

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—

芳賀 弘和^{1,*}・小川 滋²

The lumped hydrograph concept: Pilot scheme of a new duration curve analysis to evaluate hydrological properties and water supply potentials in headwater catchments

Hirokazu Haga^{1,*} and Shigeru Ogawa²

¹ 鳥取大学農学部生命環境農学科 (〒680-8553 鳥取市湖山町南 4-101)

Email: haga@muses.tottori-u.ac.jp

Department of Agricultural, Life and Environmental Sciences, Tottori University, Tottori 680-8553, Japan

² 九州大学名誉教授

* Corresponding author

要 旨

森林小流域において、目標とする水需要レベルに対する水不足量と水余剰量のバランスについて、濁水と清澄水を考慮しながら把握できる集中化ハイドログラフを提案し、その解析手法や応用可能性についての試案を示した。集中化ハイドログラフの上昇部と下降部は、それぞれ河川水が濁っている日とそうでない日の流況曲線を用いて表現された。水不足量を濁水の余剰量で補うことができる最大の目標水需要レベルと清澄水の余剰量で補うことができる最大の目標水需要レベルは、それぞれ濁水供給ポテンシャル、清澄水供給ポテンシャルと定義された。既往の短期流出解析との対比から、集中化ハイドログラフのピーク付近における濁水流出率（疑似ピーク流出係数）と清澄水の減少特性（疑似逓減係数）が、それぞれ濁水供給ポテンシャル、清澄水供給ポテンシャルに関係する指標になりうると推測された。これらの水供給ポテンシャルは、源流域から下流域に至るまでの水と土砂の統合的管理にとって大局的な観点から示唆を与えるものであり、集中化ハイドログラフの有用性は高いと考えられた。

キーワード : 集中化ハイドログラフ, 流況曲線, 濁水, 清澄水, 水供給ポテンシャル, 源流域

I. はじめに

源流域の河川水は最も重要な水資源の一つであり、これを量と質の両面から保全することは流域の水資源管理上の大きな関心事である (Burness et al., 2004; Grant et al., 2013; Abbott et al., 2017)。源

流域からの水の流出量（供給量）と下流域での水需要量（人間活動のみならず河川生態系や水環境からの要求も含む）とのバランスが、流域内での水配分や水利用計画に大きく影響する。したがって、水需要に対する水供給の過不足（水余剰と水

不足)に関する量的・時間的情報を得ることは最も本質的なことである。

この量的なバランスを簡単に評価する方法には、流況曲線(図 1A)を用いるものがある。流況曲線は、流域の水不足や水余剰の起こりやすさ、あるいは目的とする流出量の発生期間に関する情報をその形状を介して示すことができる(鈴木, 1988; 久米・窪田, 1998)。このため、既往研究では、流況曲線の形状特性や曲線上の指標流量と流域の様々な特性(降水, 地形, 地質, 降雨-流出応答, 及び水の流出経路などの特性)との関係が調べられてきた(志水, 1980; 虫明ら, 1981; 劉ら, 1998; 蔵治, 2001; Yokoo and Sivapalan, 2011; Brown et al., 2013)。

他方、源流域の河川水の質は、浄水処理のコスト, 河川生態系の栄養・エネルギー基盤, 閉鎖性水域の富栄養化と密接に関わる(楠田, 1993; Dearmont et al., 1998; Bilotta and Brazier, 2008; Heberling et al., 2015)。このため、流況曲線を用いた水資源解析は、水量のみならず水質の情報が組み込まれることによって有用性が増すと考えられる。しかしながら、量と質を一体的に扱う流況曲線解析法は提案されていない。源流域の河川水に水資源としての価値を見だし、定量的に評価するためには、そのような解析法の確立が望まれる。

本報告では、源流域で得られる降雨と流量のデータを用いて、基本的な水質項目である濁り(例えば、濁度や懸濁物質濃度)に関する情報を組み込んだ新たな流況曲線を作成する方法を解説し、その流況曲線を集中化ハイドログラフとして概念化する。また、目標とする水需要レベルに対する水不足量と水余剰量のバランスに関して、集中化ハイドログラフの解析から源流域の濁水供給ポテンシャルと清澄水供給ポテンシャルを表す指標が得られることを示す。さらに、集中化ハイドログラフから得られる情報と濁水・清澄水供給ポテンシャルとの関係を検討する際の着眼点を

示し、集中化ハイドログラフの応用可能性についての試案を提示する。

II. 集中化ハイドログラフ

源流域(概ね 100 ha 未満の集水域)を対象とした多くの既往研究では、懸濁物質の濃度は降雨に伴う流量増加時に顕著に高く、降雨終了には速やかに低下するという特徴が報告されている(Kurashige, 1993; Lewis et al., 2002; Sammori et al., 2004; Hotta et al., 2007; Ide et al., 2012; Zimmermann et al., 2012; Mather and Johnson, 2014)。この特徴は、源流域における懸濁物質の供給過程が河床堆積物の巻き上げ, 河岸侵食, あるいは林床土壌や作業道の表面侵食に依存すること(Gomi et al., 2005; Mizugaki et al., 2008), 及び河川流量の短時間(< 1 h)での変化量と懸濁物質濃度の間に密接な関係があること(Hotta et al., 2007)から判断して、源流域における典型的な特徴と思われる。

そこで、源流域において降雨や融雪によって流量が増える期間とそれ以外の期間をそれぞれ濁った水(濁水)を供給する期間, 濁っていない水(清澄水)を供給する期間と捉えることにする。さらに、両期間に供給される水量が水需要とどのようにバランスするかを理解するために、両期間を区別して流況曲線を作成することとする。ここでは、説明を単純化するために融雪出水については対象とせず、降雨に伴う流量増加によって濁りが発生する場合を考える。

まず、日単位の降雨と流量のデータが1年間を通して得られたとし、このうち濁った日とそうでなかった日を区別する。濁りの情報として、Stagge et al. (2012)やMohamoud (2014)が示しているような詳細な濁度データや懸濁物質濃度のデータがあれば“濁り”を定量的に定義できるため、この区別は簡単であろう。しかしながら、源流域において濁度や懸濁物質濃度のデータを通年で得ることは容易ではなく、濁った日とそうでなかった日を区別するには何らかの工夫が必要である。例え

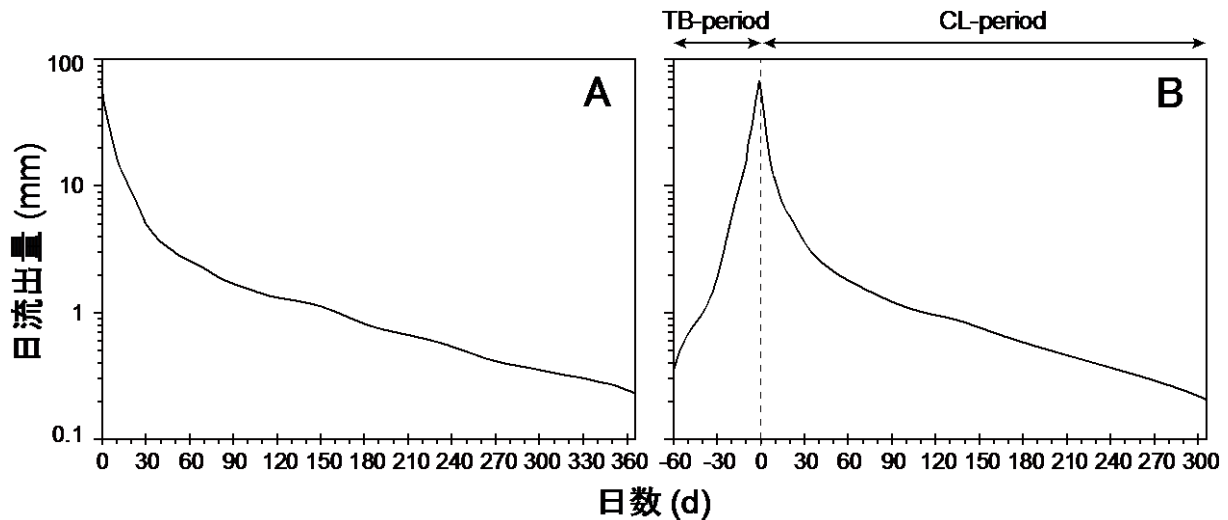


図1 通常の流況曲線 (A) と新たな流況曲線としての集中化ハイドログラフ (B) の例。
TB-period と CL-period はそれぞれ濁っていた期間と濁っていなかった期間を意味する。
また図の表現上, TB-period の日数についてはマイナス値を用いて示している。

ば前述したように、小流域においては濁度や懸濁物質濃度が降雨に対して速やかに応答することを考慮し、ある程度まとまった降雨量があった日を濁った日とみなすことが考えられる。どの程度の“濁り”を濁水とみなすかは、解析の目的や対象とする流域によって異なると考えられるので、濁った日かどうかを区別するための降雨量の基準値はその都度決めることになるであろう。例えば、「日雨量 10 mm 以上の日を濁った日、それ未満を濁っていなかった日とする」というような処理が考えられる。

次に、濁った日のデータのみを用いて流況曲線を描き、濁っていなかった日のデータについても同様に描く。この時、濁った日のデータについては昇順に、濁っていなかった日のデータについては降順に並べて表現するものとする。そして、両者の流況曲線をつなぐことにより、濁りの情報を組み込んだ新たな流況曲線が得られる (図 1B)。

通常の流況曲線は 1 本の降順曲線で描かれるため (図 1A)、曲線上で隣り合う日であったとしても降雨条件が大きく異なることがある。近年、流況曲線の表現方法を検討した研究が数例あるが、基本的には同様のことが言える (河村ら, 2004 ;

真名子ら, 2007)。このため、流況曲線を用いた解析においては、流出過程が本質的に異なる日を混同して扱ってしまう可能性がある。しかしながら、今回提示した新たな流況曲線では、小流域での降雨—流出—濁りの応答が速やかであること (概ね数時間以内) を考慮して、降雨中の流出現象とそれ以外の流出現象がそれぞれ濁った日の領域 (TB-period) と濁っていなかった日の領域 (CL-period) に区別されている (図 1B)。当然ながら、それぞれの領域において隣り合う日のデータに時間的なつながりはない。しかし、CL-period では、降雨からの経過時間が図に反映されている可能性がある。すなわち、CL-period において流出量のレベルが高いほど降雨日からの経過日数は短く、流出量のレベルが低いほどその経過日数は長くなる傾向にあると考えられる。このため、大局的にみて、CL-period はハイドログラフの逡減部のような性質を持つ可能性が高い。

したがって、今回提示する新たな流況曲線は、ある期間内に何度も生じる流量変動を 1 つの上昇部と低下部に集中化して表現したハイドログラフと捉えることができる。これを、集中化ハイドログラフと呼ぶこととする。対象とする期間が 1

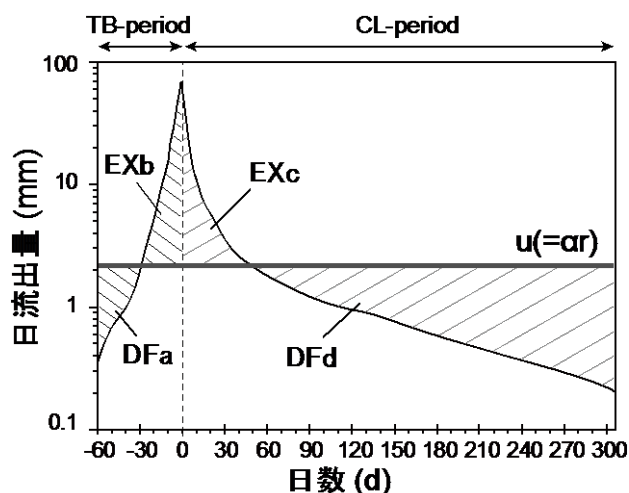


図2 集中化ハイドログラフと水需要レベル(u)に対する余剰分(EXb , EXc)と不足分(DFa , DFd)を示した例。水需要レベルの表現($u=\alpha r$)については式(4)を参照。

年間であれば1年集中化ハイドログラフ、あるいは1季節や10年であれば季節集中化ハイドログラフ、10年集中化ハイドログラフとなり、それぞれの期間を特徴づけるグラフが得られると予想される。

III. 濁水・清澄水供給ポテンシャル

集中化ハイドログラフは、流出の継続時間に関する情報を持っている。すなわち、濁っている日数を一目で把握でき、さらに、目標とする水需要レベルに対して水不足や水余剰が生じる日数を濁りの有無を考慮して把握することができる。これは、集中化ハイドログラフが流況曲線概念を元にして作られているためであり、集中化ハイドログラフの利用上、最も基本的な点である。例えば、年間を通じて一定の水需要レベル(u)への対応が見込まれる流域に対して、図2のような1年集中化ハイドログラフが得られた場合、濁った日が60日(うち水余剰30日、水不足30日)あり、濁らなかった日が305日(うち水余剰50日、水不足205日)あると読み取ることができる。

流況曲線の形状に降雨一流出過程が影響するという既往研究(例えば、Yokoo and Sivapalan, 2011)を参考すると、流域の水文特性、例えば降

雨と流出の応答、降雨ピークと流量ピークの時間差、一時的な地中流の発生時間などは、集中化ハイドログラフの形状に影響を及ぼすことが考えられる。もし、基底流量のレベルが高く、さらに降雨後の逓減が緩やかである流域ならば、集中化ハイドログラフの減少部は高いレベルで維持される可能性があり、当該流域が高い清澄水供給ポテンシャルを持ちうることを推察できる。すなわち、集中化ハイドログラフを用いて、流域の水文特性と水質特性を考慮して水供給と水需要のバランスを大まかに理解できる可能性がある。

鈴木(1988)は、年降水量と流況曲線を用いて森林流域における水不足率、水利用集約度を定量的に評価した。今回提示する水供給ポテンシャルを評価するための年集中化ハイドログラフの解析は、この鈴木(1988)の研究を応用するものである。

年間の目標水需要量(U)の日平均値($u=U/N$, N : 年間の日数)に対する総水余剰量(EX)と総水不足量(DF)は、次のように表せる。

$$EX=EXb+EXc \quad (1)$$

$$DF=DFa+DFd \quad (2)$$

ここで、 EXb と EXc はそれぞれTB-periodとCL-periodにおける水余剰量、 DFa と DFd はそれぞれTB-periodとCL-periodにおける水不足量である(図2)。

また、年降水量(R)とその日平均値($r=R/N$)を用いて、 U と u を表すと次のようになる。

$$U=\alpha R \quad (3)$$

$$u=\alpha r \quad (4)$$

ここで、 α は定数であり、水利用の集約度(年降水量の何割に相当する水量を利用できるか)を示すパラメータである。年降水量の全てを利用する時は $\alpha=1$ 、全く利用しない時は $\alpha=0$ となる。

さらに、 α によって EX , EXb , EXc , DF , DFa , DFd がどのように変化するかを調べる。特に、 $DF=EXb$, $DF=EXc$ となる α をそれぞれ見出し、それらの α を「濁っている水の余剰分で水不足を

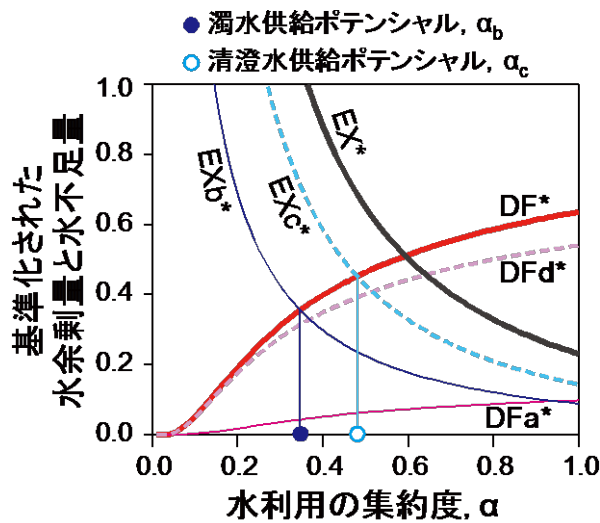


図3 水利用の集約度の変化に伴う水余剰量と水不足量の変化を示した例。水余剰量と水不足量のそれぞれは目標水需要量で基準化したものとして表されている。

補うポテンシャル (濁水供給ポテンシャル, α_b)」, 「濁っていない水で水不足を補うポテンシャル (清澄水供給ポテンシャル, α_c)」と定義する。これにより, 源流域の濁りを考慮した水供給特性を定量的に評価できるようになる。図3は, α によって水余剰と水不足のバランスが変化する様子を示している。ただし, この図において, EX, EXb, EXc, DF, DFa, DFd の値は年間の目標水需要量 $U(=\alpha R)$ で除されており, それぞれ DF^* , DFa^* , DFd^* , EX^* , EXb^* , EXc^* として基準化された表現となっている。なお, この基準化された表現は, 年降雨量の異なる年や場所における解析結果を比較する場合に有用と考えられる。

IV. 集中化ハイドログラフと水供給ポテンシャルとの関係を検討する際の着眼点

一般に, ハイドログラフを用いた短期的流出現象の解析では, 流出成分の違い (直接流出と基底流出) に着目し, 直接流出率 (=直接流出量÷降雨量), ピーク流出係数 (=ピーク時の流出量÷ピーク時の降雨量), 逓減係数 (基底流出の減少特性を表す係数), 直接流出量と基底流出量の比などを算出し, 当該流域の流出特性の指標とされる

(Hewlett and Hibbert, 1967 ; Mosley, 1979 ; 藤枝・阿部, 1982 ; Lesack, 1993 ; Mulholland, 1993 ; Katsuyama et al., 2001 ; Haga et al., 2005)。

これと対比して集中化ハイドログラフを考えるならば, 濁水流出率 (=濁水としての流出水の総量÷年降水量), 清澄水流出率 (=清澄水としての流出水の総量÷年降水量), 疑似ピーク流出係数 (=TB-periodの最大値付近における濁水の流出量÷同付近における降水量), 疑似逓減係数 (CL-periodの減少特性を表す係数), 及び濁水の総量と清澄水の総量の比が, 集中化ハイドログラフの特徴を表す有効な指標となると思われる。

一般的な流出現象の特性, すなわち流量が降雨時に増加し, その後徐々に減少するという特性を考慮すると, その余剰分の大部分は TB-period と CL-period のそれぞれの最大値付近で発生し, 他方, 不足分の大部分は CL-period の低流量部で発生すると考えられる。このため, 濁水供給ポテンシャルは, TB-periodの最大値付近における濁水流出率 (例えば, 疑似ピーク流出係数) が大きいほど高まる可能性がある。他方, 清澄水供給ポテンシャルは, CL-periodの最大値付近での流量減少が緩やかであるほど (例えば, 疑似逓減係数が小さいほど) 高まる可能性がある。つまり, その妥当性については注意深い検証が必要であるが, これらの水供給ポテンシャルの経年変化や流域間差は, 集中化ハイドログラフの疑似ピーク流出係数や疑似逓減係数の時間的・空間的な変動特性に着目することによって解釈できるかもしれない。

V. 集中化ハイドログラフの応用可能性

集中化ハイドログラフの構造と解析方法はシンプルであるが, 通常の流況曲線解析では得られない2つの大きな情報が得られる。すなわち, 濁水と清澄水の発生継続期間に関する情報とそれらの水供給ポテンシャルに関する情報が得られる。本報告では, 源流域の典型的な特徴として「降雨-流量-濁りの素早い応答」を仮定し, 日降雨量から河川水の濁り

の有無を判別して集中化ハイドログラフを描く方法を提案した。しかし、降雨量データがない流域や融雪出水が起きる地域では、降雨量や降雪量からでは濁りの状態を判断することは難しい。そのような場合には、降雨や融雪に伴う大きな流量上昇によって河川水が濁る例 (Hotta et al., 2007; Iida et al., 2012) を参考にし、「前日より流量が高くなった時に河川水が濁る」と仮定して解析を進める工夫もあると思われる。もちろん、融雪時期や地域特性が濁りに与える影響は慎重に考慮される必要があるが、このような仮定を利用すれば流量データしか存在しない場合でも濁る日の判別が可能となり、集中化ハイドログラフが作成できる流域は増えると思われる。

本報告で示したように、源流域の水供給ポテンシャルを濁水と清澄水に分けて解析することには大きな意味がある。これは流域間の比較において、濁水と清澄水を区別しない場合の水供給ポテンシャルは同じであっても、濁水供給ポテンシャルと清澄水供給ポテンシャルは流域間で大きく異なる可能性があるからである。この点を解析できることは、対象とする流域の水資源管理や森林管理において、濁水と清澄水のどちらに重点を置くべきかを流域の水文・水質特性を考慮して検討することにつながる。例えば、ある源流域が水道水源として期待されたとしても、濁水供給ポテンシャルが高く清澄水供給ポテンシャルが低い場合には、清澄水確保のための水源開発よりも濁水制御のための治山による森林表土の保全や砂防による河道の安定化を優先する方が効果的であると判断できるかもしれない。したがって、源流域の水文・水質特性が同時に考慮される集中化ハイドログラフの解析は、森林の構造や多面的機能に配慮した流域ゾーニング (太田, 2005; 光田ら, 2009; 伊藤ら, 2013) を行う際に役に立つ可能性がある。

濁水供給ポテンシャルについて言えば、上流域の濁りを下流へ伝播させずに河川水量を維持するためのコンセプトに通じる重要な指標である。つまり、「濁水は積極的に貯水池に留め (懸濁物質を捕捉・沈殿させ) て水不足の補完に備え、逆に清澄水はで

きるだけそのまま下流へ流し十分な河川流量を維持する」というコンセプトに合う。これは、濁水供給ポテンシャルが下流域の閉鎖性水域における富栄養化対策などの水環境管理を検討する上で有用な指標になりうると考えられる。

他方、清澄水供給ポテンシャルは、懸濁物質の流れを阻害せずに利用しやすい水を積極的に確保するというコンセプトに通じる重要な指標である。これは、上流域と下流域の土砂輸送のつながりに配慮した流域土砂管理と水資源管理を検討する上で役に立つと考えられる。また、下流域での河床低下や海浜の砂不足が懸念される地域では、上流からの土砂流出 (懸濁物質を含む) をある程度許容しながら良質な水資源を維持することが求められる (水山, 2006; 道上, 2008)。このような地域において清澄水供給ポテンシャルが高い場合には、源流域における濁水は貯水したり取水したりせずに (例えば、貯水池をバイパスして)、下流へ流すことが水と土砂の統合的管理の面から有効だと判断されるかもしれない。

以上の議論は、まだ試案の段階であり、その実現可能性を判断するためには、各地の水文、水質、及び水利用に関するデータと社会的状況を総合的に解析する研究が不可欠である。しかしながら、集中化ハイドログラフというシンプルな解析方法は、現在の源流域が置かれている状況から考えて、今後の森林と水資源に関する研究指針を示す一つの方法として利用価値は高いと思われる。

VI. おわりに

本報告で示した試案は、源流域における河川水の濁り、すなわち流量変化に対して速やかに応答する基本的な水質項目に着目し、源流域における流出特性を新たな流況曲線を介して評価しようとするものであった。この新たな流況曲線を集中化ハイドログラフとして捉え、かつ既往の短期流出解析法と対比して解析することにより、源流域の水文特性や水供給ポテンシャルを大まかに把握できる可能性を指摘した。現時点では、本解析手法は年間を通じて河川

に流水が存在するような温暖湿潤地域での解析に適用することを想定しているが、河川水の濁りの特徴を適切に組み込むことができれば、寒冷地や乾燥地などの河川にも適用できるだろう。また、今回は源流域という比較的小さな空間スケール (~100 ha) を想定したが、降雨-流量-濁りの応答時間の把握や詳細な水質データの収集によって、より大きな空間スケールへの適用も可能になるかもしれない。さらに、栄養塩類の流出負荷という視点からの応用も期待できるかもしれない。

国内のみならず国外においても、源流域は水資源の保全・利用を考える上で鍵となる場であることが認識されている (Grant et al., 2013; Abbott et al., 2017)。しかしながら、源流域の水量や水質は、森林の伐採 (間伐を含む)、植林、林種転換、あるいは風倒災害や斜面崩壊などの地表の変化により長期的な影響を受けうる。また、日本のように過疎化が進む源流域では、森林と人間の関わり方のみならず水利用や水管理の形態が大きく変化しているところもある (Maruyama, 1997; 橋本・同前, 2014)。このような状況から、集中化ハイドログラフのような大局観を備えた解析手法は、広域的・長期的に源流域の流出特性を把握する手法としての意義は大きい。今後は各地の水文・水質データを用いた解析やシミュレーションを利用した理論的解析を行い、集中化ハイドログラフの概念と応用性について検証することが求められる。

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 (21780150, 26450481)、及び公益財団法人アサヒグループ学術振興財団研究助成 (2017 年度サステイナブル社会・経済学部門) を受けて実施しました。ここに記して謝意を表します。

引用文献

Abbott, B. W., G. Pinay and T. Burt (2017) Protecting water resources through a focus on headwater

- streams. *Eos* 98, doi: 10.1029/2017EO076897.
- 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.
- Brown, A. E., A. W. Western, T. A. McMahon and L. Zhang (2013) Impact of forest cover changes on annual streamflow and flow duration curves. *J. Hydrol.* 483: 39-50.
- Burness, S., J. Chermak and D. Brookshire (2004) Water management in a mountain front recharge aquifer. *Water Resour. Res.* 40: W06S21, doi: 10.1029/2003WR002160.
- 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.
- 藤枝基久・阿部敏夫 (1982) 竜の口山試験地における森林の成立が流出に及ぼす影響. *林試研報* 317 : 113-138.
- Gomi, T., R. D. Moore and M. A. Hassan (2005) Suspended sediment dynamics in small forest streams of the Pacific Northwest. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 41: 877-898, doi: 10.1111/j.1752-1688.2005.tb03775.x.
- Grant, G. E., C. L. Tague and C. D. Allen (2013), Watering the forest for the trees: an emerging priority for managing water in forest landscapes. *Front. Ecol. Env.* 11: 314-321. doi: 10.1890/120209.
- Haga, H., Y. Matsumoto, J. Matsutani, M. Fujita, K. Nishida and Y. Sakamoto (2005) Flow paths, rainfall properties, and antecedent soil moisture controlling lags to peak discharge in a granitic unchanneled catchment. *Water Resour. Res.* 41: W12410, doi: 10.1029/2005WR004236.
- 橋本誠・同前浩司 (2014) 山口県のため池管理手法に関する取組み. *農業農村工学会誌* 82 : 343-433.

- Heberling, M. T., C. T. Nietch, H. W. Thurston, M. Elovitz, K. H. Birkenhauer, S. Panguluri, B. Ramakrishnan, E. Heiser and T. Neyer (2015) Comparing drinking water treatment costs to source water protection costs using time series analysis. *Water Resour. Res.* 51: 741–8756,
- Hewlett, J. D. and A. R. Hibbert (1967) Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas. In *International Symposium on Forest Hydrology*, edited by W. E. Sopper and H. W. Lull, pp.275–290, Pergamon, New York.
- 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.
- 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.
- 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.
- 伊藤哲・木崎巧治・光田靖・平田令子・山川博美・三枝直樹 (2013) 木材生産性, 土砂流出リスク及び溪畔林保全を考慮した自然林再生のための小集水域ゾーニング. *景観生態学* 18 : 139–147.
- Katsuyama, M., N. Ohte and S. Kobashi (2001) A three-component endmember analysis of streamwater hydrochemistry in a small Japanese forested headwater catchment. *Hydrol. Processes* 15: 249–260.
- 河村明・久野祐輔・神野健二 (2004) 昇降順対数流況曲線の提案. *土木学会論文集* 761 : 91–94.
- 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.
- 蔵治光一郎 (2001) 森がもどり水がもどる時間. *科学* 71 : 57–66.
- Kurashige, Y. (1993) Mechanism of suspended sediment supply to headwater rivers and its seasonal variation in west central Hokkaido. *Jpn. J. Limnol.* 54: 305–315.
- 楠田哲也 (1993) 水のにごり. *水環境学会誌* 16 : 449.
- Lesack, L. F. W. (1993) Water balance and hydrologic characteristics of a rain forest catchment in the central Amazon basin. *Water Resour. Res.* 29: 759–773.
- Lewis, D. J., K. W. Tate, R. A. Dahlgren and J. Newell (2002) Turbidity and total suspended solid concentration dynamics in streamflow from California oak woodland watersheds. *USDA Forest Servis Gen. Tech. Rep. PSW-GTR-184*: 107–118.
- 真名子武・手計太一・平野文昭 (2007) 新しい流況曲線の提案に関する基礎的研究. *水工学論文集* 51 : 379–384.
- Mather, A. L. and R. L. Johnson (2014) Quantitative characterization of stream turbidity-discharge behavior using event loop shape modeling and power law parameter decorrelation. *Water Resour. Res.* 50: 7766–7779, doi: 10.1002/2014WR015417.
- 道上正規 (2008) 河床変動と流砂量式. *SABO* 93 : 3–7.
- 光田靖・家原敏郎・松本光朗・岡裕泰 (2009) 基準・指標の理念に基づく森林計画手法に関する検討. *森林計画学会誌* 42 : 1–14.
- Mizugaki, S., Y. Onda, T. Fukushima, S. Koga, H. Asai and S. Hiramatsu (2008) Estimation of suspended sediment sources using ^{137}Cs and $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ in unmanaged Japanese cypress plantation

- watersheds in southern Japan. *Hydrol. Process.* 22: 4519–4531, doi: 10.1002/hyp.7053.
- 水山高久 (2006) 流砂系土砂管理：砂防編—私案—。SABO 88 : 1.
- Maruyama, T. (1997) Main tasks and future of irrigation, drainage and reclamation engineering in Japan. *Rural and Environmental Engineering* 32: 4–21.
- Mosley, M. P. (1979) Streamflow generation in a forested watershed, New Zealand. *Water Resour. Res.* 15: 795–806.
- Mohamoud, Y. (2014) A. Time series separation and reconstruction (TSSR) technique to estimate daily suspended sediment concentrations. *J. Hydrol. Eng.* 19: 328–338, doi: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000814.
- Mulholland, P. J. (1993) Hydrometric and stream chemistry evidence of three storm flowpaths in Walker Branch Watershed. *J. Hydrol.* 151: 291–316.
- 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.
- 太田猛彦 (2005) 森林の多面的な機能とゾーニング機能の「階層性」を考える—。森林科学 43 : 11–17.
- 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.
- Sammori, T., Z. Yusop, B. Kasran, S. Noguchi and M. Tani (2004) Suspended solids discharge from a small forested basin in the humid tropics. *Hydrol. Process.* 18: 721–738. doi: 10.1002/hyp.1361.
- 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.
- Stagge, J. H., A. P. Davis, E. Jamil and H. Kim (2012) Performance of grass swales for improving water quality from highway runoff. *Water Research* 49: 6731–6742.
- 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.
- Yokoo, Y. and M. Sivapalan (2011) Towards reconstruction of the flow duration curve: development of a conceptual framework with a physical basis. *Hydro. Earth Syst. Sci.* 15: 2805–2819.
- Zimmermann, A., T. Francke and H. Elsenbeer (2012) Forests and erosion: Insights from a study of suspended-sediment dynamics in an overland flow-prone rainforest catchment. *J. Hydrol.* 428–429: 170–181.

