数値気候モデルを用いた土砂生産量予測

ESTIMATION OF SEDIMENT YIELD IN JAPAN BY USING CLIMATE PROJECTION MODEL

秋本嗣美¹・川越清樹²・風間聡³ Tsugumi AKIMOTO, Seiki KAWAGOE and So KAZAMA

1学生会員 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻(〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06)
 2正会員 博(環境科学) 東北大学大学院環境科学研究科 博士研究員(〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-20)
 3正会員 博(工) 東北大学大学院環境科学研究科 准教授(〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-20)

Extreme precipitation caused by global warming is forecasted with climate prediction model. We calculated sediment yield in Japan using forecast climate data (MRI-RCM20Ver.2; SRES A2 and MIROC; SERES A1B) and digital geographic data. First, we made the sediment forecasting model with sediment hazard probability. Second, we evaluated sediment yields in Near-future climate and Future climate. Average sediment yield in Hokkaido by using MIROC Future climate model is 158m³/km²/year, showing a 27 percent increase over present climate model. The result of this study can constitute basic data to manage sediment effects in each river basin in Japan.

Key Words : SRES, sediment yield, sediment hazard, basin, global warming

1. はじめに

幾つかの数値気候モデルから,地球温暖化に伴う降雨 量の増大,および豪雨頻度の増加,無降雨期間の長期化 に示される極端な降水現象の出現が展望されている¹⁾. 降雨量の増大と豪雨頻度の増加は,流量や土砂生産量の 増加を促進させ,水資源や水災害の問題を誘発させる²⁾. 異常気象レポート2005は,近年の降雨量の極大化,豪雨 頻度の増加の傾向を示し,特に,2004年の大雨の記録を 報告している.2004年は平年比1.5倍以上の台風上陸, 新潟・福島豪雨等に示される梅雨前線の停滞により,列 島各地で洪水決壊や土砂崩壊が群発し,治水,および治 山施設が整備されつつあるにも係わらず1950年以降最高 の2986人の水・土砂災害による死傷者が記録されている ³⁾.地球温暖化に伴う降雨量の増大,豪雨頻度の増加の 予見は,2004年と酷似した被害の高頻度化,既往最大の 被害の更新を危惧させるものである.

降雨量の増加に伴う土砂生産量の増加は、斜面崩壊、 土砂浸食の活発化に起因する.流域内で斜面崩壊、土砂 浸食が頻発した場合、沿岸への土砂供給を増加させる一 方で、堆砂に伴う貯水池の有効貯水容量の減少、河床上 昇に伴う洪水リスクの増加、有機濁質成分の負荷増加を 生じさせる.例えば、2004年の福井豪雨(2004年7月18日) では、九頭竜川水系真名川ダムの上流域で約35%の崩壊 地面積が拡大し、ダム稼動27年の累積堆砂量に相当する 1,000千m³の堆砂が認められた.また、この降雨以降、 約5ヶ月間にわたり貯水池内の濁度が100度以上を記録し た⁴.この事例から、地球温暖化に伴う降雨量増加によ り、列島各地で土砂に関連した問題が同時多発的に発生 すると推測される.したがって、地球温暖化による土砂 による影響を事前に明らかにし、問題を軽減させるため の適応策を講じなければならない.

地球温暖化に伴う影響を評価するため,現在までの気 候の推移や温室効果ガス排出予測から類推された降水情 報を基に,広範領域に対する逼迫指標⁵や発生確率⁶を求 め,地域のリスクに対するポテンシャルを定量かつ分布 的に明示させる取り組みがなされている.この成果は, 地球温暖化に対する対策の適切な配置,設計基準の見直 しや,今後,微細な調査を進めるべく地域の抽出に有用 である.土砂生産に対する分布予測は,例えばダム等の 水資源,水災害の対策構造物を設計することや,緻密な データの取得から物理過程を系統よくモデル化できるこ とから,流域や市町村等の中小規模の領域を対象にした 事例が多い⁷⁾⁸⁾.温暖化も含めた気候変動は地球規模で生 ずることを考慮すると,広範領域に対する土砂生産の分 布予測も同時に捉える必要もある.これに対し,長谷川 ら⁹や岡野ら¹⁰による日本列島全域を対象に広範領域に 対する土砂生産予測の研究事例がある.しかし,降雨に よる影響を考慮していない地形,地質に依存したもので あり,気候変動による影響を捉えることができない.そ こで,地形,地質の他に降雨の条件も考慮できる斜面崩 壊発生確率モデルを構築し,日本列島全域のリスクマッ プの作成を試みている⁹.

本研究では、斜面崩壊リスクモデルを利用した土砂生 産量モデルを構築し、この条件に数値気候モデルによる 降雨量を用いることで、気候変動に対する日本列島の土 砂生産量を求めた.このモデルは、気候変動に伴い発生 しうる量的なインパクトの大きい斜面崩壊のみの土砂生 産量に着目したものである.真名子ダムの事例に示され るとおり、斜面崩壊は莫大な土砂生産を生じさせる.土 砂生産予測モデルには、ダム堆砂に基づいた広域かつ長 時間の平均的な量を利用している.各流域、各地方の現 在から将来に至る土砂生産を比較検討することで、気候 変動に対して脆弱になる地域の抽出が可能になり、詳細 調査、対策を優先する地域の検討に有用な成果になる.

斜面崩壊以外にも裸地や植生等の多くの因子が土砂生産 に影響するが、気候変動に示される長い時間とダム流域 に示される広い空間の平均量を対象にしたため、詳細な 物理過程は考慮しないこととした.また、気候変動を考 慮する中で植生を考慮する場合、植生自体の生活環境も 変化する可能性が高い.そのため、気候変動に対する植 生の影響も踏まえながら、土砂生産への関与を明らかに しなければならない.今後、気候変動と植生の動向にも 着目して土砂生産量予測モデルに組み込む意向である. 以下に本研究の手順を整理する.

- 1) 数値気候モデルによる斜面崩壊発生確率の導出
- 2) 斜面崩壊発生確率による土砂生産量の導出
- 3) 将来の気候条件に応じた十砂生産量マップの作成

これらを導出することにより、気候変動により斜面崩 壊の土砂生産量が増加する地域を抽出する.

2. データセット

気候変動に対する土砂生産量を導出するため,斜面崩 壊発生確率モデル⁶と土砂生産量予測モデル¹¹⁾を用いた. 斜面崩壊発生確率モデルには,地形,地質データ,降雨 条件を含む水文データ,災害実績データを利用した.土 砂生産量予測モデルは,斜面崩壊の発生確率とダム堆砂 の実績データを利用した.以下にモデルに利用した各 データを説明する.これらはダム堆砂の実績データを除 くと,解像度1km×1kmの数値地理情報である.

(1) 地形・地質データ

地質データとして、国土数値情報のKS-META-G05-54Mを用いた.本解析では、土砂、土砂化しやすい地質 のみを評価の対象とし、崩積土、続成期間の短い新第三 系堆積岩と第三系堆積岩、造山鉱物にカオリナイトを含 み粘土化しやすい花崗岩の4種の地質の地域のみ斜面崩 壊発生確率,および土砂生産量を検討することにした.

地形データとして起伏量を用いた.起伏量は,国土数 値情報KS-META-G05-56Mデータに格納された最高標高 と最低標高の差から求められた.起伏量は,建設省河川 砂防基準(案)¹²⁾などの山地崩壊の予測モデルに用いられ ている地形指標であり,従来から土砂生産の推定に利用 されてきた.

(2) 水文データ

水文データとして地下水動水勾配を用いた.動水勾配 は数値地理情報を用いた浸透解析による浸潤線から求め ている. KS-META-G05-54Mデータの表層土壌, KS-META-G05-56Mデータの斜面傾斜度を用いて擬似的な2 次元斜面を再現し,再現期間5年に対する24時間降雨量 極値を降雨条件として斜面に与えることにより,再現期 間毎の動水勾配を得ている.以下に浸透解析,降雨極値 のデータを説明する.

a)浸透解析方法

浸透解析にRichardsの二次元飽和不飽和浸透解析モデルを用いる.浸透解析は式(1)に示すとおりである. Richards式にダルシー則と比水文容量 $C(=\partial \theta / \partial \psi)$ を代入することで導かれる.

$$C\frac{\partial\psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial\psi}{\partial x} - K_x \sin\alpha \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial\psi}{\partial z} - K_z \cos\alpha \right)$$
(1)

ここで*C*:比水分容量(= $\partial \theta / \partial \psi$), θ :体積含水率, ψ :圧 力水頭(cm), *t*:時間(sec), *K*:不飽和透水係数(cm/sec), α :斜面傾斜度(°)である. 添え字の*x* は水平方向, *z* は 水平方向である. 体積含水率 θ は式(2)に示す谷式¹³, 不 飽和透水係数*K* は式(3)に示す一般化Kozeny式¹⁴から求 めた. 表層土壤は, 礫質土, 砂質土, シルト, 粘土に分 類して浸透解析に用いた. 降雨は24時間雨量を時間毎に 等分配して浸透解析に用いた. この降雨設定は, 実際の 時間配分を再現したものではないものの, 降雨浸透に対 する地域特性の導出を可能にする.

$$\theta = \left(\theta_r - \theta_s\right) \left(\frac{\psi}{\psi_0} + 1\right) \exp\left(-\frac{\psi}{\psi_0}\right) + \theta_r$$
(2)

$$K_{x} = Ks_{x} \left(\frac{\theta - \theta_{r}}{\theta_{s} - \theta_{r}}\right)^{\beta}, K_{z} = Ks_{z} \left(\frac{\theta - \theta_{r}}{\theta_{s} - \theta_{r}}\right)^{\beta}$$
(3)

ここで θ_r :残留体積含水率, θ_s :飽和体積含水率, \mathcal{M}_s : C が最大となる Ψ , Ks:飽和透水係数, β :土壌係数 である.

b)将来気候モデルによる再現期間の降雨極値データ

浸透解析に再現期間5年の降雨極値データを利用する. 本解析では現在気候(1980年から2000年),中間気候(2050 年対応),将来気候(2100年対応)の3つの気候を対象にす る.現在気候にメッシュ気候値(気象庁),中間気候,お よび将来気候に数値気候モデルの平年値のアウトプット データを用いた.数値気候モデルには,社会発展する発



展途上国の現状も踏まえて経済発展型の地域主義とグ ローバル化による SRES(Special Report on Emission Scenario)を用い, SRESがA2であるMRI-RCM20-Ver.2(気 象庁・気象研究所)、SRESがA1B(化石燃料・非化石燃料 のバランス重視の高成長型社会)であるMIROC(the Model for Interdisciplinary Research on Climate;国立環境研究 所・東京大学気候システム研究センター・海洋研究開発 機構地球環境フロンティア研究センター)を解析に利用 した. A2シナリオは気温上昇の概ね上限(2090年-2099 年; 2.0℃から5.4℃), A1Bシナリオは気温上昇予測の中 間値(2090年-2099年;1.7℃から4.4℃)を示している. な お、2050年に対応する中間気候としてMRI-RCM20-Ver.2 の場合2031年から2050年のデータ, MIROCの場合2036 年から2065年のデータ、2100年に対応する将来気候とし てMRI-RCM20-Ver.2の場合2081年から2100年, MIROC の場合2065年から2095年を用いた.

本研究では、牛山ら¹⁵⁾の求めた暖候期降雨量(4月から 11月)と日降雨極値の強い相関を参考に、暖候期中の最 大月降雨量平年値を再現期間の日降雨極値に変換する線 形式から開発したモデルを基に再現期間5年の降雨極値 を求めている¹⁶⁾.このモデルは、最大月降雨平年値の発 生する季節毎(春・夏;3月から8月、秋;9月から11月, 冬;12月から2月)に作成されている.各気候ともに平年 値データが利用されているが、中間気候、将来気候は lizumiら¹⁷⁾による統計的解析からダウンスケーリングし た解像度1km×1kmの数値気候モデルの月降水量平年値 データを利用した.図-1に各数値気候モデル,気候によ る動水勾配変化を示す.

(3) 災害実績データ

災害実績データに2004年7月12日から13日の新潟・福 島豪雨による降雨イベントにより頻発した土砂災害の調 査結果を利用した.この災害事例は,甚大な降雨により 同時多発的に斜面崩壊を生じさせた降雨と斜面崩壊の密 接な空間的関係が示されているものである.また,地質 分布も疎らなため,日本列島を対象にした斜面崩壊のリ スクに利用できる事例である.この実績データを斜面崩 壊発生確率モデルの係数同定に利用し,列島全域の斜面 崩壊発生確率を算定した.

(4) ダム堆砂データ

国土交通省,および水資源機構の所管する日本列島各 地の59ヶ所のダム堆砂データを土砂生産量予測モデルに 利用した.検討対象にダム上流の流域面積が185km²以上, ダム経過年15年以上の大規模かつ運用期間の長いダムを 選定している.解析には累積堆砂量を流域面積,ダム堆 砂で除した比堆砂量を用いた.

3. 解析方法

斜面崩壊による土砂生産量の導出に利用した斜面崩壊 発生確率モデル、土砂生産量予測モデルを説明する.

(1) 斜面崩壊発生確率モデル

発生確率モデルに多重ロジスティック回帰分析を利用 した.災害実績エリアにおける斜面崩壊の発生を1,非 発生を0に設定し、二項分布を作成した.この二項分布 にロジスティック曲線をあてはめ、重回帰式に定式化し た.発生確率モデル式は、ロジスティック曲線を起伏量 と動水勾配による説明変数で重回帰式に示したものであ る.モデル式は崩積土、新第三系堆積岩、古第三系堆積 岩、花崗岩の4つの地質に応じて作成された.式(4)に斜 面崩壊発生確率モデル式を示す.

$$P = \frac{1}{1 + \exp\left[-\left(\beta_0 + \beta_h hydY_h + \beta_r reliefY_r\right)\right]}$$
(4)

ここで, *P*:発生確率(%), β₀:切片, β_h:動水勾配係数, β_r:起伏量係数, *hydY_h*:動水勾配, *reliefY_r*:起伏量(m)であ る. 説明変数は, 5%以内の有意確率*P*値を示し, 有意水 準95%を満たす. 図-2に斜面崩壊発生確率の分布を示す. (2) 土砂生産量予測モデル

斜面崩壊による土砂生産量予測モデルは、再現期間5 年のダム上流域の斜面崩壊発生確率とダムの貯水池にお ける比堆砂量の関係を指数関数により定式化したもので ある.式(5)に土砂生産量予測モデル式、図-3に現在気候 データを用いて算出した発生確率とダム堆砂量の関係を 示す.

 $SY = 0.1051 \exp(0.0301P)$

(5)



40 60 80 斜面崩壊発生確率(%)



ここで, SY:比堆砂量(×10³m³/km²/year), P:再現期間5年 の降雨極値を用いた発生確率(%)である.再現期間5年 の決定係数R²は指数関数の近似式により0.65で示され た. 日本列島全域を対象にしても強い相関が示されて いるため、降雨に起因する斜面崩壊発生確率を用いた 指数関数による近似式で土砂生産が推定できると解釈 できる.本研究では、気候変動に伴う降雨に起因する 斜面崩壊を対象に列島の土砂生産量を包括的に捉える ことを目的にすることから、この近似式を土砂生産量 予測に利用することとする. ただし、個別のデータと曲 線を比較した場合,一部に0.6×10³m³/km²/yearの誤差を 含むダムも存在する. こうした誤差の発生する理由とし て、排砂対策の整備による土砂堆砂の抑制効果、融雪に 起因した斜面崩壊による土砂生産進行、植生による斜面 崩壊抑制効果が挙げられる. これらの特性はダム個別の 特性であり、包括的な評価に取り入れることが困難であ る. 今後, 土砂生産の予測精度の向上を図ることを目的



図-4 土砂生産量予測分布

に、これらの特性を整理し、土砂の抑制および促進に対 する関数に数値化してモデルに組み込むことに取り組む 意向である.

4. 解析結果

図-4に土砂生産量予測分布を示す.また、図-5は各将

表-1 各流域・各地域における平均土砂生産量



図-6 3流域の平均土砂生産量

来気候と現在気候を用いて算出した土砂生産量の差である。各ケース共に糸魚川ー静岡構造線、中央構造線の周辺に土砂生産量2000m³/km²/yearを超えるグリッドセルが 集中する。

中間気候,将来気候に伴い土砂生産量の著しい増加が 認められる地域は北海道南部,東北地方,東海甲信越地 方,近畿地方,四国地方である.北海道は道南部の山岳 域において250-500 m³/km²/yearの土砂生産が発生すると 予測される.東北地方では奥羽山脈,阿武隈高地の周辺 で土砂生産量が0から250-500 m³/km²/yearの地域に変化 する.北陸地方の越後山脈周辺,近畿地方の福知山盆地, 丹後盆地,播磨平野の北部において,中間気候に伴う土 砂生産量と,現在気候に伴う土砂生産量の差が 1000m³/km²/year以上のグリットセルが認められる.また 四国地方においてもMIROCの中間気候において,四国 地方南部において急激な土砂生産量の増加が認められる.

5. 考察

考察として一級河川の流域における土砂生産量の変化

を説明する. 表-1は流域における各気候の平均土砂生産 量を示したものである. 図-6は、増加率が高い地域の3 流域の土砂生産量を示したものである. また、図-7に日 本列島平均の土砂生産量を示した.

図-7 日本列島の平均土砂生産量

図-7より、中間気候、将来気候においての土砂生産量 の増加が見て取れる.平均値におけるMRI-RCM20-Ver.2, MIROCの中間気候、将来気候の平均値には大きな変化 は認められない.しかし、図-6よりMRI-RCM20-Ver.2 の将来気候によって算出された土砂生産量の値が他の ケースを由良川のように上回るパターン、また吉野川、 鵡川のように下回るパターンが存在する.上回るパター ンについては、今回対象とした全105流域のうち8流域存 在する(灰色で塗りつぶされている箇所).この生産量の パターンの違いは、各流域において地形形状が異なるこ と、地質の種類が異なることが原因であると考えられる. また、MRI-RCM20-Ver.2が採用しているA2シナリオは 約2020年を境に著しい気温上昇が予見されている.活発 な気温上昇に伴い地域ごとの降雨極値に差異が発生する ことも原因であると考えられる.

図-8に現在気候に対する各気候の土砂生産量の増加量を地域毎に示した.九州地方を除く全ての地域でA1BシナリオのMIROCの将来気候が最も高い増加率を示す.



北海道,近畿地方においては現在比,27%増,25%増が 認められる.地域別では北海道の増加率が他の地域に比 べ高いことが見て取れる.これは北海道の地形条件,地 質条件が他の地域と比較すると地球温暖化による降雨パ ターンの変化に反応しやすいことを示唆している.また 東北地方,関東地方においては他の地域に比べ,増加率 が低い.東北地方においては,図-5では増加する地域も 認められるが,地方全体としては低い増加率を示す.

今後は各気候モデルに採用されているシナリオの時系 列的な降水の変化,地形変化,地質の違いを検討し,日 本列島における土砂生産量予測の評価をさらに推進させ る予定である.

6. 結論

本研究の結論を以下に列挙する.

- 全ての気候において糸魚川-静岡構造線、中央構造 線の周辺に土砂生産量2000m³/km²/yearを超える地域が 集中する.
- 2) 中間気候,将来気候に伴い土砂生産量の著しい増加 が認められる地域は北海道南部,東北地方の奥羽山 脈,阿武隈高地周辺,東海甲信越地方,近畿地方, 四国地方である.
- 3)現在気候に対する各気候の土砂生産量の増加量は九 州地方を除く全ての地域でA1BシナリオのMIROCの 将来気候が最も高い増加率を示す.北海道,近畿地 方においては現在比に対し27%増,25%増である.

本研究は、このモデルはマクロな視点から気候変動に 対する土砂生産の変化を捉えたものであり、過剰な土砂 生産の認められる地域の詳細調査を誘導させていく成果 である.そのため、気候変動に対する適応策を求めるに は、マクロの視点からだけではなく、ミクロの視点も踏 まえた評価が必要になり、双方の視点を融合させること が今後の課題になる.また、排砂システム、融雪等の降 雨以外の土砂堆砂に対する要因も整理して精度の高い土 砂生産量予測モデルの構築に取り組む意向である. 謝辞:本研究は地球環境研究総合推進費(S-4)の研究助成 によって行われた.ここに併せて謝意を示す.

参考文献

1) 和田一範,村瀬勝彦,富沢洋介:地域気候モデルを用いた 地球温暖化による災害リスク算定の試み,水工学論文 集,No.48,pp.457-462,2004.

2) 風間聡, 沖大幹:温暖化による水資源への影響, 地球環境, Vol.11, No.1, pp59-65,2006.

3) 気象庁: 異常気象レポート 2005, http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/climate_change/2005/ind ex2.html, cited, 2008/9/30.

 (4) 国 土 交 通 省 近 畿 地 方 整 備 局 : http://www.kkr.mlit.go.jp/plan/kannai2007/01/08.pdf, cited, 2008/9/30.
 5) Yukiko Hirabayashi, Shinjiro Kanae, Seita Emori, Taikan Oki,Masahide Kimoto: Global projections of changing risks of floods and Droughts in a changing climate, Hydrological Sciences Jornal, Vol.53, No.4, pp754-772, 2008.

6) 川越清樹,風間聡,沢本正樹:将来気候モデルを用いた斜面崩壊リスク評価,地球環境研究論文集,Vol.16,pp.27-33,2008.
7) サニット ウォンサ,清水康行,岩井聖:流域全体系における土砂動態モデル化の試み:河道形状・土地利用変遷に関する基礎的検討,水文・水資源学会誌,Vol.17,No.6,pp59-606,2004.
8) 高橋保,井上素行,中川一,里深好文:山岳地帯における土砂流出の予測,水工学論文流,No.44, pp.717-722, 2000.

9) 長谷川浩一,若松和寿江,松岡昌志:ダム堆砂データに基 づく日本全国の潜在的浸食分布,自然災害科学,Vol.24,No.3, pp.287-301,2005.

10) 岡野眞久,高柳淳二,藤井隆弘:計画堆砂量の設定とダム 貯水池流入土砂量に基づく貯水池堆砂量推定方法についての考 察,平成14年度ダム水源地環境技術研究所 所報, pp.31-37, 2002.

11) 秋本嗣美,川越清樹,風間聡,沢本正樹:斜面崩壊によるダム貯水池の影響評価,水工学論文集,No.52, pp.571-576,2008.
 12) 建設省(現国土交通省):建設省河川砂防基準(案),1997.

13) 谷誠:一次元鉛直不飽和浸透によって生じる水面上昇の特

性, 日本林学会誌, Vol.64, No.11, pp.409-418, 1982.

14) W.F.Brutsaert : The permeability of a porous medium determined from certain probability laws forpore size distribution, Water Resources Research, Vol.4, No.2, pp.425-434, 1968.

15) 牛山素行, 寶馨: AMeDASデータによる暖候期降水量と最 大1時間・日降水量の関係, 水文・水資源学会誌, Vol.16, No.4,pp.368-374,2003.

16) 川越清樹,風間聡,沢本正樹:数値地理情報と降雨極値 データを利用した土砂災害発生確率モデルの構築,自然災害科 学,Vol.27, No.1,2008.

17) T. Iizumi, M. Nishimori, and M. Yokozawa : Combined equations for estimating global solar radiation: Projection of radiation field over Japan under global warming condition by statistical downscaling, Journal of Agricultural Meteorology, Vol.64, No.1, pp.9-23, 2008.

(2008.9.30受付)