

## 6. SWATモデルを用いた2018年胆振東部地震が 厚真川流域の土砂流出に与える影響の推定

Estimation of influences of 2018 Hokaido Esaten Iburi Earthquake on Sediment  
Transport Characteristics in the Aduma River Basin Using SWAT

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

Makoto NAKATSUGAWA, Hiroki OHASHI and Chen YUECHAO

<sup>1</sup>室蘭工業大学 大学院工学研究科 教授

<sup>2</sup>応用地質株式会社

<sup>3</sup>室蘭工業大学 博士後期課程

### 要 旨

厚真川流域では2018年9月6日に発生した北海道胆振東部地震により大規模な斜面崩壊が発生した。これに伴い、斜面崩壊が流域の流動特性、土砂輸送特性に大きな影響を与えていると推察される。本研究では厚真川流域における地震発生前後の流動特性、土砂輸送特性の変化を評価することを目的に、SWATモデルによる流動特性、土砂輸送特性の現況再現との変化抽出を試みた。その結果、ダム運用を考慮することで現況の流動特性、土砂輸送特性を数値モデル上で再現し、流動特性は大きく変化していないが土砂輸送特性が一部変化している可能性を示した。今後検証期間の延長、検証データの収集精査、検証位置の追加等により、より明瞭に地震による流動特性、土砂輸送特性の変化を評価できるものとする。

《キーワード：流動特性；土砂輸送特性；SWAT；ダム》

## 6. 1. はじめに

研究対象地である厚真川流域では2018年9月6日に発生した北海道胆振東部地震により大規模な斜面崩壊が発生した。地震後の現地状況からすると、斜面崩壊が流域の流動特性、土砂輸送特性に大きな影響を与えていると推察され、流域において様々な観測や研究が実施されている<sup>1)</sup>。

一方、これまでの研究では、流域全体の流動特性、土砂輸送特性に関して評価したものが少なく、さらに地震の前後での変化を総合的・定量的に評価したものはない。

以上のことから本研究ではSWAT (Soil and Water assessment Tool) を用いて地震前後の流動特性、土砂輸送特性の変化を評価することを目的とする。

## 6. 2. 対象地

### 6. 2. 1. 厚真川流域概要

図6-1に厚真川流域の概要を示す。厚真川は延長52.3km、流域面積が67km<sup>2</sup>、流域の標高が海拔0m～600mの2級河川である。厚真川本川上流にはかんがいを目的とした厚真ダム (1970年運用開始、流域面積52km<sup>2</sup>有効貯水容量 9523千m<sup>3</sup>)<sup>2)</sup> と利水や治水を目的とした厚幌ダム (2017年運用開始、流域面積105.3km<sup>2</sup>、有効貯水量43100千m<sup>3</sup>)<sup>2)</sup> が整備されている。厚幌ダムの流域面積は厚真川流域全体の1/3を占めており、その運用は厚真川下流の流動に大きな影響を与えていると推察される。

また、流域では地震後に様々な研究者により様々な観測が行われているが、地震前から連続的に観測が行われているのはアメダス気象観測所「厚真」での降水量、気温等の気象観測、厚真大橋での河川流量観測及び厚真ダムでの流入・流出記録である。さらに厚幌ダム運用開始後は厚真大橋から約10km下流にある共栄橋で河川流量を共栄地点で濁度の連続観測が行われている。本研究ではこれらのデータを用いた解析検討を実施した。

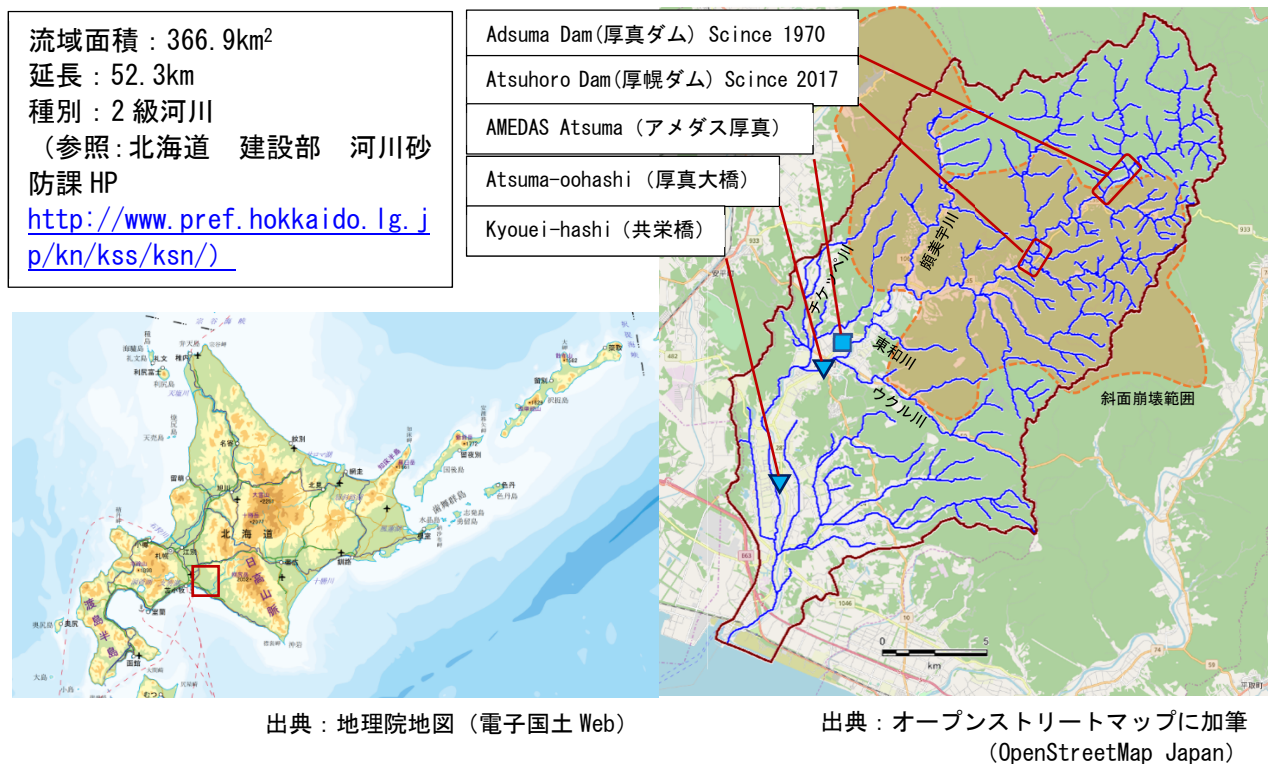


図6-1 厚真川流域概要図

## 6. 2. 2. 現地の状況

写真6.1～写真6.4に2019年4月26日に実施した現地視察時の河川の状況を示す。前々日から弱い雨（アメダス「厚真」の観測結果によれば4/24～4/26に計10mm）があったが、上流域の厚幌ダム（写真6-1）、支流（写真6-2）、中流域の厚真大橋付近（写真6-3）、及び河口域（写真6-4）いずれも河川水の透明度は低かった。



写真6-1 厚幌ダム放出路状況



写真6-2 東和川状況



写真6-3 厚真大橋付近の状況



写真6-4 厚真川河口の状況

## 6. 3. 研究方法

### 6. 3. 1. 評価手順

本研究では以下の手順で地震発生前後の流動特性、土砂輸送特性の変化を抽出した。

- 1) 地震発生前の流動特性、土砂輸送特性を数値モデル上で再現
- 2) 上記数値モデルに地震発生後の気象条件を与えた解析を実施し、地震の影響がない場合の河川流量及び負荷量を予測
- 3) 地震発生後の河川流量、負荷量の観測結果と予測結果を比較

### 6.3.2. 観測データと解析期間

図6-2に2015年～2019年のアメダス「厚真」での気象観測結果，厚真ダム・厚幌ダムの流入・放出量観測結果，厚真大橋・共栄橋での河川流量観測結果及び共栄地点での濁度観測結果を示す．2015年～2016年はデータの取得状況はよいが2017年以降はデータ未取得期間が存在する．特に厚幌ダムの流入・放出量は2018年8月10日～2018年11月10日までと2019年3月20日～2019年6月25日のみのデータ取得にとどまった．以上のことから，2015年から2017年を数値モデルのキャリブレーション期間とし，2018年から2019年を予測期間とした．

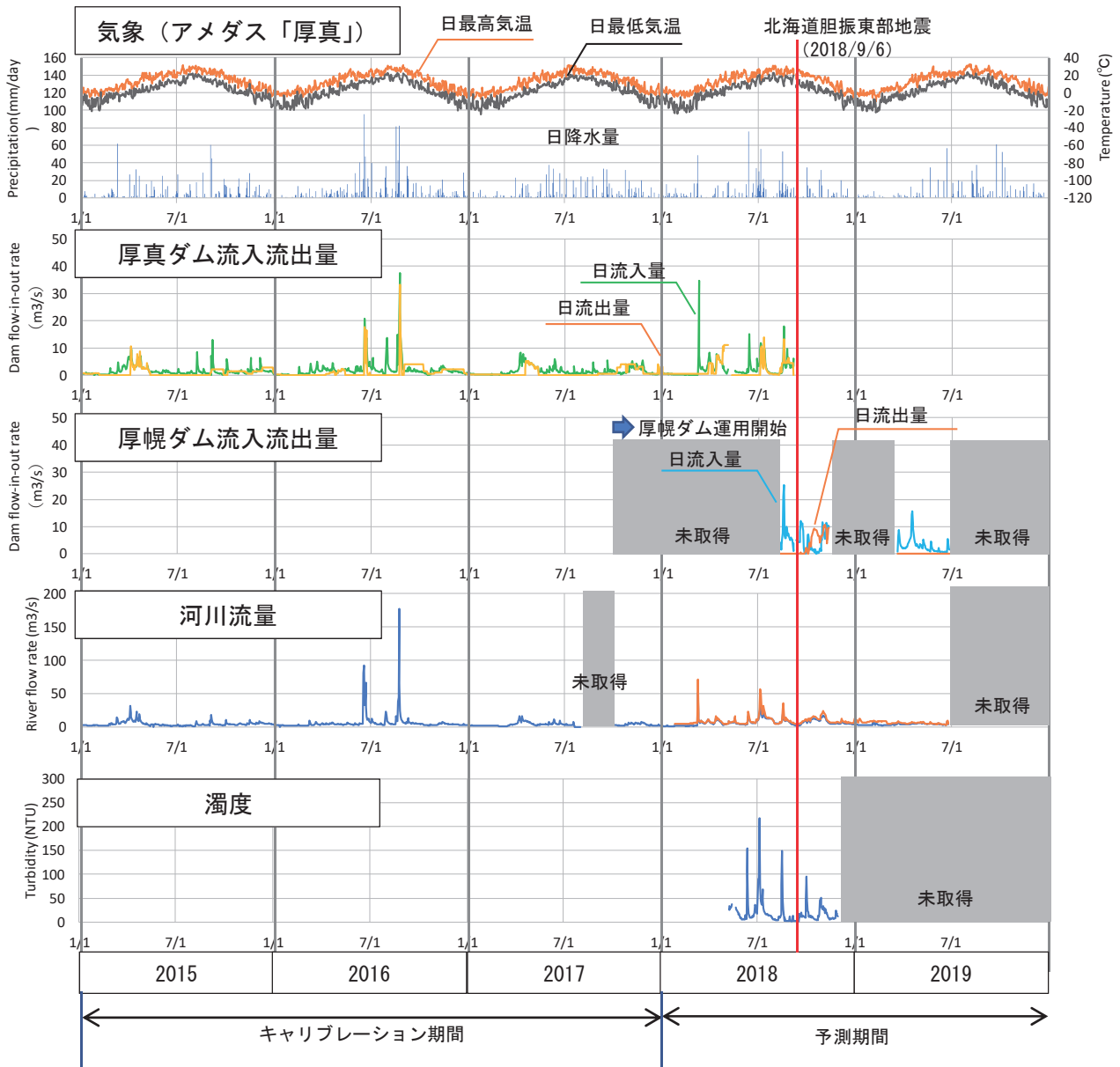


図6-2 2015年～2019年の観測結果

### 6.3.3. SWAT概要

本研究では気象，地形，土地利用，土壌分布状況を主な入力値とするSWATを用いた<sup>3)</sup>．SWATはテキサスA&M大学，Blackland研究所及び米国農務省（USGS）が開発したオープンソースの準分布型水文流出モデルであり，懸濁態が考慮可能で国内で実績がある数少ないシミュレーターの一つである．以下に特徴をまとめる．

a) 領域分割

SWATでは解析対象流域をSubbasinと呼ばれる小領域に分割し、その中を地形傾斜, 土地利用区分, 土壌の分布状況からHRUs ( Hydrological Response Unit) と呼ばれる計算ユニットに分割する. その後, Subbasin毎に各HRUsから河川に供給される水, 物質量を物理式, 経験式を用いて算出する.

b) 水循環機構のモデル化

水循環プロセスのモデル化は大きく5つに分けられる. まず図6-3中①に示す「降水」が発生し, 次に図6-3中②に示す降水量の「地表流出水」と「土壌水」への分離がSCS-CN (Curve Number method)

またはGreen and Ampt Infiltration methodにより行われる. 地表流出分とされた水は修正合理式に従って河道まで移動する. 次に図6-4中③に示すように, Penman-Monteith法により「蒸発散」が, Kinematic strage model法により「側方流動」が, 植生の状況等から「植生による吸い上げ」が, 圃場揚水量, 土壌水分量, 下位の土壌の飽和状況より「下位層への浸透」が残りが「貯留」として定量化される. 次に図6-3中④で示すように土壌最下位層から地下水への浸透水は深層地下水浸透率により「浅層地下水浸透」と「深層地下水浸透」に分離される. 最後に図6-3中⑤に示すように, 浅層地下水に浸透した水は地下水位, 透水係数, 河川までの距離に応じたスピードで河川流量の「基底流出」となる. 深層地下水に到達した水はモデルの中で考慮される水循環には関与しない.

c) SS循環のモデル化

SSの流動は大きく, 図6-3 ( i ) に示す「生産」, 図6-3 ( ii ) に示す「地表流出」や「側方流出」による河道までの移動, 図6-3 ( iii ) に示す「河道内での浸食・浮遊・堆砂・移動」の3つのプロセスに分けられる. まず, 生産プロセスではMUSLE (The Modified Universal Soil loss Equation) 式と地表の浸食性に関する物性値, 地表流量及びピーク流速からSS生産量 (ton/day) が決まる. 次に生産されたSSは地表流, 土壌層からの側方流動及び浅層地下水からの基底流に分割され, それぞれの流速に応じて河川へ到達する. 最後に河道に到達したSSは河川流量の流速に応じて河床に堆積する他, 河道内の浸食作用で発生したSSとともに堆積・再浮遊しながら流下していく.

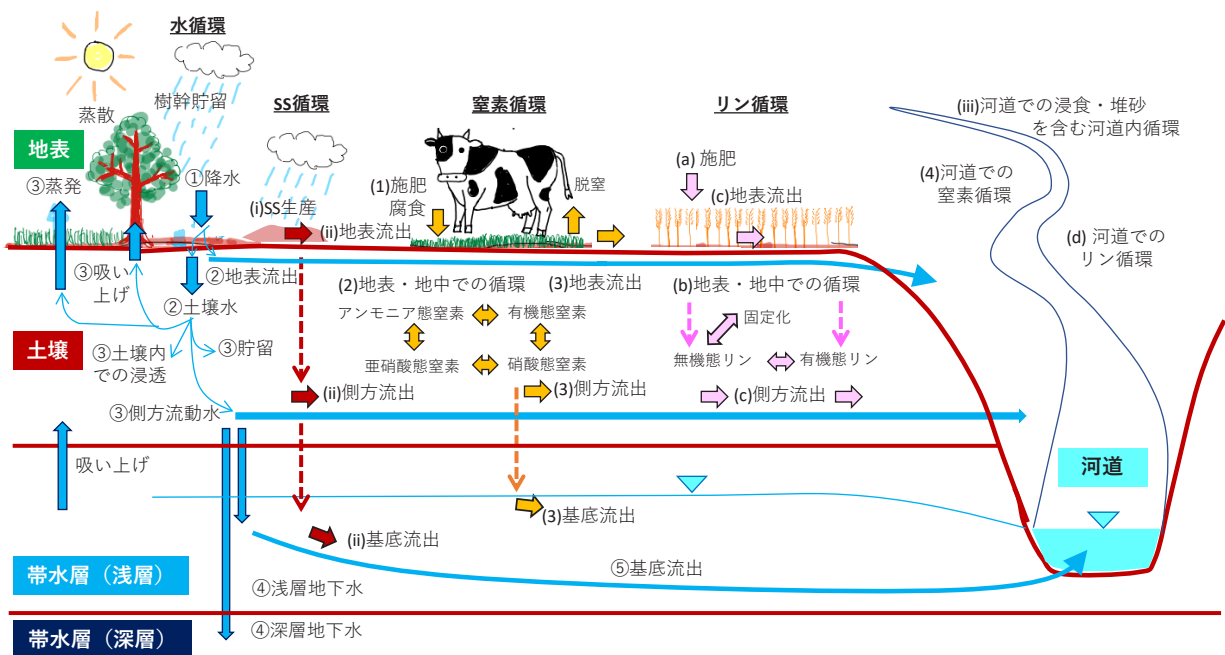


図6-3 SWAT概要図

### 6.3.4. 解析条件

#### (1) 流域のSubbasin分割

図6-4に流域のSubbasin分割図を示す。流域分割数は65，HRUs数は225とした。

#### (2) 基本入力条件

表6-1に数値モデルの基本条件として入力したデータベースとその出典をまとめ、図6-5～図6-7に入力状況を示す。土地利用区分や土壌区分とSWATデータベースの関係性はその特性等を勘案し表6-2, 表6-3のように整理・適用した。

#### (3) ダム運用の考慮

本研究ではダムより下流域の河川流量（計算値）に対し，ダム上流域の河川流出量（計算値）を減じてダム放出量（観測値）を加える方法でダム運用を考慮した。なお，SWATではダムのモデル化を行うReservoirオプションが用意されているが，本研究ではダムの流入量・放出量の記録があることから採用していない。

表6-1 入力データ諸元

項目	データ	出典
地形	10mメッシュ 数値標高モデル	国土地理院 基盤地図情報
土地利用区分	土地利用細分メッシュ データ 平成26年度	国土交通省 国土数値情報
土壌区分	20 万分の1 土地分類基本調査	国土交通省 国土調査
降水量	アメダス「厚真」	気象庁
気温		
風速		
日照時間		
相対湿度		

表6-2 土地利用区分とSWATコードの関係性

コード	分類	SWATコード
0100	田	WETN
0200	その他の農用地	CSIL
0500	森林	FRST
0600	荒地	BSVG
0700	建物用地	URMD
0901	幹線交通用地	URMD
0902	鉄道	URMD
1000	その他の用地	URMD
1100	河川地及び湖沼	WATR
1400	海浜	WATR
1500	海水域	WATR
1600	ゴルフ場	GRAS

表6-3 土壌区分とFAO分類の関係性

区分1	区分2	FAO分類
未熟土	砂丘未熟土壌	Andosols
	湿性粗粒火山抛物体未熟土壌	
	粗粒火山抛物体未熟土壌	
灰色低地土	粗粒灰色低地土壌	GrayFluvisols
	灰色低地土壌	
	細粒灰色低地土壌	
褐色森林土	褐色森林土-粗粒火山抛物体未熟土壌	Cambisols
	褐色森林土II	
褐色低地土	粗粒褐色低地土壌	BrownFluvisols
	褐色低地土壌	
泥炭土	低位泥炭土壌	Histosols

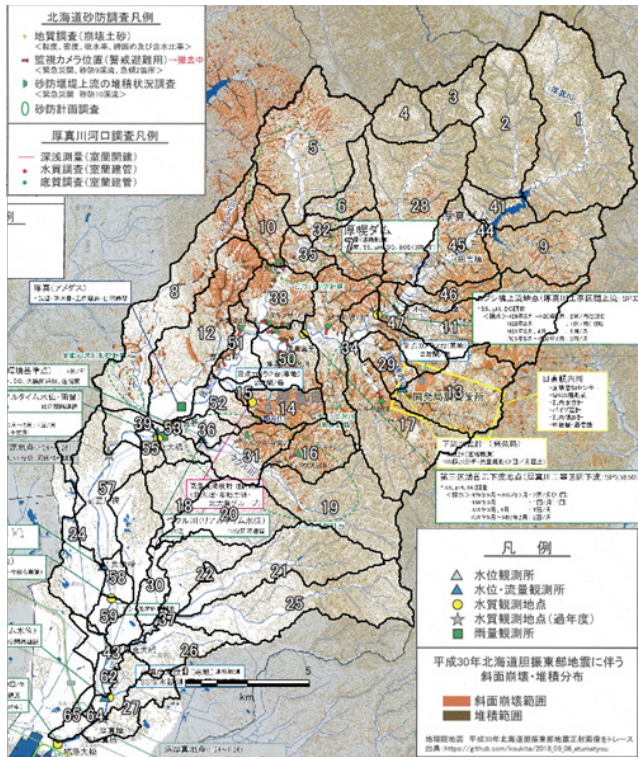


図6-4 流域Subbasin分割図  
 (背景は厚真川土砂流出研究会 観測地点検討図 2019.6.18版)

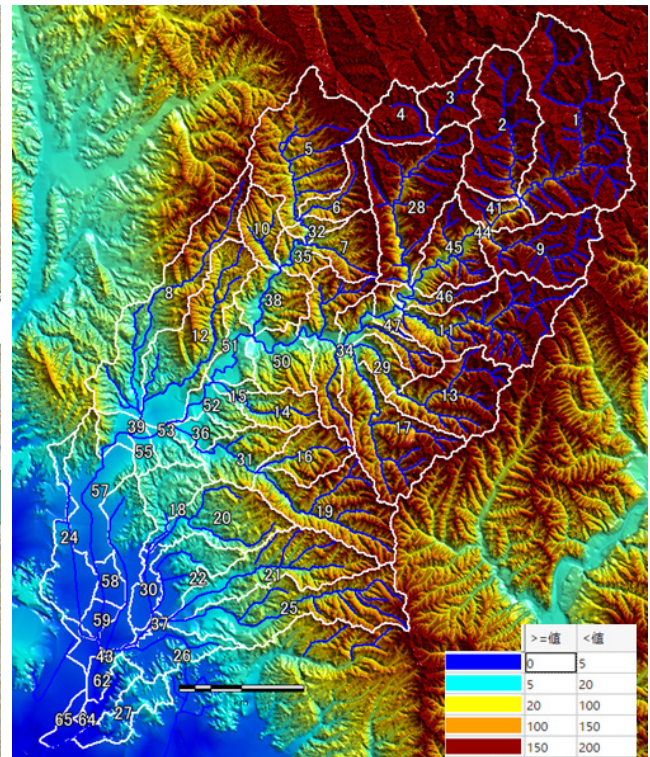


図6-5 厚真川流域地形図  
 (出典：10mメッシュ数値標高モデル 国土地理院基盤地図情報)

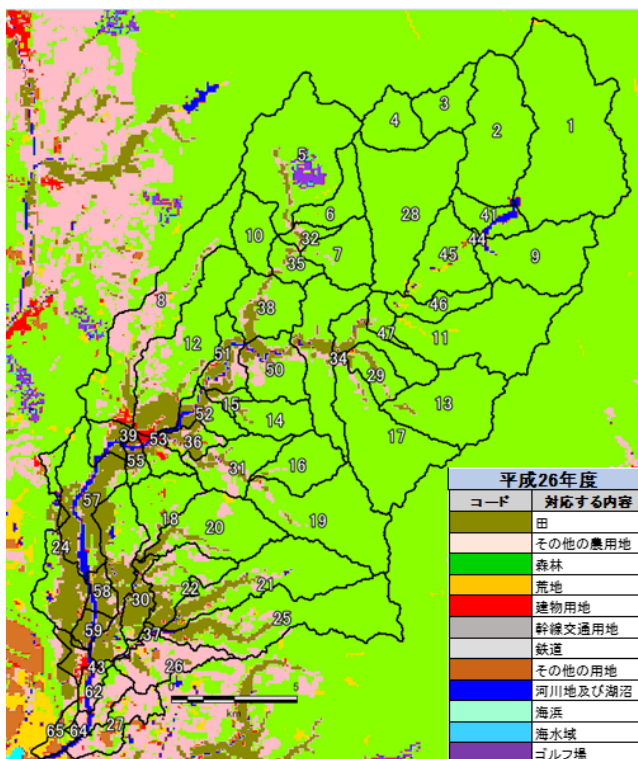


図6-6 厚真川流域土地利用条件図  
 (出典：国土交通省 国土数値情報 土地利用細分メッシュデータ 平成26年度)

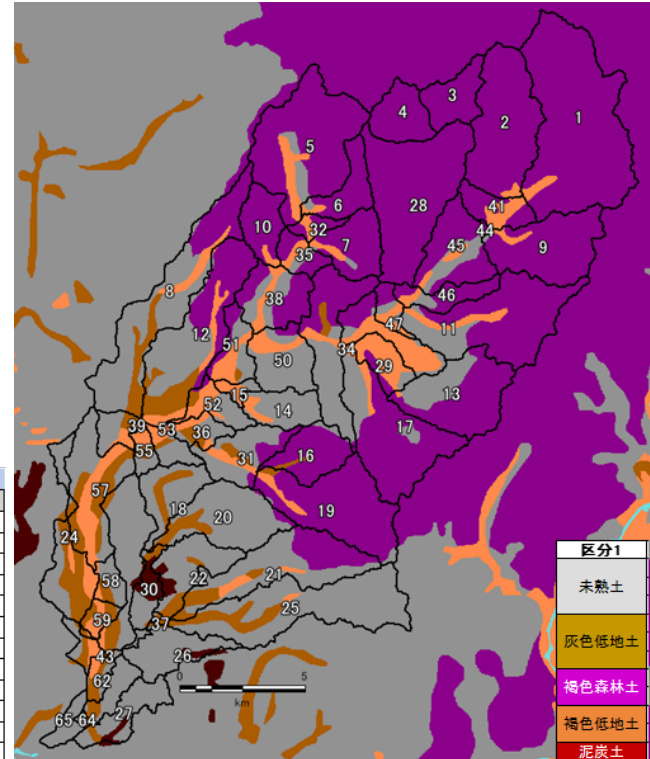


図6-7 厚真川流域土壌分布図  
 (出典：国土交通省 国土調査 20万分の1土地分類基本調査)

## 6. 4. 結果

### 6. 4. 1. 観測データの再現性

図6-8に厚真大橋の河川流量を対象とした現況再現計算結果を観測データと合わせて示す。キャリブレーション期間のうち2015～2016年でNS効率係数が0.65, 2015～2017年で0.6であった。2017年にNS効率係数が低下するのは厚真大橋での河川観測流量が一部取得できていないこと及び厚幌ダム建設中や運用開始直後のダム流入量・放出量のデータが取得できていないことに起因するものと考えられる。

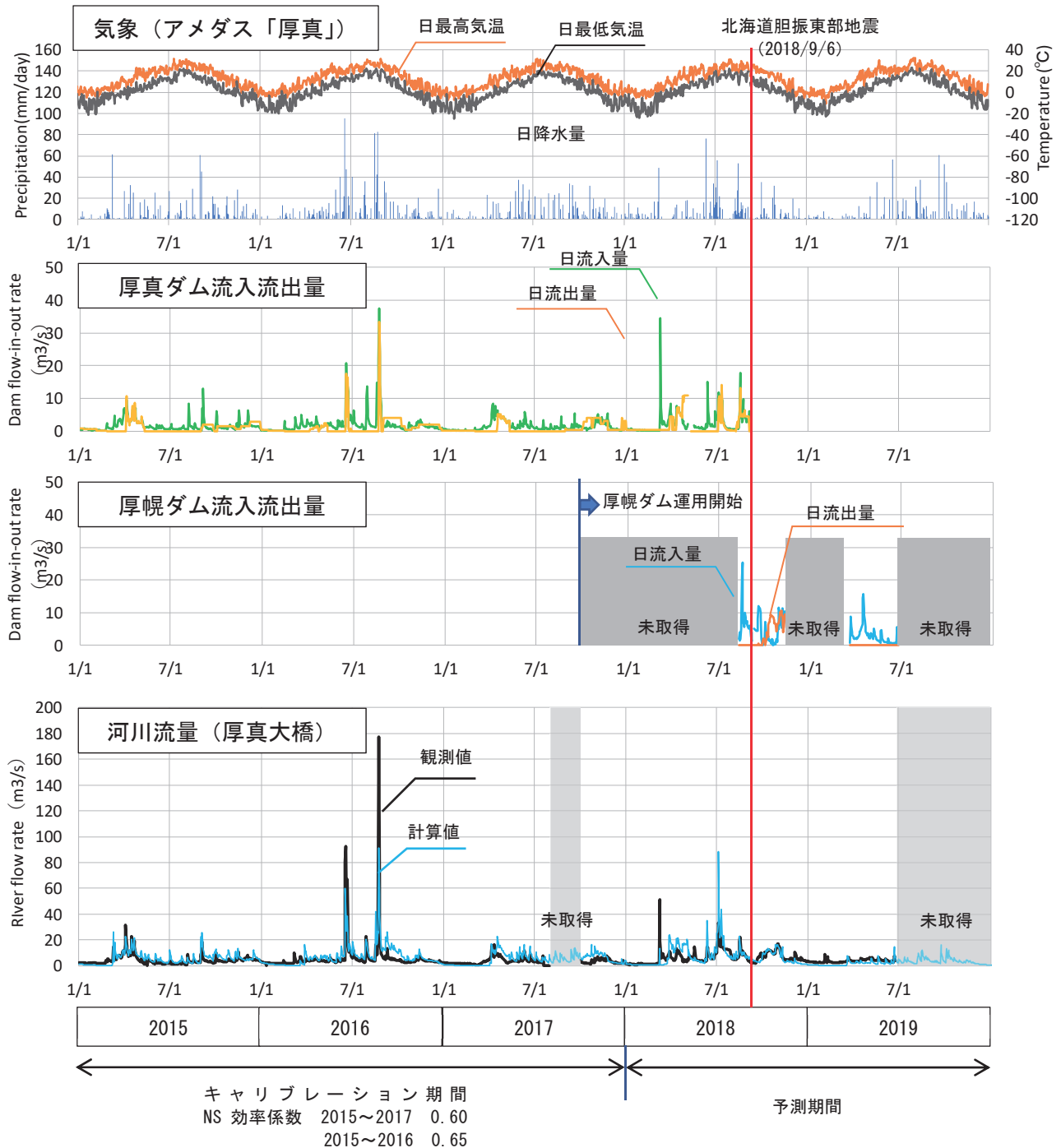


図6-8 現況再現計算結果



#### 6. 4. 2. 水理パラメータ

表6-4にSWATでの主要な水理パラメータと本研究での採用値及び既往文献での採用値を示す。SWATは100以上のパラメータがあり、自動的にパラメータを同定する機能を有する。しかし、この機能を使用した場合は正解パラメータ群が多数出現する「チーズケーキ現象」が発生し<sup>4)</sup>厚真川の水文特性を十分理解できない可能性があったことから、本研究ではSWATパラメータの物理的意味を考慮したマニュアルでの同定解析を実施した。

寒冷地である北海道での先行事例と比較すると、採用値に違いはあるが、降雪や融雪に関するパラメータ、支川の河床粗度係数、深層帯水層への浸透係数は共通して調整を行っている。ただし、先行事例の採用値は設定できる限度幅を超えるものもあり精査が必要である。

表6-4 主要なSWATパラメータと採用値

物性値			本研究		久保ほか <sup>5)</sup> (2015)	soumura et al <sup>6)</sup> (2009)
記号	物理的内容	単位	検討幅	採用値	鷗川, 沙流川	網走川
SFTMP	降雪気温	°C	0.5 ~ 4	3	-2.92	4.2
SMTMP	融雪気温	°C	-5 ~ 2	0	0.25	-
SMFMX	6/21の融雪係数	mm/°C・day	1 ~ 5	1	-	-
SMFMN	12/21の融雪係数	mm/°C・day	0 ~ 4.5	1	-	-
TIMP	雪塊内温度伝達遅延係数	-	0.3 ~ 1	0.3	-	0.2
SNOC0VMX	雪域100%となる積雪深	mm	1 ~ 200	1	651	-
SN050COV	雪域50%となる積雪深	mm	0.5 ~ 0.5	0.5	0.38	-
PLAPS	降水量の高度依存性	mm/km	0 ~ 100	100	2902	-
TLAPS	気温の高度依存性	°C/km	-10 ~ 0	-7	-6.55	-
SOL_K1	最上位の土壤層透水係数	mm/hr	3.6 ~ 360	24.1	-	-
SOL_Z1	最上位の土壤層底面までの深さ	mm	300 ~ 300	300	-	-
SOL_K2	2番目の土壤層透水係数	mm/hr	0.36 ~ 123	12.3	-	-
SOL_Z2	2番目の土壤層底面までの深さ	mm	1000 ~ 1000	1000	-	-
CH_K1	支川の河床堆積物透水係数	mm/hr	0 ~ 36	0.36	-	-
CH_N1	支川の河床粗度係数	-	0.014 ~ 0.14	0.014	0.58	0.4
CH_K2	本川の河床堆積物透水係数	mm/hr	0 ~ 36	0.36	-	-
CH_N2	本川の河床粗度係数	-	0.014 ~ 0.1	0.014	-	-
RCHRG_DP	深層帯水層への浸透係数	-	0.05 ~ 0.5	0.05	0.61	0
SURLAG	地表流の遅延係数	-	2 ~ 15	4	-	0.96
LAT_TTIME	側方流の川までの到達時間 0の場合は土壤の透水係数 で計算される	days	0 ~ 0	0	-2.89	-
GW_DELEY	土壤層から浅層帯水層への 浸透遅延係数	days	2 ~ 31	10	15	-
CN2	SCS Curve Number法で用い る地表流発生 of 閾値	-	50% ~ 100%	50%	100%	-

#### 6. 4. 3. 水・物質流動特性の変化

図6-9に2018年の共栄橋における河川流量の観測値と計算値の経時変化図と共栄地点での濁度観測値と浮遊物質質量計算値の経時変化図を示す。また、図6-10に地震発生前後の河川流量の観測値と計算値の相関図を示し、図6-11に地震発生前後の濁度（観測値）と浮遊物質質量（計算値）の相関図を示す。図6-9の河川流量比較図及び図6-10の相関図では、地震発生前後で河川流量の変動パターンに明瞭な差は

見られない。図6-9において2018年9月以降に河川流量と降雨との関係が変化しているが、計算値もこれを再現できていることから、厚幌ダムによる貯水と放出量制御の影響が出ているものと推定される。一方で、図6-11の観測濁度と計算浮遊物質負荷量の関係では地震前後での明瞭な違いは見られないが、図6-9の負荷量の経時変化図では地震発生後の10月末から11月初旬の降雨後の負荷量について解析値に比べ観測値は負荷が減少しにくい傾向がみられる。

この傾向をより詳細に分析するためL-Q式の作成を行った。図6-12の地震前後の流量と濁度観測結果から作成した地震前後のL-Q式を示し、図6-13に流量とSS解析値から作成したL-Q式を示す。濁度とSSの違いがあるため一概には比較できないが、それぞれのL-Q式の傾き、切片に大きな差はない。しかし、決定係数は解析値から算出したL-Q式、地震前の観測値から算出したL-Q式が0.6であるのに対し、地震後の観測値から算出したL-Q式は0.35と低くなっている。これは地震前後でのL-Q式は大きく変わっていないが、地震後はL-Q式と観測値にずれが生じていることを示す。また、図6-14では河川流量が10m<sup>3</sup>/s以上の場合の地震前後のL-Q式の違いに比べ、10m<sup>3</sup>/s未満の地震前後のL-Q式が大きく違っている。これは河川流量が10m<sup>3</sup>/s未満で地震前後のL-Q式に違いが生じていることを示す。河川流量10m<sup>3</sup>/s未満での濁度の平均値が地震前の8.4に対し、地震後は9.3であることを考慮すると地震後は流量が小さい領域で濁度が上昇している可能性を示している。

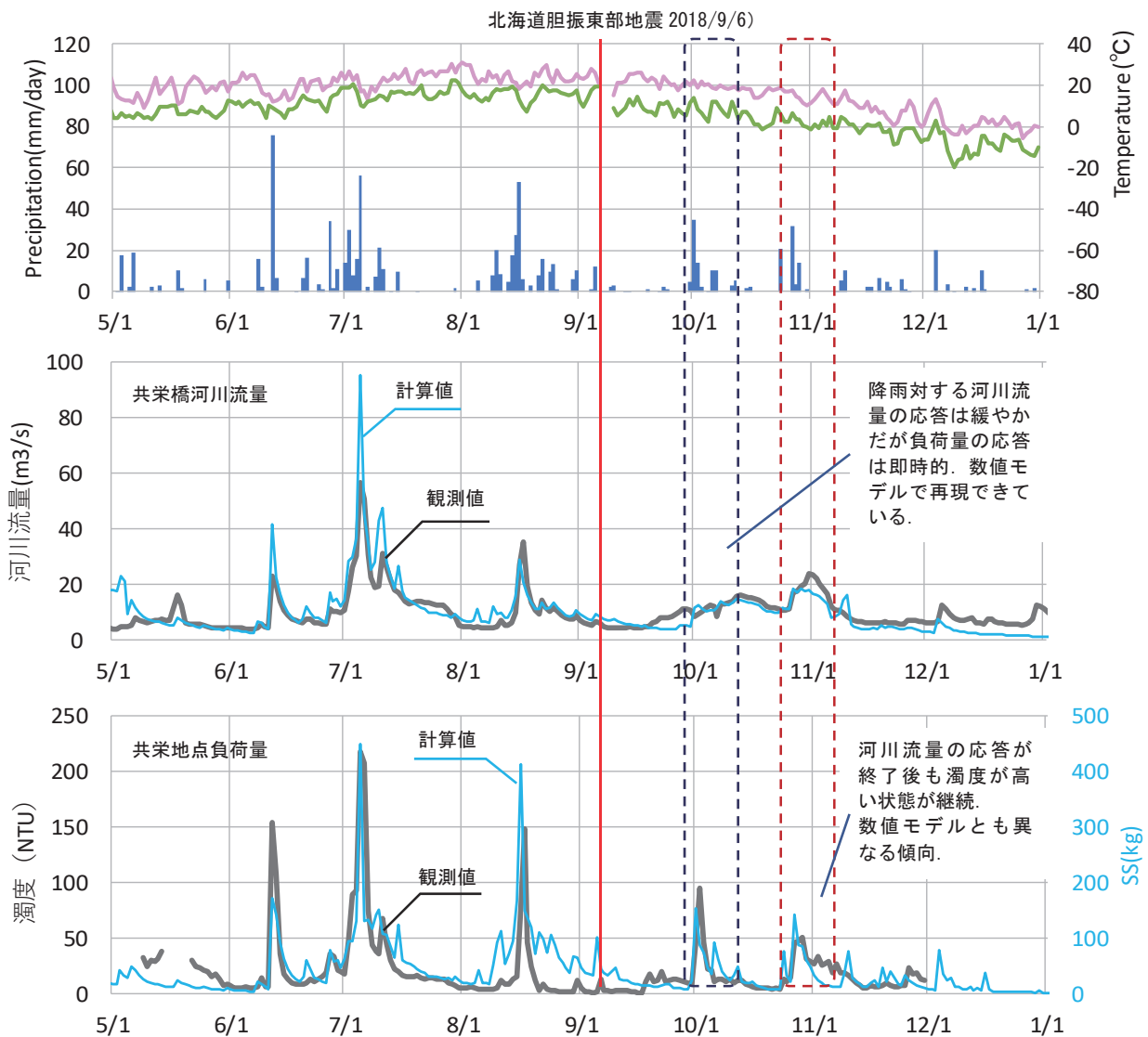


図6-9 2018年の河川流量及び負荷量の経時変化比較図

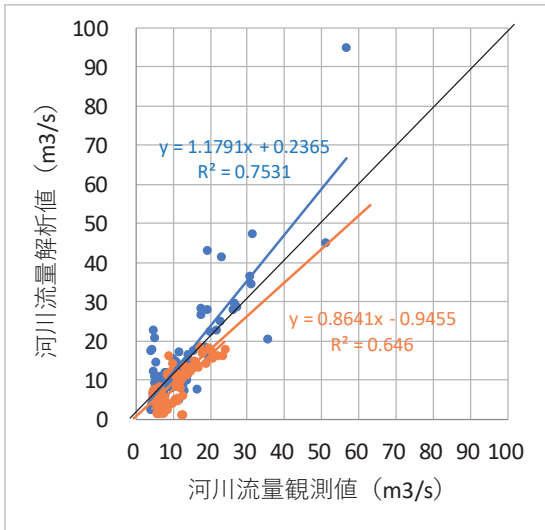


図6-10 地震前後の観測河川流量と計算河川流量の関係

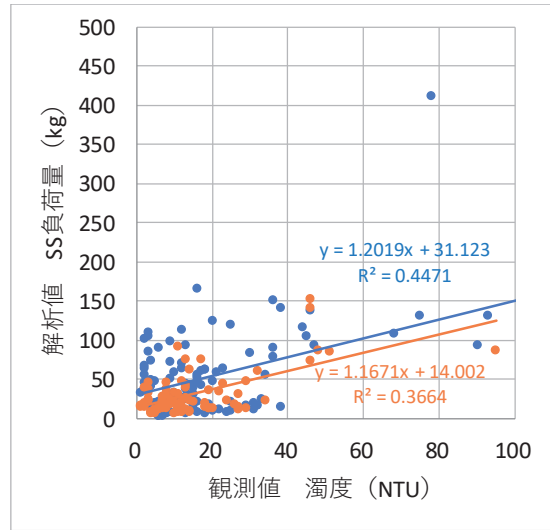


図6-11 地震前後の観測濁度と計算浮遊物質負荷量の関係

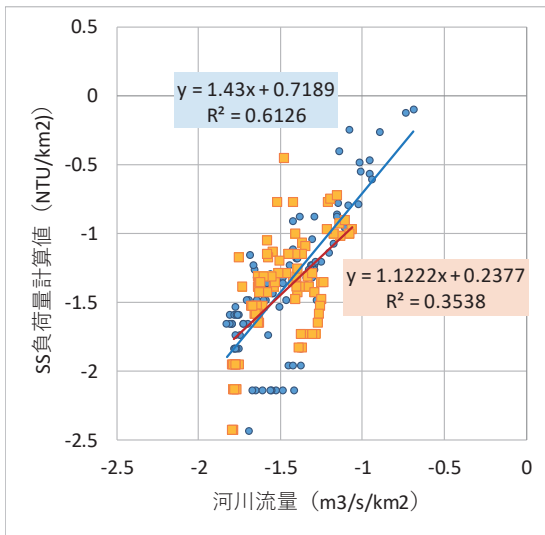


図6-12 観測結果から作成した地震前後の流量と濁度の関係 (L-Q式)

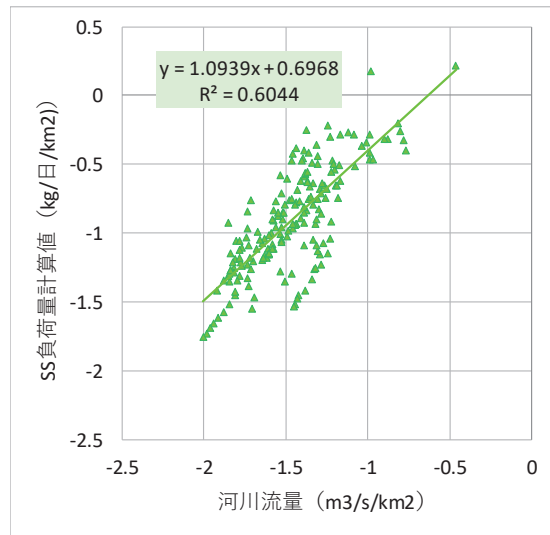


図6-13 解析結果から作成した流量とSSの関係 (L-Q式)

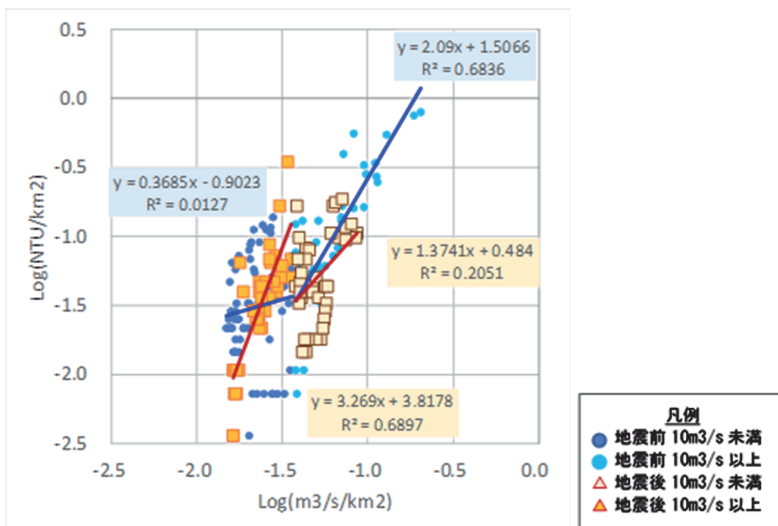


図6-14 河川流量10m³/sで分離した地震前後のL-Q式

## 6.5. 考察

- ・本研究では地震発生前後での土砂輸送特性の変化の一部をとらえている可能性はあるが、明瞭な変化は抽出できなかつた。変化の有無も含めた検討を行う上では以下に示す調査・検討が必要と考える。
  - 1) 検証期間の延長  
本研究では地震発生日の前後4か月での検証であり、季節変動や厚幌ダムの影響を完全には分離できていない。これらは検証期間を延長することである程度解消するものと考えられる。
  - 2) 検証データの収集・精査  
厚真川本川の河川流量や負荷量へは厚真ダムや厚幌ダムの影響が大きく、これらの運用データを正確に考慮した検討が必要である。また、濁度とSSの関係についての調査が必要と考える。
  - 3) 検証位置の追加（上流側での検証）  
斜面大規模崩壊により河川への負荷は大きくなっているものと推定されるが、粒径が大きな浮遊物質は大きくは移動せずに河床に堆砂している可能性がある。つまり共栄地点付近では土砂輸送特性の変化がとらえにくい可能性がある。このためより上流側地点での負荷量観測結果を入手し検証を行う必要があると考える。
- ・本研究で採用したSWATへのダム運用考慮方法により、厚幌ダムの運用が河川流動特性に大きな影響を与えていること及びそれを数値モデルにより再現できることが明らかとなった。これは厚幌ダムの目的である環境水の維持の効果やフラッシュ掃流の効果を実測評価できることを示す。今後検証を進める中で合わせて明らかにしていく。

## 6.6. 結論

本研究ではSWATモデルを用いて地震発生前後の流動特性、土砂輸送特性の変化を評価することを試みた。得られた知見は以下のとおりである。

- ・ダム運用を考慮することで現況の流動特性、土砂輸送特性を数値モデル上で再現した
- ・流動特性は大きく変化していないが土砂輸送特性が一部変化している可能性を示した。
- ・今後検証期間の延長、検証データの収集検証、検証位置の追加等により、地震による流動特性、土砂輸送特性の変化をより詳細に評価できるものと考えられる。

## 謝辞

研究の遂行にあたり、北海道室蘭建設管理部治水課に情報提供頂いた。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 厚真川観測地点検討図2019.6.16版, 厚真川土砂流出研究会, 2019.
- 2) ダム便覧, 一般財団法人日本ダム協会, <<http://damnet.or.jp/Dambinran/binran/TopIndex.html>>
- 3) SWAT Input / Output Documentation version 2012, Texas Water Resources Institute, 2012.
- 4) Karim C. Abbaspour, 2015, SWAT-CUP SWAR Calibration and Uncertainty Programs, 2015.
- 5) 村上泰啓, 水垣滋, 久保まゆみ, 森貞和仁, SWATモデルを用いた沙流川流域の物質循環推定について, 平成24年度砂防学会研究発表会, 2012.
- 6) Somura, H. et al., Sensitivity analysis of hydrologic and suspended sediment discharge in the Abashiri River Basin, Hokkaido Region, Japan international agricultural engineering journal 2009, Vol. 18, Issue (01-02), 27-39, 2009.