

## 2. 2018年北海道胆振東部地震による土地被覆の変化が厚真川流域の土砂流出に及ぼした影響の解析

Yuechao Chen<sup>1</sup>・中津川 誠<sup>2</sup>  
Yuechao CHEN, Makoto NAKATSUGAWA

<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

### 要 旨

2018年9月の北海道胆振東部地震とそれによる斜面崩壊、土石流や地すべりは、厚真川流域の土砂流出を変化させた。本研究では、流域の2015年と2020年の土地利用・土地被覆（LULC）マップを解析することでそれらの変化を把握し、SWATモデル（Soil and Water Assessment Tool）を用いて流域の水循環や土砂流出過程に及ぼす影響を分析した。結果として、地震によって流域の10%近くの森林が裸地へと変化したことを明らかにした。また、2020年のLULCデータに基づき推算された流出量は、2015年のLULCデータに基づく流出量よりもわずかに多く、地震後の土砂流出量は地震前より著しく多くなっていることが示された。具体的に言うと、流出量に応じて規準化された地震後の土砂流出量は、地震前に比べ約4.42倍と推定された。これは、林地の減少に対する裸地の増加に対応していることを示唆している。

《キーワード：2018年北海道胆振東部地震；厚真川流域；土地利用・土地被覆（LULC）；SWATモデル；流出；土砂流出》

## 2. 1. はじめに

1900年1月1日から2020年12月31日までの間に、 $M_w$ 6以上の巨大地震が全世界で11,400回以上も発生している<sup>1),2)</sup>。世界人口の急増に伴い、地震やその二次災害により人命、財産、インフラにもたらされる脅威がさらに大きくなることが予想される<sup>3)</sup>。日本列島は地震が頻発する太平洋プレートとユーラシアプレートの接合部に位置しているため、日本では地震が毎年10,000回以上発生している。大きな地震による斜面崩壊、土石流、地すべりは広範囲の植生相の破壊を伴うことがあり、その結果として水循環や土砂流出の特徴が大きく変化することがある<sup>4)</sup>。すなわち、地震後に河川流域の広範囲での侵食、堆積、河川流路の変化によって、大規模な地形の変化を引き起こす<sup>5)</sup>。

主に人間活動に起因する土地利用・土地被覆 (LULC) の変化<sup>6)</sup> と自然災害<sup>7)</sup> は、地球上の環境変化における最も重要な要素の一つとして認識されている<sup>8),9)</sup>。また、それらは世界中の河川流域で利用可能なすべての水資源にも影響を及ぼす<sup>10)</sup>。また、LULCの変化は、河川流量のみならず、土砂流出などに影響を及ぼす<sup>11)</sup>。したがって、LULCの変化が水循環や物質循環に与える影響を評価することは、流域管理や生態系の回復に不可欠である。LULC変化が河川流量の動態に与える影響の定量化は、近年、水文学の中で関心の高いテーマとなっている。しかし、多くの研究が急激な都市化、森林伐採、農業によるLULC変化の影響に注目しているのに対し、地震やその他の自然災害の影響について論じているものは少ない。地震などの自然災害は、人為的な活動と異なり、短期間でLULCの変化に著しく大きな影響を与える。

2018年北海道胆振東部地震に関する研究は、これまで多角的に行われている。Susukida et al.<sup>12)</sup> は、地震の余震域とその周辺のテクトニックな応力場を調査し、余震域では逆断層型の応力場が支配的であることを明らかにした。Zhou et al.<sup>13)</sup> は、連続豪雨と地震動の影響から、広域地すべりの発生機構と斜面の安定性と永久変位について解析している。Shibata et al.<sup>14)</sup> は、地震前後のM2潮位成分に対する地下水位の応答から、地下水位の変化を報告している。Kubo et al.<sup>15)</sup> は、日本の地震の震源破壊過程を調査し、石狩低地の堆積層の全体的な地震動特性を再現した。Li et al.<sup>16)</sup> は、地震によって引き起こされる地震時地すべりに大きく影響するTa-d軽石が果たしている制御の役割について調査している。Ohtani et al.<sup>17)</sup> は、将来発生しうる地震に関する地震ポテンシャルを評価している。結果からは、地震リスクが高まっていることが明らかになった。Gou et al.<sup>18)</sup> は、地震の震源地域における地震学的構造と複雑な方位角的地震波異方性を調査している。Fujiwara et al.<sup>19)</sup> は、地震と関連する地表面移動量の特定と解析を行っている。Nakamura et al.<sup>20)</sup> は、震源地やその余震の検討を含め、北海道内およびその周辺におけるS波減衰 (Qs) 構造を調査している。Fukuda et al.<sup>21)</sup> は、地震後に起きた停電に伴う中学生の睡眠パターンデータを分析し、平常時の睡眠と比較した。Chen et al.<sup>22)</sup> は、地震前後の土砂流出量を大まかに推定し、地震後に土砂流出が大きく増加したと定性的に判断している。以上のように、地震に関する研究は綿密かつ多様に行われているが、地震前後のLULCの変化を定量化し、それが厚真川流域の水循環や土砂流出に与えた影響を調べた研究者はわずかである。

本研究では、厚真川流域の水循環および土砂流出過程に対する土地利用変化の影響について分析するために、SWATモデルを用いた。これまで、SWATモデルは降雨流出や融雪流出の計算<sup>23),24)</sup>、土砂<sup>25)</sup>、栄養塩<sup>26)</sup>、汚染や微生物の輸送過程の研究<sup>27)</sup>、さらに地域の水資源管理<sup>28)</sup>などの研究分野で使用されてきた。また、SWATモデルは、LULCの変化が水循環と土砂流出過程に与える影響を評価するためにも有用と考えられる。Babur et al.<sup>29)</sup> は、Manglaダムの流出土砂量に対する気候およびLULC変化の影響を分析している。Perazzoli et al.<sup>30)</sup> は、コンコルディア川流域において、異なるLULCシナリオの下での河川流量と土砂収量の変化の影響を分析した。Sadeghi et al.<sup>31)</sup> は、タジャン川流域において、気候変数とLULC変化に対する流出量の応答を調べ、LULCが気候変数と比較して流出に有意な影響を与えることを明らかにした。Anand et al.<sup>32)</sup> は、LULCの変化によるガンガー川流域の水文応答を評価した。これら

の研究は有用な結果をもたらしており、LULCの変化による河川流域の水循環や土砂流出過程に対する影響の評価にSWATモデルが役立つことを示している。SWATモデル以外のロバスト手法も、気候変動と河川流量の関係を調査するために適用されている。例えば、Ghaderpour et al.<sup>33)</sup>は、カナダのアサバスカ川流域の融雪と河川流量に対する気候変動の影響を示すために、最小二乗法によるクロスウェーブレット解析を適用している。Zerouali et al.<sup>34)</sup>も、アルジェリア北部のセバウ川流域の日降水量とカルスト泉水量の応答を評価するためにクロスウェーブレット変換解析を応用した。

以上を踏まえ、本研究の具体的な目的は、1) 衛星画像を用いた厚真川流域における地震によるLULCの急激な変化の把握、2) SWATモデルを用いた地震前後の厚真川流域の水循環や土砂流出の変化の推定と評価とした。

## 2.2. データ・方法

### 2.2.1. 研究対象地域

厚真川流域は、北海道南部の北緯42°34′～42°53′、東経142°7′～141°59′に位置している。面積は約382.9 km<sup>2</sup>、流路延長は52.3 km、標高は0～640mの範囲である。過去20年間の気象データによると、厚真川流域の年平均降水量は1235.9 mm、平均風速は2.5 m/s、平均日射量は8 MJ/m<sup>2</sup>、平均相対湿度は78%、最低・最高気温はそれぞれ-25.3℃と32.3℃、年平均気温は6.6℃となっている。図2-1に厚真川流域の位置と概形を示す。

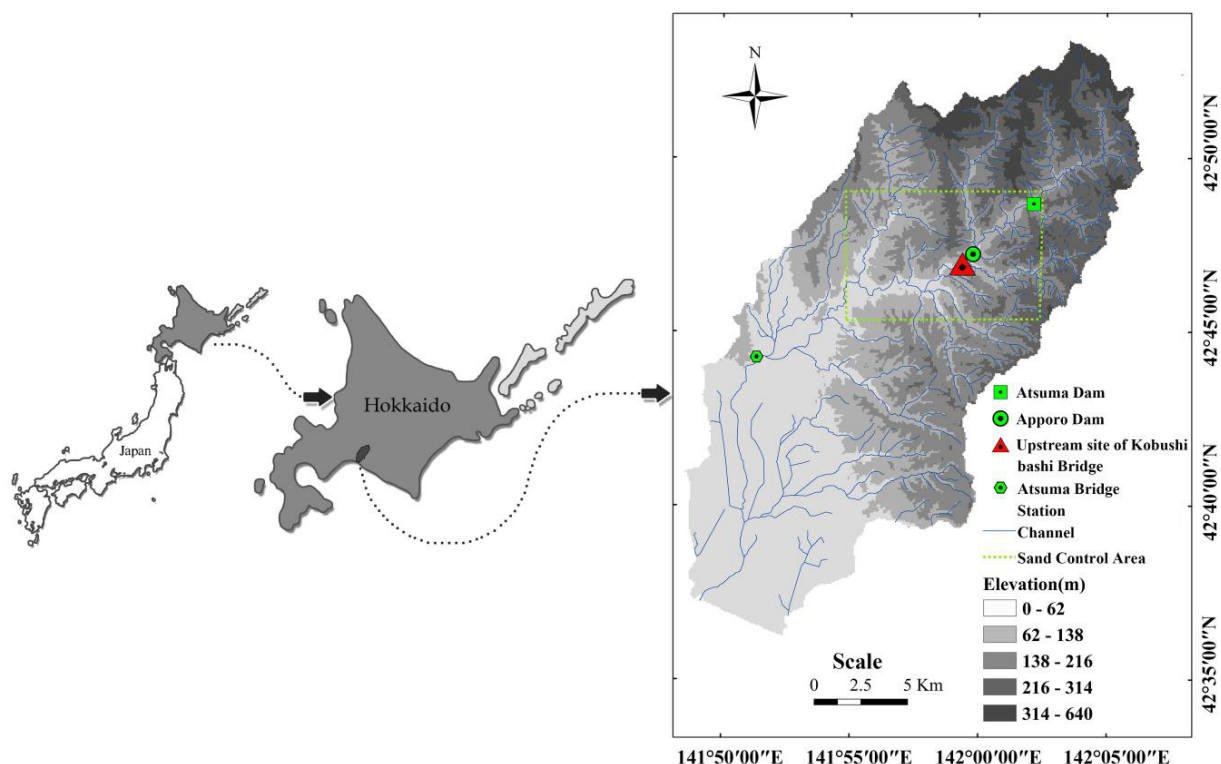


図2-1 厚真川流域の位置と概形.

## 2. 2. 2. 2018年北海道胆振東部地震

2018年北海道胆振東部地震の震源地は北緯42.7°，東経142°，深さ37 kmであった．気象庁の発表によると，厚真町では $M_j$  6.7 ( $M_w$  6.6)，最大震度7を観測した．北海道でこれほど大きな震度の地震が発生したのは初めてであった．地震後，標高200～400 mに位置する約400 km<sup>2</sup>の丘陵地において，複数の大規模な浅い斜面崩壊と深い斜面崩壊が発生した．

人的・物的被害は，北海道で死者41名，負傷者692名（うち重傷者13名，軽傷者679名）であった．また，この地震により少なくとも2,508棟の建物と何本かの道路が損壊し，数台の車が土石流に埋もれた．生産・生活面では，北海道最大の火力発電所である苫東厚真発電所や釧路市の音別発電所2号機などで設備に被害が出た．北海道は電力供給の半分以上を失い，北海道全域で295万世帯が停電（いわゆるブラックアウト）となった．水道や通信も一部でストップし，スーパーやコンビニエンスストアも品薄になり，北海道内の1,800の学校が臨時休校となった．農林水産業も，地震による土砂流出や停電による深刻な経済的損失を被った．また，SUMCO千歳工場，CALBEE，サッポロビールなど，いくつかの工場も生産停止となった．

厚真川流域では，2018年4月から2018年8月にかけて，大雨事例が5回発生している．いくつかの研究では，連続的な降雨と強い地震動が斜面の破壊の主要因であることが示されている<sup>13)</sup>．被災地の（堆積岩からなる）基盤複合体は厚い火砕岩に覆われており，強い地震動は浅い斜面崩壊を誘発し，平面的な斜面地形ではなく谷型の地形に沿って移動し，移動距離も大きくなった．また，浅い斜面崩壊の中には比較的緩やかな斜面（30°未満）で発生したものもある．したがって，厚真川流域における地震後の土砂の主な発生源は侵食であったことが推察される．図2-2(a)と(b)は，それぞれ厚真川流域の斜面方向マップと斜面度マップである．

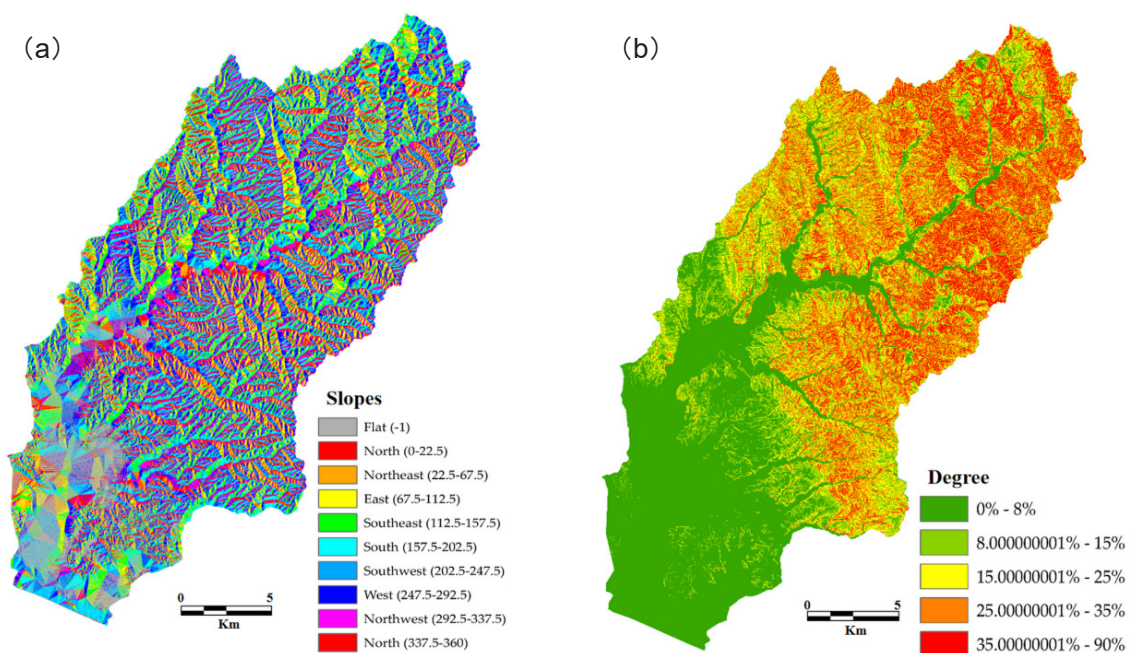


図2-2 厚真川流域の (a) 斜面方向マップと (b) 斜面度マップ [22].



厚真川流域には、図2-1に示す位置に厚幌ダムと厚真ダムがある。厚真ダムは、北海道胆振東部地震によりダム本体が被害を受けている。土砂や樹木などで排水路が塞がれ、ダムが利用不能となった。しかし、それらの撤去と復旧工事が行われ、2023年には供用可能となる予定である。厚幌ダムは本体には被害がなかったものの、ダム周辺の法面で土砂崩れが発生した。その結果、ダム本体や周辺斜面に大量の土砂や流木が堆積し、ダムの貯水機能に影響が及んだ。ダムの機能は、堆積した土砂や流木を撤去し、不安定な斜面を補強することで回復させる予定である。さらに、震災後、日高幌内川、チケッペ川、チカエッペ川、東和川で大規模な斜面崩壊が発生し、河道が塞がれた。そのため、これらの地域では、斜面の補強や砂防ダムの建設が行われた。図2-3に厚真川流域の砂防マップを示す<sup>35)</sup>。

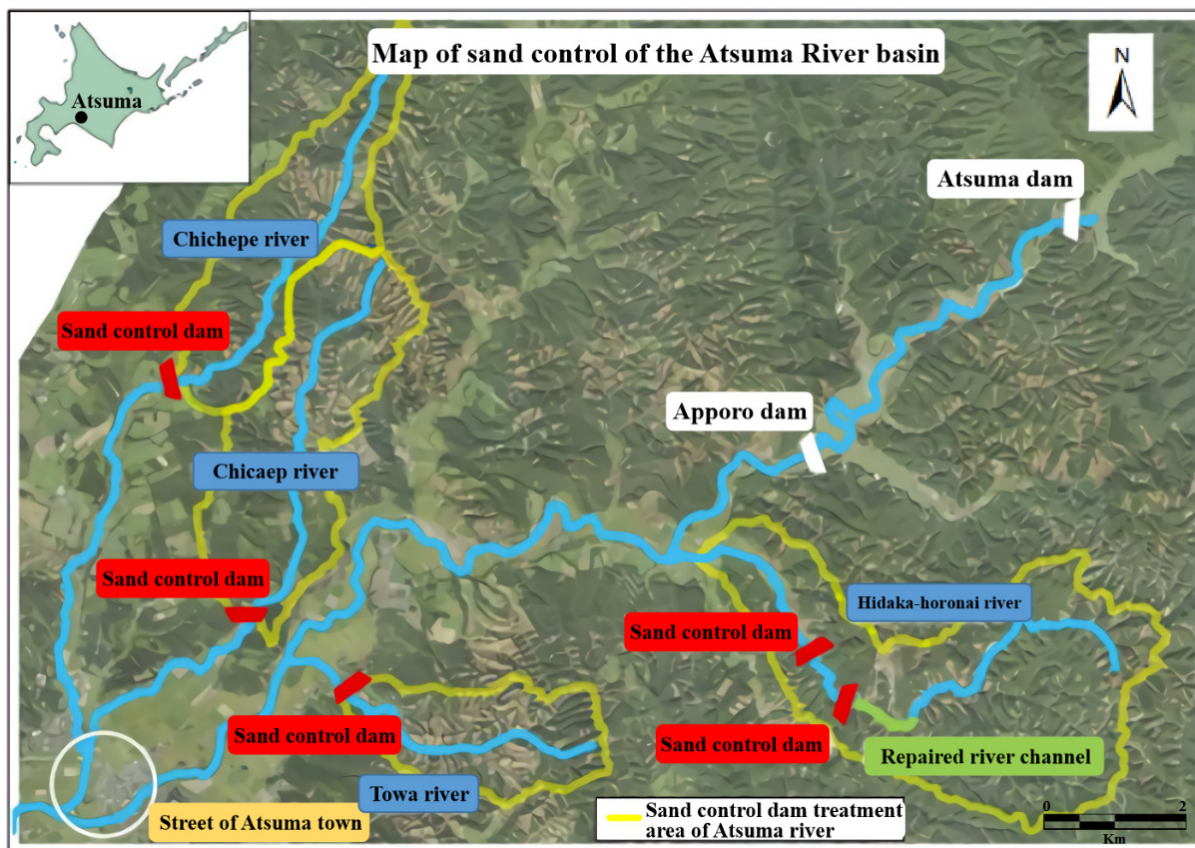


図2-3 厚真川流域の砂防マップ<sup>35)</sup>。

### 2.2.3. SWATモデル (Soil and Water Assessment Tool)

SWATモデル<sup>36)</sup>は、米国農務省 (USDA) が開発した物理ベースの水文学的モデルである。地表水や地下水の水質・水量のシミュレーションや、LULC、土地管理手法、気候変動による環境影響を予測するために用いることが可能である。

SWATモデルによる流出シミュレーションの基礎式は (1) 式である。

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

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流出のモデル化を行う。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)式の通りである。

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

SWATモデルでは、水循環の推定対象として流域を分割して水文応答ユニット(HRU)を設定する。厚真川流域を対象とした計算では319のHRUを設定した。ここで、 $Sed$ は1 HRU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。

以上のモデルパラメータを修正し、シミュレーション結果を改善するために、SWAT校正・不確実性プログラム (SWAT-CUP)<sup>37)</sup>を用いて、SWATモデルの較正と検証、感度 (ワンアタッチおよびグローバル) および不確実性分析を実施している。本研究で使用した不確実性解析手法は、SWAT-CUPプラットフォームの一部である逐次不確実性当てはめ手順バージョン2 (SUFI-2) である。SUFI-2は、ベイズの枠組みに基づいて、各パラメータに関連する不確実性領域 (事前および事後) 内で動作する。パラメータを取り巻く不確実性には、主に入力データセット、モデル構造、測定データの3つの側面がある。さらに、SUFI-2は、グローバルな探索手順を用いて最適化と不確実性分析を組み合わせを行い、ラテンハイパーキューブサンプリングによって複数のパラメータを処理することができる。

#### 2.2.4. データセット

気象水文データは、気象庁及び気象業務支援センターから購入した2009~2020年の気象データ (降水量、気温、平均風速、相対湿度、日射量)、北海道庁胆振総合振興局室蘭建設管理部から提供していただいた2015~2020年の河川観測データ (浮遊物質、流出量、ダムの流入・流出データ) を使用した (補足資料)。ただし、一部の期間については、データが欠落している。本研究で使用したデータセットを表2-1に示す。

本研究では、ENVIソフトを使用してLandsat-8画像を処理し、LULCマップを作成した。表2-2に示すように、農地、森林、草地、水、裸地、宅地の6つのLULCクラスの特特定と分類を行った。図2-4には、厚真川流域の2015年と2020年のLULCの状態を示す。また、SWATモデルのシミュレーションには、表2-1に示すように、DEMと土壌データを使用した。

表2-1 本研究で用いたデータセット.

データ型	説明	解像度	ソース	ダウンロードパス	データ番号	取得日	形式
地形図	デジタル標高モデル (DEM)	0.4" × 0.4" (約10 m <sup>2</sup> )	国土地理院	<a href="https://fgd.gsi.go.jp/download/mapGis.php?tab=dem">https://fgd.gsi.go.jp/download/mapGis.php?tab=dem</a> (2021年11月20日にアクセス)	DEM10B 6342	2019年 11月3日	TIF
土地利用土地被覆図	土地利用土地被覆の分類	30 m (OLI) 100 m (TIRS)	アメリカ地質調査所	<a href="https://earthexplorer.usgs.gov/">https://earthexplorer.usgs.gov/</a> (2021年11月20日にアクセス)	LC08_L2SP_ 107030_20150923_ 20200908_02, LC08_ L2SP_107030_ 20200531_20200820_02	152021年 3月15日	
土壤マップ	土壤型	1/200,000	国土交通省	<a href="https://nlftp.mlit.go.jp/kokjo/inspect/landclassification/land/l_national_map_20-1.html">https://nlftp.mlit.go.jp/kokjo/inspect/landclassification/land/l_national_map_20-1.html</a> (2021年11月20日にアクセス)	Hokkaido_1 200,000 Land Classification Basic Survey	2019年 11月3日	GRID
気象データ	レーダー降水量データ	日次 (450か所の観測所)	気象業務支援センター	<a href="http://www.jmbc.or.jp/jp/">http://www.jmbc.or.jp/jp/</a> (2021年11月20日にアクセス)	2009.01.01-2020.12.31	2021年 5月9日	CSV
	最低・最高気温	日次 (厚真観測所)	気象庁	<a href="https://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php">https://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php</a> (2021年11月20日にアクセス)			
	風速	日次 (苫小牧観測所)					
	相対湿度						
日射量	日次 (札幌観測所)					TXT	

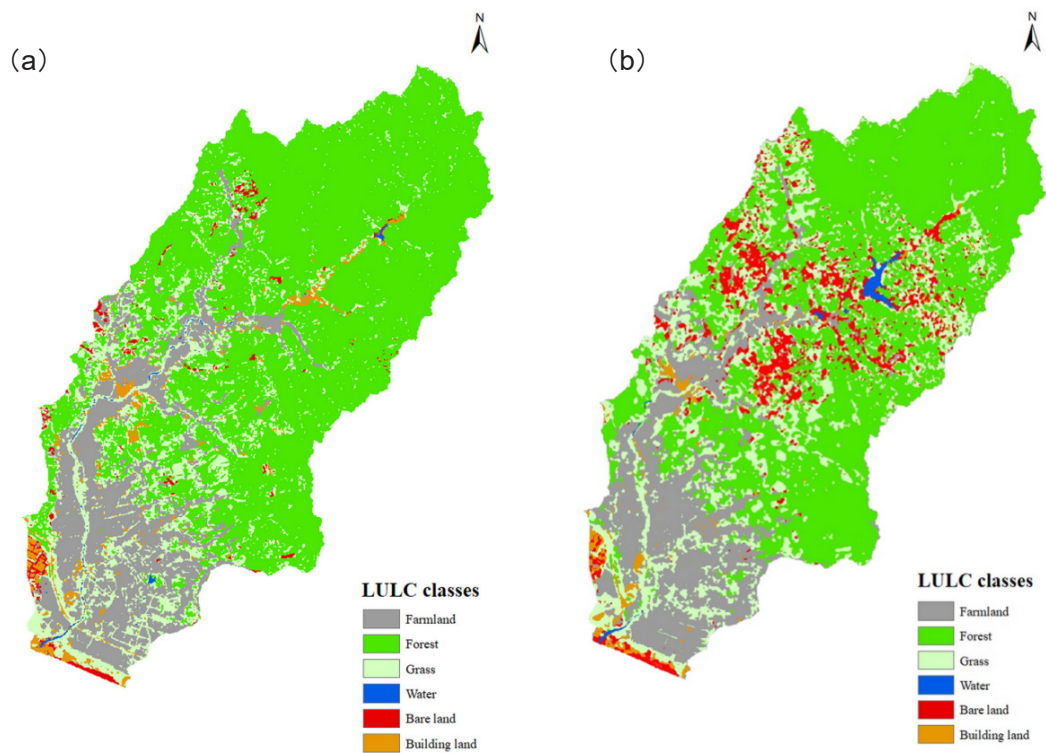


図2-4 2015年 (a) と2020年 (b) の厚真川流域におけるLULCの状態.

表2-2 2015年と2020年の厚真川流域におけるLULCの内訳 (単位 ; km<sup>2</sup>).

	LULC	2015	2020
1	農地	64.06	67.36
2	森林	232.25	186.35
3	草地	55.50	78.26
4	水域	0.88	18.71
5	裸地	4.48	25.46
6	宅地	9.69	7.70

### 2.2.5. 解析の流れ

厚真川流域のLULC変化とその水循環・土砂流出過程への影響を定量化するために、以下の手順で行った。1) 厚真川流域の地震によるLULCの急激かつ大幅な変化を検討するため、2015年と2020年のLULCマップを作成する。2) SWATモデルを用いて、2015年および2020年のLULC観測結果を基に地震前後の水循環・土砂流出過程をシミュレーションし、その変化を分析する。図2-5 に本研究の解析の流れを示す。



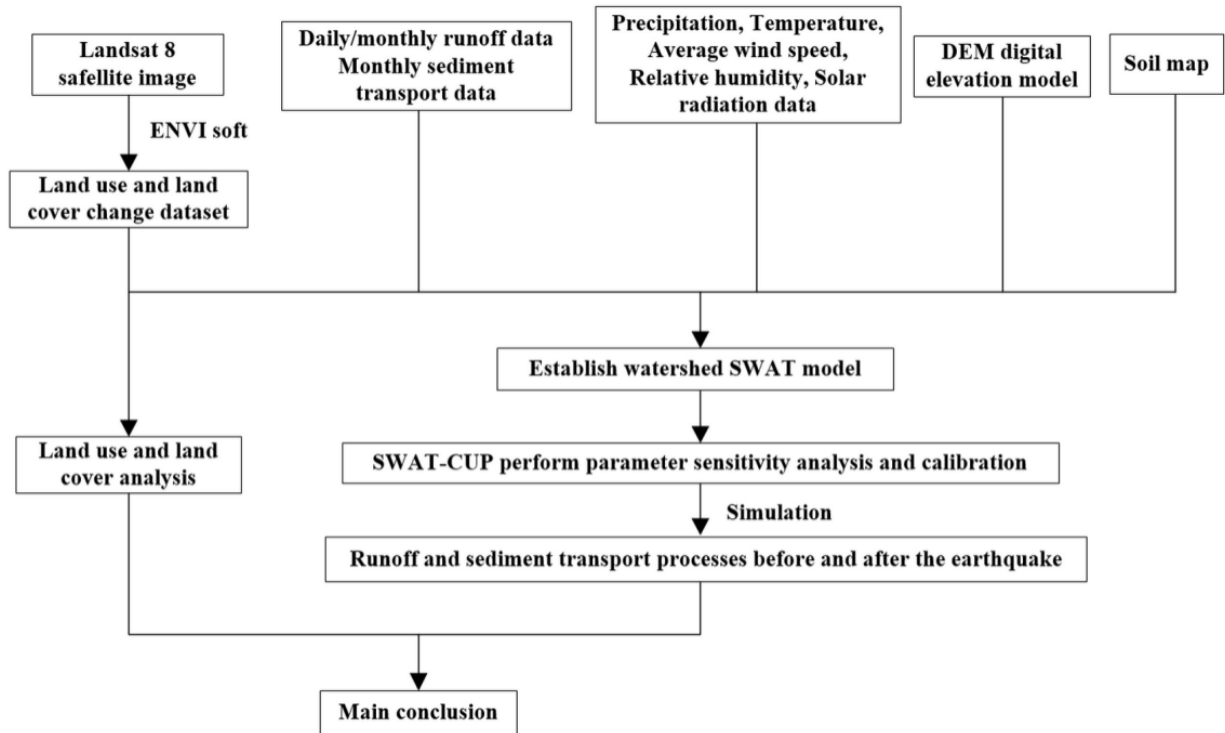


図2-5 本研究の解析の流れ

シミュレーションの結果は、決定係数 ( $R^2$ )、ナッシュ・サトクリフ効率係数 (NSE)、偏り率 (PBIAS)、ピアソン積率相関係数 (PPMCC) を用いて評価した。 $R^2$ 、NSE、PBIAS、PPMCCの計算処理式を式 (3) ~ (6) に示す。

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

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

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

$$PPMCC = \frac{\sum_{i=1}^T (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^T (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^T (S_i - \bar{S})^2}} \quad (6)$$

ここで、 $T$ は計算時間 (days/months)、 $O_i$ は*i*時の観測流出量、 $S_i$ は*i*時の計算流出量、 $\bar{O}$ は観測流出量の平均値、 $\bar{S}$ は計算流出量の平均値である。モデルの評価は、 $NSE > 0.6$ 、 $R^2 > 0.7$ 、 $PBIAS = \pm 15\%$ 、 $PPMCC > 0.8$ の場合に優良であると見なした。

## 2. 3. 結果と考察

### 2. 3. 1. 土地利用と土地被覆の変化解析

厚真川流域の2015年と2020年の土地利用図を比較したところ、農地面積は3.30 km<sup>2</sup>の増加、宅地面積は1.99 km<sup>2</sup>の減少が推定されたが、大きな変化はないといえる。一方、森林面積は45.9 km<sup>2</sup>と大きな減

少幅となっていた。反面で裸地面積，草地面積，水域面積はそれぞれ20.98 km<sup>2</sup>，22.75 km<sup>2</sup>，17.83 km<sup>2</sup>の増加となっていた。以上の結果，森林面積の減少のほとんどが新たな裸地と草地の増加に繋がっており，地震による斜面崩壊が原因であることが推察された。また，厚幌ダム周辺は，2017年のダムの完成により，宅地から水域へと変化した。しかし，厚真ダムは地震で損傷し機能しなかったため，厚真ダム周辺は水域から裸地への変化がみられている。図2-6は，地震後の斜面崩壊・土砂堆積域と2020年LULC厚真川流域マップの裸地・草地の分布を示したものである。

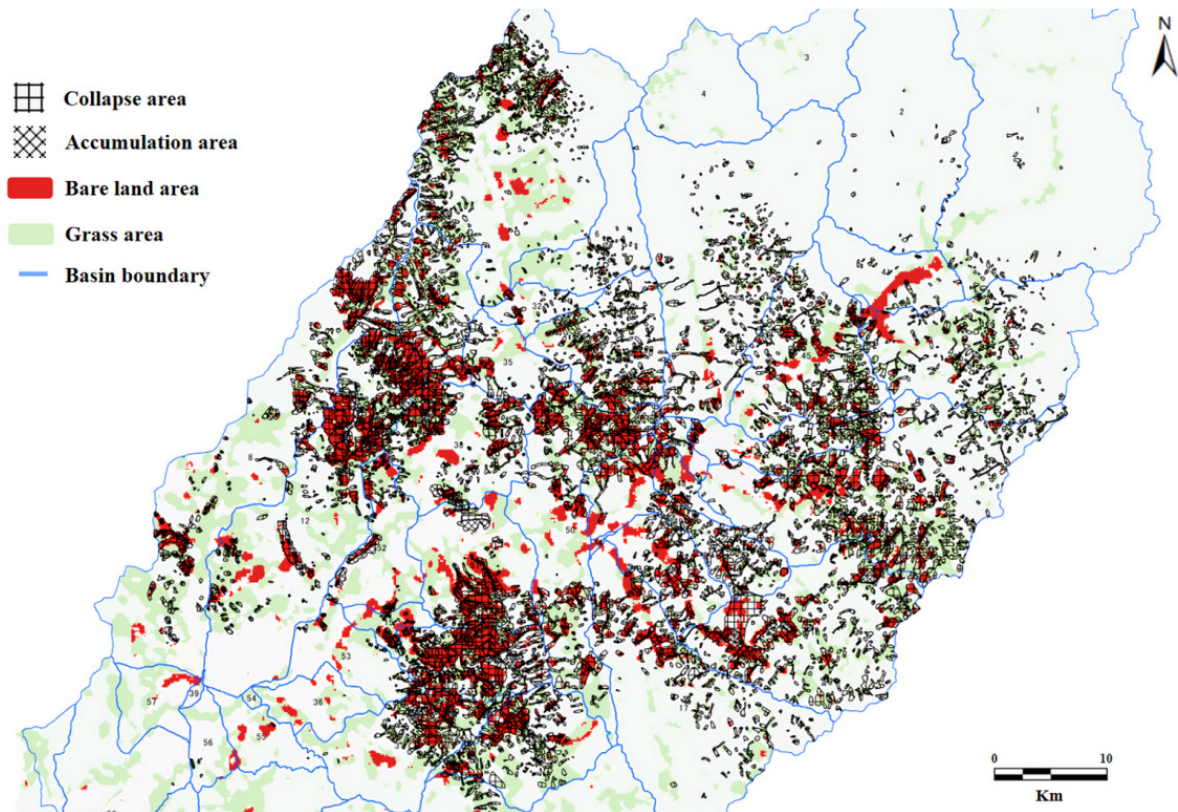


図2-6 2020年の厚真川流域の斜面崩壊域，土砂堆積域，および裸地と草地の分布図

厚真ダムは2023年に供用再開の予定であり，貯水池部分は裸地から水域に変化することになる。また，日高幌内川，チケッペ川，チカエップ川，東和川については斜面補強工事や砂防ダムの建設が完了した。このうち，日高幌内川流域には63.17 km<sup>2</sup>，チケッペ川流域は43.2 km<sup>2</sup>，チカエップ川流域は12.74 km<sup>2</sup>，東和川流域は5.1 km<sup>2</sup>の面積を有する。砂防ダムは，主に河道への土砂流出の抑止を目的に建設される。砂防ダムの建設はLULCの状態には影響しないが，流域の土砂流出に大きな影響を与える可能性がある。地震後の対策工が一段落した現在，新たな裸地への大規模な植生回復や斜面補強の施工計画はない。したがって，短期的には，流域におけるLULCの状態が大きく変化することはないと予想され，流域の流出量も大きく変化することはない。しかし，砂防ダムの建設により，流域の土砂流出量は減少することも考えられる。

### 2.3.2. 流出量の推定

SWATモデルでは，地理的なデータを入力することにより，パラメータの初期値（デフォルト値）を生成することができる。しかし，それでは流出を正確に再現できないことも多い。そこで，本研究では，SWAT-CUPを用いて，SWATモデルにおける流出計算のパラメータを調整した。まず，SWAT-CUPの全体感度の分析により，流出シミュレーションのなかで最も感度の高いパラメータを決定した。次に，逐

次不確実性フィッティング (SUFI-2) アルゴリズムを用いて、補正後のパラメータを求めた (表2-3)。ここで、ウォームアップ期間を2009年から2014年、較正期間を2015年から2017年、検証期間を2018年から2020年とした。

表2-3 SWATモデルにおける流出計算のパラメータ

番号	名称	説明	日単位				月単位			
			2015	2020	2015	2020	2015	2020	2015	2020
			初期値		補正值		初期値		補正值	
1	TIMP.bsn	積雪温度ラグ係数	1	1	1		1	1	0.161241	
2	CN2.mgt	水分条件IIのための初期SCS 流出曲線番号	79	87	63.189432	69.588362	79	87	46.119094	50.789382
3	SMFMN.bsn	12月21日の降雪の融雪係数 (mm H <sub>2</sub> O/°C-day)	4.5	4.5	1.359352		4.5	4.5	4.916194	
4	SMFMX.bsn	6月21日の降雪の融雪係数 (mm H <sub>2</sub> O/°C-day)	4.5	4.5	2.048258		4.5	4.5	1.638298	
5	TLAPS.sub	気温減率 (°C/km)	0	0	-2.392		0	0	-1.221248	
6	SOL_AWC.sol	土壌層の有効圃場容水量 (mm H <sub>2</sub> O/mm soil)	0.1	0.1	0.025737		0.1	0.1	0.09	
7	SMTMP.bsn	融雪基準温度 (°C)	0.5	0.5	0.108525		0.5	0.5	3.543045	
8	CH_K2.rte	沖積層の支流における有効 透水係数 (mm/hrh)	0	0	52.697681		0	0	16.700487	
9	CH_K1.sub	沖積層の支流における有効 透水係数 (mm/h)	0	0	12.198375		0	0	0.503748	
10	SNOCOVMX.bsn	積雪100% (SNO100) に相 当する最低積雪水量 (mm H <sub>2</sub> O)	1	1	0.639671		1	1	0.375468	
11	CH_N2.rte	本流のマニングの「n」値	0.014	0.014	0.304582		0.014	0.014	0.032119	
12	CH_N1.sub	本流のマニングの「n」値	0.014	0.014	0.230863		0.014	0.014	0.513274	
13	ESCO.hru	土壌蒸発補償係数	0.95	0.95	0.7684		0.95	0.95	0.61147	
14	PLAPS.sub	降水減率 (mm H <sub>2</sub> O/km)	0	0	173.700012		0	0	-109.683922	
15	SFTMP.bsn	降雪温度 (°C)	1	1	-0.908274		1	1	-1.100187	
16	ALPHA_BF.gw	基底流量のα係数 (days)	0.048	0.048	0.972874		0.048	0.048	0.004363	
17	SURLAG.bsn	表面流出ラグ係数	4	4	4		4	4	0.932302	
18	GW_DELAY.gw	地下水遅延時間 (days)	31	31	62.261829		31	31	84.258835	
19	SNO50COV.bsn	積雪50%に相当する、 SNOCOVMXによる雪量の 割合	0.5	0.5	0.743382		0.5	0.5	0.771502	
20	GWQMN.gw	復帰流量が発生するために 必要な浅部帯水層の深度の 閾値 (mm H <sub>2</sub> O)	1000	1000	0.362763		1000	1000	2.610365	

LULCの変化が流出パターンに与える影響を調べるため、まず2015年のLULCデータに基づき、厚真川流域（厚真大橋地点、流域面積232.14km<sup>2</sup>）の日単位および月単位の流出量のシミュレーションを行った。次に、以上によって較正されたSWATモデルに2015年と2020年のLULCデータを用いて、同一期間（2015年～2020年）の日単位および月単位の流出シミュレーションを行って比較した。図2-7～図2-10に結果を示す。また、表2-4に誤差解析結果を示す。2015年のLULCデータについて較正期間（2015年～2017年）の日単位流出シミュレーション結果では、R<sup>2</sup>が0.876、NSEが0.707、PBIASが10.52%、PPMCCが0.876であった。同様に、月単位では、R<sup>2</sup>が0.910、NSEが0.691、PBIASが16.15%、PPMCCが0.911であった。また、検証期間（2020年）の日単位の流出シミュレーション結果では、R<sup>2</sup>が0.874、NSEが0.620、PBIASが-6.85%、PPMCCが0.874となった。月単位では、R<sup>2</sup>が0.861、NSEが0.729、PBIASが-6.028%、PPMCCが0.610となった。その結果、SWATモデルの流出シミュレーションの誤差は小さく、再現性は良好であることが示された。

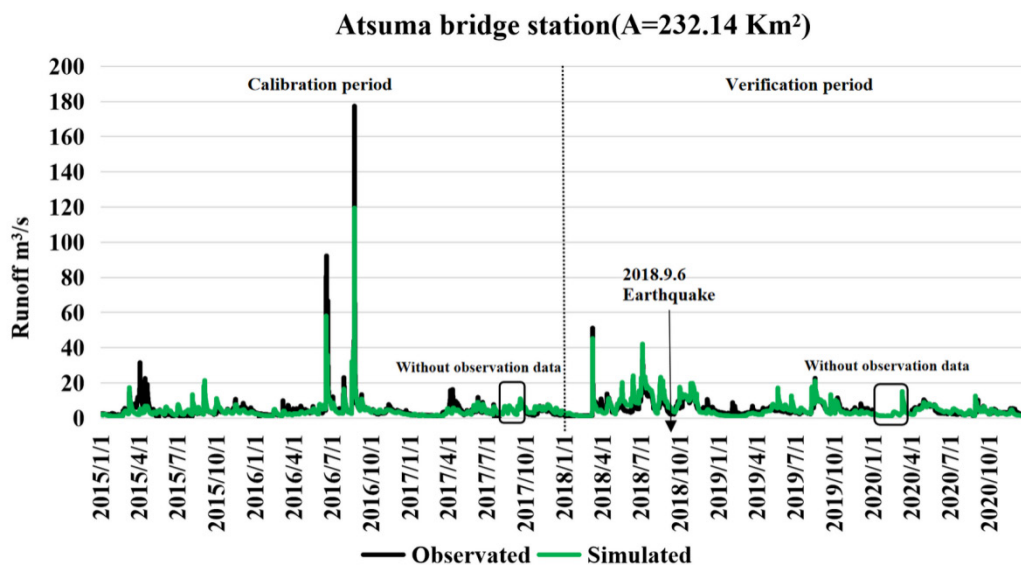


図2-7 2015年のLULCデータを用いた日単位の流出計算結果

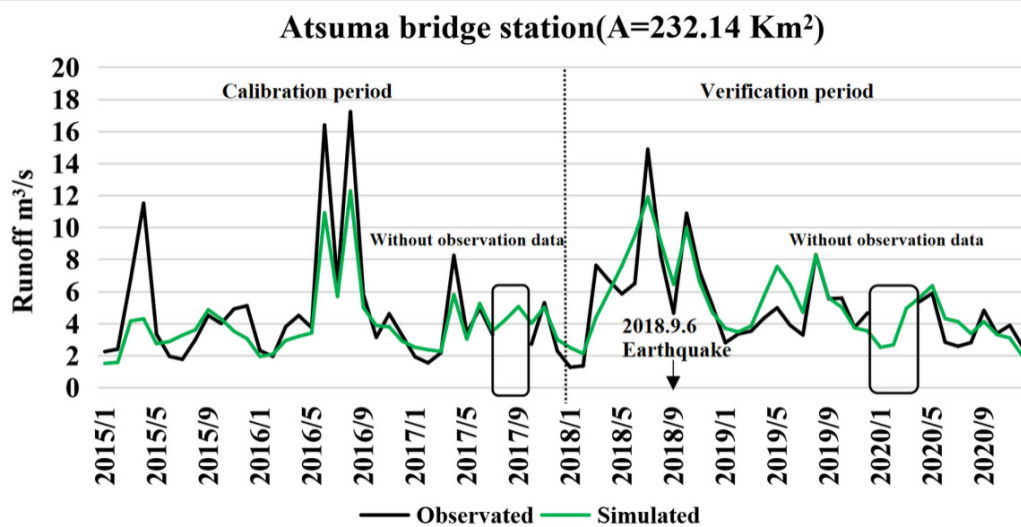


図2-8 2015年のLULCデータを用いた月単位の流出計算結果



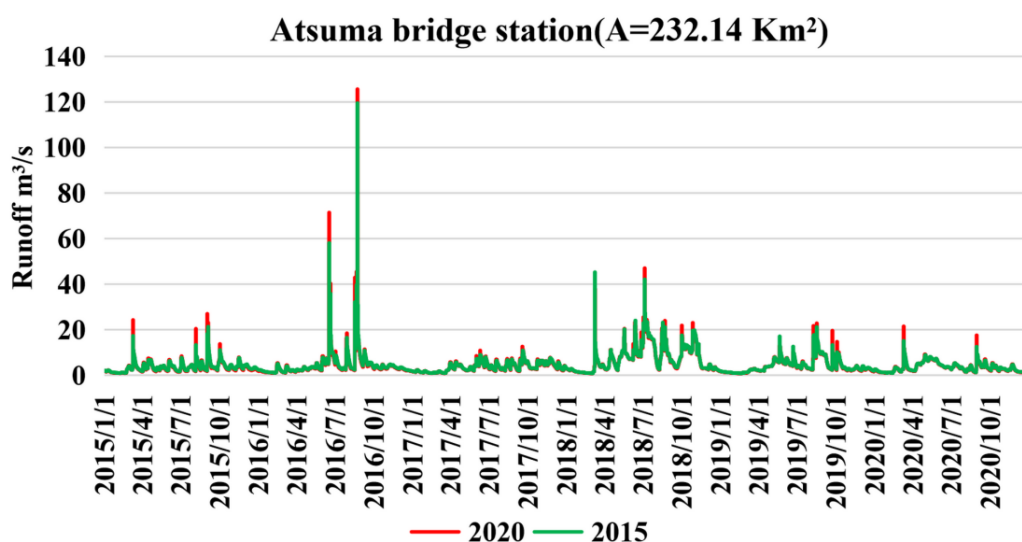


図2-9 2015年と2020年のLULCデータに基づいた日単位の流出量の比較

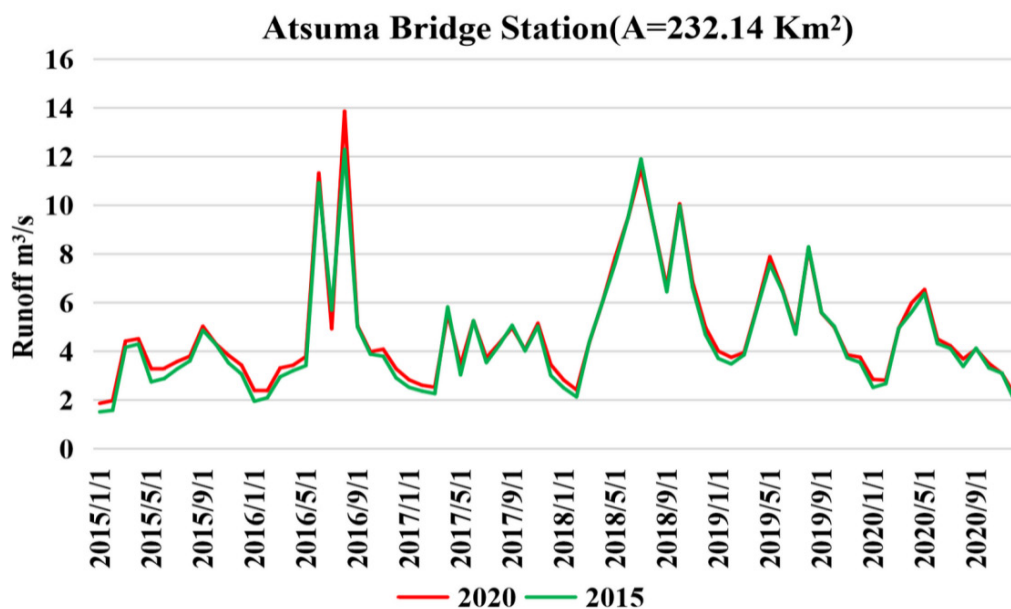


図2-10 2015年と2020年のLULCデータに基づいた月単位の流出量の比較

表2-4 2015年のLULCデータに基づいたSWATモデルによる流出シミュレーションの誤差解析結果

	厚真大橋観測所	R2	NSE	PBIAS	PPMCC
日単位	較正期間 (2015~2017年)	0.876	0.707	10.52%	0.876
	検証期間 (2018~2020年)	0.874	0.620	-6.85%	0.874
月単位	較正期間 (2015~2017年)	0.910	0.691	16.15%	0.911
	検証期間 (2018~2020年)	0.861	0.729	-6.028%	0.610

2015年と2020年のLULCデータを用いて得られた流出シミュレーション結果を比較すると、シミュレーション結果は類似しており、2015年から2020年のLULC変化は流出過程にほとんど影響を与えていないことが示された。しかし、注意深くみると、2020年の日単位・月単位の流出量のピーク値は、2015年

のそれよりも若干大きいことが分かる。このことは、林地面積の減少と裸地面積の増加により、流域で降水が流出に変換される割合が増加したことを示唆しており、植生の減少による樹幹遮断の減少、表面流出の増加、蒸発散の減少などが推察される。表2-5に2015年から2020年までの厚真川流域の水収支を整理した結果を示すが、2015年から2017年に比べて2018年から2020年は流出率の増加傾向が表れており、2015年から2020年のLULC変化に伴うものであることが明らかになった。

表2-5 2015年から2020年までの厚真大橋観測所上流域の観測水収支

年	2015	2016	2017	2018	2019	2020	平均
降水量 (mm/y)	1,274	1,540	1,171	1,451	1,067	985	1,248
降雨量 (mm/y)	994	1,299	1,068	1,253	999	915	1,088
降雪量 (mm/y)	280	241	103	198	68	70	160
流出量 (mm/y)	585	835	490	918	615	518	660
流出率 (流出量/降水量)	0.46	0.54	0.42	0.63	0.58	0.53	0.53

### 2.3.3. 土砂流出量の推定

流出パラメータは前節で較正されたものを用い、土砂流出に感度の高いパラメータをSWAT-CUPおよびSUFI-2アルゴリズムで求めた。結果を表2-6に示す。なお、以後土砂流出量を表す指標はSWATモデルで推算されるSS濃度のことを指す（厳密には掃流砂量と浮遊砂量を合算したものが土砂流出量の実態であるが、流域全体での推算や検証が困難なため、SSを土砂流出の特徴を便宜的に表す指標として用いた。）。2015年と2020年のLULCデータを用いて、それぞれ地震前（2017年1月～2018年8月）と地震後（2018年10月～2020年12月）のこぶし橋上流（図2-1）の土砂流出量の計算結果を図2-11および図2-12に示し、表2-7に誤差解析結果を示す。地震前の土砂流出過程のシミュレーション誤差指標は $R^2=0.802$ 、 $NSE=0.621$ 、 $PBIAS=10.205\%$ 、 $PPMCC=0.802$ となり、地震後では $R^2=0.823$ 、 $NSE=0.638$ 、 $PBIAS=15.755\%$ 、 $PPMCC=0.823$ となった。この結果から、地震前後の土砂流出過程のシミュレーション誤差は小さく、SWATモデルで厚真川流域の土砂流出量を適切に推定できることが示された。

表2-6 SWATモデルにおける土砂流出計算のパラメータ

番号	名称	説明	地震前		地震後	
			初期値	補正值	初期値	補正值
1	USLE_P.mgt	USLE式が支持する演習係数	1	0.090052	1	0.060287
2	SOL_BD (.sol)	湿潤高密度 (Mg/m <sup>3</sup> またはg/cm <sup>3</sup> )	0.3	1.37037	0.3	1.954686
3	REVAPMN.gw	深部帯水層への「revap」または浸透が発生するために必要な浅部帯水層の深度の閾値 (mm H <sub>2</sub> O)	750	186.166534	750	401.453583
4	USLE_C{2}.plant.dat	土地被覆/植物 (森林) に適用できるUSLEによる水食のC係数の最低値	0.001	0.0008159	0.001	0.00102348
5	SPCON.bsn	水路の土砂運搬時に再流入する土砂の最大量を計算するための線形パラメータ	0.0001	0.006331	0.0001	0.002783
6	USLE_C{3}.plant.dat	土地被覆/植物 (草地) に適用できるUSLEによる水食のC係数の最低値	0.003	0.00083717	0.003	0.00069073
7	CH_ERODMO.rte	CH_ERODMOの値は0.0から1.0までの値に設定. 0.0は侵食されない水路, 1.0は侵食に対する抵抗がない水路を表す.	0	3.744806	0	8.263742
8	HRU_SLP.hru	平均斜度 (m/m)	0.05155	0.0708287	0.6687	0.58217958
9	USLE_K.sol	USLEによる土壌侵食能 (K) 係数の式 (単位: 0.013 (metric ton m <sup>2</sup> h) / (m <sup>3</sup> -metric ton cm))	0.0628	0.3016999	0.0628	0.484151
10	EPCO.hru	植物取込補償係数	1	0.490527	1	0.992019
11	SOL_K.sol	飽和状態の透水係数 (mm/h)	10.63	6.69041	10.63	13.267877
12	OV_N.hru	地表流のマニングの「n」値	0.1	0.0937598	0.14	0.249963
13	GW_REVAP.gw	地下水「revap」係数	0.02	0.02342478	0.02	0.01479886
14	CH_COV1.rte	水路被覆率	0	25.236423	0	11.92763
15	CH_L2.rte	本流の長さ (km)	10.9016	10.4795119	10.9016	13.864849
16	CH_S2.rte	支流の平均勾配 (m/m)	0.011634	0.0117971	0.011634	0.02539592
17	CH_COV2.rte	水路被覆率	0	22.798399	0	21.584068
18	USLE_C{1}.plant.dat	土地被覆/植物 (農地) に適用できるUSLEによる水食のC係数の最低値	0.001	0.0013788	0.001	0.00027133
19	SPEXP.bsn	水路の土砂運搬時に再流入する土砂を計算するための指数パラメータ	1	1.321381	1	1.156308
20	SLSUBBSN.hru	平均斜面長 (m)	60.97561	60.97561	9.14634	7.10126411

表2-7 SWATモデルによる土砂流出シミュレーションの誤差解析結果

こぶし橋上流 (図2-1)	R <sup>2</sup>	NSE	PBIAS	PPMCC
2017年1月～2018年8月	0.802	0.621	10.205%	0.802
2018年10月～2020年12月	0.823	0.638	15.755%	0.823

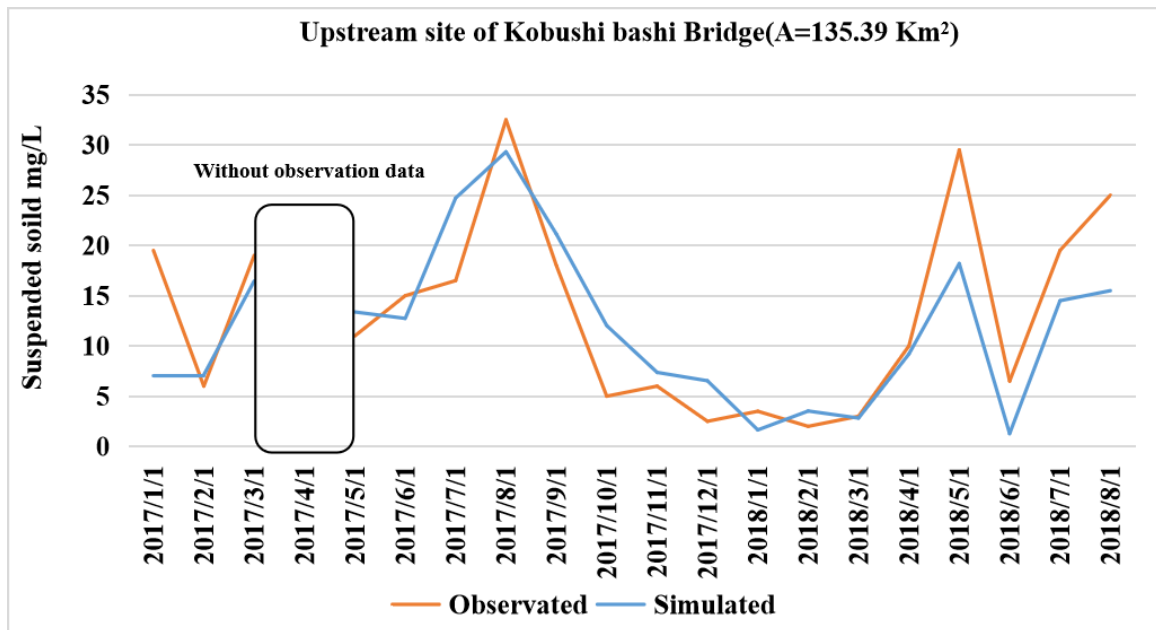


図2-11 2015年のLULCデータに基づく地震前の月単位の土砂流出量計算結果  
(2017年1月～2018年8月)

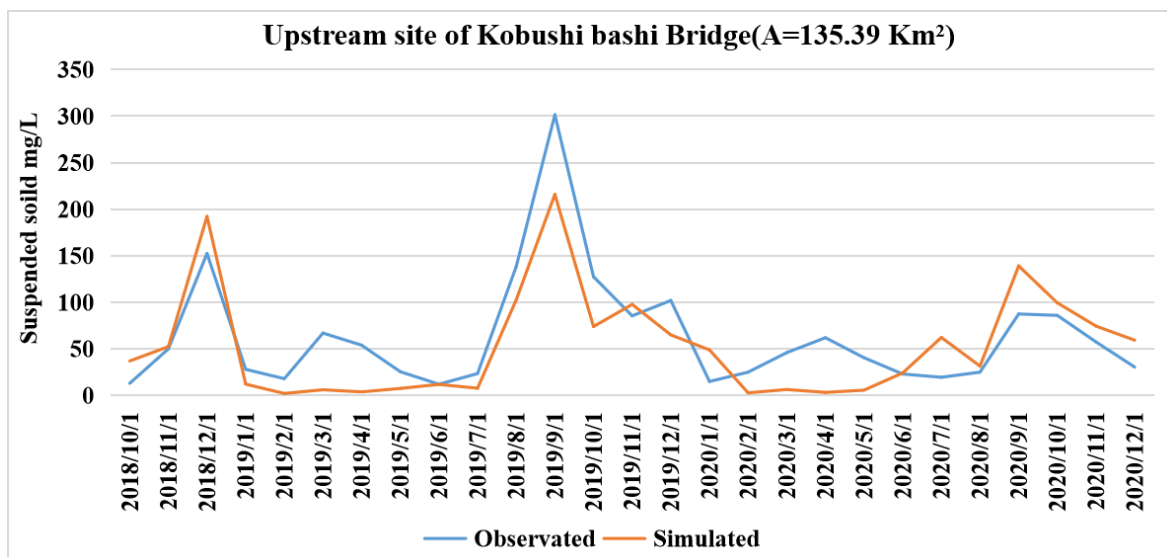


図2-12 2020年のLULCデータに基づく地震後の月単位の土砂流出量計算結果  
(2018年10月～2020年12月)

図2-11と図2-12のシミュレーション結果を比較すると、地震後の土砂流出量は地震前に比べて一桁増えていることが分かる。これは、厚真川流域の土砂流出量が地震後に大きく増加したことを示している。図2-13は、流出量で規準化した土砂流出量の累積値の変化を地震前後で示したものである。これを見ると、土砂流出量は地震後に大きく増加し、地震前の4.42倍となった。地震前の累積曲線の傾向をみると、土砂流出量はほぼ一定の割合で変化しており、地震による急激なLULC変化以前は、厚真川流域の降水に対する土砂流出は比較的安定した関係になっていたことが示唆される。一方、地震後の累積曲線をみると、土砂流出の増加傾向が顕著となり、降水に対する土砂流出が不安定な状態に推移したことが見て取れる。地震後の累積曲線は、2018年9月～10月、2018年11月～12月、2019年1月～7月、2019年8月～12月、2020年1月～6月、2020年7月～12月の6つに区分される。



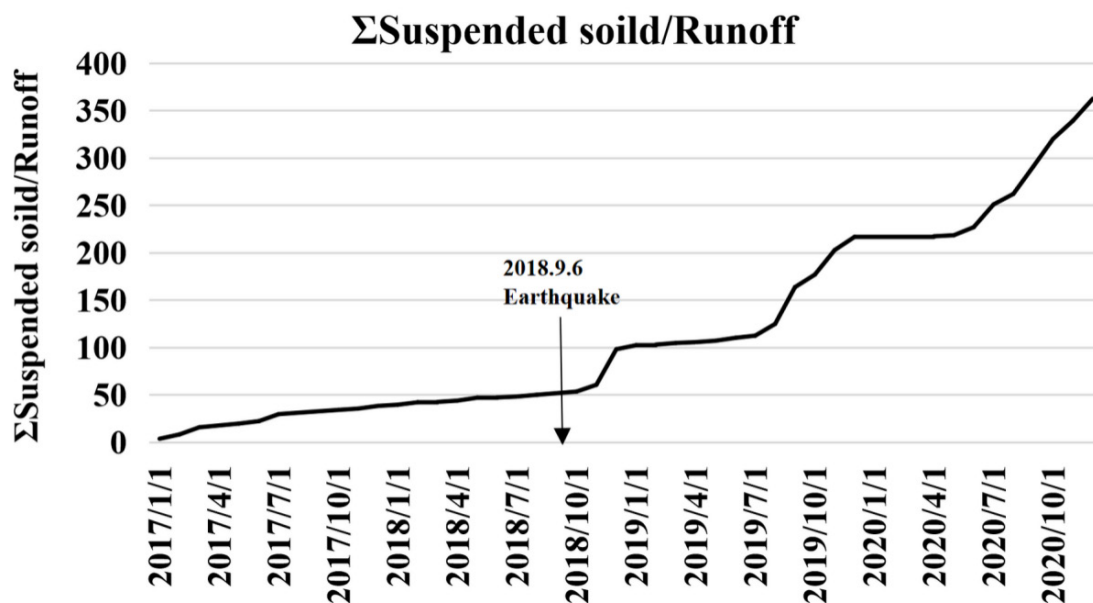


図2-13 地震前後における流出量で規準化した土砂流出量の累積値の変化傾向

2018年9月6日から2018年10月にかけては、地震による厚幌ダムの被害により、流出量が減少し土砂流送能力が低下したため、下流での土砂流出量はすぐには増加しなかった。その後、2018年11月から12月にかけては、工事後の放流により流出量が増加し、河道周辺に堆積した土砂が下流に運ばれるようになった。そのため、土砂流出量が大きく増加した。2019年1月から3月までは冬期の降雪期間であり流出量も少なかった。次に、2019年4月から7月にかけては、厚幌ダムの稼働により流出量が少なく、土砂流送能力が小さく、土砂流出量が減少した。2019年8月から2019年12月にかけては、厚幌ダムが機能したことで流出量も増加し、土砂が下流に運ばれた。さらに、侵食によって発生した土砂が下流に運搬された。そのため、この段階で土砂流出量が増加した。2020年1月から2020年6月にかけても、冬期の積雪期および融雪期の貯水池の貯留によって流量が少なく、土砂流出の原因は主に河道の侵食によるものであった。したがって、この段階では土砂流出量は少なかった。2020年7月から2020年12月にかけては、降雨によって流出量が増加し、流域からの土砂生産や河道侵食によって土砂流出も増加した。地震後、流域の裸地が大幅に増加したことも土砂流出量の増加を促す大きな要因と考えられる。

## 2.4. 結論

本研究では、2018年北海道胆振東部地震発生後の土地被覆の急激な変化と、それが厚真川流域の水循環・土砂流出に与える影響を評価した。研究の目的は、厚真川流域の土地利用・土地被覆（LULC）変化を定量化し、それが厚真川流域の水循環や土砂流出にどのような影響を与えたかをSWATモデルで評価することにある。本研究で用いた手法は類似の状況における異なるシナリオに適用可能であるが、モデルパラメータ等は地域や流域の特性に依存するので、ここで得られた結論は、少なくとも定量的な意味では2018年北海道胆振東部地震が厚真川流域に与えた影響にのみ有効である。しかしながら、ここで提示した考え方は、地震のような自然災害の影響を評価するだけでなく、ダムや砂防といった人為的な作用によってどのような効果をもたらすかを分析することにも役立つと考える。

本研究で得られた結論を要約すると、以下の通りである。

- 1) 人工衛星データの解析に基づき、厚真川流域における地震による土地利用の急激な変化は、主に森林面積の10%近くが裸地化したことを意味する。
- 2) 急激なLULC変化により流出量は若干増加したが、同じ流出量に対する土砂流出量は地震前の約

4.42倍と大幅に増加した。2018年9月胆振東部地震のような未曾有の地震が流域の土砂流出に与える影響について適切に定量化することができた。

限られた観測データに基づく本研究では、地震後のLULC変化を定量的に把握し、地震後のLULC変化が厚真川流域の水循環・土砂流出に与える影響を検証したが、長期的な影響については継続的な研究が必要である。同時に、2018年北海道胆振東部地震が厚真川流域全体さらには海域環境に与える影響を十分に検討するためには、下流域や河口のデータを取り入れることが必要である。

## 2. 4. 謝辞

本研究は、(一財)北海道河川財団の助成とともに、JSPS 科研費(課題番号20H02404, FY2020~2023)の助成を受けて遂行された。また、国土交通省北海道開発局室蘭開発建設部、北海道建設部および室蘭建設管理部、寒地土木研究所の関係各位には貴重な情報提供や助言をいただいた。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

1. Liu, G.; Li, W.; Li, Y.; Xie, Z.; Wang, D.; Fan, Q.: Elevation-based and crustal thickness-based spatial statistical analysis of global strong earthquakes ( $M_w \geq 6.0$ ). *Phys. A Stat. Mech. Appl.* Vol.566, 125669, 2021.
2. China Earthquake Administration. Available online: <https://www.cea.gov.cn/cea/xwzx/zyzt/index.html> (accessed on 11 August 2021).
3. Smith, K.: *Environmental Hazards: Assessing Risk and Reducing Disaster*, 6th ed.; Routledge: London, UK, pp. 3-12, 2013.
4. Zhang, G.T.; Cui, P.; Jin, W.; Zhang, Z.T.; Wang, H.; Bazai, N.A.; Li, Y.; Liu, D.Z.; Alessandro, P.: Changes in hydrological behaviours triggered by earthquake disturbance in a mountainous watershed. *Sci. Total Environ.* Vol. 760, 143349, 2021.
5. Kawser, U.; Hoque, A.; Nath, B.: Observing the impacts of 1950s great Assam earthquake in the tectono-geomorphological deformations at the Young Meghna Estuarine Floodplain of Bangladesh: Evidence from Noakhali Coastal Region. *Arab. J. Geosci.* Vol.14, 306. 2021.
6. Feng, Y.; Lei, Z.; Tong, X.; Gao, C.; Chen, S.; Wang, J.; Wang, S.: Spatially-explicit modeling and intensity analysis of China's land use change 2000-2050. *J. Environ. Manag.* Vol. 263, 110407, 2020.
7. Amano, H.; Iwasaki, Y.: Land Cover Classification by Integrating NDVI Time Series and GIS Data to Evaluate Water Circulation in Aso Caldera, Japan. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, Vol.17, 6605, 2020.
8. Meshesha, D.T.; Tsunekawa, A.; Tsubo, M.; Ali, S.A.; Haregeweyn, N.: Land-use change and its socio-environmental impact in Eastern Ethiopia's highland. *Reg. Environ. Chang.* Vol.14, pp.757-768, 2014.
9. Ruiz, I.; Sanz-Sánchez, M.J.: Effects of historical land-use change in the Mediterranean environment. *Sci. Total Environ.* Vol.732, 139315, 2020.
10. Mathodi, B.; Kenabatho, P.K.; Parida, B.P.; Maphanyane, J.G.: Analysis of the Future Land Use Land Cover Changes in the Gaborone Dam Catchment Using CA-Markov Model: Implications on Water Resources. *Remote Sens*, Vol.13, 2427, 2021.
11. Ahmadisharaf, E.; Lacher, I.L.; Fergus, C.; Benham, B.L.; Akre, T.; Kline, K.S.: Projecting land use change impacts on nutrients, sediment and runoff in multiple spatial scales: Business-as-usual vs. stakeholder-informed scenarios. *J. Clean. Prod.* Vol.257, 120466, 2020.

12. Susukida, Y.; Katsumata, K.; Ichiyanagi, M.; Ohzono, M.; Aoyama, H.; Tanaka, R.; Takada, M.; Yamaguchi, T.; Okada, K.; Takahashi, H.; et al.: Focal mechanisms and the stress field in the aftershock area of the 2018 Hokkaido Eastern Iburi Earthquake (M<sub>JMA</sub> = 6.7). *Earth Planets Space*, Vol. 73, 1, 2021.
13. Zhou, H.; Che, A.; Wang, L.; Wang, L.: Investigation and mechanism analysis of disasters under Hokkaido Eastern Iburi earthquake. *Geomatics. Nat. Hazards Risk*, Vol.12, pp. 1-28, 2021.
14. Shibata, T.; Takahashi, R.; Takahashi, H.; Kagoshima, T.; Takahata, N.; Sano, Y.; Pinti, D.L.: Coseismic changes in ground-water level during the 2018 Hokkaido Eastern Iburi Earthquake. *Earth Planets Space*, Vol.72, 23, 2020.
15. Kubo, H.; Iwaki, A.; Suzuki, W.; Aoi, S.; Sekiguchi, H.: Estimation of the source process and forward simulation of long-period ground motion of the 2018 Hokkaido Eastern Iburi, Japan, earthquake. *Earth Planets Space*, Vol.72, 20, 2020.
16. Li, R.; Wang, F.; Zhang, S.: Controlling role of Ta-d pumice on the coseismic landslides triggered by 2018 Hokkaido Eastern Iburi Earthquake. *Landslides*, Vol.17, pp.1233-1250, 2020.
17. Ohtani, M.; Imanishi, K.: Seismic potential around the 2018 Hokkaido Eastern Iburi Earthquake assessed considering the viscoelastic relaxation. *Earth Planets Space*, Vol. 71, 57, 2019.
18. Gou, T.; Huang, Z.; Zhao, D.; Wang, L.: Structural heterogeneity and anisotropy in the source zone of the 2018 Eastern Iburi earthquake in Hokkaido, Japan. *J. Geophys. Res*, Vol.24, pp. 7052-7066, 2019
19. Fujiwara, S.; Nakano, T.; Morishita, Y.; Kobayashi, T.; Yarai, H.; Une, H.; Hayashi, K.: Detection and interpretation of local surface deformation from the 2018 Hokkaido Eastern Iburi Earthquake using ALOS-2 SAR data. *Earth Planets Space*, Vol.71, 64, 2019.
20. Nakamura, R.; Shiina, T.: Three-dimensional S-wave attenuation structure in and around source area of the 2018 Hokkaido Eastern Iburi Earthquake, Japan. *Earth Planets Space*, Vol.71, 114, 2019.
21. 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. Rhythm*, Vol.18, pp.351-354, 2020.
22. Chen, Y.C.; Nakatsugawa, M.; Ohashi, H.: Research of Impacts of the 2018 Hokkaido Eastern Iburi Earthquake on Sediment Transport in the Atsuma River Basin Using the SWAT Model. *Water*, Vol.13, 356, 2021.
23. Tiwari, S.; Kar, S.C.; Bhatla, R.; Bansal, R.: Temperature index based snowmelt runoff modelling for the Satluj River basin in the western Himalayas. *Meteorol. Appl*, Vol. 25, pp. 302-313, 2018.
24. Yaduvanshi, A.; Sharma, R.K.; Kar, S.C.; Sinha, A.K.: Rainfall-runoff simulations of extreme monsoon rainfall events in a tropical river basin of India. *Nat. Hazards*, Vol. 90, pp.843-861, 2018.
25. Martínez-Salvador, A.; Conesa-García, 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.
26. Yang, X.; He, R.; Ye, J.; Tan, M.L.; Ji, X.; Tan, L.; Wang, G.: Integrating an hourly weather generator with an hourly rainfall SWAT model for climate change impact assessment in the Ru River basin, China. *Atmos. Res*, Vol.244, 105062, 2020.
27. Sowah, R.A.; Bradshaw, K.; Snyder, B.; Spidle, D.; Molina, M.: Evaluation of the soil and water assessment tool (SWAT) for simulating E. coli concentrations at the watershed-scale. *Sci. Total Environ*, Vol.746, 140669, 2020.
28. Ahn, S.; Sheng, Z.: Assessment of water availability and scarcity based on hydrologic components in an irrigated agricultural watershed using SWAT. *J. Am. Water Resour. Assoc*, Vol.57, pp.186-203,2021.
29. Babur, M.; Shrestha, S.; Bhatta, B.; Datta, A.; Ullah, H.: Integrated assessment of extreme climate and

- landuse change impact on sediment yield in a mountainous transboundary watershed of India and Pakistan. *J. Mt. Sci*, Vol.17, pp.624-640, 2020.
30. Perazzoli, M.; Pinheiro, A.; Kaufmann, V.: Effects of scenarios of landuse on water regime and sediment transport in the Concórdia River basin, *SC. Rev. Árvore*, Vol.37, pp.859-869, 2013.
  31. Sadeghi, S.; Saghafian, B.; Najarchi, M.: Assessment of impacts of change in land use and climatic variables on runoff in Tajan River basin. *Water Supply*, Vol.20, pp.2779-2793, 2020.
  32. Anand, J.; Gosain, A.K.; Khosa, R.: Prediction of land use changes based on Land Chasnge Modeler and attribution of changes in the water balance of Ganga basin to land use change using the SWAT model. *Sci. Total Environ*, Vol.644, pp.503-519, 2018.
  33. Ghaderpour, E.; Vujadinovic, T.; Hassan, Q.K.: Application of the least-squares wavelet software in hydrology: Athabasca River basin. *J. Hydrol.-Reg. Stud*, Vol.36, 100847, 2021.
  34. Zerouali, B.; Chettih, M.; Alwetaishi, M.; Abda, Z.; Elbeltagi, A.; Augusto Guimarães Santos, C.; Hussein, E.E.: Evaluation of Karst Spring Discharge Response Using Time-Scale-Based Methods for a Mediterranean Basin of Northern Algeria. *Water*, Vol.13, 2946, 2021.
  35. 厚真川水系砂防事業所 <https://www.hkd.mlit.go.jp/mr/kouhou/c5b1ee00000f4qa.html>
  36. The official website of SWAT <https://swat.tamu.edu/>
  37. The official website of SWAT-CUP <https://swat.tamu.edu/software/swat-cup/>