

「水の循環系モデリングと利用システム」

平成 15 年度採択研究代表者

恩田 裕一

筑波大学大学院生命環境科学研究科・准教授

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

1. 研究実施の概要

現在わが国の森林の 40%以上をしめる人工林が放置され、特にヒノキ林における土壌侵食・表面流出が指摘されているが、これらが流域スケールの洪水発生に及ぼす影響については明らかでない。そこで、本研究チームは、表面流出メカニズムの解明と森林施業による流出変化のモデル化により、望ましい人工林の維持・管理について提言を行うことを目指している。

荒廃が著しいヒノキ人工林を含む 5 つの観測サイト（愛知，高知，三重，長野，東京）を設定し、施業履歴の異なるヒノキ人工林，スギ人工林，カラマツ人工林の他，比較対象として広葉樹林について水文観測，水質分析及びリモートセンシングによる森林情報把握を行った。研究は，1) フィールド観測グループ，2) モデリンググループ，3) 森林維持管理モデリンググループ，及び 4) 総合解析グループによって進められている。これまでに，フィールド観測グループ及び総合解析グループにより，データの蓄積と表面流発生メカニズムの解明が着実に進んでいる。その中で，特筆すべき成果は，①プロットスケールの観測結果から，従来，十分な浸透能があるとされてきた広葉樹林においても表面流発生が認められたこと，②ヒノキ人工林の浸透能低下の要因として雨滴衝撃による土壌クラスト形成の他に，撥水性の影響が示唆されたこと，③流出水の酸素同位体比から，洪水イベントのピーク流出時において，ヒノキ林の方が広葉樹より「新しい水」の寄与が高いこと，などがあげられる。また，水流出モデリングについては，TOPOTUBEを用いた分布型モデルにより，小流域スケールでの飽和地表流を再現できることが確認された。土壌の撥水性・浸透スポットの存在・林床被覆の多寡による浸透能の空間分布不均一性を考慮した上での，不飽和地表流を再現できるモデルへと改良が進んでいる。全 5 サイトの TOPOTUBE が完成しており，三重以外のサイトでの分布型流出モデルの適用が進む予定である。森林維持管理モデリンググループでは，①林床被覆の乾重量や被度と浸透能との間に関係性を見出し，林床被覆から浸透能を推定できるようになったこと，②リモートセンシ

ングによる Top Surface という新しい概念を提案し、山地斜面の林分平均樹高の推定及び荒廃人工林の抽出が可能となったこと、③高汎用性森林成長モデルを開発したことが、主な成果としてあげられる。

現在、野外・室内実験により、地域ごとの土壌特性の差異・撥水性・雨滴衝撃による土壌クラストの形成を含めた表面流発生の素過程の解明を進めるとともに、これらの新たなメカニズムを考慮した斜面・流域スケールの水流出モデルの開発も進めている。また、今後の森林維持管理の指針として、密度管理図を用いて森林管理モデルを展開することを目標に掲げ、モデルを構成する各パーツの解析・文献整理が達成されている。また、土壌流出評価のために放射性同位体を用いた濁度成分の起源推定も併せて行っている。これらの結果から、現在の森林状態と今後の森林管理（間伐の有無・間伐強度の差異）が流域の水土保持機能や河川環境へ与える影響の評価を行っていく。

2. 研究実施内容

日本では、森林が国土の約 65%を占め、その 40%以上が人工林である。適切に管理されずに放置され人工林が荒廃することは、下流域での洪水発生などの災害、渇水時の水量や水質の確保といった水資源の問題、河川や海洋の生態系に対する影響、森林管理の費用負担など、様々な問題と関わっている。しかしながら、荒廃した人工林地の水流出特性の変化について、相対的に大きな流域スケールで実測した例がほとんどなく、それらが河川や海洋の環境へ及ぼす影響が十分に理解されていない。そこで本研究課題では、プロットスケール、源流域スケール、大流域スケールにおいて洪水流出や水質の観測を行い、リモートセンシングによる分析等、広域をカバーする手法を組み合わせることで、人工林の荒廃が水循環、洪水発生、水質など下流域の河川環境に与える影響を予測する。そして、これらの理解を通じて、人工林の維持・管理方法について提言を行い、今後の水資源の循環予測・持続的利用のための基礎資料を提示することを目的として研究を行う。

日本の5カ所（愛知、高知、三重、長野、東京）に荒廃が著しいヒノキ人工林を含む大試験流域を対象流域として設定し、各地域のヒノキ人工林、スギ人工林、カラマツ人工林の中から施業履歴や林床植生が異なる林分で観測を行い、また比較対象として広葉樹についても観測を行った。本研究は、1) フィールド観測グループ、2) モデリンググループ、3) 森林維持管理モデリンググループ、及び4) 総合解析グループによって進められている。

1) フィールド観測グループ

本グループでは、森林管理状態と水・土砂・栄養塩類などの流出状況とその機構の解明のため、各サイトに異なる空間スケール（プロット、小流域、大試験流域）の異なる観測流域を入れ子状に配置し、水流出・降雨・流出物質の観測及び解析を行った。その結果、以下のような知見が得られた。(1) プロットスケールの水流出観測から、従来浸透能が十分

に高いとされていた広葉樹林においても表面流が発生すること。(2) ヒノキ人工林での表面流発生には、雨滴衝撃による土壌クラスト形成の他に、撥水性が影響している可能性があること。(3) 空間スケールの違いによって直接流出量が異なっていた。これらのことから、表面流の発生要因および流下の素過程を解明する必要があると考えられた。なお、平成 19 年度内でフィールド観測は全て終了した。

2) モデリンググループ

本グループでは、水文モデルによる現象の再現及び森林や林床条件の変化による水・土砂流出量の変化、将来的な水流出予測を行うため、斜面及び流域スケールで観測された水流出プロセスを考慮し、モデル開発と新たなパラメータ設定を行った。主な成果は以下の通りである。(1) 斜面スケールの飽和・不飽和浸透モデルにおいて、土壌の撥水性・浸透スポットを考慮することで、現場散水実験による実測の浸透量変化を再現することができた。(2) 異なる空間スケールの斜面プロット観測から、より大きな空間スケールでは飽和及び不飽和表面流が発生していることが示唆された。(3) TOPOTUBE により要素分割した分布型流出モデルを構築し、降雨初期の土壌撥水性の影響を加味した上で小流域スケールにおける飽和地表流の発生位置を再現できた。また流域内の浸透能をランダムに変化させたり、林床の被覆状態の差異に応じて浸透能を与えたりすることで、流域内の浸透能の空間的不均一性を評価した上で流出を再現できた。現在 5 つ全てのサイトで TOPOTUBE が完成しており、三重以外のサイトでも分布型流出モデルによる再現を進めている。(4) タンクモデルによる大流域スケールの降雨一流出解析から、1980 年代半ば以降に流出率の増加傾向が認められた。今後、O-18 による成分分離結果とタンクモデルの結果を比較し、パラメータを設定することによって、流出プロセスを考慮したモデル改良により表面流による影響を評価する。

3) 森林維持管理モデリンググループ

本グループでは、森林管理のための、林床被覆と浸透能との関係、リモートセンシングを用いた広域的な森林情報の高精度な定量的把握、および高汎用性森林成長モデルの開発、また、実際の間伐効果に関する実証的研究を行なうことを目的としている。主な成果は以下の通りである。(1) 林床被覆が様々に異なるヒノキ人工林の林床において、森林内の雨滴衝撃を再現した振動ノズル式散水装置を用いて浸透能を測定したところ、浸透能と林床被覆の乾重量との間に直線型の回帰式で表せる正の相関が確認された。完全に裸地化した林床で 20mm/h 程度、十分にリターや下層植生で覆われている林床で 100mm/h 以上の浸透能が得られた。また切り捨て間伐による倒木・落枝葉の存在が浸透能の回復に効果を発揮することが示された (60mm/h 以上の浸透能)。(2) 新たに提案した Top Surface の概念によって航空機 LiDAR データによるヒノキ林の平均樹高の推定及び荒廃人工林の抽出が可能であることが示された。それを用いて日本全国における荒廃林の分布を示した。(3) 従来の、地域限定型の人工林に対する森林成長モデルから、広域対応型の森林成長モデルを構築し、検証用データにより、その汎用性及び広域対応性が確認された。(4) 強度間伐前後の林床到

達雨量，樹幹流量及び流出土砂量の観測から，間伐後における流出土砂量の減少が見られた。間伐による水・土砂流出への影響を確認するためには，無間伐林との比較検討が必要である。(5) 間伐による光環境変化のモデリングを行い，密度管理図を用いて森林管理モデルを展開するための文献整理が進んだ。具体的には，収量比数→開空度・総対象度→林床被覆→浸透能・撥水性→分布型モデル，というプロセスを経る。現在，各パーツの組み合わせを検討している。

4) 総合解析グループ

本グループでは，表面流発生の視点から流域スケールでの荒廃人工林の評価を行うため，表面流成分の分離手法の確立，洪水流出における表面流の寄与推定，人工林の健全度評価を行うことを目的としている。主な成果は以下の通りである。(1) 酸素同位体を用い表面流成分の分離手法を確立するため，プロット観測で得られた表面流出水の同位体特性を降雨水，基底流出水と比較したところ，表面流出水が土壤中に浸透せず流下するホートン型地表流であることが確認された。(2) 高知サイトでは，実際に下流域で洪水被害が発生した台風イベント時（2005年9月4-7日；総雨量646mm）に，流量と水質データを取得することができた。同位対比を用いて流域末端，ヒノキ林中流域及び広葉樹中流域の新しい水成分の寄与を調べたところ，ヒノキ林では新しい水成分による流出ピークの形成が認められ，それに比して広葉樹では新しい水成分の寄与が小さいことが明らかとなった。同様の手法で，高知・愛知・長野の各サイトのヒノキ林と広葉樹林流域におけるピーク流出時の新しい水成分割合を比較すると，ヒノキ林の方が広葉樹林流域に対して新しい水成分の割合が大きくなる傾向がみられた。これらのことから，ヒノキ林流域と広葉樹林では，表面流発生などによる直接流出が洪水流量の増加を引き起こしていることが示唆された。

以上の成果の取りまとめとして，本の出版（『人工林の荒廃と水流出—健全な森林管理と河川環境を目指して—』（仮題・岩波書店），及び，雑誌 HYDROLOGICAL PROCESSES 水文・水資源学会特集号への論文発表（全8本の投稿）が進行中である。それ以外にも，平成19年度には全20件の論文発表がなされた。成果については随時 web にて公開されている。

<http://crest-forest.suiri.tsukuba.ac.jp/>

3. 研究実施体制

(1) 総合解析グループ

- ①研究者名：恩田 裕一（筑波大学大学院生命環境科学研究科生命共存科学専攻）
- ②研究項目：総括，高知・多摩流域における現地調査，環境影響モデリング，リモートセンシングによる荒廃森林の抽出

(2) 流出観測グループ

- ①研究者名:寺嶋 智巳 (千葉大学大学院理学研究科)
- ②研究項目:多摩, 長野, 高知における流域流出観測

(3) 流出モデリンググループ

- ①研究者名:Roy Sidle (京都大学防災研究所)
- ②研究項目:三重における流出観測および土壌プロット観測, 各スケールのモデリング

(4) 森林維持管理モデリンググループ

- ①研究者名:竹中 千里 (名古屋大学大学院生命農学研究科)
- ②研究項目:森林維持管理と流出特性に関するモデリングの構築、森林施業と水流出の関係

4. 研究成果の発表等

(1) 論文発表(原著論文)

1. Fukuyama, T., Onda, Y., Takenaka, C., Desmond, E.W.: Investigating erosion rates within a Japanese cypress plantation using Cs-137 and Pb-210ex measurements. *Journal of Geophysical Research - Earth Surface* (accepted)
2. Gomi, T., Sidle, R. C., Miyata, S., Kosugi, K., Onda, Y. (2008) Dynamic runoff connectivity of overland flow on steep forested hillslopes: scale effects and runoff transfer. *Water Resources Research*. DOI: 10.1029/2007WR005894 (in press)
3. 平野智章, 寺嶋智巳, 中村智博, 青木文聡, 境優(2008) 管理放棄されたヒノキ人工林および天然生落葉広葉樹林における土壌表層部の水流発生機構. 地形 (受理)
4. Kosugi, K., Katsura, S., Mizuyama, T., Okunaka, S., Mizutani, T.(2008) Anomalous behavior of soil mantle groundwater demonstrates the major effects of bedrock groundwater on surface hydrological processes. *Water Resources Research* 44. W01407. DOI: 10.1029/2006WR005859.
5. Matsushita, B., Yang, W., Chen, J., Onda, Y., Qiu, G. (2007) Sensitivity of the Enhanced Vegetation Index (EVI) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to Topographic Effects: A Case Study in High-Density Cypress Forest. *Sensors* 7: 2636 – 2651
6. Miyata, S., Kosugi, K., Gomi, T., Onda, Y., Mizuyama, T. (2007) Surface.run-off as affected by soil water repellency in a Japanese cypress forest. *Hydrological Processes* 21(17): 2365 – 2376. DOI: 10.1002/hyp.6749
7. Mizugaki, S., Onda, Y., Fukuyama, T., Koga, S., Asai, H., Hiramatsu, S.(2008) Estimation of

sediment sources using ^{137}Cs and ^{210}Pb in unmanaged Japanese cypress plantation watersheds, southern Japan. *Hydrological Processes* (accepted)

8. 南光一樹 (2008) 雨滴の大きさをはかる. シリーズ: 森をはかる. *森林科学* 52: 55
9. Nanko, K., Mizugaki, S., Onda, Y. (2008) Estimation of splash detachment rate based on quantification of throughfall kinetic energy in an unmanaged Japanese cypress plantation. *Catena* 72:348-361 DOI: 10.1016/j.catena.2007.07.002
10. Nanko, K., Onda, Y., Ito, A., Moriwaki, H. (2008) Effect of canopy thickness and canopy saturation on the amount and kinetic energy of throughfall: an experimental approach. *Geophysical Research Letters* 35. L05401. DOI: 10.1029/2007GL033010
11. 恩田裕一 (2007) 森林の荒廃による表面流出の発生および細粒土砂の河川への流出. *地盤工学会誌* 55(8): 16-19
12. Onda, Y., Dietrich, W. E., Booker, F (2008) Evolution of overland flow after a severe forest fire, Point Reyes, California. *Catena* 72:13-20
13. 恩田裕一, 五味高志, 水垣 滋 (2007) 観測の現場を訪ねて (その2) JST/CREST プロジェクト“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”研究サイト. *砂防学会誌* 59(5): 70-73
14. 恩田裕一, 蔵治光一郎, 五味高志, 水垣滋(2008) 国際シンポジウム「山岳地域の水資源管理と洪水軽減のための持続可能な森林管理」開催報告. *水文・水資源学会誌* 21(1):69-71
15. Sadeghi, S.H.R., Mizuyama, T., Miyata, S., Gomi, T., Kosugi, K., Fukushima, T., Mizugaki, S., Onda, Y. (2008) Development, evaluation and interpretation of sediment rating curves for a Japanese small mountainous reforested watershed. *Geoderma* 144:198-211
16. Sadeghi, S. H. R., Mizuyama, T., Miyata, S., Gomi, T., Kosugi, K., Mizugaki, S., Onda, Y. (2007) Is MUSLE apt to small steeply reforested watershed?, *Journal of Forest Research*. 12(4): 270-277. DOI:10.1007/s10310-007-0017-9
17. Sidle, R. C., Hirano, T., Gomi, T., Terajima, T. (2007) Hortonian overland flow from Japanese forest plantations - an aberration, the real thing, or something in between? *Hydrological Processes* 21(23): 3237-3247. DOI:10.1002/hyp.6876
18. Trandafir, A. C., Sidle, R. C., Gomi, T., Kamai, T. (2008) Monitored and simulated variations in matric suction during rainfall in a residual soil slope. *Environmental Geology*. DOI: 10.1007/s00254-007-1045-7 (in press)
19. Zhang Z, Fukushima T, Onda Y, Gomi T, Fukuyama T, Sidle RC, Kosugi K, Matsushige K. (2007) Nutrient runoff from forested watersheds in central Japan during typhoon storms: Implications for understanding runoff mechanisms during storm events. *Hydrological Processes* 21: 1167-1178. DOI: 10.1002/hyp.6677
20. Zhang, Z., Fukushima, T., Onda, Y., Mizugaki, S., Gomi, T., Kosugi, K., Hiramatsu, S., Kitahara, H., Kuraji, K., Terajima, T., Matsushige, K. (2008) Characterization 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. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2007.09.045

(2) 特許出願

平成 19 年度 国内特許出願件数:1 件 (CREST 研究期間累積件数:1 件)