

### 3. SWATモデルによる2018年北海道胆振東部地震が厚真川流域の土砂輸送に及ぼす影響に関する研究

Yuechao Chen<sup>1</sup>・中津川 誠<sup>2</sup>・大橋 弘紀<sup>3</sup>

Yuechao CHEN, Makoto NAKATSUGAWA and Hiroki OHASHI

<sup>1</sup> 室蘭工業大学大学院工学研究科 博士後期課程

<sup>2</sup> 室蘭工業大学大学院工学研究科 教授

<sup>3</sup> 応用地質株式会社 上級専門職

#### 要 旨

地震によって引き起こされる斜面崩壊，地すべり，土石流がもたらす災害は河川流域の安全・安定の脅威となる．日本では地震が多発するため，河川流域での土砂輸送に及ぼす地震の影響の研究は不可欠である．

本研究では2018年北海道胆振東部地震前後での厚真川流域での流出・土砂生産および輸送の過程を検証するために，土壌及び水アセスメントツールSWAT (Soil and Water Assessment Tool) モデルを用いたシミュレーションを行なった．また，流出計算のモデルパラメータはSWAT-CUP (Soil and Water Assessment Tool Calibration and Uncertainty Program) を用いた感度分析と調整により，土砂流出計算のモデルパラメータは試行錯誤によって最適値が設定された．

研究結果はSWATモデルが厚真川流域での流出過程を的確にシミュレーションできることを示し，Nash-Sutcliffe効率係数 (Nash-Sutcliffe efficiency coefficient: NSE) は較正期間において0.61，検証期間にあつては0.74という精度を確認した．また，地震後の土砂生産が大幅に増加する傾向を確認し，大まかな概算では単位降水量当たりの土砂生産量は，地震以前の3.5トン/mm/年から地震後には6.2トン/mm/年にへと加すると推算した．

《キーワード：SWAT；SWAT-CUP；流出；土砂生産；土砂輸送；厚真川流域；2018年北海道胆振東部地震》

### 3. 1. はじめに

地球規模の気候変動が自然災害を頻発させている<sup>1),2),3)</sup>。そのため、人類が災害に適応して対処することが重要である<sup>4)</sup>。一方、地震も大きな自然災害の誘因である。2017年から2019年には、全世界で震度6以上の地震は全332回起きており、その中でもとりわけ震度7以上の地震は34回、震度8以上の地震は2回起きている<sup>5)</sup>。地震及び関連する二次災害は長期にわたって人類に被害をもたらす<sup>6),7)</sup>。地震後の河川流域での侵食の過程と仕組みは複雑であり、重力侵食は一般にランダムに発生し、流体侵食が加わる。これらは流出、土砂生産及び土砂輸送に重大な影響を及ぼすが、そのプロセスやメカニズムの解明は土石流、土壌侵食、河川での土砂輸送の研究領域で大きな課題となっている<sup>8)</sup>。

地震が河川流域での土砂輸送に与える影響に対する理解を深めるため、水文モデルの活用が検討されている。シミュレーション技術が発展し、河川流域での自然現象への理解が進むにつれ、水文モデルは流域水循環の調査研究や流域管理の強力なツールとなっている。分布型水文モデルによって、河川流域の多様な水文過程を適切にシミュレーションすることが可能となり、課題解決の重要なツールになっている<sup>9),10),11)</sup>。20世紀末には、急速な発展をみせる計算機の機能、地理情報システム (Geographic Information System: GIS)、リモートセンシング (Remote Sensing: RS) といった革新的テクノロジーによって、分布型水文モデルは重要な位置を占めており、土壌及び水アセスメントツール (SWAT) モデルは、それに相まって発展した<sup>12)</sup>。現在、SWATモデルは世界的に最も広く用いられている分布型水文モデルの一つである。SWATモデルは世界の様々な空間スケールをもつ流域で検証されており、水資源マネジメント<sup>13)</sup>、降雨の流出解析<sup>14),15),16)</sup>、流域の土砂輸送過程研究<sup>17),18)</sup>などに用いられている<sup>19)</sup>。

2018年北海道胆振東部地震については、発災後調査研究が進められており、その焦点は地震によって引き起こされた自然斜面の変状把握、厚真川流域の火砕流堆積物の物理的な特徴、地震による崩壊過程、地震の社会影響などといった問題にあてられている<sup>20),21),22),23),24),25)</sup>。しかし、2018年北海道胆振東部地震前後の厚真川流域全体の土砂輸送過程の変化に関する調査研究は十分になされておらず、本研究ではそのような課題に取り組んだものである。

2018年北海道胆振東部地震の後、大規模な斜面崩壊が厚真川流域で発生し、そのため大量の土砂が斜面・水系沿いに堆積・流出し、河川環境や海域環境に大きな影響を与えると推測される。本研究ではSWATモデルを用いて地震が厚真川流域における土砂輸送へ与える影響を推算した。内容は以下の3項目の構成となる。まずは、(1) 流域上流部にある貯水池の影響を考慮した上で、SWATモデルによる流出シミュレーションの精度を向上させることである。我々はモデルを準備 (warm-up) 期間・較正 (calibration) 期間・検証 (validation) 期間に区分して適用した。次に、(2) 観測されている濁度と懸濁物濃度 (SS) との関係に基づき、計算されるSSの妥当性を検証することである。さらに、(3) 先行研究、現地調査、濁度と土砂輸送の相関関係を基に、土砂輸送に係るモデルパラメータを補正し、土砂輸送の変化を推算することを目的とした。

## 3. 2. 方法

### 3. 2. 1. 対象流域

対象流域は北海道南部の厚真川流域である。流域面積は382.9 km<sup>2</sup>、主河道長は52.3 kmであり、標高は海拔0~600 mに分布している、厚真川流域には、厚真ダム (1970年操業開始。集水面積52 km<sup>2</sup>。有効貯水容量9.5 × 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>) と厚幌ダム (2017年操業開始。集水面積105.3 km<sup>2</sup>。有効貯水容量4.3 × 10<sup>7</sup> m<sup>3</sup>) の2つの貯水池がある。厚幌ダムの集水域は厚真川流域のおよそ3分の1を占めており、流域全体の流出や土砂輸送に及ぼす影響が大きいと推察される。流域の地質構成は新第三紀堆積岩である川端 (かわばた) 層、振老 (ふれおい) 層 (砂岩泥岩互層・砂岩・礫岩)、軽舞 (かるまい) 層 (主に珪藻質シルト岩・砂岩・礫岩)、萌別 (もえべつ) 層 (珪藻質シルト岩) が基盤を形成し、第四紀の段丘堆積物、沖積層、

クッタラ火山，支笏火山及び樽前火山などから噴出した降下火砕物（テフラ）等がそれらを覆って堆積している<sup>21)</sup>。この地域は日高山脈から夕張山地にかけての圧力軸に直交する北北西-南南東走向の背斜・向斜構造が発達している<sup>21)</sup>。また，厚真川が流れ込む太平洋岸にはシシヤモ，ホッキ貝といった付加価値の高い水産資源が存在する。図-1に厚真川の流域図を示す。

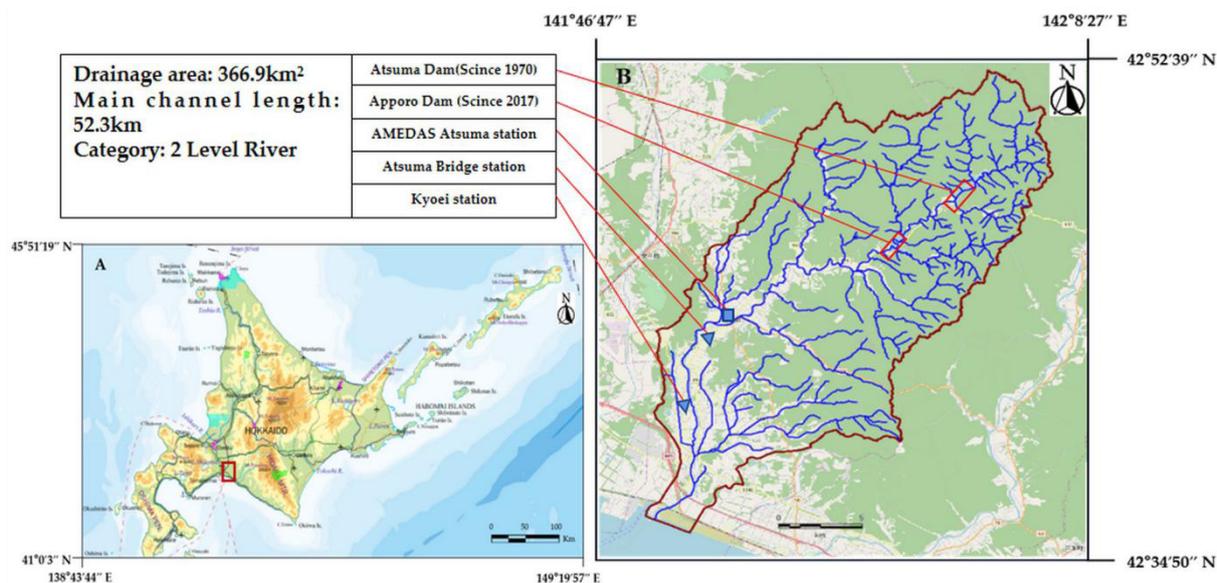


図-1 厚真川流域地図Map of Aduma River basin ((A) GSI: 国土地理院 (2020)<sup>26)</sup>; (B) Open Street Map Japan (2020)<sup>27)</sup>).

2018年9月6日，北海道厚真町で震度7を観測する地震が発生した。震源地は北緯42.7°東経142°で深さは37.0 kmであった<sup>22)</sup>。揺れは北海道のほぼ全域で感じられ，北海道で震度7以上の地震が記録されたのは初めてであった。震源地周辺の基盤地質は新第三紀の振老層の中新世中・後期の礫岩・砂岩・泥岩と軽舞層の中新世後期の砂岩・硬頁岩・泥岩，萌別層の中新世後期から鮮新世初期のシルト岩から成る<sup>28)</sup>。この際，最大7 cmの隆起が主に震源域に分布しており，この領域の東側では，最大4 cmの東方への移動が広く観察されている。断層は南北方向に延び，東に対し傾斜角74°であり，断層の先端はおおよそ15kmの深さに及ぶ。2018年9月6日03:00と2018年9月7日23:59の間に459回の地震が起き，余震域はおおよそ南北25 km<sup>2</sup>に及び，その震源の95%は深さ20~40 kmに分布していた<sup>29)</sup>。2018年の北海道胆振東部地震と厚真川流域内の大規模な地滑りの後，自然条件下での安全率はすべて大きく，降雨なしで斜面が滑ることはないことを示しています<sup>30)</sup>。

2018年北海道胆振東部地震は多数の浅い崩壊を起こし，複数の大規模かつ深い崩壊は中新世の頁岩・泥岩など基礎地盤構造にまで及び，これらは標高200~400 mにわたる400 km<sup>2</sup>の丘陵地帯で起きた。その面積は総計11.8 km<sup>2</sup>，うち厚真川流域のものは9.6 km<sup>2</sup>で，地すべりの総容積は3千万m<sup>3</sup>に及んだ<sup>21)</sup>。

図-2に2018年北海道胆振東部地震による斜面崩壊の画像を例示する。おおよそ4,500個所の斜面崩壊が地震後に発生し，大量の土砂や流木となって流域内に流下堆積した。図-3には地震により起きた斜面崩壊の分布図，また流域の勾配分布を図-4に示す。

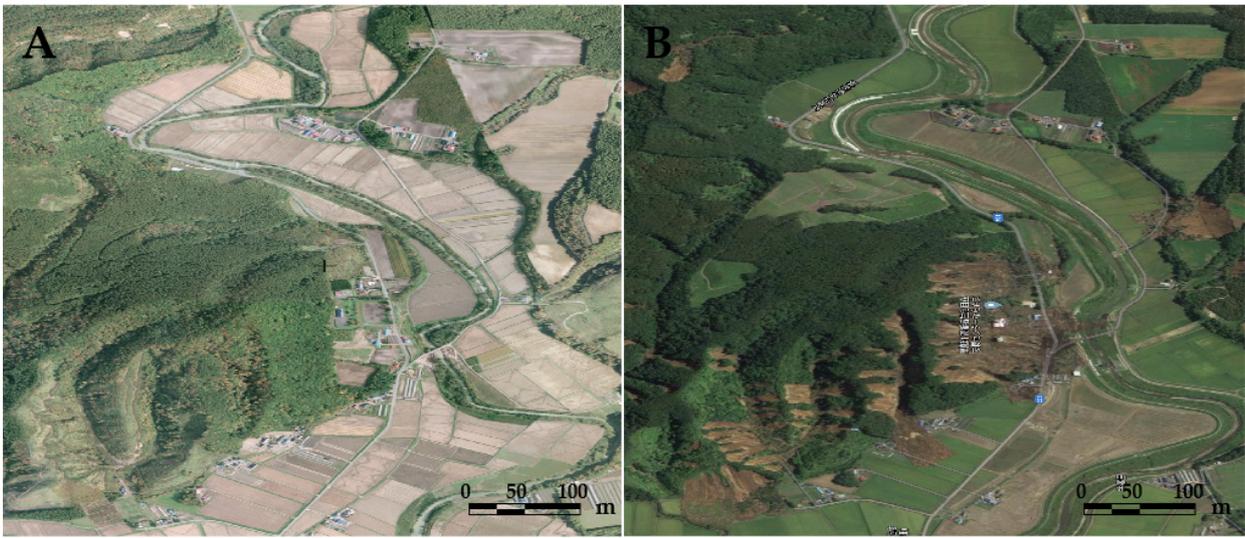


図-2 2018年北海道胆振東部地震で発生した斜面崩壊 ((A) 国土地理院 (2017)<sup>26)</sup>; (B) Google Earth (2020)<sup>31)</sup>.

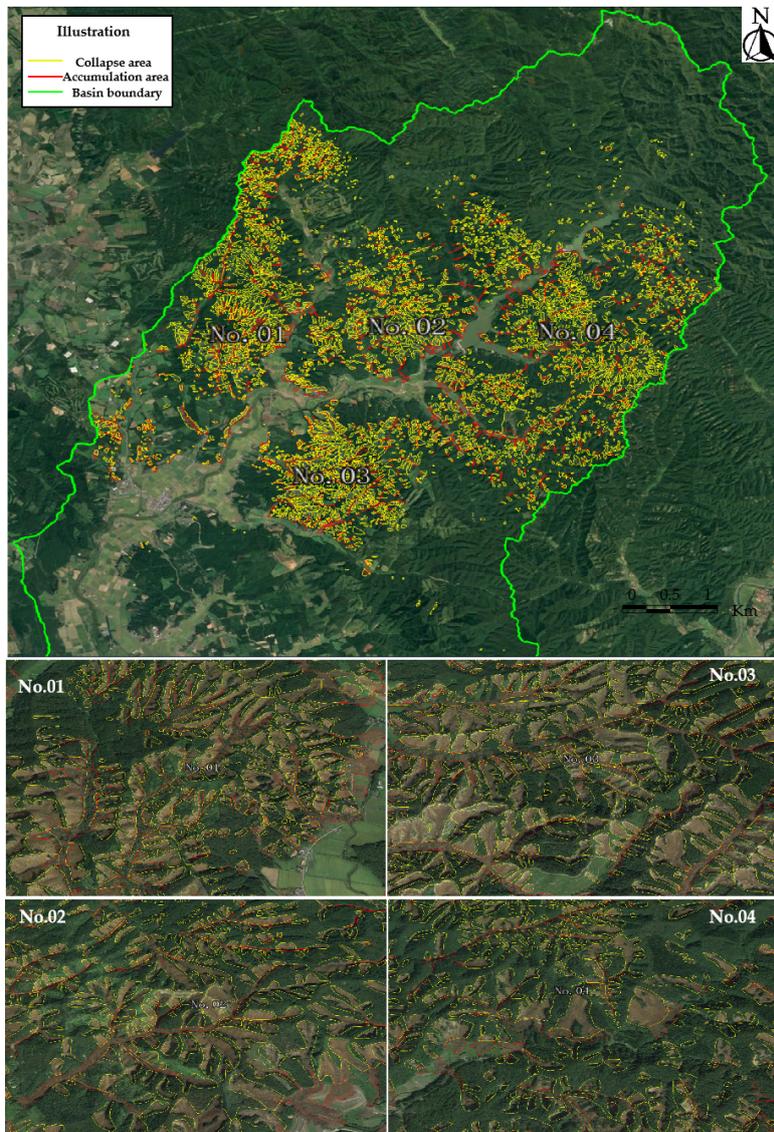


図-3 2018年北海道胆振東部地震で発生した厚真川流域の斜面崩壊の分布図<sup>31)</sup>.

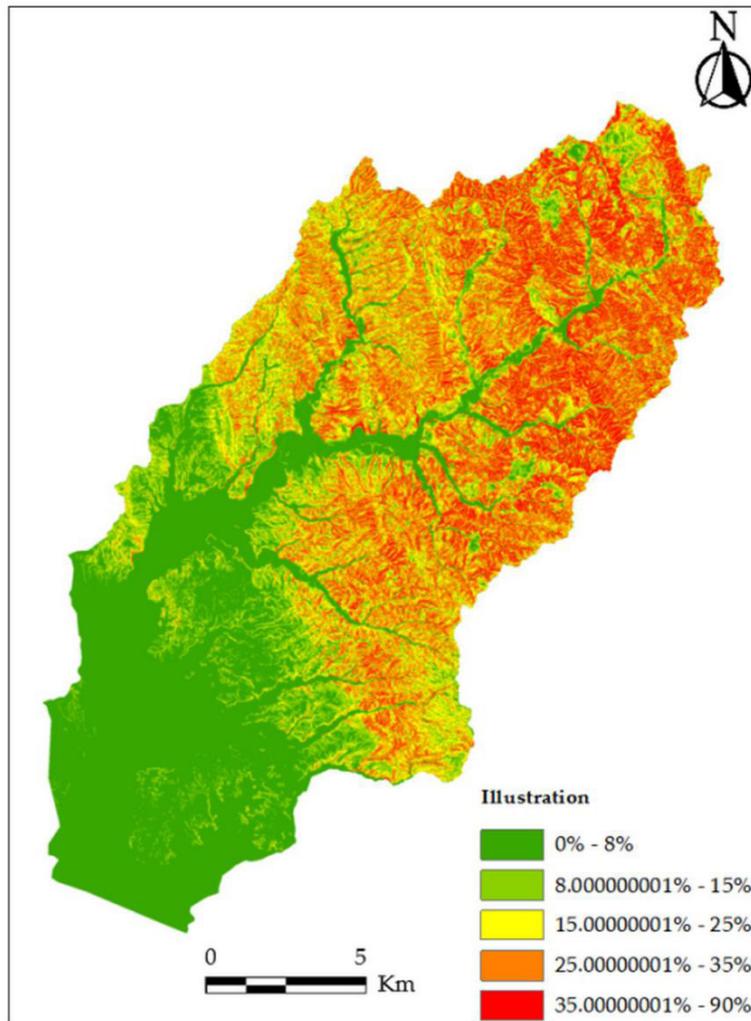


図-4 厚真川流域の勾配分布図.

### 3. 2. 2. SWATモデル

米国農務省農業研究局（US Department of Agriculture-Agricultural Research Service: USDA-ARS）によって開発された土壌及び水アセスメントツール（Soil and Water Assessment Tool: SWAT）は、現在世界で最も広く用いられている水文モデルの一つである。SWATモデルは河川流域を扱うモデルであり、土地利用の改変による長期にわたる流出や土砂、農業由来物質の水質への影響を予測するために開発された。

#### 3. 2. 2. 1. SWATモデルの基礎式

SWATモデルは気象・水文、土壌・土地利用、懸濁物・栄養塩を定量化し、水循環、土砂流出、栄養塩循環・水質成分流出の推算、それらの管理方法などが評価できる。河川流域は複数のサブ流域に分割され、そこから各サブ流域を同様な土地利用・土壌条件・地形・営農形態等によって水文応答ユニット（Hydrological Response Units: HRU）に分割する。各HRUにあつては、目的とする数値が別々に計算されて、その総量が最終的に合算される。サブ流域及び各HRUに分割することによって、研究者は流域の水循環や懸濁物や栄養塩といった物質循環の空間特性を分析できる。さらに水収支や物質収支の検証も可能である。SWATモデルで用いる基礎式は以下の通りである。

$$SW_t = SW_o + t \sum_{i=1} (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

ここで、 $SW_t$ は最終土壌内水分量 (mm)、 $SW_o$ は土壌内水分量 (mm)、 $t$ は日数で示される時間で、 $R_{day}$ は降水量 (mm)、 $Q_{surf}$ は表層流出量 (mm)、 $E_a$ は蒸発散量 (mm)、 $W_{seep}$ は土壌への浸透量 (mm)、 $Q_{gw}$ は復帰水量 (リターンフロー) (mm) である。

SWATモデルでは修正ユニバーサル土壌損失方程式 (Modified Universal Soil Loss Equation: MUSLE) を用いて侵食と土砂輸送のモデル化を行う。MUSLEでは流出量を用いて侵食を定量化し、土砂生産量を算定する。推定式は (2) の通りである。

$$Sed = 11.8 \times (Q_{surf} \times q_{peak} \times area_{hru})^{0.56} \times K \times C \times P \times LS \times CFRG \quad (2)$$

ここで、 $Sed$ は1HRU当たりの土砂生産量 (ton/日)、 $Q_{surf}$ は表層流出量 ( $mm/10^3 \cdot m^2$ )、 $q_{peak}$ がピーク流出量 ( $m^3/s$ )、 $area_{hru}$ はHRUの面積であり、( $10^3 \cdot m^2$ )、 $K$ は汎用土壌損失式 (Universal Soil Loss Equation: USLE) の土壌侵食係数 (無次元)、 $C$ はUSLEの被覆状態係数 (無次元)、 $P$ はUSLEの地表形状係数 (無次元)、 $LS$ はUSLEの地形補正係数 (無次元)、 $CFRG$ は地表形態係数 (無次元) である。

### 3. 2. 2. SWATモデルの入力データ

SWATモデルで入力するデータは、数値標高モデル (DEM)、土地使用データ、土壌データ、気候データである。これらを表-1に示す。すべての地理データは、地理座標系 (WGS84) からメートル座標系 (JGD2000//Japan Plane Rectangular CS II) に投影しなおす必要がある。SWATは地理情報システム (GIS) インターフェイスの拡張版として適用できる流域モデリングパッケージであり、SWAT2009バージョンのQGISインターフェイスによって流域を離散化し、SWATモデルの入力ファイルを抽出する。

DEMは集水域を抽出し、地形のパラメータを決めるために用いられる。厚真川流域の集水域は65のサブ流域に、国土地理院の10 mメッシュの数値標高モデルを用いて抽出され、離散された。また、2014年の国土交通省土地利用メッシュデータを用い、植生の判別やそれに係るパラメータ設定を行い、モデルに入力した。さらに、1/200,000国土交通省土地分類基本調査の土壌分類データを使用している。以上の土地利用データ及び土壌データを集約して225区分に及ぶHRUを導出した。厚真川流域のDEMによる標高分布、土地利用、土壌分類を図-5に示す。

表-1 厚真川流域のSWATモデル入力データ.

データタイプ	名称	精度	データソース
地形図	数値標高モデル (DEM)	10m	国土地理院
土地利用図	土地利用分類	100m	国土交通省
土壌図	土壌分類	1/200,000	国土交通省
気候	降水量	450地点	気象業務支援センター
	最高・最低気温	アメダス/厚真観測点	
	風速		
	日照	官署/札幌観測点	
	相対湿度	アメダス/苫小牧観測点	

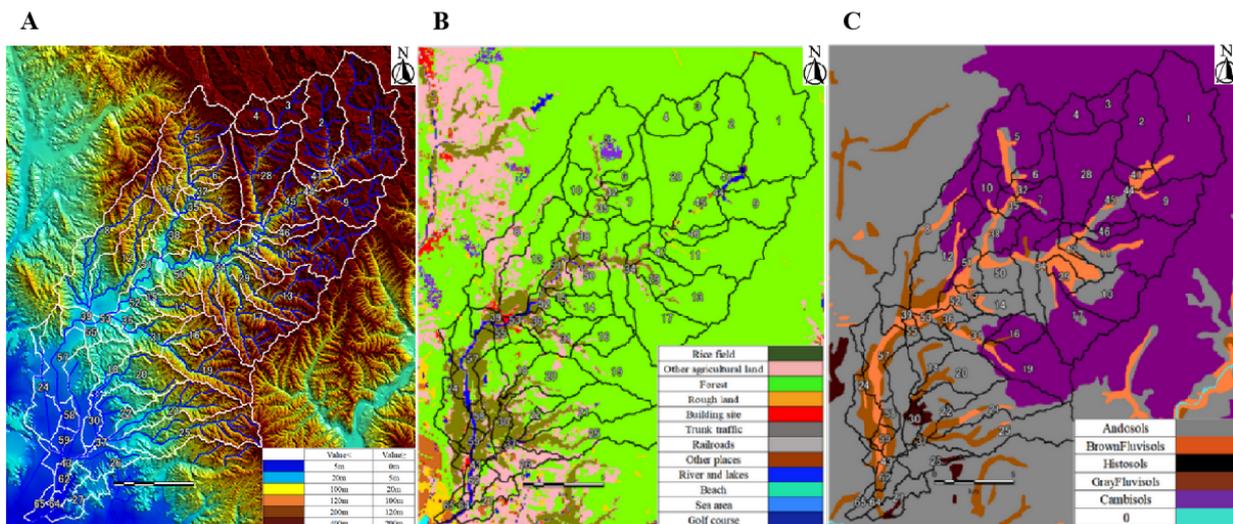


図-5 厚真川流域の標高 (A), 土地利用 (B), 土壌分類 (C)

次に流出量を推算するため、厚真川流域の450のレーダー観測点での日降水量データを利用する。また、積雪量や融雪量を推算するため、アメダス/厚真観測点での最高・最低気温データ、平均風速データ、アメダス/苫小牧観測点での相対湿度データ、気象官署/札幌観測点での日照データも併用する。

厚真川における土砂輸送量ないし懸濁物 (SS) の観測は行われていない。そこで、間接的ではあるが濁度の観測値と比較して計算される懸濁物 (SS) に類似性があるかどうかで土砂輸送量の推定の妥当性を確認することとした。濁度は、2018年4月14日から2019年12月までの共栄観測点での観測データに基づいている。ただし、その間にデータを取得できなかった期間が4回あった。一方、厚真橋観測点では2015年から2019年にわたって観測が行われたが、2017年7月20日から2017年9月30日に欠測期間があった。厚真ダムの流出データは2015年1月1日から2018年9月5日にかけてのものだが、2017年以降一時期のデータが欠落していた。厚幌ダムの流出入量データは2018年8月10日から2018年11月10日までと2019年3月20日から2019年6月25日までのものであった。

### 3. 2. 2. 3. SWATモデルのパラメータ

SWATモデルには対象流域の標高データ、土地利用データ、土壌分類データに従ってデフォルトのパラメータを生成する機能がある。また、各パラメータを過去の水文データおよびSWAT-CUPを用いて補正することができる。本研究ではSWAT-CUPを用いて、流出パラメータの感度分析を行い、それに従って各パラメータを調整した。まずは、SWAT-CUPのグローバル感度分析機能を使用し、最も感度の高い流出パラメータを特定するために感度分析が行われた。流出量の再現に感度の高いパラメータは、積雪温度遅延係数 (TIMP)、カーブナンバー (CN2)、12月21日時点の融雪係数 (SMFMN)、6月21日時点の融雪係数 (SMFMX)、気温減率 (TLAPS)、可能保水量 (SOL\_AWC)、融雪基底温度 (SMTMP)、本支川の実効透水係数 (CH\_K2, CH\_K1)、最小積雪含水率 (SNOCVMX)、本支川のマニング粗度係数 (n) 値 (CH\_N2, CH\_N1)、蒸発補正係数 (ESCO)、降水減率 (PLAPS)、降雪温度 (SFTMP) であった。次に、感度の高い流出パラメータがシークエンシャル不確実性対応 (SUFI-2) アルゴリズムを用いて自動的に調整されて得られる。SWATモデルを用いて11年間にわたる計算が行われ、計算の準備 (warm-up) 期間を2009年から2014年、較正 (calibration) 期間を2015年から2017年とし、SWAT-CUPを用いて流出パラメータを最適化する。それらのパラメータを用いて、検証 (validation) 期間にあたる2018年から2019年の流出量を再現する。

一方、土砂輸送に関するモデルパラメータは、観測データがないため、SWAT-CUPを用いた感度分

析及び調整を行うことができない。過去の先行研究，現地調査，観測されている濁度との比較などによって試行錯誤的に何回かのシミュレーションを試み，それらは設定された。

表-2に厚真川流域に適用した各パラメータの一覧を示す。

表-2 厚真川流域で感度の高いSWATモデルのパラメータ。

変数	パラメータ名	感度順	内容	デフォルト値	修正値
流出	v_TIMP.bsn*	1	積雪温度遅延係数	1	0.22
	r_CN2.mgt***	2	湿度条件Ⅱでの当初のSCS流出カーブナンバー	73	60
	v_SMFMN.bsn**	3	12月21日時点の融雪係数 (mm H <sub>2</sub> O/°C-day)	4.5	3.17
	v_SMFMX.bsn	4	6月21日時点の融雪係数 (mm H <sub>2</sub> O/°C-day)	4.5	10
	v_TLAPS.sub	5	気温減率 (°C/km)	0	-6
	v_SOL_AWC.sol	6	土壌層の可能保水量 (mm H <sub>2</sub> O/mm)	0.143	0.0003
	v_SMTMP.bsn	7	融雪基底温度 (°C)	0.5	-0.83
	v_CH_K2.rte	8	本川の実効透水係数 (mm/h)	0	4.58
	v_CH_K1.sub	9	支川の実効透水係数 (mm/h)	0	19.65
	v_SNOCOVMX.bsn	10	最小積雪含水率 (mm H <sub>2</sub> O)	1	0.05
	v_CH_N2.rte	11	本川のマニング粗度係数 (n) 値	0.014	0.07
	v_CH_N1.sub	12	支川のマニング粗度係数 (n) 値	0.014	0.12
	v_ESCO.bsn	13	蒸発補正係数	0.95	0.85
	v_PLAPS.bsn	14	降水減率 (mm H <sub>2</sub> O/km)	0	200
	v_SFTMP.bsn	15	降雪温度 (°C)	1	-2.93
変数	パラメータ名		内容	地震前	地震後
土砂 輸送	v_CH_COV.rte		河道被覆係数	0	0.8
	v_SPCON.bsn		水系堆積経路の線形再エントレインメント (linear re-entrained) パラメータ	0.0001	0.01
	v_SPEXP.bsn		水系堆積経路の線形再エントレインメント (linear re-entrained) パラメータ指数	1	1.5
	v_CH_EROD.rte		河道侵食係数	0	0.5
	v_USLE_K.sol		USLE土壌侵食係数	0.265	0.65

\*拡張子(例. mgt)は，パラメータが生じているSWATのファイルを指す。

\*\*修飾子(v)は所定の範囲からの値によるパラメータの大体を指す。

\*\*\*修飾子(r)はパラメータの当該の変化を指すにおける変化を指し，この値はSWATデータベースからの値に1+所定の範囲のファクターをかけたものである。

### 3. 2. 2. 4. 計算結果の評価

本研究ではSWATモデルの再現性に関して3つの評価手法を採用した。決定係数 $R^2$ <sup>32)</sup>，Nash-Sutcliffe efficiency (NSE)<sup>33)</sup>，パーセントバイアス (PBIAS)<sup>34)</sup>である。 $R^2$ ，NSE，PBIASは下式 (3)，(4)，(5) のように表される。

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^T (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^T (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^T (S_i - \bar{S})^2}} \quad (3)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^T (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^T (O_i - \bar{O})^2} \quad (4)$$

$$PBIAS = \left[ \frac{\sum_{i=1}^T (O_i - S_i)}{\sum_{i=1}^T O_i} \right] \quad (5)$$

ここで、 $T$ は計算時（日数）、 $O_i$ は時点*i*における観測値、 $S_i$ は時点*i*における計算値、 $\bar{O}$ は観測値の平均、 $\bar{S}$ は計算値の平均である。本研究では、先行研究の知見に基づき、 $NSE > 0.6$ 、 $R^2 > 0.7$ および $PBIAS = \pm 25\%$ を満たす場合は、再現性がよいものと判断した<sup>31),32)</sup>。

### 3.3. 結果

#### 3.3.1. 流出量の推定結果

本研究で流出量の再現において感度の高いパラメータは表-2に示す15個のパラメータであった。これらはデフォルト値からSWAT-CUPを用いて調整され、観測結果との整合が図られた。地震後のシミュレーション結果は地震前よりも良好であった。とくに、透水性を表すCH\_K1およびCH\_K2の感度が高く、このようなパラメータへの影響は、地震後に透水性が増大し、帯水層への涵養と流出の増加が反映された結果と推測される。加えて、地震により生産された土砂が河道に堆積し、一時的に降雨や流水を貯留していた可能性が推測される。

流出量の再現結果を図-6、評価指標を表-3に示す。較正期間において、 $R^2$ が0.69、NSEが0.61、PBIASが17.3%、また、検証期間において、 $R^2$ が0.77、NSEが0.74、PBIASが-8%であり、良好な再現性が確認できた。なお、2017年7月20日から2017年9月30日までの観測結果の欠測は、較正期間の再現精度低下の原因と考えられる。土砂輸送の誘因となる年間降水量は重量な指標であるため、厚真川上流域の厚真橋での水収支を表-4に整理した。結果より、2015年から2019年にかけて、降水量に対する流出量の比である流出率の増加傾向が見出せる。なお、2019年の降水量は、2015年から2019年の5年間で最小となっている。地震前の降水量に関しては、2018年4月から2018年9月の地震までに、5回の主要な大雨事例があった。その中で地震直近の大雨としては、2018年8月13～18日にあったものである。これらについては土砂輸送過程の解析において十全留意する必要がある。

Atsuma Bridge station (A=232.14 km<sup>2</sup>)

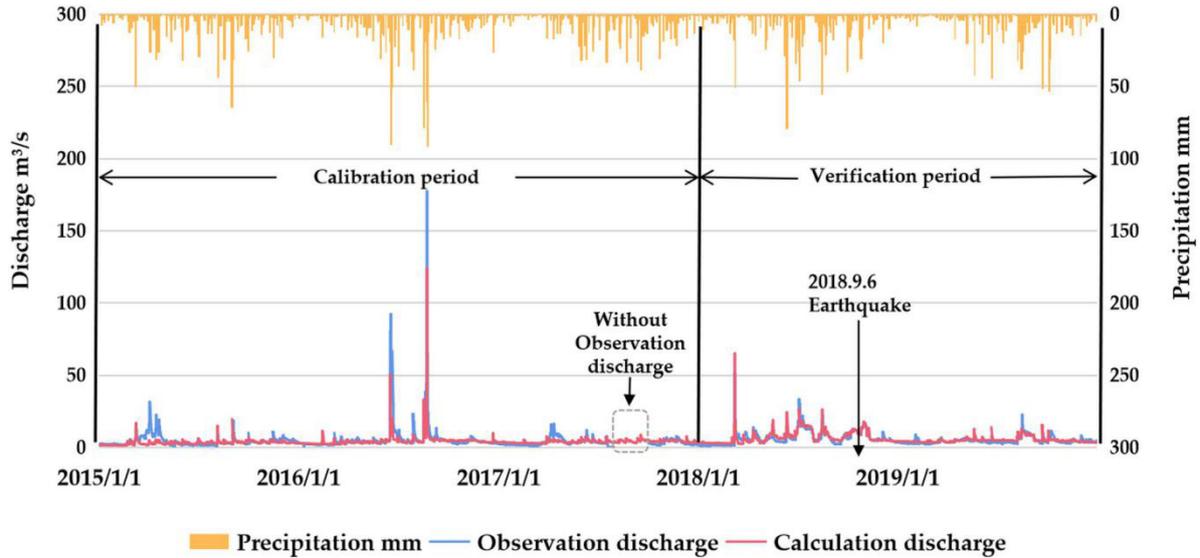


図-6 厚真川における流出量の再現結果  
 (2015年から2019年の厚真橋における観測結果と計算結果の比較、  
 (注) 観測結果は2017年7月20日から9月30日まで欠測となっている。)

表-3 流出シミュレーションの評価指標

厚真橋観測点	R <sup>2</sup>	NSE	PBIAS
較正期間 (2015~2017)	0.69	0.61	17.3%
検証期間 (2018~2019)	0.77	0.74	-8%

表-4 流域の水収支 (厚真橋観測点集水域, A=232.14km<sup>2</sup>)

年当たり	2015 (mm)	2016 (mm)	2017 (mm)	2018 (mm)	2019 (mm)	Average (mm)
降水量	1274	1540	1171	1451	1067	1301
降雨量	994	1299	1068	1253	999	1122
降雪量	280	241	103	198	68	179
流出量	585	835	490	918	615	689
流出量/降水量	0.46	0.54	0.42	0.63	0.58	0.43

### 3.3.2. 土砂輸送量の推定

濁度と浮遊物濃度 (SS) は関係性があるとの見解<sup>35), 36), 37), 38), 39), 40), 41)</sup>により、計算されたSSが観測された濁度と同様な傾向があれば、妥当な推定がなされていると判断した。本研究では、土砂輸送量は単位時間当たりの浮遊物量とし (g/s)、流量 (m<sup>3</sup>/s) とSS濃度 (mg/L=g/m<sup>3</sup>) を乗じたものとみる。共栄観測点で観測された濁度と推算された土砂輸送量を比較した結果を図-7に示す。結果からピークはほぼ一致していることがわかり、土砂輸送量が近似的に定量化できているものと判断する。

濁度の変化は、土砂輸送の変化を判断する情報として重要な意味をもつ。図-7をみると、2018年の濁度と比較して、2019年に濁度が大きく増大していることが分かる。さらに言うと、2018年北海道胆振東部地震の直後には濁度の増大は見られなかったが、2019年8月以降に増大していることがわかる。この理由は、上流にある厚幌ダムが復旧して、厚真川流域の水位が上昇し、地震に起因して堆積していた土砂が下流に流下した可能性が考えられる。



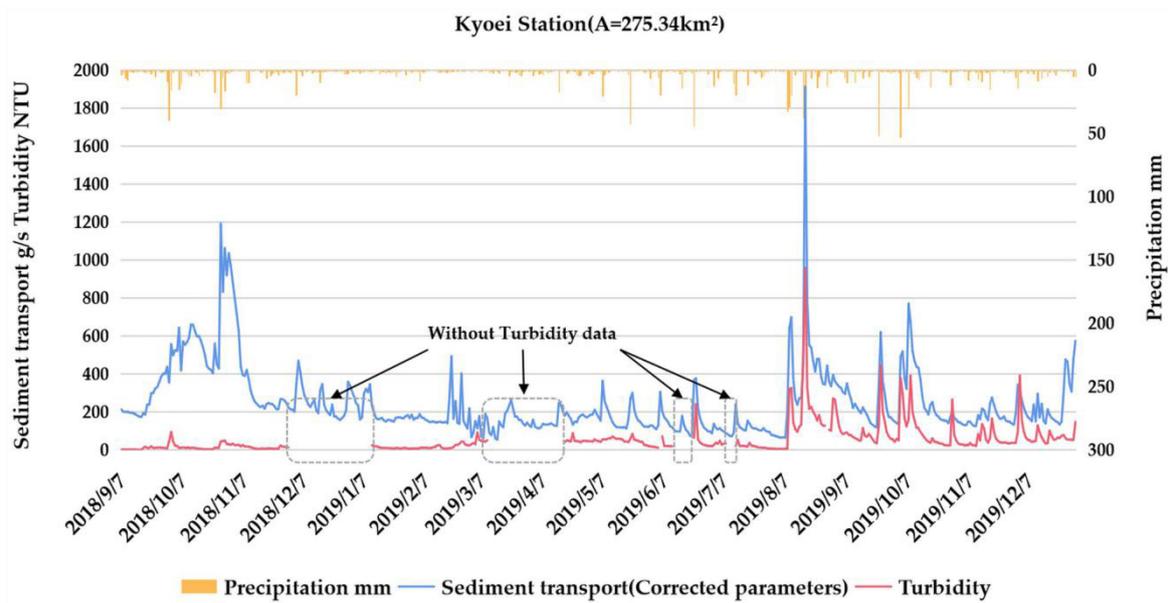


図-8 2018年北海道胆振東部地震後の修正モデルパラメータを用いた濁度観測値と土砂輸送量計算値の比較（共栄観測点）.

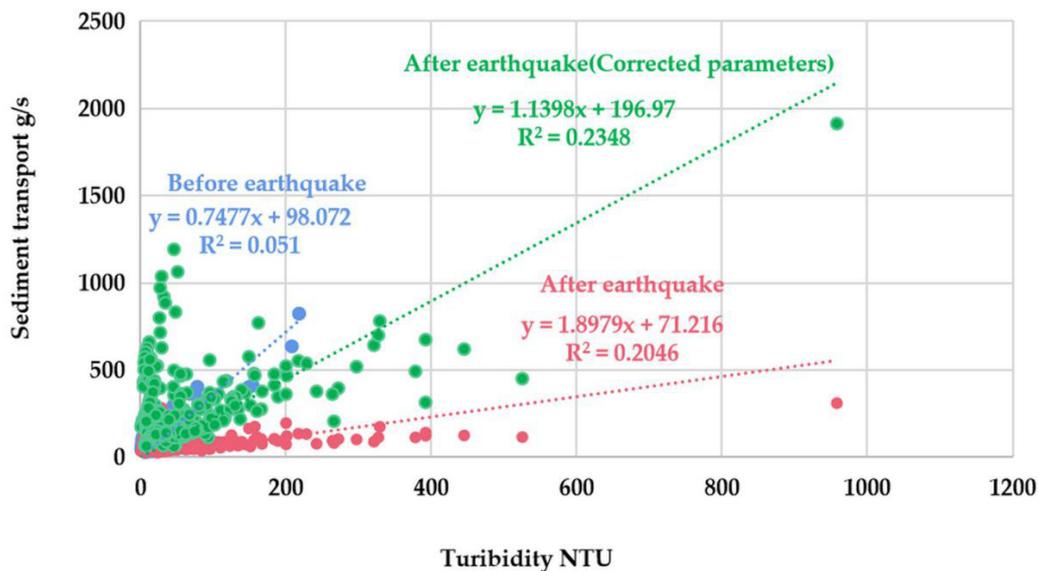


図-9 2018年北海道胆振東部地震前後の濁度観測値と土砂輸送量計算値の相関関係（共栄観測点）

表-5 2018年北海道胆振東部地震前後での単位降水量当たりの土砂輸送量（共栄観測点）

時期	土砂輸送量総量 (トン)	降水量総量 (mm)	単位土砂輸送量 (t/mm/年)
2018.1-2018.8	2755.3	1053.2	3.5
2018.10-2019.12	9754.6	1261.6	6.2

### 3.4. 考察

ダム貯水池の影響を考慮したうえでモデルパラメータを調整したことで、SWATで地震前後の流出量・土砂輸送量の再現がなされた。先行研究に基づき、2018年北海道胆振東部地震及びそれに伴う大規模な

斜面崩壊の後、厚真川流域では降雨がない限り斜面崩壊は起きないと考えられる。地震後に増えた土砂堆積は主に侵食過程で生成されたものであり、その過程を再現できるSWATの利用が有意義である。

土砂輸送については、地震前後の濁度の変化及び濁度と土砂輸送量の関係修正を通して、流域の土砂生産や流出が地震以後に増加傾向にあることが推論できる。先行研究、現地調査、濁度観測値と土砂輸送量計算値の相関関係に基づくシミュレーションを試行錯誤することで、地震後のモデルパラメータが修正され、土砂輸送量が適切に再現された。計算の結果、単位降水量当たりの土砂輸送量は地震前の3.5トン/mm/年から地震後の6.2トン/mm/年に増加したことが推計された。

SWATモデルは、土砂流出の有益な解析ツールであり、流域の多様な水文、土砂流出過程をシミュレーションできる。SWATモデルの運用において、精度の良いデータと多様なパラメータへの理解が重要である。一方で、SWATモデルにはいくつかの限界もある。例えば、GISやENVIなどの専門者向けのソフトウェアの使用が地理データの準備に必要であり、初心者がすぐに利用し始めるのは容易ではない。また、SWATモデルは、流域の多様な物理化学生物過程を、地理データ、気象データほかのデータを入力してシミュレーションを行う。SWATモデルはデータ及びモデル構造に制約があるため、現実の状況を十全に再現できないこともあり、その場合、モデルパラメータを調整せねば満足の結果が出せない。そのための最適化の作業が不可欠となる。

本研究では、利用可能な観測データに基づいて、厚真川流域での土砂輸送に及ぼす地震後1年程度の影響について検証したが、長期にわたる影響に関しては更なる継続研究が必要である、今のところ河川にあるサイズの大きな土砂は簡単には移動できず、河床に堆積している可能性がある。それゆえ、2018年北海道胆振東部地震の厚真川流域への長期的影響を把握するには、上流域を検証対象を追加する必要がある。

### 3.5. おわりに

本研究では、土壌及び水アセスメントツール（SWAT）を用い、厚真川流域で発生した2018年北海道胆振東部地震前後の土砂輸送量の変化を推算した。主要な結論は以下の通りである。

- ダム貯水池の運用を考慮し、SWATモデルによって厚真川流域の流出過程を定量化し、長期にわたる流出量を精度よく推算することができた。この際にSWAT-CUPを用いて、流出に関するモデルパラメータが適切に設定された。
- 濁度と土砂輸送量の比較および濁度変化の洞察により、2018年北海道胆振東部地震前後では土砂流出の特性が変化したことが推察された。また、地震後、厚真川流域で土砂流出が増加する傾向が示唆された。
- 粗々の推算結果として、単位降水量当たりの土砂輸送量が地震前の3.5トン/mm/年から地震後の6.2トン/mm/年に増加することが示された。

### 謝辞

本研究の実施に当たり、国土交通省北海道開発局および北海道の河川砂防関係部署の皆様には有益な情報を提供いただいた。また、国立研究開発法人・寒地土木研究所の寒地河川チーム、水環境保全チームおよび北海道大学大学院工学研究院の河川・流域工学研究室(泉典弘教授)、水圏防災・環境研究室(清水康行教授)、地域防災学分野(寄附分野)(今日出人特任教授、久加朋子特任准教授)には研究の遂行に便宜を図っていただいた。さらに、一般財団法人・北海道河川財団には本研究に係る助成を通して多大なご支援をいただいた。ここに記して謝意を表する。

## 引用文献

- 1) Yilmaz, V.; Can, Y.: Impact of knowledge, concern and awareness about global warming and global climatic change on environmental behavior. *Environ. Dev. Sustain.*, Vol.22, pp.6245-6260, 2020.
- 2) Jyoteeshkumar, P.; Kiran, P.V.; Balaji, C.: Chennai extreme rainfall event of 2015 under future climate projections using the pseudo global warming dynamic downscaling method. *Curr. Sci.*, Vol.118, pp.1968-1979, 2020.
- 3) Anenberg, S.C.; Dutton, A.; Goulet, C.A.; Swain, D.L.; Van Der Pluijm, B.: Toward a Resilient Global Society: Air, Sea Level, Earthquakes, and Weather. *Earth's Future*, Vol.7, pp.854-864, 2019.
- 4) De Bruijn, J.A.; De Moel, H.; Jongman, B.; De Ruiter, M.C.; Wagemaker, J.; Aerts, J.C.J.H.: A global database of historic and real-time flood events based on social media. *Sci. Data*, Vol.6, pp.1-12, 2019.
- 5) China Earthquake Administration. Available online: <https://www.cea.gov.cn/cea/xwzx/zyzt/index.html> (accessed on 11 December 2020).
- 6) Faturay, F.; Sun, Y.Y.; Dietzenbacher, E.; Malik, A.; Geschke, A.; Lenzen, M.: Using virtual laboratories for disaster analysis—A case study of Taiwan. *Econ. Syst. Res.*, Vol.32, pp.58-83, 2020.
- 7) Liu, Q.F.; Yin, D.Y.; Wang, Z.C.: Inversion of the rupture process and high-frequency radiation of the 2017 Jiuzhaigou earthquake, northeastern Tibetan Plateau. *J. Asian Earth. Sci.*, Vol.179, pp.300-318, 2020.
- 8) Domenech, G.; Fan, X.M.; Scaringi, G.; Van Asch, T.W.J.; Xu, Q.; Huang, R.Q.; Hales, T.C.: Modelling the role of material depletion, grain coarsening and revegetation in debris flow occurrences after the 2008 Wenchuan earthquake. *Eng. Geol.*, Vol.250, pp.34-44, 2019.
- 9) Bastola, S.; Murphy, C.; Sweeney, J.: The role of hydrological modelling uncertainties in climate change impact assessments of Irish river catchments. *Adv. Water Resour.*, Vol.34, pp.562-576, 2011.
- 10) Butts, M.B.; Payne, J.T.; Kristensen, M.; Madsen, H.: An evaluation of the impact of model structure on hydrological modelling uncertainty for streamflow simulation. *J. Hydrol.*, Vol.298, pp.242-266, 2004.
- 11) Kasa, I.; Gelybo, G.; Horel, A.; Bakacsi, Z.; Toth, E.; Koos, S.; Dencso, M.; Deelstra, J.; Molnar, S.; Farkas, C.: Evaluation of three semi-distributed hydrological models in simulating discharge from a small forest and arable dominated catchment. *Biologia*, Vol.72, pp.1002-1009, 2017.
- 12) Karki, R.; Srivastava, P.; Veith, T.L.: Application of the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) at field scale: categorizing methods and review of applications. *Trans. ASABE*, Vol. 63, pp.513-522, 2020.
- 13) Briak, H.; Mrabet, R.; Moussadek, R.: Use of a calibrated SWAT model to evaluate the effects of agricultural BMPs on sediments of the Kalaya river basin (North of Morocco). *Int. Soil Water Conserve. Res.*, Vol. 7, pp. 176-183, 2019.
- 14) Jodar-Abellan, A.; Valdes-Abellan, J.; Pla, C.; Gomariz-Castillo, F.: Impact of land use changes on flash flood prediction using a sub-daily SWAT model in five Mediterranean ungauged watersheds (SE Spain). *Sci. Total. Environ.*, Vol.657, pp.1578-1591, 2019.
- 15) Kamamia, A.W.; Mwangi, H.M.; Feger, K.H.; Julich, S.: Assessing the impact of a multimetric calibration procedure on modelling performance in a headwater catchment in Mau Forest, Kenya. *J. Hydrol.-Reg. Stud.*, pp.Vol.80-91, 2019.
- 16) Meng, X.Y.; Wang, H.; Lei, X.H.; Cai, S.Y.; Wu, H.J.; Ji, X.N.; Wang, J.H.: Hydrological modeling in the Manas River Basin using soil and water assessment tool driven by CMADS. *Teh. Vjesn.*, Vol.24, pp. 522-534, 2017.
- 17) Martinez-Salvador, A.; Conesa-Garcia, C.: Suitability of the SWAT Model for Simulating Water Discharge and Sediment Load in a Karst Watershed of the Semiarid Mediterranean Basin. *Water Resour. Manag.*, Vol.34,

pp. 785-802, 2020.

- 18) Almendinger, J.E.; Murphy, M.S.; Ulrich, J.S.: Use of the Soil and Water Assessment Tool to Scale Sediment Delivery from Field to Watershed in an Agricultural Landscape with Topographic Depressions. *J. Environ. Qual.* Vol.43, pp. 9–17, 2014.
- 19) Francesconi, W.; Srinivasan, R.; Perez–Minana, E.; Willcock, S.P.; Quintero, M.: Using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to model ecosystem services: A systematic review. *J. Hydrol.* Vol.535, pp. 625–636, 2016.
- 20) Kawamura, S.; Kawajiri, S.; Hirose, W.; Watanabe, T.: Slope failures/landslides over a wide area in the 2018 Hokkaido Eastern Iburi earthquake. *Soils Found.* Vol.59, pp. 2376–2395, 2019.
- 21) Osanai, N.; Yamada, T.; Hayashi, S.; Kastura, S.; Furuichi, T.; Yanai, S.; Murakami, Y.; Miyazaki, T.; Tanioka, Y.; Takiguchi, S.: Characteristics of landslides caused by the 2018 Hokkaido Eastern Iburi Earthquake. *Landslides*, Vol.16, pp. 1517–1528, 2019.
- 22) Wang, F.R.; Fan, X.M.; Yunus, A.P.; Subramanian, S.S.; Alonso–Rodriguez, A.; Dai, L.X.; Xu, Q.; Huang, R.Q.: Coseismic landslides triggered by the 2018 Hokkaido, Japan (M–w 6.6), earthquake: Spatial distribution, controlling factors, and possible failure mechanism. *Landslides* Vol.16, pp. 1551–1566, 2019.
- 23) Fukuda, K.; Shibata, Y.; Sato, H.; Okabe, S.: How the large–scale blackout following the 2018 Hokkaido Eastern Iburi earthquake impacted adolescents’ sleep patterns. *Sleep Biol. Rhythms*, Vol.18, pp. 351–354, 2020.
- 24) Gou, T.; Huang, Z.C.; Zhao, D.P.; Wang, L.S.: Structural Heterogeneity and Anisotropy in the Source Zone of the 2018 Eastern Iburi Earthquake in Hokkaido, Japan. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, Vol.124, pp. 7052–7066, 2019.
- 25) Zang, C.; Ni, S.D.; Shen, Z.C.: Rupture Directivity Analysis of the 2018 Hokkaido Eastern Iburi Earthquake and Its Seismotectonic Implication. *Seismol. Res. Lett.* Vol.90, pp. 2121–2131, 2019.
- 26) Geospatial Information Authority of Japan. Available online: <https://www.gsi.go.jp/top.html> (accessed on 2 August 2020).
- 27) OpenStreetMap. Available online: <https://www.openstreetmap.org/#map=10/42.7750/142.1062> (accessed on 4 July 2020).
- 28) Ito, Y.; Yamazaki, S.; Kurahashi, T.: Geological features of landslides caused by the 2018 Hokkaido Eastern Iburi Earthquake in Japan. *Geol. Soc. Lond. Spec. Publ.*, Vol.501, pp. 122–149, 2020.
- 29) Katsumata, K.; Ichiyonagi, M.; Ohzono, M.; Aoyama, H.; Tanaka, R.; Takada, M.; Yamaguchi, T.; Okada, K.; Takahashi, H.; Sakai, S.; et al.: The 2018 Hokkaido Eastern Iburi earthquake (M JMA= 6.7) was triggered by a strike–slip faulting in a stepover segment: Insights from the aftershock distribution and the focal mechanism solution of the main shock. *Earth Planets Space*, Vol.71, pp. 1–8, 2019.
- 30) Zhou, H.; Che, A.; Wang, L.; Wang, L.: Investigation and mechanism analysis of disasters under Hokkaido Eastern Iburi earthquake. *Geomat. Nat. Hazards Risk.*, Vol.12, pp. 1–28, 2021.
- 31) Google Earth. Available online: <https://www.google.com/earth/> (accessed on 10 September 2020).
- 32) Santhi, C.; Arnold, J.G.; Williams, J.R.; Dugas, W.A.; Srinivasan, R.; Hauck, L.M.: Validation of the swat model on a large river basin with point and nonpoint sources. *J. Am. Water Resour. Assoc.*, Vol.37, pp. 1169–1188, 2001.
- 33) Nash, J.E.; Sutcliffe, J.V.: River flow forecasting through conceptual models part I–A discussion of principles. *J. Hydrol.*, Vol.10, pp. 282–290, 1970.
- 34) Gupta, H.V.; Sorooshian, S.; Yapo, P.O.: Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison

- with multilevel expert calibration. *J. Hydrol. Eng.* Vol.4, pp. 135–143, 1999.
- 35) Moriasi, D.N.; Arnold, J.G.; Van Liew, M.W.; Bingner, R.L.; Harmel, R.D.; Veith, T.L.: Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Trans. ASABE*, Vol.50, pp.885–900, 2007.
  - 36) Benaman, J.; Shoemaker, C.A.; Haith, D.A.: Calibration and validation of soil and water assessment tool on an agricultural watershed in upstate New York. *J. Hydrol. Eng.*, Vol.10, pp. 363-374, 2005.
  - 37) Teixeira, L.C.; De Paiva, J.B.D.; Da Silva Pereira, J.E.; De Moura Lisboa, R.: Relationship between turbidity and suspended sediment concentration from a small hydrographic basin in Santa Maria (Rio Grande do Sul, Brazil). *Int. J. River Basin Manag.*, Vol.14, pp. 393-399, 2016.
  - 38) Navratil, O.; Esteves, M.; Legout, C.; Gratiot, N.; Nemery, J.; Willmore, S.; Grangeon, T.: Global uncertainty analysis of suspended sediment monitoring using turbidimeter in a small mountainous river catchment. *J. Hydrol.*, Vol.398, pp. 246-259, 2011.
  - 39) Haimann, M.; Liedermann, M.; Lalk, P.; Habersack, H.: An integrated suspended sediment transport monitoring and analysis concept. *Int. J. Sediment Res.*, Vol.29, pp. 135-148, 2014.
  - 40) Sari, V.; Castro, N.M.D.; Pedrollo, O.C.: Estimate of Suspended Sediment Concentration from Monitored Data of Turbidity and Water Level Using Artificial Neural Net works. *Water Resour. Manag.*, Vol.31, pp. 4909-4923, 2017.
  - 41) Bright, C.; Mager, S.; Horton, S.: Response of nephelometric turbidity to hydrodynamic particle size of fine suspended sediment. *Int. J. Sediment Res.*, Vol.35, pp. 444-454, 2020.