

平成21年6月1日現在

研究種目： 基盤研究(B)

研究期間： 2005～2008

課題番号： 17380144

研究課題名(和文) 緑のダム機能の水文学的評価に関する研究

研究課題名(英文) Study on hydrological evaluation of green dam effects

研究代表者

田中丸 治哉 (TANAKAMARU HARUYA)

神戸大学・大学院農学研究科・教授

研究者番号：80171809

研究成果の概要： 森林の持つ洪水緩和機能や渇水緩和機能のことが緑のダム機能と呼ばれている。この概念は特に新しいものではないが、最近、ダム建設の是非に関する議論に際して頻繁に取り上げられ、その評価は研究者、行政、市民を巻き込んだ論争に発展している。本研究は、山林流域と農地造成流域の水文データの比較、針葉樹人工林流域における間伐前後の水文データの比較、針葉樹人工林斜面と自然雑木林斜面における植生と土壌物理性の比較等に基づいて、緑のダム機能の水文学的な評価を試みたものである。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	5,400,000	0	5,400,000
2006年度	2,000,000	0	2,000,000
2007年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2008年度	1,900,000	570,000	2,470,000
年度			
総計	11,100,000	1,110,000	12,210,000

研究分野：農学

科研費の分科・細目：農業工学 農業土木学・農村計画学

キーワード：緑のダム、対照流域法、農地造成、間伐、水循環モデル、タンクモデル、流出負荷量、流域貯留量

## 1. 研究開始当初の背景

森林の持つ洪水緩和機能、渇水緩和機能のことが緑のダム機能と呼ばれている。この概念は特に新しいものではないが、民主党諮問委員会の「緑のダム構想」(2000年)や前長野県知事の「脱ダム宣言」(2001年)を契機として、広く一般にも注目されるようになった。また、徳島県の吉野川第十堰の改築(可動堰建設)や熊本県の川辺川ダムの建設について、その是非が活発に議論されてきたが、建設推進側と建設反対側の間で緑のダム機能の有無が争点の一つとなっている。

緑のダム機能の評価は、かねてから森林水

文学の最も重要な課題の一つであり、主に対照流域法による水文観測によって森林植生の皆伐や部分伐採が流出・水収支に及ぼす影響が世界各国で検討されてきた。

農業土木分野でも1980年以降、山林における農地造成が流出・水収支に与える影響に関する研究が精力的に行われてきており、それらの研究では、対照流域法によって、山林流域と森林が伐採・除去された農地造成流域の水文データが対比されたことから、森林の洪水緩和機能、渇水緩和機能の評価事例としても度々引用されてきた。

一方、我が国では、間伐、枝打ち等の森林

管理が不十分な荒廃人工林が増えてきていることから、近年は、森林管理のあり方が流域からの洪水流出や土砂流出に及ぼす影響が議論され始めた。しかしながら、これまでの対照流域法による水文観測のほとんどは、森林の皆伐や部分伐採、農地造成といったかなり強いインパクトが流域に及ぶ場合を検討対象としてきており、間伐や針広混交林化が流域の水文特性に与える影響についてはまだ十分なデータが得られておらず、この種の実証データの蓄積が必要とされていた。

## 2. 研究の目的

(1) 前述のような背景から、研究代表者ら(田中丸, 多田, 瀧本)がかねてから参画してきた農地造成の流出・水収支への影響評価に関する研究を基礎として、これまでに収集されてきた対照流域法による水文データを緑のダム機能という観点から再評価する。

(2) さらに、山林小流域における水文・水質観測を実施するとともに、流域内の針葉樹人工林斜面と自然雑木林斜面における植生と土壌物理性を細かく調査して、植生状況と土壌物理性の関係を検討する。水質データに関しては、15分間隔での水質現場観測を実現するとともに、流出負荷量の変化を定量的に検出する方法を検討する。

(3) 一方、研究分担者(武田)は、かねてから間伐遅れが生じている人工林流域とそうでない人工林流域の水文・水質データを観測してきている。さらに、両流域では、観測期間中に間伐が実施された。この観測データは、観測事例の少ない貴重なものである。本研究では、この水文データの解析に基づいて、間伐が流域の流出・水収支に与える影響について検討する。

## 3. 研究の方法

(1) 直接流出特性と浸入能の関係について：全国13地区の農地造成流域と山林流域(農林水産省)を対象とし、これら流域で観測された洪水データ(累加雨量-直接流出量関係)に基づいて直接流出特性を検討した。カーブナンバー法を適用して求められた各流域の標準的な乾湿状態でのCN値と、各流域で測定されている冠水型浸入能試験による60分積算浸入量の平均値を対比し、積算浸入量を説明変数、CN値を従属変数とした線形回帰式と予測値の信頼区間を示した。

(2) 流況安定化に寄与する流域貯留量の推定：人工のダムが利水や洪水調節のための貯留機能を有するように、自然流域も多かれ少なかれ同等の貯留機能を有していると考えられる。そこで、これらの流域貯留量を定量的に評価することを目的として、最小自流量を保障する利水貯留量、洪水緩和にも資する総合貯留量の二種類の貯留量を推定する。複

数の山林流域と農地造成流域を対象として、それら二種類の貯留量を比較することで、山林流域の緑のダム機能を評価した。

(3) 森林植生と土壌物理性の関係について：奈良県五條吉野山林流域(流域面積12.82ha)に10m×10mのスギ人工林斜面プロット(写真1)と自然雑木林斜面プロット(写真2)を設定し、植生調査と土壌物理性(三相組成、乾燥密度、飽和透水系数他)の調査を実施して、植生状況の違いが土壌物理性に及ぼす影響について検討した。両斜面で二重円筒浸入計による冠水型浸入能試験も実施した。



写真1 スギ人工林斜面(五條吉野山林流域)



写真2 自然雑木林斜面(五條吉野山林流域)

(4) 山林流域からの流出負荷量の定量的評価手法について：山地斜面における間伐の有無や管理放棄など、斜面管理形態は山林からの物質負荷量の流出に影響を与えると考えられるが、流出負荷量の変化を定量的に検出する方法が確立されていない。このため、五條吉野山林流域からの溶存物質の流出負荷量を対象として、ある期間の総流出負荷量を精度良く推定するために必要なサンプルの取得方法(サンプリング戦略)、信頼区間の推定法、負荷量の算出法について検討した。

(5) 間伐が山林流域の水文特性に及ぼす影響について：島根県東部に位置する間伐遅れの流域(流域面積0.34ha)と対照流域(同1.26ha)を試験流域に設定した(図1)。前者の流域では、間伐遅れによって林冠が閉鎖し、

日中でも薄暗い状態にあって、下層植生が貧弱あるいは皆無なエリアは流域内の約 43% を占め、その部分では地表面が露出しているかスギやヒノキの枯れ枝が散乱している状態であった。流量は、両地点とも流域の最下流端に量水堰（三角堰）を設置して観測し、降水量は、堰付近に設置した転倒マス型自記雨量計を用いて測定した。なお、調査期間中に間伐遅れの流域では本数で 32% の間伐が、対照流域では 24% の間伐が行われた。これらの水文観測データに基づいて、間伐が山林流域の水文特性に及ぼす影響を検討した。

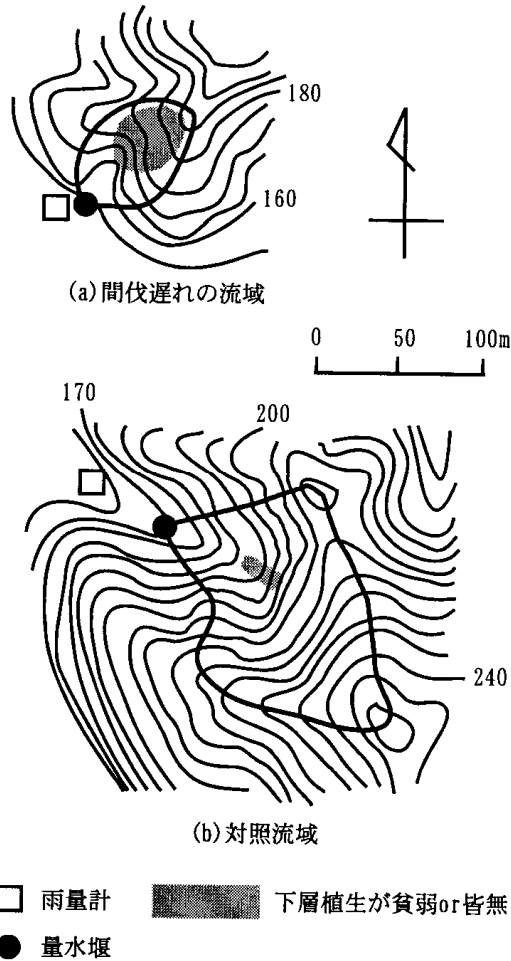


図1 島根東部山林流域の概要

#### 4. 研究成果

(1) 直接流出特性と浸入能の関係について：全国 13 地区の農地造成流域と山林流域を対象として、標準的な乾湿状態での CN 値を求めたところ、同じ地目でも流域ごとに CN 値はかなり変動すること、同じ地区で山林・農地造成流域を比較すると、山林流域の方が CN 値が小さくなる（直接流出量が小さくなる）場合が多いこと、60 分積算浸入量の平均値を説明変数、CN 値を従属変数とした線形回帰式と予測値の 95% 信頼区間を求めたところ、表層土壌の浸入能が大きいほど CN 値

が小さくなる傾向が認められたものの、その信頼区間の広さから見て、表層土壌の浸入能の大きさだけでは、直接流出量の大小が説明できないことが示された（図 2）。

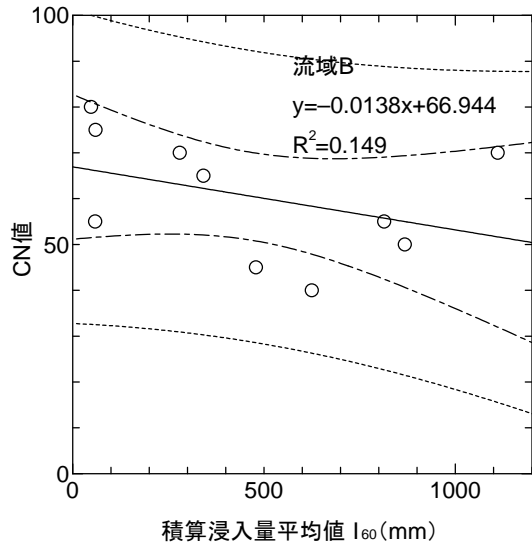


図2 山林流域の CN 値と積算浸入量の関係

(2) 流況安定化に寄与する流域貯留量の推定：奈良県五條吉野地区、京都府丹後島津地区、石川県輪島柳田地区にそれぞれ設けられた農地造成流域と対照流域である山林流域、さらに、豪雪地域の山地流域である手取川流域の日単位水文データを対象として、最小自流量（渇水時流量）を保障するために発現する利水貯留量と、水収支式に基づく流域貯留量の時系列変動データから貯水過程および放水過程の変動幅（容量）を求め、渇水の底上げ及び洪水緩和の双方に寄与する総合貯留量を算定した。流域貯留量の具体的な計算手順については、文献（堀野、瀧本、三野：農土論集 211, 2001）を参照されたい。

利水貯留量の平均値（図 3）について見ると、いずれの地区でも、山林流域の方が農地造成流域よりも大きな貯留量を有しており、山林流域の方が流況の安定化に大きく役立っていると言える。なお、地区間の差はそれほど大きくない。

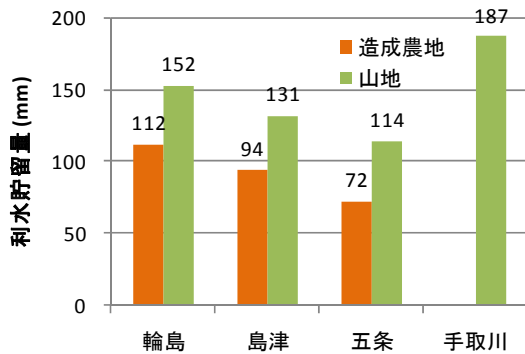


図3 利水貯留量の比較

一方、総合貯留量の平均値については、五條吉野地区において山林流域の方が農地造成流域よりも高い値を示したが、丹後島津、輪島柳田地区では山林流域と農地造成流域で大きな差は見られなかった。その原因としては、積雪の多い手取川地区、輪島柳田地区の総合貯留量が高い値を示したことから見て、積雪の影響が大きいと考えられた。

(3) 森林植生と土壤物理性の関係について：五條吉野山林流域に設けた 10m×10m のスギ人工林斜面プロットと自然雑木林斜面プロットにおいて、まず植生調査を実施した。メッシュ法で樹木位置図を作成して、樹種と立木本数密度を調べるとともに、胸高周囲長、平均樹高を測定した。南近畿・四国地方スギ林分密度管理図によれば、スギ人工林斜面の収量比数は 0.87 であり、密な状態であると判断された。

一方、両斜面において土壤物理性の調査も実施した。表層から 5cm 及び 20cm の深さにおいて、各斜面からそれぞれ 24 個ずつの土壤サンプル (100cc) を採取し、三相組成、真比重、乾燥密度、飽和透水係数を調べた。その結果、両斜面ともに深さ 20cm のサンプルの方が深さ 5cm のサンプルよりも固相率、真比重、乾燥密度が大きく、飽和透水係数が小さいことが分かった。さらに、これら項目について、深度別に母平均値の差の検定を行って、スギ人工林斜面と自然雑木林斜面の土壤物理性の違いを見出そうとしたが、いずれの項目も有意水準 5% で有意差なしであった。

両斜面で二重円筒浸入計による冠水型浸入能試験も 1 点ずつ実施した。ここでは、自然雑木林斜面の方がスギ人工林斜面よりも浸入能が大きいという結果を得たが、過去の調査で、同じ雑木林内でも浸入能がかなりばらつくことが分かっており、測定点数を増やした調査を再度行う予定である。

(4) 山林流域からの流出負荷量の定量的評価手法について：五條吉野山林流域で測定した 2004 年 3 月～12 月の約 7.7 ヶ月間の 10 分間流量・水質データに基づいて解析を行った。対象とする水質項目は  $Cl^-$ 、 $K^+$ 、 $Na^+$  の 3 項目である。10 分間隔データで積算した期間総負荷量を真値とみなし、これを適当なサンプリング間隔のデータで推定し、その信頼区間を示す手法を検討する。サンプリング戦略として、等間隔サンプリング、流量層別サンプリング、ランダムサンプリングの 3 方法を検討した。信頼区間の推定には、残差分布の正規性を仮定する古典的な方法とブートストラップ法を用いた。負荷量の算出は、USGS の Load Estimator モデルの 7 パラメータモデルによるものとした。これに、バイアス修正法として、コンポジット法、QMLE 法、MVUE 法を組み合わせる評価を行った。区間推定の良さは、95%信頼区間に真の総流出負荷量を

含む割合 (カバー率) により判断した。

解析結果によると、古典的な区間推定法はブートストラップ法に比べて、カバー率が 50～70% となり、低いパフォーマンスであった。サンプルの採取方法では、等間隔サンプリングが最も良好な区間推定結果を与えた。負荷量算出法としては、様々なサンプリング間隔に対して、USGS の 7 パラメータモデルにコンポジット法を組み合わせたものが、90% 以上のカバー率を与えた。このときの結果を示したものが表 1 である。95%信頼区間としては若干パフォーマンスが低い部分があるものの、等間隔サンプリングによるモニタリングデータに対する USGS の 7 パラメータモデルにコンポジット法を組み合わせた負荷量区間推定法の実用性は高いといえる。ただし、サンプリング間隔が低い場合には信頼区間の幅が非常に広がる点に注意を要する。

表 1 95%信頼区間の性能 (カバー率)

採水間隔*	95%信頼区間のカバー率 (%)		
	$Cl^-$	$K^+$	$Na^+$
1h	100.0	100.0	100.0
6h	100.0	100.0	100.0
1d	93.1	100.0	93.1
3d	100.0	90.3	99.8
7d	99.0	94.0	98.6
14d	100.0	100.0	100.0

\*定期採水における採水間隔

(5) 間伐が山林流域の水文特性に及ぼす影響について：間伐遅れの流域と、間伐遅れが生じていない対照流域の 8 年間 (1999～2006 年) の日流出高データを比較した結果、次のような結果を得た。

① 中小規模の出水では間伐遅れの流域の流量が多く、大規模な出水では逆に対照流域の流量の方が多くなる傾向にあった。

② 渇水時の流量では、比較的降水量の多い年に、間伐遅れの流域の方が対照流域よりも流量が低下したが、降水量の少ない年では大きな差異がみられなかった。

③ 間伐を行うと基底流出のレベルが上昇し損失量 (=降水量 - 流出量) が低下した。主な要因は、樹木の伐採による蒸発散の減少と考えられ、損失量の低下率が間伐率 (間伐本数の比率) と同程度となる年もあった。

④ 間伐遅れの流域で間伐を行うと、基底流量の上昇は少なくとも 3 年間継続したが、この理由として、下層植生の回復がみられなかったことが考えられた。一方、対照流域で間伐を行うと、同様に基底流量の上昇が生じたものの、約 1 年で間伐前の流況に戻った。

次いで、間伐遅れの流域と対照流域のそれぞれに対して、福嶋・鈴木が提案している水循環モデル (HYCYMODEL) 及び直列 3 段タンクモデルを適用し、次のような結果を得た。

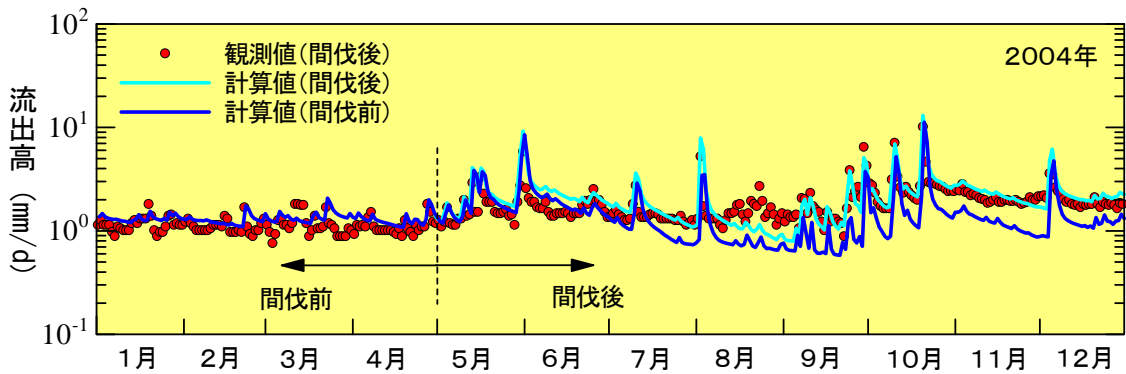


図4 水循環モデル (HYCYMODEL) によって推定した間伐前後の流況

⑤まず、間伐遅れの流域の日単位水文データに対して水循環モデル (HYCYMODEL) を適用した。間伐前の観測データを用いて、試行錯誤的にパラメータを決定した後、間伐に関わる一部のパラメータだけを調節して、間伐後のハイドログラフを再現することを試みた。その結果、降雨遮断量を間伐前の0.7倍に、蒸散量を間伐前の0.73倍に減少させれば、間伐後の水収支がバランスし、ハイドログラフも概ね再現できることが分かった。

図4は、間伐前後のハイドログラフの再現結果であるが、間伐前、間伐後ともに再現性は良好である。間伐前後の年間蒸発散量を比較すると、間伐後に約300mm減少している。図4には、間伐を実施しなかった場合を想定した計算ハイドログラフも示しているが、間伐してから数ヶ月が経過すると、間伐後の流量が間伐前よりも常時大きくなっている。これは、水資源確保の点から間伐を実施した方が有利であることを示している。

⑥さらに、両流域に直列3段タンクモデルを適用したところ、最適同定されたパラメータは、流域の水文特性（中小規模の出水では間伐遅れの流域の流量が多く、大規模な出水では逆に対照流域の流量の方が多）とよく符合していると判断された（図5）。また、タンクモデルの計算においても、間伐本数の比率に合致した減少率で蒸発散量を減少させるとハイドログラフの計算結果が改善された。

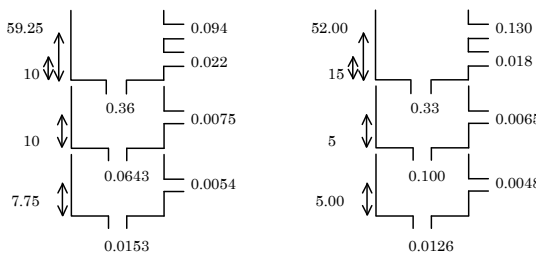


図5 タンクモデルのパラメータ (mm-d 単位)  
左：間伐遅れの流域、右：対照流域

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者に

は下線)

[雑誌論文] (計12件)

- ①戸田政仁, 武田育郎, 宗村広昭, 井手淳一郎, 間伐遅れの針葉樹人工林における水文特性とタンクモデル定数との関係, 応用水文, 21, 1-9, 2009, 査読有
- ②武田育郎, 木質バイオマスと鉄バクテリアを用いた自然水域におけるリンの再資源化の試み, 農業農村工学会資源循環研究部会論文集, 4, 119-130, 2008, 査読有
- ③武田育郎, 宗村広昭, 間伐材と鉄バクテリアを用いた自然水域からのリンの回収とその農業利用, 環境技術, 37(5), 347-351, 2008, 査読有
- ④武田育郎, 農業生産におけるリン負荷の現状と課題, 水環境学会誌, 30(7), 343-347, 2007, 査読無
- ⑤田中丸治哉, 緑のダム機能の水文学的評価に関する研究, ダム研究委員会シンポジウム, 農業農村工学会, 103-126, 2007, 査読無
- ⑥田中丸治哉, 藤原洋一, 妥協計画法による流出モデル定数の多目的最適化, 農業土木学会論文集, 241, 107-115, 2006, 査読有
- ⑦多田明夫, 田中丸治哉, 畑 武志, 集水域からの流出負荷量の推定法とその不確かさについて, 農業土木学会論文集, 245, 109-122, 2006, 査読有, 平成20年度農業農村工学会賞(優秀論文賞)受賞
- ⑧安達雅人, 田中丸治哉, 多田明夫, GLUEによる流出モデルの不確定性評価に関する研究, 応用水文, 19, 71-78, 2006, 査読無
- ⑨田中丸治哉, 竹内 稔, 多田明夫, 直接流出特性と浸入能の関係について—緑のダム機能の水文学的評価に関する研究—, 応用水文, 19, 88-97, 2006, 査読無
- ⑩西村圭市・武田育郎・福島 晟・宗村広昭, 夏季の農業排水路における水生動物の多様性と環境因子との関係, 農業土木学会論文集, 242, 90-105, 2006, 査読有
- ⑪西村圭市・武田育郎・福島 晟, 宗村広昭, 水田地区に生息する魚類に影響を及ぼす環

境因子, 日本雨水資源化システム学会誌, 12(1), 11-16, 2006, 査読有

- ⑫ Takeda, I., Fukushima, A., Long-term changes in pollutant load outflows and purification function in a paddy field watershed using a circular irrigation system, Water Research, 40, 569-578, 2006, 査読有

[学会発表] (計15件)

- ① 瀧本裕士, 堀野治彦, 田中丸治哉, 流域の安定化に寄与する流域貯留量の推定—石川県, 京都府, 奈良県の事例研究—, 台湾農田水利会研究集会, 2009/3/16, 台中市
- ② Tada, A., Tanakamaru, H., Evaluation of Load Estimation Methods and Sampling Strategies by Confidence Intervals in Estimating Solute Flux from a Small Forested Catchment, AGU Fall Meeting, 2008/12/17, San Francisco
- ③ Tanakamaru, H., Takeuchi, M., Takeda, I., Tada, A., Change in Flow Characteristics of a Forest Catchment due to Thinning, AGU Fall Meeting, 2008/12/15, San Francisco
- ④ 竹内 稔, 田中丸治哉, 武田育郎, 多田明夫, 山地小流域を対象とした緑のダム機能の評価に関する研究, 農業農村工学会京都支部第65回研究発表会, 2008/11/6, 福井市
- ⑤ 朱 蕾, 多田明夫, 田中丸治哉, 面源負荷量の推定精度について—USGS Load Estimatorの検証を中心として—, 農業農村工学会京都支部第65回研究発表会, 2008/11/6, 福井市
- ⑥ 田中丸治哉, 竹内 稔, 武田育郎, 多田明夫, 間伐に伴う山林流域の流況変化について, 平成20年度農業農村工学会大会講演会, 2008/8/28, 秋田市
- ⑦ 戸田政仁, 武田育郎, 宗村広昭, 2つの針葉樹人工林の水文特性とタンクモデル定数との関係, 平成20年度農業農村工学会大会講演会, 2008/8/27, 秋田市
- ⑧ 武田育郎, 宗村広昭, 宍道湖とその周辺集水域における水質環境の現状と課題, 平成20年度農業農村工学会大会講演会, 2008/8/27, 秋田市
- ⑨ Tada, A., Tanakamaru, H., Confidence Interval in Estimating Solute Loads from a Small Forested Catchment, AGU Fall Meeting, 2007/12/14, San Francisco
- ⑩ Takimoto, Y., Horino, H., Tanakamaru, H., Evaluation of Catchment Storage Volume for Moderating Flow Fluctuations, AGU Fall Meeting, 2007/12/11, San Francisco
- ⑪ 田中丸治哉, 水文学から見た「緑のダム」の評価と展望—問題の所在について—, 平成19年度農業農村工学会大会講演会,

2007/8/28, 松江市

- ⑫ 武田育郎, 戸田政仁, 宗村広昭, 森也寸志, 針葉樹人工林における「緑のダム」の水文学的評価, 平成19年度農業農村工学会大会講演会, 2007/8/28, 松江市
- ⑬ 田中丸治哉, 竹内 稔, 多田明夫, 直接流出特性と浸入能の関係について—緑のダム機能の水文学的評価に関する研究—, 水文・水資源学会2006年度研究発表会, 2006/8/29, 岡山市
- ⑭ 武田育郎, 福島 晟, 宗村広昭, 斐伊川水質の長期変動と流域特性の変化, 平成18年度農業農村工学会大会講演会, 2006/8/8, 宇都宮市
- ⑮ 田中丸治哉, 森林伐採と農地造成に伴う流況変化に関する考察, 平成17年度農業土木学会講演会大会, 2005/8/25, 岐阜市

[図書] (計1件)

- ① 田中丸治哉, 「ピーク流量」「緑のダム」「流域許容水量」の用語解説, 川の百科事典(高橋 裕他編)収録, 丸善, 564, 620, 664, 2009

[その他]

研究代表者(田中丸)は, 平成19年度農業農村工学会大会講演会における企画セッション「水文学から見た『緑のダム』の評価と展望」のオーガナイザーを務めた。さらに, 田中丸と武田は, 同セッションにおいて, 研究成果(学会発表⑪⑫)をそれぞれ発表した。

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

田中丸 治哉 (TANAKAMARU HARUYA)  
神戸大学・大学院農学研究科・教授  
研究者番号: 80171809

### (2) 研究分担者

畑 武志 (HATA TAKESHI)  
平成17年度のみ分担者  
神戸大学・農学部・教授  
研究者番号: 70031193

多田 明夫 (TADA AKIO)  
神戸大学・大学院農学研究科・准教授  
研究者番号: 00263400

武田 育郎 (TAKEDA IKUO)  
島根大学・生物資源科学部・教授  
研究者番号: 60227022

瀧本 裕士 (TAKIMOTO HIROSHI)  
富山県立大学・短期大学部・准教授  
研究者番号: 60271467

### (3) 連携研究者

該当なし