

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	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³・鈴木 啓明⁴

Hiroshi HAYAKAWA, Masayuki UTO, Yusuke MORINO, Masato OSAWA 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 沿岸・水資源グループ 主査

⁴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

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の開発を目的とした。流域の定常的な水循環構造の把握に必要な水文量のうち、蒸発散量をBrutseartの補完関係式に基づいて再計算した結果、降水量と蒸発散量の差から求められる水資源賦存量は流域下流部の河川流量と概ね整合的なものとなった。また、表層地質分布、土地利用区分に基づき流域内の年平均的な地下水涵養量分布を推定、タンクモデルを用いて計算した地下水位と不圧帯水層の地下水位観測結果を比較して月毎の地下水涵養量を求めた。これらの結果を、前年度作成していた水循環モデルに加えることにより、流域の定常的な水循環構造を把握した。さらに、流域の水循環と人間活動との関係性を把握するため、かんがい用水の潜在的需要量が水資源賦存量に占める割合を小流域ごとに求め、その割合が1995年から2015年にかけてどう変化したか把握した。また、水循環モデルは、常呂川流域の地下帯水層構造、表層地質分布と土地利用区分を忠実に反映するように改良し、将来の社会情勢の変化に伴い、土地利用等の改変による流域内の水循環や水資源賦存量への影響を評価することが可能となった。

《キーワード：水資源賦存量；地下水涵養量；水循環構造；水需要；長期流出解析》

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通し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。

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。

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

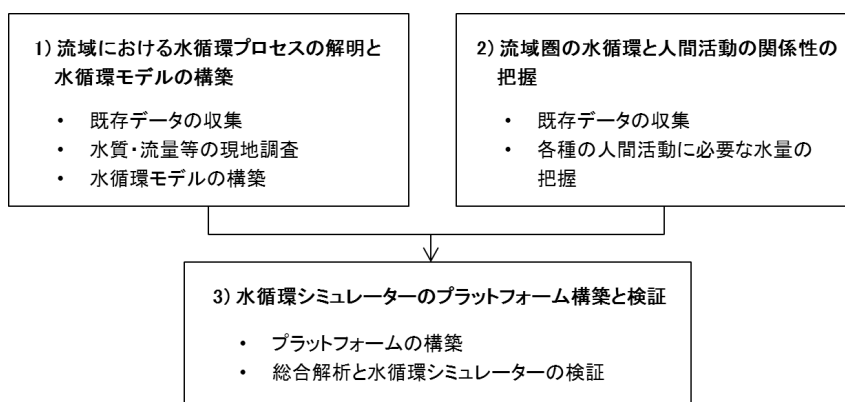


図1 本研究の構成

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、令和元年度に実施した小課題1) 2) 3) の研究成果を述べる。

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121 km、流域面積1,928 km²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763.6 mm、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、タマネギやテンサイ、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6,600 ha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。

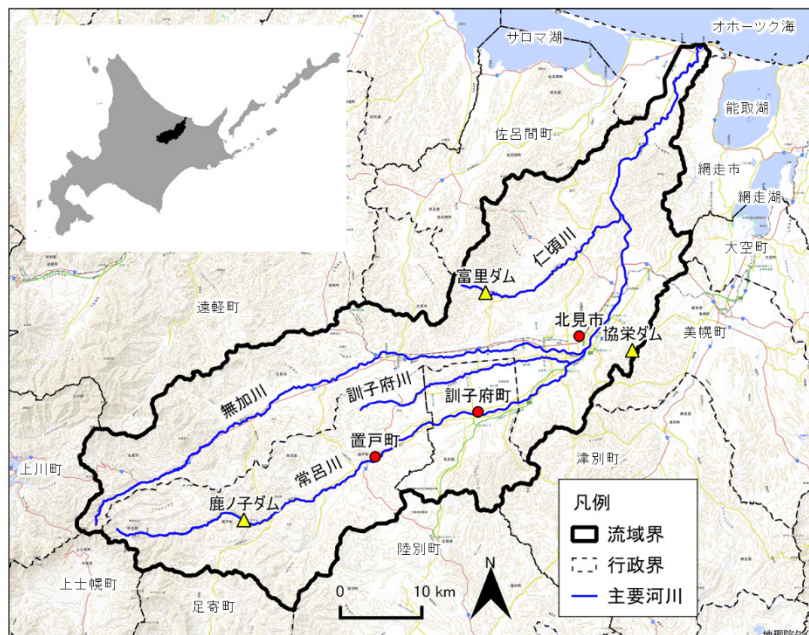


図2 常呂川流域の位置図。流域界、行政界、及び主要河川は、国土交通省国土政策局⁴⁾の「流域界・非集水域データ」、「行政区域データ」、及び「河川データ」をそれぞれ加工して作成。背景図は国土地理院⁵⁾（地理院タイル・標準地図）による。

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⁶⁾。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^{7),8)}。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⁶⁾。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 (2020年3月17日確認).
- 4) 国土交通省国土政策局：国土数値情報, <http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/> (2020年3月17日確認).
- 5) 国土地理院：地理院タイル, <https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html> (2020年3月17日確認).
- 6) 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.
- 7) 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 (2020年3月17日確認).
- 8) 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 (2020年3月17日確認).

4. 蒸発散量及び水資源賦存量の再計算（担当：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、流域の定常的な水循環構造を把握し、使用可能な水量を把握して計画的に水利用を行う必要がある。ここでは、平成29年度及び平成30年度のデータ収集・解析によって把握した水資源賦存量と河川流量との整合性を向上させるため、蒸発散量の算出手法を再検討し、蒸発散量及び水資源賦存量の再計算を行った。

（1）方法

a) 蒸発散量及び水資源賦存量の再計算

蒸発散量については、平成30年度はPenmanの式¹⁾により水面や飽和した土壌面からの蒸発量（可能蒸発散量）を求め、井形²⁾による土地利用ごと・月ごとの蒸発散比を乗じることにより実蒸発散量を推定した。その結果、常呂川下流部の上川沿観測所より上流の水資源賦存量が上川沿観測所における実測の河川流量に対して2割程度小さく³⁾、この理由として蒸発散量が過大評価されている可能性が考えられた。

平成30年度の計算で用いた井形²⁾による蒸発散比は石狩川流域で求めたものだが、常呂川流域の気候条件は石狩川流域とは異なる。特に、年降水量は常呂川流域で石狩川流域に比べ少ない⁴⁾ことから、地表面が水分不足に陥りやすく、可能蒸発散量に対する実際の蒸発散量の比（蒸発散比）がより小さくなることが予想される。

以上を考慮し、本年度はBouchet⁵⁾が最初に提案した式の改良版である、Brutsaert⁶⁾の補完関係式に基づいて蒸発散量を再計算した。補完関係式は、実際の蒸発散量（ E ）、可能蒸発散量（ Epo ：広く一様な表面が湿潤であるか濡れており、これと接触する空気が十分に飽和している場合の蒸発散量）及び見かけの可能蒸発散量（ Epa ：蒸発散量 E の地表面に囲まれた、十分小さく周囲の地表面の蒸発散量等への影響は無視できる、飽和した地表面からの蒸発散量）の間に成立すると考えられる関係式に基づいて実際の蒸発散量を推定するものであるが、Brutsaert⁶⁾は境界条件を2つ新たに加え、より一般的な定式化を行った。その式を以下に示す。

$$E = (Epo/Epa)^2 (2Epa - Epo) \quad (1)$$

この式を用いる利点として、蒸発散比によりPenmanの式¹⁾で得られる値を補正する場合に比べて計算の物理的な根拠が明確であること、 Epo 導出に必要な一つのパラメータ（ α_e ）を除く全ての値を既存の気象データを用いて導出できること、さらにAi *et al.*⁷⁾により、日本国内の森林域でパラメータ α_e の値が求められているとともに、この式で計算した蒸発散量が実測と良く合うことが確認されていることが挙げられる。

Ai *et al.*⁷⁾と同様、 Epo はPriestley-Taylorの式⁸⁾により、 Epa はPenmanの式¹⁾によりそれぞれ計算した。Priestley-Taylorの式で計算に必要なパラメータ α_e については、常呂川流域の約7割を森林が占めることを考慮し、Ai *et al.*⁷⁾が日本国内4地点の森林域で求めた平均値の1.01を流域全体で用いることとした。

Penmanの式¹⁾で計算に必要なパラメータのうち、風速関数はBrutsaert *et al.*⁹⁾に、風速はBrutsaert¹⁰⁾に従い、その他のパラメータは三浦・奥野^{11),12)}に従い計算した。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。土地利用別のアルベドは佐渡・児島¹³⁾による月別値を使用した。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、「海水域」に水域のアルベドを適用した。

平成30年度同様、メッシュ農業気象データの積雪深から積雪の有無を日ごとに判断し、積雪のある日には小島の式¹⁴⁾により蒸発散量を算出した。

その地域で潜在的に最大限使える水の量の目安として、平成30年度に求めた降水量から蒸発散量を引くことにより、水資源賦存量をメッシュごとに計算した。

蒸発散量及び水資源賦存量の日別値は、地域メッシュの第3次メッシュごとに計算した。

b) 流域及び解析期間の区分

水資源賦存量については、平成30年度までの報告と同様、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）。また、水需要の季節変動を考慮して、解析期間をかんがい期（5/1～9/20）と非かんがい期（9/21～翌4/30）に分け、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。

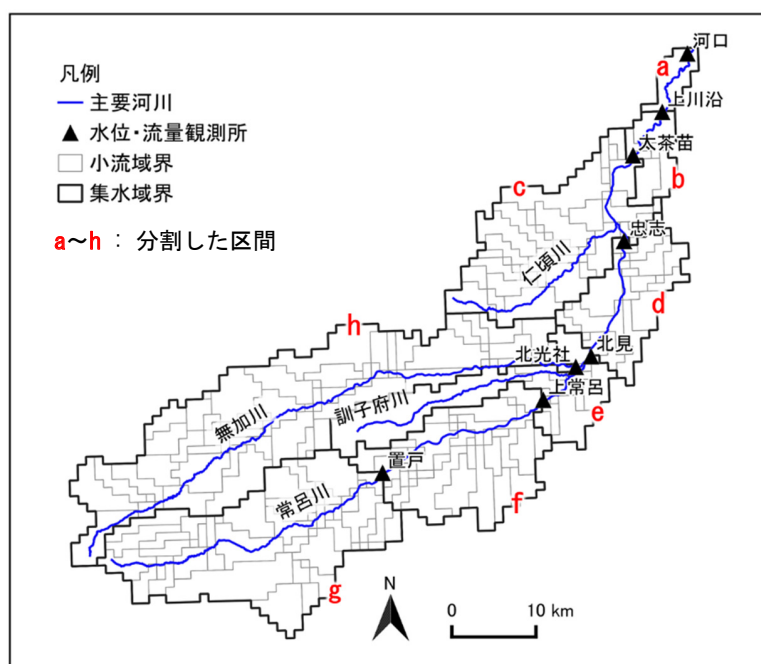


図1 常呂川流域の流域区分。河川ラインは国土交通省国土政策局¹⁵⁾の「河川データ」を加工して作成。水位・流量観測所の位置は国土交通省国土政策局国土情報課¹⁶⁾による。

(2) 結果と考察

a) 蒸発散量及び水資源賦存量の再計算結果

常呂川流域における、2008-2015水文年の平均値として求めた降水量（平成30年度に計算）³⁾、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蒸発散量は367 mmで、2018年度求めた平均蒸発散量（497 mm）の73.8%の値であった。蒸発散量が360mm以上400 mm未満のメッシュが全メッシュの72%を占めた。また、400 mm以上480 mm未満の比較的大きい蒸発散量を示すメッシュが常呂川本流最下流部付近に、280 mm以上320 mm未満の比較的小さい蒸発散量を示すメッシュが北見市周辺に、320 mm以上360 mm未満の蒸発散量を示すメッシュが内陸部の一部及び流域西部の山地域に認められた。

常呂川本流最下流域付近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アルベド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敷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。一方、北見市周辺を含む内陸部の一部で蒸発散量が相対的に小さかったのは、北見市周辺の市街地及び内陸部に広がる草地及び畑のアルベドが、流域の大部分を占める森林に比べ大きいことを反

映していると考えられる。また、流域西部の山地域で蒸発散量が相対的に小さかったのは、地域の標高が高く、気温が低いことを反映したと考えられる。

今年度求めた常呂川流域の平均水資源賦存量は655 mmで、2018年度求めた平均水資源賦存量（520 mm）の125.9 %の値であった。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、1,000 mm以上1,100 mm未満であった。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700 mm以上900 mm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400 mm以上500 mm未満と比較的小さい値を示した。

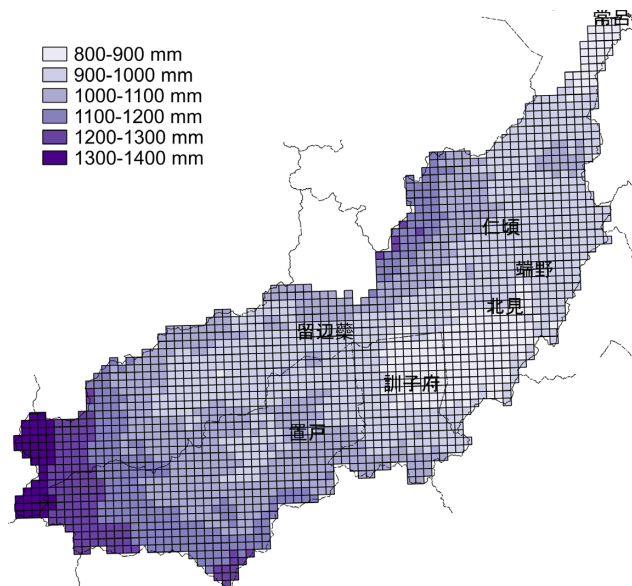


図2 常呂川流域の降水量分布（2008-2015水文年平均）。行政界は国土交通省国土政策局¹⁵⁾の「行政区域データ」を加工して作成。

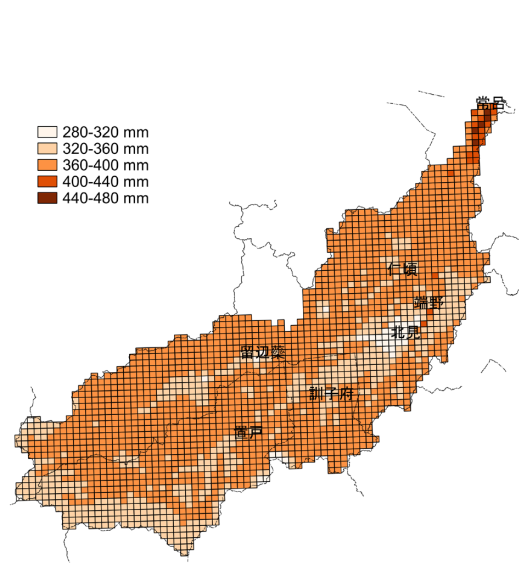


図3 常呂川流域の蒸発散量分布（2008-2015水文年平均）。行政界は国土交通省国土政策局¹⁵⁾の「行政区域データ」を加工して作成。

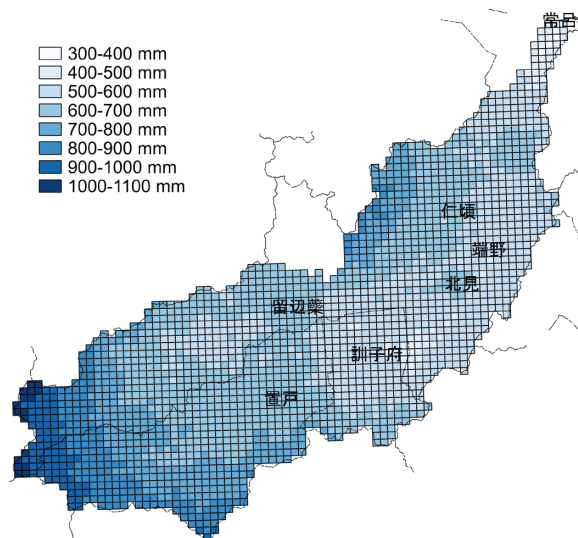


図4 常呂川流域の水資源賦存量分布（2008-2015水文年平均）。行政界は国土交通省国土政策局¹⁵⁾の「行政区域データ」を加工して作成。

b) 水資源賦存量の再計算結果と河川流量の比較

常呂川流域には、訓子府から北見にかけての常呂川沿いの低地帯と、仁頃地域の盆地に地下水盆が分布し、それぞれの地下水は上川沿観測所より上流側で河川に流出すると考えられる¹⁷⁾。人間活動により消費される水量は河川流量に対して相対的に小さい³⁾ことから、上川沿観測所ではその上流側の水文年当たり水資源賦存量が、水文年当たり河川流量に概ね等しくなると考えられる。そこで、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結果、水資源賦存量は1,247百万m³/年、河川流量は1,289百万m³/年であり、水資源賦存量が河川流量に比べ3.3%小さい結果となった(図5)。平成29年度に木塚・鈴木¹⁸⁾が求めた水資源賦存量が河川流量の半分程度、平成30年度に木塚・鈴木³⁾が求めた水資源賦存量が河川流量に比べて2割程度少ない値であったのに比べ、流域の水収支の整合性が向上した。

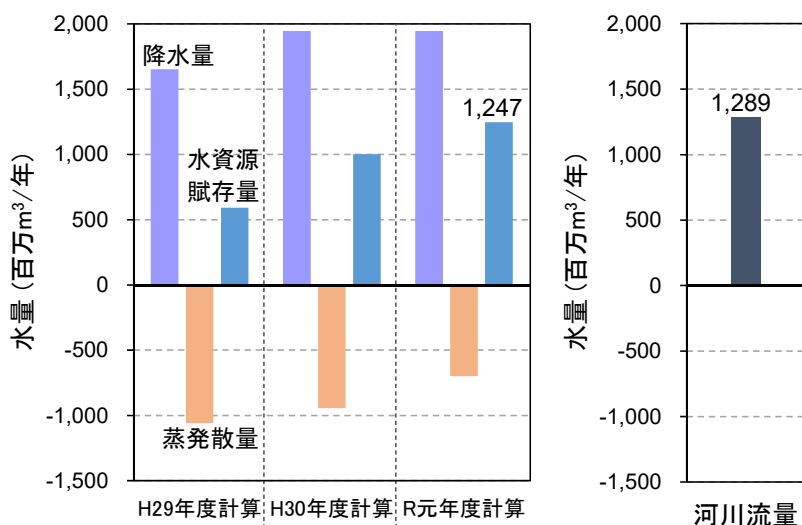


図5 常呂川流域（上川沿観測所より上流域の全区間）で計算した年間の降水量、蒸発散量及び水資源賦存量と河川流量の値（上川沿観測所）の比較。蒸発散量は負方向に示す。平成29年度及び平成30年度の推定値はそれぞれ木塚・鈴木¹⁸⁾、木塚・鈴木³⁾による。各水量はいずれも2008～2015水文年の平均値を示す。

計算した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水文年ごとに比較した結果を図6に示す。水文年ごとにみると、水資源賦存量と河川流量のずれは最も大きい2011水文年でも14.5%であり、

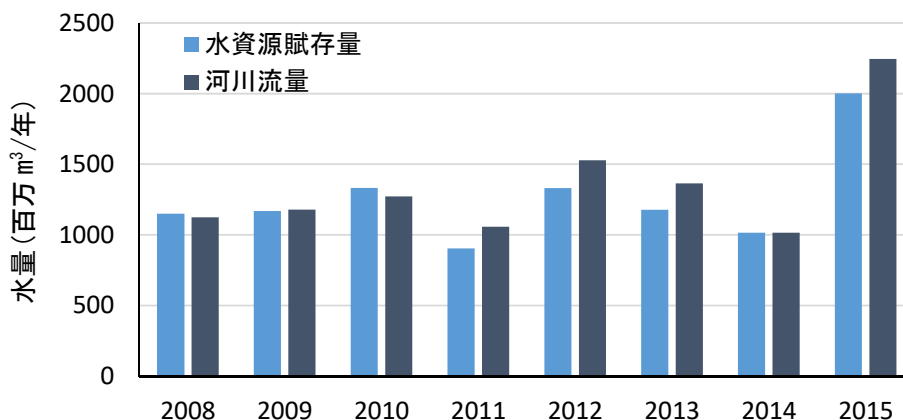


図6 常呂川流域（上川沿観測所より上流域の全区間）で計算した年間の水資源賦存量と河川流量の値（上川沿観測所）の水文年ごと（2008～2015水文年）の比較。

水文年ごとの水収支についてもある程度の整合性はあるものと判断される。ただし、2008、2009、2010、2014の4つの水文年には水資源賦存量と河川流量のずれは4.8%以内と小さいのに対し、2011、2012、2013、2015の4つの水文年には水資源賦存量が河川流量を10.9%～14.5%下回り、水資源賦存量が過小評価されていることが考えられた。これらのずれの原因については、降水量と蒸発散量の推定誤差の他、河川流量の観測誤差が加わっている可能性もあり、詳細な検討はできていないが、降水量については気象レーダーによる観測データを用いて気象観測所で観測されない局地的な降水を考慮することにより、さらに推定精度の向上を検討する余地もあるものと考えられる。

c) 水資源賦存量の流域及び解析期間の区分ごとの特徴

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」区間で最も多く、「置戸―最上流」区間が次いだ（図7）。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%（703 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%（194百万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。

水文年平均でかんがい期と非かんがい期の水資源賦存量を比較すると、非かんがい期の水資源賦存量のほうが多いものの、非かんがい期の日数（222日または223日）はかんがい期の日数（143日）より多いことから、1日当たりではかんがい期の水資源賦存量が上回っている。ただし、最大の年と最小の年の幅をみると、どの区間でもかんがい期は非かんがい期に比べ大きく、年ごとの変動がより大きいことがわかる。このことから、非かんがい期に得られる水をダムへの貯水や滞留時間の長い地下水から利用することが、年間を通して安定して水資源を確保するうえで重要と考えられる。

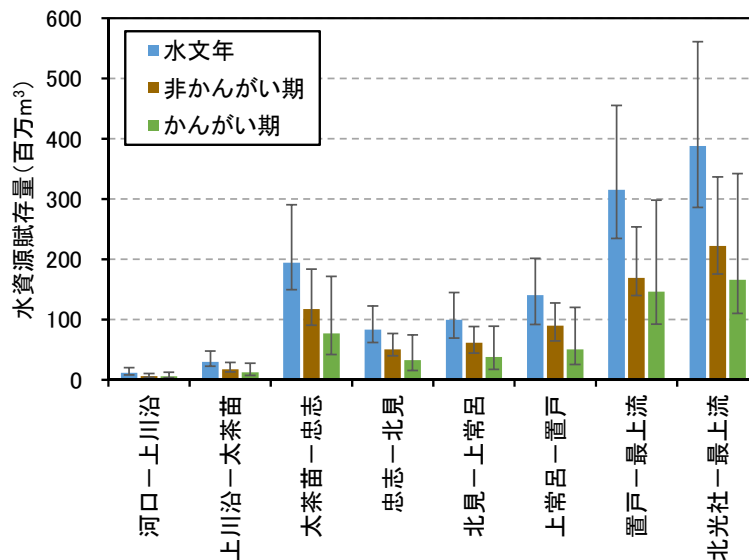


図7 常呂川流域の各区間における水資源賦存量（2008～2015水文年平均）
エラーバーは最大の年と最小の年の幅を示す。

参考文献

- 1) Penman, H. L. : Natural evaporation from open water, bare soil and grass, *Proc. Roy. Soc. A*, Vol.193, pp.120-145, 1948.
- 2) 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.
- 3) 木塚俊和・鈴木啓明 : 流域圏の水循環と人間活動の関係性の把握, (一財) 北海道河川財団研究所紀要, XXX, pp.42-52, 2019.
- 4) 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.
- 5) Bouchet, R. : Evapotranspiration réelle et potentielle, signification climatique, International Association of Hydrological Sciences Publication, Vol.62, pp.134-142, 1963.
- 6) Brutsaert, W. : A generalized complementary principle with physical constraints for land-surface evaporation, *Water Resour. Res.*, Vol.51, pp.8087-8093, doi: 8010.1002/2015WR017720., 10.1002/2015wr017720, 2015.
- 7) Ai, Z., Wang, Q., Yang, Y., Manevski, K., Zhao, X., and Eer, D. : Estimation of land-surface evaporation at four forest sites across Japan with the new nonlinear complementary method. Scientific reports, Vol.7, 17793, 10.1038/s41598-017-17473-0, 2017.
- 8) Priestley, C. H. B. and Taylor, R. J. : On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Mon. Weather Rev.*, Vol.100, pp.81-92, 1972.
- 9) Brutsaert, W. and Stricker, H. : An advection-aridity approach to estimate actual regional evapotranspiration. *Water Resour. Res.*, Vol.15, pp.443-450, 1979.
- 10) Brutsaert, W. : Hydrology: An Introduction. Cambridge University, 2005.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 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.
- 15) 国土交通省国土政策局 : 国土数値情報, <http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/> (2020年3月17日確認).
- 16) 国土交通省国土政策局国土情報課 : 主要水系調査成果 (利水現況図), <http://nrb-www.mlit.go.jp/kokjo/inspect/landclassification/water/risui/index.html> (2020年3月17日確認).
- 17) 森野祐助・大澤賢人 : 常呂川流域の水理地質, (一財) 北海道河川財団研究所紀要, XXIX, pp.39-43, 2018.
- 18) 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, (一財) 北海道河川財団研究所紀要, XXIX, pp.51-57, 2018.

5. 常呂川流域の地下水涵養量の推定（担当：森野祐助・大澤賢人）

流域における持続的な地下水資源の利用を計画するためには、地下水収支の流入項に相当する地下水涵養量の年平均的な値を明らかにする必要がある。本章では表層地質分布、土地利用区分に基づき流域内の年平均的な地下水涵養量分布を推定した。さらにタンクモデルを用いて月毎の地下水涵養量を求め計算した地下水位と不圧帯水層の地下水位観測結果を比較することで妥当性を評価した。

（1）流域内の年平均的な涵養量の推定

a) 表層地質分布

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。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。このうち、水理地質基盤の分布域は地下水が涵養されず、表面流出するものとして扱った。20万分の1地質図幅「北見」¹⁾、「紋別」²⁾、「網走」³⁾に基づき区分した、常呂川流域内の水理地質基盤分布及び容水地盤分布を図1に示す。常呂川流域（約1,928km²）のうち約63%（約1,213km²）が水理地質基盤、約37%（約715km²）が容水地盤である。

b) 土地利用区分

水資源賦存量のうち地下水として涵養される割合（涵養係数という）は土地利用区分によって大きく異なる。例えば森林や農用地などは容水地盤が地表に露出しているため、高い涵養係数が期待できるが、建物用地や道路はアスファルトやコンクリートで覆われているため低い涵養係数になる。

容水地盤分布域の土地利用区分⁴⁾を図2に示す。容水地盤分布域の土地利用区分は、その他農用地約49%、森林約33%、建物用地約7%の順に多い。その他農用地は主に訓子府、置戸および端野周辺、森林は主に留辺蘂および仁頃周辺、建物用地は北見周辺に多く分布する。

水資源賦存量から地下水涵養量を求めるには、土地利用区分に応じた地下水涵養係数を決める必要がある。土地利用区分と国土交通省⁵⁾による流出係数（表1）をもとに、土地利用区分に応じた涵養係数を設定した（表2）。

c) 年平均的な地下水涵養量の算出

第4章で求めた常呂川流域の年水資源賦存量分布（2008-2015水文年平均）および土地利用区分に基づく地下水涵養係数から地下水涵養量分布（mm/年）を求めた（図3）。地下水涵養量は置戸、留辺蘂、仁頃、端野周辺で400mm/年以上、訓子府、仁頃北部、端野の低地部周辺で300mm～400mm/年、常呂周辺で200～300mm/年、北見周辺で0～100mm/年となった。地下水涵養量の多い地域（置戸、留辺蘂、仁頃、端野周辺など）は水資源賦存量が比較的多く、涵養係数が高い土地利用区分（例えば、その他農用地や森林など）も多く分布する地域である。地下水涵養量の少ない地域（北見周辺など）は水資源賦存量が比較的少なく、地域涵養係数が低い土地利用区分（例えば、建物用地や道路など）が多く分布する地域である。

この結果に基づき算出した常呂川流域内の地下水涵養量（2008-2015水文年平均）は約295百万m³/年となった。すなわち流域内の水資源賦存量（2008-2015水文年平均）1,244百万m³/年の約24%が地下水として涵養されている事を意味する。

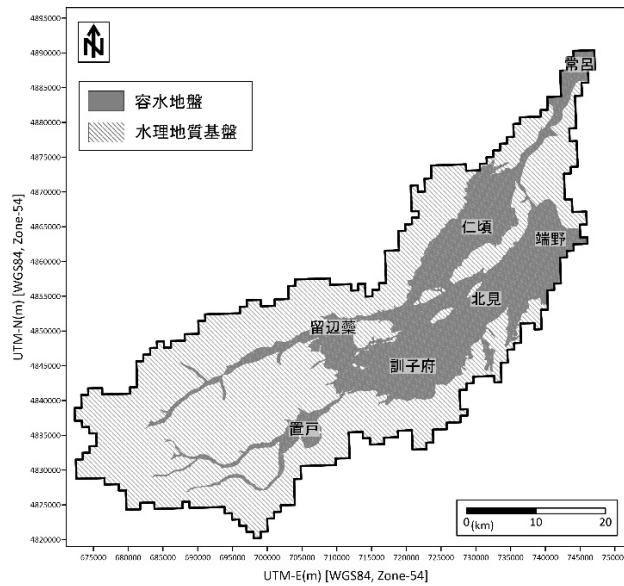


図1 水理地質基盤および容水地盤分布

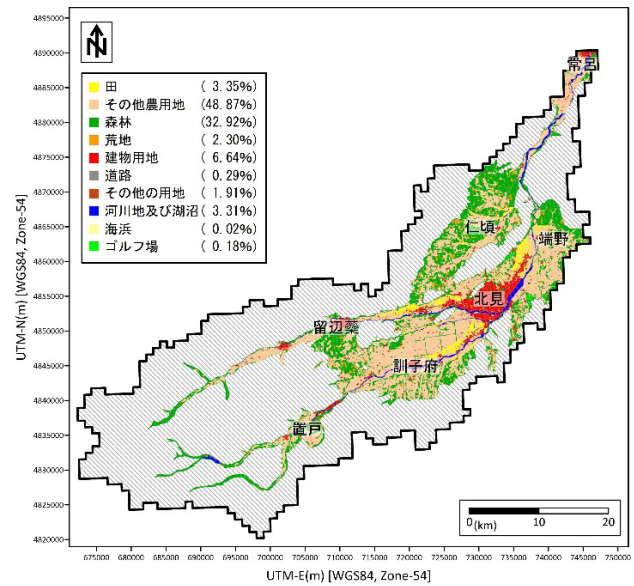


図2 容水地盤分布域の土地利用区分

表1 「流出雨水量の最大値を算出する際に用いる土地利用形態ごとの流出係数を定める告示（平成16年国土交通省告示第521号）」⁵⁾

土地利用の形態	流出係数
宅地	0.90
池沼	1.00
水路	1.00
ため池	1.00
道路（法面を有しないものに限る。）	0.90
道路（法面を有するものに限る。）	法面（コンクリート等の不浸透性の材料により覆われた法面の流出係数は1.00、人工的に造成され植生に覆われた法面の流出係数は0.40とする。）及び法面以外の土地（流出係数は0.90とする。）の面積により加重平均して算出される値
鉄道線路（法面を有しないものに限る。）	0.90
鉄道線路（法面を有するものに限る。）	法面（コンクリート等の不浸透性の材料により覆われた法面の流出係数は1.00、人工的に造成され植生に覆われた法面の流出係数は0.40とする。）及び法面以外の土地（流出係数は0.90とする。）の面積により加重平均して算出される値
飛行場（法面を有しないものに限る。）	0.90
飛行場（法面を有するものに限る。）	法面（コンクリート等の不浸透性の材料により覆われた法面の流出係数は1.00、人工的に造成され植生に覆われた法面の流出係数は0.40とする。）及び法面以外の土地（流出係数は0.90とする。）の面積により加重平均して算出される値

土地利用の形態	流出係数
コンクリート等の不浸透性の材料により覆われた土地（法面を除く。）	0.95
コンクリート等の不浸透性の材料により覆われた法面	1.00

土地利用の形態	流出係数
ゴルフ場（雨水を排除するための排水施設を伴うものに限る。）	0.50
運動場その他これに類する施設（雨水を排除するための排水施設を伴うものに限る。）	0.80
ローラーその他これに類する建設機械を用いて締め固められた土地	0.50

土地利用の形態	流出係数
山地	0.30
人工的に造成され植生に覆われた法面	0.40
林地、耕地、原野その他ローラーその他これに類する建設機械を用いて締め固められていない土地	0.20

表2 土地利用別の流出係数および涵養係数

土地利用区分 ⁴⁾	国土交通省 ⁵⁾	流出係数	涵養係数
田	林地、耕地、原野、その他ローラーその他これに類する建設機械を用いて締め固められていない土地	0.2	0.8
その他用地	林地、耕地、原野、その他ローラーその他これに類する建設機械を用いて締め固められていない土地	0.2	0.8
森林	林地、耕地、原野、その他ローラーその他これに類する建設機械を用いて締め固められていない土地	0.2	0.8
荒地	林地、耕地、原野、その他ローラーその他これに類する建設機械を用いて締め固められていない土地	0.2	0.8
建物用地	宅地	0.9	0.1
道路	道路	1	0
その他用地	飛行場、コンクリート等の不浸透性の材料により覆われた法面	0	1
河川及び湖沼	池沼、水路	1	0
海浜	林地、耕地、原野、その他ローラーその他これに類する建設機械を用いて締め固められていない土地	0.2	0.8
ゴルフ場	ゴルフ場	0.5	0.5

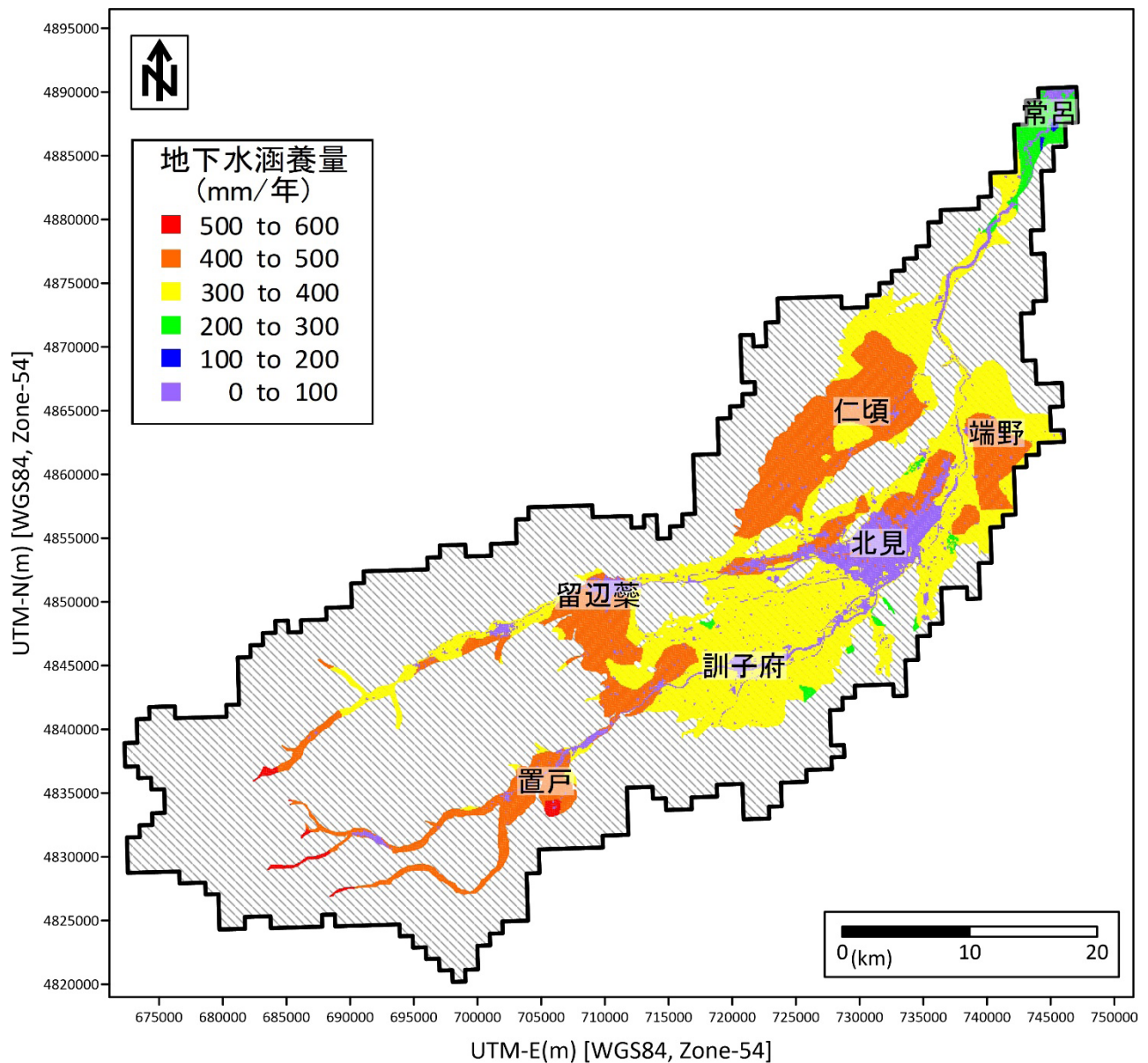


図3 地下水涵養量 (2008-2015水文年平均)

(2) タンクモデルを用いた月毎の地下水涵養量の推定

a) タンクモデルの概要

タンクモデルは菅原⁶⁾によって開発された河川流出モデルである。水収支区を1つ（もしくは複数）のタンクとして表現し水収支を再現する概念モデルである。本研究では不圧帯水層をタンクに置き換えたタンクモデルを作成し、2003年～2018年の計算水位と観測水位を比較してタンクモデルを評価、月毎の地下水涵養量を推定した。作成したタンクモデルを図4に示す。タンクモデルは上から雪タンク、1段目タンク（表面流出）、2段目タンク（不圧帯水層）の3段構造とした。

雪タンク流出量は気温が0℃以上かつ積雪深が0cmの場合、降水量（mm）をそのまま流出量 Q_1 として1段目タンク（表面流出）へ入力。気温が0℃以上かつ積雪深が0cmより大きい場合、前日との積雪深の差分と雪の密度（200 kg/m³）の積を融雪水量（mm）として1段目タンク（表面流出）へ入力。気温が0℃以下の場合降水量、積雪深に関わらず1段目タンク（表面流出）への入力はないものとした。

タンクモデルの計算に必要なデータは平均気温、積雪深、降水量、蒸発散量である。平均気温、積雪深、降水量は気象庁の北見観測所で観測された値⁷⁾を使用した。蒸発散量はPenman-Monteith法⁸⁾によって算出し湿度データのみ網走観測所⁷⁾の値を使用した。2段目タンク（不圧帯水層）の涵養・流出に伴う地下水位の変化量を決めるために設定した有効間隙率は、周辺の表層地質分布から沖積砂層～沖積砂礫層の値25%とした。

b) 計算水位と実測水位の比較

作成したタンクモデルを評価するため、2段目タンク（不圧帯水層）の水位から求めたタンク水位（mm）に観測井周辺の標高56mを補正值として入力して計算した計算水位と観測井を用いて観測した不圧帯水層の実測水位を比較した（図5）。実測水位は北海道オホーツク総合振興局網走建設管理部が設置した地下水観測孔No.6（北見市柏陽町）の観測結果を用いた。

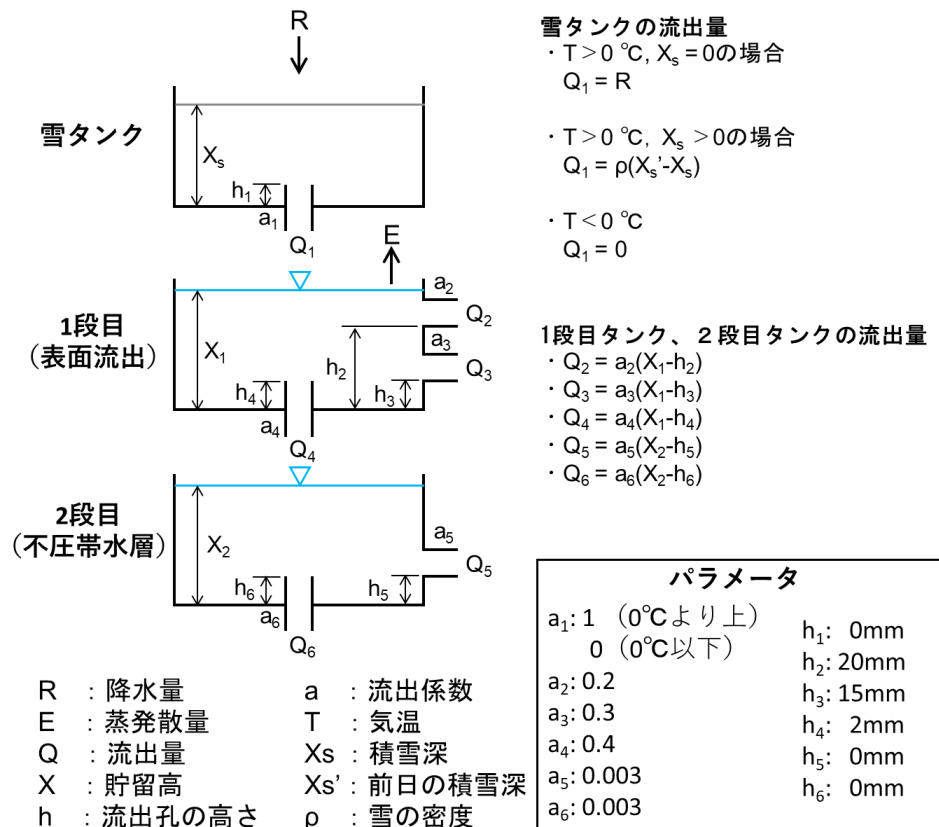


図4 タンクモデルの概要

計算水位は2003年から2009年6月頃まで実測水位を良好に再現している。2009年6月頃から実測水位が低下したため、計算水位と実測水位の絶対値は異なるが、地下水位の季節変動などの相対的な地下水位の変動は良好に再現されている。以上のことから、本研究で作成したタンクモデルは地下水観測孔No.6周辺の不圧帯水層の地下水位変動を良好に再現していると考えられる。

c) 月毎の地下水涵養量の算出

2段目タンク（不圧帯水層）への流入量を示す、流出量 Q_4 が地下水涵養量に相当する。タンクモデルから算出した月毎の地下水涵養量を図6に示す。2003年～2018年間で地下水涵養量が最も少ないのは2004年2月で11.7 mm、最も多いのは2016年9月で39.4 mmであった。算出した月毎の地下水涵養量は、降水量が少なく気温が氷点下で融雪が起こりにくい2月に最も少なく、融雪の影響が大きい4～5月および降水量が多い9月～10月に多くなる傾向がある。

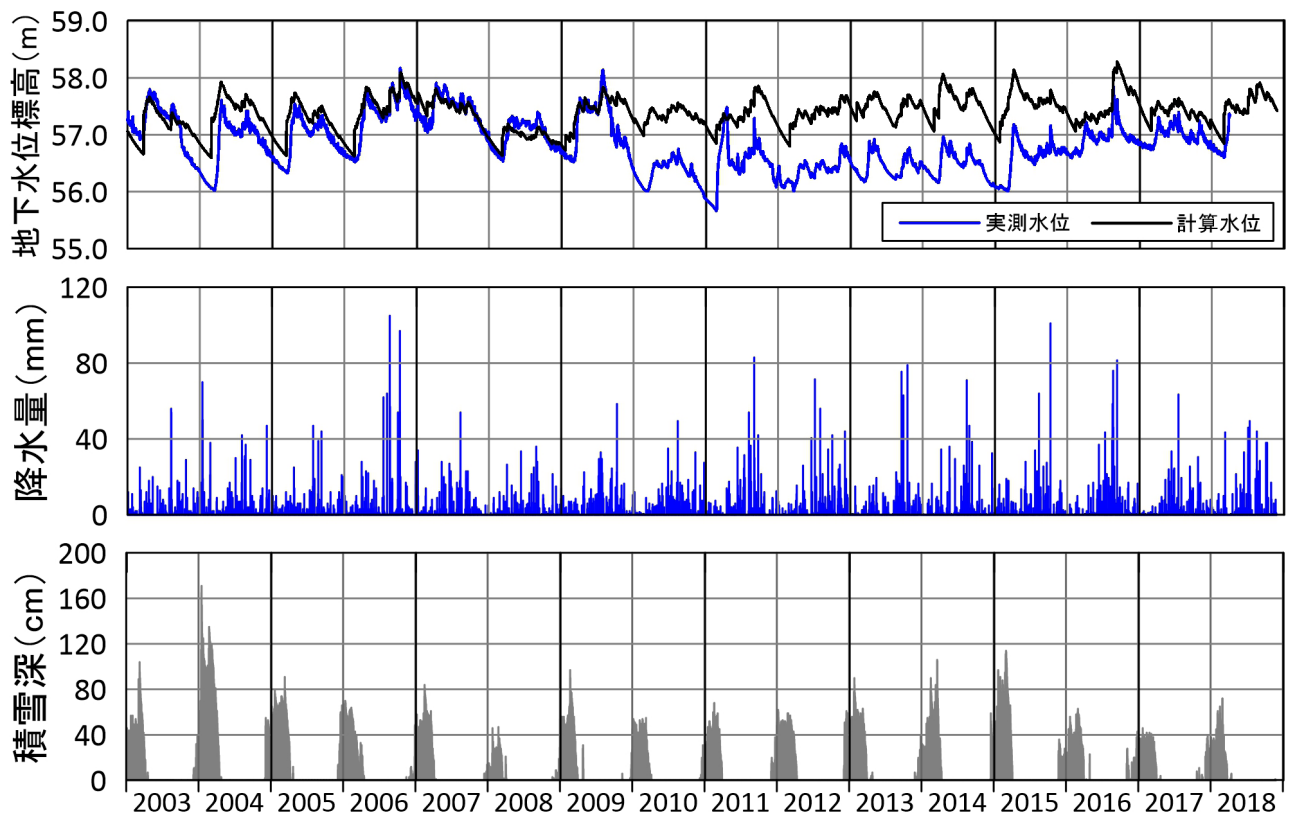


図5 タンクモデルによる計算水位と実測水位の比較

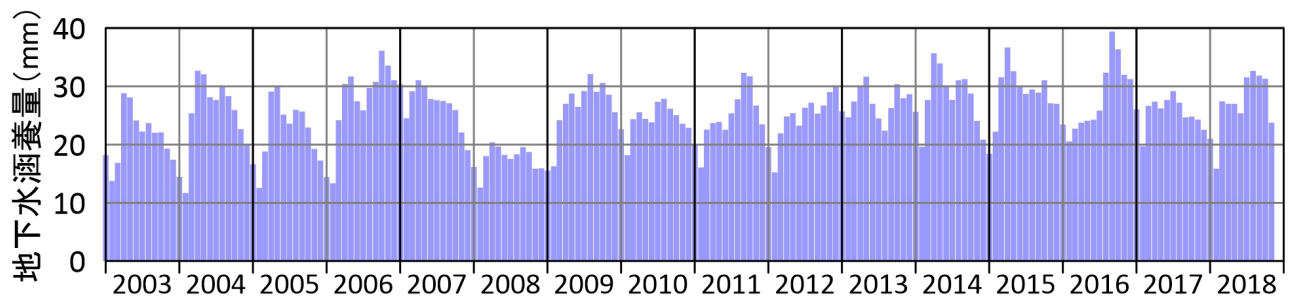


図6 月毎の地下水涵養量

謝辞

本研究の実施にあたり、北海道オホーツク総合振興局網走建設管理部には地下水位観測データをご提供いただきました。国立大学法人福島大学共生システム理工学類地下水盆管理研究室の柴崎直明教授および佐藤ひかる氏には地下水涵養量の算出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) 山口昇一：20万分の1地質図「北見」，地質調査所，1970.
- 2) 佐藤博之・山口昇一：20万分の1地質図「紋別」，地質調査所，1984.
- 3) 佐藤博之・三梨昂：20万分の1地質図「網走」，地質調査所，1970.
- 4) 国土交通省：土地利用細分メッシュ，URL. <http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-L03-b.html> (2020年3月17日確認).
- 5) 流出雨水量の最大値を算する際に用いる土地利用形態ごとの流出係数を定める告示，平成16年国土交通省告示第521号，2002.
- 6) 菅原正巳：水文学講座7流出解析法，共立出版，257p，1972.
- 7) 気象庁：過去の気象データ・ダウンロード，URL. <https://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php> (2020年3月17日確認).
- 8) Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M. : Crop evapotranspiration, Chapter 2 FAO Penman-Monteith equation, FAO irrigation and drainage paper, 56, FAO, 17-28,1998.

6. 表流水と地下水を考慮した流域水循環構造の解明（担当：鈴木啓明・森野祐助）

ここでは、平成29年度及び平成30年度のデータ収集・解析の成果、第4章の蒸発散量の再計算結果及び第5章の地下水涵養量の計算結果を取りまとめ、水循環シミュレーターの構築に必要な流域の定常的な水循環構造を把握した。

(1) 水収支の集計方法

常呂川流域には、訓子府から北見にかけての常呂川沿いの低地帯と、仁頃地域の盆地に地下水盆が分布するが、それぞれの地下水は上川沿観測所より上流側で河川に流出すると考えられる¹⁾。このことから、上川沿観測所からオホーツク海への流出のうち地下水の流出は無視できるものと仮定して、常呂川流域のうち、上川沿観測所から上流側（面積にして流域全体の98.6%）の水収支を把握した。水収支の解析期間は第4章と同様、かんがい期（5/1～9/20）と非かんがい期（9/21～翌4/30）に分け、9/21～翌9/20を水文年とした。

降水量から蒸発散量を引いて得られる水資源賦存量は、地表面に流出する水と地下水として涵養される水に分配されるので、

$$P - ET = Sr + Gr \quad (1)$$

（ P は降水量、 ET は蒸発散量、 Sr は表面流出量、 Gr は地下水涵養量）

このとき、地表水の水収支は次式で表される。

$$\Delta Ss = t \times (Sr - U_o + U_i + Gd - R_o) \quad (2)$$

（ ΔSs は地表水の貯留量の変化（ m^3 ）、 t は解析期間（ s ）、 U_o と U_i は地表水の取水量及び還元水量（ m^3/s ）、 Gd は地下水の地表への流出量（ m^3/s ）、 R_o はオホーツク海への河川水流出量（ m^3/s ））

また、地下水の水収支は次式で表される。

$$\Delta Gs = t \times (Gr - Gd - U_G) \quad (3)$$

（ ΔGs は地下水の貯留量の変化（ m^3 ）、 U_G は地下水の取水量（ m^3/s ））

上記水量のうち、 ET は第4章で求めた値を、 P 、 U_o 及び U_i は平成30年度に求めた値を使用し、 U_G は経済産業省²⁾及び農林水産省³⁾による取水量の情報をもとに、主な利用用途とみられる工業用水と農業用水を合わせて $0.1 m^3/s$ 未満とした。

水文年の Sr 、 Gr は第5章で求めた値を用いた。かんがい期及び非かんがい期の Gr については、第5章で求めた月毎の地下水涵養量の推定結果から、かんがい期の Gr と非かんがい期の Gr の比率を求め（ただし9月の地下水涵養量は、その2/3がかんがい期、1/3が非かんがい期に生じたとして計算した）、水文年における Gr の計算値をこの比率に応じて按分したものをを用いた。ここで得られた値と（1）式から、かんがい期及び非かんがい期の Sr を求めた。

Gd は、各期間で $\Delta Gs = 0$ と仮定し、このとき（3）式から導かれる計算値を採用した。水文年における R_o は、水文年を通じて $\Delta Ss = 0$ と仮定し、このとき（2）式から導かれる計算値を採用した。かんがい期及び非かんがい期の R_o は、水文年における R_o の計算値の、実測の河川流量に対する比率を求め、この比率をかんがい期及び非かんがい期の観測流量に乗じたものをを用いた。

(2) 水収支の集計結果

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を求めた結果を図1に示す。水文年あたりの降水量（ P ）は $61.6 m^3/s$ 、蒸発散量（ ET ）は $22.1 m^3/s$ で、これらの差から求められる水資源賦存量は（ $P - ET$ ） $39.5 m^3/s$ であった。表面流出量（ Sr ）は水資源賦存量の76%に相当する $30.1 m^3/s$ 、地下水の涵養量（ Gr ）は水資源賦存量の24%に相当する $9.4 m^3/s$ であった。人間活動に伴う河川水の取水量（ U_o ）は表面流出量（ Sr ）の10%（ただし還元水量（ U_i ）を差し引いた正味の利用量でみると3.7%）

であるのに対し、人間活動に伴う地下水の取水量 (U_G) は地下水の涵養量 (Gr) の1.1%未満と見積もられた。

水収支から導かれた上川沿における河川流量 (R_o) は38.3 m^3/s で、上川沿における実測の河川流量 (40.8 m^3/s) の93.9%であった。

非かんがい期とかんがい期に分けて比較すると、かんがい期は降水量、蒸発散量、人間活動による取水量、河川流量のいずれも非かんがい期より多く、より活発な水の移動が生じていることがわかった。

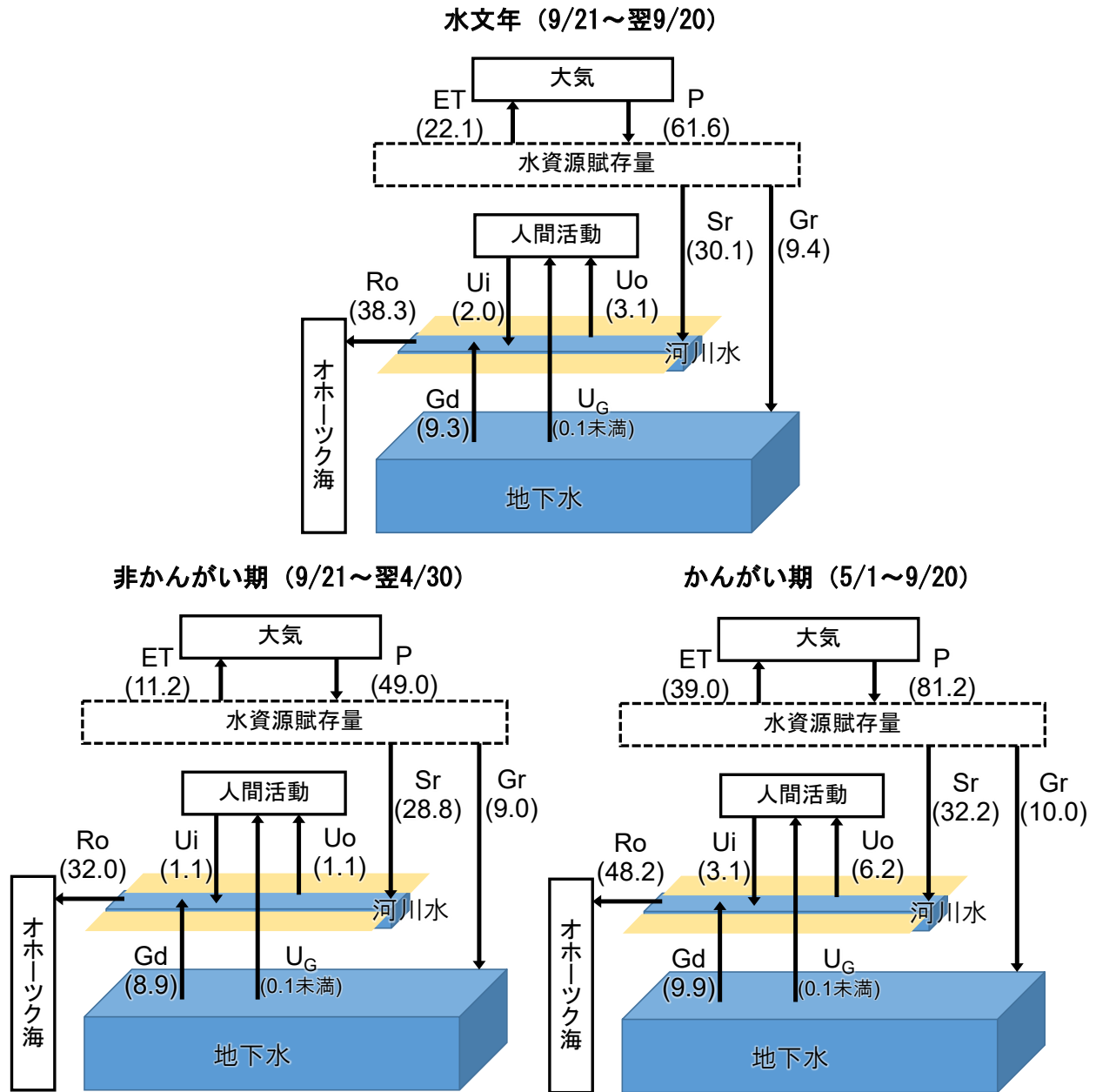


図1 常呂川流域 (上川沿観測所より上流域の全区間) における水収支の計算結果. 木塚・鈴木⁴⁾を改変. 水収支は2008~2015水文年の平均流量 (m^3/s) を表している. Pは降水量, ETは蒸発散量, R_o は河川水流出量, U_o ・ U_G は人間活動に伴う河川水及び地下水の取水量, U_i は人間活動から河川への還元水量, S_r は表面流出量, Gr ・ G_d は地下水の涵養量及び流出量で、いずれも年間の平均的な水移動量 (m^3/s) を表す.

参考文献

- 1) 森野祐助・大澤賢人：常呂川流域の水理地質, (一財) 北海道河川財団研究所紀要, XXIX, pp.39-43, 2018.
- 2) 経済産業省：工業統計調査, <https://www.meti.go.jp/statistics/tyo/kougyo/> (2020年3月17日確認).
- 3) 農林水産省：第5回農業用地下水利用実態調査の概要, <https://www.maff.go.jp/j/nousin/sigen/pdf/chikasui.pdf> (2020年3月17日確認).
- 4) 木塚俊和・鈴木啓明：流域圏の水循環と人間活動の関係性の把握, (一財) 北海道河川財団研究所紀要, XXX, pp.42-52, 2019.

7. 流域圏の水循環と人間活動の関係性の分析（担当：鈴木啓明）

水資源賦存量は空間的に偏在しており、必要な場所で必要な量の水を得られるかどうか判断するには、水利用の状況等をより詳細な空間単位で把握することが必要となる。第6章で把握した水資源賦存量を潜在的に利用可能な水量の指標としてとらえ、それに対する水利用の状況を詳細な空間単位で把握することを試みた。常呂川流域の水利用の約66%を占める¹⁾農業用水を対象として、かんがい用水の潜在的需要量が水資源賦存量に占める割合を小流域ごとに求め、その割合が1995年と2015年でどのように変化しているか検討した。

(1) 方法

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）」²⁾を元データとし、1 km メッシュごとに流出河川を定義して作成したGISデータ³⁾を基に、常呂川流域を小流域に区分し、各小流域間の上流－下流の関係を定義した。第6章で求めた2008水文年から2015水文年までの水資源賦存量を小流域ごとに集計し、小流域ごとに、その小流域とその上流の小流域の水資源賦存量の合計（以下「累積水資源賦存量」という）を計算した。

かんがい用水の潜在的需要量（1995年及び2015年）を以下の方法で計算した。水田のかんがい水量に関する常呂川流域での実測値は得られなかったため、北海道空知総合振興局が平成27～29年度に実施した減水深調査結果から、空知管内雨竜町の慣行水田における生育期間中の日減水深の3ヶ年平均値（7.0 mm/d）を求め、これに常呂川流域における年間の頭首工取水日数（109日：5月15日～8月31日）を乗じた値（763 mm）を水田の単位面積当たりかんがい用水量（原単位）とした。また、北海道農政部が平成10～17年度に実施した、北見市留辺蘂と遠軽町生田原における畑地かんがい推進モデルほ場設置事業の調査結果から、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の1生育期間におけるかんがい水量を作物別に集計し、その平均値（32 mm）を畑地の原単位とした。一般財団法人農林統計協会⁴⁾のデータから、1995年及び2015年の水田と畑地（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）それぞれの作付面積を集計し、上述の原単位を乗じて集落ごとのかんがい用水の潜在的需要量を求めた。

GIS（地理情報システム）上で各集落が小流域と交差する部分の面積を求め、集落ごとのかんがい用水の潜在的需要量を交差部分の面積に応じて按分した後、小流域ごとに再集計し、小流域単位のかんがい用水の潜在的需要量を求めた。集落の境界データとして、政府統計の総合窓口（e-Stat）⁵⁾から2015年農林業センサス境界データを入手して使用した。水資源賦存量と同様に、かんがい用水の潜在的需要量もその小流域とその上流の小流域の合計を計算し、「かんがい用水の潜在的需要量（累積値）」とした。

(2) 結果

累積水資源賦存量の計算結果を図1に、1995年及び2015年のかんがい用水の潜在的需要量を図2に、1995年及び2015年のかんがい用水の潜在的需要量（累積値）が累積水資源賦存量に占める割合を図3に示す。

常呂川の置戸観測所付近から下流側及び無加川下流部を含む小流域は、256～1,262 M m³と相対的に大きい累積水資源賦存量を示したのに対し、これらの河川を含まない小流域の大半は、32 M m³未満と相対的に小さい累積水資源賦存量を示した（図1）。

かんがい用水の潜在的需要量は、1995年には置戸から忠志にかけての盆地域の一部の小流域で0.5～3.5 M m³と相対的に大きい値を示したが、2015年には多くの小流域で減少し、相対的に大きい値を示す

小流域でも0.5～1.3 M m³であった（図2）。1995年に比べて2015年にかんがい用水の潜在的需要量が減少したのは、畑に比べて大きな水使用量の原単位をもつ水田の面積減少を反映している。

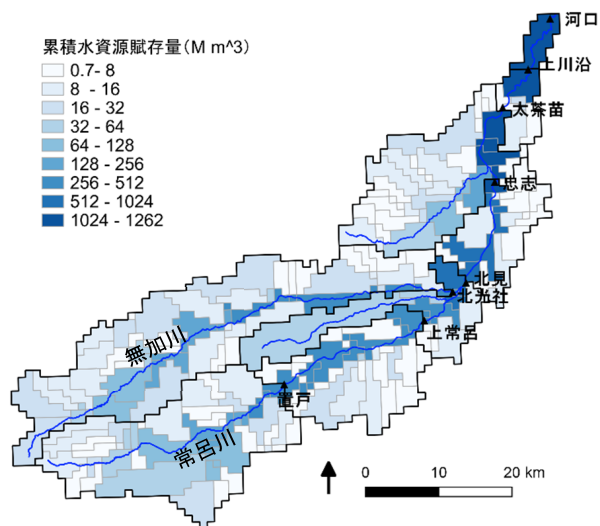


図1 小流域ごとの累積水資源賦存量（その小流域とその上流の流域の水資源賦存量の合計）の分布（2015年）。河川ラインは国土交通省国土政策局²⁾の「河川データ」を加工して作成。水位・流量観測所の位置は国土交通省国土政策局国土情報課⁶⁾による。

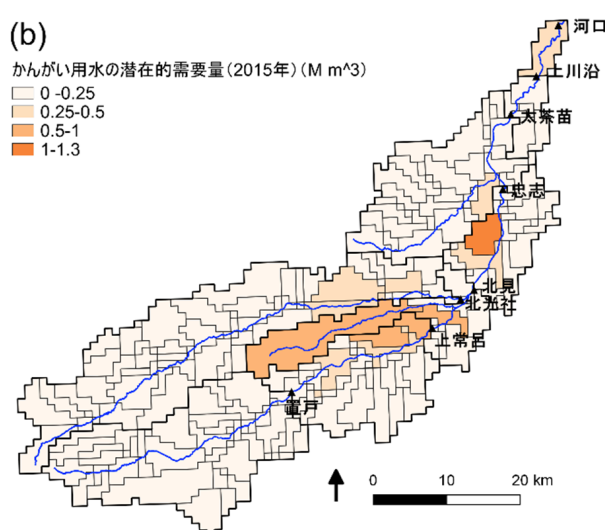
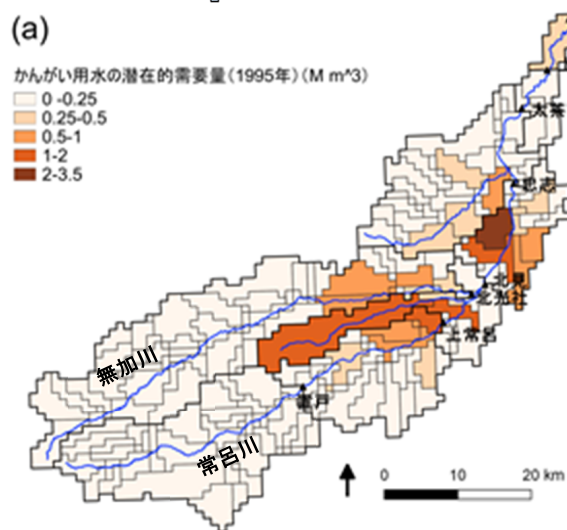


図2 1995年 (a) と2015年 (b) におけるかんがい用水の潜在的需要量。河川ラインは国土交通省国土政策局²⁾の「河川データ」を加工して作成。水位・流量観測所の位置は国土交通省国土政策局国土情報課⁶⁾による。

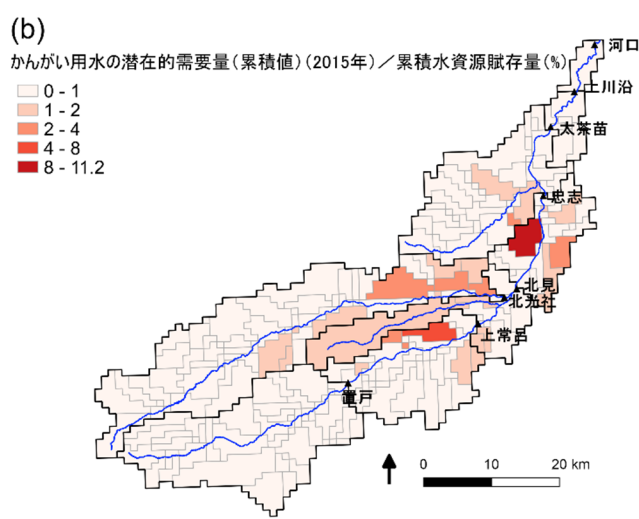
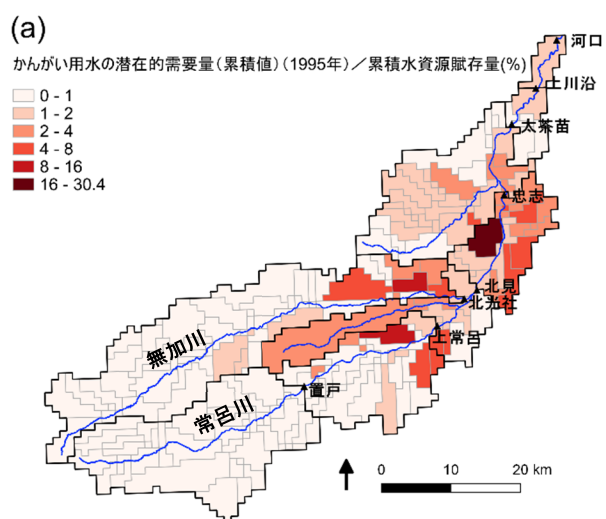


図3 1995年 (a) と2015年 (b) における累積水資源賦存量に占めるかんがい用水の潜在的需要量（累積値）の割合。河川ラインは国土数値情報²⁾の「河川データ」を加工して作成。水位・流量観測所の位置は国土交通省国土政策局国土情報課⁶⁾による。

かんがい用水の潜在的需要量（累積値）が累積水資源賦存量に占める割合は、1995年には置戸から忠志にかけての盆地域の一部の小流域で2～30.4%と相対的に大きい値を示した。かんがい用水の潜在的需要量の減少に伴い、2015年にはかんがい用水の潜在的需要量（累積値）が累積水資源賦存量に占める割合も多くの小流域で減少しており、相対的に大きい値を示す小流域でも2～11.2%にとどまった（図3）。

このように、常呂川流域ではいずれの小流域でも、年間を通してみるとかんがい用水の潜在的需要量を賄うだけの水資源賦存量があること、また1995年に比べ、2015年には潜在的需要量が減少しており、かんがい用水をより余裕をもって確保可能となっていることが示された。

上記の解析で用いた累積水資源賦存量には、人為的な取水・導水の影響は考慮されていない。実際には、常呂川や無加川に取水口をもつ農業用水路による取水・導水があり、これらを加えた場合にはかんがい用水の潜在的需要量は変化する。また、ほ場で必要な水はこれ以外にも、例えば病害虫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り^{7,8)}、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、栽培管理用水量も考慮する必要がある。これらの検討は今後の課題である。

水資源賦存量及び原単位法によるかんがい用水の需要量の推定手法は、今後の気候変動に伴う降水量及び蒸発散量の変化や、農作物の作付面積の変化に伴う水量変化の予測にも活用することができる。今後、生活用水や工業用水など他の水利用の原単位を含め、算定手法を検討・精査することにより、地域における、利用可能な水量に見合った持続的な水利用の検討がより実施しやすくなると考えられる。

謝辞

本研究の実施にあたり、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きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 木塚俊和・鈴木啓明：流域圏の水循環と人間活動の関係性の把握，(一財)北海道河川財団研究所紀要, XXX, pp.42-52, 2019.
- 2) 国土交通省国土政策局：国土数値情報, <http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/> (2020年3月17日確認)。
- 3) 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.
- 4) 一般財団法人農林統計協会：2015年農業集落カード DVD-R版, 2017.
- 5) 政府統計の総合窓口（e-Stat）, <https://www.e-stat.go.jp/> (2020年3月17日確認)。
- 6) 国土交通省国土政策局国土情報課：主要水系調査成果（利水現況図）, <http://nrb-www.mlit.go.jp/kokjo/inspect/landclassification/water/risui/index.html> (2020年3月17日確認)。
- 7) 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.
- 8) 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.

8. 水循環シミュレーターの構築と適用（担当：早川博・宇都正幸）

本研究は、地下水流動と河川流出を考慮した流域圏における水循環モデルを構築し、常呂川流域を対象として、流域の人間・社会活動の変化、例えば、稲作減反政策による水田作付面積の減少や、畑地のコムギ・テンサイ・バレイショ・豆类・タマネギなど、主要な作物の作付面積割合の変化、また、水田灌漑から畑地灌漑への変化など、流域の水循環、水資源に及ぼす影響を評価し得る水循環シミュレーターの開発が最終的な目的である。

本研究はユーザー・インターフェイスを行政サイドでも利用しやすいGUIベースの水循環シミュレーターを目指していたが、残念ながらGUIの構築までは本研究期間中に達成することができず、CUIのPython言語をベースとしたシステム制御を行っている。ただし、流域の地形・地質などの地理情報や降水量や気温などの気象情報は、GISアプリのArcGIS Pro（ESRI社）で管理し、Python言語システム上でArcGIS Proの処理・解析を実行させることができるので、水循環シミュレーターへのデータ受け渡しも可能である。現在は、手動でのデータの受け渡しであり、自動化とGUI化が今後の残された課題である。

（1）水循環モデルの改良

本研究の水循環モデルは、流域の時間的・空間的な水循環プロセスの解明と、その結果を用いた流域の水収支や水資源賦存量の空間的な分布状況の把握を目的としているので、流域を一体と考える集中型流出モデルではなく、流域を細分化した分布型流出モデルとしている。流域を図1のように矩形グリッドに分割し、各グリッドの水循環モデルは、流域の地表面を構成する山腹斜面や農地、河道からの短期流出には、洪水流出に再現性が高い1K-DHM¹⁻³⁾を適用した。1K-DHMモデルでは、斜面グリッドは表層土壌の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、前報⁴⁾では、常呂川流域の水理地質構造を考慮し、小尻のHydro-BEAMモデル⁵⁾を参考に、A層の下部の地質構造としてB層、C層、D層の3層を付加した帯水層構造とした。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している。

分布型流出モデルでは、本来、空間的に分布する斜面グリッド、河道グリッド毎に流出モデルパラメータは変化させる。表層土壌（A層）に適用した1K-DHMの同定すべき流出パラメータは、斜面域では等価粗度係数 N ($m^{-1/3}/s$)、A層の飽和透水係数 k_a (m/s)、A層中の最大水分量に対応する水深 d_a (m)、A層中マトリクス部の最大水分量に対応する水深 d_s (m)、マトリクス部の飽和透水係数 k_s の比 $\beta(=k_a/k_s)$ である。河道部での河道粗度係数 n ($m^{-1/3}/s$)や河道断面の流量流積関数式のパラメータ

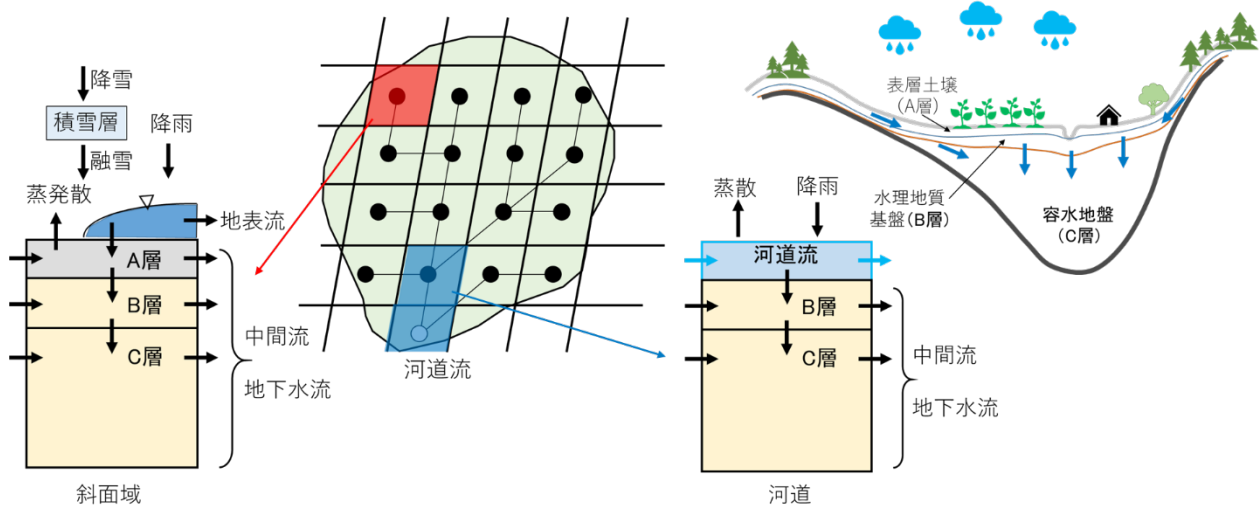


図1 水循環モデルの構成

などは同定せずに既往研究で得られている普遍的な値を与えている。その他に同定すべきパラメータとして、前報のモデルでは帯水層B~D層の層厚 D_B, D_C, D_D と間隙率 $\delta_B, \delta_C, \delta_D$ 、各層の初期帯水量比率 $\lambda_B, \lambda_C, \lambda_D$ 、水平・鉛直方向の飽和透水係数 k_B, k_C, k_D が加えられた。この流域全てのグリッドの同定すべきパラメータは、前報では全て同じ値とする前提で同定作業を進めた。短期流出の洪水流出では、流域全てのグリッドの同定すべき流出パラメータを同じとおいても、各グリッドの斜面勾配や河道勾配の地形条件から定まる流出特性と、各グリッドの落水方向から定まる河道網に従う流出量の集水過程が支配的となって、良好な再現性が得られている³⁾。

一方、長期流出では、無降雨期間の地下水流出による基底流出成分の再現性が重要となる。前報の帯水層モデルでは、3層構造の帯水層厚を流域一様に付加し、各層厚を同定パラメータに含めていた。常呂川の帯水層構造は第5章の図1に示すように流域の上・下流域には地下水が涵養されない水理地質地盤が広く流域の63%を占め、地下水を涵養できる容水地盤が中流域の河道周辺に厚く分布している。本報では、この帯水層構造を帯水層モデルに反映するため、図1に示すように、B層が水理地質地盤、C層が容水地盤の2層構造とし、河道周辺の容水地盤では前報の温泉ボーリング資料から推定した帯水層深度データから、深度の10%までをB層、残りをC層に案分してB層、C層の層厚を与える改良を施した。なお、水理地質地盤が卓越する斜面域では、B層厚0.2m、C層厚0.5mとおいた。したがって、帯水層の同定すべきパラメータはB層、C層の間隙率 δ_B, δ_C 、各層の初期帯水量比率 λ_B, λ_C 、水平・鉛直方向の飽和透水係数 k_B, k_C である。なお、第5章では土地利用区分ごとに容水地盤への流出率と涵養係数を与えて、年平均的な地下水涵養量の推定を行っている。これはA層の土地利用区分ごとにB層、C層の帯水層への地下水涵養過程に違いがあると仮定している。この点は、次に示す水循環モデルの蒸発散過程も含めたA層グリッドの流出パラメータの同定作業について説明する。

長期流出では帯水層からの基底流出成分とともに、地表面の表層土壌（A層）からの蒸発散量を考慮する必要がある。前報では流域各グリッドの表層土壌と土地利用の分布を考慮せずに各グリッドが一樣の表層地被状態であるとおいて流出パラメータを同定していた。しかし、第4章で説明した蒸発散量の推定でも、土地利用別アルベドを考慮しており、表層土壌（A層）の流出パラメータも土地利用と表層土壌別に同定する必要がある。土地利用は国土数値情報の土地利用細分メッシュデータを水田、畑、森林、荒地、住宅地、その他用地、水域の7区分に集約して、各々の等価粗度係数 $N(\text{m}^{-1/3}/\text{s})$ 、A層中の最大水分量に対応する水深 $d_a(\text{m})$ 、A層中マトリクス部の最大水分量に対応する水深 $d_s(\text{m})$ 、マトリクス部の飽和透水係数 k_s の比 $\beta(=k_a/k_s)$ を同定パラメータとし、表層土壌は褐色森林土、黒ボク土、グライ土、未熟土、岩屑土、ポドゾル、泥炭土、水域の8区分に集約して、A層の鉛直方向の飽和透水係数 $k_a(\text{m}/\text{s})$ を同定パラメータとした。また、A層の水平方向の飽和透水係数は、飽和・不飽和浸透流解析において鉛直方向の飽和透水係数 $k_a(\text{m}/\text{s})$ の1~2オーダー倍にすることで良好な再現性が得られている⁶⁾ため、本モデルではA層の水平方向の飽和透水係数は、鉛直方向の飽和透水係数 k_a の100倍に固定した。一方、第5章の帯水層への地下水涵養過程では、A層の土地利用区分でB層への浸透過程を関連付けているが、本モデルでは、A層の浸透過程には地表の土地利用区分よりは表層土壌区分が支配的と考え、表層土壌区分ごとの鉛直方向の飽和透水係数 k_a をもってB層への浸透量を与えている。

以上、前報までの水循環モデルでは、短期流出過程の再現に重みをおいていたので、本報では長期的な流域の水循環過程を再現し得る水循環モデルへの改良を試みた。前報では、地表面の土地被覆や土地利用の違いが洪水流出の再現性に及ぼす影響は少ないとの仮定の下、流域全てのグリッドの同定すべき流出パラメータを全て同じとおいても、良好な再現性を得ていた。しかし、長期的な流出過程では、地下水流出の帯水層モデルと蒸発散過程の重みが高くなり、A層の土地被覆や土地利用の違いを考慮する必要があり、改良を加えたものである。

(2) 改良水循環モデルの検証

前報⁴⁾の水循環モデルでは、十分に考慮していなかった表層土壌の地被状態として、表層土壌（A層）は8区分（図2）、土地利用は7区分（図3）毎に流出パラメータを同定する。ここで、土地利用区分の等価粗度係数 $N(m^{-1/3}/s)$ は、同定せずに代表的な値として、水田2.0、畑0.3、森林1.0、荒地0.5、住宅地0.03、その他の用地0.4、水域0.03を与えた。したがって、同定した流出パラメータは、土地利用区分のA層中の最大水分量に対応する水深 $d_a(m)$ 、A層中マトリクス部の最大水分量に対応する水深 $d_s(m)$ 、マトリクス部の飽和透水係数 k_s の比 β の 3×7 区分=21個、表層土壌区分の鉛直方向飽和透水係数 $k_a(m/s)$ の8個、帯水層（図4）のB層、C層の間隙率 δ_B, δ_C 、各層の初期帯水量比率 λ_B, λ_C 、水平・鉛直方向の飽和透水係数 k_B, k_C の8個の計37個である。同定手法は前報と同じくSCE-UA法⁷⁾を適用し、平成28（2016）年8月北

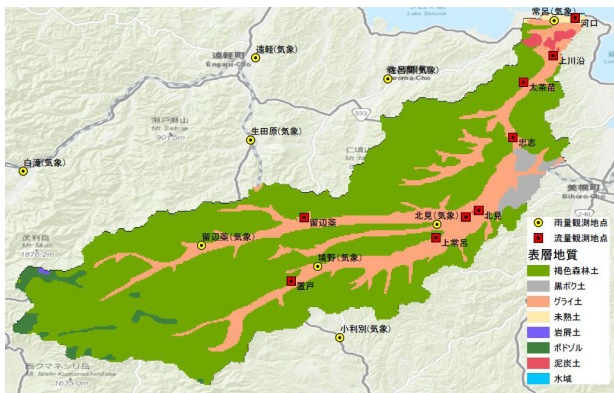


図2 表層地質

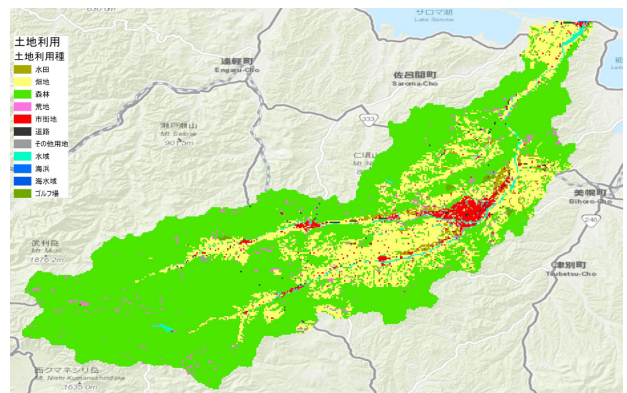


図3 土地利用

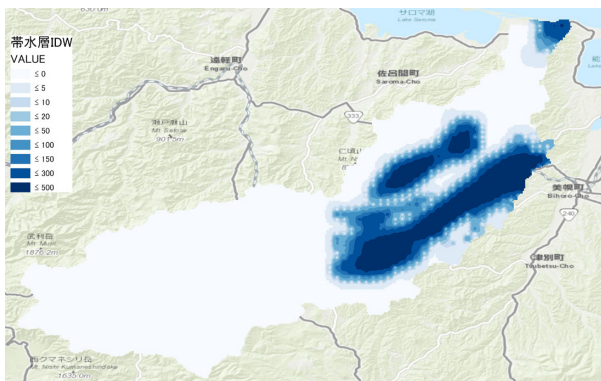


図4 帯水層深分布

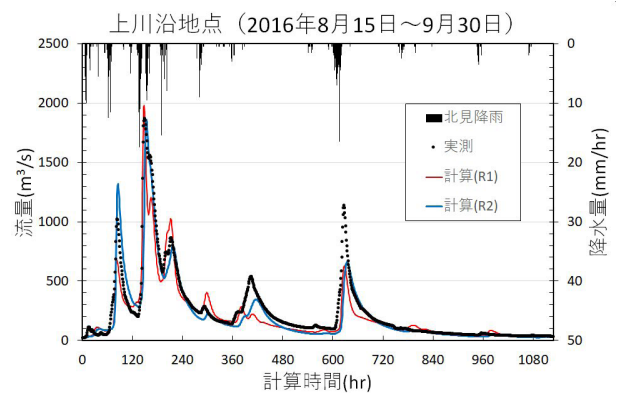


図5 改良水循環モデルの検証（上川沿）

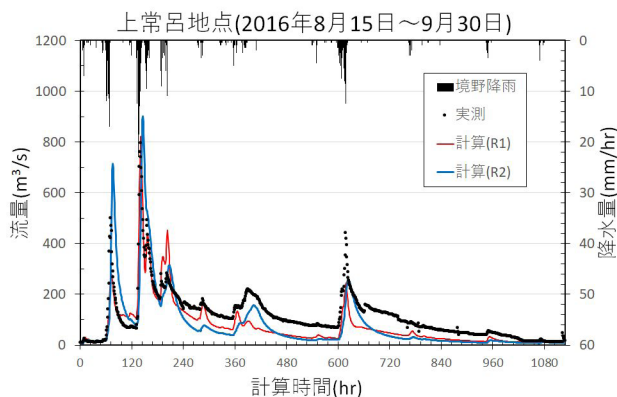


図6 改良水循環モデルの検証（上常呂）

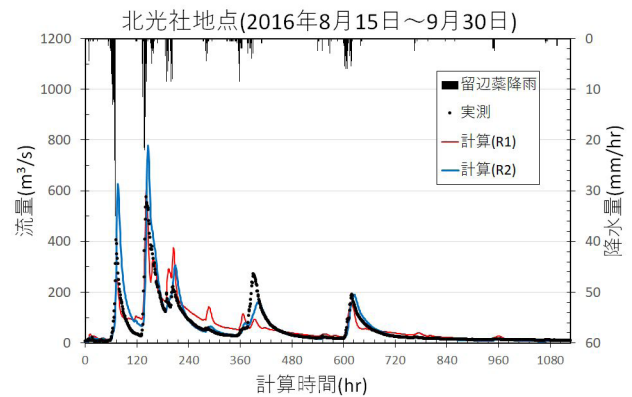


図7 改良水循環モデルの検証（北光社）

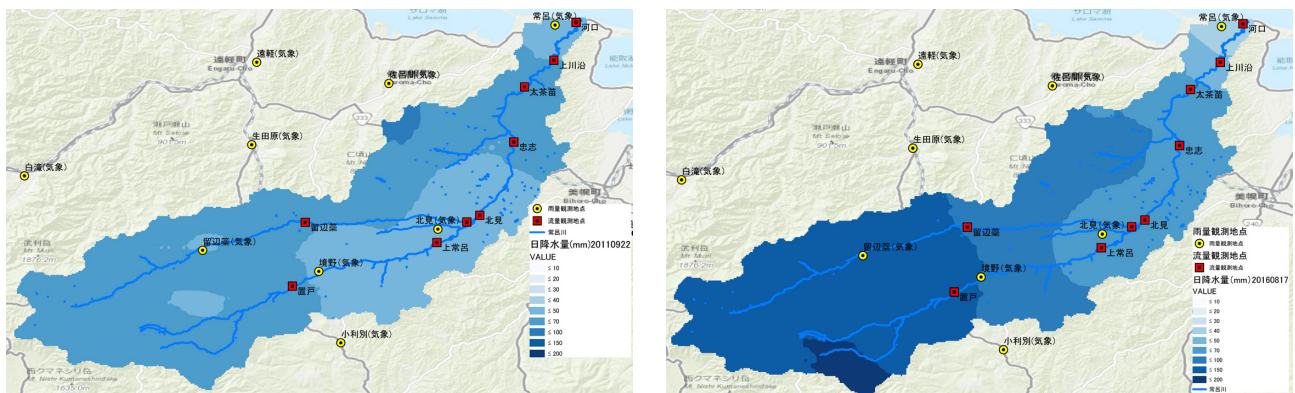
海道豪雨災害の洪水イベントを対象に解析した。

図5から図7が上川沿観測所，上常呂観測所，支川の北光社観測所における実測流量との検証結果である。前報と比較すると，いずれの地点も流量低減部の再現性が向上しており，帯水層モデルの改良が反映している。

SCE-UA法による同定作業は，今回の37個のパラメータを2000組のパラメータ組合せの中で標準最小2乗基準（SLSC）が最小となるパラメータを求めたもので，同定回数を増やすことで最適なパラメータ値は変化する点や，対象とする洪水流出によっても変化することに注意が必要である。

(3) 長期流出解析

第4章では常呂川流域の将来にわたる水資源を持続的に利用していくために，流域の定常的な水循環構造を把握し，使用可能な水量を把握することを目的として，蒸発散量の算出と水資源貯存量の把握を行っている。本節では，水循環モデルに第4章で再整理した日降水量（第4章図2）と日蒸発散量（第4章図3）の3次メッシュ（1kmグリッド）データを入力し，常呂川流域の日流量を算定した。計算期間は，2008-2015水文年とし，日データを24時間にわたって一定の降水量，蒸発散量とにおいて計算した。なお，流出パラメータは，2008-2015水文年の8年間の流出量に対する同定作業は現実的ではないので，平成28（2016）年8月北海道豪雨災害の洪水イベントから得られた流出パラメータを基準値とにおいて，日流量を算出した。図8は日降水量の一例である。今回の長期流出解析では，この日降水量から日蒸発散量を差引いた値を降水量として与え，前報の水循環モデルに組込んでいたThornthwaite法による蒸発散モデルは省略している。また，積雪・融雪モデルでは，日降水量を気温データで降雪か降水かを判別して，降雪深を計算し，融雪期には日降水量に融雪量を加算して流量を算出している。

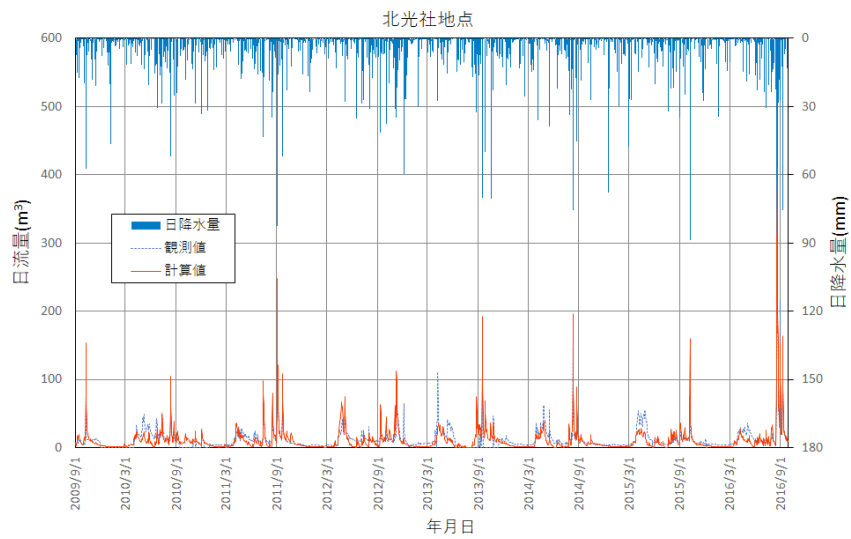
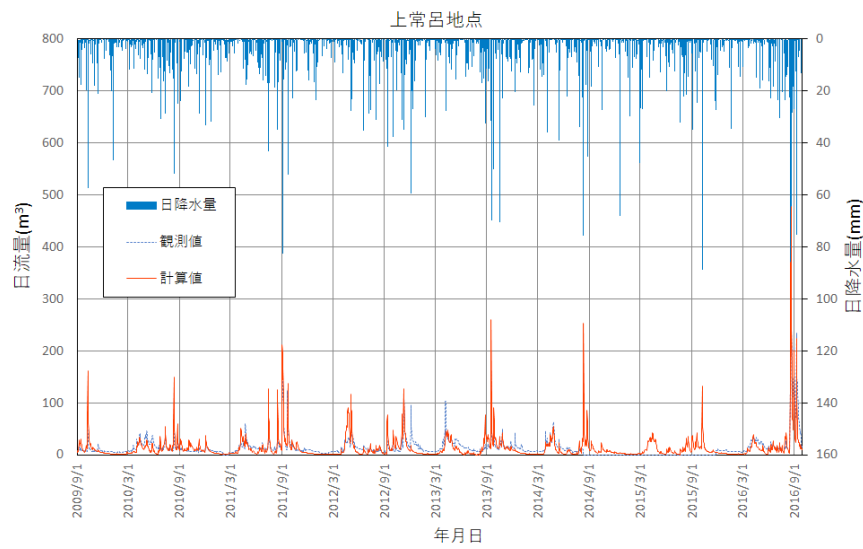
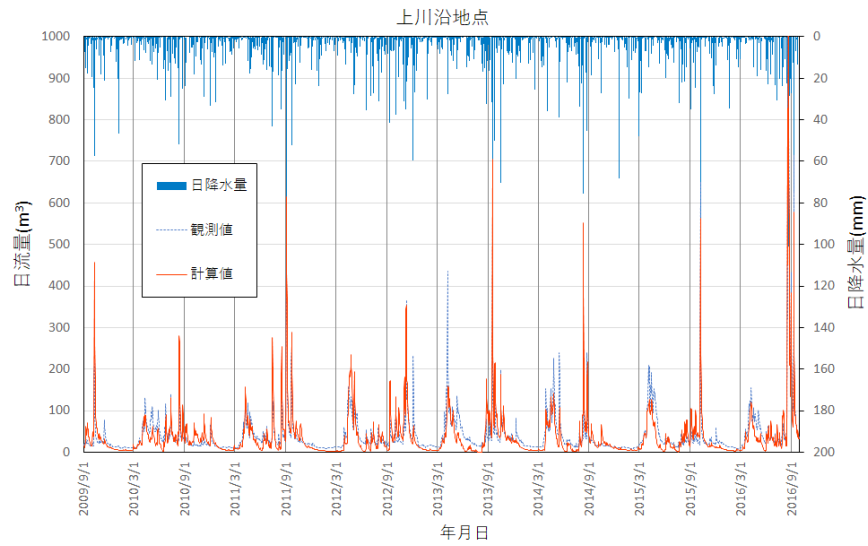


(a) 2011年9月22日

(b) 2016年8月17日

図8 日降水量(3次メッシュ)

図9は2008-2015水文年の8年間の長期流出解析結果である。流出パラメータとして2016年8月北海道豪雨洪水流出を基準パラメータとして与えた計算結果であるものの，下流の上川沿観測地点，中流の上常呂観測地点，支川無加川の北光社観測地点の流量を概ね良好に再現している。なお，非かんがい期の3月からの融雪期において，年度によっては流量が少ない場合もあり，改良の余地は残されている。



上：上川沿観測地点，中：上常呂観測地点，下：北光社観測地点

図9 3次メッシュ水文量による日流量の解析結果(2009年9月から2016年9月)

(4) 水資源として確保可能な河川流量

常呂川流域では、水資源を持続的に利用していく上で、河川表流水で確保できる水量の把握が不可欠である。前節で算出した2008～2015水文年の日流量を用いて、常呂川流域の各流量観測地点における年間の総水量を求め、その経年変化を図10に示す。2015年水文年（2015年9月21日～2016年9月20日）は2016年8月北海道豪雨を含んでいるため、他の年度より水量は多くなっているが、上川沿流量観測地点の水量は1,176百万m³/年となり、第4章で示した実測流量から算出した1,289百万m³/年より9%減の水量となった。降水量から蒸発散量を差引いた水資源賦存量は1,247百万m³/年であり、その差は地下帯水層に涵養された水量と考えることができる。

以上、水循環モデルを改良し、2008～2015水文年の長期間の日流量解析では、ほぼ実測流量と同程度の解析結果を得ることができた。この水循環モデルに、流域の社会情勢の変化や将来の気候変動の影響を取り入れる仕組みを付加するのが本研究の最終的な目的であった流域シミュレーターの構築であった。残念ながら、シミュレーターのプラットフォーム開発が滞り、完成させるまでには至っていないが、早期に利用しやすい流域シミュレーターの完成を目指す予定である。

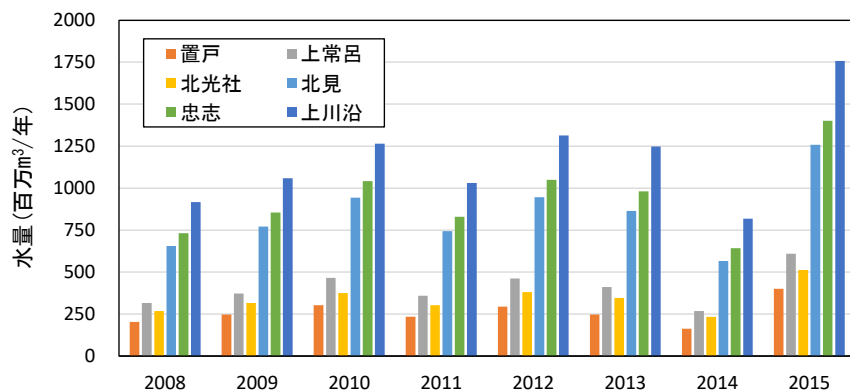


図10 常呂川流域の各流量観測地点における河川水量の経年変化

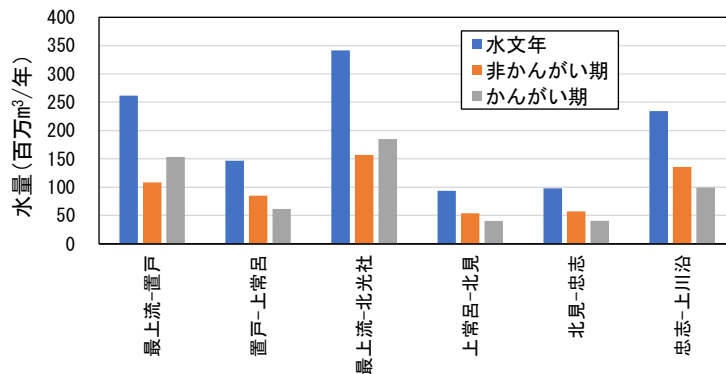


図11 常呂川流域の各区間において確保できる河川水量（2008～2015水文年平均）

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・丸谷靖幸助手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) 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.
- 2) 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> (2020年3月25日確認)
- 3) 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.
- 4) 早川博・宇都正幸他：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，(一財)北海道河川財団研究所紀要，XXX，pp.27-57，2019.
- 5) 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.
- 6) 早川博・矢萩亮祐・渡邊康玄・佐々木尊・高橋大輔：畑地における耕盤層の存在が流出特性へ及ぼす影響，河川技術論文集，第18巻，pp.447-452，2012.
- 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.

9. 総括（担当：早川博）

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。水資源は生活や産業に欠かせないものであるものの、一度に利用できる水資源の量には限りがあるため、流域の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、流域のある地点において人間・社会活動によって水質が悪化すると、その下流での水利用に悪影響を及ぼすことになる。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・社会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」の適切な管理が求められている。平成26年に制定された「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は、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、各省庁を横断して法整備されている。

本研究は、この流域一貫の水循環管理システムの一助となる水循環シミュレーターの開発を目的としている。対象流域として取り上げた常呂川流域は、年降水量が800mm以下の国内でも最小降水量の地域にあり、将来の気候変動による影響が大きい地域でもある。第1次産業を主要な産業としており、将来的に水資源を十分に確保できるのか、また、新たな水資源の開発確保の可能性などを検討する上でも、水資源の現状把握が前提となる。

本研究では、第4章で常呂川流域の水資源として利用可能となる降水量から蒸発散量を差し引いた水資源賦存量を詳細に検討した。その結果、従前の水文観測地点は平地に多く設置され、山地部の観測所データが少ないために、流域の降水量は過少に評価されていた。本研究では地域メッシュの3次メッシュ（約1kmサイズ）ごとに降水量、蒸発散量を算定し、山地部の降水量を考慮すると、流域平均の年降水量が約1,000mmとこれまでより多く算定された。また、蒸発散量もメッシュごとの標高、気温、土地利用等を考慮して算定すると、流域平均値は370mm程度となった。この結果、流域平均の水資源賦存量は650mm前後となり、この値は、流域貯留量を定常と仮定し、水資源賦存量がすべて流域下流から流出するものとして年間流量の実測結果と比較すると同程度となり、妥当な算定結果であることが確かめられた。また、水資源賦存量を流域の区間別に集計した結果、降水量の多い山地部が大きく、下流に下るに従い減少している。ただし、仁頃川が流入する忠志一太茶苗区間では、水資源賦存量が増加している。

次に、第5章では常呂川流域の流域貯留量の受け皿となる地下帯水層の空間分布を調査した結果、地下水として涵養される容水地盤は河道周辺に集中し、流域の約37%（約715km²）を占め、残り約63%（約1,213km²）は地下水が涵養され難く流出し易い水理地質基盤であった。したがって水資源賦存量の多い山地上流域では、その水量を地下水として涵養させることができず、地下水は利用し難い。また、地下水を涵養できる容水地盤の涵養量は、流域の水資源賦存量の約24%に相当し、それほど利用されていない地下水は今後の水資源開発の重要な資源となる。

以上の水循環量の算定を基に、第6章では流域の水循環構造を調べた結果、下流の上川沿観測所より上流区間における水収支から、水資源賦存量の76%が表面流出量で、残り24%が地下水の涵養量となり、人間活動に伴う河川水の取水量は表面流出量の10%で、地下水からの取水量は1%未満にすぎない。この結果、水収支から導かれた上川沿観測所における河川流量は、上川沿における実測の河川流量の93.9%となり、妥当な算定結果となっている。また、非かんがい期とかんがい期に分けて比較すると、かんがい期は降水量、蒸発散量、人間活動による取水量、河川流量のいずれも非かんがい期より多く、より活発な水の移動が生じていることがわかった。ただし、かんがい期の各算定諸量の年ごとの変動の幅が大きく、変動が少なく安定的に非かんがい期に得られる水をダムへの貯水や滞留時間の長い地下水から利用することが、年間を通して安定して水資源を確保するうえで重要と考えられる。

一方、第7章では常呂川流域の水利用について検討し、各小流域における1995年と2015年の累積水資

源賦存量は、常呂川本川と無加川近傍の小流域に多く、それ以外の小流域は比較的少ない。この累積水資源賦存量を利用するかんがい用水の潜在的需要量は、置戸から忠志にかけての盆地域の一部の小流域で相対的に大きい値を示し、累積水資源賦存量に占めるかんがい用水の潜在的需要量も、同じ盆地域では2~30.4%と大きい値を示した。常呂川流域ではいずれの小流域でみても、年間を通してみるとかんがい用水の潜在的需要量を賄うだけの水資源賦存量があり、また1995年に比べ、2015年は水田の面積減少を反映して潜在的需要量が減少し、かんがい用水をより余裕をもって確保可能となっていることが示された。

最後、第8章では流域の水循環シミュレーターについて言及している。水循環シミュレーターの骨格をなす水循環モデルは、上記してきた流域の時間的・空間的な水循環プロセスの解明と、その結果を用いた流域の水収支や水資源賦存量の空間的な分布状況の把握を目的としているので、流域を一体と考える集中型流出モデルではなく、流域を細分化した分布型流出モデルである。洪水流出などの短期流出に再現性が高い1K-DHMをベースとし、長期的な水循環、水収支を考える上で不可欠となる地下帯水層モデルを追加した水循環モデルを構築した。地下帯水層モデルは、常呂川流域の帯水層構造の調査結果を反映すべく、地下水涵養機能を持たない水理地質基盤と涵養機能を持つ容水地盤の2層構造とし、調査で得られた層厚分布を与えた。また、入力降水量、蒸発散量は地域メッシュの第3次メッシュごとの日別値を与え、水循環モデルの流出パラメータには2016年8月北海道豪雨洪水流出を対象に最適同定された基準パラメータを適用して、2008~2015水文年の8年間の長期流出解析を試みた。その結果、下流の上川沿観測地点、中流の上常呂観測地点、支川無加川の北光社観測地点の流量を概ね良好に再現している。なお、非かんがい期の3月からの融雪期において、年度によっては流量が過小評価する場合もあり、改良の余地は残されている。また、各水文年の年間総水量を求め、実測流量との比較でも良好な再現結果が得られている。水循環シミュレーターに残された課題としては、今後の新たな水資源として期待される地下水利用の影響を評価するために、地下水汲み上げによる地下水位の変動解析モデルの追加、他の流域へ適用できるように水循環モデルパラメータの一般化、さらには、水循環シミュレーターのユーザー・インターフェイスのGUI化などが挙げられる。