

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 情報・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 情報・水環境グループ 研究職員

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。そのために今年度はまず、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。地下水流動を明らかにするために、既存の地質図やボーリング資料、重力探査資料をもとに流域の水理地質構造を推定した。その結果、訓子府から北見にかけての常呂川沿いの低地帯と仁頃地域の盆地に容水地盤が厚く分布している可能性が考えられた。また、地下水の涵養域を把握するための基礎情報として表流水の水素・酸素安定同位体比を調べ、その空間分布の特徴を明らかにした。河川流出については、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。また、水資源賦存量や河川水の取水量に関するデータを整理し、流域全体の水収支の把握を進めた。河川流量と取水量を比較した結果、河川水の利用においては、取水量の多くなるかんがい期に、とくに置戸観測所から北見観測所までの区間における河川流量の確保が重要と考えられた。

《キーワード：水理地質構造；水素・酸素安定同位体比；分布型流出モデル；水資源賦存量；水収支》

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。

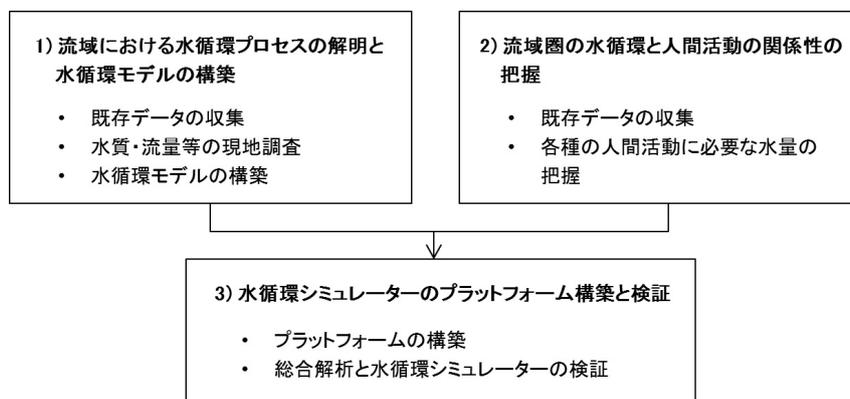


図1 本研究の構成

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、農林水産業の生産量、人口の流動など流域圏の人間活動に関する各種の既存データを収集するとともに、河川水や地下水の取水量との関係を調べ、人間活動に必要な水量を明らかにする。

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29年度に実施した、小課題1) 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。

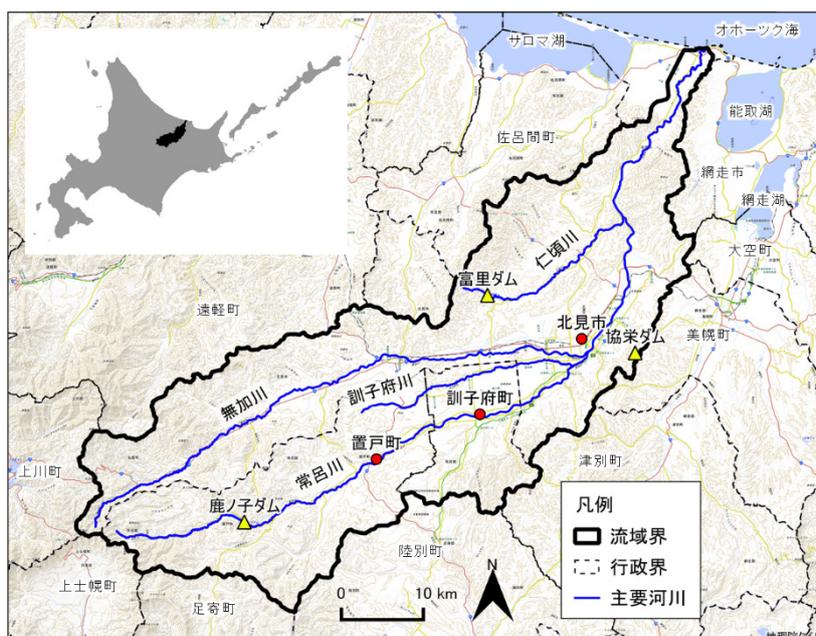


図2 常呂川流域の位置図。流域界、行政区界、及び主要河川は、国土数値情報「流域界・非集水域データ」、「行政区域データ」、及び「河川データ」をそれぞれ加工して作成。背景図は地理院タイル(標準地図)による。

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（2018年2月15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（2018年2月23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/v6dkjr00000002yqc-att/v6dkjr000000048qi.pdf>, 2007（2018年2月23日確認）.

4. 常呂川流域の水理地質（担当：森野祐助・大澤賢人）

常呂川流域内の地下水循環を明らかにするためには流域内の地形・地質を明らかにする必要がある。常呂川流域の地質は、ジュラ紀末～白亜紀火山岩・堆積岩類，古第三紀・新第三紀の堆積岩類・火山岩類，および第四紀の堆積物に大別される。ジュラ紀から古第三紀までの古い時代の地層は仁頃山地，北見丘陵及び津別山地西部に分布している。古第三紀から新第三紀の主に堆積岩からなる地層は栄森丘陵，津別山地などの基盤を構成している。新第三紀の火山岩類は置戸山地周辺に広く分布する。第四紀の堆積物は主に台地や低地を構成している。常呂川流域の水理地質基盤は下位より白亜系の仁頃層群，始新統の栄森層，中新統の津別層で構成される。容水地盤は中新統の相内層，第四系の更新統，火砕流堆積物，段丘堆積物，沖積層である。

(1) 水理地質概要

10万分の1北海道水理地質図幅5号「北見」及び同説明書¹⁾に基づいて記述する。

北見盆地の地下地質は美芳湯で掘削されたボーリングで明らかにされている（図1）。盆地の最下位には周辺の山地を構成する仁頃層群が存在し，北見市街地で深度約470mである。その上に津別層が深度約120mまで存在し，北見市街地で帯水層の厚さは約120mである。

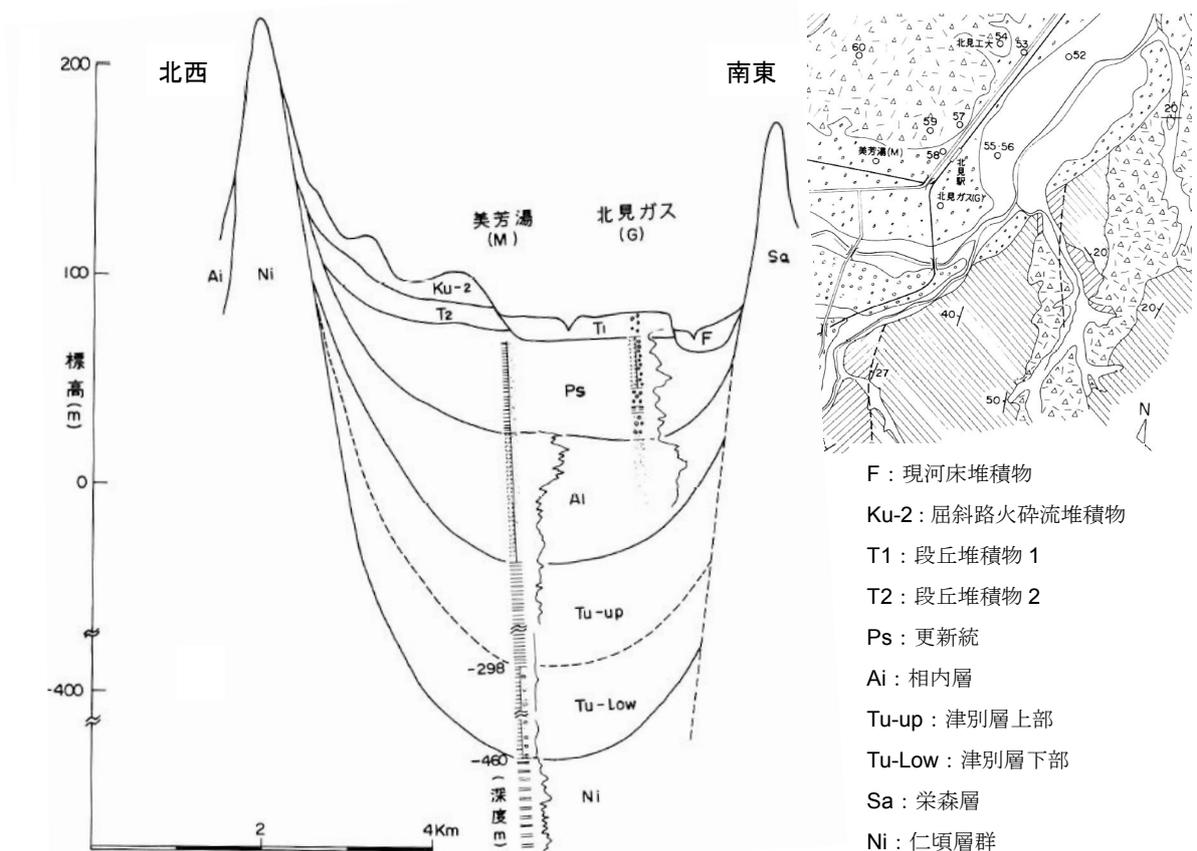


図1 北見盆地の地下地質¹⁾

(2) 地表地質踏査

水理地質構造を理解する上で表層地質分布及び岩相を把握する事は非常に重要である。今年度は仁頃層群，栄森層，津別層，相内層を対象に地表地質踏査を行い，代表的な岩相を観察した。

a) 仁頃層群²⁾

主に玄武岩質の枕状溶岩や塊状溶岩，ハイアロクラスタイトなどの火山岩・火山砕屑岩と火山岩質の角礫岩・砂岩からなり，少量の赤色チャートや石灰岩，赤色泥岩を伴う．玄武岩質火山岩・火山砕屑岩は変成作用や変質作用を受けて，暗緑色で緑色岩（類）が多い．



図2 仁頃層群 緑色岩

b) 栄森層³⁾

端野町協和～豊岡，北見市南丘～開成・常川にかけての丘陵地に分布する．主に礫岩と砂岩の互層で構成され，礫岩は緑色岩類・赤色チャート及び珪質泥岩の亜角～円形の中礫を主体とする．



図3 栄森層 礫岩層

c) 津別層⁴⁾

津別市街南部を模式地として栄森丘陵から津別山地に広く分布する。下部を砂岩層,上部を暗灰色硬質頁岩で構成される。



図4 津別層 硬質頁岩層

d) 相内層³⁾

盆地の東部周辺の北見市相内,常川や訓子府町大谷などの山地や台地の基盤として分布^{1) 5)},主に黄灰色で中粒～粗粒の弱固結凝灰質砂岩で構成される。



図5 相内層 凝灰質砂岩層

(3) 重力異常による水理地質構造の推定

水理地質構造を推定するために、重力探査資料を収集・整理した。常呂川流域の水理地質基盤は白亜系の仁頃層群、漸新統の栄森層、中新統の津別層で構成される。これらの地層は火成岩や変成岩、続成作用によって固結した堆積岩類で、硬質で緻密なため自然密度は一般的に $2.3\sim 2.6\text{g/cm}^3$ である。容水地盤は中新統の相内層、第四系の更新統、火砕流堆積物、段丘堆積物、沖積層で、未固結な場合が多く自然密度は一般的に $1.8\sim 2.0\text{g/m}^3$ である。つまり、常呂川流域の水理地質構造は密度差がある2層から構成されると考えられる。常呂川流域の地質図⁶⁾と重力異常図⁷⁾を重ね合わせた図を図6に示す。

重力異常は地下に高密度な物質があれば高重力異常を、低密度な物質があれば低重力異常を示す。このことから、水理地質基盤で構成されている山地や丘陵は高重力異常(図6中H)を、容水地盤が厚く堆積している低地部では低重力異常(図6中L)を示した。常呂川流域の特徴的な低重力異常は訓子府から北見にかけての南西-北東方向に延びる常呂川沿いの低地帯と仁頃地域の南西-北東方向に延びる盆地である。この地域は容水地盤が厚く分布していると考えられる。また両地域は周辺を水理地質基盤に囲まれた閉鎖的な地下水盆地なので、それぞれ、仁頃川下流(常呂川合流前)、忠志付近までに地下水盆地内の地下水が河川へ流出すると考えられる。

今後、大深度まで掘削した温泉ボーリング資料を収集し水理地質基盤深度分布を把握することで、詳細な水理地質構造を推定可能である。

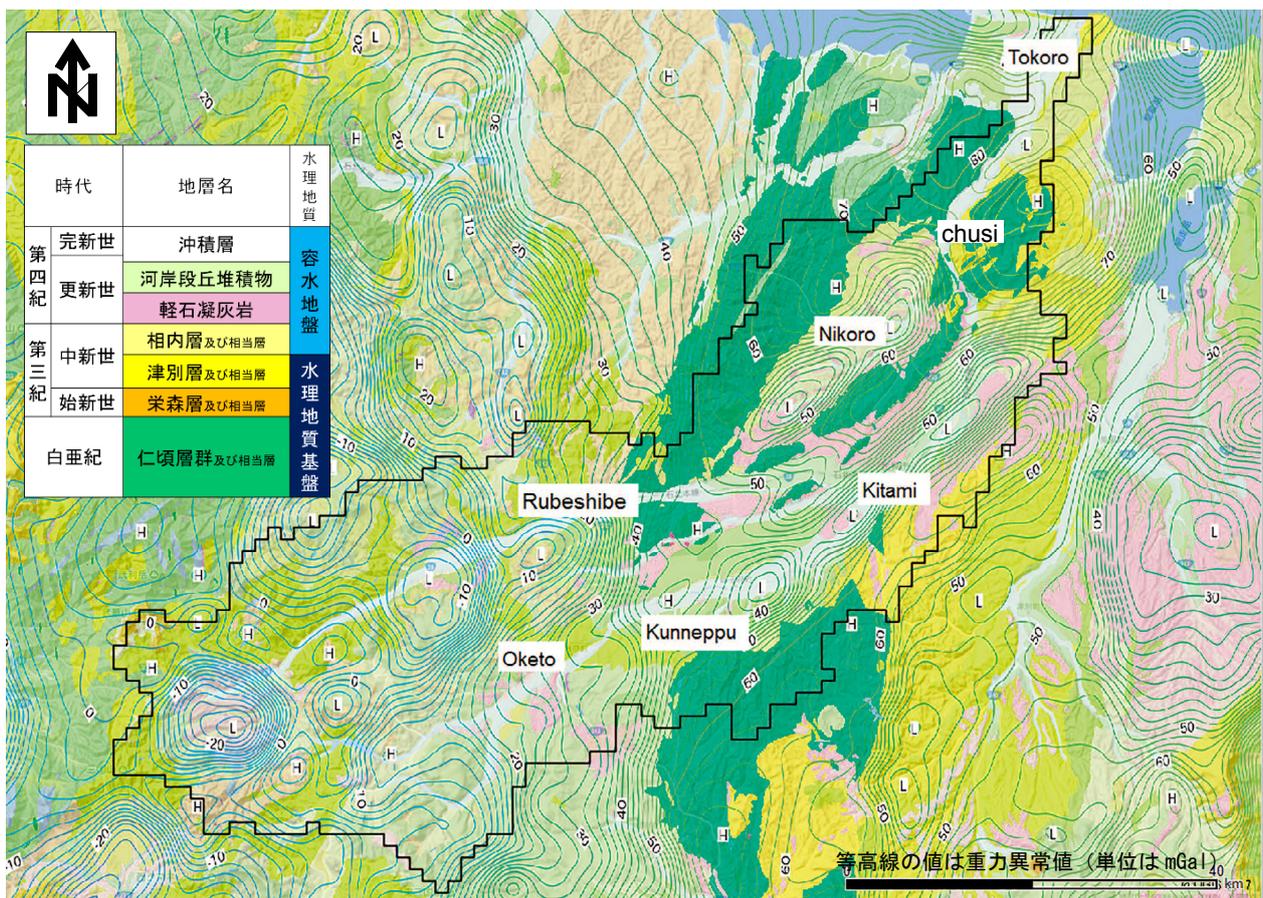


図6 常呂川流域の地質図と重力異常図(仮定密度 2.67g/cm^3)

参考文献

- 1) 小原常弘・和田信彦・横山英二・松浪文博・佐藤巖：北海道水理地質図幅説明書，第5号，「北見」，北海道立地下資源調査所，53p，1980。

- 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，35p，1968.
- 4) 千地万造・榎山次郎・紺田功・坂本享：北海道網走—阿寒湖間の第三系層序，地質学雑誌，58 no. 682，1952.
- 5) 小原常弘・国府谷盛明・早川福利・山口久之助・佐藤巖：北見市の水理地質，地下資源調査所報告，47，pp.81-88，1975.
- 6) 地質調査総合センター(2014b) 日本シームレス地質図®WMTS 配信サービス仕様. <https://gbank.gsj.jp/seamless/wmts/wmts.html>
- 7) 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（担当：森野祐助・大澤賢人）

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いる¹⁾²⁾。森野・大澤³⁾は常呂川流域の表流水を収集、地下水循環機構推定のための基礎情報として、水素・酸素安定同位体比を測定し分布を示した。

(1) 手法

分析には2017年5月から8月にかけて常呂川流域で採取し現場で濾過（ワットマン製ガラス繊維ろ紙GF/Fを使用）した水試料を用いた。水試料の水素と酸素の安定同位体組成はキャビティンクダウン分光装置（Picarro社製 L1102-ib）を用いて測定した。分析方法は、1検体につき8回の繰り返し分析を行い、分析値が最も安定する5～8回目の分析値の平均値を求めた。

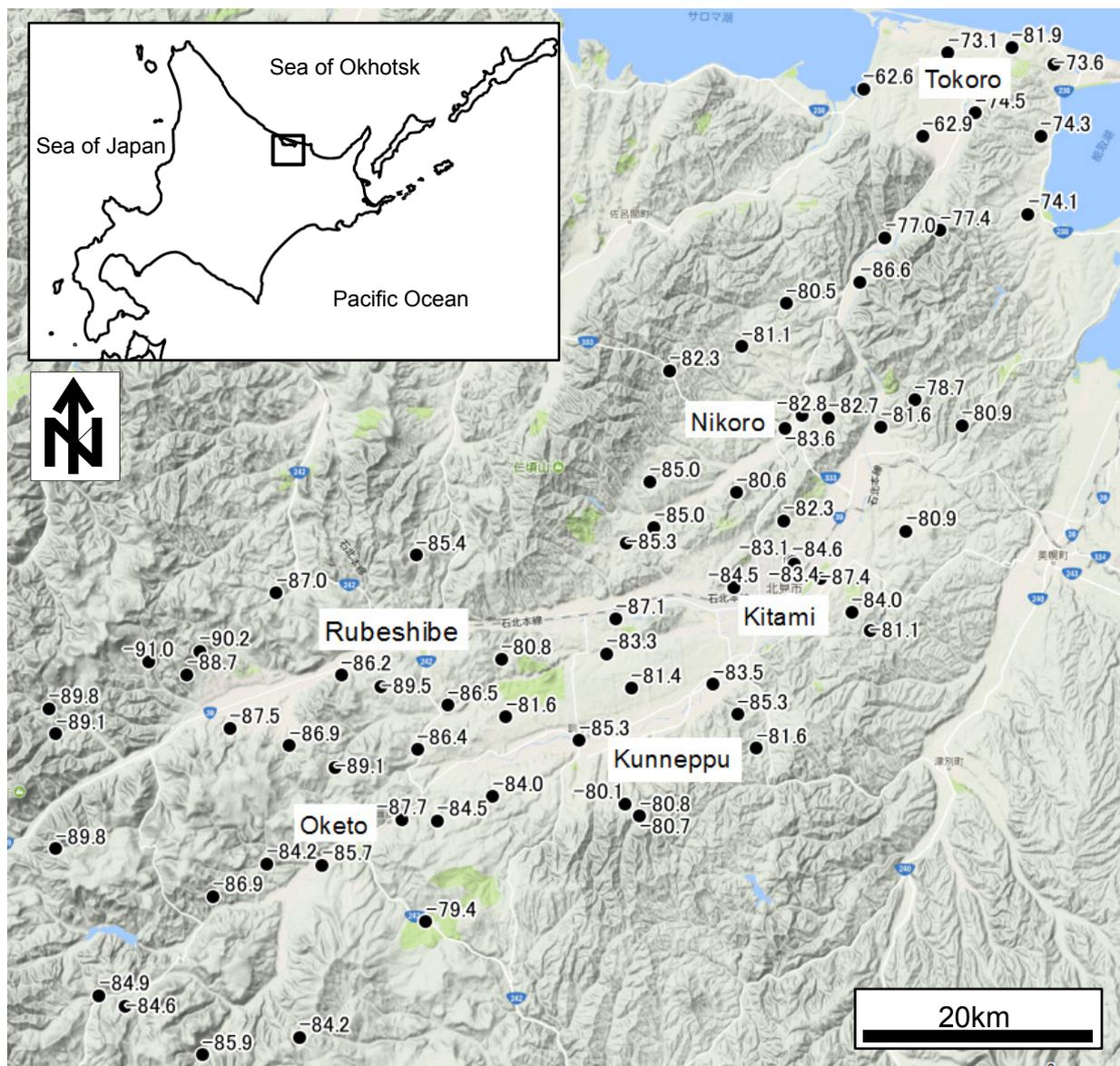


図1 水素安定同位体比 (δD‰) 分布³⁾

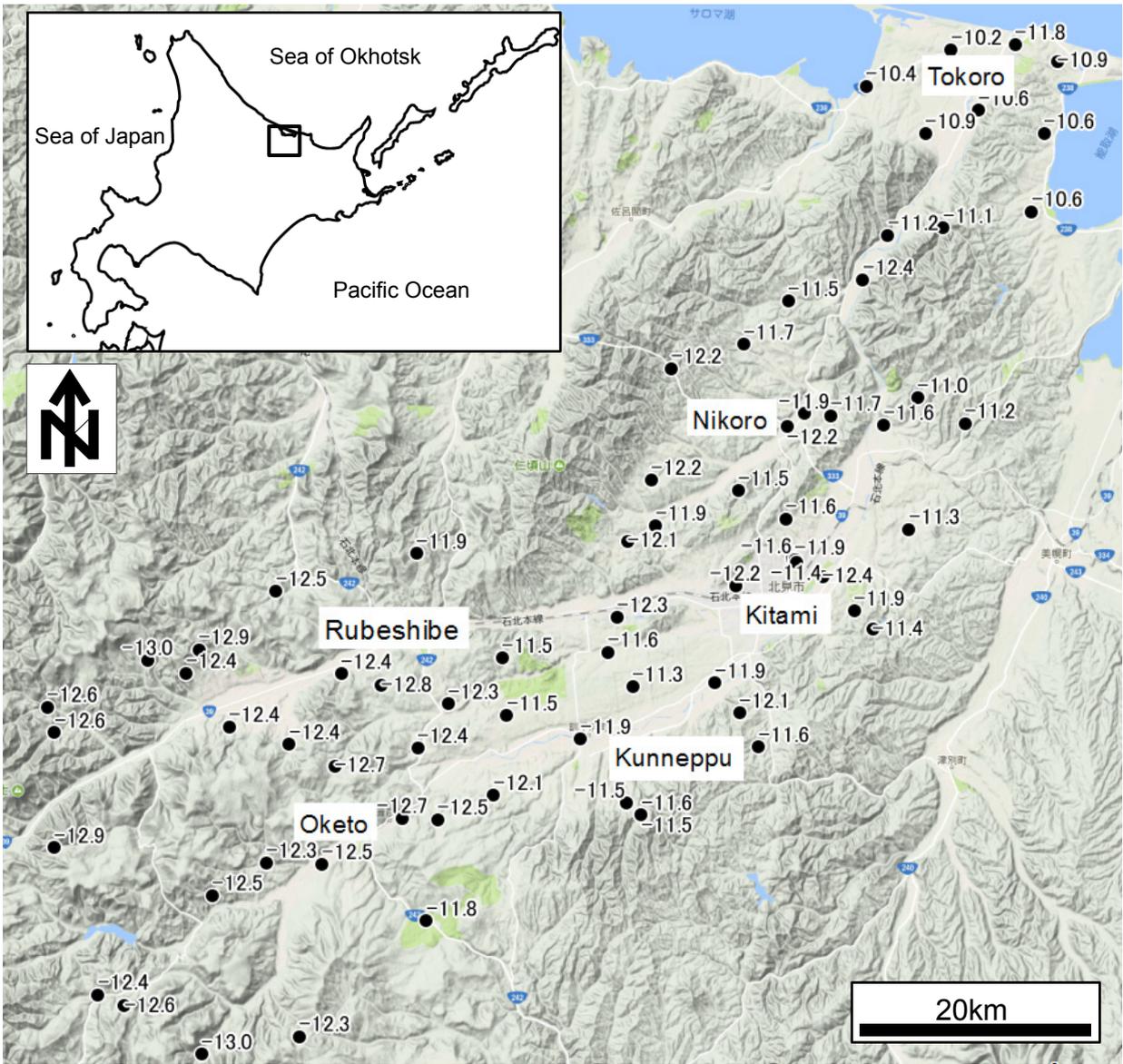


図2 酸素安定同位体比 ($\delta^{18}\text{O}\text{‰}$) 分布³⁾

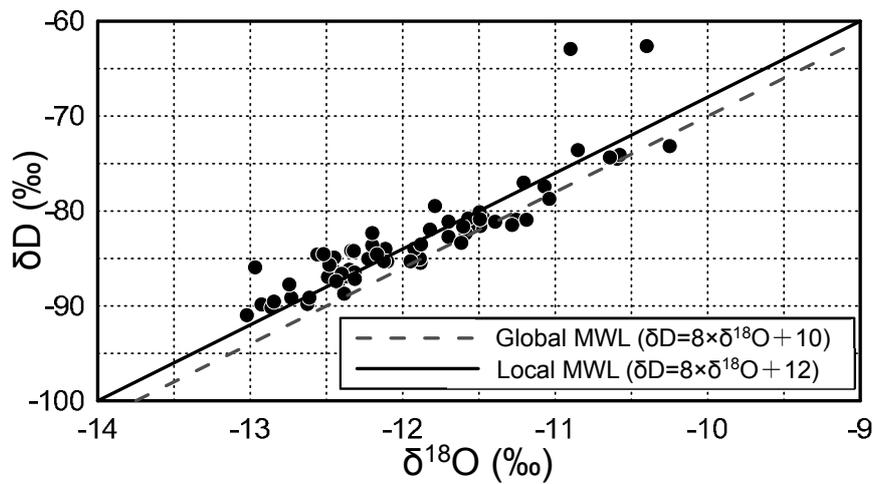


図3 水素安定同位体比 (δD) 酸素安定同位体比 ($\delta^{18}\text{O}$) の関係³⁾

(2) 結果

常呂川流域で採取した水試料の水素・酸素安定同位体比の結果のうち、水素安定同位体比分布を図1に、酸素安定同位体比の分布を図2に示す。水素同位体比 (δD) は -91.0‰ ～ -62.6‰ 、酸素安定同位体比 ($\delta^{18}O$) は -13.0‰ ～ -10.2‰ の範囲であった。

δD の分布は下流域(常呂周辺)で $-62.6\sim -81.9\text{‰}$ 、中流域(北見周辺)で $-78.7\sim -85.3\text{‰}$ 、上流域(留辺蘂・置戸周辺)で $-80.8\sim -91.0\text{‰}$ となった。 $\delta^{18}O$ の分布は下流域(常呂周辺)で主に -10‰ オーダー、中流域(北見周辺)で主に -11‰ オーダー、上流域(留辺蘂・置戸周辺)で主に -12‰ オーダーとなった。 δD 、 $\delta^{18}O$ ともに内陸(上流)ほど低い値を示し、それぞれの流域で標高の高い地域では相対的に低い値を示す。これは、内陸部ほど同位体比が低くなる内陸効果と、標高が高い地域ほど同位体比が低くなる高度効果⁴⁾によるものと考えられる。

一般的に $\delta^{18}O$ と δD の関係は傾きを8とする直線($\delta D = 8 \times \delta^{18}O + d$)で近似される⁵⁾。この直線は天水線(Meteoric Water Line)と呼ばれ、地球規模では $d=10$ を示す。 d 値は水蒸気団の生成時の蒸発速度によって決まり地域毎に異なる値を示し日本では日本海側で20前後、太平洋側で10前後を示す。対象地域はオホーツク海に注ぐ河川流域のため中間的な値の $d=12$ を示す(図3)。

(3) まとめ

本研究で常呂川流域の水素・酸素安定同位体比分布及び d 値を明らかにした。常呂川流域で採取した表流水の水素・酸素安定同位体比は、上流域ほど低い値を、河口域ほど高い値を示し、内陸効果及び高度効果によるものと考えられた。降水、河川水、地下水などの特徴を示す重要な指標になる d 値は $d=12$ を示した。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、北海道立総合研究機構地質研究所の高橋徹哉資源環境部長には有益な助言を頂いた。同部資源環境グループの大森一人研究職員には水素・酸素同位体比分析に関して技術助言を頂いた。また資源環境グループの皆様には、有益な助言、議論をいただいております。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) Clark, I. and Fritz, P.: *Environmental Isotopes in Hydrology*. Lewis, New York, 328p, 1997.
- 5) Craig, H.: Isotopic variations in meteoric waters, *Science*, 133, pp. 1702- 03, 1961.

6. 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（担当：早川 博・宇都正幸）

(1) 流域圏における諸課題

近年、局所豪雨の増加や北海道では台風の上陸数が急激に増加するなど、気候変動に伴う様々な変化が顕著に現れてきており、最近では“既往最大”や“想定外”という言葉が頻繁に報道される機会が増加してきた。このような気候変動の影響は、我々が生活する流域圏において非常に大きな被害をもたらしており、“既往最大”クラスの台風の上陸による、“想定外”の洪水発生による住環境や産業への被害が生じている。そのため、持続可能な流域圏を考えるには、気候変動などの影響も考慮した水循環と人間活動の影響を定量的に評価する必要がある。これまで多くの研究者により、様々な水循環モデルが開発されてきた（例えば、Hydro-BEAM¹⁾やWEB-DHM^{2,3)}、MATSIRO⁴⁾）。Hydro-BEAMやWEB-DHMは、分布型流出モデルであり、流域圏における河川流況の再現・予測を目的として開発されてきた。一方、MATSIROは陸面過程モデルであり、MATSIROに人間活動モジュールを組み込まれた水循環モデルHiGW-MAT⁵⁾も開発され、多くの研究で用いられている。しかし、MATSIROのような陸面過程モデルは、水・熱収支の解析には有用であるが、標高に伴う斜面流出といった流出過程の再現精度に課題を有する。そこで本研究では、流域圏における水循環と人間活動の影響を評価可能な新たな水循環モデルを開発することを目的とする。

(2) 水循環モデルの概要

本研究で対象とする常呂川流域では、過去に洪水に伴う濁水・土砂流出による貝類の斃死⁶⁾や濁水取水に伴う断水⁷⁾が発生している。さらに平成28年8月北海道豪雨災害⁸⁾では豪雨に伴う洪水による甚大な被害が対象流域で発生しており、持続可能な流域圏を構築するには、洪水のようなピーク流量を適切に評価可能な水循環モデルが必要となる。そこで本研究では、既往の論文で洪水流出の再現性が示されている1K-DHM^{9),10)}をベースとした分布型流出モデルを構築することとした。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¹¹⁾。しかし、1K-DHMは主に洪水イベントを対象とした流出解析を目的として構築されており、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。そこで、長期的な河川流況の予測に重要となる蒸発散に関するモデルを本モデルに組み込むこととした。本研究では、蒸発散の推定には月平均気温のみで推定可能なThornthwaite法¹²⁾を採用することとした。さらに、北海道のような積雪寒冷地域では積雪・融雪過程を適切に評価可能な融雪モデルを組み込む必要がある。そこで本研究では積雪時の圧密過程を考慮したdegree-hour法を採用することとした（式(1)-(5)）。

$$S_d = S'_d + S_f - REDUCT - M_s \quad (1)$$

$$M_s = k \cdot T_d + M_g \quad (2)$$

$$REDUCT = PP \cdot \frac{S'_d}{WEQ'} \cdot \left(\frac{S'_d}{10}\right)^{0.35} \cdot 0.3244 \quad (3)$$

$$WEQ = WEQ' + PP \quad (4)$$

$$\rho_s = \frac{WEQ}{S_d} \quad (5)$$

ここで、 S_d ：積雪深 (mm)、 S'_d ：降雪前の積雪深 (mm)、 S_f ：降雪量 (mm)、 M_s ：融雪量 (mm)、 k ：パラメータ、 T_d ：気温 (°C)、 M_g ：地熱による融雪量 (mm)、 PP ：降水量 (mm)、 $REDUCT$ ：圧密量 (mm)、 WEQ' ：降雪前の積雪水量 (mm)、 ρ_s ：雪密度 (g cm⁻³)、 WEQ ：積雪水量 (mm) である。

(3) 水循環モデルの再現性の検証

水循環モデルにおける再現精度を向上させるには、例えば雨量や降雪量の空間分布を適切に与える必要がある。そこで本研究では、数に限りがある地上気象観測所のデータを図1で示されるAMeDAS観測所における水文気象データをティーセン法により流域を分割することで与えることとした。

本研究で構築した水循環モデルのパラメータは既往の洪水イベント（2001年9月）を対象として、中流の上常呂地点での観測流量を与えてSCE-UA法¹³⁾によって同定した（図2）。ここで、キャリブレーション結果の妥当性を確認するためNash-Sutcliffe係数（以下Nash）およびCoDを計算した。Nash, CoDは両者とも0.984となり、一般的に高再現性を示す0.6以上であった。同定したパラメータを表1に示す（各パラメータの詳細は、参考文献¹¹⁾を参照いただきたい）。

次に、本研究で導入した融雪モデルのパラメータを決定するため、常呂川流域周辺で降雪量および積雪深が計測されているAMeDAS観測所（遠軽、白滝、留辺蘂、北見）の4地点を対象に2000年11月から2001年12月において積雪深の再現計算を行い、パラメータを同定した。一例として、AMeDAS観測所（北見）のキャリブレーション結果を図3に示す。ここで、キャリブレーション結果の妥当性を確認するためCoDを計算したところ0.980となり、一般的に高再現性を示す0.6以上であった。同定したパラメータを表2に示す。

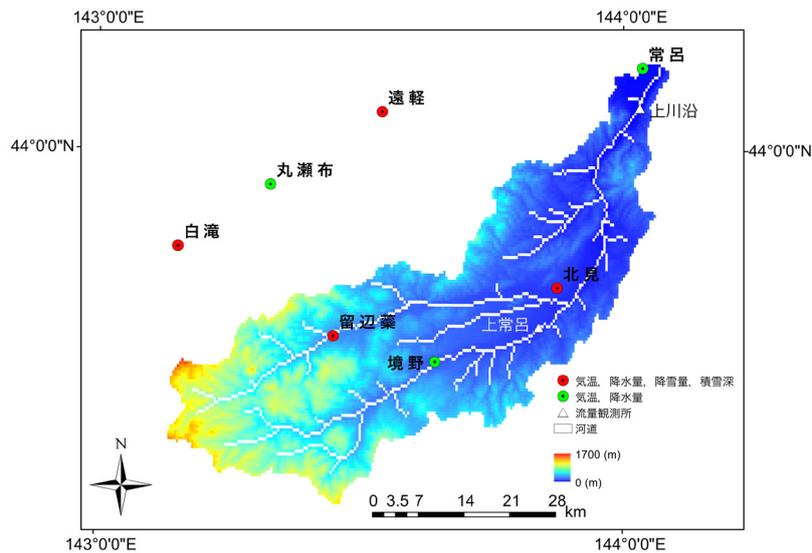


図1 常呂川流域とAMeDAS観測所

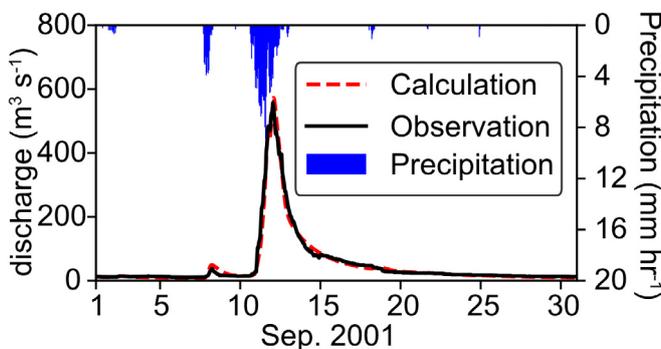


図2 水循環モデルのキャリブレーション結果

表1 水循環モデルのパラメータ

パラメータ	値
等価粗度 n ($\text{m}^{-1/3} \text{s}^{-1}$)	0.1018
飽和透水係数 k_a (m s^{-1})	0.0146
土層厚 d_a (m)	0.4028
土層厚 d_s (m)	0.3337
透水係数比 β (-)	8.3428

最後に水循環モデルおよび融雪モデルをカップリングさせ、同定したパラメータが長期的な河川流況を再現可能か確認するため、case1（2000年11月から2001年12月）、case2（2005年11月から2006年12月）、case3（1997年11月から1998年12月）の3事例を対象にバリデーションを行った。バリデーション結果の1例（case2）を図4に示す。ピーク流量で過大、融雪期間で過小な値を示している点はあるものの、全体的な流量の変化傾向を再現しており、高い再現性を示していることが分かる。しかし、本研究で用いた水循環モデルでは、斜面グリッドで洪水に着目して開発された不飽和・飽和中間流・地表面流を考慮したKinematic-waveモデルが採用されており、特に低水時の流量の再現性に課題を残している。そのため、今後は洪水だけではなく低水時の流量も適切に再現出来るよう、斜面グリッドに採用するモデル等を改良し、汎用性の高い水循環モデルを構築していく予定である。

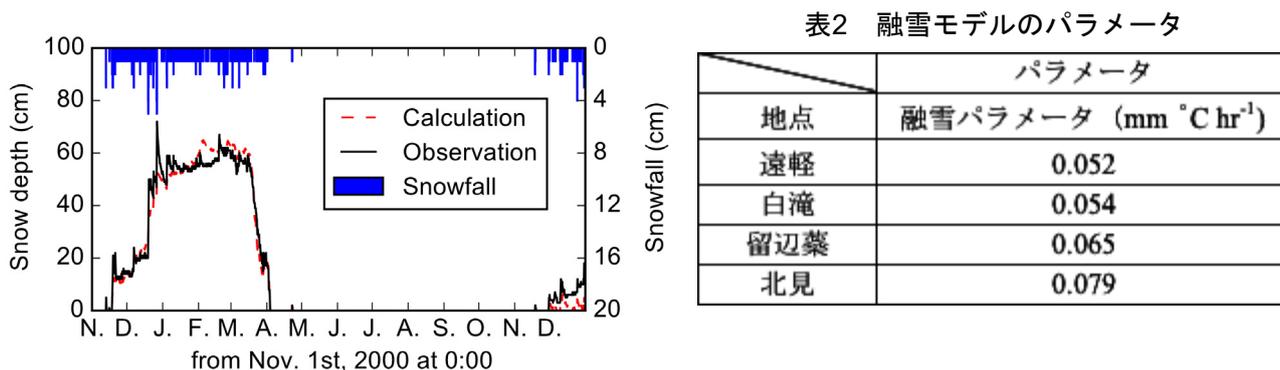


図3 AMeDAS観測所（北見）における融雪モデルのキャリブレーション結果

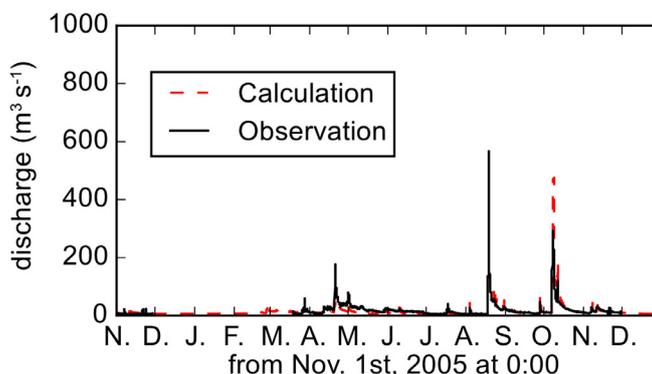


図4 水循環モデルの検証結果（一例としてcase2（2005年11月から2006年12月）を示す）

参考文献

- 1) 小尻利治・東海明宏・木内陽一：シミュレーションモデルでの流域環境評価手順の開発，京都大学防災研究所年報，第41号 B-2，pp.119-134，1998.
- 2) Wang, L., Koike, T., Yang, K., Jackson, T. J., Bindlish, R. and Yang, D. : Development of a distributed biosphere hydrological model and its evaluation with the Southern Great Plains Experiments (SGP97 and SGP99), *J. Geophys. Res.-Atmos.*, Vol.114, D08107, 2009, DOI: 10.1029/2008JD010800.
- 3) Wang, L., Koike, T., Yang, K. and Yeh, P. : A sssessment of a distributed biosphere hydrological model against streamflows and MODIS land surface temperature in the upper Tone River Basin, *Journal of Hydrology*, Vol.377, pp.21-34, 2009.
- 4) Takata, K., Emori, S. and Watanabe, T. : Development of the minimal advanced of the surface interaction and

runoff, *Global Planet Change*, Vol.38, pp.209-222, 2003.

- 5) Pokhrel, Y., Hanasaki, N., Koirala, S., Cho, J., Yeh, P. J. F., Kim, H., Kanae, S. and Oki, T. : Incorporating anthropogenic water regulation modules into a land surface model, *J. Hydrometeor.*, pp.255-269, 2012.
- 6) 黒田保孝・加納浩生・奥山昌幸：常呂川水系常呂川における土砂流出調査に関する報告，河川技術論文集，第10巻，pp.167-172，2004.
- 7) 北見市：北見市水道水の断水に関する原因技術調査委員会報告書（要約），
<https://www.city.kitami.lg.jp/docs/2013062500065/files/dansuihokoku.pdf>，（2018年2月26日確認）
- 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%9A%E8%AA%BF%E6%9F%BB%E5%9B%A3%E5%A0%B1%E5%91%8A%E6%9B%B8_20170501.pdf，（2018年2月26日確認）
- 9) 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, DOI: 10.1080/02626667.2014.967693.
- 10) 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>（2018年2月26日確認）
- 11) 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.
- 12) Thornthwaite, C. W. : An approach toward a rational classification of climate, *Geograph. Rev.*, Vol.38, pp.55-94, 1948, DOI: 10.2307/210739.
- 13) 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, DOI: 10.1016/0022-1694(94)90057-4.

7. 流域における定常的な水循環モデルの構築（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、河川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。こうした流域の水利用計画の検討においては、河川流出や人間活動に伴う取水などを含め、流域の水循環を収支として定量的に捉えることが有効である。本章では、気象、河川流量、取水量などの既存データを用いて常呂川流域の水収支を推定し、人間活動による流域の水資源の利用状況を把握することを目的とした。

(1) 方法

a) 水収支の計算

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、常呂川本流の流量観測所を境に、流域を区間分けした。常呂川流域には北海道開発局網走開発建設部または北海道網走建設管理部が所管する水位・流量観測所が、本流・支流合わせて18か所存在する。そこで、小流域ポリゴンデータを用いて、水位・流量観測所を基点とする18の集水域を定義した（図1）。小流域ポリゴンデータは国土交通省国土政策局「国土数値情報（流域メッシュデータ）」を元データとして、1kmメッシュごとに流出河川を定義したGISデータである¹⁾。さらに、本流の8か所の水位・流量観測所（下流より、「河口」「上川沿」「太茶苗」「忠志」「北見」「上常呂」「置戸」「常呂川」）を境に、流域をa～hの8区間に分割した。

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。 P 、 ET 、 U_o 、及び U_i は上述のa～hの各区間で集計した。また、 R_i と R_o は各観測所の流量観測データから得た。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。

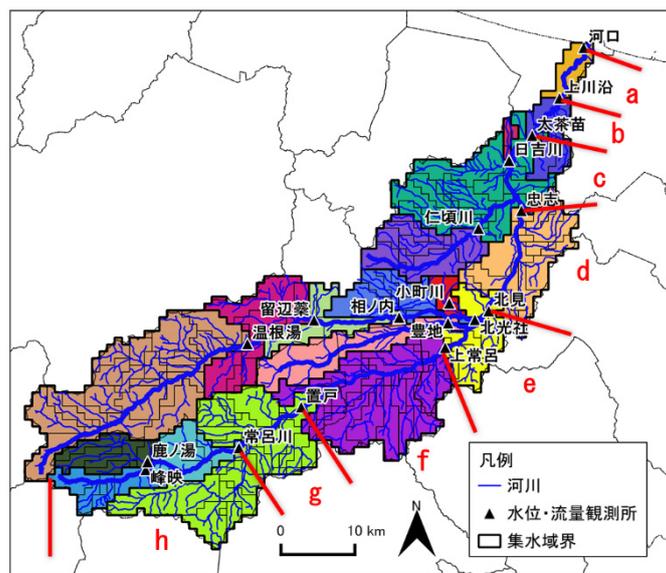


図1 常呂川流域の河川網と流域区分。河川ラインと行政区界は、国土数値情報の「河川データ」と「行政区域データ」を加工して作成。水位・流量観測所の位置は国土交通省の主要水系調査による。

b) 気象データの収集と蒸発散量及び水資源賦存量の算出

常呂川流域における降水量の測定は、気象庁アメダス観測所、北海道開発局網走開発建設部及び北海道網走建設管理部が所管する雨量観測所などで行われているが、観測点は平野部に集中し、山地域の降水量については情報が少ない。一般に山地域では降水量が大きくなることが知られており、単純に観測点における降水量データを補間する形でメッシュごとの降水量を求めた場合、山間部の降水量が過小評価されるおそれがある。

一方、気象庁では1981～2010年の降水量等の平年値を1kmメッシュで推定した「メッシュ平年値2010」を作成・公開しており、全国の気象台・測候所等とアメダス観測所の平年値を基として、メッシュごとに地形因子等の特性を考慮した降水量を推定している²⁾。そこで本研究では「メッシュ平年値2010」の値を常呂川流域の降水量として用いた。

蒸発散量は実測が難しく、また土地利用等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。本研究では、詳細な気象データに乏しい場合も簡便に推定を行う方法として知られるThornthwaite³⁾の方法を用いて推定した。なお、気温データは「メッシュ平年値2010」の値を使用した。本データは国土数値情報「平年値メッシュデータ（第2.1版）」より入手した。

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。

以上により集計した降水量、蒸発散量、及び水資源賦存量は月別データのため、a)に示した水収支の解析期間に合わせ、便宜的に5～9月をかんがい期、1～4月及び10～12月を非かんがい期として、期間ごとに合計した。

c) 河川流量の計算

常呂川本流8か所の水位・流量観測所のうち、比較的長期間にわたって流量が観測されている6か所(上川沿、太茶苗、忠志、北見、上常呂、置戸)の毎時流量データを北海道開発局網走開発建設部より入手した。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、2007年9月21日から2016年9月20日の9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。その際、期間別平均流量に欠測がある場合はその期間を除いて平均化した。

d) 水利用に伴う取水量及び還元水量の計算

常呂川流域の河川では、農業用水、水道用水、工業用水を含む許可水利権が設定されている⁴⁾。これら個々の取水施設の取水量データを北海道開発局網走開発建設部より入手し、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、2007年9月21日から2016年9月20日の9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。その際、取水実績の無い期間がある場合はその期間を除いて平均化した。

取水された水はそれぞれの用途に利用された後、その全部または一部は下水道や排水施設等を経由して再び河川へと戻される。この水のことを還元水といい、取水量に対する還元水量の割合は還元率と定義されている⁵⁾。本研究では、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、防火用水1.0とした。なお、水道用水は下水道等を経由して河川に還元されると考えられるが、その還元率に関する情報が十分に得られていないため、本報では還元水は無いもの（還元率ゼロ）とした。

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。

(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「メッシュ平年値2010」による降水量分布を実際の観測降水量と合わせて示した(図2)。これによると、平地では観測降水量をある程度よく反映している一方、観測データの少ない山地では平地に比べ降水量が大きく推定され、地形の影響が考慮されていることが確認された。

次に、1kmメッシュごとに年蒸発散量を算出した結果、常呂川流域全体で384~574mm(平均520mm)の値を示した。その空間分布(図3)を見ると、山地で比較的低い値が確認された。これは山地で気温が低い影響を反映している。

降水量から蒸発散量を差し引いた水資源賦存量は常呂川中流域の訓子府町から北見市街地に広がる北見盆地付近で100~200mm程度の比較的小さい値を示した(図4)。これは降水量が少ない一方、蒸発散量は比較的多いためである。

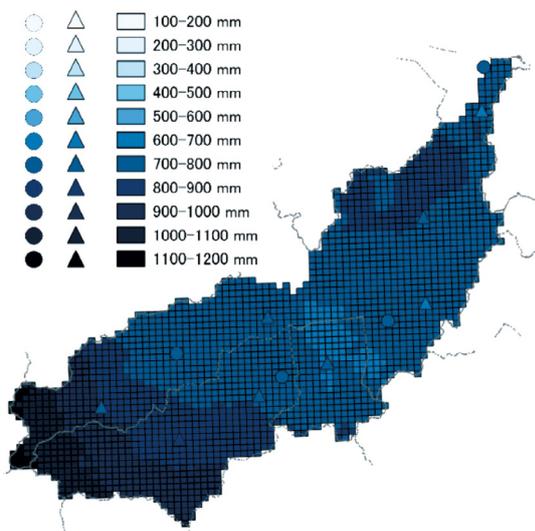


図2 常呂川流域のメッシュ平年値による降水量分布と降水量観測点(○:アメダス、△:雨量観測所)における観測降水量(1981~2010年)

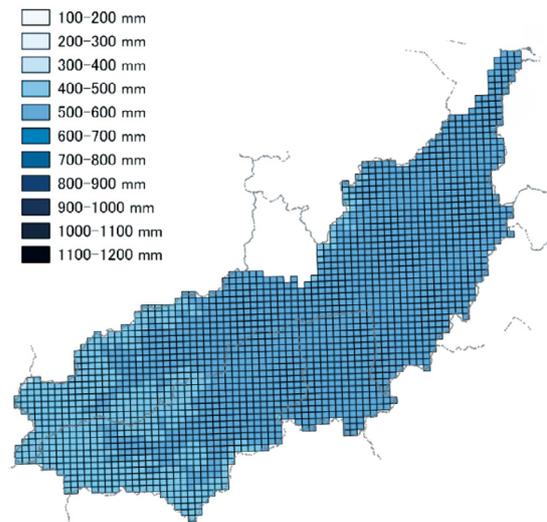


図3 常呂川流域の蒸発散量分布(1981~2010年)

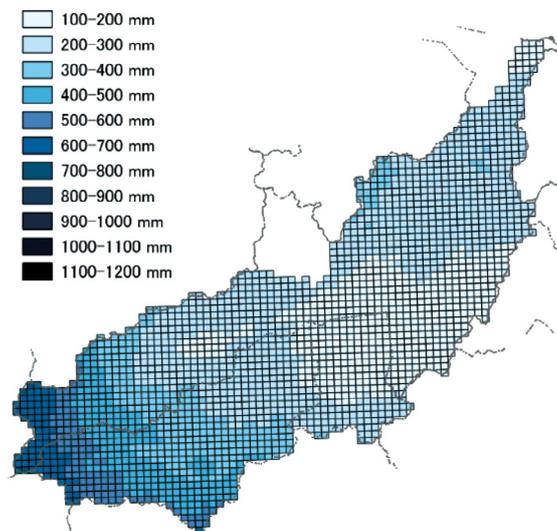


図4 常呂川流域の水資源賦存量分布(1981~2010年)

上記の方法により降水量、蒸発散量を求めたが、これらと河川の流出量を比較したときの水収支は一致せず（後に(2)-c)で詳述する）、少なくともいずれかの量の推定に誤差があると考えられる。この誤差要因について以下に考察した。

まず、河川流出量の観測期間は2007年9月21日～2016年9月20日であるのに対し、降水量及び蒸発散量は1981～2010年の平均値を用いており、両者の対象期間のずれが不一致の要因として挙げられた。そこで、降水量について、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で、1981～2010年と2007年9月21日～2016年9月20日の平均年降水量の比をそれぞれ求めたところ、後者のほうが地点平均で約8.7%大きくなった（表1）。また、蒸発散量については、継続的に気温観測を行っているアメダスで両期間の月別平均気温の差をそれぞれ求め、その違いにより計算した年蒸発散量がどの程度増減するか試算したところ、後者のほうが地点平均で約2.7%大きくなった（表2）。

以上により対象期間を統一しても、水収支の不一致はなお存在していることから、蒸発散量の推定誤差あるいは降水量及び河川流出量の観測誤差もあることが考えられた。特に蒸発散量の推定に用いたThornthwaiteの式は、アメリカ全土にわたる観測値に合うように作られた経験式であり、あくまでも簡便法であることから、今後、ペンマン法やその改良型にあたる補完法を用いた蒸発散量の計算を行い、値の妥当性について検討する余地があると考えられる。一方、降水量については、冬季の降雪の形での降水量の捕捉が不十分であるために過小評価されている可能性も考えられる。例えば、野上ら⁶⁾は積雪地域の冬季降水量の捕捉率が70%程度であるとすれば、多くの河川流域で水収支法により合理的な蒸発散量（計算値）となることを示唆している。このことについてもさらに詳しい検討が必要である。

表1 1981～2010年と2007年9月21日～2016年9月20日の平均年降水量の比較

観測所	降水量 (mm)		B/A
	1981～2010年	2007～2016年	
	平均 (A)	平均 (B)	
常呂 アメダス	700	699	0.998
北見 雨量観測所	686	729	1.062
境野 アメダス	734	851	1.160
留辺蘂 雨量観測所	709	780	1.099
留辺蘂 アメダス	702	784	1.116
平均	706	768	1.087

表2 1981～2010年と2007年9月21日～2016年9月20日の平均年蒸発散量の比較

観測所	蒸発散量 (mm)		B/A
	1981～2010年	2007～2016年	
	平均 (A)	平均 (B)	
常呂 アメダス	570	591	1.036
北見 アメダス	553	563	1.019
境野 アメダス	549	567	1.032
留辺蘂 アメダス	539	550	1.021
平均	553	568	1.027

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 $3.1\text{m}^3/\text{s}$ 、かんがい期の平均で $6.1\text{m}^3/\text{s}$ 、非かんがい期の平均で $1.1\text{m}^3/\text{s}$ の値を示し、かんがい期は非かんがい期の5倍以上取水量が多いことが分かった（図5）。その内訳を見ると、年間取水量のうち農業用水が $2.1\text{m}^3/\text{s}$ （全体の約68%）と圧倒的に大きく、水道用水が $0.5\text{m}^3/\text{s}$ （全体の約17%）と続いた。日本全体でみても水使用量の約67%は農業用水と言われており⁷⁾、常呂川流域でも同様の特徴を有していることが分かった。

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6に示した。水文年の水収支では、降水量（ P ）が $52.4\text{m}^3/\text{s}$ 、蒸発散量（ ET ）が $33.6\text{m}^3/\text{s}$ となり、水資源賦存量は単純計算で $18.8\text{m}^3/\text{s}$ と見積もられた。このうち、水利用に伴う取水量（ U ）は $3.0\text{m}^3/\text{s}$ となり、水資源賦存量の約16%を河川水として利用している計算となる。日本全体での集計では、水資源賦存量（4,200億 $\text{m}^3/\text{年}$ ）に対する河川水の使用量（709億 $\text{m}^3/\text{年}$ ）は約17%と見積もられている⁸⁾。このことから、常呂川

流域における水資源の利用率は全国平均のそれと同程度であることが分かった。

かんがい期と非かんがい期の違いに着目すると、かんがい期は降水量は多いが蒸発散量も多いため、水資源賦存量は単純計算で $1.5\text{m}^3/\text{s}$ となり、この期間の取水量 ($6.1\text{m}^3/\text{s}$) をまかなうことができない。これに対し、非かんがい期の水資源賦存量は $30.0\text{m}^3/\text{s}$ とかんがい期よりもはるかに多く、なおかつ期間も長いので、より多くの水資源の確保が期待できる。このことから、非かんがい期に降った雨や雪がダム貯水池や地下の帯水層などに一時的に貯留されることによって、取水量の多くなるかんがい期の水資源が確保されているものと思われる。

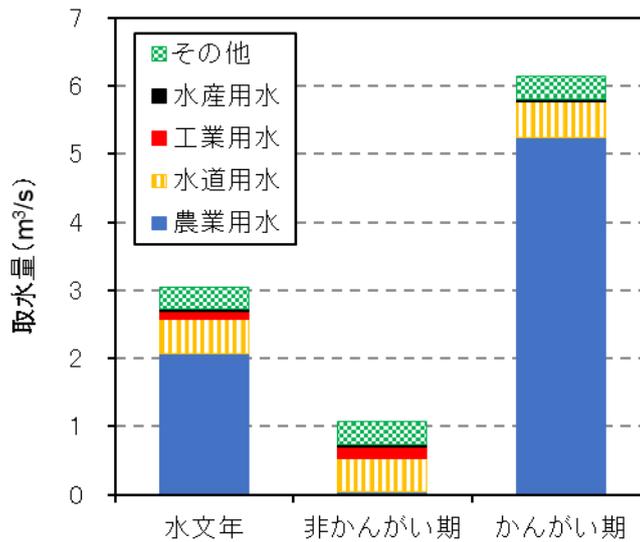


図5 常呂川流域における河川水の期間別平均取水量. 2007年9月21日から2016年9月20日の平均値を示している。

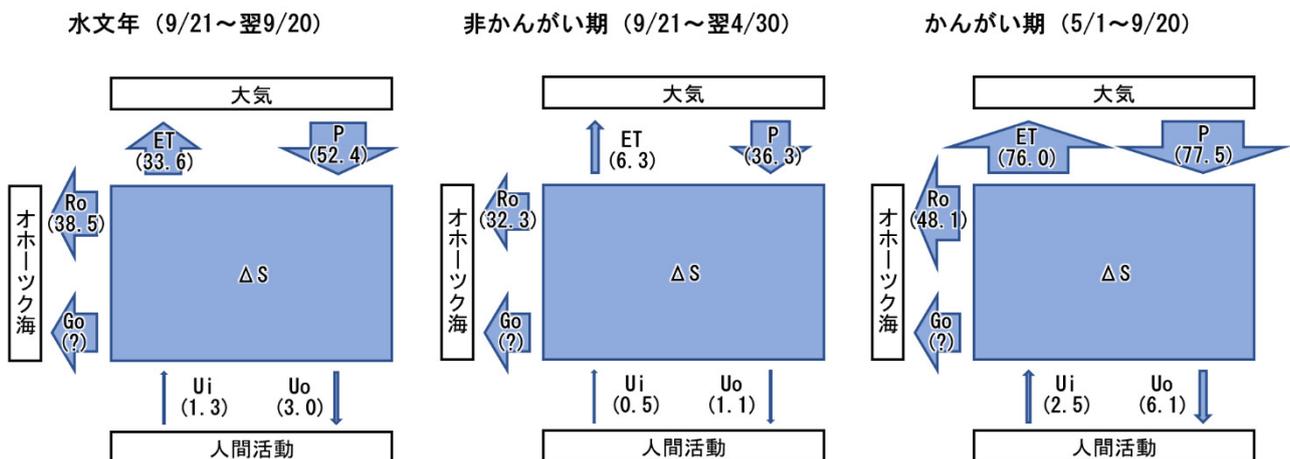


図6 常呂川流域 (上川沿観測所より上流域の全区間) における水収支の計算結果 (暫定版). 木塚・鈴木 (2017)⁹⁾ を一部改変. 水収支は水文年, 非かんがい期, 及びかんがい期の各期間の平均流量 (m^3/s) を表している. 最上流域を含むため, 上流区間からの河川水流入量 (R_i) と地下水流入量 (G_i) はともにゼロとなる.

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たまった地下水は、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（第4章(3)）。そのため、オホーツク海に流出する地下水は忠志観測所より下流に薄く堆積した沖積層からのものに限られ、 G_0 は R_0 に比べてはるかに少量と考えられる。仮に G_0 をゼロと仮定し、なおかつ流域の貯留量は経年的に大きく変化しない($\Delta S \approx 0$)とした場合、インプット($P + U_i$)とアウトプット($ET + R_0 + U_o$)が釣り合うはずである。しかし、図6の水文年でみるとインプットが $53.7\text{m}^3/\text{s}$ 、アウトプットが $75.1\text{m}^3/\text{s}$ と釣り合わない。先に(2)-a)で記したように、水収支の不一致は河川流量データと気象データの解析期間のずれだけでは説明できないことから、今後さらに検討が必要である。

上述のように、常呂川流域では水資源賦存量の約16%を河川水として利用している。当然のことながら、河川水は年間を通して安定的に流れているわけではなく、大雨や干ばつといった気象条件によってその流量は大きく変動する。したがって、安定的な水資源の確保という観点では、河川の流況を考慮した上で、その取水量を検討することが肝要である。

そこで、常呂川本流の水位・流量観測所を対象に、各水文年の非かんがい期・かんがい期別に平均流量と最小流量を求め、各区間の総取水量と比較した(図7)。取水量はかんがい期の置戸～上常呂(f)と上常呂～北見(e)の区間で圧倒的に多く、区間fで $2.9\text{m}^3/\text{s}$ 、区間eで $2.7\text{m}^3/\text{s}$ を示した(図7B)。かんがい期にこの区間で取水量が多いのは、常呂川頭首工や常呂川第1・第2頭首工などの農業用水の大規模な取水施設が集中しているためである。この2区間の河川流量をみると、かんがい期の平均流量で置戸 $13.5\text{m}^3/\text{s}$ 、上常呂 $19.8\text{m}^3/\text{s}$ と、それぞれ取水量の5倍、7倍程度の流量があった。これに対し、最小流量では置戸 $5.7\text{m}^3/\text{s}$ 、上常呂 $5.3\text{m}^3/\text{s}$ と、いずれも取水量の2倍程度だった。とくに対象期間で最も渇水の年

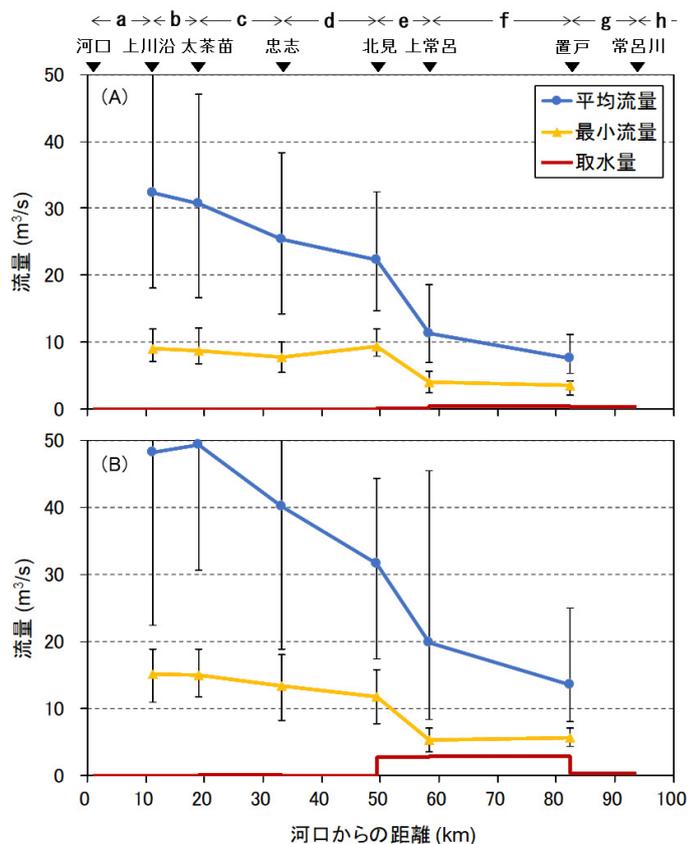


図7 非かんがい期 (A) とかんがい期 (B) における常呂川本流の流量と各区間の総取水量の縦断図。流量と取水量は2007年9月21日から2016年9月20日の9年分の平均値を示している。流量のバーは範囲を表している。

では、置戸 $4.3\text{m}^3/\text{s}$ (2012年), 上常呂 $3.5\text{m}^3/\text{s}$ (2008年) と、それぞれ取水量の1.5倍, 1.3倍の流量しかなかった。実際には今回把握できなかった取水もあることから、それを考慮すると河川流量と取水量との差はさらに小さくなる。このことは、渇水時には十分な取水量の確保が困難になる可能性を示唆している。以上の結果から、常呂川流域の水利用においては、取水量の多くなるかんがい期に、とくに置戸～北見観測所の区間における河川流量の確保が極めて重要と考えられる。

(3) まとめと今後の課題

本研究により、常呂川流域の水資源賦存量、河川流量、及び取水量に関するデータを整理し、常呂川流域の水収支の把握を進めることができた。その結果、人々がどこでどの程度の水資源量を利用しているか、流域全体で定量的に明らかにすることができた。流況を考慮した解析では、水資源の安定的な確保に向けた課題が確認された。

今後、蒸発散量をはじめ各水文量の推定精度の向上を図るとともに、現時点で一部把握できていない河川水の取水について情報収集を進め、地下水の取水量も考慮したうえで、水循環モデルの構築を進める予定である。

河川の流量管理においては、人間活動のために取水する河川水の流量（水利流量）だけでなく、動植物の保護や漁業、景観、流水の清潔の保持などのために必要な流量（維持流量）の確保も重要となる⁹⁾。今後は、維持流量も考慮したうえで河川流量の目標レベルを検討するとともに、将来的な水需要の変化も考慮しながら、常呂川流域における水資源管理上の課題をより詳細に分析する必要がある。

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雨量及び河川流量の観測データと河川水の取水量データをご提供いただきました。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) 気象庁：メッシュ平年値図（解説），http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/atlas_manual_new.html (2018年1月23日確認).
- 3) Thornthwaite, C. W. : An approach toward a rational classification of climate, *Geograph. Rev.*, Vol.38, pp.55-94, 1948.
- 4) 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/jigyoku_keikaku/gaiyou/seibi/tokoro_index.html (2018年2月15日確認).
- 5) 国土交通省河川局河川環境課：正常流量検討の手引き（案），http://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/ryuuryoukentou/tebiki.pdf (2018年2月15日確認).
- 6) 野上道男：暖かさの指数と流域蒸発散量—気候値メッシュデータによる解析—，地学雑誌，第99巻，pp.144-156, 1990.
- 7) 内閣官房水循環政策本部：平成28年度水循環施策, 2017.
- 8) 国土交通省水管理・国土保全局水資源部：平成29年版日本の水資源の現況, 2017.
- 9) 木塚俊和・鈴木啓明：常呂川流域の水収支の把握，第20回日本陸水学会北海道支部大会講演要旨，2017.