

矢作川流域の中山間地域を対象とした流出解析

Runoff analysis for hilly and mountainous regions in the Yahagi River basin

杉原 弘泰[†], 内田 臣一^{††}
SUGIHARA Hiroyasu[†], UCHIDA Shigekazu^{††}

Abstract In the hilly and mountainous area of the Yahagi River basin, which includes forests, rice paddies (including abandoned rice paddies), and small rivers, runoff analysis was conducted using the SWMM (Storm Water Management Model). By setting the SWMM parameters based on the results of previous studies, we were able to almost reproduce the observed values at the Takabashi Water Level Observation Station. Predictions were made for further runoff reduction measures for forests, rice paddies, and small rivers, and specific examples of measures in three areas of Toyota City were presented.

1. はじめに

近年、気候変動の影響による水災害の激甚化・頻発化等が問題となっている。これに対処するため、従来からの堤防の整備、ダムの建設・再生などの対策に加え、集水域と河川区域のみならず、氾濫域も含めて一つの流域として捉えて治水計画を策定する「流域治水」が求められるようになってきた¹⁾。

そのきっかけのひとつが2019年10月の東日本台風による水害で、それらに対応して社会資本整備審議会²⁾は、水災害対策を「流域治水」へ転換する答申をまとめた。これに従って国土交通省は全国の一級水系において流域治水プロジェクトを始め、2021年3月30日に策定、公表した。これは一級水系の全109水系と、二級水系の一部で、国・流域自治体・企業等からなる流域治水協議会を設置し、対策の全体像をまとめたものである。2021年5月には実効性を確保するため、特定都市河川浸水被害対策法の改正をはじめとする流域治水関連9法が公布された³⁾。

本研究で対象とする矢作川流域においても、矢作川流域治水協議会は「矢作川流域治水プロジェクト2.0」を公表して、森林整備・保全、水田貯留などの具体的な対策を進めている。しかし、矢作川流域は流域連携の先進事例として評価されている⁴⁾ものの、それらの対策は十分な技術研究に基づいて実施されているとは言い難い。

全国的な流域治水に関わる近年の河川技術研究の動向については、内田ほか⁵⁾、原田ほか⁶⁾が総説をまとめ

た。そして、島谷^{7~9)}は熊本県の球磨川流域を対象として従来の一般的な治水の考え方にこだわらない研究と実践を始めた。また、徳島大学の研究グループ^{10~13)}および玉井ほか¹⁴⁾による一連の研究では、森林域からの流出と河川での水の挙動を流域治水も念頭に検討している。

しかし、本研究で対象とする丘陵の中山間地域での対策については、新垣ほか¹⁵⁾や萱場・小田¹⁶⁾などの先駆的な研究があるものの、いまだ研究が少ない。

本研究では、矢作川流域の丘陵の中山間地域（矢作ダムから高橋水位観測所の間で、矢作川に流入する支流の流域、図1）を対象に流出解析を行った。

まず流出解析のパラメータを既往研究の結果を参考にして設定することによって、矢作川中流の高橋水位観測所の観測値を再現することを試みた。対象としたのは、2000年9月（東海豪雨）、2013年9月（台風18号）、2023年6月（梅雨前線・台風2号）の3回の降雨での観測値である。

そして、そのパラメータ設定をいくつかの治水対策を想定して変更し流出解析を行うことにより、対策の効果を検討し、矢作川流域治水プロジェクトにおいて、より具体的な治水対策を計画するための基礎資料を提供することを本研究の目的とした。

2. 研究方法

2・1 「洞」の地形と土地利用

研究対象地域の流域面積は486 km²で、「美濃三河高原」と呼ばれる高原状の丘陵（一部は猿投山などの山地）が広がり、平地は狭い。

[†]愛知工業大学大学院 建設システム工学専攻（豊田市）

^{††}愛知工業大学 工学部 社会基盤学科（豊田市）



図1 矢作川流域図と研究対象流域

細かく見ると、この地域は丘陵の低い尾根に浅い谷が入り組んだ地形によって構成されている。そのような地形の特に谷の部分は愛知県西部と岐阜県南部では「洞」（あるいは、「湫（久手）」、「迫間（廻間、狭間）」と呼ばれることが多い¹⁷⁾。この地形は、この地域に特有なものではなく、中国地方西部・九州では「迫」、「佐古」と呼ばれ⁸⁾、関東地方では「谷津」、「谷戸」と呼ばれる¹⁸⁾。

「洞」での土地利用を模式的に示すと図2のようになる。尾根と山腹の部分は、森林（スギ・ヒノキの人工林か、あるいは落葉広葉樹の二次林が多い）で、谷底の部分は水田として使われていたが、現在では休耕田、あるいは放棄水田となっている所が多い。そして、谷底には中小規模の河川が流れている。

このような地形と土地利用の地域で流出解析を行うにあたり、パラメータの設定と流域治水のための具体的な対策は、次の3部分に分けて考えた: 1) 尾根と山腹を覆う森林、2) 谷底の水田（休耕田、放棄水田を含む）、3) 中小河川。次の2・2～2・4でその3部分に分けて文献を検討し、それを参考に2・6でパラメータを設定した。

2・2 森林からの流出

森林が持つ様々な機能のうち、治水と利水の観点から重要なのは、洪水緩和機能と渇水緩和機能と考えられる¹⁹⁾。このうち、本研究が対象とする治水と関係するのが森林の洪水緩和機能（流出緩和機能²⁰⁾）である。

森林の洪水緩和機能については、2000年頃から激しくなった「緑のダム」に関する論争がある^{19～23)}。

土木工学を中心とした立場からは、森林の洪水緩和機

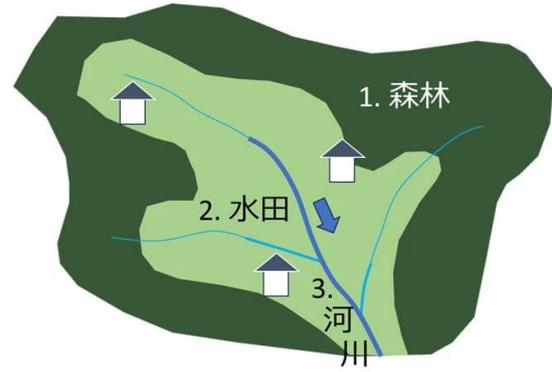


図2 矢作川流域の中山間地域の「洞」における土地利用の模式図

能には大雨時に限界があることを直視し、過大な機能を期待しない考え方が強調される傾向にある^{24～28)}。一方、森林水文学を中心とした立場からは、洪水緩和機能の限界を認めつつも、流出を遅らせる機能や森林の質の改善（例えば、人工林の間伐による下層植生の繁茂）による流出抑制などを評価する考え方が強調される傾向にある^{22), 29～40)}。

しかし、論争の基本的な問題点は、森林の洪水緩和機能についてデータが少ないことであり、いまだ今後の研究が待たれる状況にあると考えられる。

本研究では、「自然環境が有する多様な機能を活用」することが謳われている流域治水の基本的な考え方²⁾に従い、後者の立場に立って、森林の洪水緩和機能を具体的な研究結果がある場合^{41, 42)}に限って評価し、流出解析のパラメータ設定に利用することにした。

2・3 水田からの流出

中山間地帯に位置する水田は、洪水緩和、斜面崩壊防止、水資源涵養等の流域保全機能を有するとされ、近年進行する耕作放棄により、これらの機能の低下が危惧されている^{43, 44)}。

吉田ほか⁴⁵⁾は新潟県上越市にある中山間地域の水田と耕作放棄水田で、水文観測をして得られたデータを解析した。2007年から2009年まで試験流域の末端にて10分間隔で水位の瞬間値を観測し、別途流量観測により作成した水位—流量曲線を用いて流量に変換した。ピーク流出係数は耕作水田主体流域の0.24に対し、耕作放棄水田主体流域は0.30と1.25倍の値となった。

増本ほか^{46, 47)}と吉村⁴⁸⁾は、ほ場が湿潤状態の時には耕作放棄により流出高およびピーク流出高が増大する傾向を示した。すなわち湿潤状態では土層の雨水保留機能や浸透能が小さく、地表面の水みち流れが卓越する。しかし観測状態にあるほ場では亀裂の発達によって土層の保留量や浸透量が増加し、耕作水田と比べて流出率やピーク流出高の減少につながったことも報告している。

矢作川流域の中山間地域を対象とした流出解析

耕作水田よりも耕作放棄水田からの流出量が多い傾向があるという観測結果がこれらの研究で明らかになった。

吉田ほか⁴⁹⁾は、中山間小流域を対象に、土地利用・耕作状況が異なる複数の地目からの水文流出過程を表現する分布型水循環モデルを構築した。それとともに、耕作水田・耕作放棄水田が主体の試験流域に適用して、流域水循環と水田管理状態の相互関係を評価した。

試験流域からの流出現象は、分布型水循環モデル⁴⁵⁾により表現した結果、放棄水田周辺の飽和帯から発生した地表流が、耕作水田周辺からの地表流より多く、この違いが流域スケールの短期流出特性の違いに寄与した可能性を示した⁴⁹⁾。

増本⁵⁰⁾は、洪水防止機能についていえば、広域水田の持つ雨水保留量は、(a)土地利用の違いによる流出量や流出波形の違いとしての貯留量の変化と、(b)計画洪水時における水田地帯が持つ遊水地機能としての洪水貯留量に分けられると述べている。

前者は、流出場の違い、例えば水田域が都市域に変化することにより、貯留量が減少し、結果として流出ピークの増大と流出波形の先鋭化が起こる現象として理解される。すなわち、それらは雨水保留量の違いと流出ハイドログラフの波形変化として説明できる。

後者の(b)については、広域の水田地帯が、流域レベルでみた場合、洪水を貯留するバッファーとしての遊水地機能(ここではポテンシャル)を持っているというものである。

そこで水田の持つ多面的機能、特に洪水貯留機能を流域管理に利用する際に、中山間地域の水田の役割を理解し、耕作放棄地の増加とその対処法についても対策を立てる必要があると述べている。

耕作放棄により流出が変化し、最悪の場合、法面が崩壊する事例がある。そのような事態を防ぐためにも耕作放棄地の有効利用が望まれる。例えば天水田(実際には田越しの循環灌漑が行われている)では、濁水にそなえた小規模ため池としての利用の例などもみられる⁵⁰⁾。

研究対象が新潟県以外のものは、西廣ほか¹⁸⁾が、印旛沼流域に多数存在する「谷津」の耕作放棄地を、湿地として保全・再生する措置がもたらす効果について意見を述べた。

かつて水田として利用され、現在では多くが耕作放棄地になっている「谷津」に着目し、谷津の湿地としての維持・再生や、その流域の台地・斜面の草原や樹林の維持・再生によってもたらされる多面的機能を、既存の知見や現地での調査結果から論じたものである。

印旛沼周辺の干拓事業(1946~1969年)が完成し、稲作の生産の中心は谷津から印旛沼沿岸の低地に移行した。すると谷津の水田は、水田の狭さや高い地下水位のため、大型の機械を用いた農業に不向きであり、耕作放棄が進んでいった。

西廣ほか¹⁸⁾は、谷津の放棄水田の活用に期待される効果を述べている。それは流域の水田は畦畔の存在によって雨水を一時貯留する機能を有していること、そしてそれは同時に水田の湿地ハビタットとしての機能の保全にもつながることである。多数の谷津で流出抑制が生じることで、ピーク流量や総流出量の抑制効果の期待値が高まるとしている。

島谷⁸⁾は、湿地再生×流域治水×OECMを同時に達成するための研究対象として迫を取り上げ、治水、環境に対する効果の検証、その実装に取り組んでいる。

島谷⁸⁾は、放棄水田となった迫田の自然を再生し、迫湿地内に小堤を設置し遊水地として機能させ流出抑制に取り組み、さらに湿地の再生管理を実施している。

迫の自然再生には、集水域である台地上の森林や農地を含めた環境の連続性・水循環・化学肥料や農薬、土壌流出などの管理が必要となる。また迫は集水域をもっており、土木的工法の確立と集水域を含めた治水効果の検証が必要であると提案している。

そこで本研究では、矢作川の中山間地における支川流域の「洞」の耕作放棄水田において、流出抑制として降水を一時的に貯留した場合の流出解析を行う。

2・4 中小河川を通った流出

流出抑制対策は、河川の基準点の流量を減らそうとする場合、それぞれの場所からの発生量を減らす手法、流達率を減らす手法、洪水波の時間差を活用し加算量を減らす手法の3手法が流出抑制手法として考えられる^{7,8)}。流達率は河道の形態による河道貯留、流量波形、粗度係数などに影響を受け、時間によって変化することに注意が必要である。よって、流達率を減ずるためには、氾濫域の確保、蛇行再生、粗度上昇、河道貯留量の増加が想定される^{7,8)}。

この流出抑制対策を実践した例が萱場・小田¹⁶⁾の中小河川における河道内貯留機能に着目した研究である。河道内貯留の機能は、主に大河川を対象に議論されてきたが、中小河川における河道の部分拡幅が、河道内貯留および洪水波形に及ぼす効果について研究した⁶⁾。

中小河川の河道側方部に設けたワンド状の空間はピーク流量の逓減・遅延機能、生物の生息・生育空間としての機能、親水機能を有するが、ピーク流量の逓減・遅延に関しては、これを評価した具体的研究が少なく、この効果を中小河川の計画の中に見込むことは困難な状況であった¹⁶⁾。そこで萱場・小田¹⁶⁾は、中小河川におけるハイドログラフに側方貯留空間が及ぼす影響と、各支川での対策により本川に対して期待される効果について検討した。

中小河川の河道拡幅及び部分拡幅は、中小河川の多自然川づくりにおいて、自然度が高い河川地形・河床環境の創出による生息場所の保全・創出の効果を期待するだけでなく、河道災害の回避の観点からも推奨される。

表 1 SWMM で使用した要素 (上) と
SWMM の各要素に設定する項目 (下)

実物での呼び名	河川 (河道)	河川 (合流地点)	森林・水田など 地表面	降水
SWMMでの呼び名	導管 (link)	合流 (node)	集水域	降水量
説明	断面形状・勾配を設定	標高を設定	降水量をこれに 入力	気象庁など から入手

導管(link)	長さ,断面形状,粗度係数,勾配
合流(node)	標高
集水域	流入 node 番号,不浸透面積率,面積, Horton の浸透能

流域治水におけるピーク流量逓減効果、洪水波形をずらす効果などに期待できる可能性についても、検討結果をもとに紹介された⁶⁾。

これらの取り組みの考え方に従って矢作川流域の中山間地域で治水対策を実践した想定で、本研究では流出解析を行うケースを設けた。

2・5 流出解析

流出解析を行うソフトは SWMM (Storm Water Management Model) を使用し、Dynamic Wave Model で流出解析を行った⁵¹⁾。

SWMM とは米国環境庁 (US-EPA) が開発した雨水管理モデルであり、都市部や都市近郊の地域を対象として、雨水排水路、貯留浸透施設、下水道等の機能を組み込み対象流域における汚水・雨水を総合的に解析と評価をすることができる。

SWMM は非線形のタンクモデルである。神田ほか⁵²⁾を参考として、SWMM における流出の基礎式を次に示す。

本解析での流出の基礎式は式 (1) である。

$$\frac{dV}{dt} = A \frac{dd}{dt} = Ai - Q \quad (1)$$

ここで、 V : 集水域上の水量、 d : 水深、 t : 時間、 A : 集水域の面積、 i : 降雨超過 (降雨強度-浸透能)、 Q : 流出量である。また流量 Q は次の式 (2) で示される。

$$Q = W \frac{1}{n} (d-d_p)^{\frac{5}{3}} \quad (2)$$

ここで W : 集水域の幅、 d_p : 凹地貯留の深さ、 l : 集水域の勾配である。

SWMM では窪地貯留による降雨の遮断、不飽和土壌層への降雨の浸透、浸透した水が地下水層へ浸透すること

など様々なプロセスを考慮して流出解析できる⁵¹⁾。和文では、豊國^{53~55)}による解説がある。我が国では神田ほか⁵⁶⁾と城戸⁵⁷⁾が SWMM を用いて都市域の河川流域で流出解析を行った研究がある。

流出解析を行う前に入力するデータのことを流域モデルという。本研究では矢作川流域の矢作ダムから河口までを流域モデルで構築し、図 1 の緑色範囲を対象として様々な設定値を設定して流出解析した。

流域モデルは表 1 (上) に示すように、河川は導管 (node) と合流 (link)、森林や田畑、市街地など河川以外の地表面部分は集水域、降水は降水量と呼ぶもので構築される。それぞれに設定する項目を表 1 (下) に示す。

SWMM の流出解析では、様々な設定値を設定して流域モデルを構築した後、降水量と上流端からの流量を入力して流出解析を行い、解析結果を得る (図 3)。

2・6 流域モデルの作成とパラメータの設定

本研究において、導管 (link) の長さや断面形状 (深さ、川幅、法勾配) は地理院地図の計測ツールを用いて設定した。例えば、矢作川本川を 250 m ごとに導管 1 本で構築する。その導管 1 本に対して、導管の長さ 250 m、断面形状 (深さ、川幅、法勾配)、河床のマニングの粗度係数を設定した。

マニングの粗度係数は国土交通省の設計便覧⁵⁸⁾ を使用し設定した。導管どうしをつなぐ合流 (node) は、標高を設定するので、地理院地図上に示される標高を用いて設定した。

集水域の面積は地理院地図の GIS 作図ツールを用いて面積を求めた。構築した集水域を、地理院地図に照らし合わせて面積を計測した。

不浸透面積率は、集水域の面積に対する不浸透域の面積の割合なので、地理院地図の計測機能で不浸透域の面積を求めて設定した。例えば、集水域の面積が 19 ha で、そのうち建物の屋根と、道路などの舗装された面積を地理院地図の計測機能で求め、割合を算出し、不浸透面積率は 25 % と設定した。表 2 に、設定した不浸透面積率を 10 % ごとに分けて、不浸透面積率とその対象の集水域の面積の合計を示す。

例えば、表 2 より、不浸透面積率 30 % 台に設定した集水域の面積の合計は 846.0 ha である。

Horton の浸透能は相馬ほか⁴¹⁾と平岡ほか⁴²⁾の現地試験によって求められた浸透能を用いた。

森林域の浸透能は、表 3 に示す値を設定した。また矢作川水系明智川流域の森林域では、相馬ほか⁴¹⁾の研究によって求めた浸透能を、常緑針葉樹林や落葉広葉樹林ごとにそれぞれ設定した。常緑針葉樹林や落葉広葉樹林の分布情報は、岐阜県域統合型 GIS の植生分布マップ⁵⁹⁾を利用した。この植物分布マップには、スギ・ヒノキ、コナラ、アカマツなどに分かれて図示されている。

表 2 集水域の不浸透面積率の割合毎の面積累計

単位	面積	
	%	ha
各段階の不浸透面積率	100	0.0
	90~99	49.4
	80~89	29.0
	70~79	44.0
	60~69	114.0
	50~59	49.2
	40~49	79.0
	30~39	846.0
	20~29	11,982.6
	10~19	5,972.0
0~9	29,474.6	
面積の合計		48,639.8

そこで、本研究では矢作川水系明智川流域の岐阜県内の森林域で、ヒノキ、コナラ、アカマツの3種類に分けて浸透能を設定した。その際に設定値の利用にしたのは相馬ほか⁴⁾の研究である。

森林域以外の Horton の浸透能は、初期浸透能 20 mm/h、最終浸透能 10 mm/h に設定した。

耕作放棄水田に貯留することを流域モデルに反映するために、SWMM の貯留アイコンを用いた。豊田市八草町、豊田市小原北町仲田の現地調査によって、畦の高さは約 40 cm だったことから、貯留できる最大の高さは 37 cm として設定し、耕作放棄水田の面積は地理院地図の GIS 作図ツールを用いて求めた。

例えば、豊田市八草町の耕作放棄水田 1 枚で、貯留する面積は 2869 m²、貯留する最大の高さ 37 cm、標高 140 m、取水口と流出口の大きさは 20 cm 四方の四角形と設定した。

研究対象範囲 486 km²のうち、0.516 km²の耕作放棄水田と耕作水田で貯留を想定した。

河道の粗度係数は矢作川本川と支川で設定値を分けた (表 3)。

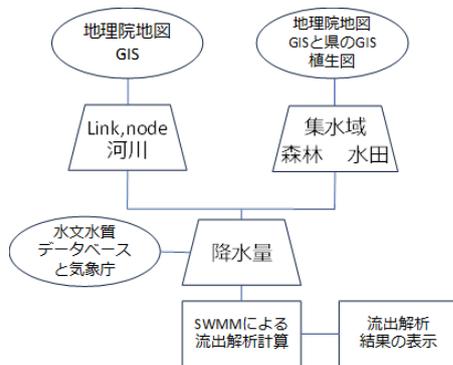


図 3 SWMM の流出解析の流れ

2・7 解析の概要

解析ケースは 3 ケースで行った。森林がはげ山で中小河川の河床の粗度係数が小さく、流出量が多くなるような極端な状態に設定した流出解析を case1、現状に近い状態を case2、森林域の初期浸透能が case2 よりも大きく、耕作放棄水田に貯留し、中小河川の粗度係数が大きい流出解析を case3 とした (表 3)。Case3 は研究対象範囲 486 km²のうち、0.516 km²の水田で貯留を実施した。

流出解析に用いた降雨イベントは、2000 年 9 月 11 日から 9 月 12 日にかけての東海 (恵南) 豪雨と、2013 年 9 月 15 日から 9 月 16 日にかけて台風 18 号の時のものと、2023 年 6 月 1 日から 6 月 3 日にかけての梅雨前線および台風 2 号による降雨である。

降水量の記録は水文水質データベースと、気象庁の過去の気象データ検索から得た。降水量観測点合計 9 地点の降水量の記録を利用した (表 4)。

表 4 に最大 1 時間雨量と累積雨量を示す。表 4 の最大 1 時間雨量の列の背景色は、気象庁の雨雲の動き (ナウキャスト) での降水量ごとの色⁶⁾に従った。累積雨量が 200 mm を超えたものは赤色で、270 mm を超えたものは紫色で背景色を塗った。

各雨量観測点に近い集水域に、各降水量を入力させて流出解析を行った。例えば小原雨量観測点に近い集水域には小原の降水量を、明智雨量観測点に近い集水域には明智の降水量を入力させて解析した。図 4 にどこの降水量の記録を入力させて解析したか示した。

愛知県の確率降雨⁶⁾を調べると、各地区に 10 分間や 60 分間など降雨時間別の確率雨量とその降雨強度が示されている。そして降雨強度式が求められていて、そこから降雨強度式による確率雨量が示されている。表 4 に示す確率年は、その降雨強度式による 60 分間の確率雨量から得て記している。例えば、2000 年東海 (恵南) 豪雨の際の気象庁岡崎雨量観測所で観測された最大 1 時間雨量の 85.0 mm/h は、岡崎地区の 60 分間の確率降雨では、確率年 1/150 にあたる。例として 2013 年台風 18 号の降雨イベントの際に、小原で観測された雨量を図 5 (上) に示す。

表 3 解析ケースごとの流域モデルの設定値

設定項目	単位	地域	case1 はげ山など	case2 現状想定	case3 流出抑制
森林域の浸透能	mm/h	初期	10	40	50
		最終	5	5	5
耕作放棄水田に貯留	無し		貯留なし	貯留なし	貯留あり
集水域の粗度係数	m ^{-1/3} s	浸透域	0.02	0.02	0.02
		不浸透域	0.04	0.04	0.04
河道の粗度係数	m ^{-1/3} s	本川	0.03	0.03~0.035	0.03~0.035
		支川	0.012	0.03~0.05	0.05
集水域の不浸透面積率	%	全域	個別に設定	個別に設定	個別に設定

表 4 流出解析に使用した降雨イベントの降水量一覧

大雨事例名		東海(恵南)豪雨(2000年)			台風18号(2013年)			梅雨前線及び台風2号(2023年)		
観測所名	確率降雨の 対象地区	最大1時間雨量 (mm/h)	累積雨量 (mm)	確率年 (60分間)	最大1時間雨量 (mm/h)	累積雨量 (mm)	確率年 (60分間)	最大1時間雨量 (mm/h)	累積雨量 (mm)	確率年 (60分間)
矢作ダム	設案地区	記録無し	明智の記録を入力		42.0	205.0	1/2	32.0	208.0	1/1.1
明智	小原地区	47.0	355.0	1/2	66.0	214.0	1/10	31.0	204.0	1/1.1
小原	小原地区	40.0	262.0	1/1.1	92.0	194.0	1/80	38.5	223.0	1/1.1
道慈	小原地区	33.0	287.0	1/1.1	71.0	158.0	1/10	39.0	211.0	1/1.1
猿投	小原地区	記録無し	豊田の記録を入力		54.0	140.0	1/30	35.0	215.0	1/1.1
乙部	名古屋地区	69.0	412.0	1/10	34.0	97.0	1/1.1	32.0	188.0	1/1.1
足助	岡崎地区	50.0	295.0	1/6	48.0	218.0	1/5	36.0	203.0	1/2
豊田	名古屋地区	61.0	413.0	1/8	38.5	115.0	1/2	35.0	201.5	1/1.1
岡崎	岡崎地区	85.0	288.0	1/150	22.5	162.5	1/1.1	42.0	275.5	1/3

観測所名の背景色の凡例： 水文水質データベース 気象庁過去の気象データ検索

解析に使用した降雨イベントのなかで、60分間の確率雨量の確率年が最も大きかったのは、150年に1回の確率であった(表4)。

流域モデルに入力する流量は、矢作ダムで観測された放流量を水文水質データベースから得て使用し、流域モデルの最上流端として、矢作ダムの放流量を流域モデルに流下させて解析した。

解析に使用した矢作ダムの放流量の期間は、2000年9/10の1:00~9/12の24:00と、2013年9/15の1:00~9/17の23:00(図5下)と、2023年5/31の1:00~6/4の6:00である。

3. 解析結果

3・1 矢作川支川の解析結果と考察

阿摺川と矢作川の合流点での水位ハイドログラフを、図6に示す。はじめの水位ピークの山がcase2よりもcase1の方が高かった。これはcase1の粗度係数がcase2よりも小さいので流速が速くなり、流下が早まったからだと考える。

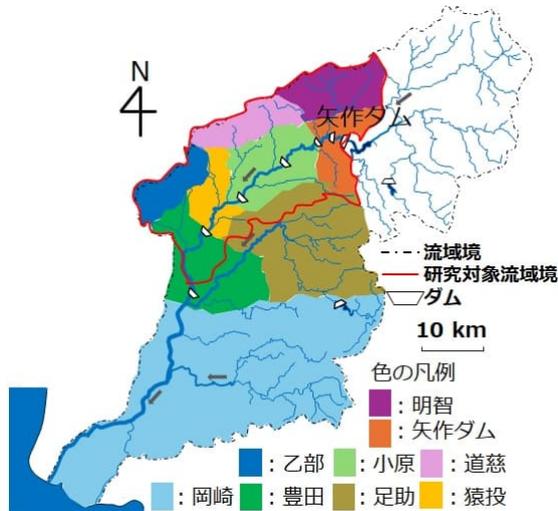


図4 降水量の記録の集水域への入力先

3・2 矢作川本川の解析結果と考察

水文水質データベースにある、小渡から高橋までの水位観測所で、実際に観測された水位の観測値と、SWMMの解析結果の水位と比較する。ピーク水位の値はまとめて表5に示す。水位のハイドログラフは、高橋水位観測所での3ケースの解析結果と実際に観測された観測値を、図7に示す。

2000年東海(恵南)豪雨の時の解析結果について、実際に観測された水位の観測値の記録は、高橋水位観測所しか記録が残っていない。よって小渡と猿投は解析結果のみのピーク水位を表5に示す。

高橋の観測値は9/12 9:00に最大値7.36 mを記録した。解析結果のピーク水位はcase1では2時間早い7:00に5.24 m、case2では9:00に5.76 mとなった(図7上)。

2013年台風18号の時の降雨での解析結果について、猿投の観測値は9/16 11:00に最大値7.78 mを記録した。解析結果のピーク水位はcase1では同時刻に最大値7.52 m、case2では同時刻に最大値6.77 mとなった(表5)。

高橋では観測値は9/16 12:00に最大値4.40 mを記録し、解析結果のcase1では同時刻に5.17 m、case2では同時刻に3.87 mであった(図7中、表5)。

2023年の梅雨前線及び台風2号による大雨を用いた解析結果では、猿投の観測値は6/2 15:00に最大値6.92 mを記録した。解析結果のピーク水位はcase1では5時間早い10時に最大値7.57 m、case2では1時間早い14時に最大値6.80 mとなった(表5)。

高橋では観測値は6/2 16:00に最大値4.21 mを記録し、解析結果のCase1では5時間早い11時に4.31 m、case2では1時間早い15時に4.04 mとなった(図7下、表5)。

Case1は森林の浸透能が低いので流出量が増え、中小河川の粗度係数が低い設定であるため、河川への流出が早まったと考えられた。その結果ピーク到達時間が早まり、ピーク水位も観測値よりも高くなった。

矢作川流域の中山間地域を対象とした流出解析

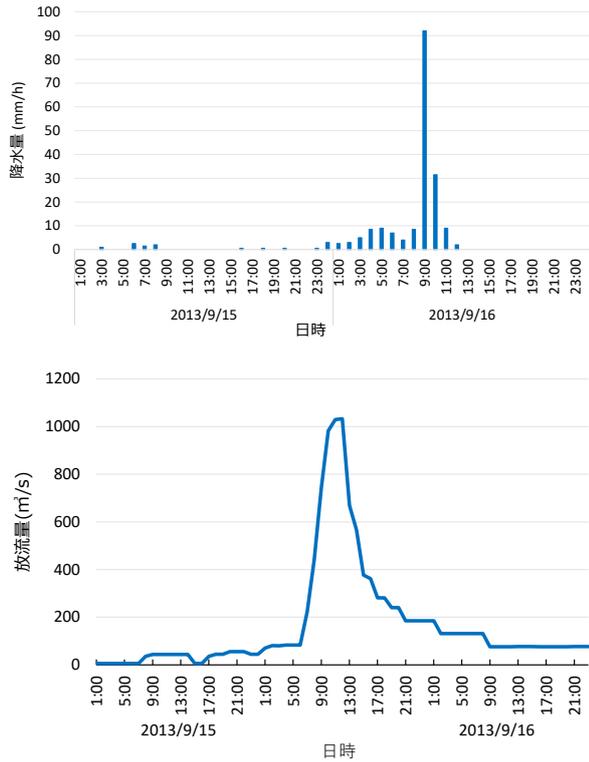


図5 豊田市 小原の降水量（上）と最上流端として流下させた矢作ダムの放流量（下）

3・3 提案：流出を抑制する設定

森林域の初期浸透能が case2 よりも 10 mm/h 高く、耕作放棄水田に貯留（研究対象範囲 486 km² のうち、0.516 km² で実施）し、中小河川の河床の粗度係数が高い値（0.05：若干の石、雑草がある⁵⁸⁾）にして解析した（表3）。解析ケース名は case3 とした。貯留を実施した耕作放棄水田と耕作水田を例示すると、豊田市八草町、豊田市小原北町石田洞、豊田市新盛町菅田和にある。

3・4 矢作川支川における流出を抑制した場合の解析結果と考察

耕作放棄水田に貯留した解析結果を、横軸は日時で縦

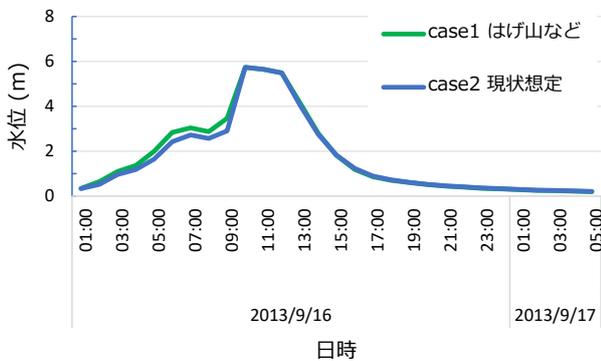


図6 2013年台風18号の阿摺川合流点の水位のヒドログラフ

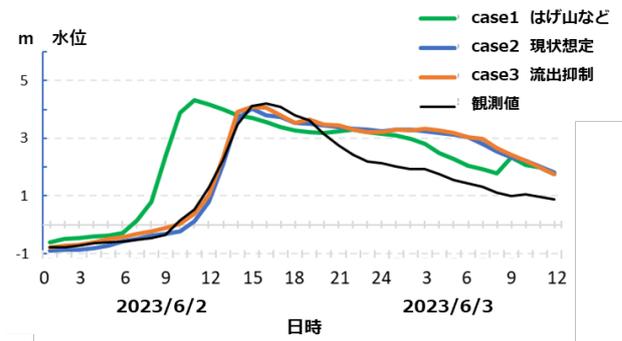
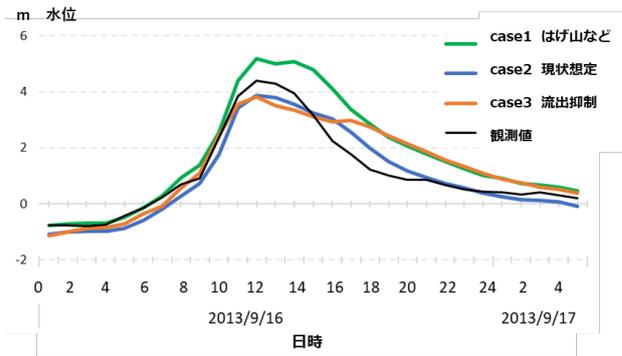
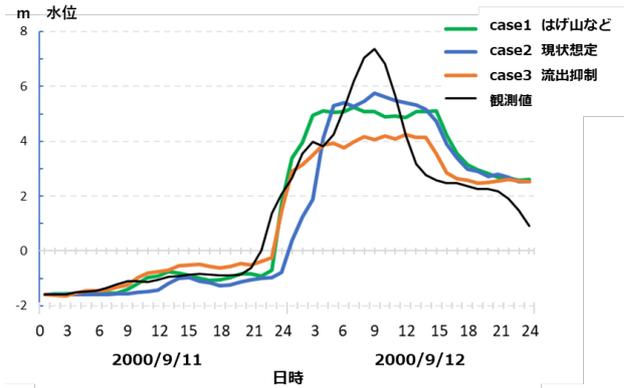


図7 高橋の観測値と解析結果の水位の比較（上：2000年、中：2013年、下：2023年の降雨）

軸は耕作放棄水田の湛水水深であらわし、図8に示す。放棄水田2は放棄水田1と連結していて、放棄水田1の下流につながっている。よって放棄水田1にある程度貯留されると、それ以降は放棄水田2が満杯になるまで優先的に貯留されるという様子が図8から考えられた。

耕作放棄水田 A と、2023年降雨の放棄水田2のグラフが平坦になっているのは、満杯まで貯留したことを意味している。

耕作放棄水田貯留の有無での支川の水位変化を、貯留した耕作放棄水田の下流で水位ハイドログラフを作成し図9に示す。case2、case3 どちらも2013年9/16 10:00に水位のピークがあった。Case2のピーク水位は0.62mで、case3のピーク水位は0.57mであった。耕作放棄水田に貯留することで、その下流の支川のピーク水位が5cm低下した。

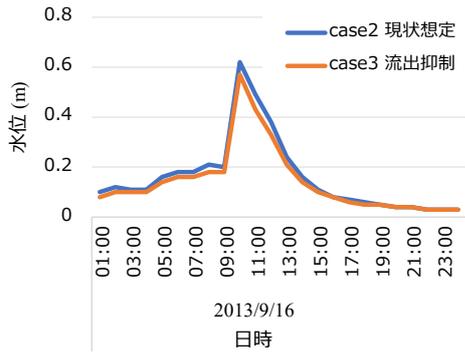


図 9 2013 年台風 18 号の耕作放棄水田貯留の有無による支川での水位の比較

3・5 矢作川本川における流出を抑制した場合の解析結果と考察

3・2 節と同様に、水文水質データベースにある、小渡から高橋までの水位観測点で、実際に観測された水位の観測値と、SWMM の解析結果の水位で比較する。まとめて表 5 に示す。

2000 年東海豪雨の時の解析結果について、実際に観測された水位の観測値の記録は、高橋水位観測所しか記録が残っていない。よって小渡と猿投は解析結果の case2 と case3 のみのピーク水位を表 5 に示す。

高橋の観測値は 2000 年 9/12 9:00 に最大値 7.36 m を記録した。解析結果のピーク水位は case2 では 9:00 に 5.76 m、case3 では 12:00 に 4.26 m となった (図 7 上、表 5)。

2013 年台風 18 号の時の降雨での解析結果について、猿投の観測値は 9/16 11:00 に最大値 7.78 m を記録した。解析結果のピーク水位は case2 では同時刻に最大値 6.77 m、流出を抑制する設定の case3 では同時刻に最大値 6.82 m となった (表 5)。

高橋では観測値は 9/16 12:00 に最大値 4.40 m を記録

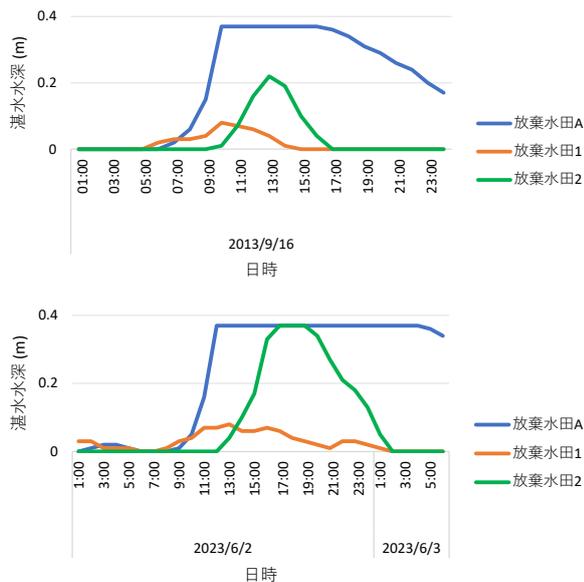


図 8 耕作放棄水田の貯留による湛水水深のハイドログラフ (上: 2013 年降雨 下: 2023 年降雨)

し、解析結果の case2 では同時刻に 3.87 m、case3 では同時刻に 3.81 m であった (図 7 中、表 5)。

2023 年の梅雨前線及び台風 2 号による大雨を用いた解析結果では、猿投の観測値は 6/2 15:00 に最大値 6.92 m を記録した。解析結果のピーク水位は case2 では 1 時間早い 14 時に最大値 6.80 m、case3 では 14 時に最大値 6.78 m となった (表 5)。

高橋では観測値は 6/2 16:00 に最大値 4.21 m を記録し、解析結果の Case2 では 1 時間早い 15 時に 4.04 m、case3 では 15 時に 4.10 m となった (図 7 下、表 5)。

2013 年台風 18 号の降雨で、高橋の水位のハイドログラフの形 (図 7 中) が、観測値よりも解析結果の方がなだらかになった。

ハイドログラフの形がなだらかになるということは、ピーク水位が低くなったり、下流へ流下する流量が分散したりすることになる。そのようになると河道の断面積にゆとりが生まれ、越流や氾濫する危険度が下がる。

森林が保水する能力の限界に達し、河川へ流出した分の流量を、耕作放棄水田に貯留したり、中小河川の粗度係数を上げたりすることで、ピーク水位低減効果が出るのが期待できる。

2000 年東海 (恵南) 豪雨の場合の高橋では、観測値のハイドログラフは 2 段階で水位が上昇していることがわかる (図 7 上)。しかし case2 では、2 段階で水位は上昇していない。実際には河床に砂礫が流下や堆積して、河道断面が変わったこともあり、水位がさらに上昇したと考える。

ただ、SWMM では、解析途中に河道断面の変更は解析に反映できないため、case2 と観測値の水位ハイドログラフが、ほとんど一致するような結果にはならなかったと考えた。

流出を抑制する設定の case3 では、2000 年東海 (恵南) 豪雨の場合は猿投では case2 より 0.10 m 低下した (表 5)。

2013 年台風 18 号の場合は猿投では観測値よりも 0.95 m ピーク水位が低下し (表 5)、2023 年梅雨前線及び台風 2 号の場合は猿投では観測値よりも 0.14 m 低下した (表 5)。

流出を抑制する設定の case3 では、2000 年東海 (恵南) 豪雨の場合は高橋では観測値よりも 3.04 m 低下した (図 7 上、表 5)。2013 年台風 18 号の場合は高橋では観測値よりも 0.58 m ピーク水位が低下し (図 8 中、表 5)、2023 年梅雨前線及び台風 2 号の場合は高橋では観測値よりも 0.03 m 上昇した (図 7 下、表 5)。

4. 流出を抑制する設定を可能にする具体例

4・1 森林域での流出抑制の取り組み

平岡ほか⁴²⁾は、ヒノキ人工林で下層植生が増えることで最終浸透能が高くなることを示した。矢作川流域の森林域で下層植生が生えるように、また生えている状態

矢作川流域の中山間地域を対象とした流出解析

表5 観測値と解析結果のピーク水位一覧

水位 (m)	2000年東海(恵南)豪雨				2013年台風18号				2023年梅雨前線及び台風2号			
	観測値	Case1	Case2	Case3	観測値	Case1	Case2	Case3	観測値	Case1	Case2	Case3
小渡	記録無し	5.40	5.86	5.94	4.76	3.43	3.98	3.87	4.98	2.24	2.56	2.61
猿投	記録無し	8.33	6.82	7.77	7.78	7.52	6.77	6.82	6.92	7.57	6.80	6.78
高橋	7.36	5.24	5.76	4.26	4.40	5.17	3.87	3.81	4.21	4.31	4.04	4.10

が維持できるように、林床に日光が差し込むことが必要だと考える。そのために間伐を行い、下層植生が生えている状態が続くように手を加えることを提案する。

4・2 耕作放棄水田に貯留

4・2・1 研究対象流域の耕作放棄水田

耕作水田が放棄された時期は、様々である。1971年の減反政策、2020年以降を含むその後の様々な時期に耕作放棄水田になったと考えられる。

耕作放棄水田を現地調査した箇所は、

- 1) 豊田市八草町(2025年1月24日)
- 2) 豊田市小原北町石田洞(2025年1月26日)
- 3) 豊田市新盛町菅田和(2025年1月26日)

である。現地の方の聞き取りは2)と3)で行うことができた。石田洞と菅田和は集落の名前や呼び名であり、地名としては「小原北町石田」と「小原北町石洞」、「新盛町菅田」である。

3)の菅田和の耕作放棄水田は、高野⁶²⁾によると1978年には耕作放棄水田になっていた。しかし、一部の耕作放棄水田は再び耕作水田に戻した(図10)と私たちの聞き取り調査で明らかになった。

2)の石田洞にある耕作放棄水田は、聞き取り調査で2006年に耕作放棄水田になったとわかった。その場所から少し山の中に入ると、水田の跡がみられる場所があった(図11上)。畦のように少し段差があることから、水田の跡と考えられ、その場所については1970年代の減反政策時に耕作放棄水田になったと聞き取ることができ

た。

また石田洞にある耕作放棄水田は水が張られていて、一見、耕作放棄水田に見られなかった(図11下)。聞き取り調査で「草が生えてこないようにするために水を張っている」と知ることができた。

1)の豊田市八草町にある耕作放棄水田のうち、減反政策がきっかけで放棄された水田の現状は、植生遷移が進行し、樹木が生えている(図12)。

2)の石田洞にある耕作放棄水田も同様に、減反政策がきっかけで放棄された水田には樹木が生えている(図11上)。

以上のことから、現時点で耕作放棄水田には様々な状態のものがある。容易に貯留できる耕作放棄水田は、河川沿いにあり、河川の水を容易に取水できるものが、す



図10 耕作放棄から再び耕作水田に戻した水田



図11 石田洞の耕作放棄水田

ぐに貯留でき流出を抑制する具体例になる。

4・2・2 耕作放棄水田に取水して貯留

容易に取水する方法は、耕作水田時に使用していた取水口をそのまま使用する方法(図 13 上)と、遊水地のようにして河川から耕作放棄水田に直接流入させる方法(図 13 中)、河川にリーキーダム⁶³⁾のような堰を設置して貯水する方法(図 13 下)が考えられる。

耕作水田時に使用していた取水口をそのまま使用する方法の例として、豊田市八草町の耕作放棄水田とその取水口の位置を豊田市基本図上に記し、図 14 に示す。

取水口を赤丸で、赤矢印が取水口から先につながっているパイプを示す。取水口の蓋は常に開けておけば、開け閉めのために人が現地に行かずに済むようできる。

古く減反政策がきっかけで放棄された水田は、植生遷移が進行し、樹木が生えている(図 11 上、図 12)ことが多いことから、堰を設置したり越流堤を設置したりするためには、ある程度樹木を伐採する必要があると考える。その際に伐採された樹木を、堰の材料として使用し、耕作放棄水田に貯留する方法を提案する(図 13 下)。

このような放棄水田への貯留の生物多様性の観点からの意義は、絶滅危惧種の生息場の保全とともに、湿地ネットワークを再生し、生物群集の保全に寄与することである⁶⁴⁾。

4・3 三面コンクリート張り河川の再改修

本研究の研究対象流域で、支流には多くの三面コンクリート張り河川がある。その区間の河床のコンクリート張りだけでなくすことで粗度係数を上げることが望ましい。

宮崎県高千穂町を流れる山附川では、2005 年 9 月 6 日に台風 14 号によって川沿いの棚田は深くえぐられた。河床には巨石がたくさんあり、倒壊した家もあった⁶⁵⁾。

島谷⁶⁵⁾は上流の流れを速め、下流に速やかに水を流すこれまでの手法は下流域に洪水を発生させる結果につながったという。山附川では被災した部分で川幅を広げるなどして、流速が上がらない改修を試みた。被災した区間では、被災して流失した水田を買って川幅を広げ、護



図 13 耕作放棄水田に取水する例



図 12 豊田市八草町の耕作放棄水田

岸の法面を曲線的に施工し、巨石は利用方法を見極めて生かす施工をした。

矢作川流域でも、直線的な支流を蛇行させたり、支流に隣接する耕作放棄水田を「河川化」して部分的に川幅を拡幅したりすることを提案する。

5. 謝辞

本研究は愛知工業大学 工学部 社会基盤学科 城戸由能教授の指導のもとに杉原が始めた愛知工業大学 土木工学科の

矢作川流域の中山間地域を対象とした流出解析

卒業研究、および愛知工業大学大学院 工学研究科 博士前期課程 建設システム工学専攻において 1 年次まで城戸教授のもとで杉原が履修した「水圏環境・生態学特別研究」の成果が基礎となっている。しかし、その後、城戸教授の健康上の問題のため、2 年次には内田が指導を引き継いだ。

卒業研究と博士前期課程 1 年次に流出解析をご指導いただいた城戸由能教授に、心より感謝申し上げます。

また、卒業研究と博士前期課程 2 年間を通じて懇切丁寧なご指導をいただいた愛知工業大学 工学部 社会基盤学科 赤堀良介教授にも、心より感謝申し上げます。

6. 要約

矢作川の森林・水田（耕作放棄水田を含む）・中小河川が入り組んだ中山間地域で流出解析（SWMM）を行った。SWMM のパラメータ設定を既往研究の結果を参考にして調査することによって、対象とした 3 回の出水のうち 2 回について高橋水位観測所の観測値をほぼ再現することができた。

森林・水田・中小河川についてさらに流出を抑制する対策を施した場合の予想を示し、豊田市八草町、豊田市小原北町石田洞、豊田市新盛町菅田和での対策提案の具体例を示した。

引用文献

- 1) 土木学会誌編集委員会:特集 流域治水. 土木学会誌, 107(6), pp.10-45, 2022.
- 2) 社会資本整備審議会 河川分科会 気候変動を踏まえた水災害対策検討小委員会:気候変動を踏まえた水災害対策のあり方について—あらゆる関係者が流域全体で行う持続可能な「流域治水」への転換 答申. ii+65pp., 2020.
- 3) 瀧 健太郎:「流域治水」の実現可能性. 土木学会誌, 107(12), pp.24, 東京, 2022.
- 4) 鶴田 舞, 伊藤崇宏, 松田 啓, 柳澤 修:流域治水対策の検討・推進プロセスに関する事例分析. 河川技術論文集, 30, pp.513-518, 2024.
- 5) 内田龍彦, 岩見収二, 石川博基, 知花武佳, 川池健司, 原田守啓, 呉 修一:流域治水に関わる近年の河川技術研究の動向. 河川技術論文集, 30, pp.501-506, 2024.
- 6) 原田守啓, 呉 修一, 内田龍彦:流域治水の実践と求められる技術:持続可能な社会の発展に河川技術はどうか貢献するか?. 河川技術論文集, 30, pp.519-524, 2024.
- 7) 島谷幸宏:熊本県で進む流域治水研究の思想と実装. 現代思想, 51(14), pp.88-95, 2023.
- 8) 島谷幸宏:球磨川流域を対象とした緑の流域治水の概念化とそれに基づく実践. 河川技術論文集, 29, pp.425-430, 2023.
- 9) 島谷幸宏:巻頭言:未来につなぐ共創の流域治水—その思想と手法. BIOCITY, 99, pp.6-14, 2024.
- 10) 田村隆雄, 端野道夫, 穴水秀樹, 荒木隆夫:吉野川池田ダム上流の森林流域の洪水低減機能に関する定量的評価. 水工学論文集, 52, pp.379-384, 2008.
- 11) 小河 健一郎, 田村隆雄, 瀧川紀子, 桑原正人, 高西春二:樹種転換を伴う銅山川上流域における 50 年間の洪水流出特性の変化. 土木学会論文集 B1(水工学), 67, pp.I_571-I_576, 2011.
- 12) 田村隆雄, 上田 尚太朗, 武藤裕則, 鎌田磨人:遮断蒸発率と地表粗度の増強による森林の洪水低減機能の早期向上に関する検討. 土木学会論文集 B1(水工学), 76, pp.I_127-I_132, 2020.
- 13) 上田 尚太朗, 田村隆雄, 武藤裕則, 鎌田磨人:人工林の針広混交林化による森林の洪水低減機能向上に関する研究. 土木学会論文集 B1(水工学), 77, pp.I_157-I_162, 2021.
- 14) 玉井 典, 佐々木 勝教, 馬越唯好, 白鳥 実, 豊田康嗣:森林の土壤保水力を考慮した高精度な流出解析手法を用いた林相変化に関する降雨流出解析. 土木学会論文集 G(環境), 69, pp.I_151-I_159, 2013.
- 15) 新垣俊介, 一柳英隆, 皆川朋子:球磨盆地における追耕作放棄田を活用した流出抑制と湿性生物生息場保全に関する基礎研究. 河川技術論文集, 29, pp.449-454, 2023.
- 16) 萱場祐一, 小田一輝:中小河川における河道側方部の貯留空間によるピーク流量逡減効果—多自然川づくりの流域治水への実装に向けての一考察. 河川技術論文集, 29, pp.437-442, 2023.
- 17) 村上哲生, 南 基泰:はじめに—洞を歩く. 洞学—洞の自然と人との関わり. pp.4-8, 風媒社, 名古屋, 2020.
- 18) 西廣 淳, 大槻順朗, 高津文人, 加藤大輝, 小笠原奨悟, 佐竹康孝, 東海林 太郎, 長谷川 雅美, 近藤昭彦:「里山グリーンインフラ」による気候変動適応:印旛沼流域における谷津の耕作放棄田の多面的活用の可能性. 応用生態工学, 22, pp.175-185, 2020.
- 19) 蔵治 光一郎, 保屋野 初子(編):緑のダムの科学—減災・森林・水循環. 253pp., 築地書館, 東京, 2014.
- 20) 谷 誠:水と土と森の科学. 京都大学学術出版会, 243pp., 2016.
- 21) 蔵治 光一郎, 保屋野 初子(編):緑のダム—森林・河川・水循環・防災. 260pp., 築地書館, 東京, 2004.
- 22) 蔵治 光一郎:森の「恵み」は幻想か—科学者が考える森と人の関係. 218pp., 化学同人, 京都, 2012.
- 23) 虫明功臣, 太田猛彦(監修):ダムと緑のダム—狂暴化する水災害に挑む流域マネジメント, 237pp., 日経 BP, 東京, 2019.
- 24) 日本学術会議:地球環境・人間生活にかかわる農業及び森林の多面的な機能の評価について(答申), 112pp., 2001.

- 25) 吉谷純一:「緑のダム」議論は何か問題かー土木工学の視点から. 蔵治 光一郎, 保屋野 初子(編), 緑のダムー森林・河川・水循環・防災, pp.118-130, 築地書館, 東京, 2004.
- 26) 今後の治水対策のあり方に関する有識者会議:今後の治水対策のあり方についてー中間とりまとめ, 71pp., 2010.
- 27) 山田 正:河川工学、治水の立場から. 蔵治 光一郎, 保屋野 初子(編), 緑のダムの科学 減災・森林・水循環, pp.31-45, 築地書館, 東京, 2014.
- 28) 高橋定雄:森林における治水・利水機能とその限界. 虫明功臣, 太田猛彦(監修):ダムと緑のダムー狂暴化する水災害に挑む流域マネジメント, pp.45-68, 日経BP, 東京, 2019.
- 29) 蔵治 光一郎:森林の機能論としての「緑のダム」論争. 蔵治 光一郎, 保屋野 初子(編), 緑のダムー森林・河川・水循環・防災, pp.131-149, 築地書館, 東京, 2004.
- 30) 恩田裕一(編):人工林荒廃と水・土砂流出の実態, 245pp., 岩波書店, 東京, 2008.
- 31) 日本学術会議:河川流出モデル・基本高水の検証に関する学術的な評価(回答), 219pp., 2011.
- 32) 谷 誠:山地流域における自然貯留の洪水緩和機能に関する方法論的考察. 水利科学, 55(1), pp.151-173, 2011.
- 33) 谷 誠:森林の保水力はなぜ大規模な豪雨時にも発揮されるのか?ーその1洪水緩和にかかわる二種の効果の区別. 森林科学, 66, pp.26-31, 2012.
- 34) 谷 誠:森林の保水力はなぜ大規模な豪雨時にも発揮されるのか?ーその2森林の取り扱いから考える. 森林科学, 67, pp.26-31, 2013.
- 35) 谷 誠:豪雨時に森林が水流出に及ぼす影響をどう評価するか. 蔵治 光一郎, 保屋野 初子(編), 緑のダムの科学ー減災・森林・水循環, pp.46-65, 築地書館, 東京, 2014.
- 36) 谷 誠:水循環に及ぼす森林の影響. 中村太士, 菊沢喜八郎(編), 森林と災害, pp.24-77, 2018.
- 37) 五名美江, 蔵治 光一郎:ハゲ山に森林を再生した小流域における降雨量ー直接流出量関係の長期変化. 日本森林学会誌, 94, pp.214-222, 2012.
- 38) 蔵治 光一郎・五名美江:70年以上の長期モニタリングが明らかにした治水計画の対象となるような大雨時の森林保水量の実態. 科学, pp.397-402, 83(4), 岩波書店, 東京, 2013.
- 39) 藤枝基久:森林の水源涵養機能ーいち研究職員の業務記録, 99pp., ブイツーソリューション, 名古屋, 2018.
- 40) 蔵治 光一郎:流域治水における森林の役割ー「流域治水×森林マネジメントシステム」の可能性. BIOCITY, 99, pp.32-39, 2024.
- 41) 相馬ふきの, 洲崎燈子, 野崎健太郎:足助町大河原川の源流域における森林土壌の浸透能. 矢作川研究, 9, pp.61-68, 2005.
- 42) 平岡 真合乃, 恩田裕一, 加藤弘亮, 水垣 滋, 五味高志, 南光一樹:ヒノキ人工林における浸透能に対する下層植生の影響. 日本森林学会誌, 92, pp.145-150, 2010.
- 43) 早瀬吉雄:中山間地水田域の洪水防止機能評価. 応用水文, 4, pp.81-89, 1992.
- 44) 早瀬吉雄:水田地帯の洪水防止・軽減機能の評価と機能向上事業の提案, 農業土木学会誌, 62, pp.943-948, 1994.
- 45) 吉田武郎, 増本隆夫, 工藤亮治, 谷口智之, 堀川直紀:広域水田灌漑地区の用水配分・管理モデルの実装による流域水循環のモデル化. 農業農村工学会論文集, 80(1), pp.9-19, 2012.
- 46) 増本隆夫, 高木強治, 吉田 修一郎, 足立 一日出:中山間水田の耕作放棄が流出に与える影響とその評価. 農業土木学会論文集, 189, pp.389-398, 1997.
- 47) 増本隆夫, 野添 学, 吉村 亜希子, 松田 周:耕作放棄に伴う流出量変化を評価する中山間水田流出モデル. 農業土木学会論文集, 2003(224), pp.175-184, 2003.
- 48) 吉村 亜希子, 石田憲治, 渡嘉敷 勝:中山間地域における水田の耕作放棄が流出に及ぼす影響. 農村計画学会誌, 20, pp.139-144, 2001.
- 49) 吉田武郎, 増本隆夫, 堀川直紀, 皆川裕樹:中山間水田が主体の小流域における短期流出過程のモデル化. 農業農村工学会論文集, 81(3), pp.235-244, 2013.
- 50) 増本隆夫:水田の貯留機能評価と水資源の流域管理にみるパラダイム・シフト. 水文・水資源学会誌, 11(7), pp.711-722, 1998.
- 51) United States Environmental Protection Agency : SWMM. <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm>, (最終閲覧日 2025年2月21日).
- 52) 神田 徹, 神吉和夫, 山田 敏, 西山武志:SWMM法を用いた都市下水道流況予測システム. 水工学論文集, 37, pp.117-122, 1993.
- 53) 豊國永次:都市域の流出モデルについて(1). 神戸大学農学部研究報告, 19, pp.17-26, 1990.
- 54) 豊國永次:都市域の流出モデルについて(2). 神戸大学農学部研究報告, 20, pp.87-92, 1992.
- 55) 豊國永次:都市域の流出モデルについて(3). 神戸大学農学部研究報告, 20, pp.183-195, 1993.
- 56) 神田 徹, 神吉和夫, 渡辺政広, 前田康宏:都市小流域へのSWMMの適用におけるモデル・パラメータの値について. 水工学論文集, 45, pp.79-84, 2001.
- 57) 城戸由能:西羽東師川流域の水文・環境観測と水・汚濁負荷流出解析, 京都大学防災研究所年報, 51(B), pp.549-563, 2008.

矢作川流域の中山間地域を対象とした流出解析

- 58) 国土交通省近畿地方整備局:設計便覧(案), 第 2 編 河川編, 第 11 章水路, pp.水路-1-pp.水路-3, 2012. https://www.kkr.mlit.go.jp/plan/jigyousya/technical_information/consultant/binran/etsuran/page02.html, (最終閲覧日 2025 年 2 月 27 日).
- 59) (公財)岐阜県建設研究センター:県域統合型 GIS 植生分布(H6~10 調査結果). <https://gis-gifu.jp/gifu/Agreement?IsPost=False&MapId=1188&RequestPage=%2fgifu%2fPositionSelect%3fmid%3d1188>, (最終閲覧日 2025 年 3 月 4 日).
- 60) 気象庁:気象庁ホームページにおける気象情報の配色に関する設定指針, pp.7, 表 2-1, 2020. https://www.jma.go.jp/jma/kishou/info/colorguide/HPColorGuide_202007.pdf, (最終閲覧日 2025 年 3 月 8 日).
- 61) 愛知県河川課:愛知県の確率降雨(平成 18 年 1 月 1 日から適用), pp.1-15, pp.20-23, 2006, <https://www.pref.aichi.jp/uploaded/attachment/231329.pdf>, (最終閲覧日 2025 年 3 月 4 日).
- 62) 高野雅夫:中山間地域の集落再生のための基礎知識. 中山間地域を存続させるための移住・定住空き家活用取り組み実践ガイド, pp.7-36, (一社)おいでん・さんそん, 豊田, 2024.
- 63) 近藤学永, 萱場祐一:リーキーダム(透過型ダム)が洪水波形に与える影響に関する基礎的研究, 令和 6 年度土木学会全国大会第 79 回年次学術講演会要旨, 土木学会, 河道の水理(1), II-84, 東京, 2024.
- 64) 島谷幸宏:流域治水と OECM 人吉球磨地域の迫湿地の再生へ. BIOCITY, 92, pp.94-97, 2022.
- 65) 島谷幸宏:協働による環境と防災の調和 対立を乗り越え、よりよい復興・公共事業を行うために, あまみず文庫, 84pp., 2023.

(受理 令和 7 年 3 月 19 日)