

TOPOTUBE地形解析と分布型流出モデルを用いたヒノキ林流域における表面流の発生予測

科学技術振興機構 ○五味高志

京都大学防災研究所 Roy C. Sidle

京都大学大学院農学研究科 宮田秀介・小杉賢一朗

筑波大学大学院生命環境科学研究科 恩田裕一

1. はじめに

日本の国土の約40%は人工林であり、その半数以上がスギ・ヒノキ林である。間伐などの保育作業が行われていない植栽後30~40年経過したヒノキ林では、立木密度が高く林冠が閉塞している。そのため林床の植生が少なく、裸地化した林床では土壌浸透能の低下による表面流の発生と表土流亡が観測されている。土壌の植生被覆量が少ないほど、土壌浸透能が低下する事例や、表面流の発生には土壌クラストの形成による浸透能の低下とともに、土壌の撥水性が影響していることが報告されている。本研究では、土壌表面の物理条件などを考慮した分布型流出モデルを用いて、流域スケールでの表面流の発生および流域の流出量と応答を解析することを目的とした。また、土壌表面条件が変化することによって、流出量や流出応答がどのように変化するかについての予測も試みた。本研究はJST/CREST「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」の一部として行なわれた。本研究は、三重県中部に位置する、40年生ヒノキ人工林に覆われた4.8haの流域と、その流域に入れ子状に配置された小流域（林床が裸地化しているヒノキ林や植栽後に複数回間伐したヒノキ林など）を対象とした。また、高知県大正町に位置する調査値においても本流出モデルを用いた流出解析を行った。

2. TOPOTUBEによる地形解析

分布型流出モデルの基礎となる流域地形の解析を行うために、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用いた。TOPOTUBEは、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になる線を引きアルゴリズムで作成される。等高線に対して、直角に交わる線（flow line）を基準とし分割することで、水移動のベクトル（TOPOTUBE）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る。TOPOTUBEの各地形要素間の水の動きについては、1次元で取り扱うことができるために、水流出に関する計算を簡略化しやすい利点もある。本研究ではLiDAR地形測量による詳細な等高線（1m）を用いて、TOPOTUBEを作成した（図-1）。TOPOTUBEの作成はArcGISとC++プログラミングを用いた。

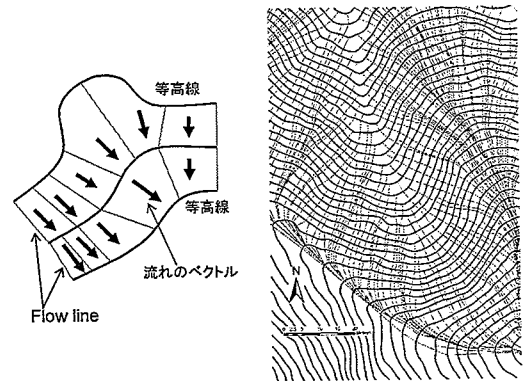


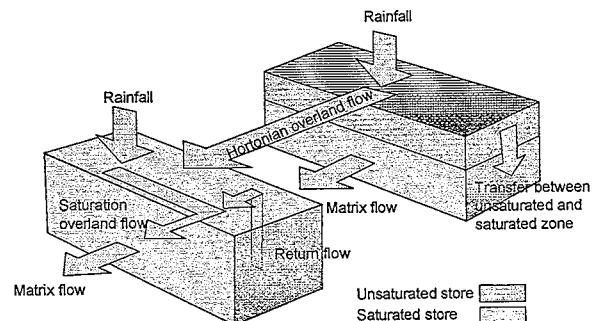
図-1 TOPOTUBE地形解析の模式図と三重サイトの2m等高線地図から作成したTOPOTUBE

3. 表面流の発生と流下

表面流の発生については、Horton (1933) の降雨に対する浸透能の関係を用いた。発生した、表面流がTOPOTUBEを流下するプロセスについては、キネマティックウェーブ式を用いた（図-2）。飽和土壌中の水の動きはDarcy則を用い、飽和地下水帯のについてもキネマティックウェーブ式を用いて地下水流動を再現した。

4. 観測によって得られた結果のパラメータ化

現地観測によって、新たに得られた①土壌浸透能、②土壌撥水性、③浸透スポットをパラメータとして流出モデルに組み込んだ。浸透能については、振動ノズル型の散水試験器を用いて計測した（伊藤ほか、2005）。林床が裸地化しているヒノキ林における最小浸透能は14mm、林床に有機物や下層植生がある場合の浸透能は130mmであることが報告されている。ヒノキ林の表層土壌では、土壌撥水性が表面流の発生に影響を及ぼしていることが報告されている（Miyata et al. in press）。土壌の撥水性は、降雨イベントの初期に顕著にみられ、降雨強度が計測された浸透能より小さい場合においても、表面流が発生する要因となっている。そこで、降雨量によって土壌浸透能が変化する関数をモデルに組み込むことによって撥水性の影響を考慮した。ヒノキ林斜面において、サイズの異なるプロットにて表面流の流出を観測した場合、



Four point finite difference solution of the kinematic overland flow

$$\frac{A_4 + Q_4}{2} \frac{\Delta t}{\Delta x_e} = \frac{A_1 + A_3 - A_2}{2} + Q_4 \frac{\Delta t}{\Delta x_e} + i_4 A_4 \frac{\Delta t}{\Delta x_e}$$

$$Q_4 = n^{-1} A_4 R_4^{2/3} S_4^{1/2} = \partial A_4^m$$

図-2 表面流の発生と流下におけるモデル構造の模式図

サイズ（斜面長の長い）の大きなプロットでは小さなプロットと比べて流出率が小さくなる傾向がある（Gomi et al., in review）。大きなプロットでは、発生した表面流が浸透する「場（浸透スポット）」がより多く存在することが影響していると考え、モデルにおいても土壤が浸透する「場」を考慮した。浸透スポットの存在については、宮田ほか（2007）でも報告されている。

5. 分布型流出モデルによる流出解析

三重サイトの林床裸地化している0.3haのヒノキ林流域を対象として、モデルを適応した。本対象地では流域末端における流出量の観測に加えて、流域内に8x25mの斜面大プロットと0.5x2mの小プロットにより表面流量の観測を行っているために、モデルによる計算結果を検証するには適している。流域全体の浸透能が14mmを用いて、2004年12月4日の降雨イベントに適応した例を示した（図-3）。土壤浸透能のみを考慮した場合、降雨イベントの初期においては、降雨が浸透能を上回らないために、計算では表面流は発生しないこととなるが、斜面プロットの観測では降雨の初期から表面流の発生が確認された。そこで、土壤撥水性を考慮すると降雨の初期から表面流が発生し、表面流の流出応答における観測値と計算値の整合性が向上した。ただし、斜面大プロットと流出末端における計算結果はともに、観測値に対して大きくなる傾向があり、モデルが表面流を過大評価していることが予想された。これは、モデルパラメータとして均質な土壤浸透能を与えていることが要因であると考え、流域内の土壤条件が不均質であると仮定した。TOPOTUBEの20・40・60%に浸透能の高い箇所（浸透スポット）がランダムに存在するとし、表面流の発生量を計算したところ、40%の場合において観測値と計算値の整合性が最も良くなった（図-4）。

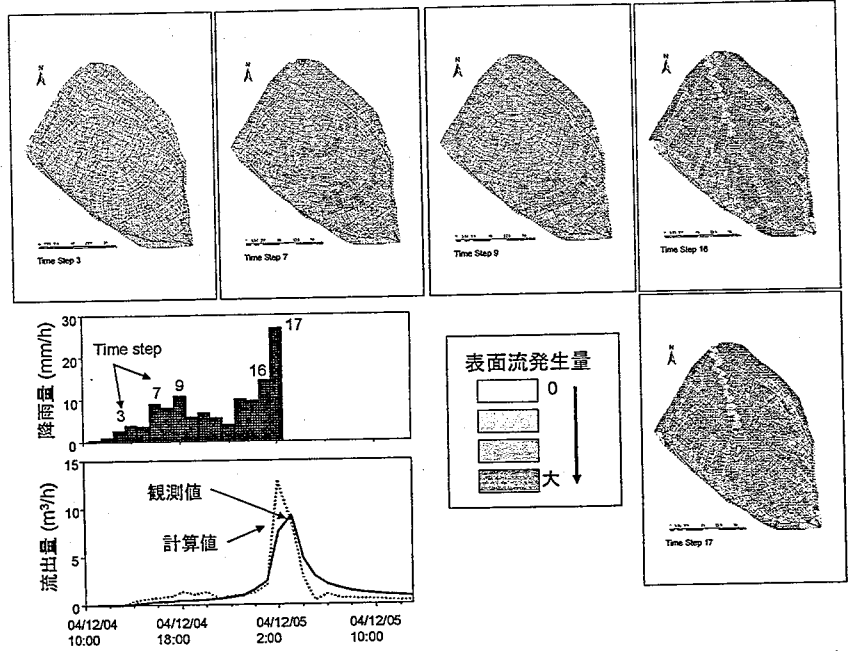


図-3 モデル計算結果による三重サイトのヒノキ林における発生表面流の空間分布

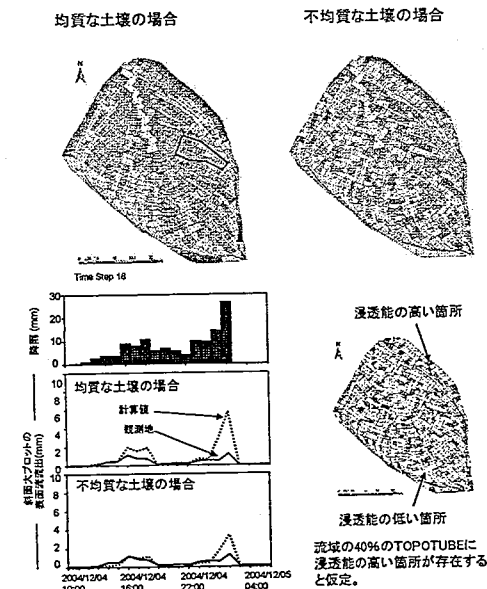


図-4 不均質な土壤を考慮した場合の表面流分布と流出量

図-3)。土壤浸透能のみを考慮した場合、降雨イベントの初期においては、降雨が浸透能を上回らないために、計算では表面流は発生しないこととなるが、斜面プロットの観測では降雨の初期から表面流の発生が確認された。そこで、土壤撥水性を考慮すると降雨の初期から表面流が発生し、表面流の流出応答における観測値と計算値の整合性が向上した。ただし、斜面大プロットと流出末端における計算結果はともに、観測値に対して大きくなる傾向があり、モデルが表面流を過大評価していることが予想された。これは、モデルパラメータとして均質な土壤浸透能を与えていることが要因であると考え、流域内の土壤条件が不均質であると仮定した。TOPOTUBEの20・40・60%に浸透能の高い箇所（浸透スポット）がランダムに存在するとし、表面流の発生量を計算したところ、40%の場合において観測値と計算値の整合性が最も良くなった（図-4）。

6. まとめ

分布型流出モデルを用いて、ヒノキ林斜面における表面流の発生量とその分布の再現を行った。土壤撥水性を考慮することによって、降雨初期における表面流の発生と降雨に対する流出の応答が改善された。また、土壤浸透能の空間的なばらつきなどの土壤の不均質性を考慮することによって、表面流発生量の再現性が改善された。浸透能の不均質性については、土壤構造による土壤の鉛直浸透のみならず、樹木根茎や土壤発達そのもの違いによっても生じていると考えられているために、森林流域における流出解析を行うためには、それらの不均質性や空間分布を考慮したモデル化を行う必要があると考えられた。

引用文献

- Dhakal AS, and Sidle RC (2004) Pore water pressure assessment in a forest watershed: Simulations and distributed field measurements related to forest practices. *Water Resources Research*, 40, doi:10.1029/2003WR002917.
- Gomi T, Sidle RC, Miyata S, Kosugi K, Onda Y. Dynamic runoff connectivity of overland flow on steep forested hillslopes: Scale effects and runoff transfer. *Water Resources Research* (in review).
- Horton, R.E. 1933. The role of infiltration in the hydrological cycle. *Transactions, American Geophysical Union* 14: 460-466.
- 伊藤俊・伊田裕一・加藤弘亮（2005）森林における浸透能測定のための散水型人工降雨装置について.平成17年度砂防学会研究発表会概要集. 302-303.
- Miyata S, Kosugi K, Gomi T, Onda Y, and Mizuyama T (2007) Surface runoff as affected by soil water repellency in a Japanese cypress forest. *Hydrological Processes* (in press).