

研究成果報告書

研 究 題 目		花崗岩流域における大量アンサンブル気候予測データを用いた土砂流出量の将来予測	実 施 年 度 2022 年度
代 表 研 究 者	所 属	広島大学 先進理工系科学研究科	
	氏 名	井上 卓也	印

1. 研究の目的・背景

近年、大型台風や線状降水帯といった高強度の降雨をもたらすイベントを原因とする極端な土砂災害が頻発化している。さらに下流へ流出した土砂が河道に堆積し、溢れた洪水流による道路や橋梁の破壊や、洪水氾濫が日本各地において毎年のように発生し、多大な人的・経済的損失を生み出し続けている。

今後も気候変動により豪雨が増加すれば、山地の斜面崩壊による土砂生産量はさらに増加するであろう¹⁾。生産された土砂の一部はダム湖に堆積し、既設水力発電設備に影響を及ぼす。奥村・角によれば、電力事業者が所有するダムの4分の1において、堆砂によって、出水時のダム湖水位の上昇、発電運用支障、環境悪化が生じている²⁾。

上記背景を踏まえ、本研究では、大量アンサンブル気候予測データ（d4PDF）³⁾を「土砂生産・土砂流出解析モデル SiMHIS」⁴⁾に投入し、気候変動による土砂生産・流出量の変化を定量的に評価する。具体的には、以下の4つの項目を実施する。

- ① 山地斜面の侵食と風化を考慮した土砂生産・流出モデルの構築
- ② 花崗岩山地流域におけるモデルの再現検証
- ③ 花崗岩山地流域における d4PDF を用いた現在の土砂生産・流出特性の把握
- ④ 花崗岩山地流域における d4PDF を用いた将来の土砂生産・流出特性の把握

上記の①～④は、一流域を対象にモデルの構築・検証・将来予測を実施する段階である。花崗岩で形成された斜面が多い流域を対象とするのは、全国各地に存在し、土砂生産量が多いためである。なお、構築したモデルを一般化（地質の異なる流域への適用）は本研究の対象外とする。

参考文献

- 1) Lane et al.: Interactions between sediment delivery..., ESPL, 2006.
- 2) 奥村・角：堆砂進行が既設水力発電設備の持続的使用に及ぼす影響と対策，2012.
- 3) Yamada et al. Using a massive high-resolution ensemble..., ASL, 2021.
- 4) 山野井ら：複合土砂災害シミュレータ SiMHIS を用いた..., 砂防学会誌，2017.

2. 研究成果及び考察（申請時の計画に対する達成度合を織込む）

2. 1 モデルの構築

(1) モデルの概要と改良点

土砂流出プログラムとして山野井ら（2017）が開発した土砂の生産・供給・輸送の統合モデル⁴⁾を用いて、降雨量、地形データ、粒度分布から流量、流出土砂量を計算する。まず、土砂生産モデルで斜面崩壊により生産される土砂量を算出する。次に土砂供給モデルでは斜面から河道に供給される土砂量を算出する。地形データから斜面の堆積可能量を計算し、斜面崩壊により生産された土砂が堆積可能量を上回った分を土砂供給量としている。最後に、土砂堆積輸送モデルで溪床において侵食と堆積を繰り返しながら河道を流れる掃流砂量と浮遊砂量を算出する。

本研究では、Inoue et al.（2002）⁵⁾と同様に、式(1)に示す河床の貯留土砂の質量保存則において発生源ごとの土砂に番号を付け、発生源別の流出土砂量を計算できるようにモデルを改良した。

$$(1-\lambda) \frac{\partial z_b}{\partial t} = \frac{1}{B_{eff}} (Q_{bt(i-1)j} - Q_{bt,ij} + Q_{bt,j-2} + Q_{s(i-1)j} - Q_{st,ij} + Q_{st,j-2}) \quad (1)$$

ここで λ は河床材料の空隙率、 z_b は河床位、 $Q_{bt,ij}$ 、 $Q_{st,ij}$ は単位河道番号 i の掃流砂量、浮遊砂量であり、 $j=1$ は溪床、 $j=2$ は斜面から発生した土砂である。なお、河床変動には交換層・遷移層・堆積層を考慮した混合粒径モデルを採用しており、 $Q_{bt,ij}$ 、 $Q_{st,ij}$ は粒径別の流砂量の総和である。単位幅掃流砂量は芦田・道上の式、無次元限界掃流力は修正 Egiazaroff の式、浮遊砂浮上量は板倉の式、沈降量は Rubey の式で算定される。

(2) 対象流域

対象流域は北海道十勝川水系ペケレベツ川の上流部とする。十勝川流域の年間降水量の平均値は全国平均の約 1,600 mm に対して約 900 mm であり、比較的降水量の少ない地域である。ただし、上流域の新得の年平均降水量は約 1,130 mm であり、流域内では上流部の降水量が多い。上流部が位置する日高山脈東部には、比較的風化しやすい花崗岩が広がっている。また、氷河期に土壌が凍結と融解を繰り返すことで形成された周氷河堆積物が斜面表層に分布し、10m 以上の土砂層の分布が確認されている。そのため、大雨が降った場合の土砂が流出しやすい地域となっている。

(3) 2016 年北海道豪雨

2016 年 8 月下旬、前線や台風による大雨で北海道東部を中心に河川の氾濫や土砂災害が発生し、甚大な被害をもたらした。対象流域は日高山脈の東部に位置するため、台風の接近により流入した暖湿気が日高山脈にぶつかったことで地形性降雨が発達し、500 mm を超える北海道で既往最大の大雨を記録した。

対象流域において北海道豪雨災害調査団（2017）が痕跡水位から等流計算を行って算出したピーク流量は 402 m³/s であり、中津川（2018）が二段型の貯留関数法により算出したピーク流

量は $250 \text{ m}^3/\text{s}$ であった⁶⁾。また、国土交通省提供資料（2017）より流出土砂量は $380,300 \text{ m}^3$ であった⁷⁾。宮崎ら（2018）はそのうち 7 割が溪床から発生したと述べている⁸⁾。

2. 2 モデルの再現検証

(1) モデルパラメータの調整方法

入力する降雨量データは 7 月 1 日から 8 月 21 日までは国土交通省の雨量観測所のうち流域に最も近い新朝日雨量観測所にて観測された降雨量を用いる。新朝日観測所は流域より下流に位置し、豪雨時に対象流域にもたらされた地形性降雨が記録されていなかった。そのため 8 月 22 日から 9 月 5 日までは日本気象協会のアメダス降雨分布から流域内の降雨を切り取ったものを用いる。

粒度分布データは宮崎ら（2018）が 2016 年豪雨後に行った粒径調査の結果を用いる。宮崎らは土砂発生源の粒度調査のため、豪雨時に侵食されずに残った段丘と斜面から生産された土砂の堆積物である崖錐堆積物の調査を行っている⁸⁾。今回は溪床の粒度分布データとして段丘の調査結果を、斜面の粒度分布データとして崖錐の調査結果を使用した。

上記の入力データを SiMHiS に与え、北海道豪雨で観測された流量 $250 \text{ m}^3/\text{s}$ 、流出土砂量 $380,300 \text{ m}^3$ 、その内の 7 割が溪床から発生という観測結果を再現できるように、モデルパラメータを調整した。

(2) 透水係数

斜面から河道へ流出する流量は Kinematic wave モデルにより算出され、透水係数を大きくするとピーク流量は小さくなる。D₂₀ から透水係数を推定した Creager の表を参考に、ピーク流量 $397 \text{ m}^3/\text{s}$ を示した透水係数 $k = 0.0001(\text{m/s})$ を採用した。

(3) レジーム則の係数

河道部における水の流れと土砂移動量を計算する際に用いた単位河道 i の河道幅 $B_{cf,i}$ はレジーム則（山野井，2017）を用いて、式(2)から計算される。

$$B_{cf,i} = \alpha \sqrt{Q_0 \times \frac{A_i}{A_0}} \quad (2)$$

ここで Q_0 は流域の下端で河道が全幅で流れているときの流量、 A_i は単位河道 i の下流端の集水面積、 A_0 は流域下流端の集水面積を表す。

係数 α を大きくすると川幅が大きくなるため掃流力が低下し、流出土砂量も小さくなる。なお、流出土砂量は流域下流端を流れる掃流砂量と浮遊砂量の合計である。流出土砂量の観測値 $380,300 \text{ m}^3$ を参考に、 $387,381 \text{ m}^3$ を示したときの係数 $\alpha = 5$ を採用した。

(4) 斜面崩壊発生指標の補正係数

斜面崩壊が発生する際の土中水分量は降雨によらず一定であるという特性がある。山野井らのモデルでは土層内の水分量 W_t を式(3)により時々刻々と計算している。このときの斜面要素下流端から流出する単位幅流量 q_{st} は以下の式(4)のダルシー則により表される。土層内水分量 W_t が式(5)で計算される限界土中水分量 W_{cr} を超えたときに斜面崩壊が発生することを、式(6)に示す斜面崩壊発生確率指標 R_{st} を用いて表している。

$$\frac{dW_t}{dt} = \begin{cases} LI_t - q_{st} & (W_t < \lambda V) \\ -q_{st} & (W_t \geq \lambda V) \end{cases} \quad (3)$$

$$q_{st} = \frac{W_t}{\lambda L} \cdot k \cdot \sin \alpha \quad (4)$$

$$W_{cr} = (c_1 + c_2 \cdot L + c_3 \cdot \alpha + c_4 \cdot I_{60}) \cdot V \quad (5)$$

$$R_{st} = \frac{W_t}{\gamma W_{cr}} \quad (6)$$

ここで、 L は斜面長、 I_t は雨量強度、 λ は斜面の空隙率、 V は単位幅あたりの斜面土壌の体積、 α は斜面勾配、 I_{60} は60分間雨量、 $c_1 \sim c_4$ は斜面長により定められている係数である。 $c_1 \sim c_4$ は宇治川支川の志津川流域を対象に経験的に得られた値であり、斜面崩壊発生指標の補正係数 γ は地質などの違いによる差を補正するものである。補正係数を大きくすると斜面崩壊が起きにくくなるため、溪床から発生した土砂の割合が増加する。溪床から発生した土砂の割合を観測値と比較すると、補正係数 γ が0.915のとき、流出土砂量が溪床から発生した土砂の割合が0.67であり、観測値0.7と近かったため補正係数 γ を0.915とした。

以上のようにパラメータを調整することでピーク流量397 m³/s、流出土砂量387,381 m³、溪床生産源割合67%となり、2016年の豪雨時の観測値を概ね再現できた。

2.3 d4PDFを用いた現在および将来の土砂生産・流出特性の把握

(1) 入力する気候変動データ

大量アンサンブル気候予測データであるd4PDFを5kmにダウンスケーリング³⁾した現在気候と将来気候それぞれ約600年分の降雨量を入力し、気候変動による流出土砂量の変化の分析を試みる。データ数が大量にあるd4PDFを用いるのは、発生頻度の低い極端現象を統計的に評価するためである。また、5kmにダウンスケーリングしたデータを用いるのは、地形性降雨や短時間の極端降雨を考慮するためである。

(2) 現在および将来の土砂生産・流出予測結果

現在気候と将来気候(4度上昇シナリオ)におけるd4PDF降雨量と計算結果の流出土砂量の確率水文量を求めた(図-1)。なお流出土砂量の確率分布にフィットする分布モデルがなかったため、式(7)に示すノンパラメトリックな式を用いて確率年を計算した。青が現在気候、オレンジが将来気候を表している。気候変動により降雨量は確率年10年で1.4倍、確率年50年で1.6倍増加するのに対し、流出土砂量は確率年10年で5.5倍、確率年50年で3.0倍増加しており、

気候変動による流出土砂量の増加率は降雨量と比べて、大きくなった。

$$P = \frac{N + 0.6 - i}{N + 0.2} \quad (7)$$

ここで、 P は非超過確率、 N はサンプル数、 i はサンプルを大きい順に並べたときの順位である。

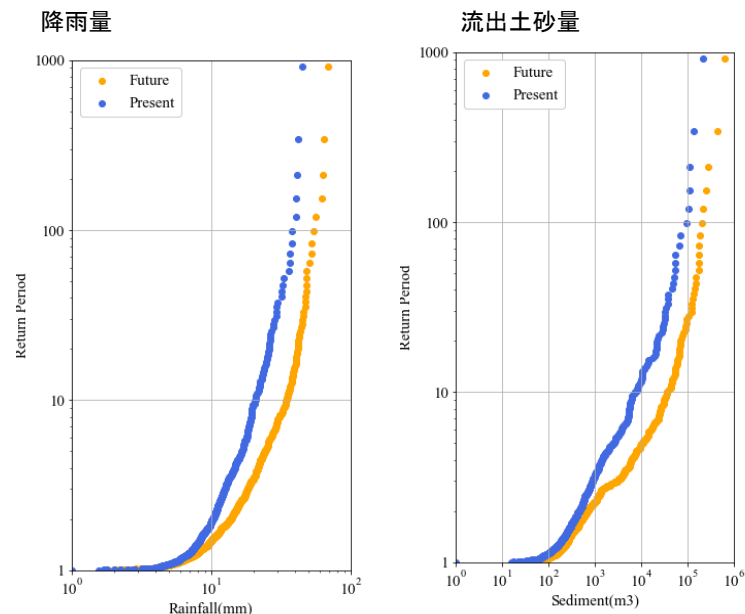


図-1 現在気候と将来気候における降雨量，流出土砂量の非超過確率

(3) 斜面崩壊の影響

図-2に流出した土砂のうち斜面から生産された土砂の割合 $P(\text{slope})$ （緑の線）とその年の最後の交換層の平均粒径 F_m （紫の線）の変化を示す。斜面から生産された土砂の割合は現在気候では37%であったが、将来気候では48%に増加している。図-7を見ると、 $P(\text{slope})$ が大きいと F_m が小さくなり、 $P(\text{slope})$ が小さいと F_m が大きくなっており、平均粒径は現在気候では平均が182mmであったのが将来気候では176mmに減少していた。このように、斜面崩壊が増加すると交換層の平均粒径が小さくなると言える。土砂の粒径が小さい方が土砂を動かすのに必要な限界掃流力が小さくなる。また、平均粒径が小さくなると土砂同士の摩擦角が小さくなることによっても、限界掃流力が小さくなる。このように、斜面崩壊が増えると交換層の平均粒径が小さくなり、次の年に土砂が動きやすくなる。これが、降雨量の増加率に比べて、流出土砂量の増加率が大きい要因ではないかと考えられる。

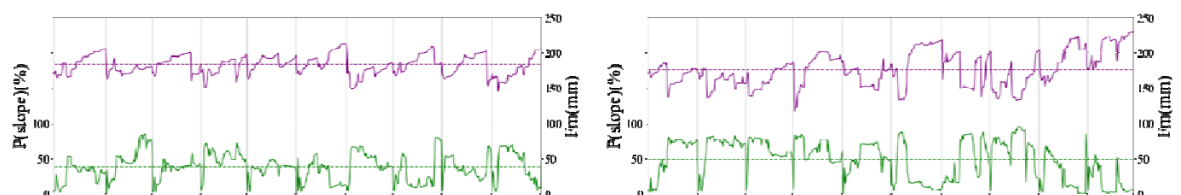


図-2 斜面から生産された土砂の割合とその年の最後の交換層の平均粒径(右:現在気候, 左:将来気候)

2. 4 まとめ（達成度）

本研究では、花崗岩地質で構成される北海道ペケレベツ川流域を対象に、土砂生産・流出に関する①モデルの構築、②豪雨時の土砂流出量の再現検証、③現在および④将来の土砂生産・流出特性の分析を実施した。研究目的とする①～④は達成されており、達成度は高いと考える。

分析の結果、気候変動によりペケレベツ川流域の降雨量は確率年10年で1.4倍、確率年50年で1.6倍増加するのに対し、流出土砂量は確率年10年で5.5倍、確率年50年で3.0倍増加しており、気候変動による流出土砂量の増加率は降雨量と比べて、大きいことが確認された。

【参考文献】

- 5) Inoue et al.: Supplied Sediment Tracking for Bridge Collapse..., Water, 2002.
- 6) 中津川誠: 2016 年 8 月の豪雨災害をもたらした気象..., 室蘭工業大学紀要, 2018.
- 7) 国土交通省北海道開発局・北海道: 第 2 回十勝川流域砂防技術検討会配付資料, 2017.
- 8) 宮崎ら: 周氷河性斜面の崩壊・侵食に起因する..., 砂防学会誌, 2018.

3. 経費の使用状況（申請時の計画に対する実績を記述）

【旅費】 調査のための北海道への旅費，発表ためのつくばへの旅費に使用した．

【消耗品費】 記録媒体（HDD，USB）と調査時に使う WiFi ルータの購入に使用した．

【人件費】 本研究の計算補助を学生に実施してもらった．

【資料印刷費】 つくばで開催された国際学会 ICFM9 への参加費およびポスター印刷費に使用した．

4. 将来展望（今後の発展性、実用化の見込み等について記述）

研究の最終的な目標は，d4PDF の気候予測データを用いて，日本全国の山地における土砂生産量・流出量の変化を明らかにすることである．そのために以下のステップが必要となる．

- ① 山地斜面の乾湿風化を考慮した土砂生産・流出モデルの構築
- ② 花崗岩山地流域におけるモデルの再現検証
- ③ 花崗岩山地流域における d4PDF を用いた現在の土砂生産・流出特性の把握
- ④ 花崗岩山地流域における d4PDF を用いた将来の土砂生産・流出特性の把握、
- ⑤ 花崗岩以外の流域を扱う場合のモデルパラメータの調整方法の検討
- ⑥ 全国の山地流域における土砂生産・流出特性の将来変化の把握

上記の①～④は，一流域を対象にモデルの構築・検証・将来予測を実施する段階である．本研究によってこの段階は達成された．今後は⑤⑥を進めていく予定である．⑤は①～④で構築したモデルを他の流域へと適用するための研究である．様々な地質へのモデルの適用性を確認するため作業量が多い．⑥が最終目標である．

5. 成果の発表（学会での発表、学術誌への投稿等を記載。予定を含む）

【学術論文・査読在あり】

1. 木戸理歩, 井上卓也, 鳩野美佐子, 山野井一輝: アンサンブル気候変動予測を用いた流出土砂量への影響評価, 土木学会論文集B1(水工学) Vol.78, No.2, 2022.
2. 井上卓也, サムナー圭希, 平松裕基, 山口里実: 縦断的・時間的に河道の勾配が変化する場における流路変動の影響, 土木学会論文集B1(水工学) Vol.78, No.2, 2022.
3. Sumner, T., Mishra, J., Inoue, T., & Shimizu, Y.: Numerical study of the interaction between wet-dry weathering and bedload induced abrasion. Water Resources Research, 58, e2021WR030952, 2022.

【国際学会発表】

1. Riho Kido, Takuya Inoue, Misako Hatono, Kazuki Yamanoi: Impact Assessment of Climate Change on Sediment Discharge using d4PDF, The 9th International Conference on Flood Management, Tukuba, Japan, February 2023.

【学術論文・査読中】

1. Riho Kido, Takuya Inoue, Misako Hatono, Kazuki Yamanoi: Climate change impact on sediment discharge using a large ensemble rainfall dataset, Progress in Earth and Planetary Science.
2. Shigekazu Masuya, Takuya Inoue, Toshiki Iwasaki, Riho Kido, Kohei Ogawa, Yasuyuki Shimizu: Assessment of risks associated with the river meandering under climate change using physics-based free-meandering model, Environmental Fluid Mechanics.