

森林荒廃が洪水・河川環境に及ぼす 影響の解明とモデル化

研究代表者
恩田 裕一

森林荒廃が洪水・河川環境に及ぼす影響の解明とモデル化

研究代表者 筑波大学大学院生命環境科学研究科 恩田裕一

1. 全体構想

日本の国土の約40%は人工林であり、そのうち半数以上がスギ・ヒノキ林である。特に、日本各地の30~40年生のヒノキ人工林では、材価の低迷や林業労働力の不足により、下枝打ちや間伐等の管理が放棄された森林が多い。このような森林では、立木密度が高く林冠が閉塞しており、日射量の不足により林床の植生が消失して、表面流の発生や表土の流亡が生じている。

異なる森林管理状態における水・土砂・栄養塩類等の流出状況とその機構を解明し、将来的な森林管理のあり方に向けて提言するために、全国5カ所（東京、信州、愛知、三重、高知）に空間スケールの異なる観測流域を入れ子状に設定し、水流出・降雨・流出物質の観測及び解析を行うことを目的とした。流域サイズはサイトによって異なるが、入れ子状に設定した流域末端部に水文観測施設を配置している（図1, 2）。小試験流域では、ヒノキやスギなどの人工林、広葉樹林、また、信州サイトに特徴的な人工林であるカラマツ林に分類され、河川流出水に加えて、最小空間スケールとして流域斜面の区画（プロット）を設置し、表面流出水も観測することとした。

2. 研究手法・体制

各観測流域（サイト）では、森林管理履歴・立木密度・林床植生の異なる小試験流域を入れ子状に配置した観測を行った。水資源上もっとも問題が大きいと思われるヒノキ林についてはすべてのサイトで観測を行い、比較対象としての広葉樹林においても観測を行った。対象流域の対象流域の末端部では、パーシャルフリームに水位センサーを設置し（図3）、5分毎に流量を計算した。観測流域付近の樹冠に覆われていない場所で、転倒マス雨量計によって雨量を計測した。各観測流域には、自動採水器（アメリカンSIGMA社製）を設置し、30分から1時間間隔で洪水イベント時の水を採取した。各サイトでは、林床植生などの条件の異なる各流域の斜面に幅0.5m×長さ2mの小プロットを配置し表面流の発生を観測した。プロット表面を流下した水を200リットルタンクへ溜め、タンクの水位を計測することで、降雨と表面流流出量の時系列変化を把握した。また、降雨サンプラーにより降雨水サンプルを採取した（図

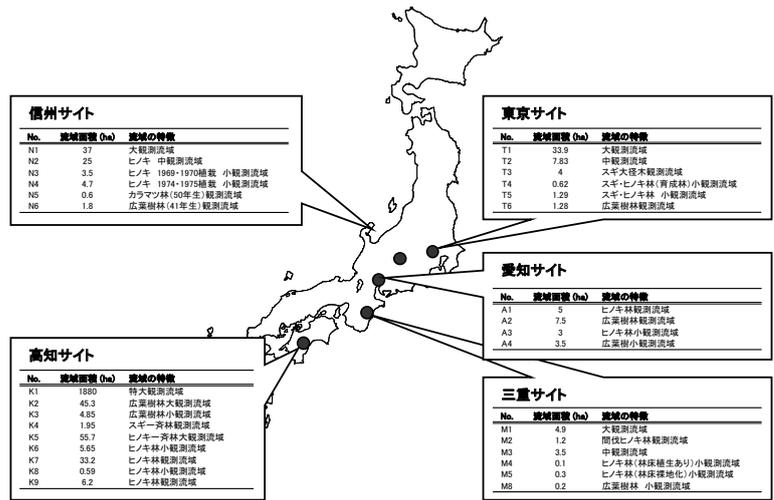


図1 観測流域の概要

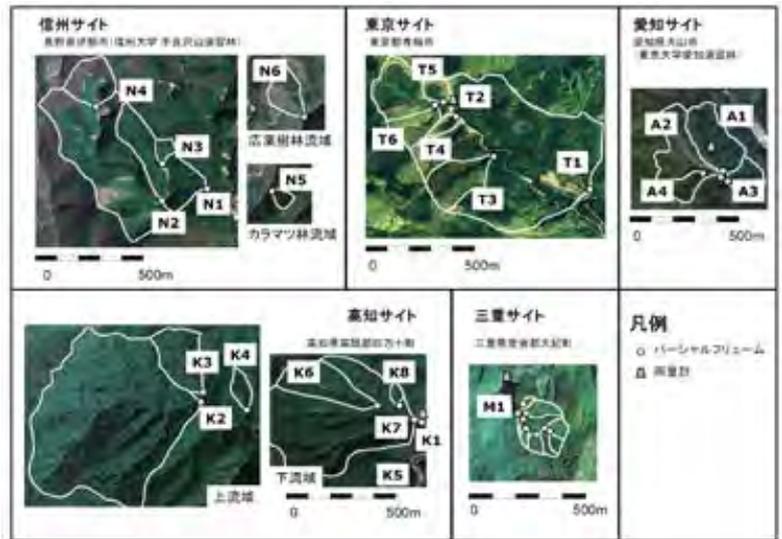


図2 調査サイトの試験流域

3). 降雨サンプラーは2リットルのボトル4本によって構成されており、降雨が継続し一本目のボトルが満水すると自動的に次のボトルに水が分配される仕組みになっている。

これらのデータ、サンプルの分析・解析をもとに、表面流発生メカニズムについて検討し、浸透能低下をもたらす原因について考察した。表面流発生メカニズムを反映した浸透モデリング、源流域の分布型モデリング、大流域における洪水発生モデリングを行い、浸透能を考慮した森林維持管理モデルを構築した。本研究には、筑波大学、東京農工大学、京都大学、名古屋大学、東京大学、千葉大学、信州大学、岡山大学、国立環境研究所、三重県等より、約20名の研究者が参加した。



図3 観測設備の概況

3. 主な研究成果と考察

3.1. 森林の状態による水流出への影響

表面流発生と浸透能

表面流観測を行った全サイトにおいてヒノキ林、広葉樹林およびスギ林のプロットにおける表面流観測結果を図4に示す。林床が裸地化したヒノキプロットの平均表面流出率（降雨イベントごとの総表面流出量／総降雨量の平均）が0.09～0.58であったのに対し、広葉樹プロットで0.05～0.14、スギプロット（林床がほぼ完全に被覆されている）で0.05～0.08と、林床が裸地化したヒノキ林よりも少ないものの、広葉樹林やスギ林斜面においてもある程度の表面流が発生することが確認された。林床が裸地化したヒノキ林において表面流量が大きかったのは、林内雨の雨滴衝撃により土壌表面にクラストが形成されるためと考えられた。ヒノキを植栽した大型室内降雨実験において、地表面に対する雨滴衝撃エネルギーが大きいほど表面流量が増加した結果もこの観測結果と一致する。三重サイトの管理施業が良好なヒノキプロット（M11）と

放置されたヒノキプロット（M13）について比較すると、下層植生が繁茂するM11においても表面流が発生し、林床が裸地化したM13よりも大きい表面流出量がしばしば観測された。この一因として、ヒノキ林表層土壌のもつ強い撥水性によって雨水の浸透が妨げられ、表面流が発生するためと考えられた。

このような各プロットにおける浸透特性の違いについて検討する。浸透特性を定量化するために、田中・時岡（2007）が人工降雨実験より提案した下式を用いて各プロットの最大浸透能 FIR_{max} を求めた。

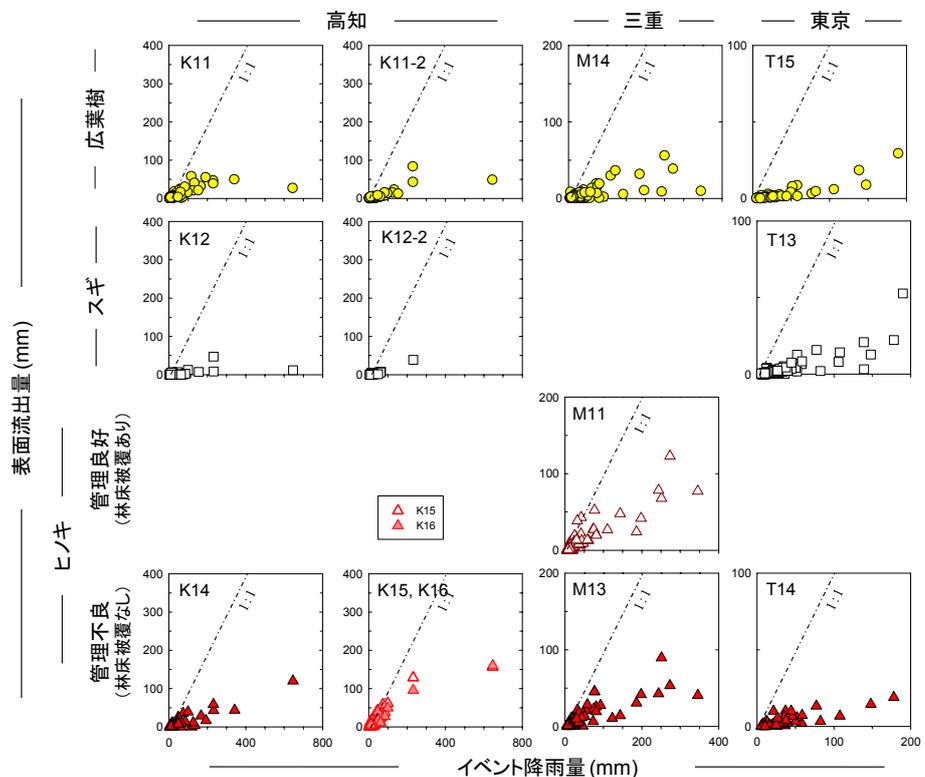


図4 各観測サイトの総降雨量とプロット表面流出量の関係

$$IR = FIR_{max} \tanh\left(\frac{R}{FIR_{max}}\right) \quad (1)$$

ここで、 IR は各降雨イベントの最大降雨強度からそれに対応する表面流出量を差し引いて求めた浸透強度 [mm/h]、 FIR_{max} は降雨強度が十分に大きい時の浸透能 [mm/h]、 R は降雨強度 [mm/h] を示す。各プロットの最大浸透能はヒノキ林において小さい傾向がみられたが、ヒノキ林においても最終浸透能が高いプロットもみられるなど、ばらつきがみられた。全プロットの土壤特性と最終浸透能との関係を調べたところ、土壤の有効粒径 D_{10} (粒径加積曲線の 10% 粒径) が小さいほど、すなわち細かい粒子 (粘土・シルト) を多く含む土壤ほど最終浸透能が低いことが示された。これは、降雨中に移動した細かい土粒子によって土壤孔隙が詰まってしまう (crusting, sealing) ためであると考えられた。

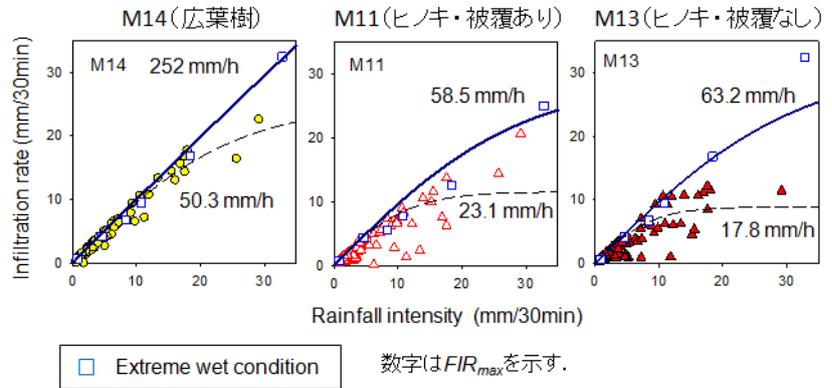


図5 降雨強度と浸透強度の関係。実線、破線はそれぞれ湿潤、乾燥状態での関係を式1より求めた近似曲線をあらわす。

また、強度の撥水性が見られた三重サイトにおいて土壤が非常に湿潤な状態 (半減期が7日のAPIが150 mm を超えるとき) の降雨に対する浸透強度を通常時 (API<150 mm) と比較すると、最終浸透能が高くなることが示された (図5)。このように、自然降雨に対して土壤の撥水性も浸透能に影響を及ぼすことが明らかとなった。

流域の流出応答と「新しい水」成分の分離

図6に、4つのサイトで観測された小規模降雨イベント (総雨量30~50 mm程度) でのハイドログラフの例を示した。東京サイトのヒノキ林T5流域における降雨 (総雨量51.8 mm, 最大時間雨量49.0 mm) に対する応答は広葉樹T6流域よりも早く、かつ大きかった。高知サイトにおける降雨イベント (総雨量40.6 mm, 最大時間雨量32.8 mm) においてもヒノキ林小流域 (K6) と広葉樹林小流域 (K3) を比べると、ヒノキ林流域では降雨に対する流出応答が鋭く、降雨ピークの5分後に一次流出ピークがみられ、その後に最大流出ピークが出現した。一方、広葉樹林流域では、流出ピークはヒノキ林流域と比べて遅れて出現し (40分後)、かつ降雨後の流出の減少 (通減) も緩やかであった。愛知サイトと信州サイトの小流域を比べても、東京サイトと高知サイトと同様に、ヒノキ林流域では降雨流出の応答が広葉樹林流域と比べて敏感であり、かつ大きなピーク流出量が観測された。総雨量が小さく降雨強度が強いイベントでは、全サイトにおいてヒノキ林流域の流出ピークが広葉樹林流域に比べて大きく、かつ降雨に対して早い流出応答が認められた。

一般に、流域の流出応答は、地質条件によって異なるこ

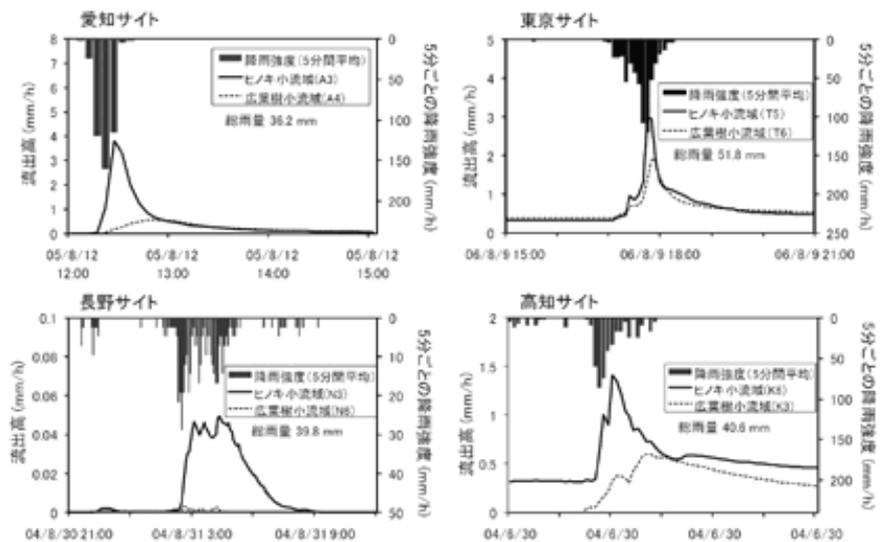
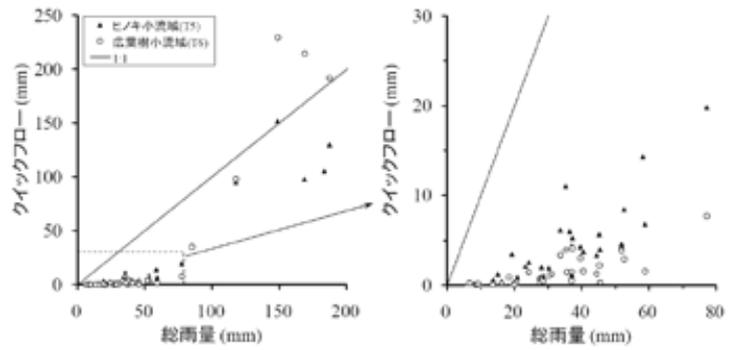


図6 小規模降雨イベント時のヒノキ林、広葉樹林小流域の降雨流出

とが指摘されている(志水, 1980; 虫明ら, 1981; Onda et al., 2001). 4つのサイトの地質は、愛知サイトが新第三紀堆積岩、長野サイトが領家帯の花崗岩、東京サイトは秩父帯(古生代石炭紀~中生代ジュラ紀)の砂岩・泥岩・チャート、高知サイトが砂岩・泥岩からなる四万十帯の堆積岩と異なっている。それにもかかわらず、小規模な降雨イベントではヒノキ林と広葉樹林との比較において、ヒノキ林流域のピーク流量が高いという共通点がみられる。

流域の流出特性をあらわす指標のひとつであるクイックフローについて検討する。クイックフローとは、降雨に対応して増加した流出成分のことであり、便宜的にハイドログラフの立ち上がり起点とした直線と流出ハイドログラフの差の積分として求められる。高知サイトと東京サイトでは、ともに降雨が大きくなるとクイックフロー成分が大きくなる傾向がみられる(図7)。これは、降雨が小さい場合は雨水は土壤中に貯留され、降雨が多くなると土壤中の雨水の貯留量が限界に達し、洪水流出として素早く流下する量が増加するためである。東京サイトでは総雨量80mmを、高知サイトでは総雨量60mmを超えた場合に、総雨量に対するクイック

東京サイト



高知サイト

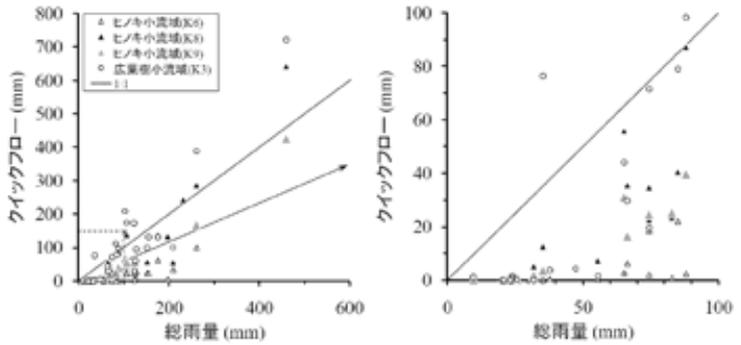


図7 東京サイトと高知サイトのクイックフローと総雨量との関係

図7 東京サイトと高知サイトのクイックフローと総雨量との関係

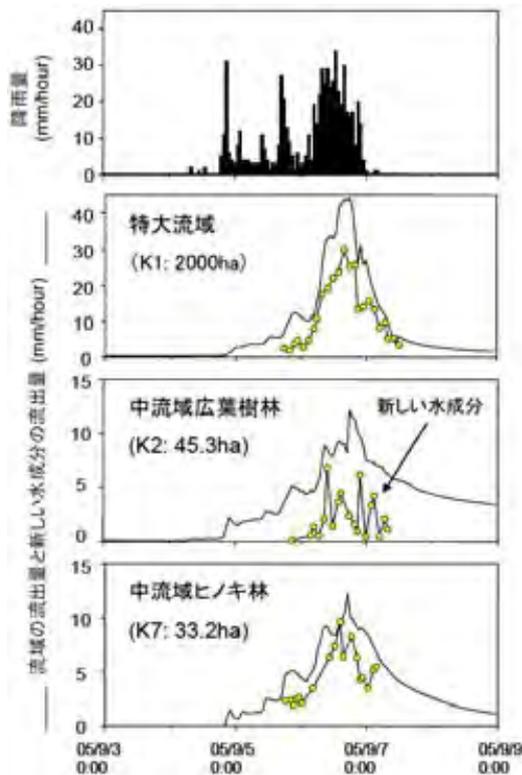


図8 高知サイトの2005年9月5-7日の洪水イベントにおける新しい水成分の流出

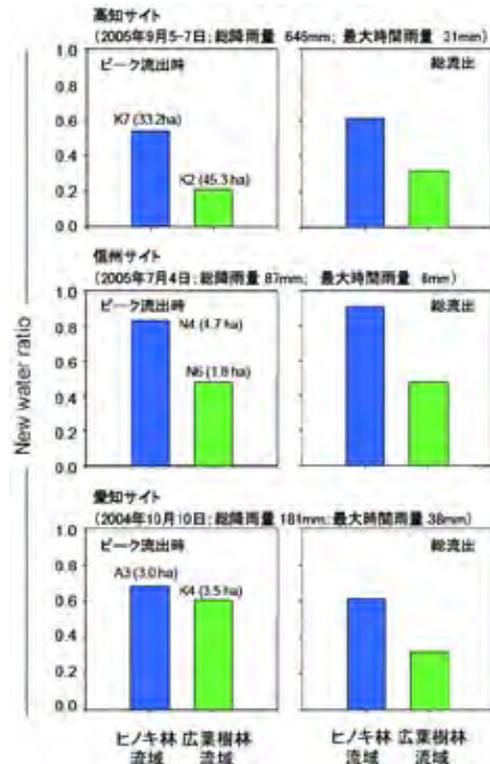


図9 高知・信州・愛知サイトのイベントピーク流出時と総流出に占める新しい水の割合

クフローの増加率が大きくなる傾向がみられた。

降雨イベント中の流出に寄与する成分は、「新しい水（今回の降雨によってもたらされた水）」と「古い水（降雨前から流域に貯留されていた水）」の2成分に分離することができる。ここでは、ヒノキ林流域と広葉樹林流域においてそれぞれ新しい水成分がどの程度寄与しているのかを検討した。高知サイトでは、2005年9月5日から7日に総雨量646mm（気象庁アメダス大正観測地点）の非常に大きな降雨イベントが発生し、四万十川下流域の四万十市で死者1名、流域全体で370世帯が床上・床下浸水、周辺農地の冠水など、様々な洪水被害がおきた。高知サイトでは、この大規模降雨イベントの降雨ピークとその前後で、流域の水サンプルを採集することに成功した。図8では、ヒノキ林大流域（K7）と広葉樹大流域（K2）、それらを含む特大流域（K1）の流出と新しい水成分を示した。広葉樹 K2 流域では、新しい水成分の変動が大きいものの、ヒノキ林 K7 流域と比べて新しい水成分の量は少ない。流出ピークの近傍では、ヒノキ林 K7 流域で新しい水成分の寄与が大きい。特大流域 K1 の流出ピークと新しい水成分のピークは大流域 K7 および K2 と比べて時間的な遅れがみられたが、特大流域の新しい水成分の流出波形は、ヒノキ林流域の流出波形と似ている。このことから、ヒノキ林流域からの新しい水成分の流出が、特大流域の新しい水成分に寄与していることも考えられた。

高知・愛知・長野の各サイトのヒノキ林流域と広葉樹林流域におけるイベントピーク流出時の新しい水成分の割合を示した（図9）。各サイトで観測対象となった降雨の規模に違いがあるが、ヒノキ林流域では、広葉樹林流域に対して新しい水成分の割合が大きい傾向がみられた。総流出量についても同様の傾向が見られた。また、ヒノキ林流域では広葉樹林流域よりピーク流出量や総流出も大きくなっていった。

3.2. 流出モデリング

分布型流出モデルの概要

分布型流出モデルで必要となる流域地形の要素分割として、従来のグリッド（正方形要素）による分割ではなく、等高線による地形要素の分割を行った。この分割方法は、各要素の大きさや面積に差が生じるが、地表面の構造に沿った水や土砂の移動ベクトル（TOPOTUBE）の方向、尾根部や谷部の適切な表示に適しており、水文モデルにおいて斜面で発生する表面流の流下方向や連続性を再現することができる。分布型流出モデルでは表面流、飽和地下水流、飽和地表流の流出を考慮し、モデル化を行った。土壌中の水流出については、土壌の深層部と浅層部の2層に分けてモデルの開発を行った。地表面に到達した雨水は、Hortonの浸透式（Horton, 1933）に応じて表面流が発生する。そこで、現地での散水試験およびプロットでの表面流観測による知見から、浸透能 IR を求める式（1）をモデルに組み込んだ。さらに、ホートン型表面流の発生、特に、降雨初期に土壌の撥水性が密接に関与していることが明らかとなったため、降雨初期には撥水性によって浸透能が低下し、降雨に伴って浸透能が増加するアルゴリズムを組み込んだ。本モデルでは流域内の任意の点における全流出量、ホートン型表面流の寄与量などを計算することができ、流域内における表面流の発生箇所、飽和地下水帯の発生位置を計算することができる。

林床被覆と浸透能の定量化

間伐施業などの森林管理が表面流発生および洪水流出に及ぼす変化を、本モデルを用いて予測するためには、林床被覆と浸透能の関係を定量的に把握する必要がある。そこで、林内の雨滴衝撃力を再現し、急峻な森林斜面にも対応できるように開発した散水装置（図10）を用いて、林床被覆と浸透能の定量化を試みた。浸透能測定は、三重サイトにおいて被覆状態のみが異なる14地点において行った。

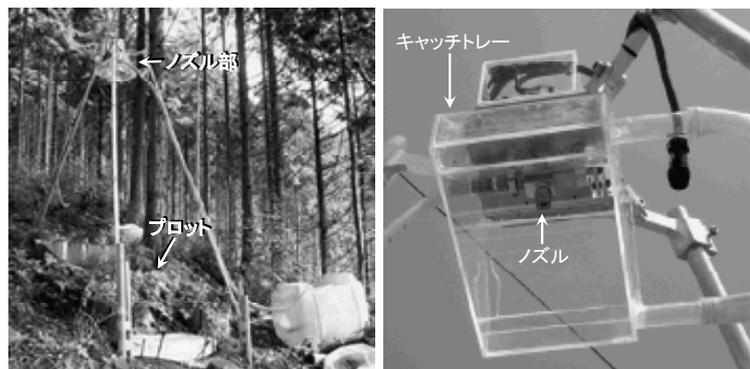


図10 振動ノズル式散水装置。（左）実験プロット、（右）ノズル部。

表 1 ブラウン-ブランケ (1971) による林床被覆状況の被度区分

被度指標	定義
r	ほぼ裸地
+	裸地化に近い状態であるが、下層植生が少し有 (5%以下)
1	下層植生が少なく、被度が10%以下
2	下層植生が多い、または少ないが、被度が25%以下
3	被度が25-50%
4	被度が50-75%
5	被度が75-100%

林床被覆はブラウン-ブランケによる7段階の被度指標により決定した(表1)。各プロットでの浸透能測定結果から求めた被度指標と浸透能の関係を図11に示す。被度が大きくなるにつれて浸透能が高くなる傾向が見られた。被度3以下の地点では浸透能が45 mm/h以下を示し、被度4以上の地点では浸透能は概ね90 mm/h以上であった。このように、林床が被覆されることで浸透能が急激に大きくなることが示された。

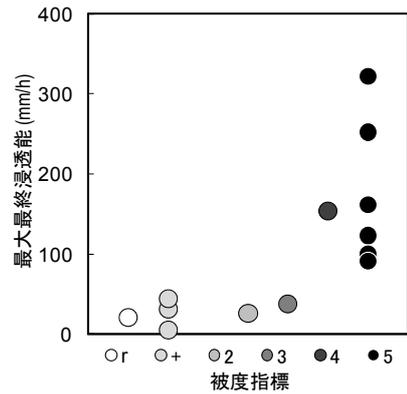


図 11 現地散水実験による被度指標と最大最終浸透能の関係 (被度1はプロットなし)。

リモートセンシング手法による浸透能の空間分布の推定

林床被覆と浸透能の関係が明らかになったことから、林床被覆の空間分布を求めることができれば、

分布型流出モデルに対して浸透能の空間分布を与えることができる。そこで、LiDARデータのレーザー地表面到達率から相対的な透過率を10×10mメッシュの解像度で算出し、相対照度の推定を行った(図12)。得られた結果は概ね現地の情報と一致し、林冠の閉塞状況や林床面の照度の空間分布を再現することができた。相対照度のクラスを、0~2, 2~5, 5~10, 10~20, 20%以上の5段階に分けた。10×10mメッシュで推定された相対照度の空間分布を用いて、土壤被覆量の空間分布を推定することができる。従来の研究で示された相対照度と土壤被覆量との関係式を用いて、各メッシュの相対照度から林床被覆量を推定した。三重サイトに適用した事例を図13に示す。上に示した土壤被覆量と浸透能との関係から浸透能の空間分布を与えた。土壤被覆量については5段階で評価されていることから、土壤浸透能についても5段階で評価した。ここで得た土壤浸透能の空間分布をもとに、分布型流出モデルで活用するTOPOTUBEエレメント毎に個別の浸透能を与えることで、浸透能の空間分布を考慮した流出モデルを構築することができた。

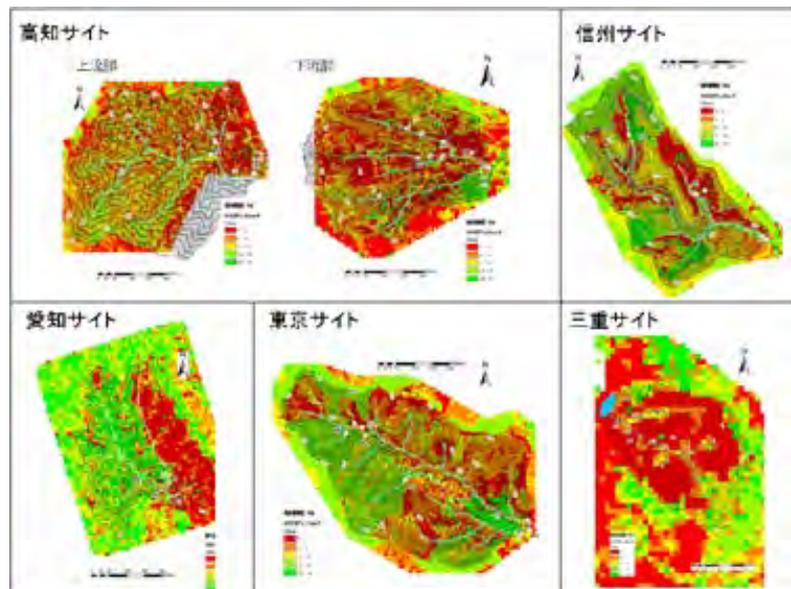


図 12 10×10mメッシュで計算した各サイトにおける相対照度の空間分布。赤色が相対照度の低い箇所を示し、緑色が相対照度の高い箇所を示す。

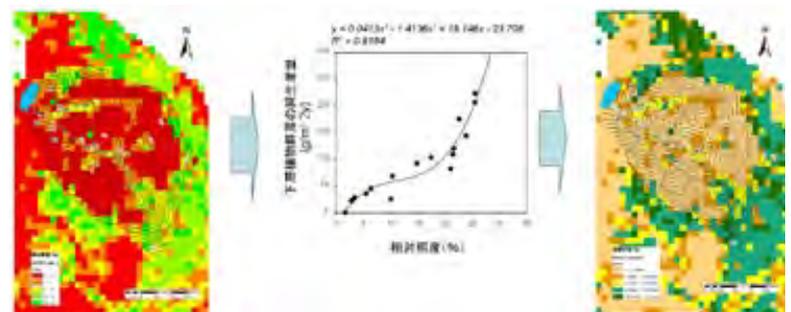


図 13 三重サイトにおける林床植生被覆量の空間分布。緑色は植生量が多い箇所を示す。

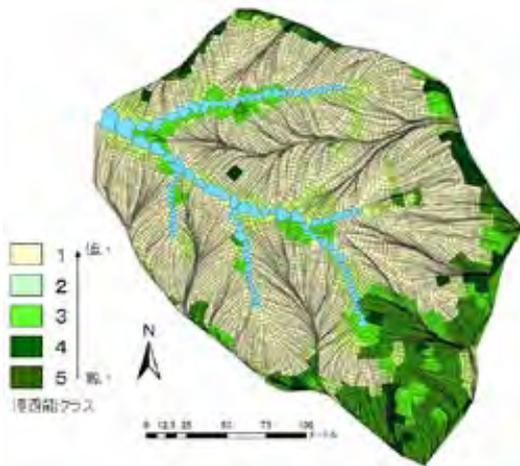


図 14 三重サイトにおける浸透能の空間分布. 青色は流路.

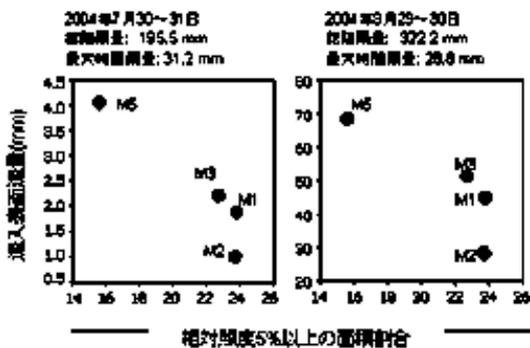


図 15 降雨イベント時の表面流入量の推定値

算される結果であると考えられる. このような林床植生量 (相対照度の割合) との関係では, 斜面からの浮遊土砂流出の寄与, カリウムを用いた表面流の流出成分分離の結果でも同様の傾向がみられる. 一方, 流域全体に相対照度が減少して植生被覆量および浸透能が低下した場合, ピーク流出時における表面流量の寄与が増加し, 全体として表面流の流入量も増えることが示された (図 16). また, 流域全体の被覆量が増加した場合, 流出波形に大きな変化は見られないが, 斜面から河川へ流入する表面流量は低下した. このように, 浸透能の空間分布を考慮することによって, 斜面から溪流への表面流の流入をより適切に評価することができた.

3.3. 森林維持管理モデリング

ヒノキ林における下層植生の侵入・生育を目指した密度管理

間伐等が適切に行われず管理不足となった過密人工林において, 下層植生の回復のために光環境の改善がどの程度必要であり, そのための間伐率をどのように決定するか等の具体的方法は必ずしも明らかにされていない. そこで, ヒノキ林を対象として下層植生の侵入・生育を目的とした森林管理方法

三重サイトにおける流出解析

三重サイトを例に, 現地浸透能試験と LiDAR データより作成した浸透能の空間分布データを TOPOTUBE に組み込んだ (図 14). これを用いて分布型流出モデルによる流出解析を行った結果, 計算値は観測値と比べて概ね良好な整合性を得ることができた. とくに, ピーク流出の応答や逓減においては観測値と同様な値を示した. このことから, 今回構築した流出モデルは, 表面流や地下水流などのプロセスについて再現性が良いと判断できた.

各流域における相対照度と斜面から溪流へ流入する表面流量を比べると, 相対照度が大きいほど, 表面流入量が小さくなる傾向がみられた (図 15). 同様にピーク流量についても, 林床被覆状態が小さいほど, 洪水ピーク時における表面流の寄与が大きくなっていった. これは, 各流域における林床植生と対応して表面流の流入量が計

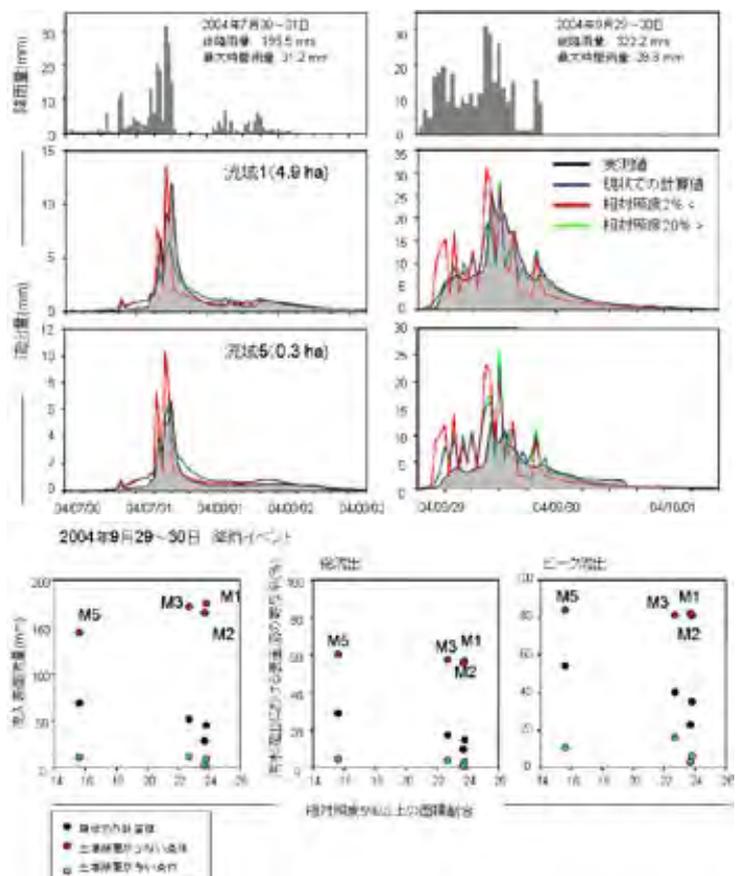


図 16 浸透能の空間分布を考慮した分布型モデルによる流出解析結果(左上:相対照度が減少,被覆量・浸透能が低下した場合,右上:相対照度が増加,浸透能が増加した場合)と各流域における表面流入量と表面流の寄与率の計算結果(下).

について、既往研究のレビューおよび現地調査により検討を行った。林内光環境と下層植生量の関係についての既往研究の文献調査から、以下の結論が得られた。

1. 林内相対照度 2%以下で林床植生は殆ど発生しない。
2. 5~10%で若干の植生が発生するが下刈の必要はない。
3. 20~30%で下層植生はかなり増加する。
4. 40~50%で陽生の雑草木が繁茂して下刈りが必要となる。

これらの結果から「相対照度を少なくとも 10%以上、理想的には 20%以上」を密度管理の目標とすることが妥当と考えられる。これを達成するために必要な間伐率を調べるために、津市白山町地内のヒノキ 37 年生人工林において間伐試験を行い、材積間伐率と林内相対照度の関係を調べた。20×20mのプロット（立木本数：2575 本/ha、平均樹高：13.0m、平均胸高直径：14.8cm）において、間伐率を 5%、15%、35%、50%と徐々に上げてプロット内の樹木を間伐し、その都度、林内相対照度を測定した（測点は 5 箇所の固定点）。その結果、間伐前 5%前後であった相対照度が、間伐率が高くなるにつれて上昇することがわかった（図 17）。本試験結果から、林内相対照度 20%を確保するには、材積間伐率で 40-50%前後（本数間伐率では 50-60%前後）の間伐が必要であることが示された。

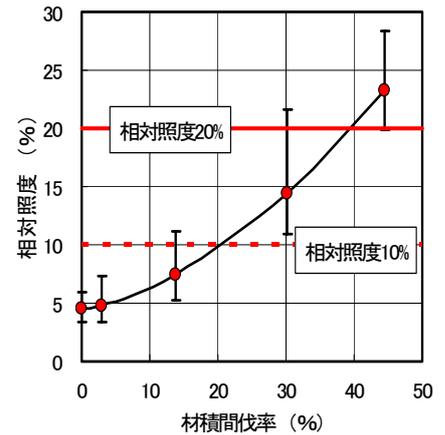


図 17 材積間伐率と相対照度の関係

下層植生の育成に適した森林管理の検討

下層植生の生育に適した森林管理モデルを把握するため、システム収穫表 DDPS（図 18；Hayashi and Yamamoto, 2006）を用い、幾つかの施業シナリオを満たす間伐方式について検討した。解析には三重県において行われた林分調査結果を用いた。通常施業林分（20 年生以上の林分）と間伐遅れ林分について、平均直径と平均樹高を初期値として与えてシステム収穫表 DDPS により間伐後 20 年間の収量比数 R_y の変化を求めた。計算の結果、間伐遅れ林分の R_y は、明らかに通常施業に相当する林齢（40 年生～50 年生）と比べて高く、間伐実施前には最多密度に近い状態であったことが分かった。また間伐遅れ林分では、本数間伐率 50%で初めて間伐直後の R_y が 0.7 を下回った。したがって、予測誤差を考慮しても、下層間伐を前提とした場合、本数間伐率 50%未満では R_y が 0.7 を下回ることが期待できないと考えられる。予測の第 1 分期の期首における間伐率（初回間伐率）は、間伐遅れ林分（40 年生～50 年生）と若齢（20 年生）の通常施業林分ではほぼ一致していた。一方、初回間伐以後、間伐遅れ林分の間伐率は、同一林齢の通常施業林分と同様、10%前後で緩やかに減少する傾向を示した。したがって、一定の

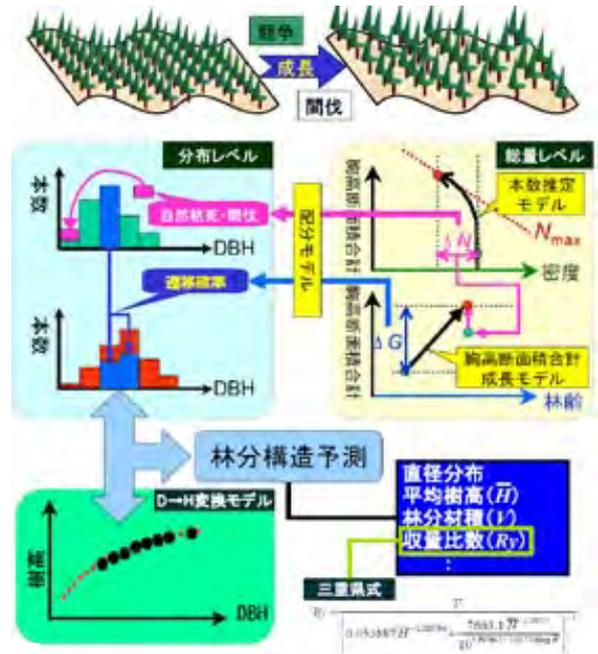


図 18 システム収穫表 DDPS の概要

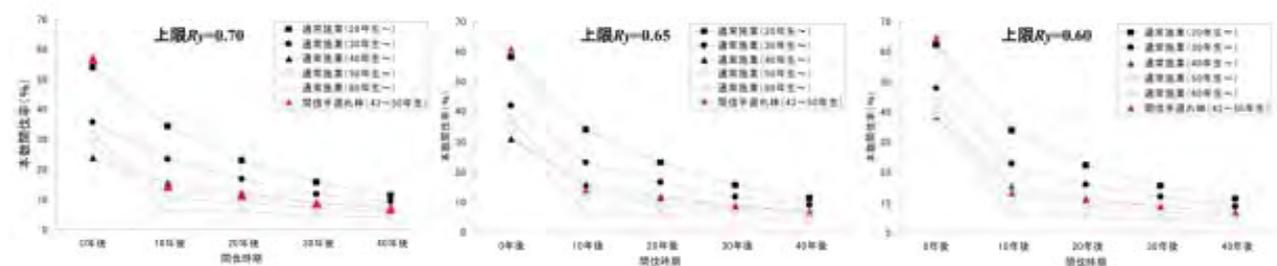


図 19 上限収量比数 (R_y) を維持するのに必要な間伐方法の予想結果

収量比数を維持するためには、若齢林を除き、初回の間伐率に大きく依存することが示された。また、40年生以上まで間伐が行われず、過密状態となった林分に対して $Ry=0.65$ を上限として密度管理を行う場合には、本数間伐率で60%が必要となることが示された(図19)。このように、現地の浸透能と被覆度との関係から最適な下層植生(被覆度)を把握することで、間伐による下層植生の侵入・生育を目標とした具体的な森林管理指針を提案できることが示された。

4. まとめ

プロットにおいて観測された表面流出量は、ヒノキ林からの流出が他の樹種より多いという結果が得られたが、土壌が失われ粗粒化した場合、空隙が大きくなった場合などは、表面流出量は他の樹種と同様の値となった。しかし、斜面長の25 m程度の大プロットにおいては、荒廃ヒノキ林からの水流出が大きいことがわかった。表面流発生の要因として、林床が裸地化したヒノキ林でのクラストの形成や表層土壌の撥水性が重要な役割を果たすことが示された。

本プロジェクトにおいて、特に荒廃人工林における流出の比較に関する初めてのデータ取得をすることができた。全国の4流域において、降雨時の流出は $\delta^{18}O$ を用いて分離したところ、ヒノキ人工林の方が広葉樹流域に比べ「新しい水」の成分が多かった。現地観察によると新しい水は、ホートン地表流のことが多いが、土壌荒廃が進んだところでは根系流が卓越する場所もあった。また、新しい水の割合は流域面積にはあまり依存せず、流域の荒廃人工林の面積率と関連があることがわかった。データ数や降雨・流出イベントの規模は一般論として語るには未だ充分ではないものの、小規模降雨イベント時(総雨量80 mm以下)では、荒廃したヒノキ人工林流域の方が広葉樹林流域よりも表面流が多く発生するためにピーク流出高が大きく、クイックフローも明らかに大きくなった。一方、降雨規模が大きくなると(総雨量80 mm以上)、土壌が湿潤になり、土壌中の雨水もすばやく流出する傾向があることから、ホートン型表面流が洪水流出に及ぼす影響は相対的に小さくなり、ヒノキ林と広葉樹林の違いは現れなくなると考えられる。

モデリンググループは、現地観測や流出成分分離で得られた情報をモデルのパラメータ同定や入力条件とする新しい試みも行われ、良い結果を得ることができた。また、森林荒廃から回復した場合、森林荒廃面積が増加した場合のシナリオについて、シミュレーションで流出特性の変化を予測できた。本研究によってリモートセンシングで得られる浸透能の空間分布や森林の荒廃度を考慮することによって、より広域を対象とした森林状態を考慮したモデル化を進める手法を提案することができた。モデルを用いて森林管理による浸透能変化を予測できるとともに、流域内で表面流が発生しやすい箇所を予測することによって、森林管理が必要となる対象地域の特定や選定を行うことができ、今後の水流出プロセスから考慮した森林管理の方向性を考察するツールとなると考えられた。

林床被覆度と浸透能の関係が明らかにするために、振動ノズル型散水装置を開発し、三重フィールドにおいて浸透能と林床被覆の関係性を明らかにした。森林荒廃度の指標となる相対照度と、表面流出水や表面侵食土砂との関係について、三重サイトのヒノキ林流域を対象に検討した。その結果、相対照度が大きくなると、流域スケールの表面流や表面侵食土砂の寄与が小さくなる傾向が見られた。間伐による光環境の改善が下層植生の侵入、生育を促すことで、雨滴衝撃が緩和されて雨水が地下に浸透しやすくなり、地表面からの水、土砂流出の寄与が減少することが示された。この結果と森林維持管理モデルを組み合わせることで、間伐などの森林管理が森林の公益的機能に与える影響を定量的に評価できる。また、システム収穫表を用いて、間伐基準の明確な施業計画により、水資源に配慮した新たな人工林管理の指針を示すことができた。

【引用文献】

ブラウン-ブランケ/鈴木時夫訳. 1971. 植物社会学 I. 朝倉書店, 東京, 29-34.

Hayashi, T., Yamamoto, K. 2006. A system to predict diameter distribution in pure even-aged hinoki (*Chamaecyparis obtusa* Seib.) plantations (II) Application to sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don) plantations. *Journal of Forest Planning* **11**(2): 67-76.

Horton, R. E. 1933. The role of infiltration in the hydrological cycle. *Transactions, American Geophysical Union* **14**: 446-460.

- 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の効果. 土木学会論文報告集 **309**: 51-62.
- Onda, Y., Komatsu, Y., Tsujimura, M., Fujihara, J. 2001. The role of subsurface runoff through bedrock on storm flow generation, *Hydrological Processes* **15**: 1693-1706.
- 志水俊夫. 1980. 山地流域における湧水量と表層地質・傾斜・植生との関係. 林業試験場研究報告 **310**: 109-128.
- 田中茂信, 時岡利和. 2007. 現地散水試験による流出・浸透特性の把握手法に関する検討. 土木学会第 62 回年次学術講演会公演概要集 (CD-ROM) **2-003**: 5-6.

5. 主要な成果報告等

査読付き論文発表 (国内 (和文) 誌 21 件, 国際 (欧文) 誌 42 件)

主要な国際誌掲載論文 (10 件のみ, その他は研究終了報告書に掲載)

1. Fukuyama, T., Onda, Y., Takenaka, C., Walling, D. E. Investigating erosion rates within a Japanese cypress plantation using Cs-137 and Pb-210ex measurements. *Journal of Geophysical Research - Earth Surface* **113**: F02007. 2007.
2. Gomi, T., Sidle, R. C., Miyata, S., Kosugi, K., Onda, Y. Dynamic runoff connectivity of overland flow on steep forested hillslopes: scale effects and runoff transfer. *Water Resources Research* **44**. W08411. 2008.
3. Gomi, T., Sidle, R. C., Ueno, M., Miyata, S., Kosugi, K. Characteristics of overland flow generation on steep forested hillslopes of central Japan. *Journal of Hydrology* (in press) 2008.
4. Kosugi, K., Katsura, S., Mizuyama, T., Okunaka, S., Mizutani, T. Anomalous behavior of soil mantle groundwater demonstrates the major effects of bedrock groundwater on surface hydrological processes. *Water Resources Research* **44**. W01407. 2008.
5. Miyata, S., Kosugi, K., Gomi, T., Onda, Y., Mizuyama, T. Surface run-off as affected by soil water repellency in a Japanese cypress forest. *Hydrological Processes* **21**(17): 2365-2376. 2007.
6. Mizugaki, S., Onda, Y., Fukuyama, T., Koga, S., Asai, H., Hiramatsu, S. Estimation of sediment sources using ¹³⁷Cs and ²¹⁰Pb_{ex} in unmanaged Japanese cypress plantation watersheds, southern Japan. *Hydrological Processes* (in press). 2008.
7. Nanko, K., Mizugaki, S., Onda, Y. Estimation of splash detachment rate based on quantification of throughfall kinetic energy in an unmanaged Japanese cypress plantation. *Catena* **72**: 348-361. 2008.
8. Nanko, K., Onda, Y., Ito, A., Moriwaki, H. Effect of canopy thickness and canopy saturation on the amount and kinetic energy of throughfall: an experimental approach. *Geophysical Research Letters* **45** L05401. 2008.
9. Zhang, Z., Fukushima, T., Onda, Y., Gomi, T., Fukuyama, T., Sidle R.C., Kosugi, K., Matsushige, K. Nutrient runoff from forested watersheds in central Japan during typhoon storms: Implications for understanding runoff mechanisms during storm events. *Hydrological Processes* **21**: 1167-1178. 2007.
10. Zhang, Z., Fukushima, T., Onda, Y., Mizugaki, S., Gomi, T., Kosugi, K., Hiramatsu, S., Kitahara, H., Kuraji, K., Terajima, T., Matsushige, K., Tao F. Characterisation of diffuse pollutions from forested watersheds in Japan during storm events - Its association with rainfall and watershed features. *Science of the Total Environment* **390**: 215-226. 2008.

主な著作物

恩田裕一編『人工林荒廃と水・土砂流出の実態』, 岩波書店 (2008 年 10 月刊行予定)

6. 受賞など

受賞:

水垣滋	砂防学会研究発表会 若手優秀発表賞	平成 19 年 6 月 14 日
五味高志	水文・水資源学会 ポスター発表賞	平成 19 年 7 月 27 日
恩田裕一	水文・水資源学会 論文賞	平成 20 年 8 月 27 日