

# 地質条件が異なる流域の流出と水温に気候変動が与える影響の研究

Research of effects of climate change on runoff and water temperature in watersheds with different geological conditions

室蘭工業大学

○学生員

武田篤弥 (Atsuya Takeda)

## 1. はじめに

平成 25 年から平成 26 年にかけて公表された IPCC 第 5 次評価報告書 (AR5) では「気候システムの温暖化には疑う余地はない」と結論付けられており、気候変動の影響はすでに顕在化しつつある<sup>1)</sup>。

今後、気温上昇により生じうる河川等での水温上昇により、内水面漁業や生態系などに影響が出ることが懸念される。このような地球温暖化に伴う気候変動の影響は、緯度の高い積雪寒冷地で、より顕著に出るとの見解もある。例えば北海道を代表する貴重な水産資源であるサケ科魚類の生息環境が損なわれれば、健全な生態系はもとより地域経済にも影響が及ぶ可能性がある。

工藤ら<sup>2)</sup>は、1 km 格子の統計的ダウンスケーリングデータ (Statistical Downscaling, 以下、1 kmDS データ)<sup>3)</sup>、LoHAS (Long-term Hydrologic Assessment model considering Snow process, 以下、LoHAS)<sup>4)</sup> 及び分布型流出モデルを用いて、空知川上流部、太平橋地点の集水域全体の流出量及び水温の推定を行い、気候変動による水温の上昇でイトウ (*Hacho perryi*) の生息域が上流部に移行する可能性を示している。しかし、地質特性に応じて流出や水温は影響を受けるため、それらが気候変動による外力のみに追従するかどうかの検証は十分ではない。例えば、水温の安定している地下水流出成分が多ければ、気温上昇の影響が緩和されることも考えられる。

以上を踏まえ、本研究では地質特性の異なる小流域で観測した結果から、水循環や水温に関するモデルの構築と精査を行った。加えて、そのモデルで種々の条件が複合した流域末端部の太平橋地点の流量・水温の再現検証を行い、流量及び水温の気候変動による応答についても分析した。

## 2. 研究手法

### 2. 1 研究対象箇所の概要

対象河川は、北海道の中央部に位置する石狩川水系空知川 (幹線流路延長 194.5 km, 流域面積 2,618 km<sup>2</sup>) とした。空知川は、その源流を上ホロカメトック山の南斜面に発しており、峻険な山間を経てルーオマンソラプチ川を合流し、太平橋 (流域面積 380.62 km<sup>2</sup>) を経て金山ダム貯水池 (かなやま湖) に流入している。

本研究では、空知川上流部におけるイトウ (*Hacho perryi*) の主な生息域であり、上流に農業等の土地利用がない二次支川の 4 流域を対象とした。それぞれの地点と地質分類を図-1 に示す。各小流域の検証地点を St.4 (流域面積 15.33 km<sup>2</sup>)、St.101 (流域面積 14.25 km<sup>2</sup>)、St.103 (流域面積 20.19 km<sup>2</sup>)、St.105 (流域面積 7.02 km<sup>2</sup>) と称する。また、地質分類図に示すように各小流

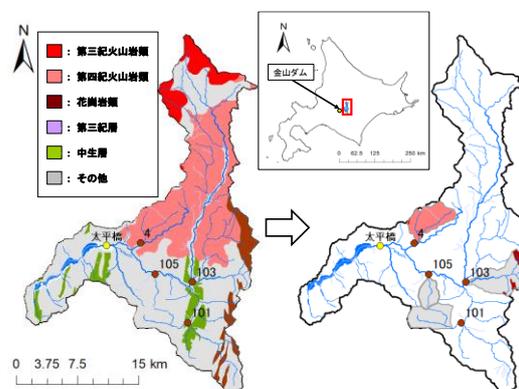


図-1 検証流域の概要と地質構成

域は、火山性地質 (St.4)、非火山性地質 (St.101, St.103, St.105) で特徴づけられる。以降、St.4, St.101, St.103, St.105 の流域はまとめて小流域と称する。

### 2. 2 水温, 水位データ

分布型流出モデル計算値の再現性を検証するため、小流域については、著者の石山らが検証流域で観測している 1 時間ごとの水位及び水温データ (2017 年 7 月~2018 年 10 月) を利用した。

### 2. 3 観測流量の推定

本研究では石山らが計測した水位データ (2017 年 7 月~2018 年 10 月) を基に、以下の方法で流量を推定した。

- 2019 年 10 月 11 日に現地測量を行い、現況流量の推定に必要な水深、河道断面等を計測した。
- 測量の際に法肩のポイントを基準高とし、図-2 に示す各断面で水深に対して、図-3 のように潤辺長  $S$  と流積  $A$  を推定できる関係式を構築する。
- 2019 年 10 月 11 日の各地点の計測時刻及び水位データと測量で得た基準高からの比高を照合して、各時点での水位に対する水深が算出できるようにする。
- 3) で算出された水深を 2) で構築した式に与え、流積  $A$ 、潤辺長  $S$  から径深  $R$  の時系列 (時間値) を算出し、下記のマンニング式より、流量  $Q$  を算出する。

$$Q = \frac{1}{n} AR^{2/3} i^{1/2} \quad (1)$$

ここで、 $R$ : 径深 (m)、 $i$ : 河床勾配で Google Earth<sup>5)</sup> の標高値を参照し、表-1 のとおりとした。 $n$  はマンニングの粗度係数で、河道を「非常に不整正な断面」と分類し 0.085 とした<sup>6)</sup>。

### 2. 4 1 kmDS データ

本研究では、1 km 四方の 3 次メッシュ毎に構成された北海道全域の気象情報 (降水量、気温等) を用いる。

小流域及び太平橋地点における河川水温及び流量の現況再現については、表-2 のデータを距離重み法で空間内挿して空間解像度を 5 km 四方から 1 km 四方にダウン

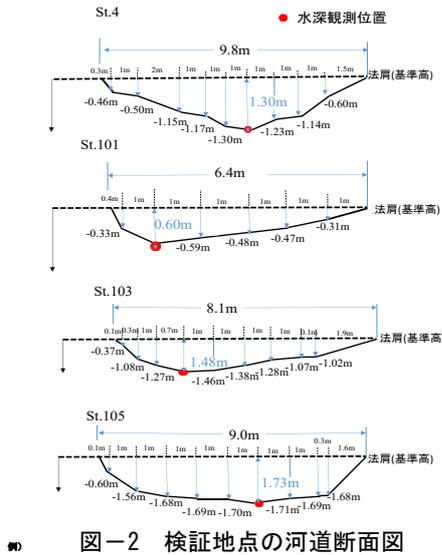


図-2 検証地点の河道断面図

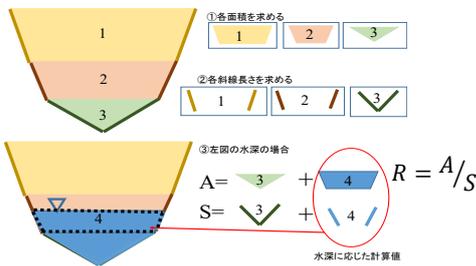


図-3 潤辺長(S), 断面積(A), 径深(R)の算出

表-1 検証地点の河道幅と河床勾配

	河道幅(m)	河床勾配
St.4	9.8	1/78
St.101	6.4	1/46
St.103	8.1	1/400
St.105	9.0	1/85

スケリングしたもの(以後、1 kmDS 現況データと称する)を使用する。

小流域及び太平橋地点の河川水温及び流量の将来予測については、表-3 に示すデータ及びモデルを用いて上田ら<sup>3)</sup>によって作成された現在気候と将来気候の1 kmDS データを使用した。以降、現在気候を対象としたものを1 kmDS 現在気候データ、将来気候を対象としたものを1 kmDS 将来気候データと称する。また、本報告における将来気候の結果は表-3 の海面水温3パターン(SST1~SST3)を平均化したものとしている。

### 2.5 大気陸面過程考慮した水文諸量の推定

蒸発散量、降雪量、積雪量、融雪量は、流域水循環の構成要素であり、流量及び水温を推定するために必要な水文諸量である。LoHAS では1 kmDS データを入力値とし、標高、緯度経度、LAI、バルク輸送係数、蒸発効率、アルベド、受光係数比、降雪密度、積雪密度などの要因を考慮して金山ダム流域内の降雨量、融雪量、蒸発散量を推定する。LoHAS の模式図は図-4 左上に示す。

### 2.6 分布型流出モデルによる水文諸量の流出計算

流出量の推定には、図-4 左下の①に示す白谷ら<sup>7)</sup>による斜面流出、河道追跡を組み合わせた分布型流出モデルを適用する。前述のLoHAS で算出した降雨量、降雪量、融雪量、蒸発散量と検証流域の地質情報を勘案し、直列4段タンクモデルを用いて各メッシュの流出量を推

表-2 1 kmDS 現況データの諸元

空間解像度・時間解像度	5km・1時間
対象期間	2016.9~2018.12
使用する気象要素	気温、降水量※、風速、相対湿度、全総雲量、下層雲量、気圧
	※降水量は空間解像度1km

表-3 将来変化推定に用いる1 kmDS データの諸元

MRI-NHRCM20 (気候変動予測モデル)		
	現在気候	将来気候
空間解像度・時間解像度	20km・1時間	20km・1時間
対象期間	1984.9~2004.8	2080.9~2100.8
将来予測シナリオ	-	RCP8.5
海面水温パターン	HadISST	SST1/SST2/SST3
積雲対流スキーム	Yoshimura Scheme (YS)	-
使用する気象要素	気温、降水量、風速、相対湿度、全総雲量、下層雲量、気圧	-
DSIRA-55 (領域ダウンスケールモデル)		
空間解像度・時間解像度	5km・1時間	-
対象期間	1984.9~2004.8	-
	気象庁 メッシュ平年値	-
空間解像度・時間解像度	1km・月	-
対象期間	1984.9~2004.8	-

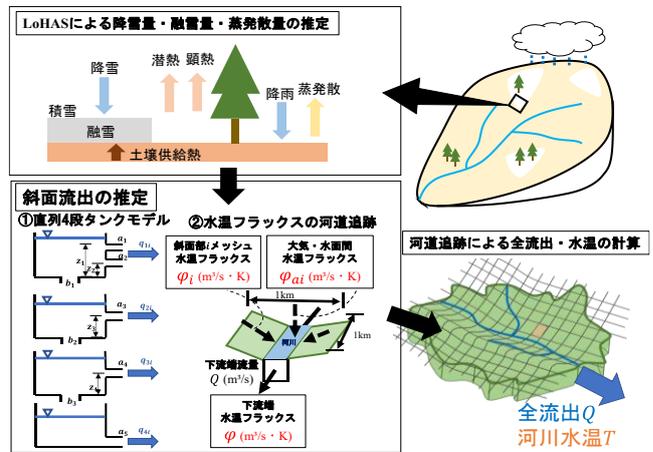


図-4 流出量、水温推定モデルの模式図

定し、kinematic wave 式によって上流端の流出量を下流端まで河道追跡し、流域全体の流量を計算する<sup>2)</sup>。

直列4段タンクモデルのパラメータについてはDuanら<sup>8)</sup>によるSCE-UA法で探索し、さらに感度分析の大きいパラメータを試行錯誤で調整することで最適値を求めた。

### 2.7 水温フラックス河道追跡による河川水温の推定

河川水温の推定は、既往文献<sup>9)</sup>を参考にLoHASとタンクモデルの結果に基づき、図-4の左下の②に示すような各流出成分流量と水温の積を水温フラックスとして与える手法を用いた。式(2)~(6)に斜面部*i*メッシュにおける各流出成分の水温フラックスの推定式を示す。

$$\varphi_{1i} = q_{1i}(T_a + 273.15) \quad (2)$$

$$\varphi_{2i} = q_{2i}(0.3274T_a + 7.631 + 273.15) \quad (3)$$

$$\varphi_{3i} = q_{3i}(0.725T_a + 0.486 + 273.15) \quad (4)$$

$$\varphi_{4i} = q_{4i}(T_g + 273.15) \quad (5)$$

$$\varphi_i = \varphi_{1i} + \varphi_{2i} + \varphi_{3i} + \varphi_{4i} \quad (6)$$

ここで、 $\varphi_{1i}$ : 表面流出フラックス ( $\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{K}$ )、 $\varphi_{2i}$ : 表層流出フラックス ( $\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{K}$ )、 $\varphi_{3i}$ : 中間流出フラックス ( $\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{K}$ )、 $\varphi_{4i}$ : 地下水流出フラックス ( $\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{K}$ )、 $\varphi_i$ : 斜面部*i*メッシュ水温フラックス ( $\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{K}$ )を示す。また、 $T_a$ : 気温 ( $^{\circ}\text{C}$ )、 $T_g$ : 地下水温 ( $^{\circ}\text{C}$ )、 $q_{1i}$ : 表面流出量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )、 $q_{2i}$ : 表層流出量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )、 $q_{3i}$ : 中間流出量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )、 $q_{4i}$ : 地下水流出量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )である。

式(2)に関しては、表面流出成分の水温は気温と平衡していると仮定して計算している。また、式(5)の地下水流出成分の水温は地下水温の影響が大きいと考え、(地独)北海道総合研究機構・森野氏より提供いただいた富良野市の地下水温データより、 $T_g = 10.2\text{ }^\circ\text{C}$ と一定値で与えた。式(3)の表層流出成分の水温については、文献<sup>10)</sup>を参考に、気温と浅い地下水温の相関式から推算した。さらに、式(4)の中間流出成分の水温については水温を $\varphi_{1i}$ ,  $\varphi_{2i}$ ,  $\varphi_{4i}$ から逆算し、気温との相関式を作成して求めた。

以上のように求められた斜面部  $i$  メッシュ水温フラックス $\varphi_i$ と、水面熱収支式に基づく大気・水面間の水温フラックス $\varphi_{ai}$  ( $\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{K}$ )の和を流量と同様に kinematic wave 式で河道追跡し、下流端水温フラックス $\varphi$  ( $\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{K}$ )を求めた。そして、求めた $\varphi$ を下流端流量 $Q$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ )で除すことで河川水温を推算した<sup>2)</sup>。

### 3. 解析結果と考察

#### 3.1 LoHASによる水文諸量の推定

金山ダム流域における LoHAS の解析結果を表-4 に

表-4 LoHASによる金山ダム流域の水文諸量推定

	LoHASによる推定値(2017)	工藤らによる推定値(2014)	観測値
①年間降雨量(mm)	938	860	-
②年間降雪水量(mm)	573	663	-
③年間蒸発散量(mm)	456	477	-
年間流出高(mm)	1,055	1,045	1,071
①+②-③			

表-5 本研究で採用したタンクモデルのパラメータ

	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$z_1$	$z_2$	$z_3$	$z_4$
火山性地点	0.283	0.052	0.232	0.127	0.082	0.259	0.084	0.058	85.5	48.4	55.7	53.3
非火山性地質	0.433	0.150	0.116	0.018	0.060	0.289	0.175	0.022	94.9	42.2	39	7.4

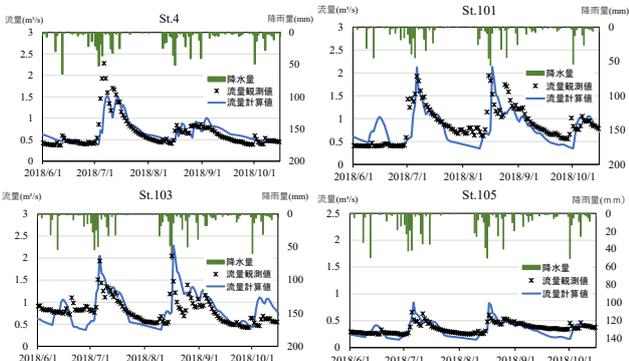


図-5 小流域流量の現況再現結果

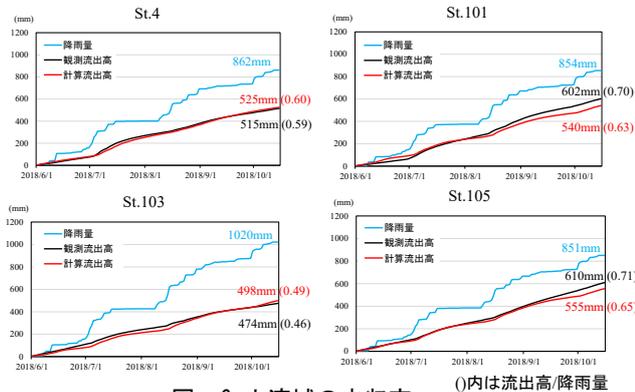


図-6 小流域の水収支

( )内は流出高/降雨量

示す。この結果に関しては工藤ら<sup>3)</sup>による2014年の推定値や2017年の金山ダム流域の年間観測流出高と同様の結果を示しており、LoHASの妥当性を確認できた。

#### 3.2 流出モデルによる現況再現

1 kmDS 現況データを用いて小流域及び太平橋地点流量及び水温の現況再現を行った。4段タンクモデルのパラメータは2.6節に示す方法で表-5のように設定した。結果を見ると火山性地質は $a_3$ ,  $a_4$ ,  $a_5$ ,  $b_3$ が非火山性地質より高い値となっており、地下水の浸透及び流出が多いという特徴を示している。

##### (1) 小流域の流量・水温の現況再現

小流域における流量の現況再現結果を図-5に示す。この結果から、計算値が観測値をほぼ再現していることが分かった。また、8月末の出水に注目すると火山性地質(St.4)では非火山性地点よりも流量の上昇が緩やかである。これは火山性地質の浸透性が大きく、流出が平滑化されることが原因と考えられる。次に、水文学の累積値を図-6に示す。この結果、降水量に対する流出量の比(流出率)が5割~7割程度となっており、先行研究<sup>2)</sup>と同様な傾向を確認できた。

小流域における水温の現況再現結果は図-7に示す。流量と同様に計算値は観測値に近く、再現性が確認できた。水温を分析していくと、火山性地質(St.4)は非火山性地質よりも水温が安定していることがわかる。これは火山性地質では水温の安定している地下水流出成分が多いためと推測される。

##### (2) 太平橋地点の流量・水温の現況再現

さらに、様々な地質条件が複合している太平橋地点の流量及び水温について検証した。太平橋地点の現況再現結果を図-8に示す。流量及び水温ともに計算値は観測値の傾向を再現している。

#### 3.3 河川水温の将来変化の推定

1 kmDS 現在気候データ及び1 kmDS 将来気候データを用いて、小流域・太平橋地点の河川水温の推定を行い、

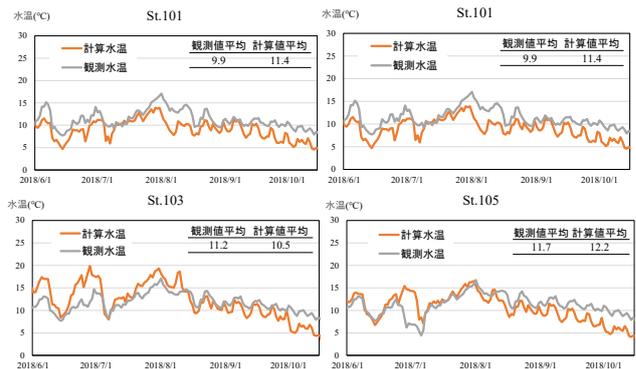


図-7 小流域河川水温の現況再現結果

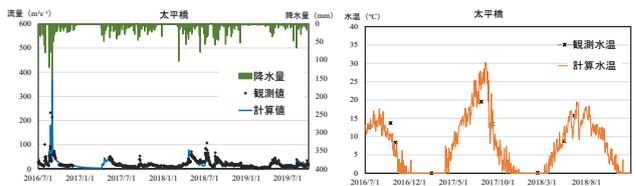


図-8 太平橋地点の現況再現結果 (左: 流量, 右: 水温)

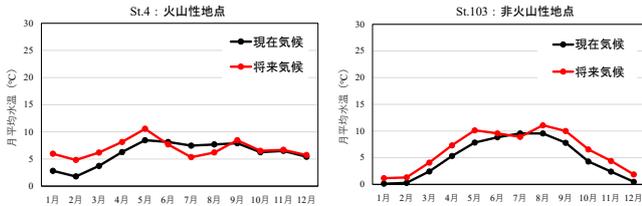


図-9 小流域河川水温の将来変化

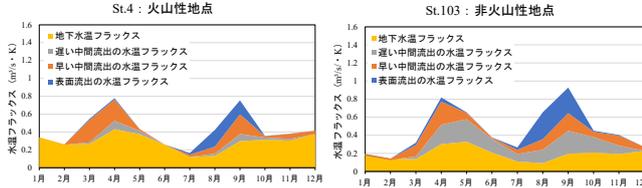


図-10 将来気候の流出成分別水温フラックス

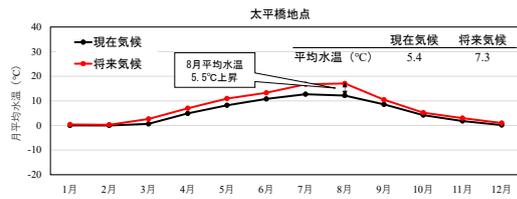


図-11 太平橋地点河川水温の将来変化

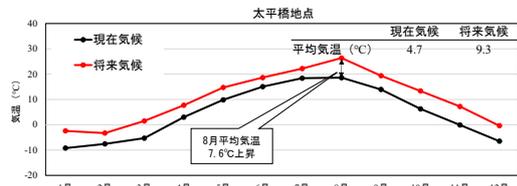


図-12 太平橋地点気温の将来変化

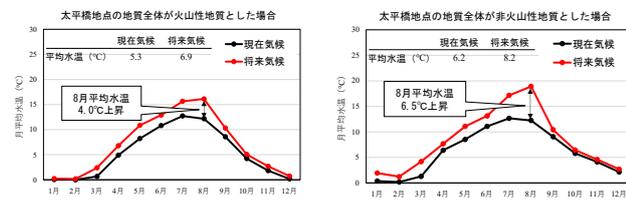


図-13 地質特性と河川水温将来変化の感度分析

将来変化を推定した。

(1) 小流域の水温の将来変化

火山性地点 (St.4) と非火山性地質 (St.103) における河川水温の将来変化を図-9 に示す。2080年9月～2100年8月の月平均値で見ると、火山性地質の水温は安定しており、非火山性地質ほど大きな水温変動が起きていなかった。また、火山性地質、非火山性地質ともに7月に水温が落ち込む様子が確認された。

その理由を探るため、図-10 に同期間における流出成分別の水温フラックスを図示する。この結果から、初夏には流量が減少し、地下水流出成分の寄与が大きくなることで水温が低下すると推察できる。

(2) 太平橋地点の流量、水温の将来変化

太平橋地点における河川水温の将来変化を図-11 に、気温の将来変化を図-12 に示す。現在気候と将来気候を比較すると、年平均気温が4.6℃上昇するのに対して年平均水温は1.9℃上昇している。特に、最も気温が高くなる8月には月平均気温が7.8℃上昇しているのに対し、月平均水温は5.5℃上昇していた。

また、太平橋流域全体が全て火山性地質であると仮定

した場合、全て非火山性地質であると仮定した場合の河川水温の将来変化を、感度分析的に推定した結果を図-13 に示す。この結果から、地質の違いによって気候変動による水温上昇が年平均では1.3℃、ピークの8月に関しては2.5℃抑制されることが推算された。

以上のような知見から、気候変動による積雪寒冷地河川の冷水性魚類の生息環境の影響推定に活用することなどが期待できる。

4. まとめ

本研究より得られた結果を以下に示す。

- 1) 地質特性の違いによる流出の違いを反映した流出量及び水温の推定手法が提案された。
- 2) 火山性地質の流域では、気温の影響を受けにくい地下水流出成分の占める割合が多いため、気候変動による影響が緩和されることがわかった。

謝辞：本研究は国土交通省砂防技術研究開発公募（河川生態）の助成を受けて実施された。（地独）北海道総合研究機構の石山信雄氏、森野佑助氏には、データ提供等で多大なご協力を頂いた。また、室蘭工業大学の中津川誠教授には研究を進めるうえで多くのご助言を頂いた。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 環境省：日本国内における気候変動による影響の評価のための気候変動予測について（お知らせ）別途資料，2014。https://www.env.go.jp/press/files/jp/24661.pdf（閲覧日：2020/12/17）
- 2) 工藤啓ら：地球温暖化シナリオに基づく寒冷地河川における水温変化の評価，土木学会論文集 B1（水工学），Vol.74, No.5, I\_37-I\_42, 2018。
- 3) 上田聖也ら：北海道を対象とした流域水収支の検証に基づく高解像度ダウンスケーリング気象情報の推定，土木学会論文集 B1（水工学），Vol.76, No.2, I\_25-I\_30, 2020。
- 4) 口澤寿ら：熱・水収支を考慮した流域スケールの積雪と蒸発散の推定，北海道開発土木研究所月報第588号，pp.19-38, 2002。
- 5) Google Earth，https://www.google.co.jp/intl/ja/earth/（閲覧日：2020/12/12）
- 6) 土木学会：水理公式集，昭和60年版，pp.11, 1980。
- 7) 臼谷友秀ら：流域貯留量推定方法のためのモデルパラメータの一般化に関する研究，土木学会論文集 B1（水工学）Vol.70, No.4, I\_355-I\_360, 2014。
- 8) Duan, Q. et al. : Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models, Water Resources Research, Vol.28, no.4, pp 230-244, 2002。
- 9) 新井正：地域分析のための熱・水収支水文学，pp.112-161, 古今書院，2004。
- 10) 北海道庁：水質関連データ集，http://www.pref.hokkaido.lg.jp/ks/jss/khz/contents/mizukankyo/down/down.htm（閲覧日：2020/12/12）