

## 略 歴

- 2002年 9月 九州大学大学院  
生物資源環境科学研究科  
博士後期課程 修了
- 2002年 10月 九州大学大学院  
農学研究院 非常勤学術研究員
- 2003年 4月 日本学術振興会 特別研究員PD  
(山梨大学大学院  
医学工学総合研究部)
- 2006年 4月 21世紀COE研究員  
(山梨大学大学院  
医学工学総合研究部)
- 2007年 10月 鳥取大学農学部  
生物資源環境学科  
(現、生命環境農学科) 准教授  
現在に至る

## 持続的かつ効率的な水利用に向けた 森林流域の清澄水供給ポテンシャル評価

日本の森林は、下流域に対して水資源を供給する重要な場である。このため、資源としてどのような水をどのくらい下流に供給できるかという“河川水の質と量の情報”が重要になる。本研究では、森林流域の水供給機能を量と質の両面から評価する新しい指標として清澄水供給ポテンシャル (Pot<sub>清澄水</sub>) を提案した。また、Pot<sub>清澄水</sub>の地域的特徴を明らかにした。さらに、上流域での水利用に適した森林管理を検討する際のPot<sub>清澄水</sub>の有用性を示した。

Pot<sub>清澄水</sub>については、森林地帯における降水量、流量、および濁度に基づいて評価するものとし、実際の森林流域 (岡山県・蒜山試験地) における観測データを用いた。まず、「河川の流量が、設定された水需要量 (年間を通して一定とする) に満たない場合 (水不足が生じた日) にはその不足分を清澄水 (濁度 < 30FTU) の余剰量で補填する」というルール下で見込まれる最大の水需要量を算出した。次いで、この最大水需要量を年降水量で割った値をPot<sub>清澄水</sub>とした。蒜山研究林では、1年間のうち濁水あるいは清澄水とみなされた日数は、それぞれ31、334日であった。つまり、この流域ではPot<sub>清澄水</sub>は0.51であり、清澄水で水不足を補いながら年降水量の約半分に対応する水需要量まで対応することが可能であると評価できた。

Pot<sub>清澄水</sub>の地域的特徴については、既往研究のレビューから抽出した各地の降雨流出特性に関するパラメータとそのパラメータが組み込まれた水循環モデル (近藤ら、1992) によるシミュレーションに基づいて明らかにした。特に、基岩部の最大貯留容量を表すパラメータ (Bmax) と地質の関係に着目した。文献および著者らの観測結果を参考にBmaxを50-1000mmの範囲で変化させてシミュレーションした結果、Pot<sub>清澄水</sub>は0.29-0.50となり、Bmaxとともに増大した。Bmaxは地質との関連が認められるパラメータであるため、地質がもたらす地下部の貯水特性がPot<sub>清澄水</sub>に大きく影響することが示唆された。

上流域の水利用に適した森林管理を検討する際のPot<sub>清澄水</sub>の有用性については、福岡県内の地質の異なる2流域(変成岩流域と花崗岩流域;互いの距離は18km程度)で生じるPot<sub>清澄水</sub>の違いに基づいて解析した。変成岩流域と花崗岩流域のPot<sub>清澄水</sub>は、それぞれ0.25と0.52と算出され、清澄水に期待できる程度は大きく異なっていた。このことは、同一地域の森林流域であっても、場所によって水源林としての効果や意味合いが大きく異なることを意味している。上流域での社会的・経済的問題が深刻化する中、本研究が提示したPot<sub>清澄水</sub>は、森林流域の水資源供給機能を定量的に捉える一つの指標として有用であると結論づけられる。

## 1. はじめに

日本の森林は、国土の約3分の2を占めており、そのうち約40%が人工林である<sup>1)</sup>。現状の人工林では、樹齢50年を超えるものが全蓄積量の過半数を占め、木材としての利用が期待される。しかし、後継者不足や木材価格低下により、1980年代以降林業は厳しい状況にある。

一方、日本の上流域は、多様な公益的機能を有する場と認識されている。とりわけ、森林は下流域に対して安定的に水資源を供給する場、すなわち水源林としての役割に大きな期待が集まっている。多くの自治体では、森林の公共財としての側面に着目し、森林の公益的機能(特に、水源涵養機能)の維持と強化に向けた財源の確保と補助金の供出を行うことで、森林を整備している。また、集落の過疎化と利水施設の老朽化が同調的に進み、奥山や里山の管理のみならず、田畑の管理、ため池や用水路等の利水施設の管理が放棄される問題も生じている<sup>2)</sup>。これは、水資源の需給バランスが不安定になることを意味しており、効率的かつ持続的な水利用の点からも森林の水源涵養機能への注目は高い。

このような状況にあっては、管理対象となる上流域の森林が資源としてどのような水をどのくらい下流に供給できるかという“河川水の質と量の情報”が重要になる。一見同じような森林であっても、“きれいな河川水(清澄水)”,あるいは“濁っている河川水(濁水)”を供給する能力は流域によって異なる可能性があり、水源涵養機能は場所ごとに変動する。このため、水資源対策としての森林整備の方針や方法は一律に設定されるものではなく、場所ごとに設定されることが望ましい。しかし、そのような森林の水供給能力を地域ごと、あるいは流域ごとに評価した例はなく、場所ごとの特性を考慮した森林整備は行われていない。したがって、持続的かつ効果的な水資源供給のための森林管理手法の検討や管理の効果検証に資する情報を整備することは、日本における喫緊の課題である。

森林流域における水の需給バランスや水供給機能については、これまでもいくつかの研究がある。例えば、水供給に対する森林の役割<sup>3)</sup>、水の貯留機能について森林とダムとの比較<sup>4)</sup>、森林の変化と水源涵養機能の関係<sup>5,6)</sup>、および流況曲線の決定要因について研究したものがある<sup>7-10)</sup>。これらは、対象とする森林がどれだけ安定的に水を供給できるかという点や地質や植生が高水や低水にどのような影響をもたらすかという点に注力し、水資源利用上の有用な知見を得ている。しかしながら、水量のみからアプローチする研究ばかりであり、水質を組み込んだアプローチは著者の知る限りない。

一概に水質と言っても分析項目は多岐にわたるが、その中で水の濁りに関する項目(例えば、濁度や懸濁物質濃度)は最も基本的である。原水の濁りは、浄水コストに直接的に反映されるとともに、水そのものの利用しやすさや安全性に関わる<sup>11)</sup>。このため、水利用上はできるだけ安定した量で、

澄んでいる状態の水が求められる。反面、濁水をもたらす出水や濁水に含まれる微細土砂は、河川や湖沼、そして沿岸域に至るまでの水域生態系の形成にとって不可欠である<sup>12)</sup>。このため、流域スケールでの生態系や水・物質循環を維持するには、安定した流れや澄んだ水ばかりではなく、出水時の流れや濁った水も必要である。したがって、森林を対象とした水の需給バランスや水供給機能に関する既往の解析手法が水の濁りに関する情報を考慮できるよう改良されるならば、その手法は量と質の両面から森林の水源涵養機能を評価するための有効な手法となりうる。

以上より、森林の水源涵養機能は、水利用や水資源対策の点から極めて重要な研究テーマであるものの、上流域に限定的な問題ではなく、また水量の視点のみから処理できる問題でもないことがわかる。つまり、「土砂を含まない“澄んだ水（清澄水）”は積極的に確保・利用し、逆に土砂を含む“濁った水（濁水）”はできるだけ下流へ流す」というコンセプトが鍵であり、今後の持続的かつ効率的な水利用にとって不可欠であると考えられる。さらに、このコンセプトは、上流域から沿岸域に至るまでの水と土砂の連続性を考慮した森林管理や水資源対策を検討する際の基礎になるとと思われる。

本研究では、量と質の両面から森林の水源涵養機能を定量的に評価する手法を提示することを目指し、“清澄水供給ポテンシャル（Pot<sub>清澄水</sub>）”という新たな指標を提案した<sup>13)</sup>。また、各地の水源涵養機能の特徴を把握するために、Pot<sub>清澄水</sub>の地域の特徴を明らかにした。さらに、上流域での水利用に適した森林管理を検討する際のPot<sub>清澄水</sub>の有用性を示した。

## 2. 方 法

### 2.1. Pot<sub>清澄水</sub>の定義

Pot<sub>清澄水</sub>は、日々の生活や河川の流れを維持するために必要な水量をできるだけきれいな水でまかないながら、逆に出水時の濁った水はできるだけ利用せずに下流に流すことを想定したときに生まれる概念である。このため、きれいな水が十分に流れている時に取水・確保することにより、水不足が生じた時にその水によって不足分を補うことを考える。このPot<sub>清澄水</sub>は、森林流域を流れる河川の流量と濁りの度合い（濁度）に基づいて評価するものとし、本研究では実際の森林流域における観測データを用いて算出することとした。その手順は次の1～5の通りである。

- 1) 1年分の流量と濁度の情報を日単位で用意する。
- 2) 濁度の情報から各日の河川水が清澄水であるか濁水であるかを判別する。
- 3) 年間を通じて一定の日水需要量を設定したときに、その量に河川の流量が満たない日（水不足が生じた日）の不足量とその量を超えた日（水余剰が生じた日）の余剰量をそれぞれ積算する。ただし、余剰量については、清澄水と濁水を区別して積算する。
- 4) 算出した水不足量は清澄水の余剰量で補填できるものとし、この条件で見込まれる最大の日水需要量（水不足量と清澄水の余剰量が釣り合うような日水需要量）を探索する。
- 5) さらに、この最大日水需要量と平均日降水量（年降水量を日数365で割った値）との比をPot<sub>清澄水</sub>と定義する。

調査対象地は、中国山地中部（岡山県真庭市）に位置する鳥取大学・蒜山研究林の水文試験流域（116ha）<sup>14)</sup>とした。ここは、凝灰角礫岩が基盤となっており、表層は黒ボク土で覆われていた<sup>15)</sup>。

2017年7月以降の1年間にわたって河川の流量と濁度のデータを得た。解析は日単位のデータに基づいて行うこととし、流量として日流出高、濁度として日最大濁度を用いた。本調査地では、懸濁物質濃度、濁度、および環境基準<sup>16)</sup>との対応を考え、河川水の日最大濁度が30FTUを越えた場合を濁水とみなした。

## 2.2. Pot<sub>清澄水</sub>の地域的特徴

Pot<sub>清澄水</sub>の地域的特徴については、既往研究の知見と“降雨流出－濁水発生モデル”によるシミュレーションに基づいて検討した。まず、源流域における河川水の濁り方（濁度や浮遊土砂濃度の変動特性）と各地の降雨流出特性（地下水の貯留・排水特性）に関する情報を抽出した。次いで、得られた情報が主たるパラメータとして組み込まれている降雨流出－濁水発生モデルに、基準となる1年分の日雨量データと日蒸発散データを入力することで流量と濁度を算出した。

源流域河川の濁りは、降雨に伴って河川流量が上昇する際に生じ、流量が減水する過程で速やかに消えていくパターンが一般的であり<sup>17,18)</sup>、流量の日々変動から濁りの発生を判別することとした。また、源流域河川での流量変動の特徴は、短期的にも長期的にも地質と関係があるとされており<sup>7,8)</sup>、基本モデルには、近藤ら<sup>19)</sup>の指数型貯留量のタンクモデル（ここでは洪水流出の部分をも1段のタンクモデルとなるように若干改良した）を用いた。このモデルには、地質に由来する地下部の貯留・排水特性に関するパラメータが含まれており、各地の降雨流出特性が表現される。地下部の貯留特性は、藤枝<sup>20)</sup>の流域保留量に関する報告を参考にした。

モデルに入力する日雨量データは、福岡気象台の1983年のものとした。これは、年降水量に着目したときに、1) このデータが日本の年降水量の平年値にほぼ等しく代表性があると考えられたこと、および2) 後述の2.3節においてPot<sub>清澄水</sub>の流域間差を具体的に解析する際に福岡県内の地質の異なる2つの森林水文試験地（御手洗水流域、弥山流域）のデータを用いたことが理由である。

日蒸発散データについては、遮断蒸発と蒸発に区別して算出した。遮断蒸発は遮断率(Ei/P)の特徴に着目し<sup>21,22)</sup>、次のように表した。

$$E_i/P = I_f + (I_0 - I_f) \exp(-kP) \quad (\text{式1})$$

ここで、Eiは日遮断量、Pは日降雨量、I<sub>f</sub>は最終遮断率、I<sub>0</sub>は初期遮断率、kは定数(>0)である。

蒸散量については、夏に多く冬に少なくなると考え<sup>23)</sup>、次のように表した。ただし、日雨量が5mm以上の日については、蒸散量はゼロとした。

$$E_t = (T_{rmax} + T_{rmin}) / 2 + (T_{rmax} - T_{rmin}) / 2 \times \sin((DOY - 123) / 366 \times 2\pi) \quad (\text{式2})$$

ここで、E<sub>t</sub>は日蒸散量、T<sub>rmax</sub>は年最大日蒸散量、T<sub>rmin</sub>は年最小日蒸散量、DOYはその年の1月1日を期日とする経過日数である。

## 2.3. 上流域での水利用に適した森林管理を検討する際のPot<sub>清澄水</sub>の有用性

上流域での水利用に適した森林管理を検討する際のPot<sub>清澄水</sub>の有用性については、ある特定の地域内で生じるPot<sub>清澄水</sub>の変動に基づいて示した。ここでは、福岡県内の地質の異なる2つの森林流域（御手洗水流域、弥山流域）の観測から得られた降雨流出特性と蒸発散特性に基づいた。

御手洗水流域(9.5ha)は、緑色片岩と蛇紋岩を基盤とし、ヒノキ人工林と広葉樹二次林で覆われていた<sup>24)</sup>。他方、弥山流域(2.98ha)は、花崗岩を基盤とし、スギとヒノキの人工林で覆われていた<sup>25)</sup>。両流域間の距離は18km程度であったが年間の流量変動の様子は大きく異なった。御手洗水流域の

基底流量は年間を通じて低いレベルで推移したのに対し、弥山流域の基底流量は夏から秋にかけて大きく増加した。

両流域で決定したパラメータをモデルに組み込むとともに、前節と同様に福岡気象台の1983年の日雨量データを入力して両流域のPot<sub>清澄水</sub>をそれぞれ算出した。さらに、両者のPot<sub>清澄水</sub>の違いが、水源涵養機能の強化を目的とした森林整備を実施する際の意思決定に与える影響について検討した。

### 3. 結果と考察

#### 3.1. Pot<sub>清澄水</sub>の評価例

蒜山研究林において観測された日降水量、日流量、および濁度（日最大値）を図1に示す。これらのデータから濁水あるいは清澄水とみなされた日数を集計すると、それぞれ31、334日であった。また、この流域のPot<sub>清澄水</sub>を算出すると0.51となり、この流域では、清澄水で水不足を補いながら年降水量の約半分に相当する水需要量まで対応可能であると評価された。

森林の水源涵養機能は、水量調節（洪水緩和と水資源貯留）と水質浄化の作用に着目される。しかし、これまでに水質、特に水処理において最も重要となる濁度<sup>26)</sup>を考慮した定量的な機能評価は行われていない。このため、本研究が提案するPot<sub>清澄水</sub>は、新しい視点を含んでおり、上流域にとどまらず下流域での水利用を考慮した機能評価を可能にしている。

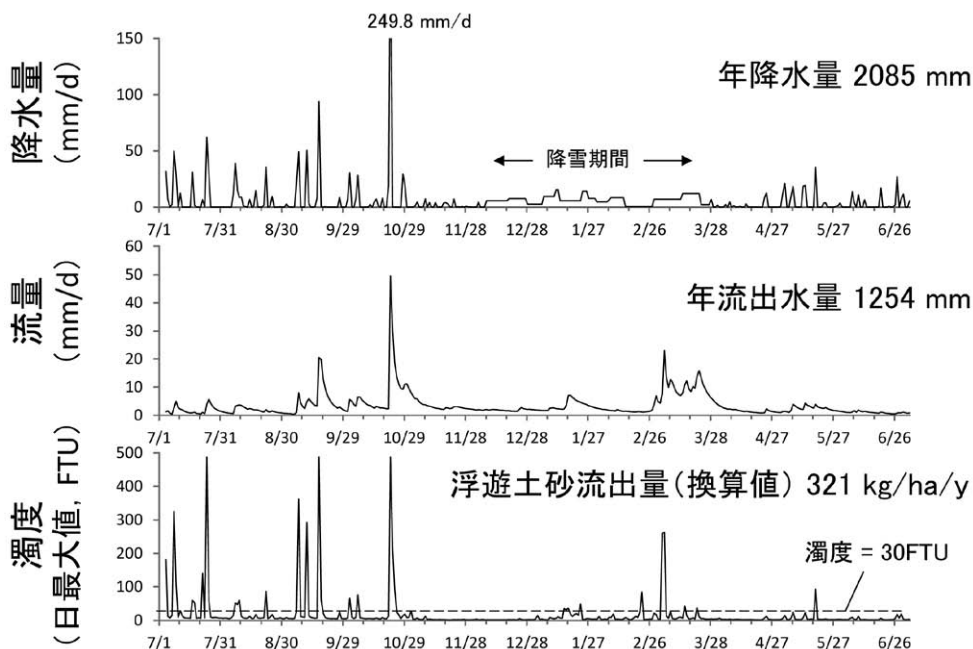


図1. 2017年7月5日からの1年間において蒜山研究林で観測された日降水量。

日流量、および濁度（日最大値）。年降水量、年流出水量、および浮遊土砂流出量を算出すると、それぞれ2085mm、1254mm、321kg/haであった。また、降雨や融雪に伴って起こる流量変化に対する濁度変化の応答は鋭敏であり、濁度の上昇は概ね流量が上昇する時に限られていた。

### 3.2. Pot<sub>清澄水</sub>の地域的特徴

既往研究<sup>20)</sup>によると、流域の貯留水量は地質によって異なり、変動はあるものの風化花崗岩や変成岩による森林流域で大きくなる傾向がある。この貯留水量は、樹冠、土層、および基岩によってもたらされるが、樹冠や土壌の状態を統一して考えるならば、本研究で用いる降雨流出モデル<sup>19)</sup>の主要なパラメータである基岩部の貯留容量 (Bmax) と読み替えることができる。文献および著者らの観測結果を参考に Bmax を 50–1000mm の範囲で変化させてシミュレーションすると、Pot<sub>清澄水</sub> は 0.29–0.50 の範囲となり、Bmax とともに増大した (図 2)。シミュレーションでは、土層の貯留容量 (Amax = 300)、洪水流出孔係数 (0.6316)、地下水流出孔係数 (0.02)、日降水量 (1983 年の福岡気象台のデータ)、蒸発散のパラメータ ( $I_f=0.16$ 、 $I_0=1.0$ 、 $k=0.19$ 、 $Tr_{min}=0.5$ 、 $Tr_{max}=2.0$ ) は固定しており、流域の地質によって左右される地下水の貯留特性が Pot<sub>清澄水</sub> に大きく影響することが示唆された。特に、花崗岩や変成岩の地質における Pot<sub>清澄水</sub> は、火山岩、堆積岩、火山灰由来の地質におけるそれよりも相対的に大きいと予想された。

当然ながら、実際の河川流量は、水の流出を左右する流域の貯留・排水特性のみならず降水量や蒸発散の影響も受けている。このため、Pot<sub>清澄水</sub> を詳細に検討するためには、対象となる流域の気象条件 (降水量の多寡、気温の高低など) や森林状態 (林齢、立木密度、葉量、サイズ等) といった時間的変動が無視できない要素も考慮する必要がある。また、将来の地球温暖化の影響を鑑みた場合、降水パターン (強度、継続時間、雨/雪) の変化、あるいは植生の潜在分布域と光合成・蒸散特性の変化なども予想されるため<sup>27)</sup>、本研究のシミュレーションで固定条件として用いた降水量や遮断蒸発と蒸散のパラメータを可変条件とする必要があると思われる。この意味で、気候変動に伴う Pot<sub>清澄水</sub> の変化度合いを定量的に評価することは、本研究ではカバーしきれなかった部分であるが、喫緊の課題である。しかしながら、地質といった時間的変動がほとんどない (私たちが生活する時間スケールと対比して十分に長い時間スケールを持つ) 要素によって Pot<sub>清澄水</sub> が大きく変動しうる点を本研究が示唆した意義は大きく、森林流域における量と質を考慮した水資源対策を検討する際に水文地質学的特性が第一に留意されるべき事項であると指摘できる。

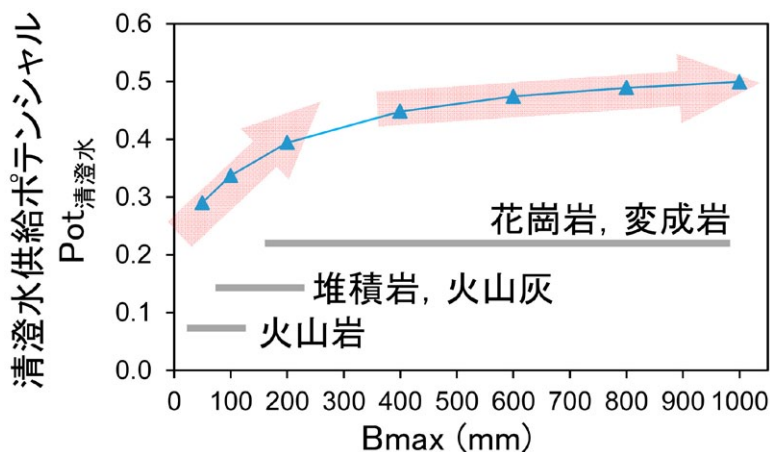


図 2. Bmax (50–1000mm) の変化に伴う清澄水供給ポテンシャル (Pot<sub>清澄水</sub>) の変化。

清澄水供給ポテンシャルは、地質による大まかな区分が可能であることがわかる。ただし、図に示した地質ごとの Bmax の変動幅は、藤枝<sup>20)</sup>が報告している保留量を Bmax に読み替えることによって作成したものである。

### 3.3. 上流域での水利用に適した森林管理を検討する際のPot<sub>清澄水</sub>の有用性

福岡県内の変成岩からなる流域と花崗岩からなる流域に着目し、観測データから同定したパラメータを用いてPot<sub>清澄水</sub>を評価した結果、それぞれ0.25と0.52であり、清澄水に期待できる程度は両者で大きく異なっていた(図3)。このことは、同一地域の森林流域であっても、場所によって水源林としての効果や意味合いが大きく異なることを意味している。同時に、水利用に適した森林管理の方法や施策の決定において、流域ごとの流出特性(特に地質の特性)を踏まえることの重要性を示唆している。

現在の日本における森林整備は、水源涵養機能の強化や土砂流出防備機能の強化を目標に掲げ、間伐施策が中心であり、多くの補助金が投じられている。しかしながら、そのような森林の機能を定量化することは難しく、また個々の地域で実施された施策の効果を科学的に検証されることはほとんどない。さらに、施策効果の検証ができるよう森林整備がデザインされることもほとんどない。したがって、期待するような機能が備わっていない森林であるにもかかわらず、その機能強化を目指すような施策が行われている場合もありうる。このため、たとえ施策効果の検証が困難であったとしても、対象地の水文地質特性に基づいてPot<sub>清澄水</sub>が評価されることは、森林整備とその水利用上の目標とのミスマッチを防ぎ、効果的な森林管理を行うための基礎情報を提供することにつながる。

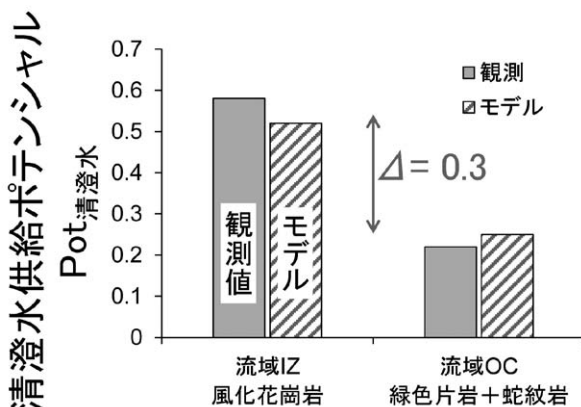


図3. 清澄水供給ポテンシヤル(Pot<sub>清澄水</sub>)に関する同一地域内での流域間の比較。

図中の流域IZ(弥山試験地)の地質は花崗岩であり、流域OC(御手洗水試験地)は緑色片岩と蛇紋岩で構成される変成岩である。両者のPot<sub>清澄水</sub>は、約0.3の差があった。なお、観測値からのPot<sub>清澄水</sub>を併記したが、これを算出する場合、流域IZと流域OCでは、それぞれ2011年(年降水量2469mm)と2004年(年降水量2155mm)のデータを用いた。

## 4. おわりに

上流域での社会的・経済的問題が深刻化する中、良質な水資源を効率的・持続的に確保すべく森林の水源涵養機能への期待は今後ますます高まると思われる。本研究が提示したPot<sub>清澄水</sub>は、その機能を定量的に捉える一つの指標として有用であると考えられる。また、本研究で整備した降水量、河川流量、濁度のデータセットは、中国山地中部の蒜山研究林で取得したものであり、全国的にみても貴重なデータである。なぜなら、この地域は、豪雪地帯の南限域(比較的温暖であり雪が雨に変わりやすい地域)であり、温暖化が流域の水循環に与える影響が懸念されるからである。

特に、流量と濁度の日単位のデータは、1年間に渡って1分間隔で計測したデータが元になっているためデータの品質は高く、かつ降雨時や融雪時の短い時間スケールでの流出-濁度形成の解析が可能である。このため汎用性・利用可能性が高いと考えられる。さらに、本研究が採用したモデルは構造が非常に単純であり、広域的に河川流量の年変動の特徴を捉えるには適している。逆に言えば、このモデルでは流域内において部分的に生じる現象を再現したり物理的な水移動過程を追跡したりすることはできないため、流域内で実施される様々な森林整備の効果を評価することはできない。この点は、本研究のモデルやシミュレーション手法の限界点である。しかしながら、流域の水文特性や河川の濁りの特性をほとんど考慮せずに森林整備を行っている現状を踏まえると、その構造や手法の簡潔さは、大きな利点であり、今後の森林政策や計画の立案において持続的な水利用を考慮する第一歩として有用であると思われる。

本研究では、水供給のうち清澄水の供給に着目して検討を行ったが、濁水の水供給についても同様の解析や検討が可能である。上流の森林地帯から下流の河川や沿岸地域までを含めた流域管理を考える場合、清澄水のみならず濁水も重要である。これは、濁水に含まれる土砂（栄養物質も含む）が河川や沿岸域の地形や生態系の維持にとって不可欠だからである。近年各地で注目されている海岸線の浸食問題やダム貯水池の堆砂問題からも分かるように、上流からの河川を通じた土砂輸送現象を無視することはできない。この意味でも、本研究が示したPot<sub>清澄水</sub>の評価や解析手法は、水と土砂の動態に基づく流域管理を検討する上で有用であると思われる。将来的には、森林域での研究のみならず、農地や都市域での水と土砂の動態に関する研究、植生の環境応答を考慮した水循環研究、人口動態や生活インフラの管理に関する社会・経済学的研究、および様々な時空間スケールを扱うことのできるモデルシミュレーションを行うことで、流域での持続的かつ効率的な水利用を実現することにつながるとと思われる。

## 謝 辞

本研究では、九州大学農学部附属演習林における御手洗水試験地でのプロジェクト（代表・小川滋）、および戦略的創造研究推進事業 CREST「荒廃人工林の管理により流量増加と河川環境の改善を図る革新的な技術の開発」（代表・恩田裕一）における弥山試験地でのプロジェクト（代表・大槻恭一）で得られたデータの一部を提供していただいた。また、解析の予備的段階において、井手淳一郎博士（九州大学持続可能な社会のための決断科学センター）と西田継博士（山梨大学生命環境学部）には有益な意見をいただいた。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 林野庁（2016）平成27年度森林・林業白書全文（HTML版）。
- 2) 角田裕志（2017）ため池の管理放棄と改廃による水域生態系への影響：人口減少で何が起きるか？. 野生生物と社会 5:5-15.
- 3) 鈴木雅一（1988）山地流域の流出に与える森林の影響評価のための流況解析. 日林誌 70: 261-268.



- 4) 久米朋宜・窪田順平 (1998) 森林流域におけるダム貯水池の流況平準化効果の評価. 水文・水資源学会誌 11:317-323.
- 5) 中野秀章・菊谷昭雄・森沢万佐男 (1963) 林況変化, とくに伐採が溪流流出に及ぼす影響 (1) — 水年・豊水・平水・低水・渇水各流出量への影響 —. 林試研報 156:1-84.
- 6) 太田猛彦・鈴木雅一・芝野博文・劉若剛 (1997) 森林の成長が流況に与える影響 — 東京大学愛知演習林森林流域試験データの読み方. 第5回水資源に関するシンポジウム論文集:347-352.
- 7) 志水俊夫 (1980) 山地流域における渇水量と表層地質・傾斜・植生との関係. 林試研報 310:109-128.
- 8) 虫明功臣・高橋裕・安藤義久 (1981) 日本の山地河川の流況に及ぼす流域の地質効果. 土木学会論文報告集 309:51-62.
- 9) 劉若剛・鈴木雅一・芝野博文・太田猛彦 (1998) 山地流域の流況曲線に与える降雨の年々変動の影響. 日林誌 80:184-188.
- 10) 蔵治光一郎 (2001) 森がもどり水がもどる時間. 科学 71:57-66.
- 11) Dearmont, D., B. A. McCarl and D. A. Tolman (1998) Costs of water treatment due to diminished water quality: A case study in Texas. Water Resour. Res. 34:849-853, DOI: 10.1029/98WR00213.
- 12) Bilotta, G. S. and Brazier, R. E. (2008) Understanding the Influence of Suspended Solids on Water Quality and Aquatic Biota. Water Research 42: 2849-2861.
- 13) 芳賀弘和・小川滋 (印刷中) 集中化ハイドログラフの概念 — 源流域の水文特性と水供給ポテンシャルを評価するための新たな流況曲線解析法に関する試案 —. 広葉樹研究.
- 14) Haga, H., T. Moriishida, N. Morishita, T. Fujimoto (2017) Properties of small instream wood as a logjam clogging agent: Implications for clogging dynamics based on wood density, water content, and depositional environment. Geomorphology 296: 1-10, DOI: 10.1016/j.geomorph.2017.08.043.
- 15) 芳賀弘和 (2013) 鳥取大学教育研究林「蒜山の森」における水文, 水質, 及び河道内微地形の観測. 砂防学会誌 66 (3):59-62.
- 16) 環境省 (1971) 生活環境の保全に関する環境基準 (河川). 水質汚濁に係る環境基準 別表 2, <https://www.env.go.jp/kijun/wt2-1-1.html> (2018年12月現在).
- 17) Hotta, N., T. Kayama and M. Suzuki (2007) Analysis of suspended sediment yields after low impact forest harvesting. Hydrol. Process. 21: 3565-3575, DOI: 10.1002/hyp.6583.
- 18) Iida, T., A. Kajihara, H. Okubo and K. Okajima (2012) Effect of seasonal snow cover on suspended sediment runoff in a mountainous catchment. J. Hydrol. 428-429: 116-128, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2012.01.029.
- 19) 近藤純正・渡辺力・中園信 (1992) 日本各地の森林蒸発散量の熱収支的評価. 天気 39: 685-695.
- 20) 藤枝基久 (2007) 森林流域の保水容量と流域貯留量. 森林総合研究所研究報告 6 (2):101-110.

- 21) Sun, X., Y. Onda, H. Kato (2014) Incident rainfall partitioning and canopy interception modeling for an abandoned Japanese cypress stand. *J For Res.* 19:317–328, DOI: 10.1007/s10310-013-0421-2.
- 22) Saito T., H. Matsuda, M. Komatsu, Y. Xiang, A. Takahashi, Y. Shinohara, K. Otsuki (2013) Forest canopy interception loss exceeds wet canopy evaporation in Japanese cypress (Hinoki) and Japanese cedar (Sugi) plantations. *Journal of Hydrology* 507:287-299, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2013.09.053.
- 23) 白木克繁 (2000) 簡略化された3次元飽和不飽和浸透数値計算による森林山地流域土中水挙動の長期再現計算. *日本林学会誌* 82:364–372
- 24) Ide, J., M. Chiwa, N. Higashi, R. Maruno, Y. Mori and K. Otsuki (2012) Determining storm sampling requirements for improving precision of annual load estimates of nutrients from a small forested watershed. *Environ. Monit. Assess.* 184: 4747–4752, DOI: 10.1007/s10661-011-2299-9.
- 25) Chiwa, M., T. Saito, H. Haga, H. Kato, K. Otsuki, and Y. Onda (2015) A nitrogen-saturated plantation of *Cryptomeria japonica* and *Chamaecyparis obtusa* in Japan is a large nonpoint nitrogen source. *Journal of Environmental Quality* 44(4): 1225-1232, DOI: 10.2134/jeq2014.09.0401.
- 26) 水道技術センター (2014) 高濁度原水への対応の手引き. 経年化浄水施設における原水水質悪化等への対応に関する研究, [http://www.jwrc-net.or.jp/chousa-kenkyuu/handbook\\_koudakudo.html](http://www.jwrc-net.or.jp/chousa-kenkyuu/handbook_koudakudo.html).
- 27) 津山幾太郎・松井哲哉・堀川真弘・小南裕志・田中信行 (2008) 日本におけるチマキザサ節の潜在分布域の予測と気候変化の影響評価. *GIS-理論と応用* 16 (2):11–25.