

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20580151

研究課題名(和文) 森林路網からの水流出が流域の洪水流出に与える影響の評価とモデル化

研究課題名(英文) Evaluation and modeling the effects of road runoff on catchment storm runoff.

研究代表者

五味高志 (GOMI TAKASHI)

東京農工大学・大学院農学研究院・准教授

研究者番号：30378921

研究成果の概要(和文)：森林路面での浸透能測定の結果、林道における浸透能は平均 33.3 mm/h と林内に比べて低く、かつばらつきも小さいことが解明できた。土壌硬度や土壌密度が小さく、空隙率が大きい路面ほど浸透能が有意に高くなる傾向が見られた。林道プロットでの流出量を観測した結果、プロット流出から算出した最大浸透能は尾根地形のプロットが一番高くなっていた。路面流出への遮断中間流が全流出量に大きな割合を占めることが分かった。地形や水文条件等を加味しながら、林道の流出特性も流域の水流出モデルに組み込むことが可能であることが解明できた。

研究成果の概要(英文)：The infiltration capacity was measured by using an oscillating nozzle rain simulator to estimate infiltration capacity of forest road surface and analyze the associated factors. The experimental results showed that the mean infiltration capacity of forest road surface was 33.3 mm/h. Bulk density and porosity were significantly correlated to infiltration capacity. Findings from both field experiments and monitoring can be applied for prediction rainfall-runoff from forest road surface which is important to be examining road runoff contribution at a watershed scale.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
20年度	2,500,000	750,000	3,250,000
21年度	700,000	210,000	910,000
22年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：農学

科研費の分科・細目：森林学・森林科学

キーワード：林道、降雨流出、浸透能、モデル化、流域スケール、森林管理

## 1. 研究開始当初の背景

日本の山地域では、森林の管理や遠隔地との交通や森林管理作業の効率化を目的とした路網が設置、管理されている。近年、戦後の拡大造林ブームにより植栽されたスギ・ヒノキ等の人工林が徐伐・間伐の時期を迎えるようになり、それらの森林管理に向けた路網

(林道や作業道)の整備が重要となっている。加えて、林業労働力の不足、材価の低迷、それによる林家の労働意欲の低下に歯止めがかからず、間伐などの森林管理作業を機械化する動きも活発化しており、森林路網の配置や整備が求められている。森林路網は森林管理を目的としたもののみではなく、遠隔地集

落の生活道路や医療行政サービスを行う交通の確保としても重要である。一方で、盛り土や切り土によって斜面の地形を大きく改変し、かつ路面の浸透能は低いことから、森林斜面から路面に流出した水が河川へ流れ込む場合には洪水流出への寄与が大きいと予想される。路面からの集中的な水流出は、土壌侵食や崩壊・土石流の発生などの原因となっていることが多い。森林路網への水流出や土砂堆積によって、山間地域の路網が寸断され、集落が孤立するなど、災害危機管理上でも、森林路網が洪水流出に与える影響を評価することが重要である。

林道や作業道の路面は車両の通行によって土壌が圧縮され、雨水は林道面に浸透しにくくなり表面流が発生しやすい。また、土壌層や岩盤が露出した切り土面では地下水（斜面からの側方流）が湧き出し、林道面からの流出を増加させる傾向がある。このように林道や作業道は面積的には森林のわずかな部分を占めるに過ぎないが、斜面からの側方流や表面流の発生を通して森林流域の水文プロセスに大きな影響を及ぼしている。特に、斜面土壌中で正圧を持つ飽和地中流は、重力によって斜面の低い位置へ移動するため、凹地形の斜面では、斜面中央に水が集中するが、凸地形の斜面では飽和地中流は分散する。すなわち、異なる斜面地形に設置されている森林路網では、斜面から路面への水の水流出量も異なっていることが考えられる。以上のような水流出や流出水の集中量の違いは、路面の土砂侵食量にも影響を及ぼしうることから、斜面地形毎に、路面や隣接斜面から降雨流出を評価する必要がある。

流域スケールでの森林管理については、近年、「水源税」等の形で、上流の森林管理費用を下流域の住民に負担させようという趨勢がある。行政的な森林管理の動きの中で、間伐などの森林管理作業の結果により、森林の機能、特に土壌浸透能や土壌侵食量などの水土保持効果が、どの程度改善されたかについての評価に関する研究が、大学、政府研究機関、NPO で取り組まれている。しかしながら、上流域の森林での水や土壌侵食が下流域の洪水流出や土砂流出に与える影響を評価する場合、森林のみを評価対象とするのではなく、森林管理対象地へのアクセスとなる路網の配置や整備などの総合的な視点での評価が重要である。路網の配置や整備手法によっては、森林管理が適切に行われた場合でも、路網からの水流出が、河川の洪水流出に大きく影響を及ぼすことも予想される。

従来の森林路網からの水流出や土砂流出に関する研究は、現地観測による実態解明が中心であり、林道の一部区間の観測が中心であった（福嶋ほか、1984 など）。流域スケールでの森林路網の配置や地形、路面の整備状

況の違いに注目し、路面から河川への水流出量を把握し、流域の洪水流出や土砂流出に対する林道の影響の評価を行った研究事例は少ない。本研究では、作業道や林道などの森林路網からの水流出量を把握し、路面の土壌物理条件（浸透能など）を定量化する。また、申請者と分担者が、GIS と C++プログラミングによって開発を進めてきた分布型水流出モデルに、森林路網モジュールを加えることによって、森林路網を考慮した流域洪水流出モデルの開発を進める。林道からの水や土砂流出が河川の洪水流出量に寄与する量を予測するモデルを用いることによって、流域スケールの水流出において、路網から水流出の寄与を評価する。

## 2. 研究の目的

日本の国土の約 40%は人工林であり、その人工林では間伐などの森林整備を行わねばならない。この森林整備を行うためには、人や車両が往来するための林道が必要不可欠であり、現状の森林整備の遅れからも、今後は更に高密度な路網システムの構築が必要である。しかしながら、林道や作業道は、斜面地形を大きく改変するために斜面の水流出プロセスを大きく変化させる。また、建設時やその後の利用による車両の転圧で硬く締め固められていることや植生がないことにより地表流が、法面による土壌中間流の捕捉により遮断中間流が発生し、流域の水流出に大きな影響を及ぼすと考えられる。そのため、森林流域における水流出や土砂移動を評価する上で、路網からの水流出の研究が重要である。さらに林内における水移動は流域の斜面地形によって異なることから、遮断中間流の流出量も集水や散水地形などの地形条件に影響を受けると考えられるが、良く分かっていない。

そこで本研究では、(1) 林道路面の水流出量を評価することを目的として、散水実験により路面の浸透能を計測し、(2) 林道からの全水流出量を定量的に評価することを目的として、林道に地形条件が異なる 3 か所のプロットを設置し、林道からの水流出量評価とそれに地形が与える影響の評価を行なった。

さらに、水土保持機能の評価および水資源管理のためには、表面流の発生が流域の流出過程に及ぼす影響を明らかにしなくてはならない。本研究では流域内斜面の浸透能の「空間分布」などを考慮し、林床植生被覆量に伴う土壌浸透能の空間分布を考慮した分布型流出モデルを開発した。浸透プロセスに関連する流域の空間分布特性を把握するために、現地浸透試験を行い、定量化を進めた。これらのデータと流域の林床植生空間分布図をもとに、「空間分布」シナリオを考慮した面流および流域の流出解析を行った。森林

流域の洪水流出現象の解明と理解を深め、森林管理による植生や浸透能変化と洪水流出量変化の予測を行い、今後の森林管理への提言を進めた。

### 3. 研究の方法

#### (1) 現地観測

本研究は、栃木県佐野市に位置する東京農工大学付属演習林、FM 唐沢山の1、2林班の林道で行った。佐野に設置されているアメダスデータによると、1979年から2010年の平均年間降雨量は1239mm、年平均気温は約13.9度であった。唐沢山の標高は90~290mで、基岩は砂岩・チャートの他に、一部火山灰が堆積したところもあり、林道路面には岩盤が露出しているところが多かった。

2009年8月に現地散水調査を、1960~1970年に設置された林道のうち植生被覆率の異なる6箇所で行なった。本研究では振動ノズル式降雨実験装置を用いて一定量の水(240mm/h)を1×1mのプロット内に散水した。散水時にプロットの土壌に浸透せずに地表流となった水を斜面下部にて捕捉し、その流量を測定した(図1)。

林道流出観測プロットは、2010年4月に2



図1 散水実験の様子

林班内の林道3箇所を設置した。林道プロットは谷地形、尾根地形、平衡斜面と地形条件が異なるよう選択した。林道プロットの斜面上部には高さ約7cmのゴム製の静水板を設置し、プロット上端からの地表流の流入を防いだ。またプロット末端部にはコンクリート製U字溝を埋め込み、プロット内を流下する地表流を捕捉した。U字溝で捕捉された地表流は、45°三角堰に集められ5分間隔で常時水位を測定した。

#### (2) モデルの開発

分布型流出モデルでは流域地形の要素分割が必要である。本研究ではグリッド(正方形要素)による分割ではなく、等高線から地形分割を行う方法を用いた。各等高線の流線による地形分割では各要素の大きさや面積には差が生じるが、地形に沿った水や土砂の

移動ベクトルの方向、尾根部や谷部の表示に適しており、分布型水文モデルにおいて斜面で発生する地表流の流下の方向や連続性を再現できる利点がある。分割された各地形の要素をここではTOPOTUBEエレメントと呼び、等高線上で与えられた任意の間隔に、斜面上部から下部へ最短距離を引くアルゴリズムで作成した。等高線に対して、直角に交わる線を基準とし分割することで、水移動のベクトル方向および、尾根部や谷部における水分配を適切に再現することができた。解析後にデータをArcInfoに取り込み、TOPOTUBEのポリゴン形状による流域地形図を作成した(図2)。

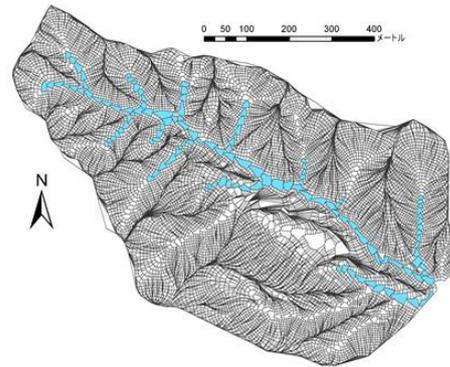


図2 TOPOTUBEの例

斜面で発生する地表流量とそれらの降雨流出への寄与を解析するためのモデルを提示する。モデルの基本的な構造は、①流域の降雨流出解析とともに斜面における地表流の発生量の解析と予測を目的とする、②土壌内の水移動は飽和領域のみを考慮し、ダルシー則で近似できるものとする、③土壌特性は深さ方向に2層で近似できる構造を持つものとする、④斜面の表土および土壌の特性は空間的な分布を取り扱うものとする、⑤降雨イベントごとに計算を行う短期水流出を対象とするものとする。

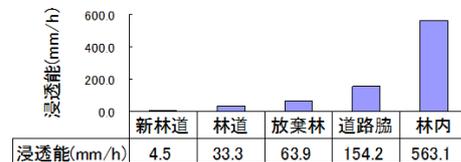


図3 路面浸透能の結果

### 4. 研究成果

林道路面における浸透能は21~43mm/h(平均:33.3mm/h)であった(図3)。この値は林内における浸透能の値と比較すると小さく、ばらつきも小さかった。これは、林道は設置や利用によって路面への転圧が行なわ

れているために同時期に設置され、同程度の

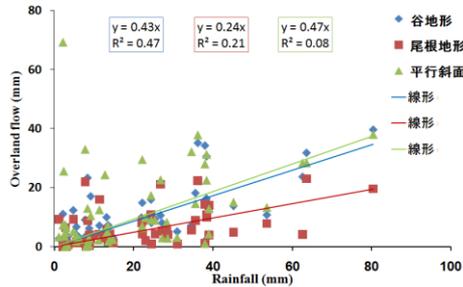


図4 林道プロット流出結果

利用頻度であった林道路面の浸透能は小さく、ばらつきも少なくなったと考えられた。

総降雨量と総流出量に明確な関係性は見られなかった。また最大浸透能は尾根地形のプロットが一番高く (26mm/h)、谷地形 (20.3mm/h)、平行斜面 (15mm/h) であり、前述の散水実験による路面の浸透能よりも低い値となった (図4)。路面の浸透能である 33.3mm/h を用いて算出したイベント毎の推定地表流量は、降雨強度が大きく短期間降雨であった4イベントを除いて、実測の流出量の方が大きくなった。この推定地表流量は林道路面由来の流出量といえるので、林道流出を路面由来の地表流と遮断中間流に分けることができた。また林道法面の斜面地形と流出には関係性があるといえた (図5)。特に降雨イベント終了後の流出が尾根地形では少なく、降雨終了時刻と流出終了時刻が近くなった。しかし、各プロットにおける時刻の差と先行降雨量や総降雨量などの水文的要因には関係性が見られなかった。

流出解析の結果、斜面浸透能の空間的な不均質性を考慮することによって流出再現性が向上することが解明できた。地形や水文条

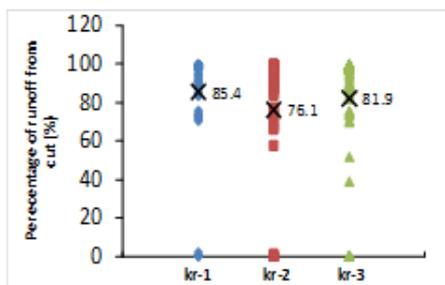


図5 遮断中間流の寄与率

件等を加味しながら、林道の流出特性も流域の水流出モデルに組み込むことが可能であることが解明できた。今後、森林や流域管理などにおいては、地形・土壌被覆・土壌特性などの空間的不均質性をどのように考慮するかが問題になる。これらについても、本研究と同様の手法を用いることによって現状

の評価やモデルに組み込むことが可能であると考えられた。また、本研究結果をより、広域の流出モデルとして適用させるためには、人工衛星によるリモートセンシングや、多摩川流域における植生や地形、さらには流出データなどのデータベース化が必要不可欠であり、本研究手法を発展させることによって、このようなメタデータを活用した流域森林管理、流域管理手法の開発さらには河川環境変動モデルなどが可能であると示唆された。

## 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 Dung B. W., Miyata S., Gomi T., Effect of forest thinning on overland flow generation on hillslopes covered by Japanese cypress, *Ecohydrology*, 査読有, Vol. 4, (2011), 367-378.
- ② Ghahramani A., Ishikawa Y., Gomi T., Slope length effect on sediment and organic litter transport on a steep forested hillslope: upscaling from plot to hillslope scale, *Hydrological Research Letters*, 査読有, Vol. 5, (2011), 16-20.
- ③ Ghahramani A., Ishikawa Y., Gomi T., Shiraki K., Miyata S., Effect of ground cover on splash and sheetwash erosion over a steep forested hillslope: A plot-scale study. *CATENA*, 査読有, Vol. 85, (2011), 34-47
- ④ 五味高志, 宮田秀介, 恩田裕一 ヒノキ人工林における表面流の発生と流域の降雨流出特性, *水利科学* 査読無, No. 311, (2010), 58-76.
- ⑤ 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*, Vol. 92, (2010), 145-150.
- ⑥ Gomi T., Asano Y., Onda Y., Sidle R. C., Miyata S., Kosugi K., Mizugaki S., Fukuyama T., Fukushima T. Evaluation of storm runoff pathway in steep nested catchments draining a Japanese ,hydrometric, geochemical,

and isotopic approaches. Hydrological Processes, 査読有, Vol.24, (2010) 550-566.

- ⑦ Woldie D.W., Sidle R.C., Gomi T. Impact of road-generated storm runoff on a small catchment response. Hydrological Processes, 査読有, Vol. 23, (2009), 3631-3638.
- ⑧ 宮田秀介, 恩田裕一, 五味高志, 水垣滋, 浅井宏紀, 平野智章, 福山泰治郎, 小杉賢一朗, Sidle RC, 寺嶋智巳, 平松晋也 (2009) 森林斜面におけるホートン型表面流の発生に影響を与える要因, 日本森林学会誌, 査読有, Vol. 91, 398-407.
- ⑨ 宮田秀介, 小杉賢一朗, 五味高志 (2009) ヒノキ林小流域の水文過程における土壌撥水性の役割. 土壌の物理性, 査読有, Vol. 111, 9-16.
- ⑩ 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, 査読有, Vol. 44, (2008) W08411. doi: 10.1029/2007WR005894
- ⑪ 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, 査読有, Vol. 361, (2008), 275-290.
- ⑫ Trandafir A.C., Sidle R.C., Gomi T., Kamai T. Monitoring and simulation variations in matric suction during rainfall in a residual soil slope. Environmental Geology, 査読有, (2008), Vol. 55(5): 951-961

[学会発表] (計9件)

- ① Dung BX, Gomi T., Miyata S, Kosugi K, Onda Y. Runoff responses to forest thinning from plot to catchment scales in a Japanese headwater, Western Pacific Geophysics Meeting, 2010年6月22日~25日, 台湾台北.
- ② Gomi T., Asano Y, Uchida T, Onda Y,

Miyata S, Kosugi K, Mizugaki S, Fukuyama T, Storm runoff pathways in steep nested catchment draining a Japanese cypress forest in central Japan, Western Pacific Geophysics Meeting, 2010年6月22日~25日, 台湾台北.

- ③ 廣瀬 満, 五味 高志, 宮田 秀介, 小田智基, 山地流域における源頭部湧水の水文地形学的特徴, 第121会日本森林学会大会研究発表, 2010, 筑波.
- ④ 熊倉 歩, 五味 高志, 宮田 秀介, 石川芳治, 内山 佳美, 山地流域における流域特性と浮遊砂流出の特徴, 第121会日本森林学会大会研究発表, 2010, 筑波
- ⑤ 長塚 結花, 五味 高志, 宮田 秀介, 平岡 真合乃, 現地散水試験による林道の浸透能測定およびその決定要因の解析, 第121会日本森林学会大会研究発表, 2010, 筑波.
- ⑥ 五味 高志, 宮田 秀介, 貯留量-流出関数を用いた山地小流域の流出特性の把握, 第121会日本森林学会大会研究発表, 2010, 筑波.
- ⑦ 宮田 秀介, 五味 高志, 森林斜面における樹幹流の選択的浸透過程, 第121会日本森林学会大会研究発表, 2010, 筑波
- ⑧ 恩田 裕一, 水垣 滋, 五味 高志, 南光一樹, 浅井 宏紀, 長嶺 真理子, 平松晋也, 福島 武彦, ヒノキ人工林流域において斜面から流路へ細粒土砂はどう移動するか, 第120会日本森林学会大会研究発表, 2009, 京都.
- ⑨ 五味 高志, 宮田 秀介, サイドル ロイ, 小杉 賢一朗, 恩田 裕一, 林床植生被覆の異なる流域における斜面から河川への表面流流出: 観測とモデリングによる解析, 第120会日本森林学会大会研究発表, 2009, 京都.

[図書] (計3件)

- ① 五味高志, 「森林流域における降雨流出過程に関する従来の研究」, 人工林荒廃と水・土砂流出の実態(恩田裕一編), 岩波書店(2008) .
- ② ロイ・サイドル, 五味高志 「斜面スケー

ルにおける表面流の流出」，人工林荒廃と水・土砂流出の実態(恩田裕一編)，岩波書店(2008)。

- ③ 浅野友子，五味高志，「水文トレーサを用いた降雨流出における表面流の寄与の推定」，人工林荒廃と水・土砂流出の実態(恩田裕一編)，岩波書店(2008)。

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況(計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等  
特になし

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

五味高志 (GOMI TAKASHI)  
東京農工大学・大学院農学研究院・准教授  
研究者番号：30378921

### (2) 研究分担者

ロイ・サイドル (ROY C. SIDLE)  
京都大学・防災研究所・教授  
研究者番号：：30359781

### (3) 連携研究者

なし