

持続可能な流域圏を目指す水循環シミュレーターの開発 ー常呂川流域を例にー

北見工業大学 地域未来デザイン工学科 早川 博
北見工業大学 地域環境工学科 宇都 正幸
北海道立総合研究機構 環境・地質研究本部 森野 祐助・大澤 賢人
北海道立総合研究機構 環境・地質研究本部 木塚 俊和・鈴木 啓明

持続可能な流域圏を目指す水循環シミュレーターの開発 —常呂川流域を例に—

Development of a water cycle simulator for sustainable river basin area
—A case study of Tokoro River Basin—

早川 博¹・宇都 正幸²・森野 祐助³・大澤 賢人⁴・木塚 俊和⁵・鈴木 啓明⁶
Hiroshi HAYAKAWA, Masayuki UTO, Yusuke MORINO, Masato OSAWA, Toshikazu KIZUKA,
and Hiroaki SUZUKI

¹ 北見工業大学 地域未来デザイン工学科 教授

² 北見工業大学 地球環境工学科 准教授

³ 北海道立総合研究機構 環境・地質研究本部 地質研究所 資源環境部 資源環境グループ 研究主任

⁴ 北海道立総合研究機構 環境・地質研究本部 地質研究所 資源環境部 沿岸地質グループ 主査

⁵ 北海道立総合研究機構 環境・地質研究本部 環境科学研究センター 環境保全部 水環境グループ 研究主任

⁶ 北海道立総合研究機構 環境・地質研究本部 環境科学研究センター 環境保全部 水環境グループ 研究主任

要 旨

将来にわたって水資源を安定的に確保するとともに、気候変動の影響も考慮しながら洪水や土砂流出などによる被害を効率よく減らしていくためには、流域を単位として水量や水質を一体的に管理するシステムが必要である。本研究では北海道オホーツク地域の常呂川流域を対象に、人間活動の変化による流域水循環の応答を定量的に分析できる水循環シミュレーターを開発することを目的としている。そのために、地下水と河川水のそれぞれの水循環プロセスの解明を進めた。地下水の循環プロセスを明らかにするために、既存の地質図、ボーリング資料、重力探査資料などをもとに流域の水理地質構造モデルを作成した。その結果、北見盆地と仁頃盆地の地下部に仁頃層群を水理地質基盤とする盆状構造があることが明らかとなった。また、地下水流動のトレーサーとして調べた表流水と地下水・湧水中の硝酸態窒素及びケイ酸態ケイ素の濃度分布から、異なる複数の地下水流動系の存在が示唆された。地表部については、降水量と蒸発散量の算出手法を再検討し、流域全体の水収支の整合性を向上させることができた。また、かんがい用水を事例として、統計データに基づいて水需要量を小流域単位で推定する手法の構築を進めた。さらに、洪水時と低水時の両方を含む長期的な流況予測が可能な水循環モデルを検討した。1K-DHMをベースとした分布型流出モデルに、蒸発散と積雪・融雪過程を導入することにより、1年程度の連続した流量変化をよく再現できることが確認された。

《キーワード：水理地質構造モデル；栄養塩濃度；水資源賦存量；水需要；分布型流出モデル》

1. 背景と目的

私たちの暮らしは流域の水循環から様々な恩恵を受けて成り立っている。雨や雪として地表に降った水は、一部は蒸発散によって大気へと戻り、その残りは河川や地下を流れてやがて海へと流れ出る。その過程で、私たちは、河川水や地下水から生活に必要な飲み水や、農業や工業などに必要な用水を得ている。川や湖、沿岸域などの水辺は、魚や貝などの生き物を育み、漁業資源を守っている。また、水辺空間は観光やレクリエーションにも利用され、地域の文化を育んでいる。

このように、流域の水資源は生活や産業に欠かせないものであるが、一度に利用できる水資源の量には限りがあるため、上流で水を取りすぎると下流では枯渇することになる。また、人間活動に伴って水質が悪化し、下流での水利用に悪影響を及ぼすこともある。さらに、豪雨に伴う洪水や河川の氾濫は都市生活を脅かし、農・林・水産などの各種産業に大きな被害をもたらす。そのため、流域全体の様々な人間活動を考慮しながら、上流から下流に至るまで、水の「量」や「質」を適切に管理する必要がある。平成26年には「水循環の重要性・水の公共性・流域の総合的管理」を理念とする水循環基本法が省庁を横断して制定され、流域を単位として水資源を一体的に管理するシステムを検討することが求められている¹⁾。

流域の総合的管理を図るには、降水・降雪や蒸発散、地下への涵養、河川への流出といったそれぞれの流域がもつ水循環の特徴を理解すると同時に、水利用や土地利用などを通して人間活動が流域の水循環に及ぼす影響を明らかにすることが重要である。さらに、都市生活や個々の産業を営む上で必要となる、あるいは、許容される水量や水質の目標レベルを明らかにしたうえで、その目標レベルにできるだけ近づくように、水や土地利用の最適化を図る必要がある。

そこで、本研究では突発的な土砂流出や水質悪化の問題を抱え、総合的な流域管理が必要とされる常呂川流域を対象に、人間活動の変化による流域水循環の応答を定量的に分析できる水循環シミュレーターを開発することを目的とする。本シミュレーターを用いて、都市生活や各種産業での水利用を最適化し、流域圏を持続させるための保全策や適応策を検討することにより、常呂川での流域管理に貢献することを目指す。

2. 研究の構成

水循環シミュレーターの構築に向けて、次の3つの小課題を設定した（図1）。

小課題1)は地下水流動と河川流出を考慮した水循環モデルの構築をねらいとする。水理地質構造の解析や水質調査、河川の流量観測などを行い、流域における水循環プロセスを把握する。また、流域の水収支を明らかにするために、流域全体の定常的な水循環モデルを構築するとともに、イベント出水を主な対象とした分布型の水循環モデルも構築する。

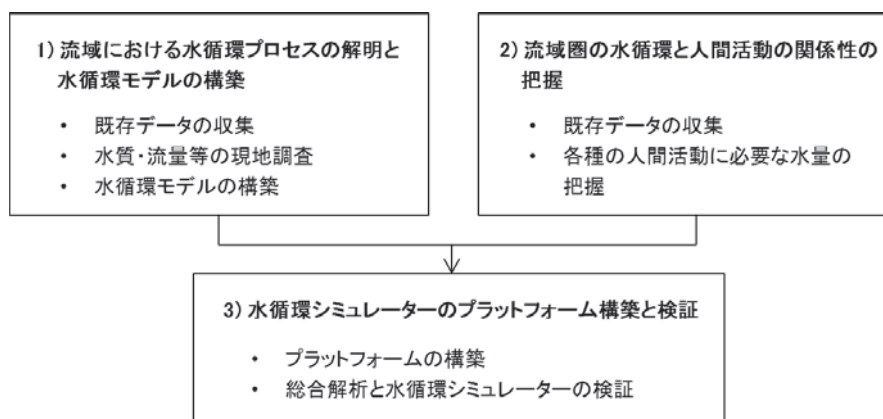


図1 本研究の構成

小課題2)は流域圏における各種の人間活動と水循環との関係性を定量的に明らかにすることをねらいとする。水資源の用途ごとの取水量やその地理的分布を把握するとともに、農林水産業の生産量や人口などの各種統計データに基づいて、人間活動に必要な水量を推定する手法を検討する。

小課題3)では小課題1)で構築した水循環モデルと小課題2)で整備した人間活動に関するデータを連結するためのシステム(プラットフォーム)を構築し、水循環シミュレーターを完成させる。その上で、人間活動の変化が流域圏の水循環に及ぼす影響を分析し、水循環シミュレーターの有用性を検証する。

本報では、平成30年度に実施した小課題1)と2)の研究成果を中心に述べる。

3. 常呂川流域の概要

常呂川は大雪山系に端を発しオホーツク海に注ぐ、幹川流路延長121km、流域面積1,928km²の一級河川である²⁾。上流域は常呂川本流と支流無加川の大きく二つの流域から成る(図2)。中流域では北見盆地を貫流し、支流の訓子府川と無加川が本流に合流する。その後、山地に囲まれた狭窄部で支流仁頃川が合流し、常呂低地を抜けて河口に達する。流域の三方を山に囲まれ、降水量が少なく、日照時間が比較的長い。気象庁のアメダス観測所(北見)における1981~2010年の平年値によると、年降水量、年間日照時間、年平均気温はそれぞれ763.6mm、1776時間、6.1℃である。

流域は北見市、訓子府町、置戸町の1市2町から成り、流域人口は2010年時点でおおよそ13万3千人である²⁾。2009年度版の土地利用データによると、流域面積の約73%を森林が占め、続いて畑地と水田を含む農用地が約20%、建物用地が約3%と続く²⁾。流域内は森林資源に恵まれ、また、農業、水産業が盛んで、タマネギやてん菜、ホタテの全国有数の産地となっている³⁾。河口域はサケ・マスの好漁場でもある。

河川水は農業用水、水道用水、工業用水などに利用されており、現在は約6,600haに及ぶ農地にかんがいされている³⁾。常呂川本流の上流には、洪水調節、流水の正常な機能の維持、農業用水、水道用水の補給を目的として1983年に竣工した鹿ノ子ダムがある。そのほか、かんがい用のダムが支流に二基存在する。



図2 常呂川流域の位置図。流域界、行政界、及び主要河川は、国土数値情報「流域界・非集水域データ」、「行政区域データ」、及び「河川データ」をそれぞれ加工して作成。背景図は地理院タイル(標準地図)による。

常呂川本流の水質は、生物化学的酸素要求量（BOD）や大腸菌群数において環境基準を超過することが多く、全窒素と全リンについても道内の一級河川と比較して値が高く、道内で最も汚濁が進んだ河川の一つである⁴⁾。また、豪雨などに伴う突発的な出水により水道の断水・給水制限や、農業、漁業への被害が発生してきている^{5),6)}。一方で、平常時の河川流量が少ないという問題も抱えている⁴⁾。このような問題に対応するために、常呂川流域ではこれまでに「常呂川水系環境保全対策協議会」や「常呂川水系清流ルネッサンスⅡ地域協議会」をはじめとする協議会が設置され、河川水の安定的な利用や水質改善のための各種の対策が行われてきている。

参考文献

- 1) 内閣官房水循環政策本部：水循環基本計画, 2015.
- 2) 地方独立行政法人北海道立総合研究機構環境・地質研究本部環境科学研究センター・地質研究所：水資源、水域生態系保全に向けた、流域特性の検討と流域圏データベースの構築（平成26年度目的積立金経常研究報告書）, 2015.
- 3) 国土交通省：常呂川水系河川整備基本方針,
http://www.mlit.go.jp/river/basic_info/jigyo_keikaku/gaiyou/seibi/tokoro_index.html（2019年3月25日確認）.
- 4) 常呂川水系清流ルネッサンスⅡ地域協議会：常呂川水系水環境改善緊急行動計画（清流ルネッサンスⅡ）, 2009.
- 5) 常呂川流域懇談会：常呂川流域懇談会からの提言,
<https://www.hkd.mlit.go.jp/ab/tisui/v6dkjr0000000718.html>, 2003（2019年3月25日確認）.
- 6) 網走支庁・網走土木現業所・北見市・訓子府町・置戸町・網走開発建設部：常呂川の水をきれいにしたいね！～流域からの土砂流出を防止・軽減！！～,
<http://www.hkd.mlit.go.jp/ab/tisui/v6dkjr0000002yqc-att/v6dkjr00000048qi.pdf>, 2007（2019年3月25日確認）.

4. 流域の水理地質構造モデルの作成（担当：森野祐助・大澤賢人）

流域内の地下水循環および水収支を明らかにするためには地下地質構造を把握し、地下水を貯留する器である水理地質基盤構造を明らかにする事が重要である。本章では温泉ボーリング資料と表層地質資料を用いた地質断面解析で地下地質構造を把握、地下地質構造に基づいた重力解析を実施して水理地質基盤構造を明らかにした。

(1) 地質断面解析

a) 温泉ボーリング資料の収集

北見盆地の地下層序を明らかにするために、温泉ボーリング資料の岩相記載¹⁾に基づいて柱状図を作成した(図1)。温泉ボーリング資料で確認できる常呂川流域の地下地質は下位より、白亜系の仁頃層群、中新統の津別層、相内層、第四系(更新統、火砕流堆積物、段丘堆積物、沖積層)で構成される。訓子府(地点6)では深度0~45mに第四系、深度45m~560mに相内層、深度560m~1200mに仁頃層群が、北見~端野間(地点5)では、深度0~92mに第四系、深度92m~360mに相内層、深度360m~758mに津別層、深度758m~1,111mに仁頃層群がそれぞれ確認されている。

b) 地質断面図の作成

地下地質構造を明らかにするために、前項で作成した温泉ボーリング柱状図と表層地質資料^{2),3)}を用いて地質断面図を作成した(図2)。その結果、本地域は訓子府~端野にかけての常呂川に沿いに、仁頃層群を水理地質基盤とする、訓子府と北見~端野を中心とした2つの盆状構造があることが明らかとなった。訓子府を中心とした盆状構造は、相内層(地点6で層厚515m)、第四系(地点6で層厚45m)で構成されるが、北見~端野を中心とした盆状構造は下位から津別層(地点5で層厚398m)、相内層(地点5で層厚268m)第四系(地点5で層厚92m)で構成される。

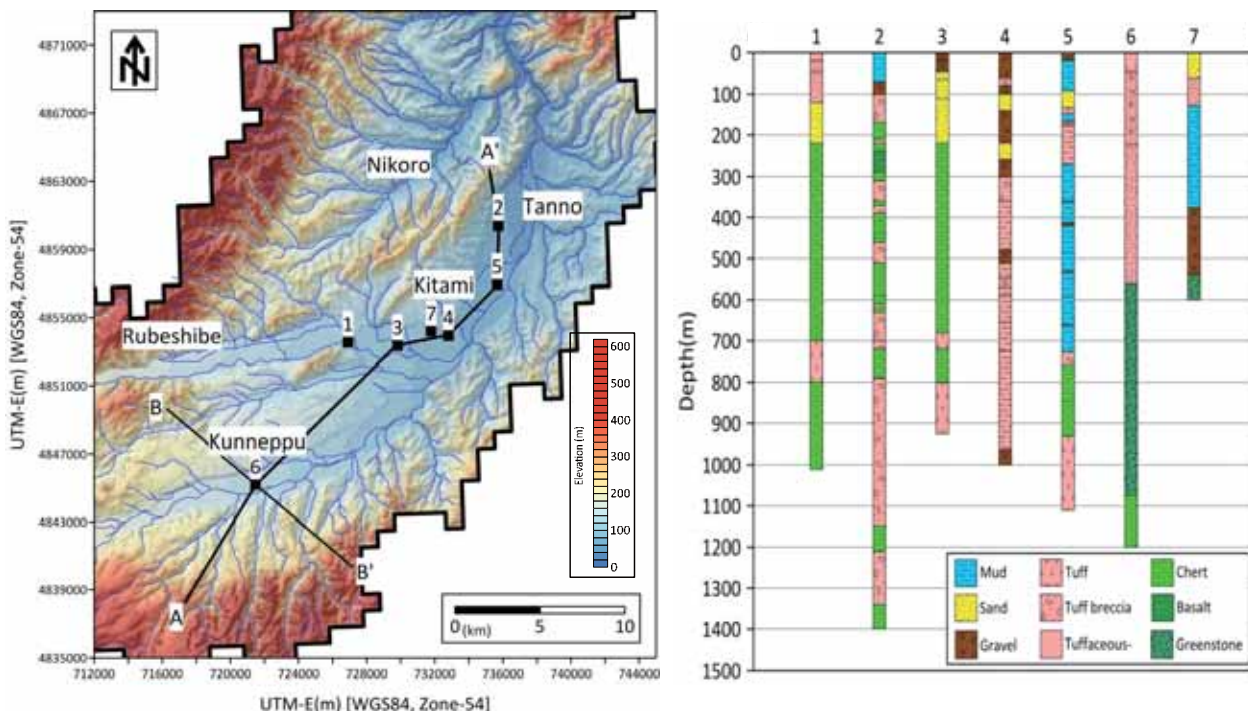


図1 温泉ボーリング柱状図（左図はボーリング地点を示す）

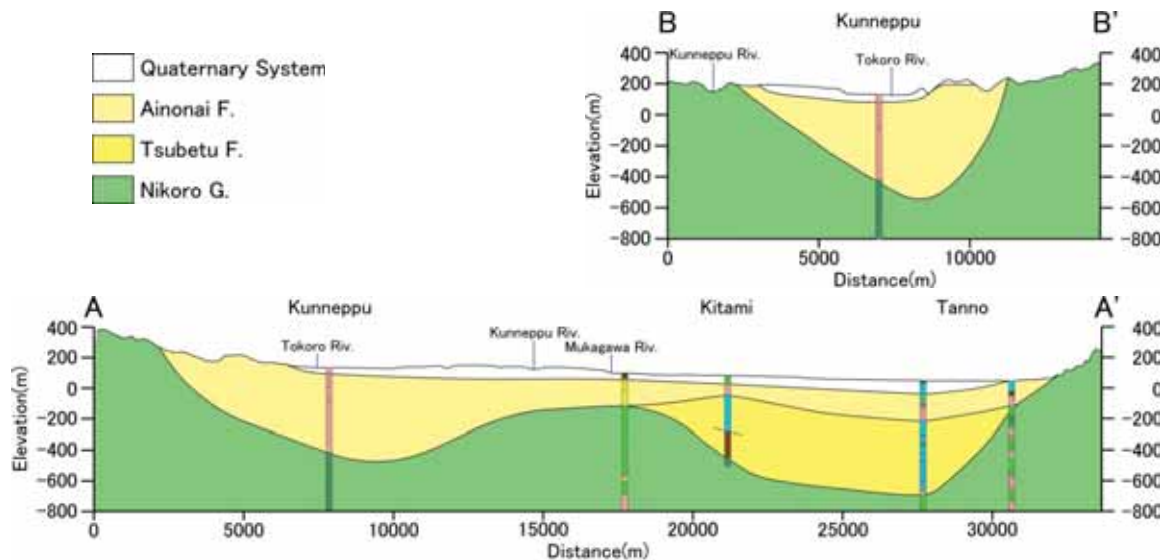


図2 地質断面図（断面線は図1参照）

(2) 重力異常を用いた水理地質基盤構造図の作成

前項で北見盆地周辺の地下地質構造の概要が明らかになったが，地下水の循環機構の解明には，北見盆地の地下地質構造を3次的に捉える必要がある．このことから，温泉ボーリング資料と表層地質資料をコントロールポイントにして，重力異常図から水理地質基盤構造（仁頃層群上面標高分布）を推定した．

a) 密度構造

北見盆地の地下密度構造を把握するため，現地で採取した地質試料を24時間水に浸した後，浮力法を用いて湿潤密度を測定した．測定結果は下位より仁頃層群で 2.7g/cm^3 （緑色岩），津別層で 2.1g/cm^3 （硬質頁岩），相内層で 1.8g/cm^3 （凝灰質砂岩）であった．第四系の堆積物は密度測定が困難だったため，文献値⁴⁾（砂礫： 2.0g/cm^3 ）を用いた．この結果から北見盆地の地下は密度の違いから 2.7g/cm^3 の仁頃層群と $1.8\sim 2.1\text{g/cm}^3$ の津別層・相内層・第四系の2層に分けることができる．

b) 重力異常図

上記の密度の違いに基づく2層構造のモデルを仮定して，水理地質基盤の仁頃層群の上面標高分布を推定した．推定には重力探査資料として日本重力CD-ROM第2版⁹⁾を用いた．仁頃層群より上位の地層（津別層・相内層・第四系）の密度 $1.8\sim 2.1\text{g/cm}^3$ に基づいて，仮定密度を 2.0g/cm^3 とし，重力異常図を作成した（図3）．水理地質基盤のように比較的浅い部分の地下構造を求める場合には，重力異常の広域的な傾向（一次傾向面）を取り除く必要がある．このため，図3の重力異常図から一次傾向面を求め，この影響を差し引いた残差重力異常図（図4）を作成した．残差重力異常分布は表層に密度 $1.8\sim 2.1\text{g/cm}^3$ の相内層および第四系が分布する訓子府で -12mgal ，北見～端野間で -18mgal ，仁頃で $-7\sim -8\text{mgal}$ の低重力異常となっている．表層に密度 2.7g/cm^3 の仁頃層群が分布する仁頃西部の山地で $10\sim 19\text{mgal}$ ，訓子府南部の山地で $10\sim 20\text{mgal}$ の高重力異常となっている．このように作成した残差重力異常分布は仁頃層群上面標高の傾向を示していると考えられる．

c) 残差重力異常と仁頃層群上面標高の関係

地質調査やボーリングなどで得られた地質資料から求めた仁頃層群上面標高と残差重力異常値を比較

した(図5)。仁頃層群上面標高(Y m)は、残差重力(X mgal)と線形関係があると仮定すると、 $Y=36.8X-122$ (決定係数 $R^2: 0.87$) の式で表される。また、地層を無限平板と仮定した層厚と重力の関係は、 $X = 0.0419 \Delta\rho Y$ として示される。ここで、 $\Delta\rho$ は表層と基盤の密度差(g/cm^3)である。今回用いた推定式の傾き36.8は $1/0.0419\Delta\rho$ に等しく、これから求めた密度差($\Delta\rho$)は $0.65\text{g}/\text{cm}^3$ となる。本研究で地質試料を用いて測定した仁頃層群の湿潤密度は $2.7\text{g}/\text{cm}^3$ 、津別層・相内層・第四系の湿潤密度が $1.8\sim 2.1\text{g}/\text{cm}^3$ であることから、求めた密度差は実測の値の範囲($0.9\sim 0.6\text{g}/\text{cm}^3$)に入り、密度構造と調和的な結果になった。

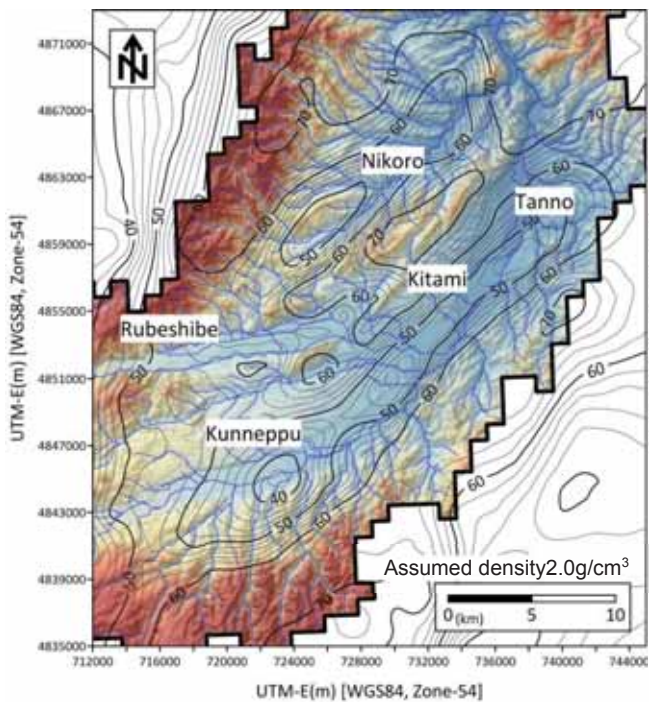


図3 重力異常図(等高線の単位はmgal)

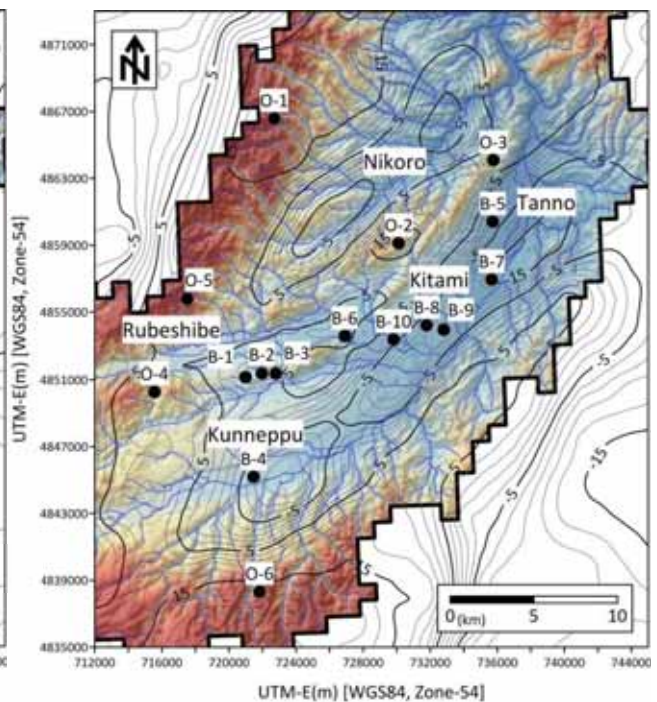


図4 残差重力異常図(等高線の単位はmgal)

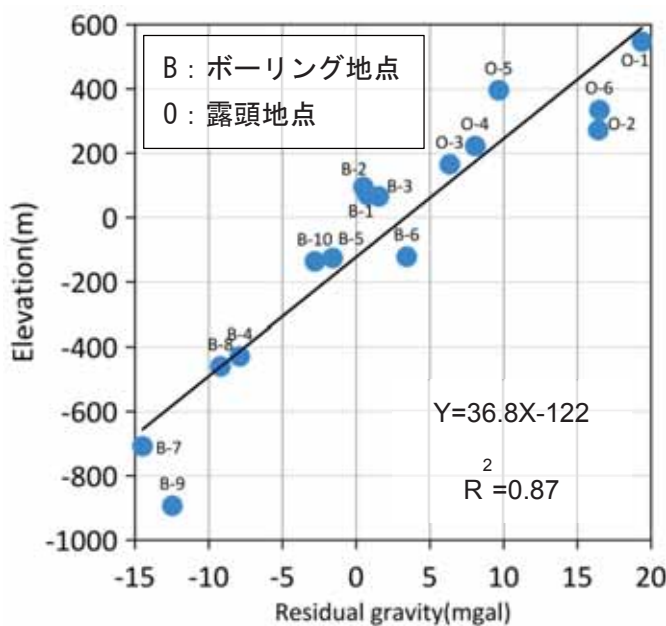


図5 残差重力異常と仁頃層群上面標高の関係

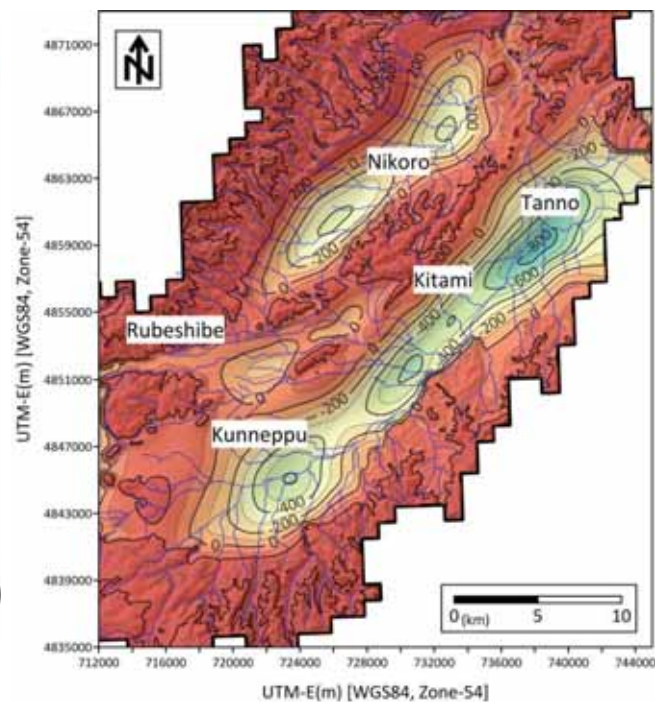


図6 仁頃層群上面標高分布図

d) 仁頃層群上面標高分布

仁頃層群上面標高 (Y m) と残差重力 (X mgal) の関係から仁頃層群上面標高分布図を作成した (図6). 北見盆地及および仁頃盆地地下の仁頃層群上面標高分布は, 共に北東～南西方向に細長い形状をしている. 仁頃層群上面標高分布は訓子府を中心とした盆状構造の最深部で標高-600m, 北見～端野間を中心とした盆状構造の最深部で標高-800m, 仁頃盆地の最深部で標高-400mと推定できた.

(3) まとめ

本章では温泉ボーリング資料と表層地質資料を用いた地質断面解析で地下地質構造を把握, 地下地質構造に基づいた重力解析を実施して水理地質基盤構造を明らかにした. 本流域の地下地質は下位より, 白亜系の仁頃層群, 中新統の津別層, 相内層, 第四系 (更新統, 火砕流堆積物, 段丘堆積物, 沖積層) で構成される. 流域内の水理地質基盤構造 (仁頃層群上面標高分布) は訓子府 (最深部標高-600m), 北見～端野間 (最深部標高-800m), 仁頃 (最深部標高-400m) を中心とした複数の盆状構造で構成される. 訓子府を中心とした盆状構造は, 相内層, 第四系で構成されるが, 北見～端野を中心とした盆状構造は津別層, 相内層, 第四系で構成される. 仁頃を中心とした盆状構造には温泉ボーリング資料がないが, 表層地質分布から相内層および第四系で構成されている可能性が考えられる. 本章での結果は今後の流域内での地下水循環や水収支モデルを検討する上で有効な情報になると考えられる.

参考文献

- 1) 北海道立地質研究所編集: 網走支庁管内の地質と地下資源Ⅲ 網走地方中南部, 北海道網走支庁農業振興部, 2005.
- 2) 石田正夫・平山健・黒田和男・番場猛夫: 5万分の1地質図幅「端野」及び同説明書, 北海道開発庁, 49p, 1968.
- 3) 石田正夫・沢村孝之助: 5万分の1地質図幅「北見」及び同説明書, 北海道開発庁, 1968.
- 4) 日本道路協会編: 道路橋示方書・同解説 I 共通編. 日本道路協会, 2017.
- 5) 村田泰章: 日本重力図マップデータ, 日本重力データベース DVD版, 数値地質図 P-2, 産業技術総合研究所地質調査総合センター, 2013.

5. 流域における水循環プロセスの把握—表流水及び地下水・湧水中の栄養塩濃度—

(担当：大澤賢人・森野祐助)

流域における水循環プロセスを把握するためには、流域内の地形、地質の解析に加えて、表流水と地下水の相互作用としての涵養・流動・流出という連続したプロセスを明らかにすることが必要である。このプロセスにおいて、地下水の涵養域の推定には水の水素・酸素同位体比をトレーサーとする手法が広く用いられており^{1),2)}、森野・大澤³⁾は、本報告の調査と同時に収集した水試料のうち、2017年に集めた常呂川流域の表流水について水素・酸素安定同位体比を測定し、地下水循環機構推定のための基礎情報として報告した。

涵養された後の地下水の流動については、表流水と地下水に含まれる栄養塩濃度（溶存無機態窒素、ケイ酸態ケイ素）を用いた推定を試みており、その結果について本報で報告する。

(1) 手法

表流水は2017年及び2018年の5月から9月にかけて常呂川流域及び比較検討のため、異なる流域となる常呂川西側の芭露川と湧別川周辺で採取した。また、浅層及び深層地下水・湧水は2017年7月及び2018年9月北見市及び訓子府町で主に採取した。採取した水試料は、直ちに現場で濾過（Pall社製メンブレンフィルターGN-6、孔径0.45 μm ）し、約4 $^{\circ}\text{C}$ で冷却保存した。上記溶存成分の分析は、ブラン・ルーベ社製AACS-IIIを用いて行った。なお、本報告では、地下水の流動を推定するトレーサーとして有用と考えられている硝酸+亜硝酸態窒素（以降、硝酸態窒素と記載）とケイ酸態ケイ素の濃度について報告する。

(2) 結果

a) 表流水と地下水・湧水中の硝酸態窒素

常呂川流域の表流水中の硝酸態窒素濃度を図1に示す。本流域における表流水中の硝酸態窒素濃度は、上流から下流にかけて比較的明確な濃度分布の傾向を示すことが明らかとなった。置戸町より上流域では、各地点とも10~30 μM 程度の低い濃度を示し、置戸町の下流から北見市までの区間（以降、中流域）では、例外的に高い値を記録した一地点（968 μM ）を除くと、30~600 μM 程度の濃度を示した。一方、北見市の下流域では、この区間において高い濃度となった一地点（500 μM 以上）を除くと、その他の地点では約100 μM 程度以下の濃度を示した。

一般に、上流域に相当する森林域の渓流水中の硝酸態窒素濃度は低く、中～下流域の扇状地や平野部では都市部からの生活排水や農地由来の窒素肥料からの溶脱による窒素濃度の増加が指摘されており⁴⁾、本流域における硝酸態窒素濃度の傾向としては、北見市周辺など人間活動が活発な中流域における窒素の高い負荷が明らかとなった。

北見市と訓子府町を中心に採取した地下水・湧水中の硝酸態窒素濃度は、1~470 μM 程度の濃度を示しており、常呂川流域の表流水と同程度であることがわかった（図2）。また、各地点の地下水中の硝酸態窒素濃度は、50 μM 以下（このうち1地点を除くその他の地点では30 μM 以下）と150 μM 以上の2つの濃度レンジに大きく分かれ、これらの2つの濃度分布は、農地、都市エリアに関わらず記録した。

一般に硝酸態窒素による地下水汚染の原因としては、農耕地における過剰な施肥や、畜産活動における排水の影響等が指摘されている⁵⁾。これらの硝酸態窒素の供給源は基本的に地表あるいは地表近くの地中となるため、地下水位が地表近くの浅い地下水では施肥後に濃度が高くなる傾向を示し、深い地下水では、施肥の直接の影響ではなく、地層に蓄積された硝酸態窒素が数年～数十年（または、それ以上）の時間の経過とともに深い地下水面に供給されると考えられている^{6),7),8)}。一方、不透水性地表面が広がる都市エリアでは、水道漏水、公園灌漑、浄化槽からの浸透など新たな地下水涵養源が形成されてお

り⁹⁾、これら涵養源からの硝酸態窒素の地下水への供給が考えられている。これら既存の知見は、本研究で見られた地下水中の硝酸態窒素の濃度の違いが地表の土地利用形態のみで決定されるものではないことを示唆する。



図1 常呂川流域における表流水中の硝酸態窒素濃度の分布
(国土地理院標準地図及び陰影起伏図を使用。以下、図2～4も同様)



図2 常呂川流域における地下水・湧水中の硝酸態窒素濃度の分布

b) 表流水と地下水・湧水中のケイ酸態ケイ素

常呂川流域の表流水中のケイ酸態ケイ素濃度を図3に示す。本流域における表流水中のケイ酸態ケイ素濃度は、200~900 μM の濃度を示しており流域全体では明確な濃度分布の傾向を示さなかった。表流水におけるケイ酸態ケイ素濃度については、一般的に、ケイ酸は雨水には含まれないため、無降雨時にはほぼそのままの濃度で、降雨の際には河道降雨や表面流によって希釈され流出することが知られている¹⁰⁾。従って、表流水中のケイ酸態ケイ素濃度は、ケイ酸塩鉱物の溶解、沈殿、水と土壤に含まれるケ



図3 常呂川流域における表流水中のケイ酸態ケイ素濃度の分布



図4 常呂川流域における地下水・湧水中のケイ酸態ケイ素濃度の分布

イ酸塩鉱物の接触時間によって決まる^{11),12)}。今後、流域の地質を含めて表流水中のケイ酸態ケイ素の濃度分布について、解析を進める予定である。

地下水・湧水中のケイ酸態ケイ素濃度は、200～800 μM 及び1,000～1,300 μM と大きく分けて2つの濃度レンジに分かれた(図4)。これら2つの濃度レンジのうち、前者は、本流域の表流水で見られた濃度と同程度、後者は表流水と比較して高い濃度であることがわかった。これら2つの濃度レンジの分布は、農地、都市エリアにかかわらず記録したことから硝酸態窒素と同様に土地利用形態以外の要因が強く関係することを示唆する。また、地下水・湧水中のケイ酸態ケイ素と硝酸態窒素濃度の分布を比較すると、硝酸態窒素濃度が高い地点では、ケイ酸態ケイ素の濃度が低く、ケイ酸態ケイ素の濃度が高い地点では硝酸態窒素濃度は低くなる傾向が見られた。

一般的に、地下水中のケイ酸態ケイ素濃度は、土壤中の鉛直不飽和浸透と一時的飽和側方流発生の過程で決まり、この間の全溶出量のうち半分以上は鉛直浸透の過程によること、また、飽和地下水帯で濃度が平衡状態に達した後は側方流動による濃度変化は起こらないことが報告されている¹⁰⁾。これらのことは、地下水面が深い地下水はケイ酸態ケイ素濃度が高くなる傾向があることを意味する。本報告で見られたケイ酸態ケイ素の濃度の違い及び硝酸態窒素との濃度分布の関係は、観測した地下水が単一ではなく異なる複数の帯水層の水であること及び、異なる地下水流動系の存在を示唆すると考えられる。

今後、ここで明らかになった濃度の違いを含めて、これまでに明らかにした本流域の地質構造や酸素同位体比による涵養域の推定結果とともに地下水の流動の解析を進め、地下水循環のモデル化に反映させたいと考える。

(3) まとめ

本研究で常呂川流域の表流水と地下水・湧水中の硝酸態窒素及びケイ酸態ケイ素の濃度分布を明らかにした。地下水・湧水中の硝酸態窒素濃度は、表流水と同等の濃度範囲を示し、大きく低濃度(50 μM 以下)と高濃度(150 μM 以上)の2つの濃度レンジに分かれた。また、地下水・湧水中のケイ酸態ケイ素濃度は、200～800 μM 及び1,000～1,300 μM と大きく分けて2つの濃度レンジを示し、前者は、本流域の表流水で見られた濃度と同程度、後者は表流水と比較して高い濃度であることがわかった。本研究の成果は、今後常呂川流域で地下水循環のモデル化を検討する上で有効な情報になると考えられる。

謝辞：本研究を進めるにあたり、地下水の調査では、北見市都市建設部公園緑地課並びに訓子府町上下水道課、北見工業大学事務局施設課の皆様のご協力を頂いた。本報告をまとめるにあたり、北海道立総合研究機構地質研究所の岡崎紀俊資源環境部長、内田康人研究主幹、鈴木隆広研究主幹には有益な助言を頂いた。また地下水中の化学成分の動態に関して同部資源環境グループの大森一人研究主任に有益な助言を頂いた。心からお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 小林正雄・北岡豪一・吉岡龍馬・堀内公子・笹井恵美：比叡山地東麓一帯の降水・河川水および地下水の水素・酸素の同位体比，日本水文科学会誌，27，pp.143-150，1997.
- 2) 水谷義彦・小田松尚：安定同位体比による富山県庄川扇状地地下水のかん養源および流動状況の研究，地球化学，17，pp.1-9，1983.
- 3) 森野祐助・大澤賢人：北海道常呂川流域における表流水の水素・酸素安定同位体比分布，第27回環境地質学シンポジウム講演論文集，pp.1-4，2017.
- 4) 中村高志・尾坂兼一・平賀由紀・風間ふたば：富士川流域における渓流水中の硝酸イオンの窒素・酸素安定同位体比，日本水文科学会誌，41(3)，pp.79-89，2011.

- 5) 田瀬則雄・李盛源：硝酸性窒素による地下水汚染対策－優良事例の策定に向けて－，日本水文科学会誌, 41(3), pp.55-61, 2011.
- 6) 田瀬則雄：浸透／地下水涵養に伴う水の動きと物質の動き，日本水文科学会誌, 42(2), pp.53-60, 2012.
- 7) 田瀬則雄：環境中の窒素の流れと地下水の硝酸性窒素汚染，畜産環境情報, 54, pp.1-14, 2014.
- 8) 松本武彦・唐星児：北海道の市町村を単位とした窒素環境容量に基づく地下水の硝酸汚染リスクの評価，日本土壌肥料学雑誌, 77(1), pp.17-24, 2006.
- 9) 石井武政・安原正也：都市域の地下水環境，日本水文科学会誌, 30(2), pp.73-80, 2000.
- 10) 島田緑子・大手信人・徳地直子・鈴木雅一：山地小流域における地下水・渓流水のSiO₂濃度形成，水文・水資源学会誌, 5(2), pp.3-11, 1992.
- 11) 鹿園直建：化学的風化作用の河川水水質，特に溶存シリカ濃度を与える影響，地学雑誌, 111(1), pp.55-65, 2002.
- 12) Barkle, G. F., Stenger, R., Burgess, C., and Wall, A. : Quantifying groundwater contribution to stream flow generation in a steep headwater catchment. *Journal of Hydrology New Zealand*, 53(1), pp.23-40, 2014.

6. 流域圏の水循環と人間活動の関係性の把握（担当：木塚俊和・鈴木啓明）

将来にわたって水資源を持続的に利用していくためには、流域の水資源賦存量を明らかにするとともに、表流水や地下水による流出過程を考慮した上で計画的に水利用を行うことが重要である。ここでは、昨年度（平成29年度）に引き続き河川水の取水に関する既存データを収集・整理するとともに、降水量と蒸発散量の算出手法を再検討し、流域全体の水収支の把握を進めた。さらに、人間活動の変化が水需要に及ぼす影響を分析することをねらいとして、原単位法による水需要の推計手法を検討した。

(1) 方法

a) 水収支の集計

上流域から下流域までの区間に応じた水収支を把握するために、小流域を基本単位として、本流7か所（河口、上川沿、太茶苗、忠志、北見、上常呂、置戸）と支流1か所（北光社）の水位・流量観測所を境に、流域をa～hの8区間に分割した（図1）。小流域の境界データとして、1kmメッシュごとに流出河川を定義したGISデータ¹⁾を基に、水位・流量観測所の位置に合わせて一部修正したデータを用いた。

各区間の水収支は次式で表される。

$$\Delta S = t \times (P + R_i + G_i + U_i - ET - R_o - G_o - U_o) \quad (1)$$

ここで、 P は降水量、 R_i と G_i は上流区間からの河川水及び地下水の流入量、 ET は蒸発散量、 R_o と G_o は下流区間への河川水及び地下水流出量、 U_o と U_i は水利用に伴う取水量及び還元水量（単位はすべて m^3/s ）、 t は解析期間（s）、 ΔS は区間貯留量の変化（ m^3 ）を示す。これらの項目に関するデータの収集及び解析方法を以下のb)～d)に示す。なお、水収支の解析期間は水需要の季節変動を考慮して、かんがい期（5/1～9/20）と非かんがい期（9/21～翌4/30）に分けた。また、冬季の積雪と翌春の融雪出水が同じ年度になるように、9/21～翌9/20を水文年とした。

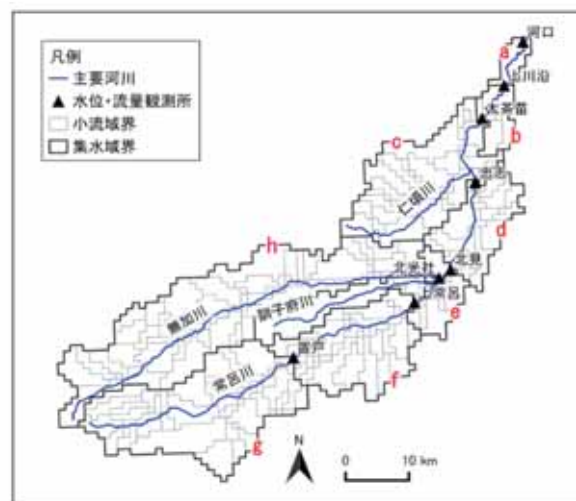


図1 常呂川流域の流域区分。河川ラインは国土数値情報の「河川データ」を加工して作成。水位・流量観測所の位置は国土交通省の主要水系調査による。

b) 降水量、蒸発散量及び水資源賦存量の計算

昨年度は、気象庁「メッシュ平年値2010」を用いた降水量及びThornthwaite²⁾の方法を用いた蒸発散量を1981～2010年について求め、水資源賦存量の推定や水収支の把握に使用した。しかし、この方法で求まるのは30年間の平均値であり、より短い時間スケールの水収支の解析には扱いにくい。加えて、前述の方法で求めた降水量及び蒸発散量を河川流量と比較したところ、水収支に不一致が生じ、蒸発散量の

推定誤差や降水量の観測誤差があることも考えられた。このため、今年度は常呂川流域の降水量及び蒸発散量の日別値を、以下に記すように推定方法を再検討して算出した。なお、計算はPython 3.7を用いて地域メッシュの第3次メッシュごとに行った。

国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構によるメッシュ農業気象データシステムには、アメダス地点における観測値を空間補間して作成した日降水量³⁾の値とともに、日降雪相当水量の値が第3次メッシュごとに公表されている⁴⁾。アメダス地点で降水量計により観測される降水量は、風によって特に雪片などの固体降水の捕捉率が低下すること（捕捉損失）により過小評価されることが知られ⁵⁾、常呂川流域の観測降水量はこの影響により過小評価されている可能性がある。メッシュ農業気象データの日降雪相当水量は、こうした測器による捕捉率の低下も考慮して小南ら⁶⁾が考案した積雪水量モデルに基づいて計算されており、積雪期には日降水量よりも大きな値を示す。そこで本研究では、メッシュ農業気象データの日降水量及び日降雪相当水量を日ごとに比較し、日降雪相当水量が上回る日にはメッシュ農業気象データの日降雪相当水量を日降水量に読み替え、その他の日はメッシュ農業気象データの日降水量を適用した。

蒸発散量は実測が難しく、土地利用などに応じて値が変わるため、広域における評価では気候要素を用いた推定式が開発されている。このうち、Penmanの式⁷⁾は日単位の気温、湿度、風速、日照時間のデータから水面や飽和した土壌面からの蒸発量（可能蒸発散量）を推定するのに広く用いられている。三浦・奥野⁸⁾はPenmanの式を用いた蒸発散量計算に必要な様々なデータの整備や物理量の単位の換算方法を示し、三浦・奥野⁹⁾は同計算を容易にするための工夫と提案を示している。なお、不飽和な土壌や植被面などでは、実蒸発散量はPenmanの式で求めた可能蒸発散量よりも小さくなる。水収支法や観測により求めた実蒸発散量の可能蒸発散量に対する比は蒸発散比と呼ばれ、井形¹⁰⁾は石狩川流域で土地利用ごとの蒸発散比を月ごとに求めている。

そこで、本研究では三浦・奥野^{8),9)}による計算の工夫などを取り入れてPenmanの式による可能蒸発散量を計算するとともに、井形¹⁰⁾に示された土地利用ごと、月ごとの蒸発散比を基にメッシュごとの蒸発散比を計算し、可能蒸発散量に蒸発散比を乗じることにより実蒸発散量を推定した。井形¹⁰⁾と同様、積雪のある日にはPenmanの式は使用せず、小島の式¹¹⁾により蒸発散量を算出した。

井形¹⁰⁾に示された土地利用ごとの蒸発散比を表1に示す。本研究ではこのうち、国土数値情報土地利用細分メッシュデータに示された土地利用区分の「森林」に森林の蒸発散比を、「田」に水田の蒸発散比を、「その他の農用地」「荒地」「ゴルフ場」に草地の蒸発散比を適用した。対応する土地利用の蒸発散比の情報が無い「建物用地」「道路」「鉄道」「その他の用地」「海浜」については暫定的に草地の蒸発散比を適用した。「河川地及び湖沼」及び「海水域」の蒸発散比は1とした。1～3月で積雪のない日には4月の蒸発散比を、12月で積雪のない日には11月の蒸発散比を適用した。

表1 土地利用別の蒸発散比（井形¹⁰⁾）

土地利用	月							
	4	5	6	7	8	9	10	11
森林	0.12	0.38	0.84	0.90	0.99	1.59	1.24	1.14
草地	0.49	0.71	0.71	0.55	0.7	0.7	0.52	0.33
水田	0.41	0.43	0.43	0.72	0.72	0.59	0.59	0.43

計算に必要な日平均気温、日照時間、日平均相対湿度及び日平均風速はメッシュ農業気象データを用いた。土地利用はメッシュ農業気象データシステムに整備された平成21年度版の国土数値情報土地利用細分メッシュデータを用いた。積雪の有無はメッシュ農業気象データの積雪深の有無により日ごとに判

断した。

土地利用別のアルベドは佐渡・児島¹²⁾による月別値（表2）を使用した。国土数値情報土地利用細分メッシュデータに示された土地利用区分の「田」に水田のアルベドを、「その他の農用地」に畑のアルベドを、「森林」に森林のアルベドを、「荒地」「ゴルフ場」に草地のアルベドを、「建物用地」「道路」「鉄道」「その他の用地」に住宅地のアルベドを、「海浜」に裸地のアルベドを、「河川地及び湖沼」及び「海水域」に水域のアルベドを適用した。

その地域で潜在的に最大限使える水の量の目安として、年降水量から年蒸発散量を引くことにより、年間の水資源賦存量をメッシュごとに計算した。

表2 土地利用別のアルベド（佐渡・児島¹²⁾）

土地利用	月							
	4	5	6	7	8	9	10	11
市街地	0.40	0.36	0.35	0.33	0.33	0.42	0.48	0.54
住宅地	0.33	0.31	0.30	0.29	0.28	0.35	0.40	0.45
草地	0.24	0.22	0.22	0.20	0.19	0.24	0.27	0.34
水田	0.11	0.10	0.13	0.15	0.25	0.25	0.24	0.27
畑	0.23	0.22	0.23	0.21	0.20	0.25	0.27	0.30
裸地	0.40	0.36	0.34	0.33	0.33	0.42	0.48	0.54
森林	0.13	0.16	0.17	0.16	0.15	0.19	0.20	0.21
水域	0.09	0.08	0.08	0.07	0.07	0.10	0.13	0.18

c) 河川流量の計算

北海道開発局網走開発建設部より入手した上川沿観測所の毎時流量データから日平均流量を求め、さらに非かんがい期、かんがい期、及び水文年の期間別平均流量を算出した。近年の平均的な流量を把握するために、2008年9月21日から2016年9月20日の8年分の平均値を、非かんがい期、かんがい期、及び水文年流量のそれぞれで算出した。

d) 水利用に伴う取水量及び還元水量の計算

河川水の取水量を把握するため、取水施設ごとの日ごとの実績取水量データを北海道開発局網走開発建設部及び北海道オホーツク総合振興局網走建設管理部より入手した。さらに、これら以外の取水量データを以下により整理した。無加川第1及び第2頭首工は北見土地改良区提供の実績取水量データを用いた。北見市滝の湯地区簡易水道は北見市上下水道局提供の平成28年度実績の1日当たり平均給水量データを用いた。置戸町簡易水道（勝山、置戸、秋田の3地区）は置戸町施設整備課提供の平成28年度実績の1日当たり平均給水量データを用いた。常呂ふ化場は道総研さけます・内水面水産試験場提供の最大取水量と取水期間を参考に日ごとの取水量を計算した。以上より整理した日ごとの取水量を基に、非かんがい期、かんがい期、及び水文年の期間別平均取水量を算出した。近年の平均的な取水量を把握するため、河川流量と同様に、2008年9月21日から2016年9月20日の8年分の平均値を、非かんがい期、かんがい期、及び水文年のそれぞれで算出した。その際、取水実績はあるがデータが無い期間、あるいは取水実績が無い期間がある場合はその期間を除いて平均化した。

人間活動に利用された水の河川への還元量を把握するため、常呂川水系における正常流量の設定手法を参考に、還元率（取水量に対する還元水量の割合）を農業用水0.4、工業用水1.0（工業用水のうち水道用水以外は全量還元されると仮定）、水産用水1.0、防火・流雪溝用水1.0として還元水量を算出した。

また、水道用水の還元水量として、北見市上下水道局，訓子府町上下水道課，及び置戸町施設整備課提供の下水道及び農業集落排水の処理施設ごとの平成28年度実績排水量（置戸町のみ計画排水量）を用いた。

算出した取水量及び還元水量を，それぞれ上述の8区間ごとに合計した。

e) かんがい用水の潜在需要量の推計

河川水の取水量の大部分を占める農業用水を対象に，原単位法による潜在的な水需要の推計手法を検討した。ここでは原単位として農地の単位面積当たりかんがい用水量を設定した。畑地かんがいについては，北海道農政部が平成10～17年度に実施した畑地かんがい推進モデルほ場設置事業の北見市留辺蘂と遠軽町生田原での調査結果を参考にした。常呂川流域の主要畑作物であるコムギ，テンサイ，バレイショ，及びタマネギを対象に，1生育期間におけるかんがい水量を作物別に集計した（表3）。ここでは4作物のかんがい水量の平均値（32mm）を畑地の原単位として設定した。

水田かんがいについては，常呂川流域での実測値が得られなかったため，北海道空知総合振興局が平成27～29年度に実施した空知管内の水田における減水深調査結果を参考にした。雨竜町の慣行水田を対象に生育期間中の平均日減水深を求めた。常呂川流域における頭首工の取水実績から5月15日～8月31日（109日）をかんがい期間とし，日減水深の3ヵ年の平均値（7.0mm/d）を乗じて水田の原単位（763mm）とした。

作付面積として，道総研中央農業試験場及び北見農業試験場提供の農業集落カードのデータを使用した。本データには1995～2015年の5年ごとを対象に主要農作物の集落別作付面積が収録されている。本データを基に，水田と畑地（コムギ，バレイショ，ダイズ・アズキ，テンサイ，タマネギの総和）に分けて作付面積を集計し，上述の原単位を乗じて集落ごとのかんがい用水の潜在需要量を求めた。

かんがい用水の潜在需要量を小流域単位で評価するために，GIS（地理情報システム）上で小流域に交差する各集落の面積を求め，集落ごとのかんがい用水潜在需要量を面積按分した。その後，小流域に交差するすべての集落の面積按分後のかんがい用水潜在需要量を合計した。集落の境界データとして，政府統計の総合窓口（e-Stat）より入手した2015年農林業センサス境界データを用いた。これらのGIS解析にはQGIS ver.3.4.4を使用した。

表3 1生育期間における作物ごとのかんがい水量集計値

作物	調査対象圃場数	かんがい水量（mm）		
		平均値	最大値	最小値
コムギ	16	35	114	0
テンサイ	13	46	192	13
バレイショ	2	18	20	15
タマネギ	50	28	87	0

(2) 結果と考察

a) 降水量，蒸発散量及び水資源賦存量の計算結果

常呂川流域における年間の降水量，蒸発散量，及び水資源賦存量の分布をそれぞれ図2，図3及び図4に示す。

今年度求めた常呂川流域の平均降水量は1,022mmで，昨年度求めた1981～2010年における流域の平均降水量（810mm）に比べ26.2%大きかった。降水量900mm以上1,000mm未満のメッシュが最も多く，全メッシュの4割強を占めた（図2）。三国山，武華山や石北峠に近い流域西部の山地域，南部の東三国山

付近及び北部の仁頃山付近で1,200mm以上の比較的高い値を示した。逆に降水量が少なかったのは、北見盆地の訓子府町から北見市柏陽付近にかけての常呂川本流域並びに訓子府川中～下流域付近、及び北見市常呂の常呂川本流最下流域付近で、概ね800mm以上900mm未満であった。

なお、冬季の捕捉損失の考慮を行わず、メッシュ農業気象データの日降水量のみを用いて常呂川流域の平均降水量を求めたところ910mmであった。すなわち、冬季の捕捉損失を考慮することにより、降水量が12.3%増加した計算になる。

また、今年度の計算対象期間とした2008～2015水文年と、昨年度計算対象とした1981～2010年の間で、1981年以降に継続的に降水量観測を行っているアメダス及び雨量観測所計5地点の平均降水量を比較したところ、前者は後者より13.2%大きい値を示し（表4）、2008～2015水文年は相対的に多雨だったと考えられる。2008～2015水文年に、常呂川流域全体の平均降水量も1981～2010年に比べ13.2%大きかったと仮定すると、この増加率（1.132倍）と冬季の捕捉損失の考慮による増加率（1.123倍）の積は1.27倍となり、常呂川流域の平均降水量の昨年度計算値に対する今年度計算値の比（1.262倍）に近づく。このことから、今年度、流域の平均降水量が昨年度に比べて大きく推計された主な要因は、新たに冬季の捕捉損失を考慮したことと、計算対象とする期間が変わったことによると考えられる。

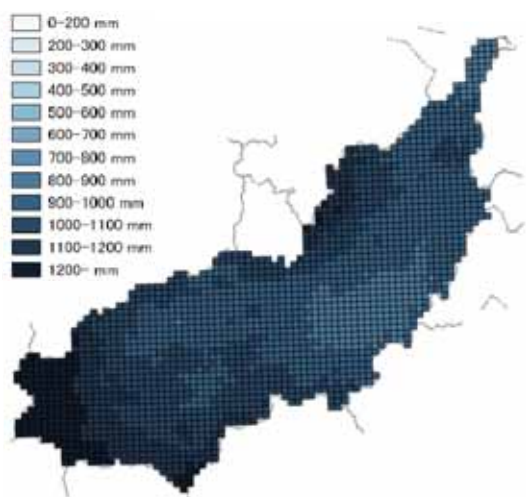


図2 常呂川流域の年降水量分布
(2008-2015水文年平均)

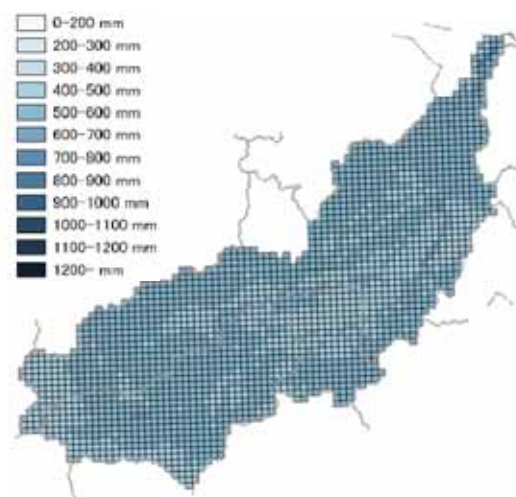


図3 常呂川流域の年蒸発散量分布
(2008-2015水文年平均)

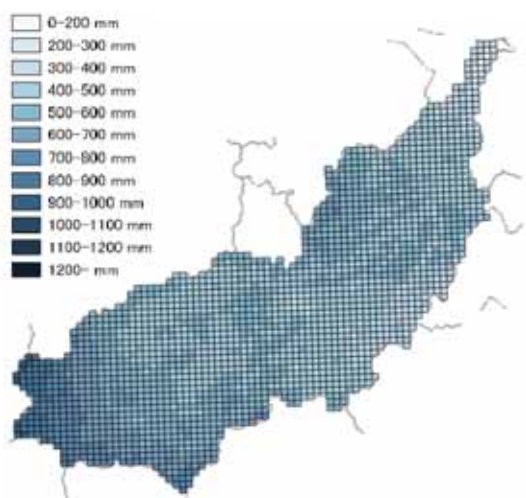


図4 常呂川流域の年水資源賦存量分布
(2008-2015水文年平均)

表4 1981～2010年と2008～2015水文年の
平均年降水量の比較

観測所	降水量 (mm)		B/A
	1981～ 2010年 平均(A)	2008～ 2015水文 年平均(B)	
常呂アメダス	700.4	721.5	1.030
北見雨量観測所	686.1	764.6	1.114
境野アメダス	733.5	875.6	1.194
留辺蘂雨量観測所	709.2	815.3	1.150
留辺蘂アメダス	701.9	819.6	1.168
平均	706.2	799.3	1.132

今年度求めた常呂川流域の平均蒸発散量は497mmで、昨年度求めたThorntwaite²⁾の方法を用いた1981～2010年における流域の平均蒸発散量（520mm）に比べ4.4%小さかった。蒸発散量が500mm以上600mm未満のメッシュが全メッシュの58%を占め、400mm以上500mm未満のメッシュが全メッシュの38%を占めた（図3）。また、蒸発散量が600mm以上700mm未満のメッシュが常呂川本流最下流域付近に認められた一方、内陸部には300mm以上400mm未満のメッシュが認められた。

内陸部では、田及びその他の農用地が多い地点で、森林が多いその周囲に比べ蒸発散量が小さくなっていた。蒸発散量の増加する夏季に、田及びその他の農用地の蒸発散比が森林の蒸発散比に比べて小さいことが反映されたものと考えられる。

一方、流域西部の山地域では、その下流側と同様に森林が土地利用の大半を占めるにもかかわらず、下流側に比べ蒸発散量が小さかった。これはこの地域の標高が高く、気温が低いことが反映されたものと考えられる。

なお、常呂川本流最下流域付近の一部のメッシュで蒸発散量が相対的に大きかったのは、この地域に多く分布する水域の蒸発散比が大きいことを反映していると考えられる。ただし、今回の方法では水のない河川区域の河川数も水域の面積として計上されているため、常呂川本流最下流域付近の蒸発散量は過大評価されている可能性がある。

今年度求めた常呂川流域の平均水資源賦存量は524mmで、昨年度求めた平均水資源賦存量（290mm）に比べ81%大きかった。水資源賦存量は、降水量が大きく蒸発散量が相対的に小さい流域西部の山地域で最大を示し、900mm以上1,000mm未満であった（図4）。流域南西部の常呂川本流の最上流部や北部の仁頃山付近でも比較的大きく、概ね600mm以上800mm未満であった。一方、北見盆地南部や常呂川本流最下流域付近では300mm以上400mm未満と小さかった。水資源賦存量が300mm以上400mm未満のメッシュの分布域は、降水量が900mm未満と小さい地域とある程度対応しており、内陸部ではその中でも、蒸発散量が比較的大きい森林の多い地域によく対応していると考えられた。

水資源賦存量を区間別に集計した結果、いずれの集計期間においても「北光社―最上流」区間で最も大きく、「置戸―最上流」区間が次いだ（図5）。水文年で見ると、流域全体の水資源賦存量の内、この両区間で56%（569百万m³）を示した。このことから、常呂川流域の水資源を確保する上では、量的な面のみからすれば、常呂川本流と無加川の最上流区間が最も重要な地域と考えられる。また、仁頃川流域を含む「太茶苗―忠志」区間において全区間の15%（151百万m³）を示し、仁頃川流域もまた水資源上重要な地域と考えられる。

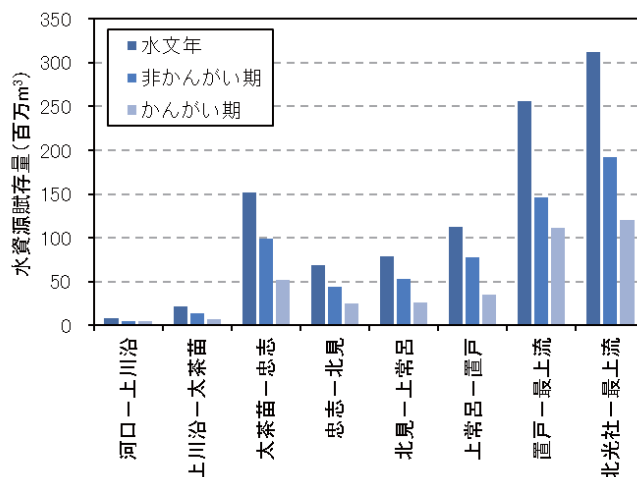


図5 常呂川流域の各区間における水資源賦存量（2008～2015水文年平均）

b) 水利用の現況

水利用に伴う河川水の取水量を集計した結果、総取水量は水文年の平均で $3.1\text{m}^3/\text{s}$ 、非かんがい期の平均で $1.2\text{m}^3/\text{s}$ 、かんがい期の平均で $6.2\text{m}^3/\text{s}$ の値を示した(図6)。取水量の内訳は、年間取水量のうち農業用水が $2.1\text{m}^3/\text{s}$ (全体の約66%)と圧倒的に大きく、水道用水が $0.6\text{m}^3/\text{s}$ (全体の約18%)と次いだ。

取水量の最も大きい農業用水は常呂川本流「上常呂-置戸」「北見-上常呂」及び無加川「北光社-最上流」の3区間で全区間の約96%を取水していた(図7)。これらの区間には常呂川頭首工、常呂川第1頭首工、相内頭首工などの取水施設が存在し、常呂川本流や無加川沿いに広がる農地に河川水が供給されている。

次に、水道用水は北見市街地を含む北見市北見地区の上水道水源である常呂川本流「上常呂-置戸」区間で全区間の約86%を取水していた(図7)。北見地区上水道を除けば、各地区の上水道及び簡易水道に対応して、「北光社-最上流」(留辺蘂地区上水道、滝の湯及び温根湯温泉地区簡易水道)、「置戸-最上流」(置戸地区及び勝山地区簡易水道)、「北見-上常呂」(秋田地区簡易水道)、「太茶苗-忠志」(常呂地区簡易水道)の各区間で取水が見られた。

各区間の取水量合計値は「上常呂-置戸」区間で全区間の45%を占め、「北光社-最上流」区間で21%、「北見-上常呂」区間で17%、「置戸-最上流」区間で11%と続いた。このように、河川水の取水量は流域内で空間的に偏在しており、ほとんどが北見観測所より上流で取水されていることが確認された。

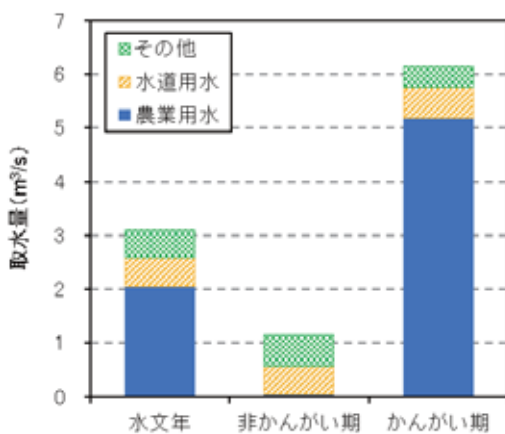


図6 常呂川流域における河川水の期間別平均取水量(2008~2015水文年平均)。その他には水産用水、工業用水、防火・流雪溝用水を含む。

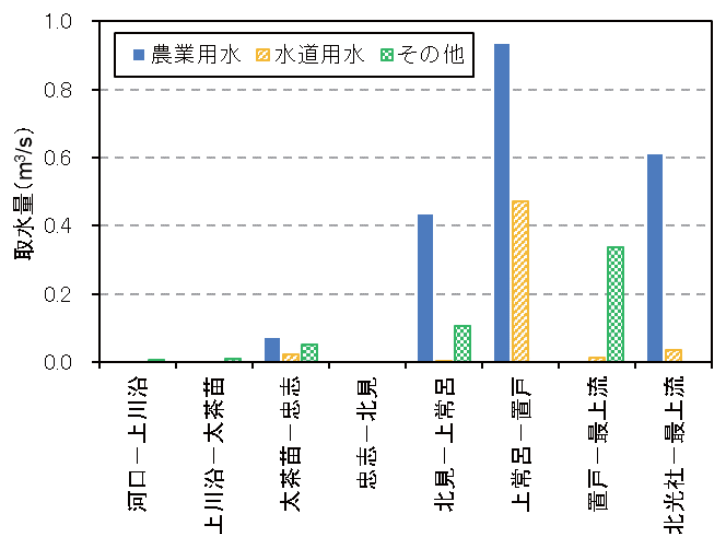


図7 常呂川流域の各区間における河川水の年平均取水量(2008~2015水文年平均)

c) 水収支の計算結果

常呂川本流の下流に位置する上川沿観測所より上流区間における水収支の計算結果を図8に示した。水文年の水収支では、降水量(P)が $61.7\text{m}^3/\text{s}$ 、蒸発散量(ET)が $29.9\text{m}^3/\text{s}$ となり、水資源賦存量は $31.8\text{m}^3/\text{s}$ と見積もられた。水利用に伴う取水量(U_0)は水資源賦存量の約10%($3.1\text{m}^3/\text{s}$)を示した。また、水資源賦存量はかんがい期に $30.5\text{m}^3/\text{s}$ 、非かんがい期に $32.6\text{m}^3/\text{s}$ となり、非かんがい期の方が水資源賦存量がわずかに大きいことが分かった。

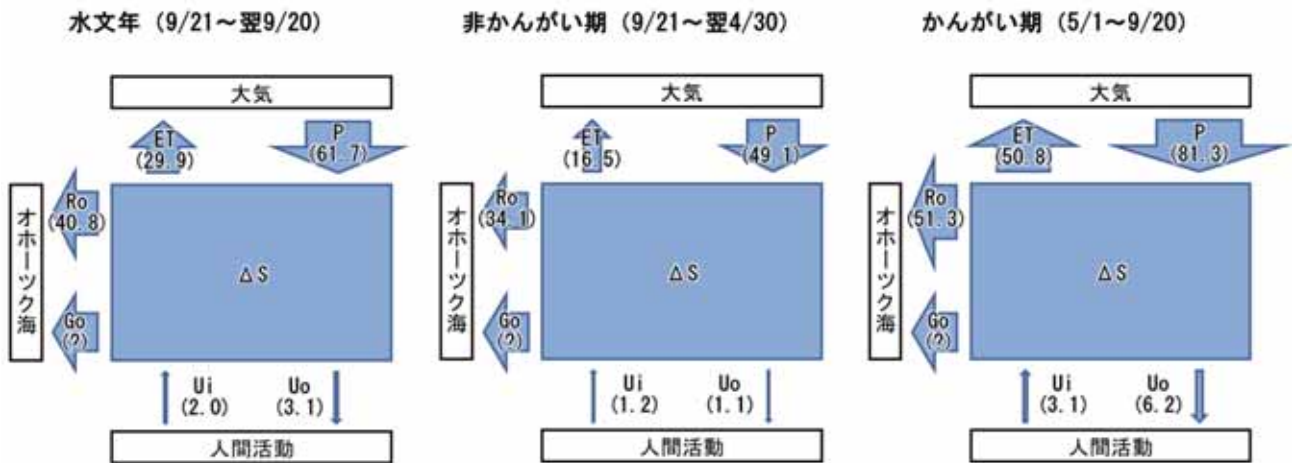


図8 常呂川流域（上川沿観測所より上流域の全区間）における水収支の計算結果（暫定版）. 木塚・鈴木¹³⁾を一部改変. 水収支は2008~2015水文年の平均流量（m³/s）を表している. 最上流域を含むため、上流区間からの河川水流入量（R_i）と地下水流入量（G_i）はともにゼロとなる.

一方、常呂川流域の水理地質層序によれば、北見盆地の地下帯水層に貯留した地下水は、北見盆地から下流の山間部に入る忠志観測所付近まででその大部分が河川に流出すると考えられる¹⁴⁾. そこで、推定した水資源賦存量の妥当性を検証するために、上川沿観測所より上流域の水資源賦存量と上川沿観測所における実測の河川流量を比較した（図9）. その結果、今年度推定した水資源賦存量は河川流量に対して2割程度小さかった. 昨年度推定した水資源賦存量が河川流量の半分程度だったのに比べると、今年度の推定結果は大幅に改善されたと考えられるが、なお水収支の不一致がある. 本研究では蒸発散量の推定において、井形¹⁰⁾による石狩川流域における調査に基づく土地利用ごとの蒸発散比を使用した. 常呂川流域における森林や農地の蒸発散比は、樹種・作物種や管理方法の違いなどに伴い、石狩川流域と異なることが考えられる. 今後、常呂川流域の地域特性を考慮した蒸発散比について、精査する余地があると考えられる.

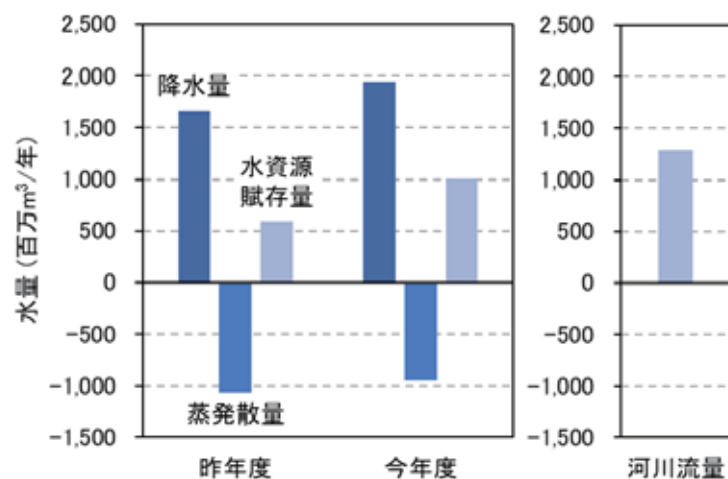


図9 常呂川流域（上川沿観測所より上流域の全区間）における年間の降水量、蒸発散量、及び水資源賦存量の推定値と河川流量（上川沿観測所）の比較. 蒸発散量は負方向に示す. 昨年度の推定値は木塚・鈴木（2018）¹³⁾による. 今年度の推定値及び河川流量は2008~2015水文年の平均値を示す.

d) かんがい用水の潜在需要量の推計結果

2015年の作付面積を基に、水田と畑地におけるかんがい用水の潜在需要量を小流域ごとに推計し地図化した(図10)。水田のかんがい用水需要は太茶苗観測所から中流域にかけて見られ、特に北見盆地北東部に位置する北見市端野で100万m³以上120万m³未満の突出して大きい値を示した。また、常呂川本流の訓子府川合流付近から上常呂と置戸観測所の間地点にかけて、無加川流域の下流部、及び訓子府川流域で20万m³以上60万m³未満の値を示した。

一方、畑地のかんがい用水需要は概ね流域全体に見られ、特に訓子府川流域で40万m³以上60万m³未満の比較的大きい値を示した。訓子府川流域の畑地では、コムギ、テンサイ、バレイショの作付面積が比較的大きく、これら作物の水需要を反映したと考えられる。また、常呂川本流の「河口ー上川沿」区間、北見市端野、及び「上常呂ー置戸」区間で20万m³以上40万m³未満の値を示した。

推計したかんがい用水の潜在需要量を流域8区間ごとに集計した結果、水田と畑地ともに、常呂川本流の太茶苗から置戸観測所までの区間と無加川流域の「北光社ー最上流」区間で比較的大きい値を示した(図11)。河川からの実際の農業用水の取水(図7)も、「忠志ー北見」区間を除き、潜在需要量の大きい区間と対応していることから、各区間の水需要に応じて河川水が取水されていると考えられる。

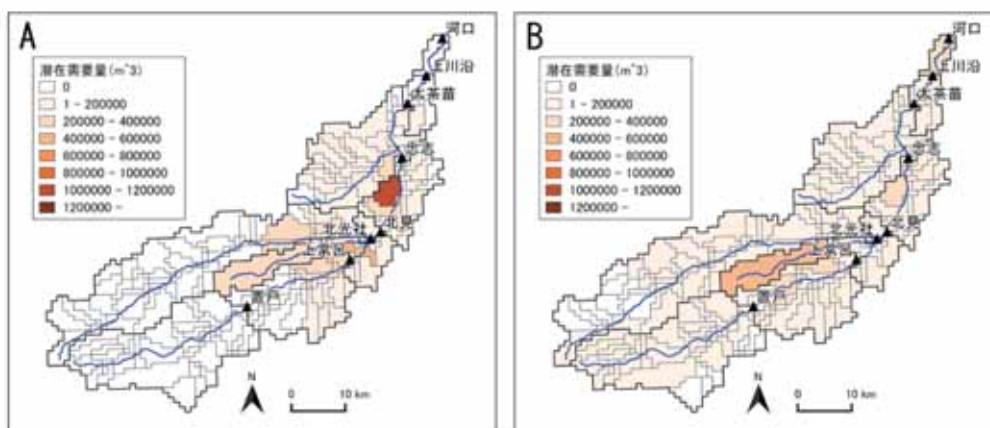


図10 水田(A)と畑地(B)におけるかんがい用水の潜在需要量(2015年)。河川ラインは国土数値情報の「河川データ」を加工して作成。水位・流量観測所の位置は国土交通省の主要水系調査による。

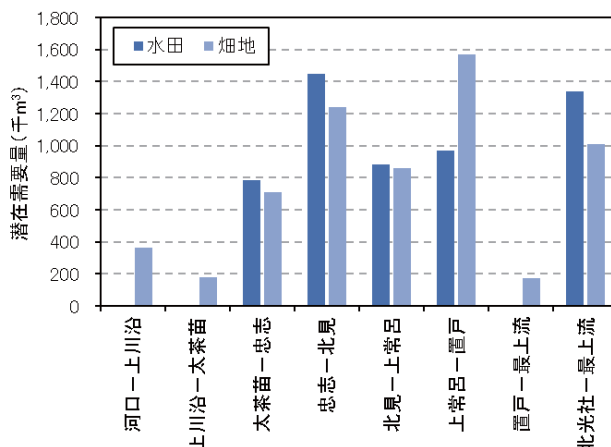


図11 常呂川流域の各区間におけるかんがい用水の潜在需要量(2015年)

本推計では農業集落カードの集落別作付面積を基に、集落に交差する小流域に作付面積データを面積按分して与えている。そのため、集落面積が大きく、1集落に複数の小流域を含む場合には、実際には農地が無い小流域にも作付面積が有るものとして集計される場合がある。また、小流域を表すGISデータは1kmメッシュを基にしているのに対し、集落を表すGISデータはより解像度の細かい滑らかな形状の境界を持つ。そのため、小流域と集落の境界が一致せず、実際には農地が無い小流域にも隣接する小流域の影響を受けて作付面積が有るものとして集計される場合がある。畑地のかんがい用水需要が常呂川本流や無加川の最上流部にも見られたのは、こうした空間解析の影響を受けているためと考えられる。

今回、かんがい用水として、畑地においては不足する土壌水分量を補給し、水田においては湛水深を維持するのに必要な水量を対象にした。しかし、ほ場で必要な水はこれ以外にも、例えば病虫害防除のための用水や、水稻の生育段階に応じた水位管理のための用水などの栽培管理用水量がある^{15),16)}。今後、農業用水の潜在的な需要量をより正確に見積もるためには、栽培管理用水量を考慮する必要がある。

(3) まとめと今後の課題

本研究では、昨年度に引き続き河川水の取水に関する既存データを収集・整理するとともに、降水量と蒸発散量の算出手法を再検討し、流域全体の水収支の把握を進めることができた。原単位法によるかんがい用水需要量の推計手法は、作付面積の変化によるかんがい用水需要量の変動予測に応用することができる。人間活動の将来変化に応じてより効率的な水利用を検討する上で、これらの水資源と水需要に関する知見の活用が期待される。

今後は、蒸発散量の推定手法を精査して水収支の整合性を向上させるとともに、地下水流動も考慮した上で水循環モデルの構築を進める予定である。また、流域内の各種産業や人々の暮らしのどのような要素が水需要の変化に強く影響するのかを分析するため、かんがい用水以外の水需要の推計手法についても検討を進める予定である。

謝辞：本研究の実施にあたり、国土交通省北海道開発局網走開発建設部には河川の流量観測データと取水データを、北海道オホーツク総合振興局網走建設管理部には取水データをご提供いただきました。北見市上下水道局、訓子府町上下水道課、置戸町施設整備課には水道の給水データと下水道及び農業集落排水の排水量データをご提供いただきました。北見土地改良区には頭首工の取水データをご提供いただきました。北海道農政部農村振興局農地整備課には畑地かんがいデータを、北海道空知総合振興局には水田かんがいデータをご提供いただきました。北海道立総合研究機構中央農業試験場及び北見農業試験場には農業集落カードの集計データをご提供いただくとともに、農業用水に係る情報収集にご協力いただきました。同機構さけます・内水面水産試験場にはふ化場の取水に係る情報収集にご協力いただきました。同機構環境科学研究センターの福田陽一朗研究主任には、蒸発散量の計算プログラム作成にあたり貴重な助言を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 地方独立行政法人北海道立総合研究機構環境・地質研究本部環境科学研究センター・地質研究所：水資源、水域生態系保全に向けた、流域特性の検討と流域圏データベースの構築（平成26年度目的積立金経常研究報告書）、2015。
- 2) Thornthwaite, C. W. : An approach toward a rational classification of climate, *Geograph. Rev.*, Vol.38, pp.55-94, 1948.
- 3) 大野宏之・佐々木華織・大原源二・中園江：実況値と数値予報，平年値を組み合わせたメッシュ気温・降水量データの作成, *生物と気象*, Vol.16, pp.71-79, 2016.

- 4) 国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構：メッシュ農業気象データシステム。
<https://amu.rd.naro.go.jp/> (2019年3月1日確認)。
- 5) 中井専人・横山宏太郎：降水量計の補足損失補正の重要性—測器メタデータ整備の必要性—, 天気, Vol.56, pp.69-74, 2009.
- 6) 小南靖弘・広田知良・井上聡・大野宏之：メッシュ農業気象データのための積雪水量推定モデル, 雪氷, Vol.77, pp.233-246, 2015.
- 7) Penman H. L. : Natural evaporation from open water, bare soil and grass, *Proc. Roy. Soc. A*, Vol.193, pp.120-145, 1948.
- 8) 三浦健志・奥野林太郎：ペンマン式による蒸発散位計算方法の詳細, 農業土木学会論文集, Vol.164, pp.157-163, 1993.
- 9) 三浦健志・奥野林太郎：ペンマン式の計算を容易にするための工夫と提案, 農業土木学会論文集, Vol.164, pp.165-170, 1993.
- 10) 井形淳：地被別の実蒸発散量推定のための蒸発散比算定に関する研究, 水工学論文集, Vol.43, pp.79-84, 1999.
- 11) 小島賢治：融雪機構と熱収支, 気象研究ノート, Vol.136, pp.1-38, 1979.
- 12) 佐渡公明・児島正洋：補完関係式による流域実蒸発散量年変化の推定, 水工学論文集, Vol.40, pp.329-334, 1996.
- 13) 木塚俊和・鈴木啓明：流域における定常的な水循環モデルの構築, (財)北海道河川財団研究所紀要, XXIX, pp.51-57, 2018.
- 14) 森野祐助・大澤賢人：常呂川流域の水理地質, (財)北海道河川財団研究所紀要, XXIX, pp.39-43, 2018.
- 15) 農林水産省農村振興局監修：土地改良事業計画設計基準及び運用・解説 計画「農業用水（畑）」, 農業農村工学会, 2015.
- 16) 農林水産省農村振興局監修：土地改良事業計画設計基準及び運用・解説 計画「農業用水（水田）」, 農業農村工学会, 2010.

7. 水循環シミュレーターのプラットフォームの試作（担当：早川博・宇都正幸）

水循環シミュレーターの構築に向けて、図1に示す小課題1)において、第4章で水理地質構造を解析し、第5章で流域における水循環プロセスを把握するため、表流水と地下水に含まれる栄養塩濃度を用いた推定手法によって表流水と涵養された後の地下水の流動を明らかにした。また、小課題2)では、流域圏における各種の人間活動と水循環との関係性を定量的に明らかにすることをねらい、第6章で流域全体の水収支の把握を進め、水資源の用途ごとの取水量やその地理的分布の把握を試みた。

本章は小課題1)で構築した水循環モデルと小課題2)で整備した人間活動に関するデータを連結する小課題3)の水循環シミュレーターのプラットフォームの試作に向けて、第4章で得られた水理地質構造を踏まえた水循環モデルの改良について報告する。

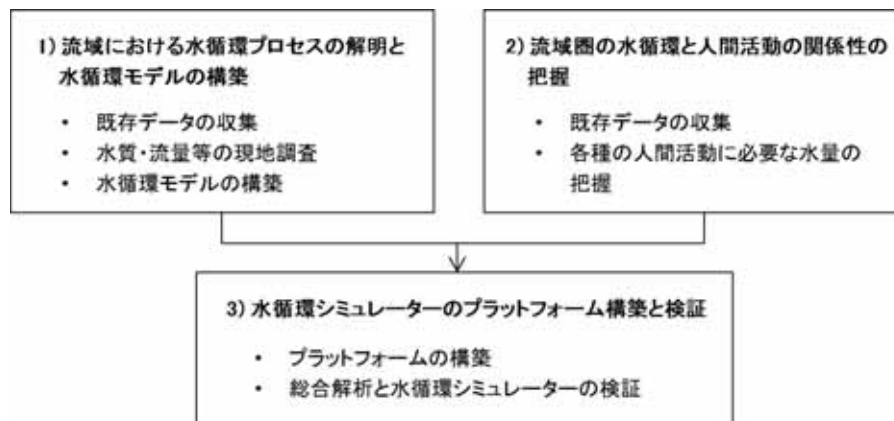


図1 本研究の構成(第2章の再掲)

(1) 水循環モデルの改良

本研究で構築した水循環モデル¹⁾は既往の論文で洪水流出の再現性が示されている1K-DHM^{2,3)}をベースとした分布型流出モデルである。1K-DHMは、標高 (Digital Elevation Model) および流下方向データ (Flow Direction) を用いることで流域を斜面グリッドおよび河道グリッドに分け、斜面グリッドでは不飽和・飽和中間流・地表面流を考慮したKinematic-waveモデル、河道グリッドでは地表面型のKinematic-waveモデルにより流出計算が行われる⁴⁾。しかし、1K-DHMは主に短期的な洪水イベントを対象とした流出モデルであり、流域圏における水循環と人間活動の影響を評価するには長期的な河川流況の予測が重要となる。そのため、本モデルでは図2に示すように長期的な河川流況の予測に重要となる蒸発散モデルとして月平均気温のみで推定可能なThornthwaite法⁵⁾を採用し、北海道のような積雪寒冷

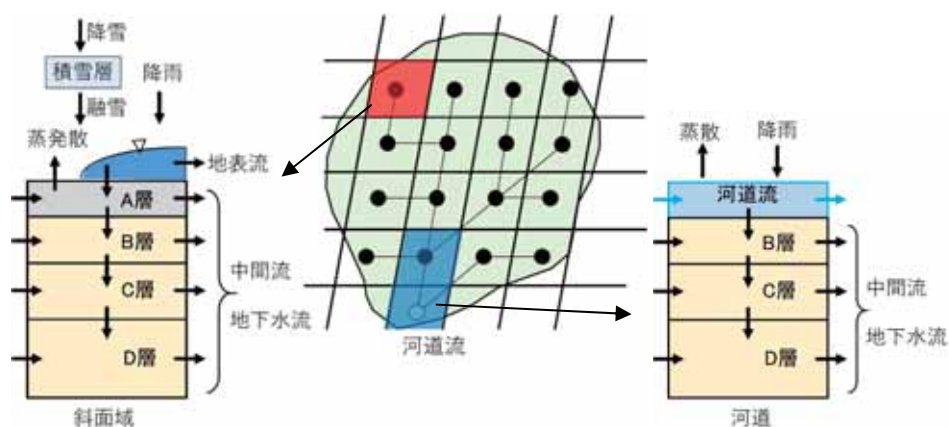


図2 水循環モデルの構成

地域に不可欠な積雪・融雪過程を評価する融雪モデルとして積雪時の圧密過程を考慮したdegree-hour法を採用した。しかし、本モデルのベースとなった1K-DHMモデルは、斜面グリッドを表層土壌のA層までの不飽和・飽和中間流・地表面流しか考慮していないため、特に低水時の流量の再現性に課題を残していた。そこで、第4章で得られた常呂川流域の水理地質構造を考慮し、小尻のHydro-BEAMモデル⁶⁾を参考に、A層の下部の地質構造として図2に示すB層、C層、D層の3層を付加し、各層の地下水浸透流モデルは線形貯留モデルとし、地下水流出方向は斜面グリッドの地表流・中間流と同じ落水方向とする。B、C層では貯留水量が層厚に達して飽和状態になると、溢水量は上層に復帰流として流入する。また、最下層のD層は帯水層に相当し、人間活動による農業、工業用水目的の地下水取水はこのD層から行う。

B層のモデルパラメータは層厚 d_B と次式の初期貯留量 S_B 、側方への流出係数 k_{B1} と下層への浸透係数 k_{B2} である。ここで、 I_B ：流入量、 O_B ：流出量であり、C層、D層も同様とする。

$$\frac{dS_B}{dt} = I_B - O_B, \quad O_B = (k_{B1} + k_{B2})S_B \quad (1)$$

本モデルの同定すべきパラメータは、新たに追加されたB層～D層のパラメータも入れ16個である。なお、各層の層厚は第4章の水理地質構造の調査結果から、第四紀の層厚約100mを、B層-5m、C層-25m、D層-90mに按分して一定値とした。モデルパラメータの同定手法はSCE-UA法⁷⁾を適用し、平成28(2016)年8月北海道豪雨災害の洪水イベントを対象に解析した。

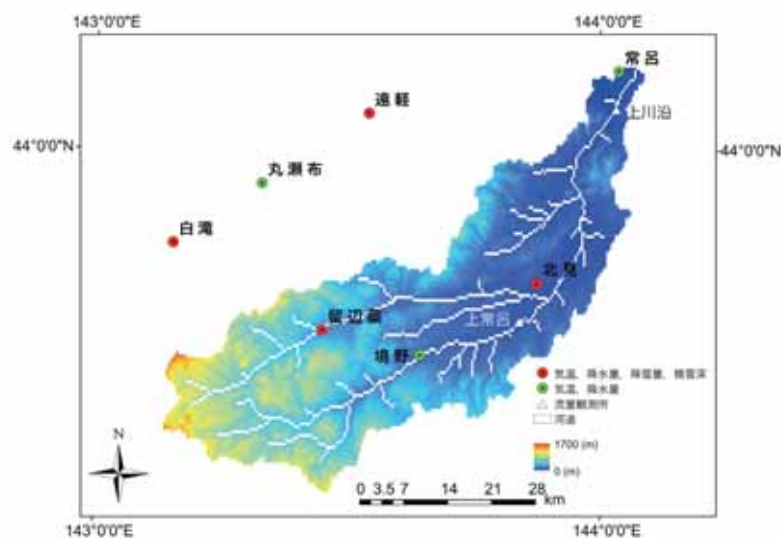


図3 常呂川流域とAMeDAS観測所

(2) 解析結果と考察

平成28(2016)年8月北海道豪雨災害⁸⁾は、8月17日(水)～8月23日(火)の1週間に3個の台風(7号、9号、11号)が北海道東部地域に上陸し、常呂川流域でも図3に示す上川沿流量観測地点やその上流の太茶苗流量観測所では計画高水位を超過し、 $H-Q$ 式による観測流量ではそれぞれ1,872(m^3/s)、1,270(m^3/s)の既往最大流量⁹⁾を記録した。また、8月29日からの前線と台風10号の接近により、十勝川水系では堤防の決壊や河川の氾濫など多大な被害を受け、常呂川流域でも9月10日に上川沿流量観測地点で1,000(m^3/s)を超える洪水イベントを記録するなど、約1ヶ月に渡って水位が高い状況であった。前報¹⁾では中流部の上常呂流量観測所の2001年洪水イベントの解析結果を示しているので、本報でも上常呂流量観測所と上川沿流量観測地点の解析結果を図4に示す。

図4上段の上常呂流量観測所の2001年洪水イベントの再現結果は良好であり、単一の流量ピークをもつハイドログラフでは本報で追加したB層～D層の地下水流出成分の明確な効果は見られない。図4中段

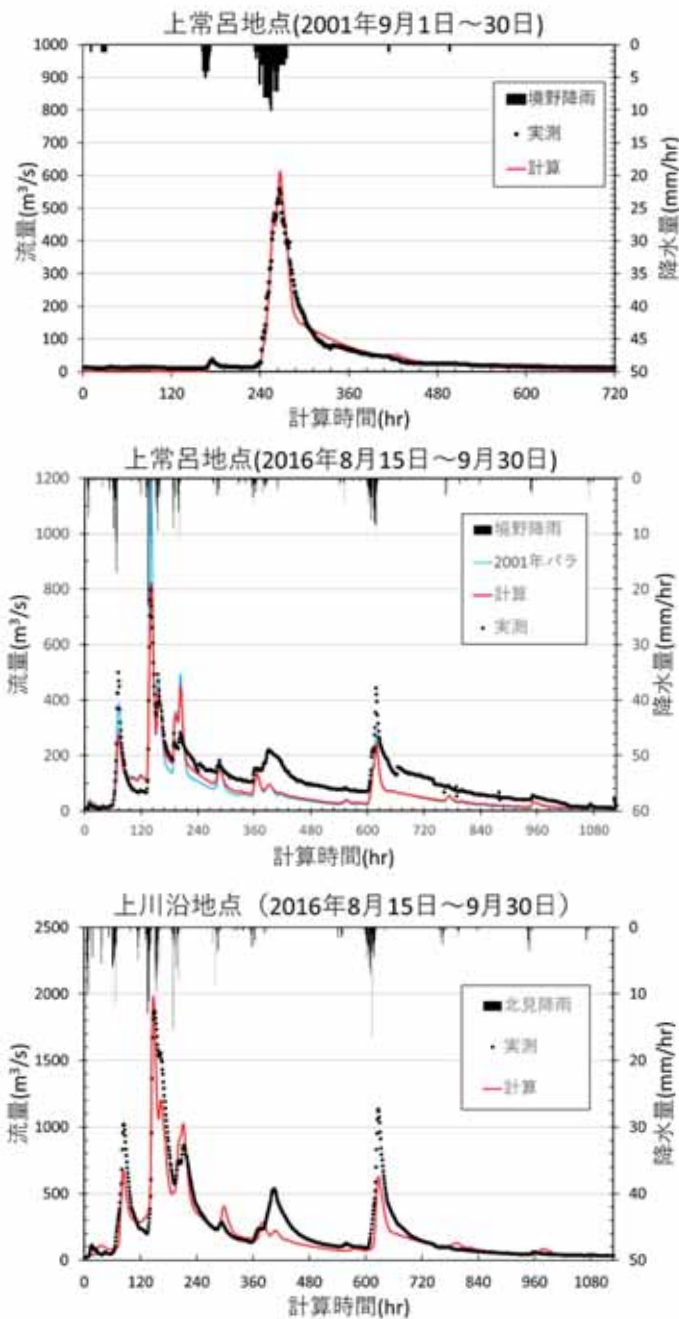


図4 水循環モデルのキャリブレーション結果

の2016年8月15日から1ヶ月間に連続する洪水イベントでは、8月21日の最大洪水イベント（第2ピーク）を最適とするパラメータ同定結果のため、後半の9月以降の洪水イベントに対して過小な再現結果となっている。一方、下流に位置する図4下段の上川沿流量観測地点の結果は、流量ピークだけでなく流量低減区間の再現性も良好であるが、後半の流量ピークは過小に評価されている。

本報では流域の水理地質構造を考慮し、B層～D層の地下水流出成分を追加する水循環モデルの改良を施した結果、流量低減区間の改善効果は見られたものの、観測地点によってはその効果が明確でないことも示された。この原因の一つとして、B層～D層の層厚と各層の透水係数も地質構造の空間分布を無視し流域全域で一定値に固定していることが挙げられる。一方で、本報の水循環モデルを長期の河川流況の解析に適用した場合は、図4下段の上川沿流量観測地点の再現結果に示された流量低減区間の改善が期待される。

(3) 水循環シミュレーターのプラットフォームの試作に向けて

前述の水循環モデルは地下水流出成分を考慮することによって、低水時の流量の再現性が改善されており、次のステップは人間活動に関するデータを連結する水循環シミュレーターのプラットフォームの試作である。第6章では流域の水利用について、流域を8区間に分けた水収支を計算し、河川から取水したかんがい用水の潜在需要量の空間分布を推定している。本研究の水循環シミュレーターは自然界の雨水の流動を追跡する水循環モデルにこれらの人間活動による河川水や地下水からの取水と涵養を組込むことになる。

人間活動による水利用を考慮した水循環モデルとしては、小尻のHydro-BEAMモデル⁶⁾の他にも、土木研究所のWEPモデル¹⁰⁾や、米国農務省が開発した水・物質循環モデルのSWATモデル^{11,12)}、地下水流動に重点をおいた登坂らのGETFLOWS¹³⁾やUSGSのMODFLOW¹⁴⁾がある。村上らはSWATモデルを北海道沙流川流域に適用し、日流量の長期的な経年変化を良好に再現している^{15,16)}。

本研究で試作中の水循環シミュレーターは流出モデルの構造上、Hydro-BEAMモデルの改良版に相当し、常呂川流域の流域グリッド毎に、そのグリッドの土地利用に応じてA層の水収支を考え、D層からの地下水取水モデルや、河川水の取水は河道グリッドから農地利用の斜面グリッドへの還元モデルを追加する必要がある。また、突発的な土砂流出や水質悪化の問題を抱え、総合的な流域管理が必要とされる常呂川流域では、将来的に安心・安全な水資源を安定的に確保する上でも、流域圏の人口減少・産業構造の変化などの社会情勢の変化や気候変動¹⁷⁾による降水量の変動などの外的要因も検討できる水循環シミュレーターが求められている。次年度は水循環シミュレーターを構築し、流域圏の水資源賦存量、水利用の経年変化の再現を目指す予定である。

謝辞：本研究の水循環モデルの構築にあたって、岐阜大学流域圏科学研究センター・丸谷靖幸特任助教には貴重な助言を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 早川博・宇都正幸：流域におけるイベント出水を中心とした水循環モデルの構築，(財)北海道河川財団研究所紀要，XXIX，pp.47-50，2018.
- 2) Tanaka, T. and Tachikawa, Y. : Testing the applicability of a kinematic wave-based distributed hydrologic model in two climatically contrasting catchments, *Hydrological Science Journal*, Vol.60, pp.1361-1373, 2014.
- 3) 京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻水文・水資源学分野：1K-FRM/DHM, <http://hywr.kuciv.kyoto-u.ac.jp/products/1K-DHM/1K-DHM.html> (2019年3月25日確認)
- 4) 立川康人・永谷言・寶馨：飽和，不飽和流れの機構を導入した流量流積関係式の開発，*水工学論文集*，第48巻，pp.7-12，2004.
- 5) Thornthwaite, C. W. : An approach toward a rational classification of climate, *Geograph. Rev.*, Vol.38, pp.55-94, 1948.
- 6) Kojiri, T. : Hydrological River Basin Environment Assessment Model (Hydro-BEAM), *Watershed models*, eds: Singh, V.P. and Frevert, D.K., Taylor & Francis, CRC Press, U.S.A, pp.613-626, 2006.
- 7) Duan, Q., Sorooshian, S. and Gupta, V. K. : Optimal Use of the SCE-UA Global Optimization Method for Calibrating Watershed Models, *Journal of Hydrology*, Vol.158, pp.265-284, 1994.
- 8) 土木学会水工学委員会：2016年8月北海道豪雨災害調査団速報版2016年9月12日，<http://committees.jsce.or.jp/report/system/files/2016%E5%B9%B48%E6%9C%88%E5%8C%97%E6%B5%B7%E9%81%93%E8%B1%AA%E9%9B%A8%E5%9C%9F%E6%9C%A8%E5%AD%A6%E4%BC%9>

A%E8%AA%BF%E6%9F%BB%E5%9B%A3%E5%A0%B1%E5%91%8A%E6%9B%B8_20170501.pdf,
(2019年3月25日確認)

- 9) 国土交通省水管理・国土保全局：水文水質データベース，<http://www1.river.go.jp/> (2019年3月25日確認)
- 10) 末次ら：都市河川流域における水・熱循環の統合解析モデルの開発，土木研究所資料，第3713号，2000.
- 11) SWAT HP： <https://swat.tamu.edu/> (2019年3月25日確認)
- 12) Gassman P. W., Reyes M. R., Green C. H. and Arnold J. G. : The Soil and Water Assessment Tool: Historical Development, Applications, and Future Research Directions, *Transactions of the ASABE*, 50 (4), pp.1211-1250, 2007.
- 13) 登坂ら：地表流と地下水流を結合した3次元陸水シミュレーション手法の開発，地下水学会誌，第38巻第4号，pp.235-267, 1996.
- 14) USGS: MODFLOW, https://www.usgs.gov/mission-areas/water-resources/science/modflow-and-related-programs?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects (2019年3月25日確認)
- 15) 村上ら：SWATモデルを用いた河川流域の物質流出特性評価について（第2報），国土交通省北海道開発局第54回（平成22年度）北海道開発技術研究発表会，No.技12，2010.
- 16) 村上ら：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要旨集，Pb-38，2010.
- 17) IPCC：第5次評価報告書 - 第1作業部会報告書（技術要約，気象庁訳），https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ipcc/ar5/ipcc_ar5_wg1_ts_jpn.pdf, 2015 (2019年3月25日確認).