 19(2), 159–184.
- 久保田多余子, 野口正二, 清水貴範, 阿部俊夫, 清水晃, 壁谷直記, 延廣竜彦, 飯田真一, 玉井幸治, 村上茂樹, 澤野真治, 坪山良夫 (2020b) 宝川森林理水試験地観測報告一本流・初沢試験流域一 (2001年1月～2010年12月). *森林総合研究所研究報告*, 19(4), 373–400.
- 延廣竜彦, 山野井克己, 溝口康子, 阿部俊夫. (2020) 定山溪森林理水試験地観測報告 (2013年1月～2017年12月). *森林総合研究所研究報告*, 19(2), 195–217.
- Shinomiya Y., Kobayashi M., Tsurita T., Tsuboyama Y., Sawano S., Itoh Y., Ohnuki Y., Shichi K. (2020) Discharge of suspended solids and radiocesium into stream water in a forested watershed before and after line thinning with spur road construction, *Journal of Environmental Radioactivity*, 225, 106418.
- 玉井幸治、澤野真治、小林政広、篠宮佳樹、大貫靖浩 (2021) 東北地方太平洋沖地震直後の流出量増加と浅層地下水位の低下：那珂川中流域低山帯での事例. *水利科学*, 65(5), 31–39.
- 玉井幸治 (2020) 森林の持つ「洪水災害の軽減機能」について. *山林*, 1635, 66–73.
- Itoh Y., Kobayashi M., Okamoto T., Imaya A., Sakai Y., Yoshinaga S. (2021) Influence of chronic and excessive nitrogen influx on forest ecosystems connected to the Tokyo metropolitan area. *Ecological Indicators*, 127, 107771.
- Kubota T., Kagawa S., Abe T., Hosoda I. (2021) Effects of clear-cutting and meteorological and physiological factors on evapotranspiration in the Kamabuchi experimental watershed in northern Japan. *Hydrological Processes*, 35(4), e14111.
- Shimizu T., Tamai K., Hosoda I., Noguchi S., Kominami Y., Abe T., Kitamura K., Kurokawa U., Levia D.F., Kubota T., Kabeya N., Iida S., Nobuhiro T., Sawano S., Iwagami S., Shimizu A., Tsuboyama Y. (2021) Long-term precipitation and stream discharge records at seven forested experimental watersheds along a latitudinal

- transect in Japan: Jozankei, Kamabuchi, Takaragawa, Tsukuba, Tatsunokuchi-yama, Kahoku and Sarukawa. *Hydrological Processes*, 35(10), e14376.
- 玉井幸治、久保田多余子、野口正二、清水貴範、飯田真一、澤野真治、延廣竜彦、荒木 誠、坪山良夫. (2021) 宝川森林理水試験地観測報告 —本流・初沢試験流域— (2011年1月～2016年12月), 森林総合研究所研究報告, 20(1), 49-67.
- Iizuka K., Kosugi Y., Noguchi S., Iwagami S. (2022) Toward a comprehensive model for estimating diameter at breast height of Japanese cypress (*Chamaecyparis obtusa*) using crown size derived from unmanned aerial systems, *Computers and Electronics in Agriculture*, 192, 106579.
- 壁谷直記、清水晃、黒川潮、酒井佳美、鳥山淳平、釣田竜也、小林政広、清水貴範、一柳錦平. (2022) 自動採水器を用いた時間別降雨採水装置の開発. 九州森林研究 75, 85-87.
- Noguchi S., Kaneko T., Iwata A., Iida S., Tamura H. (2022) Estimates of interception losses associated with Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) foliage of logging residues in two thinned watersheds. *日本水文科学会誌*, 52(3), 93-105.
- 篠宮佳樹、小林政広、伊藤優子、大貫靖浩、坪山良夫、澤野真治. (2022) 作業道作設を伴う間伐実施中の渓流水の懸濁物質濃度の定期調査, 森林総合研究所研究報告, 21(2), 103-112.
- Hata Y., Kumagai T., Shimizu T., Miyazawa Y. (2023) Implications of seasonal changes in photosynthetic traits and leaf area index for canopy CO₂ and H₂O fluxes in a Japanese cedar (*Cryptomeria japonica* D. Don) plantation, *Ecological Modelling*, 477, 110271.
- 壁谷直記、清水晃、酒井佳美、鳥山淳平、釣田竜也、小林政広、清水貴範、一柳錦平. (2023) 九州北部の結晶片岩からなる森林流域における基底流出水の平均通過時間の推定、九州森林研究, 76, 55-59.
- 久保田多余子、野口正二、阿部俊夫. (2023) 釜淵森林理水試験地観測報告—1・2・3・4号沢試験流域— (2011年1月～2016年12月), 森林総合研究所研究報告, 21(4), 305-335.
- 野口正二、村上亘、阿部俊夫、細田育広. (2023) 釜淵森林理水試験地観測報告—1・2・3号試験流域— (2006年1月～2010年12月), 森林総合研究所研究報告, 21(4), 275-303.

(2) 口頭発表 (平成31年／令和元年度～令和4年度)

- 細田育広 (2019) 森林のある山間で観測された全天日射量の簡易な評価法の検討. 水文・水資源学会研究発表会要旨集 (2019), 210-211.
- 稲垣善之、藤井一至 (2019) 日本の森林生態系における養分供給源：降水、風化、リターの寄与率. 地球惑星科学連合 2019 年大会要旨集, MIS13-06.
- 金子智紀、和田覚、新田響平、田村浩喜、野口正二 (2019) スギ人工林の間伐が水流出に及ぼす影響. 東北森林科学会大会講演要旨集, 24, 42.
- Oda T., Band L.E., Green M.B., Scanlon T.M., Sebestyen S.D., McGuire K.J., Adams M.B., Katsuyama M., Shimizu T., Urakawa R., Fukuzawa K., Ohte N. (2019) Streamflow response and recovery after forest disturbance in different climates.

AGU Fall Meeting 2019, H43G-2069.

清水貴範、飯田真一、壁谷直記、岩上翔、小林政広、玉井幸治、野口正二、延廣竜彦、清水晃（2019）関東地方の人工林小流域の植栽直後と近年における水収支の変化について。

日本水文科学会学術大会発表要旨集(2019), 28-29.

今村直広、山下尚之、小林政広、清水貴範、澤野真治、玉井幸治、飯田真一、壁谷直記、坪山良夫（2020）SWATモデルを用いた茨城県の森林小流域における流出量の推定。日本森林学会大会学術要旨集, 131, 176.

Imamura N., Yamashita N., Kobayashi M., Shimizu T., Sawano S., Tamai K., Iida S., Kabeya N., Tsuboyama Y. (2020) Estimation of discharge at small forest watersheds in Ibaraki Prefecture by using SWAT model. JpGU-AGU Joint Meeting 2020, AHW32-P26.

稲垣善之、酒井寿夫（2020）四万十川モミ天然流域における流出負荷量の推定手法の比較。生物地球科学研究会現地セッション, 7.

稲垣善之、酒井寿夫、篠宮佳樹、吉永秀一郎、山田毅、野口享太郎、森下智陽、藤井一至（2020）四万十川の森林流域において気象条件が渓流水質に及ぼす影響。日本土壌肥料学会大会講演要旨集, 66, 132 (8-1-37).

金子真司、岡本透（2020）瀬戸内気候の森林渓流水質への影響。日本土壌肥料学会講演要旨集, 66, 4 (1-1-11).

野口正二、清水貴範（2020）長期水文観測データを用いた全国の森林流域における降水-流出特性の比較。日本森林学会大会学術要旨集, 131, 175.

清水貴範、飯田真一、壁谷直記、岩上翔、小林政広、玉井幸治、野口正二、延廣竜彦、清水晃（2020）人工林小流域での若齢時および壮齢時の水循環諸量の変化について。日本森林学会大会学術要旨集, 131, 176.

阿部俊夫、久保田多余子、小川泰浩、村上亘（2021）釜淵森林理水試験地における間伐から3年目までの浮遊土砂流出量。東北森林科学会大会講演要旨集, 26, 38.

細田育広（2021）山間で観測された全天日射量の簡易な評価法の再検討。水文・水資源学会/日本水文科学会研究発表会要旨集(2021), PP-A-41.

Imamura N., Wang K., Onodera S., Shimizu Y., Kobayashi M., Shimizu T., Yamashita N., Shinomiya Y., Tamai K., Sawano S., Iida S., Kabeya N., Shimizu A., Tsuboyama Y. (2021) Water discharge at forested watersheds throughout Japan by using SWAT. JpGU-AGU Joint Meeting 2021, A-HW22.

稲垣善之、稲垣昌宏、志知幸治、吉永秀一郎、山田毅、三浦覚、篠宮佳樹、藤井一至（2021）四万十川流域における渓流水質の空間変動：1999年と2020年調査の比較。日本森林学会大会学術要旨集, 131, 200.

稲垣善之、酒井寿夫、鳥居厚志、篠宮佳樹、藤井一至（2021）四万十川森林流域における塩素の動態。日本地球惑星科学連合大会(2021), MIS11-09.

稲垣善之、酒井寿夫、鳥居厚志、篠宮佳樹、藤井一至（2021）Twenty-year changes of stream water chemistry in a forest ecosystem in the Shimanto River Basin. The EAFES abstract book, 9, 93.

- Kobayashi M., Itoh Y. (2021) Effect of stream water from nitrogen-saturated forests in the Koise River Basin on nitrogen concentrations in the main river. JpGU-AGU Joint Meeting 2021, A-HW22-P02.
- 久保田多余子、香川聡、阿部俊夫、細田育広. (2021) 森林の成長が長期蒸発散量に及ぼす影響. 水文・水資源学会/日本水文科学会研究発表会要旨集(2021), PP-A-39.
- 小田智基、Mark B Green, Lawrence Band, Todd Scanlon, 清水貴範、Stephen Sebestyen, Kevin McGuire, Mary Adams, 勝山正則、大手信人 (2021) 日本と米国の森林伐採試験から見える森林の水源涵養機能. 日本森林学会大会学術要旨集, 132, 81.
- 清水貴範 (2021) 森林総合研究所による森林流域での長期・広域的な降水・流出観測. 日本森林学会大会学術講演集, 日本森林学会大会学術要旨集, 132, 82.
- 田村浩喜、野口正二、金子智紀、長岐昭彦、和田覚、新田響平、阿部実 (2021) スギ人工林の間伐と森林機能～秋田県長坂試験地における観測結果より～. 治山シンポジウム 61, 43-46.
- 細田育広. (2022) 竜ノ口山南谷 3%面積におけるヒノキ林 30%間伐後 4 年間の水流出の変化. 日本森林学会大会学術講演集, 133, 208.
- 飯田真一. (2022) 遮断. 水文・水資源ハンドブック第二版(朝倉書店、640 頁), 31-33.
- Iida S., Noguchi S., Araki M., Nitta K., Wada S., Narita Y., Tamura H., Kaneko T. (2022) Effect of artificial thinning on transpiration of a Japanese cedar stand and its trend after the treatment. Japan Geoscience Union Meeting 2022, AHW23-P03.
- Kobayashi M., Itoh Y. (2022) Evaluation of water and solute flux in a forest soil. Japan Geoscience Union Meeting 2022, AHW24-19.
- 小林政広 (2022) 森林土壌の保水性・透水性について. 土壌の物理性, 150, 45.
- 小林政広 (2022) 日本地球惑星科学連合(JpGU)2022 年大会 A-HW24 Material transportation and cycling at the land-sea interface: from headwaters to the ocean 開催報告. 土壌の物理性, 152, 27-29.
- 久保田多余子、阿部俊夫、細田育広 (2022) 流域水収支法で推定した非積雪期の長期蒸発散量と気象要素との関係. 水文・水資源学会/日本水文科学会研究発表会要旨集(2022), PP-1-23.
- 久保田多余子、阿部俊夫、小川泰浩、伊藤優子、野口享太郎、延廣竜彦、釣田竜也 (2022) 釜淵森林理水試験地における降水・河川水の酸素・水素安定同位体比の特徴. 関東森林学会大会講演要旨集, 12, 21.
- 小田智基、久保田多余子、岩上翔、飯田真一、清水貴範、江草智弘(2022) 日本の森林流域における流域スケールがもたらす水収支の不均一性. 日本森林学会大会学術講演集, 133, 207
- ODA T., Iwasaki K., Egusa T., Kubota T., Iwagami S., Iida S., Momiyama H., Shimizu T. (2022) Area-dependent inter-catchment groundwater flow in forested catchments: a perspective based on multi-point water balance observations in Japan. American Geophysical Union Fall Meeting 2022, H51C-02.

清水貴範、飯田真一、玉井幸治、壁谷直記、清水晃（2022）比較的容易に取得できる気象観測値から常緑林の純放射量を推定する方法について．水文・水資源学会／水文科学会研究発表会要旨集（2022），0P-6-06.

阿部俊夫、久保田多余子、野口正二、細田育広（2023）皆伐後の森林回復過程における融雪期の流出—釜淵森林理水試験地での解析—．日本森林学会大会学術講演集，134，P-139.

細田育広（2023）ヒノキ人工林 30%間伐後 5 年間の林内雨量の経過．日本森林学会大会学術講演集，134，200.

飯田真一、野口正二、荒木誠、新田響平、和田覚、成田義人、田村浩喜、阿部俊夫、金子智紀（2023）間伐はスギの蒸散活動や樹液流動特性にどのような影響を与えるのか？．日本森林学会大会学術講演集，134，J-1.

今村直広、Kunyang Wang、小野寺真一、清水裕太、小林政広、清水貴範、阿部俊夫、飯田真一、稲垣善之、岡本透、壁谷直記、久保田多余子、小南裕志、澤野真治、篠宮佳樹、高梨聡、玉井幸治、釣田竜也、野口正二、延廣竜彦、細田育広、山下尚之（2023）SWAT を用いた山地森林流域における流出量の再現．日本森林学会大会学術講演集，134，P-319.

久保田多余子、阿部俊夫、小川泰浩、伊藤優子、釣田竜也、野口享太郎、延廣竜彦、小林政広（2023）多雪地域にある釜淵森林理水試験地における積雪・融雪期の流出機構．日本森林学会大会学術講演集，134，P-315.

（3）出願特許

なし

（4）受賞等

なし

（5）一般への公表・報道等

稲垣善之（2019）森林の湧水がおいしい理由．グリーン四国，1190:9.

野口正二（2020）森林の災害リスク低減に向けて水文学的視点から考える．農村と都市をむすぶ，820，46-50.

岡本透（2020）防災意識を高めるために．森林総合研究所関西支所研究情報，135:4.

田村浩喜（秋田県林業研修センター）（2021）スギ人工林の間伐と森林機能～秋田県長坂試験地における観測結果より～．第59回治山シンポジウム（講演）．

（6）研究分野における成果の発展・牽引

本課題実施期間中の「理水試験地データベース」および「森林水質データベース」の申請利用者数はそれぞれ 24 件・17 件であった。国際誌や Web サイトでの観測情報の公開と Web サイトの整備に伴い、海外からの利用申請も増加しており、今後さらに利用者数や利用される機会が増えることが期待できる状況である。

本課題では毎年度に外部有識者（広島大学・小野寺真一教授、東京大学・熊谷朝臣教授）を招聘して評価会議を行った。データベースを維持・発展させるための継続的な取り組みに

加えて、蓄積したデータやその活用、さらには地方自治体や発展途上国との連携によるデータの共有と共同での観測・解析・発表などの実施について、高い評価を得た。継続的な観測データ・情報の蓄積と公開に加えて、長期間の経年変動や広域的な比較解析を、今後も継続的に実施することに対して、なお一層の強い期待が表明された。

(7) 政策への寄与・貢献

本課題の成果によって、我が国の地球観測の推進戦略の課題解決に貢献するだけでなく、森林と水循環の相互作用の定量化やその将来予測に関して、データの蓄積とともに評価手法の開発を行うことで、国内外の課題解決のための施策の提案に対して、科学的な知見を提供できたと考えている。政策への貢献について直接的な実績には至らなかったが、林野庁の委託事業である「水源森林保全調査・有明海等の閉鎖性海域と森林に関する調査」において知見の共有を行ってきている。