

北海道富良野地域の地下水と表流水の地球化学的特徴とその空間分布特性

Geochemical characteristic and spatial distribution of groundwater and surface water in Frano area, Hokkaido

ABSTRACT

新谷 毅・森野 祐助

SHINTANI Tsuyoshi, MORINO Yusuke

受付：2023年12月27日

受理：2024年2月29日

地域地質部 沿岸・水資源グループ

Corresponding Author SHINTANI Tsuyoshi
shintani-tsuyoshi@hro.or.jp

This paper reports the results of chemical analyses of groundwater and surface water in the Furano area, a part of the model area in the database construction project of water resources for community-based water management of small water supply systems. The major dissolved chemical compositions of groundwater and surface water depend on the surface geology and active volcanoes, and the Fe and Mn concentrations are affected by the presence of peat. In addition, the NO₃-N concentration in groundwater was high in agricultural areas, whereas the NH₄-N concentration in groundwater was high in rice farming. Moreover, the stable isotope ratios of hydrogen and oxygen in groundwater may depend on the differences in the recharge area and(or) recharge process. The findings indicate that the geochemical and spatial attributes of groundwater and surface water in the Furano area are associated with the geological setting and land use near the sampling points.

Keywords: Inland basin, Groundwater, Surface water, Water quality, Isotope

1 はじめに

近年の水道インフラ事業は今後の人口減少による収入減や管路老朽化による設備更新費用の増加などの問題から既存設備の維持管理が困難になることが予想される^{1),2)}。この問題に対応するための水道事業運営の一つとして、地域住民の組織する水道利用組合等によって維持管理する地域自律管理型(分散型)水道が注目されている³⁾。しかし、地域自律型水道への転換を検討あるいは転換後にその水道事業を運営していくためには、地下水や表流水などといった水源の確保と持続的な管理手法の確立といった水資源に関する情報が必要である。例えば、清野ほか⁴⁾は地下水を分散型の水源として持続的に利用する上で、流域内の水収支や地下水流動系における涵養、湧出量などを明らかにする必要があると述べている。このように、地域自律管理型水道の導入や導入後の水資源管理方法を検討するためには、流域内の水循環を理解することが重要である。

当研究機構では、「水道インフラシステム再編」に取り組

んでおり、北海道内における地域自律管理型水道の実態調査や再編時のコスト試算などといった水道インフラシステム再編に向けた様々なシナリオ作りを進めている。特に、モデル地域の一つである富良野地域では、地域自律管理型水道が数多く存在し、その実態調査や再編に向けた実証試験が行われている⁵⁾。これらのシナリオ作成や水道インフラに関する研究において重要な要素となる水道管設置費用や必要な水処理設備を最適化するためには、水源の確保及びその水質情報が必要となる。つまり、地域自律管理型水道として利用可能な水資源情報を整備することによって、水道インフラ再編システムの検討を円滑に進めることが可能になる。

本報告では、富良野地域の水資源情報整備の一環で実施した現地調査及び水試料の化学分析の結果に基づいて、富良野地域における地下水と表流水の地球化学的特徴とその空間分布特性を記述した。

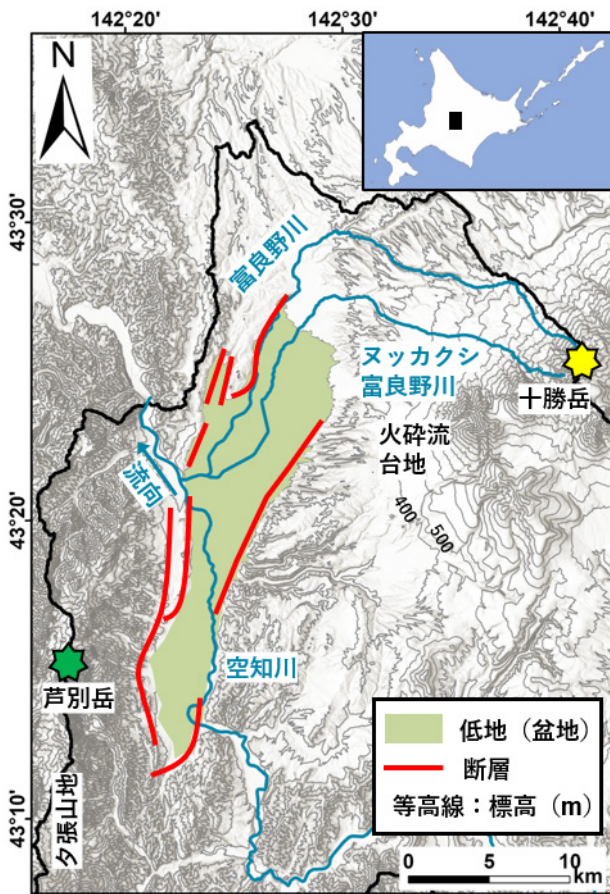


図1：富良野地域の概要図
Fig. 1: Conceptual map of Furano area.

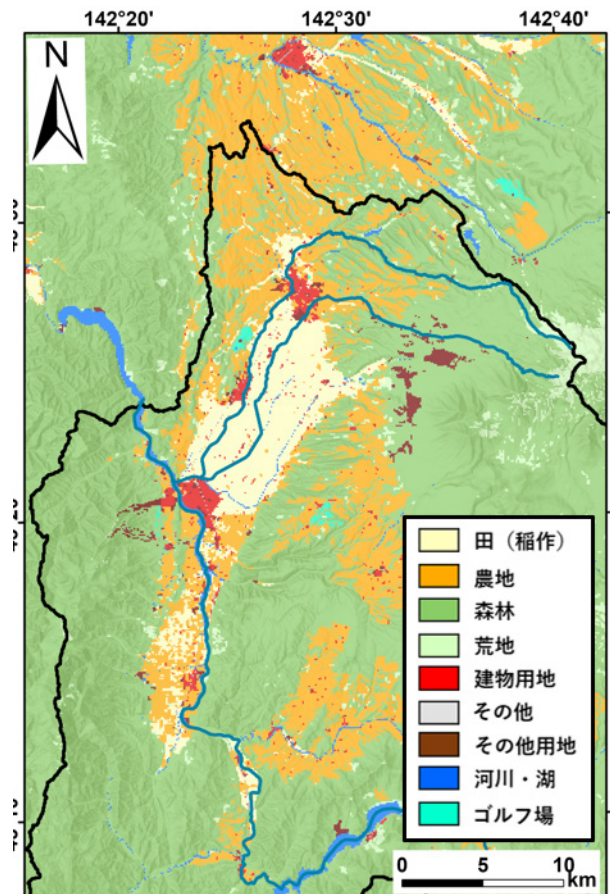


図2：土地利用図 国土数値情報（土地利用データ）を加工して作成⁹⁾
Fig. 2: Map of land use. Modified from National land information⁹⁾

2. 対象地域の概要

北海道中央部に位置する富良野地域は南北方向に延びる断層帯によって画された第四紀堆積物からなる構造盆地を中心に広がる^{6), 7)}。盆地北東部には十勝火山群が存在し、これら火山群のうち十勝岳（標高 2077 m）は活火山として知られている。その火山活動によって形成された火砕流台地が十勝岳の山麓から盆地に相当する低地部にかけて広がっている（図1）。一方、盆地南西部には夕張山地北端の芦別岳（標高 1726 m）が存在する。

盆地北部を流れる主要な河川は富良野川とヌッカクシ富良野川であり、これらの河川は十勝岳周辺に湧出する火山性熱水の影響を受けた pH5 以下の酸性の水質を示すことが知られている⁸⁾。この2つの河川は盆地中央部で合流し、盆地南部から北上してきた石狩川水系に属する一級河川の空知川に合流する。国土数値情報によれば⁹⁾、富良野地域の土地利用種別は森林・農地・田の3つが大半を占めており、森林は山地部、農地は北部や東部の火砕流台地や南部の空知川周辺の低地部、田（稲作）は富良野川周辺の低地部に多くみられる（図2）。

富良野地域の表層地質と層序を図3と図4にそれぞれ示

す^{10), 11)}。大局的には、富良野盆地南西部の芦別岳周辺では白亜紀の堆積岩が分布し、北東部では中新世から更新世の火山岩が分布する。盆地南部の両側に存在する山地は空知層群及び蝦夷層群からなるジュラ紀 - 白亜紀の堆積岩が露出しており、特に空知層群中には輝緑岩などの苦鉄質岩がみられる¹²⁾。芦別岳周辺の一部の地域では、蛇紋岩が露出している。北東部には、これらの上位に更新世の十勝火砕流堆積物が最大 200 m の厚さで分布する¹³⁾。その年代は 1.18-1.25 Ma とされている^{14), 15)}。十勝火砕流堆積物は流紋岩質の溶結凝灰岩で、盆地北西部の丘陵や盆地東部の台地を形成しており（火砕流台地）、盆地東部で富良野断層帯によって盆地と分断されている。盆地内の十勝火砕流堆積物の上面は水理地質基盤（境界）として扱われていたが^{8), 16)}、盆地北縁の一部の地域では、十勝火砕流堆積物の亀裂部に地下水が賦存しており、帯水層としての役割を果たしている。十勝火砕流堆積物の上位には富良野川周辺に発達した第四紀の扇状地堆積物が存在し、盆地内の主な帯水層を形成している。盆地低地部では、寒冷地特有の泥炭が分布している^{6), 17)}。この地域では、泥炭によって帯水層が被圧されており、自噴井が多く存在す

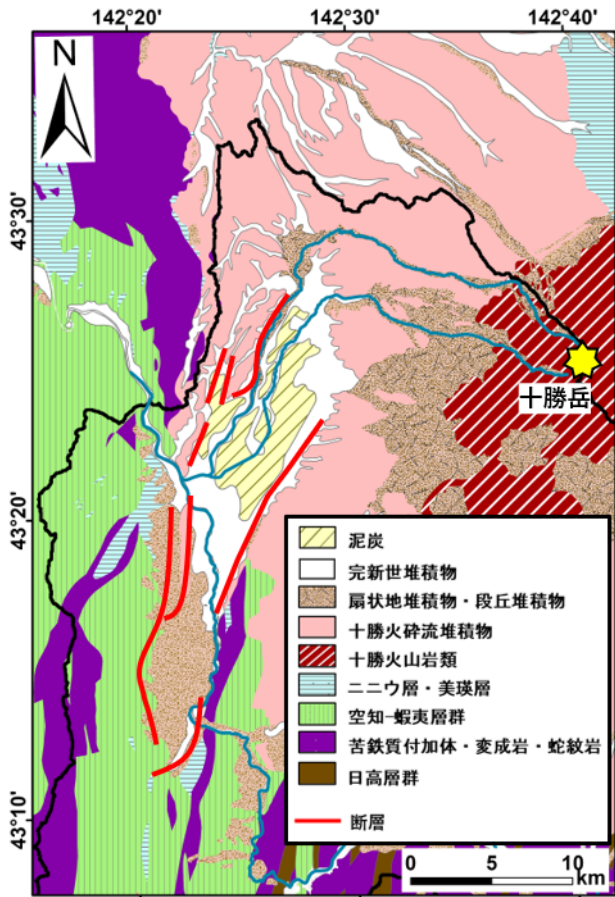


図3：表層地質図（産総研 20 万分の 1 地質図^{10,11)}より改変)
 Fig. 3: Surface geologic map (Modified from 1:200000 scale geological map published by AIST^{10,11)}.)

る⁸⁾。盆地南部では礫質な段丘堆積物が空知層群などの基盤岩を覆っており、良好な帯水層を形成している。これら第四紀以降の堆積物のうち、低地部に分布する扇状地堆積物と段丘堆積物は盆地埋積層として扱われる¹⁸⁾。盆地埋積層の厚さは富良野川流域では 100 m 以上に及び、空知川流域では約 70 m である¹⁹⁾。よって、富良野地域では、盆地埋積層と十勝火砕流堆積物の 2 層が主要な帯水層となる。

3 手法

3.1 試料採取

現地調査は 2020 年から 2022 年の間に複数回実施し、湧水・井戸水・温泉水の地下水 67 試料と表流水 23 試料をそれぞれ集めた。これらの採水地点は図 5 に示す（試料名については表 1、表 2 を参照）。採取した地下水の多くは井戸深度が 100 m 以浅で、主に水道水源や生活用水として利用されている。また、1 地点のみ温泉として利用されており、その井戸深度は 1200 m で、調査した井戸の中で最も深い。井戸の水試料は、電動ポンプを用いて水温が安定するまで一定時間排水した後、ポリバケツにより採取した。自噴井や湧

時代		地層名	
新生代	第四紀	完新世	完新世堆積物
		更新世	扇状地堆積物 ・段丘堆積物
			十勝火砕流堆積物
	新第三紀	鮮新世	美瑛層
		中新世	ニニウ層群
中生代	白亜紀	蝦夷層群	苦鉄質付加体・ 変成岩・蛇紋岩
	ジュラ紀	空知層群	
古生代		日高層群	

図 4：富良野地域の層序
 Fig. 4: Stratigraphy of Furano area.

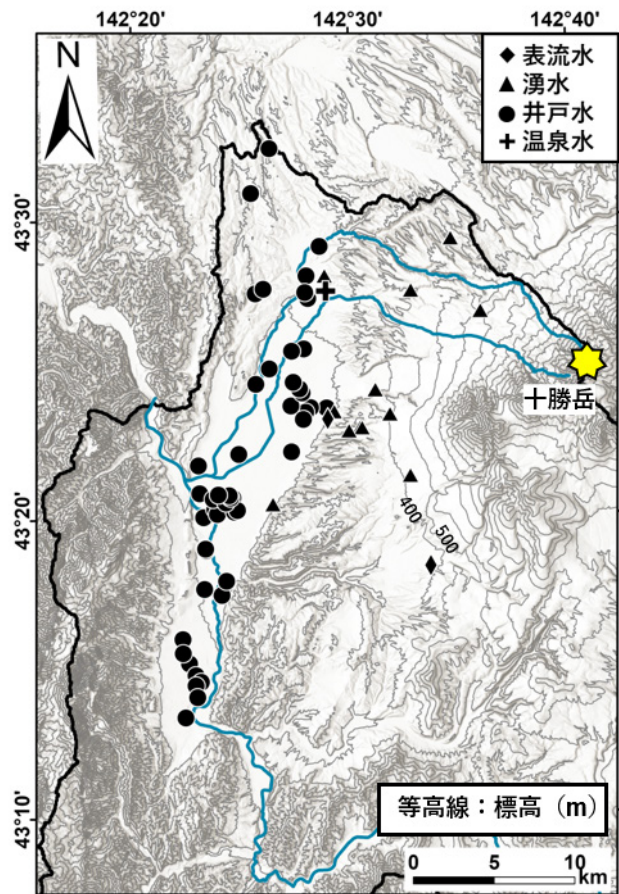


図 5：採水地点
 Fig. 5: Sampling point in this study.

水の場合は、湧水口からポリバケツを用いて採取した。表流水は、橋などから河川へ直接ポリバケツを投げ入れることで採取した。また、一部の試料は配管などで導水したものを採取した。

集めたこれらの水試料について、ポータブル電極計を用いて

水温, pH, 電気伝導度を現地で測定した。その他の化学分析用試料の前処理と保管については以下の通りである。アルカリ度測定用の試料は未処理の状態でもリプロピレン製ボトルに保管した。主要溶存イオン濃度 (Cl, SO₄²⁻, NO₃⁻-N, Na⁺, NH₄⁺-N, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺) 分析用及び水素と酸素の安定同位体比分析用の試料は 0.45 μm メンブレンフィルターによってろ過した後, ポリプロピレン製ボトルとホウ珪酸ガラス瓶にそれぞれ保管した。Total Fe と Total Mn, SiO₂ 濃度分析用の試料は硝酸濃度が 0.05 M になるように 1:1 硝酸を添加した後, ポリプロピレン製ボトルに保管した。

採取した試料のうち, FRN-6 は FRN-56~FRN-58 の 3 井混合水, FRN-7 は FRN-59 と FRN-60 との混合水であるため, 本報告の結果から除外した。さらに, 河川水のいくつかは 2021 年 4 月と 10 月にそれぞれ同一箇所でも採取しているため, これら重複する河川水試料の分析結果は 10 月のデータのみ本報告で述べる。

3.2 室内分析

実験室に持ち帰った試料について化学分析を行った。塩酸滴定により水試料中のアルカリ度を定量し, HCO₃⁻ 濃度とした。Cl, SO₄²⁻, NO₃⁻-N, Na⁺, NH₄⁺-N, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ 濃度はイオンクロマトグラフィー (Thermo Fisher Scientific 社製, DIONEX ICS1100, 2100) を用いて測定した。HCO₃⁻ 濃度を含むこれらのイオンバランスは 5 % 以内であった。Total Fe 及び Total Mn 濃度はフレイム式原子吸光分光光度法 (Varian 社製, 240FS AA) を用いて測定した。SiO₂ 濃度はモリブデンイエロー法により発色させたのち, 分光光度計 (ヤマト科学社製, U-5100) を用いて測定した。水素と酸素の安定同位体比は波長スキャンキャピティリングダウン分光法 (Picarro 社製, L-2130i) を用いて測定し, (1) 式のように標準海水 (SMOW) からの差を千分率 (‰) で表記した。

$$\delta (\text{‰}) = \frac{(R_{\text{測定値}} - R_{\text{SMOW}})}{R_{\text{SMOW}}} \times 1000 \quad (1)$$

得られた同位体比の分析精度は δ²H で 1.0 ‰, δ¹⁸O で 0.1 ‰であった。

4. 主要溶存化学組成

採取した水試料に含まれる主要イオン (HCO₃⁻, Cl, SO₄²⁻, Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺) の分析結果をパイパーダイアグラム上にプロットした (図 6)。パイパーダイアグラムの中央菱形部分を用いて, 地下水や表流水の水質をアルカリ土類炭酸塩型 (I 型), アルカリ炭酸塩型 (II 型), アルカリ土類非炭酸塩型 (III 型), アルカリ非炭酸塩型 (IV 型) の 4 つに分類することができる²⁰⁾。富良野地域の地下水の主要溶存化学組成はほとんどが I 型, III 型の領域にプロットされ, 地下

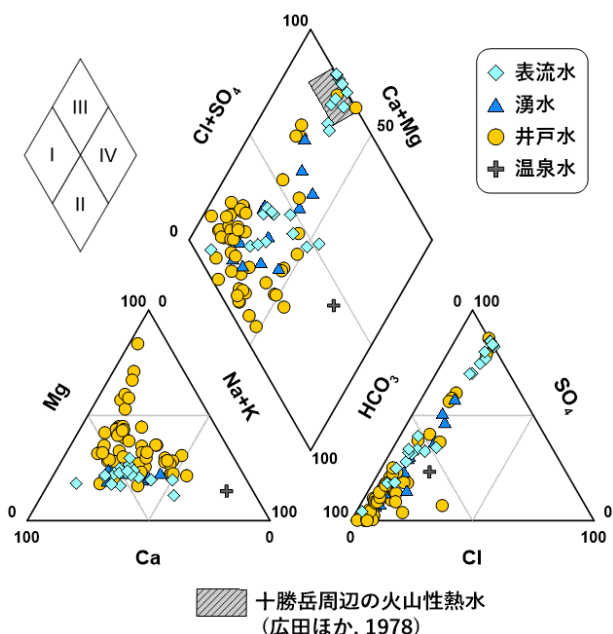


図 6: パイパーダイアグラム (主要溶存イオン組成)
Fig. 6: Piper diagram (Major dissolved ion composition)

水試料の井戸水 1 地点と温泉水は Na⁺ の割合が高い II 型と IV 型にプロットされた。また, I 型の領域にプロットされた水試料の陰イオン組成はすべて HCO₃⁻ が卓越しているのに対し, 陽イオン組成は Ca-rich (Ca²⁺ の割合が 50 % 以上), Mg-rich (Mg²⁺ の割合が 50 % 以上), 中間型の 3 つに分類することができる。III 型の領域にプロットされた地下水は I 型と同様に陽イオンは Ca²⁺ と Mg²⁺ が卓越する一方, 陰イオンは SO₄²⁻ が卓越しており, このような組成は Ca-SO₄ 型の十勝岳周辺の火山性熱水に近い²¹⁾。

表流水の化学組成も地下水と同様であるが, その HCO₃⁻ の割合は地下水に比べて相対的に低い。一部の試料は他の表流水に比べて Na⁺ と K⁺ の割合が高く, パイパーダイアグラムの菱形中心部にプロットされていた。この採取地点近くでは, 畑からの排水が河川へ流れ込んでおり, その影響を受けている可能性が考えられる。

以上のように, 富良野地域の地下水や表流水は様々な化学組成を持つことがわかった。本報告では, 空間分布特性の記載を簡潔にするため, これらの水試料を便宜的に Ca, Mg-HCO₃ 型, Ca-HCO₃ 型, Mg-HCO₃ 型, Ca-SO₄ 型, Na-HCO₃ 型, その他の 6 つの水質タイプに分類した (表 1, 表 2)。

5. 水素・酸素安定同位体比

地下水と表流水の水素安定同位体比 (δ²H) と酸素安定同位体比 (δ¹⁸O) の関係は, δ¹⁸O が -12.0 ‰より高い領域で, 富良野地域の天水線²²⁾ より δ¹⁸O 側へわずかにシフトする傾向がみられた (図 7)。本地域の試料別の同位体比について, 湧水は δ²H で -89~-81 ‰, δ¹⁸O で -13.4~-11.5 ‰, 井戸水

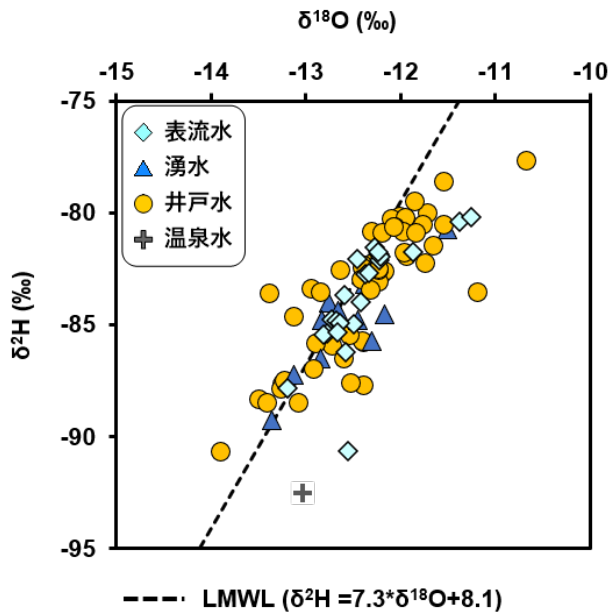


図7： δ ダイアグラム（水素と酸素の安定同位体比の関係）
黒実線は富良野地域の天水線²²⁾

Fig. 7: Delta diagram (Relationship between hydrogen and oxygen isotope ratios)
Black dotted line shows local meteoric water line in Furano area²²⁾.

は $\delta^2\text{H}$ で $-91\sim-78\text{‰}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ で $-13.9\sim-10.7\text{‰}$ 、温泉水は $\delta^2\text{H}$ で -93‰ 、 $\delta^{18}\text{O}$ で -13.0‰ 、表流水は $\delta^2\text{H}$ で $-91\sim-80\text{‰}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ で $-13.2\sim-11.2\text{‰}$ の範囲内であった。これらの試料の中では井戸水が最も同位体比の変動幅が大きく、その組成も他の水試料よりもばらつきが大きい。しかし、井戸水も含めた本地域の地下水と表流水の $\delta^2\text{H}$ と $\delta^{18}\text{O}$ は富良野地域の降水の年間変動範囲（ $\delta^2\text{H}$ ： $-127\sim-27\text{‰}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ ： $-17.5\sim-5.3\text{‰}$ ）より小さい²²⁾。一般的に降水の同位体比は気温、降水量、標高、海洋からの距離、緯度によって支配されることが知られており²³⁾、富良野地域の地下水と表流水もその起源となる降水の同位体比の変動の影響を受けていると考えられる。また、水試料の同位体比が高くなるにつれて δ ダイアグラム上では $\delta^{18}\text{O}$ 側にシフトする傾向についても十勝岳周辺に湧出する火山性熱水や涵養時における蒸発などの影響が考えられる。このことから、本地域の地下水と表流水の水素と酸素の安定同位体比は様々な影響を受けていると考えられる。

6. 水質タイプごとの空間分布

化学分析結果から得られた地下水と表流水の地球化学的特徴（4. で分類した水質タイプ及び T Fe 濃度、T Mn 濃度、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度、 SiO_2 濃度、 $\delta^2\text{H}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ ）の空間分布を帯水層に基づいて分類し、図 8~15 に示した。なお本報告では、帯水層を採取した地下水の井戸深度、盆地埋積層と十勝火砕流堆積物の基底標高分布¹⁸⁾、既存ボーリングの岩

相分布の3つの情報を基に帯水層を分類した。

6.1 水質タイプ

前述の4. で分類された水質タイプ別の空間分布を図8に示す。盆地埋積層中の地下水は帯水層の基底標高による水質の違いは見られない一方、地域によって水質タイプが明瞭に異なっていた（図8a）。盆地北部の1点は Ca-SO_4 型を示し、盆地中央部では Ca, Mg-HCO_3 型を示す。さらに、盆地南部の井戸水は、空知川の下流部では Mg-HCO_3 型が卓越する一方、上流部では Ca-HCO_3 型が卓越する。特に空知川下流の東西には蛇紋岩や空知層群などの苦鉄質岩が露出している（図3）。蛇紋岩などが地表に露出する地域の地下水は一般的に Mg-HCO_3 型の組成を持つことが知られており²⁴⁾、本報告の結果と整合的である。十勝火砕流堆積物中の地下水も盆地埋積層と同様に帯水層の基底標高分布よりもむしろ地域によって水質タイプが異なる（図8b）。富良野地域北部の富良野川やヌッカクシ富良野川周辺の湧水や井戸水は Ca-SO_4 型を示した。この組成は十勝岳周辺にみられる火山性熱水と同様であり²¹⁾、その影響を受けていると考えられる。また、この地域には1地点のみ Na-HCO_3 型を示す井戸水が存在しているが、その井戸深度は他の井戸水よりも深い50m以深である。また、盆地部の地下水は一部 Ca-SO_4 型を示すが、ほとんどは Ca, Mg-HCO_3 型を示し、火砕流台地の湧水は Ca-HCO_3 が卓越する（図8b）。表流水や深度不明の井戸についても、盆地埋積層や十勝火砕流堆積物中の地下水と同様の分布傾向があり、富良野地域北部では Ca-SO_4 型が卓越し、その他の地域では Ca-HCO_3 型が卓越する（図8c）。温泉水はその他のタイプに分類される Na-Cl, SO_4 型であり、その Cl と SO_4^{2-} の濃度は約100mg/Lと本研究で調査した水試料中で最も溶存成分の濃度が高い。以上より、温泉水を除く富良野地域の地下水と表流水の水質は帯水層ごとよりもむしろ周辺の地質環境によって異なる傾向がみられた。

6.2 Total Fe 及び Total Mn 濃度

地下水と表流水の Total Fe 及び Total Mn 濃度の空間分布は泥炭の分布と明らかな関係がみられた（図9、図10）。一般的に地下水中の Fe は黄鉄鉱の部分酸化、 Fe^{2+} を含む鉱物の溶解や鉄酸化物の還元に由来し²⁵⁾、これらの溶出特性は Mn についても同様である。このうち、鉄酸化物の還元には地下水中の有機物が重要な役割を持つことが知られているため²⁶⁾、Fe 及び Mn 濃度の支配要因として重要な役割を果たすと考えられる泥炭の分布も併せて図に示した²⁷⁾。本地域では、帯水層にかかわらず、泥炭層が分布する盆地中央部から北部にかけて Total Fe 濃度及び Total Mn 濃度が高い井戸水がみられ（図9a、図9b、図10a、図10b）、それらの多くは水道水質基準（Fe 濃度：0.3mg/L、Mn 濃度：0.05mg/L）を超過していた²⁸⁾。盆地中央部とその東側の火砕流台地との境界付近では十勝火砕流堆積物中の地下水の Total Fe 及び

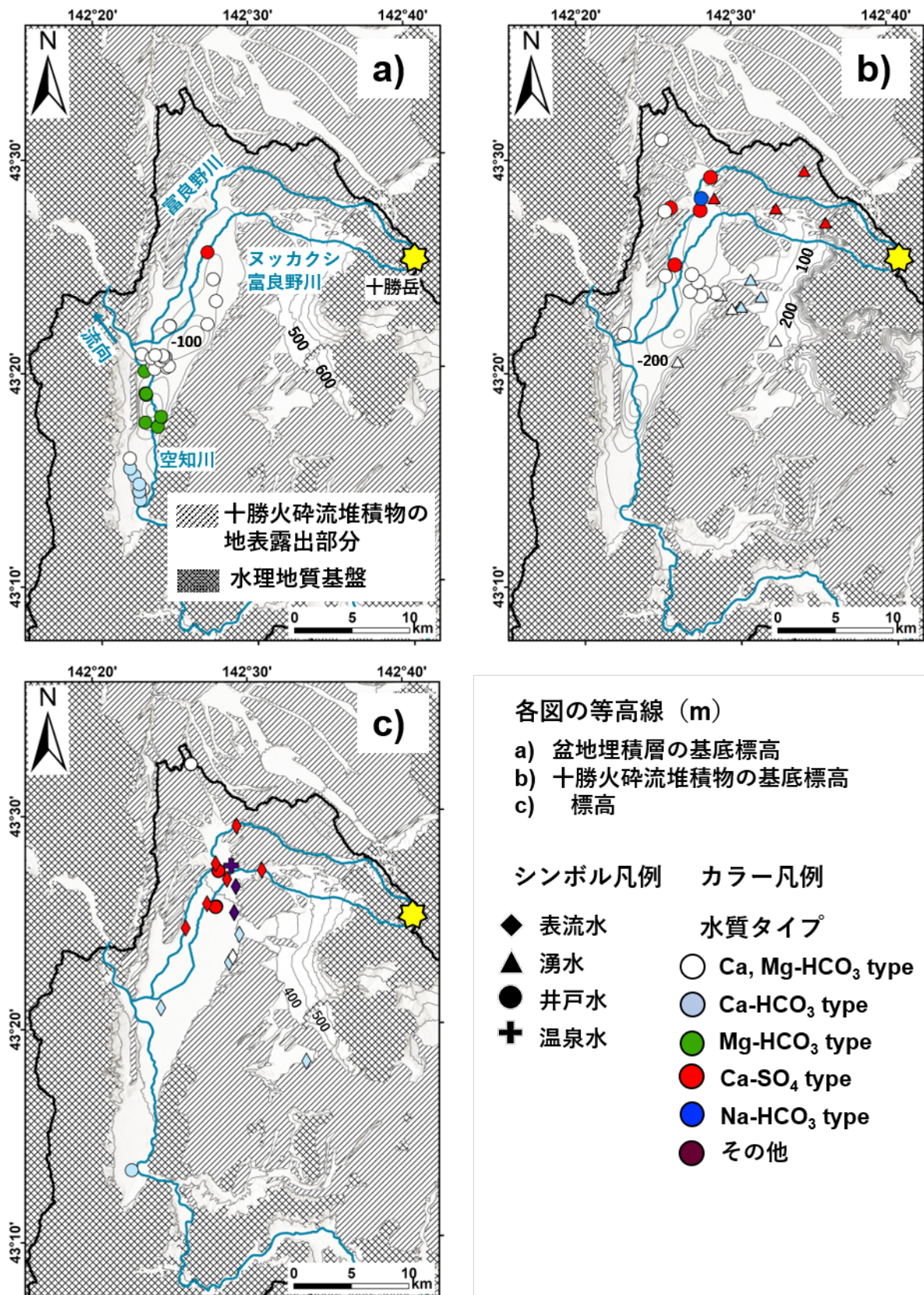


図 8：主溶解イオン組成の空間分布

a) 盆地埋積層の井戸水、b) 十勝火砕流堆積物の井戸水、c) その他（表流水、温泉水、深度不明の井戸水）

Fig. 8: Spatial distribution of major dissolved ion component in water sample

a) Well water in basin deposits, b) Well water in Tokachi pyroclastic flow deposit, c) Other (Surface water, hot spa, well water with unknown depth)

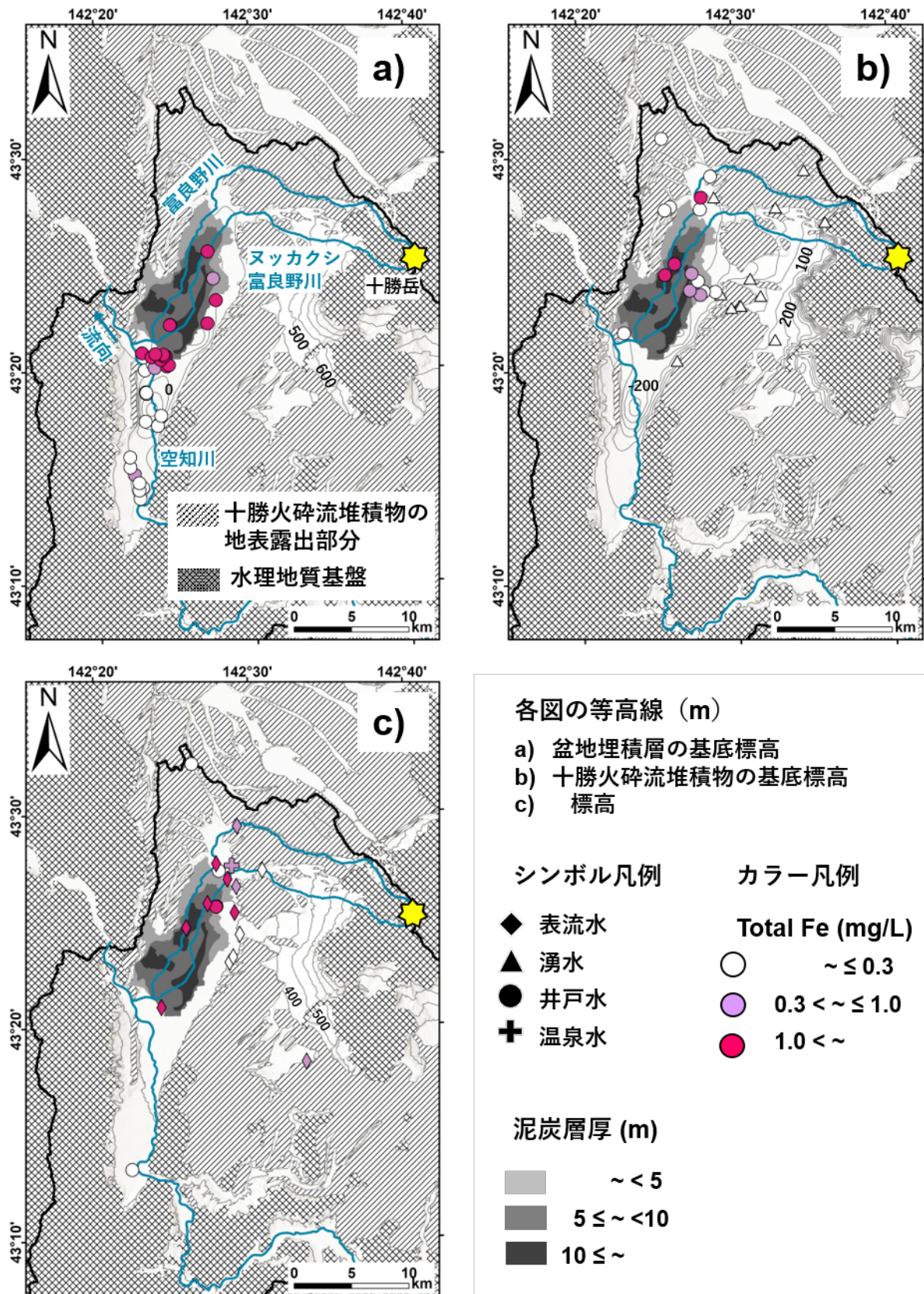


図9：Total Fe濃度の空間分布

a) 盆地埋積層の井戸水、b) 十勝火砕流堆積物の井戸水、c) その他（表流水、温泉水、深度不明の井戸水）
泥炭層厚は北海道立中央農業試験場²⁷⁾より改変

Fig. 9: Spatial distribution of total Fe concentration in water sample

a) Well water in basin deposits, b) Well water in Tokachi pyroclastic flow deposit, c) Other (Surface water, hot spa, well water with unknown depth). Peat thickness was modified from Hokkaido central agricultural experiment station²⁷⁾.

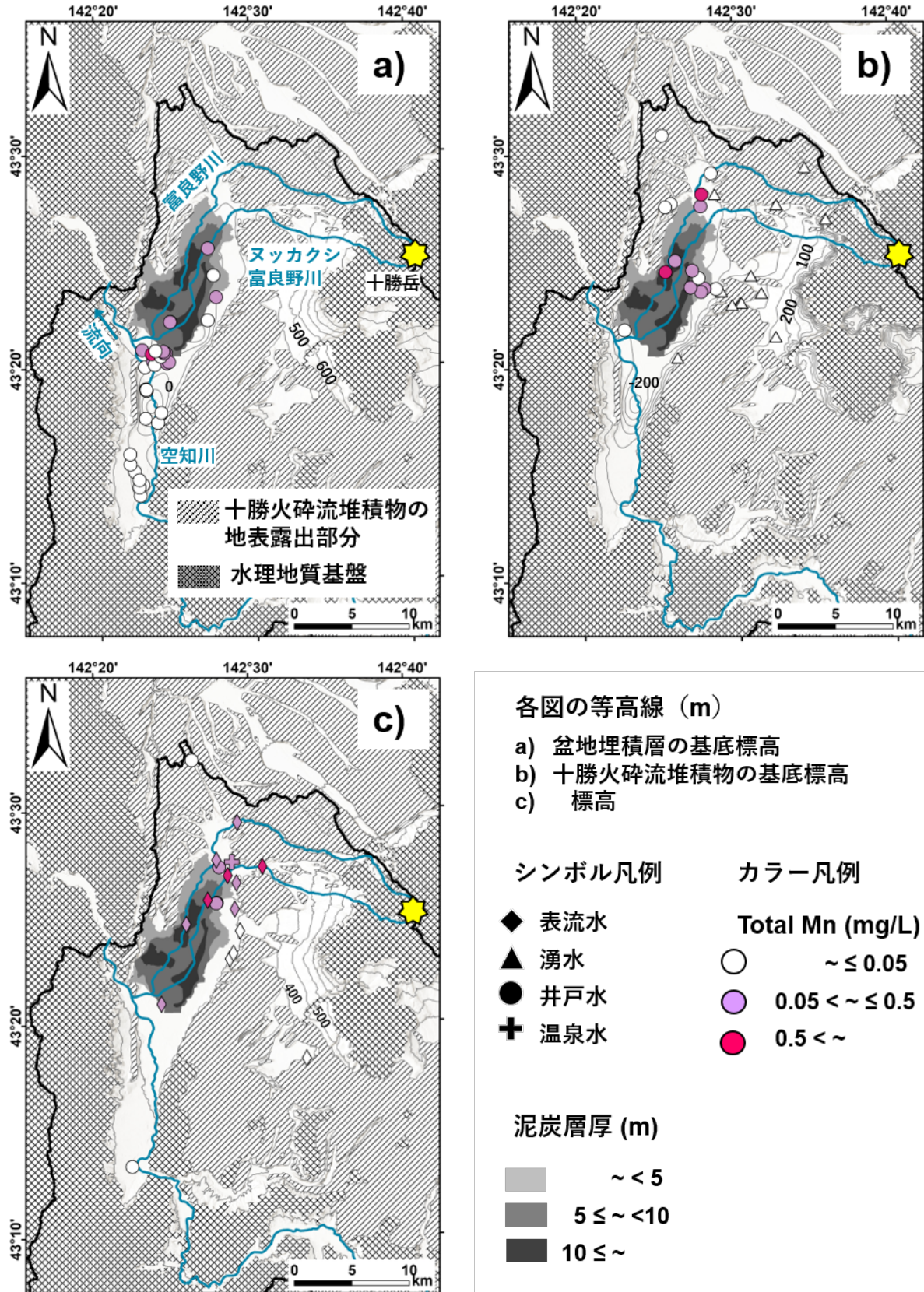


図 10 : Total Mn 濃度の空間分布

a) 盆地埋積層の井戸水、b) 十勝火砕流堆積物の井戸水、c) その他（表流水、温泉水、深度不明の井戸水）
 泥炭層厚は北海道立中央農業試験場²⁷⁾より改変

Fig. 10: Spatial distribution of total Mn concentration in water sample

a) Well water in basin deposits, b) Well water in Tokachi pyroclastic flow deposit, c) Other (Surface water, hot spa, well water with unknown depth)

Peat thickness was modified from Hokkaido central agricultural experiment station²⁷⁾

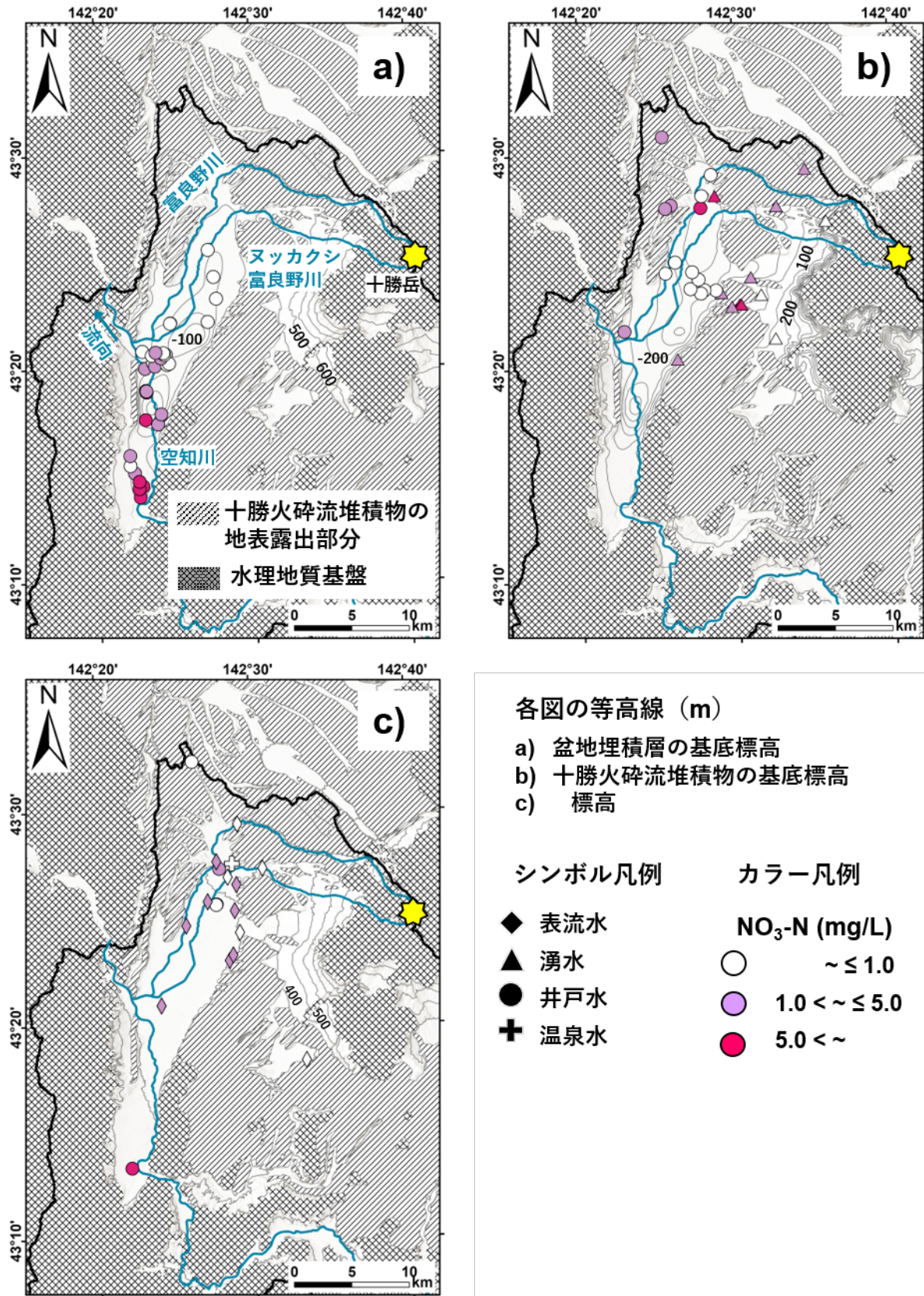


図 11 : NO₃-N 濃度の空間分布

a) 盆地埋積層の井戸水、b) 十勝火砕流堆積物の井戸水、c) その他 (表流水、温泉水、深度不明の井戸水)

Fig. 11: Spatial distribution of NO₃-N concentration in water sample

a) Well water in basin deposits, b) Well water in Tokachi pyroclastic flow deposit,

c) Other (Surface water, hot spa, well water with unknown depth)

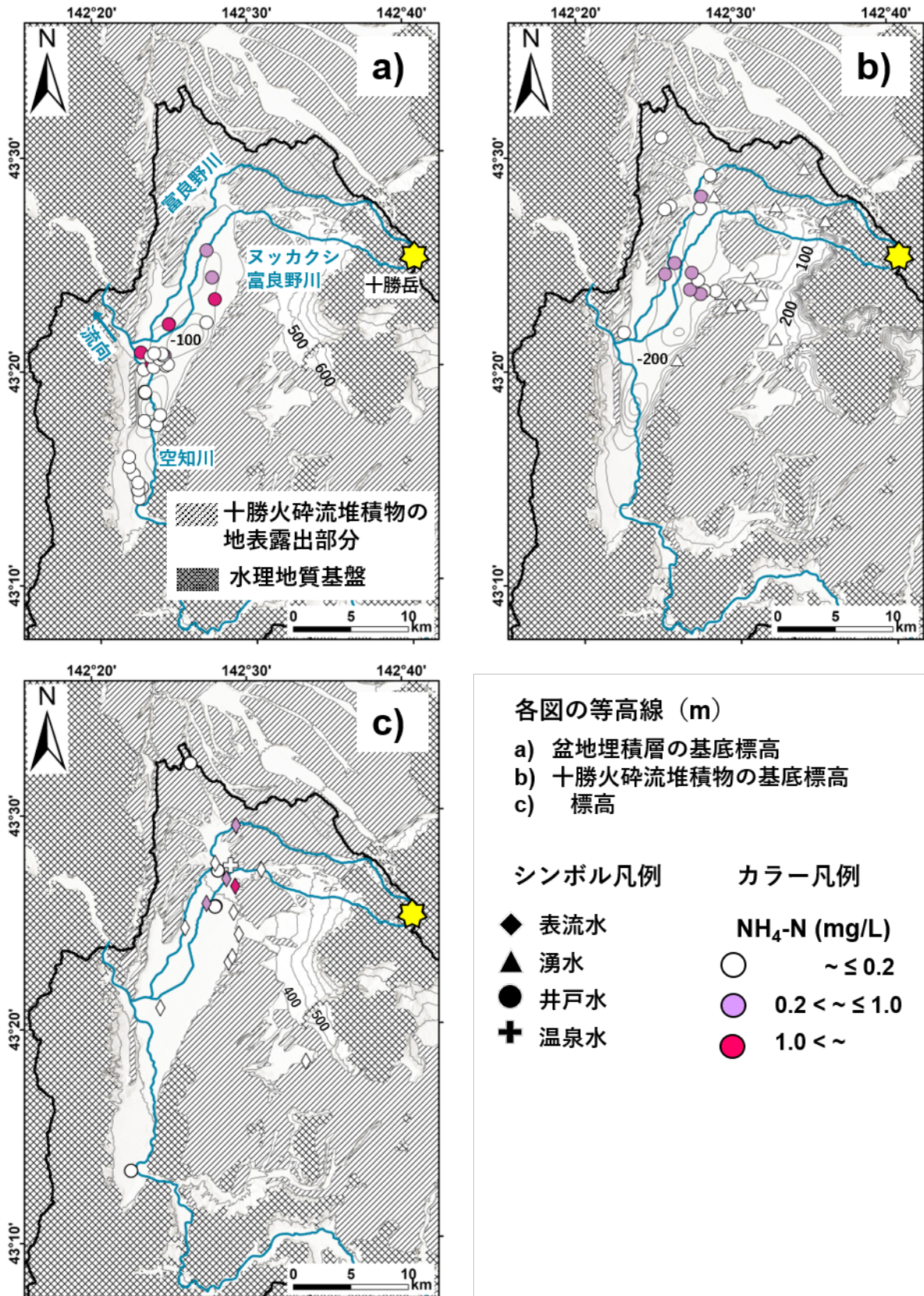


図 12 : NH₄-N 濃度の空間分布

a) 盆地埋積層の井戸水、b) 十勝火砕流堆積物の井戸水、c) その他（表流水、温泉水、深度不明の井戸水）

Fig. 12: Spatial distribution of NH₄-N concentration in water sample

a) Well water in basin deposits, b) Well water in Tokachi pyroclastic flow deposit, c) Other (Surface water, hot spa, well water with unknown depth)

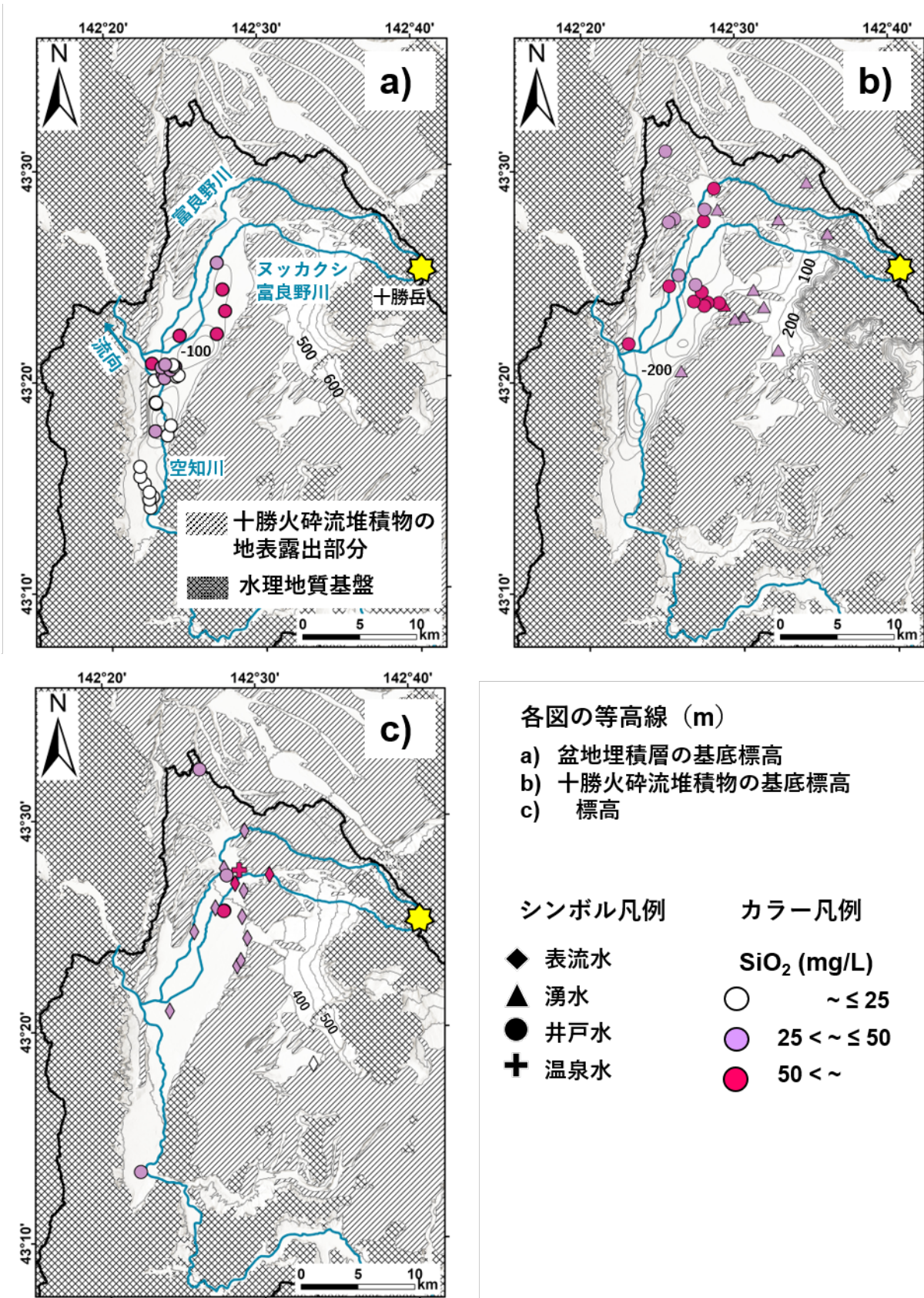


図 13 : SiO₂ 濃度の空間分布
 a) 盆地埋積層の井戸水、b) 十勝火砕流堆積物の井戸水、c) その他 (表流水、温泉水、深度不明の井戸水)
 Fig. 13: Spatial distribution of SiO₂ concentration in water sample
 a) Well water in basin deposits, b) Well water in Tokachi pyroclastic flow deposit,
 c) Other (Surface water, hot spa, well water with unknown depth)

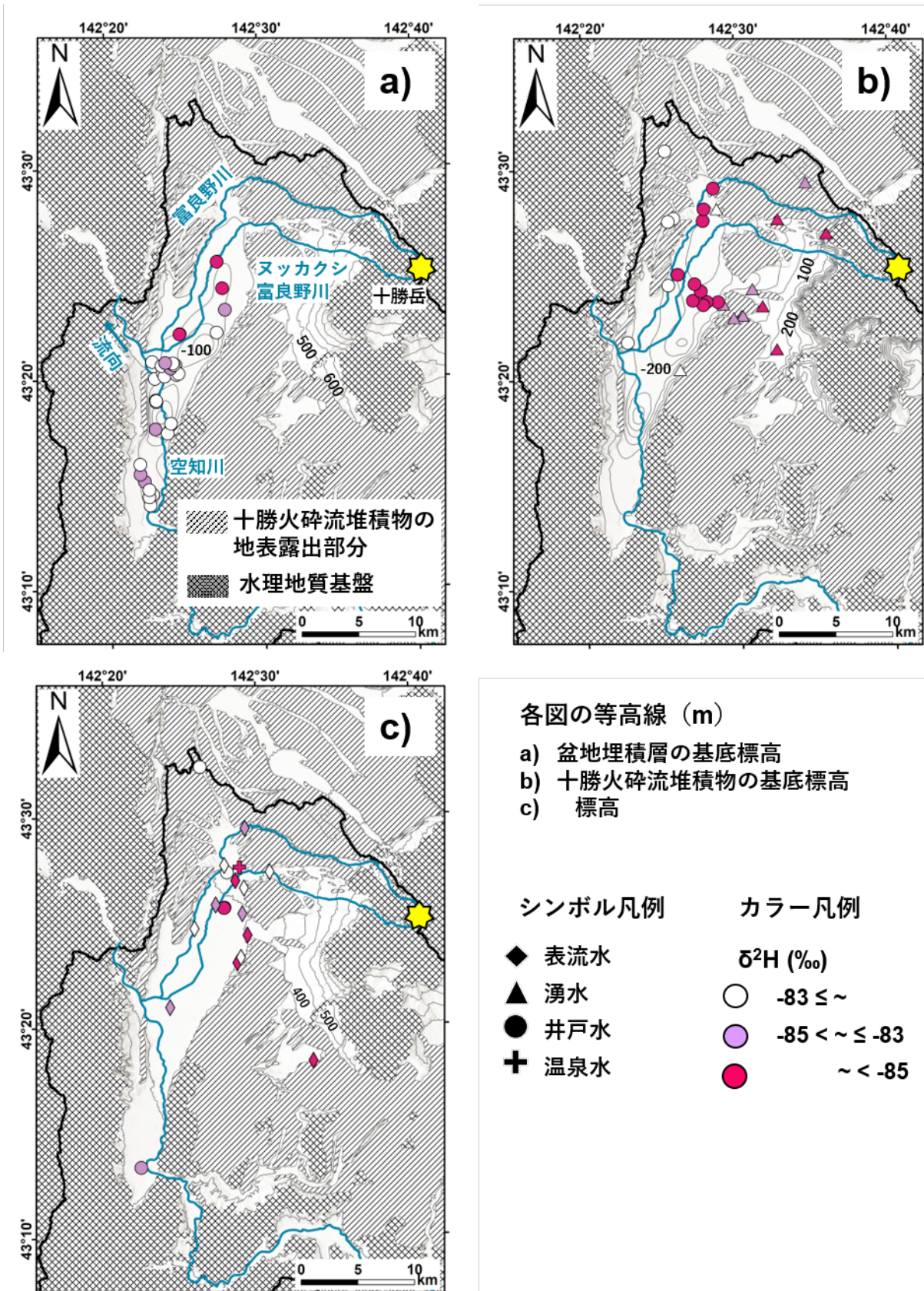


図 14: $\delta^2\text{H}$ の空間分布

a) 盆地埋積層の井戸水、b) 十勝火砕流堆積物の井戸水、c) その他 (表流水、温泉水、深度不明の井戸水)

Fig. 14: Spatial distribution of $\delta^2\text{H}$ in water sample

a) Well water in basin deposits, b) Well water in Tokachi pyroclastic flow deposit, c) Other (Surface water, hot spa, well water with unknown depth)

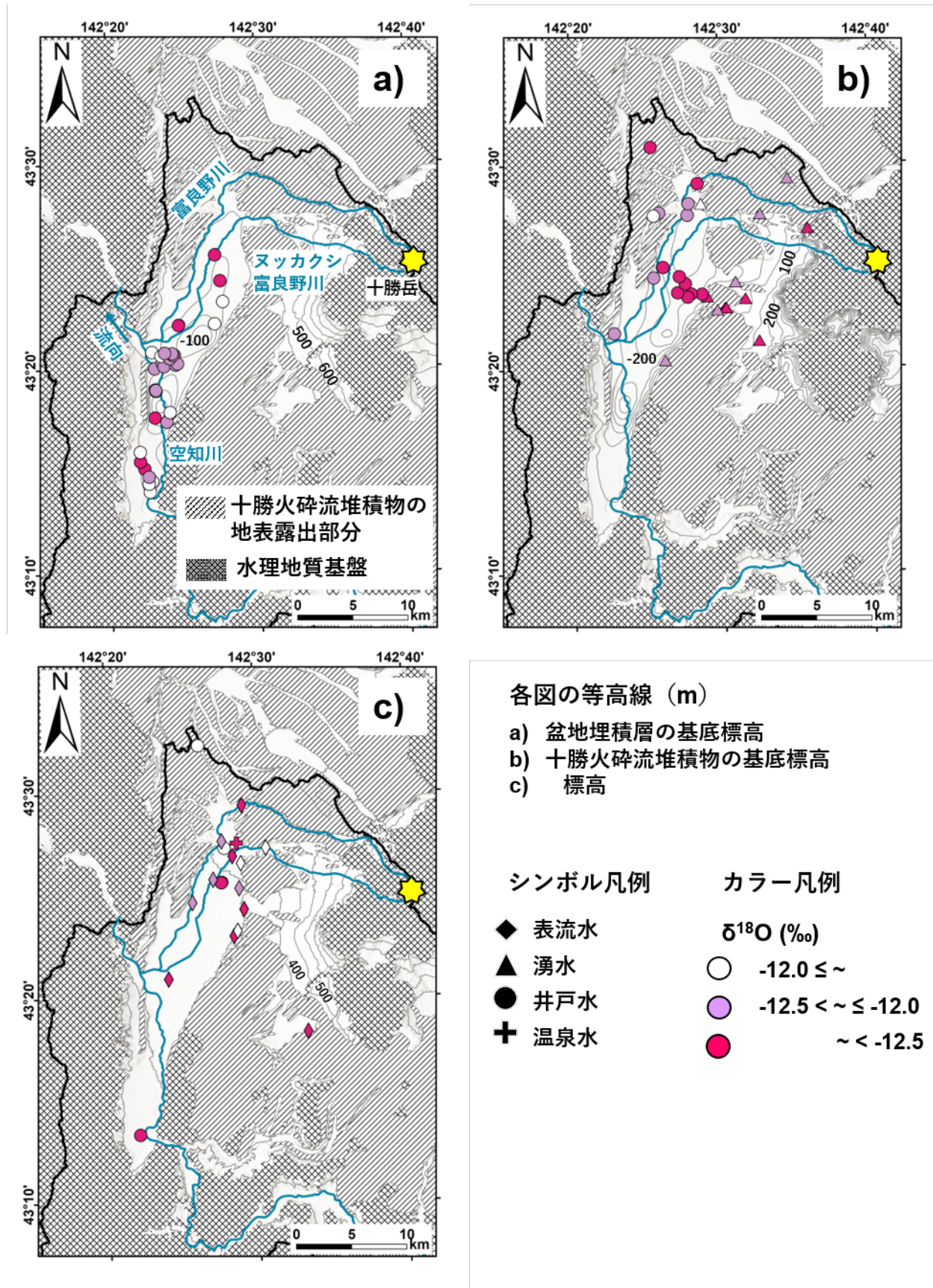


図 15: $\delta^{18}\text{O}$ の空間分布

a) 盆地埋積層の井戸水、b) 十勝火砕流堆積物の井戸水、c) その他 (表流水、温泉水、深度不明の井戸水)

Fig. 15: Spatial distribution of $\delta^{18}\text{O}$ in water sample

a) Well water in basin deposits, b) Well water in Tokachi pyroclastic flow deposit,
 c) Other (Surface water, hot spa, well water with unknown depth)

Total Mn 濃度はそれぞれ <0.3 mg/L, <0.05 mg/L と相対的に低い傾向がみられたが、泥炭層が分布する地域あるいはその周辺では Fe 及び Mn 濃度が水道水質基準を超過する傾向がみられた (図 9b, 図 10b). このような空間分布的特徴は先行研究の結果と整合的であり⁸⁾, これらの地域では 50 年以上にわたって Fe 濃度の高い地下水が湧出している. また, この濃度分布と泥炭の層厚分布との関係は認められず, 泥炭層の存在の有無が Total Fe 及び Total Mn 濃度に影響していると考えられる. 例えば, 難透水性である泥炭層の存在により, 帯水層が Fe と Mn が溶出されやすい還元環境へ変化した可能性がある. その他の地域において Fe と Mn 濃度が水道基準を超過したのは盆地南部の盆地埋積層中の井戸水と火砕流台地南部の表流水 1 地点であり (図 9a, 図 9c), 湧水はすべて水道水質基準以下であった. よって, 富良野地域の地下水や表流水の Fe と Mn 濃度を支配する主な要因は泥炭層であることが示唆された.

6.3 NO₃-N 及び NH₄-N 濃度

地下水と表流水試料の NO₃-N と NH₄-N 濃度は異なる空間分布特性を示した (図 11, 図 12). また, 本報告で採取した富良野地域の地下水と表流水の NO₃-N 濃度はすべて水道水質基準である 10 mg/L 以下であった²⁸⁾.

土地利用図との比較から (図 2), 農地利用されている地域のほとんどの地下水の NO₃-N 濃度は >1 mg/L を示した (図 11). 特に富良野地域南部の盆地埋積層の井戸水のいくつかは >5 mg/L の NO₃-N 濃度を示した (図 11a). 一方で, 盆地中央部から北部の稲作利用されている地域では, 盆地埋積層と十勝火砕流堆積物の両帯水層で井戸水の NO₃-N 濃度が ≤1 mg/L と農地利用されている地域の井戸水の NO₃-N 濃度より低い (図 11a, 図 11b) また, 湧水の採水地点のほとんどは農地利用されている地域にあり, 火砕流台地よりも東側の十勝火砕流堆積物が地表に露出している地域の湧水は NO₃-N 濃度が >1 mg/L を示し (図 11b)), それらの地域よりも十勝岳側では NO₃-N 濃度が ≤1 mg/L であった. 表流水の NO₃-N 濃度は盆地部で >1.0 mg/L を示し (図 11c), 地下水とは異なる傾向がみられた.

地下水の NH₄-N 濃度の空間分布傾向は NO₃-N 濃度と明瞭に異なっていた (図 12). 地下水や帯水層の種別にかかわらず, 稲作利用されている盆地中央部から北部の井戸水の NH₄-N 濃度は >0.2 mg/L であり, 特に盆地埋積層の井戸水のいくつかは十勝火砕流堆積物よりも高い NH₄-N 濃度 (>5 mg/L) を示した (図 12a, 図 12b). その他の地域では, 両帯水層とも NH₄-N は ≤0.2 mg/L の低濃度を示した. 表流水の NH₄-N 濃度は盆地北部の農地利用されている地域で >0.2 mg/L を示した一方, その他の地域では土地利用に関係なく ≤0.2 mg/L であり, その分布特性は地下水とは異なっていた (図 12c). この原因の詳細については不明であるが, 農

地からの排水が直接流れ込む表流水は地下水よりも硫酸アンモニウム系肥料などの影響(脱窒などのプロセスを介さない)を受けやすいのかもしれない.

水環境中の窒素濃度は, 生活排水, 家畜排せつ物, 農耕地への施肥などの地表での人為的活動による土地利用に大きく影響することが知られており^{29), 30)}, 本報告の結果も同様であった. 以上のことから, 表流水の一部を除く富良野地域の水試料の NO₃-N 濃度と NH₄-N 濃度は採水地点周辺の土地利用に関係している可能性がある.

6.4 SiO₂ 濃度

地下水と表流水の SiO₂ 濃度は空知川と富良野川の合流地点付近を境に南部で低く, 北部で高い傾向がみられた (図 13). 北部では, 水試料の種別に関わらず SiO₂ 濃度は >25 mg/L を示した (図 13). 特に盆地部の井戸水の多くは, 湧水 (25 <= 50 mg/L) よりも高い SiO₂ 濃度 (>50 mg/L) を示した. 一方, 南部では, 盆地埋積層中の地下水の多くが ≤25 mg/L の SiO₂ 濃度を示し, 北部の地下水より濃度が低い傾向がみられた (図 13a). 地下水や河川水などの一般的な陸水中の SiO₂ 濃度は地層構成物質の化学組成あるいは, 構成物質との接触時間 (滞留時間) によって変化し, また人為的汚染の影響を受けにくい点などからトレーサーとして用いられることが多い^{31), 32)}. 富良野地域の北部は十勝火砕流堆積物などの更新世以降の火山岩が卓越する一方, 南部では本地域はジュラ紀 - 白亜紀以前の堆積岩が主体であるため, 地下水や表流水の SiO₂ 濃度は表層あるいは帯水層を構成する岩石の違いを反映している可能性がある. また, 富良野地域の地下水のうち涵養域となる山地から最も離れた盆地中央部で Ca, Mg-HCO₃ 型であり, 帯水層中での陽イオン交換などの水岩石反応が進んでいないことが考えられる. よって, 富良野地域の地下水と表流水の SiO₂ 濃度は帯水層を構成する地質学的な背景による影響を受けていると考えられる.

6.5 δ²H 及び δ¹⁸O

地下水の δ²H と δ¹⁸O の空間分布は富良野地域の南部と北部で異なる傾向がみられた (図 14, 図 15). 表流水は地下水よりも比較的高い同位体比を示す傾向にあるが, 本報告では 10 月に採水した試料の結果のみを示しているため (図 14c, 図 15c), 参考値として扱うのが妥当であろう. 表 2 に記載している 4 月と 10 月の表流水の δ²H と δ¹⁸O の季節変化は, δ²H で 0-3 ‰, δ¹⁸O で 0.1-0.4 ‰ と採水地点によって様々であった. 富良野地域北部では, 相対的に同位体比が低い (δ²H < -85 ‰, δ¹⁸O < -12.5 ‰) 地下水が多く分布していた (図 14, 図 15). そのうち, 十勝火砕流堆積物が露出している地域の井戸水の δ²H は盆地部 (< -85 ‰) より高い同位体比 (≥ -83 ‰) を示し (図 14b, 図 15b), 井戸水の同位体組成は地域によって異なる. これはそれぞれの起源や流動経路の違いを反映していると考えられる. また, 火砕流台地とそれ

より十勝岳側の湧水は盆地部の井戸水と同様の $\delta^2\text{H}$ と $\delta^{18}\text{O}$ を示す一方、それらより盆地側の十勝火砕流堆積物が地表に露出している地域の湧水の $\delta^2\text{H}$ と $\delta^{18}\text{O}$ はそれぞれ $-85\text{‰} \sim -83\text{‰}$, $-12.5\text{‰} \sim -12.0\text{‰}$ であった (図 14b, 図 15b).

地域南部では、地下水のほとんどが地域北部よりも高い $\delta^2\text{H}$ ($\geq -83\text{‰}$) と $\delta^{18}\text{O}$ ($\geq -12.0\text{‰}$) を示した一方、いくつかの試料で北部の盆地部の井戸水や湧水と同様の $\delta^{18}\text{O}$ ($< -12.5\text{‰}$) を示した (図 14a, 図 15a). これらの地下水の起源となる富良野地域の降水の同位体比については、標高 400m 地点での年平均値が $\delta^2\text{H}$ で -85‰ , $\delta^{18}\text{O}$ で -12.5‰ が得られている²²⁾. 一般的に降水や表流水の $\delta^2\text{H}$ と $\delta^{18}\text{O}$ は高度効果による影響を受けやすいため³³⁾, 地下水の涵養標高の推定に用いられる^{34), 35)}. 富良野地域内における地下水の $\delta^2\text{H}$ と $\delta^{18}\text{O}$ が高度効果のみによって変化すると仮定すれば、富良野地域北部の地下水の多くは標高 400 m 以上の十勝岳周辺山麓で涵養された一方、南部の地下水の多くは比較的標高の低い段丘などで涵養されたと推定される。しかし、富良野地域の降水の $\delta^2\text{H}$ と $\delta^{18}\text{O}$ について、気温効果と降水量効果の両方の寄与を受けていることが報告されているため²²⁾, 高度効果を用いた涵養標高の定量的な推定にはさらなる調査が必要である。

まとめ

本報告では、富良野地域における地下水と表流水の地球化学的特徴とその空間分布特性について記述した。その結果、富良野地域の水試料の主な水質は Ca-SO_4 型, Ca, Mg-HCO_3 型, Mg-HCO_3 型の 3 つであることが明らかとなった。 Ca-SO_4 型の地下水は富良野地域の北部に分布しており、それらの上流に位置する十勝岳からの火山性熱水の影響が考えられる。 Ca, Mg-HCO_3 型を示す地下水の多くは盆地中央部に分布しており、一部火砕流台地でも見られる。 Mg-HCO_3 型の地下水は盆地中央部から南部に分布しており、これらの地下水の採水地点周辺には蛇紋岩などの苦鉄質岩が露出する。また、Total Fe あるいは Total Mn 濃度が水道水質基準を超える地下水の多くは盆地中央から北部の泥炭が分布する地域とその周辺に分布する。地下水の $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度は農地利用されている地域で高い傾向がある一方、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 濃度は稲作利用されている地域で高い傾向がみられた。表流水についても、一部の水質項目を除いて概ね地下水と同様の傾向がみられた。さらに、 $\delta^2\text{H}$ と $\delta^{18}\text{O}$ は富良野川と空知川の合流地点周辺を境に北部と南部で異なり、涵養域や涵養プロセスの違いを反映していると考えられる。以上のように、富良野地域における地下水と表流水の地球化学的特徴とその空間分布特性は周辺の地質環境や土地利用に関係していることが明らかになった。

表 1：地下水試料の化学分析結果

Table 1: Hydrochemical data of groundwater samples.

No.	FRN-1	FRN-2	FRN-3	FRN-4	FRN-5	FRN-6	FRN-7	FRN-8	FRN-9	FRN-10	FRN-11	FRN-12
採水日	2020/10/12	2020/10/12	2020/10/12	2020/10/12	2020/10/12	2020/10/13	2020/10/13	2020/10/13	2020/10/13	2020/10/13	2020/10/13	2020/10/13
WGS84 緯度 (°)	43.38	43.38	43.38	43.39	43.39	43.32	43.25	43.29	43.33	43.36	43.34	43.34
WGS84 経度 (°)	142.50	142.51	142.50	142.48	142.53	142.38	142.38	142.40	142.38	142.38	142.41	142.40
標高 (m)	309	309	272	185	391	176	235	188	173	169	170	173
pH	7.0	6.8	6.8	7.1	7.2	7.1	7.2	6.7	6.6	6.8	6.8	6.3
T (°C)	10.8	9.4	10.5	11.5	9.3	10.9	12.3	10.1	11.5	11.5	18.7	14.6
EC ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	142	128.4	115.6	118.4	242	218.0	156.8	197.5	139.9	121.3	239	157
T (°C)	11.7	10.5	11.3	12.4	9.8	11.7	13.0	10.8	12.1	12.3	19.7	15.1
区分	湧水	湧水	湧水	湧水	湧水	混合水	混合水	井戸水	井戸水	井戸水	井戸水	井戸水
井戸深度 (m)								30	<30	20	8	10
帯水層	十勝火砕流 堆積物	十勝火砕流 堆積物	十勝火砕流 堆積物	十勝火砕流 堆積物	十勝火砕流 堆積物			盆地埋積層	盆地埋積層	十勝火砕流 堆積物	盆地埋積層	盆地埋積層
HCO_3^- (mg/L)	39.5	38.6	40.3	53.7	31.9	117	64.1	116.5	82.0	37.2	122	61.5
Cl (mg/L)	5.47	5.58	6.15	7.44	2.43	7.83	5.61	5.24	4.83	21.4	8.57	6.15
SO_4^{2-} (mg/L)	18.9	19.5	14.1	9.75	2.54	19.9	12.0	14.4	9.81	4.54	0.33	18.3
$\text{NO}_3\text{-N}$ (mg/L)	5.00	5.31	3.95	1.69	0.15	5.01	5.66	3.06	2.18	1.90	0.03	3.25
Na^+ (mg/L)	6.63	6.95	8.89	9.64	2.63	4.26	4.74	5.34	3.74	13.9	6.09	5.20
$\text{NH}_4\text{-N}$ (mg/L)	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	0.85	n.a.
K^+ (mg/L)	1.95	1.96	2.24	3.01	1.13	0.69	0.34	1.19	0.95	3.68	2.32	1.75
Mg^{2+} (mg/L)	4.31	4.36	4.06	4.43	1.85	23.9	7.14	18.5	13.3	3.94	11.5	9.58
Ca^{2+} (mg/L)	15.8	16.5	12.4	11.3	6.88	14.4	19.5	17.5	10.8	8.76	16.9	15.0
Total Mn (mg/L)	<0.01	<0.01	<0.01	0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.36	<0.01
Total Fe (mg/L)	<0.1	<0.1	<0.1	0.13	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	<0.1	<0.1	14.6	0.22
SiO_2 (mg/L)	37.0	38.2	43.6	50.6	38.1	23.2	22.9	23.7	24.4	55.4	32.3	29.8
$\delta^2\text{H}$ (‰)	-84	-85	-83	-84	-87	-80	-80	-80	-80	-81	-81	-83
$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	-12.8	-12.8	-12.4	-12.7	-13.1	-11.9	-12.0	-12.0	-12.1	-12.3	-12.2	-12.3
Chemical type	Ca-HCO_3	Ca-HCO_3	Ca,Mg-HCO_3	Ca,Mg-HCO_3	Ca-HCO_3			Mg-HCO_3	Mg-HCO_3	Ca,Mg-HCO_3	Ca,Mg-HCO_3	Ca,Mg-HCO_3

n.a.: Not analyzed, n.d.: Not detected

表1：続き

Table 1: C0ntinued.

No.	FRN-13	FRN-14	FRN-15	FRN-16	FRN-17	FRN-18	FRN-20	FRN-21	FRN-22	FRN-23	FRN-24	FRN-25
採水日	2020/10/13	2020/10/13	2020/10/13	2020/10/14	2020/10/14	2020/10/14	2020/10/14	2020/10/14	2020/10/14	2020/10/14	2020/10/14	2020/10/14
WGS84 緯度 (°)	43.34	43.35	43.34	43.37	43.37	43.37	43.39	43.39	43.41	43.39	43.39	43.40
WGS84 経度 (°)	142.39	142.38	142.39	142.41	142.41	142.45	142.48	142.47	142.43	142.46	142.46	142.45
標高 (m)	172	170	173	170	170	176	183	181	184	180	179	180
pH	7.1	7.2	6.7	6.1	6.7	7.1	7.3	7.4	6.5	7.3	6.6	7.1
T (°C)	12.8	12.5	11.5	12.4	12.2	13.8	12.1	12.1	14.2	11.9	10.8	11
EC (μS/cm)	177.4	245	135.6	387	338	91.2	116.1	103.2	166.3	112.9	316	198.1
T (°C)	13.7	12.9	12	13	13.2	14.2	12.7	14.1	14.6	12.6	11.2	11.6
区分	井戸水	井戸水	井戸水	井戸水	井戸水	井戸水	井戸水	井戸水	井戸水	井戸水	井戸水	井戸水
井戸深度 (m)	<30	<30	4.82	60	70	50	50-60	100	10	140	11	300
帯水層	盆地埋積層	盆地埋積層	盆地埋積層	盆地埋積層	盆地埋積層	盆地埋積層	十勝火砕流 堆積物	十勝火砕流 堆積物	十勝火砕流 堆積物	十勝火砕流 堆積物	盆地埋積層	十勝火砕流 堆積物
HCO ₃ ⁻ (mg/L)	106	172	61.6	235	239	51.9	60.4	56.6	71.7	70.5	197	113
Cl ⁻ (mg/L)	7.61	9.37	5.86	14.5	14.6	4.72	8.99	4.01	6.75	4.61	4.95	7.55
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	8.73	9.84	11.5	0.30	0.30	1.38	7.52	8.58	0.38	0.72	0.44	0.63
NO ₃ ⁻ -N (mg/L)	0.04	0.05	2.13	0.06	0.07	0.03	0.59	0.05	0.04	0.02	0.10	0.03
Na ⁺ (mg/L)	13.0	14.3	6.06	29.2	29.5	6.81	11.5	7.09	8.54	10.2	11.8	17.1
NH ₄ ⁺ -N (mg/L)	1.13	1.34	n.a.	1.86	2.01	0.18	n.a.	n.a.	0.53	0.34	8.06	0.43
K ⁺ (mg/L)	2.89	5.95	1.42	5.70	5.79	1.81	3.32	2.78	1.86	2.85	3.74	4.42
Mg ²⁺ (mg/L)	9.34	16.8	8.13	17.4	17.9	2.99	5.08	4.78	4.27	4.91	11.4	6.81
Ca ²⁺ (mg/L)	15.3	19.1	13.2	23.0	23.8	7.41	7.98	8.89	10.6	5.46	26.0	11.8
Total Mn (mg/L)	0.27	0.32	0.02	0.30	0.30	0.04	<0.01	0.07	0.51	0.06	0.39	0.06
Total Fe (mg/L)	0.21	1.00	0.94	6.79	8.18	1.61	<0.1	<0.1	14.0	0.53	29.4	0.57
SiO ₂ (mg/L)	43.0	52.7	27.1	61.3	64.5	51.0	54.4	55.5	65.5	57.9	70.9	57.6
δ ² H (‰)	-82	-79	-83	-88	-88	-82	-88	-86	-82	-88	-84	-86
δ ¹⁸ O (‰)	-12.4	-11.5	-12.4	-12.4	-12.5	-11.9	-13.2	-12.6	-12.3	-13.3	-11.2	-12.7
Chemical type	Ca,Mg-HCO ₃	Ca,Mg-HCO ₃	Ca,Mg-HCO ₃	Ca,Mg-HCO ₃	Ca,Mg-HCO ₃	Ca,Mg-HCO ₃	Ca,Mg-HCO ₃	Ca,Mg-HCO ₃	Ca,Mg-HCO ₃	Ca,Mg-HCO ₃	Ca,Mg-HCO ₃	Ca,Mg-HCO ₃

n.a.: Not analyzed, n.d.: Not detected

No.	FRN-26	FRN-27	FRN-28	FRN-29	FRN-30	FRN-31	FRN-32	FRN-33	FRN-34	FRN-35	FRN-36	FRN-37
採水日	2020/10/14	2020/10/14	2020/10/14	2020/10/14	2020/10/14	2020/10/14	2020/10/14	2020/10/15	2020/10/15	2020/10/15	2020/10/15	2020/10/15
WGS84 緯度 (°)	43.40	43.40	43.41	43.43	43.43	43.43	43.42	43.22	43.23	43.25	43.26	43.27
WGS84 経度 (°)	142.46	142.46	142.45	142.46	142.46	142.45	142.44	142.37	142.38	142.37	142.37	142.37
標高 (m)	183	182	183	191	191	189	185	230	222	240	246	236
pH	7.4	7.3	7.4	7.3	7.1	7.3	7.3	6.9	6.9	6.8	7.2	7.4
T (°C)	10.6	10.4	10.6	10	10.1	9.9	10.2	12.7	11.2	9.9	13.8	10.4
EC (μS/cm)	98.8	119	170.5	253	232	282	248	169.9	153.4	116.3	54.3	118.5
T (°C)	11	10.7	11	10.4	10.4	10.2	10.8	13	11.5	10.2	14	10.8
区分	井戸水	井戸水	井戸水	井戸水	井戸水	井戸水	井戸水	井戸水	井戸水	井戸水	井戸水	井戸水
井戸深度 (m)	120	60.6	100	unknown	unknown	70	100	unknown	27	55	30	43
帯水層	十勝火砕流 堆積物	盆地埋積層	十勝火砕流 堆積物	unknown	unknown	盆地埋積層	十勝火砕流 堆積物	unknown	盆地埋積層	盆地埋積層	盆地埋積層	盆地埋積層
HCO ₃ ⁻ (mg/L)	52.0	77.8	129	39.7	41.5	53.7	75.7	58.9	52.5	55.2	22.6	61.5
Cl ⁻ (mg/L)	4.37	4.91	9.11	19.4	17.5	20.6	19.0	5.64	5.48	4.71	3.62	4.94
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	10.4	3.85	0.07	90.9	81.9	97.0	65.8	20.0	17.3	8.80	3.93	7.08
NO ₃ ⁻ -N (mg/L)	0.25	0.04	0.03	0.02	0.07	0.01	0.05	6.81	6.20	2.42	0.28	2.90
Na ⁺ (mg/L)	11.2	9.96	14.6	11.3	12.1	13.1	13.8	6.29	5.33	3.82	2.47	4.78
NH ₄ ⁺ -N (mg/L)	n.a.	0.28	0.55	0.21	n.a.	0.36	0.86	n.a.	n.a.	n.a.	0.03	n.a.
K ⁺ (mg/L)	3.16	3.03	4.14	3.27	3.32	3.46	5.03	0.55	0.72	0.33	0.38	0.63
Mg ²⁺ (mg/L)	3.21	5.43	8.82	10.4	9.58	12.0	11.0	7.83	7.18	5.17	1.18	7.87
Ca ²⁺ (mg/L)	6.98	10.8	15.4	31.9	28.2	35.2	27.3	20.5	18.8	14.7	6.79	12.5
Total Mn (mg/L)	n.d.	0.03	0.07	0.13	0.08	0.43	0.21	n.d.	n.d.	n.d.	0.02	n.d.
Total Fe (mg/L)	n.d.	0.50	0.62	1.17	1.49	1.33	1.87	<0.1	<0.1	0.81	0.24	<0.1
SiO ₂ (mg/L)	56.2	55.9	49.8	61.4	64.9	48.8	43.5	27.4	23.8	16.3	7.79	21.0
δ ² H (‰)	-87	-88	-86	-87	-88	-91	-88	-84	-78	-83	-84	-81
δ ¹⁸ O (‰)	-13.2	-13.5	-12.9	-12.9	-13.4	-13.9	-13.1	-12.8	-10.7	-12.9	-13.4	-11.8
Chemical type	Ca,Mg-HCO ₃	Ca,Mg-HCO ₃	Ca,Mg-HCO ₃	Ca-SO ₄	Ca-SO ₄	Ca-SO ₄	Ca-SO ₄	Ca-HCO ₃	Ca-HCO ₃	Ca-HCO ₃	Ca-HCO ₃	Ca,Mg-HCO ₃

n.a.: Not analyzed, n.d.: Not detected

表1：続き

Table 1: C0ntinued.

No.	FRN-38	FRN-39	FRN-40	FRN-42	FRN-43	FRN-44	FRN-45	FRN-46	FRN-47	FRN-48	FRN-49	FRN-50
採水日	2020/10/15	2020/10/15	2020/10/15	2020/10/15	2020/10/15	2020/10/16	2020/10/16	2020/10/16	2020/10/16	2020/10/16	2020/10/16	2020/10/16
WGS84 緯度 (°)	43.29	43.30	43.24	43.36	43.46	43.46	43.47	43.45	43.46	43.40	43.46	43.46
WGS84 経度 (°)	142.38	142.40	142.38	142.54	142.48	142.47	142.48	142.60	142.54	142.52	142.43	142.43
標高 (m)	193	185	226	420	226	210	219	617	389	275	219	222
pH	7.4	7.0	7.1	7.5	6.8	6.1	no data	no data	no data	no data	no data	no data
T (°C)	11.7	10	13.4	7.7	20.8	12.1	no data	no data	no data	no data	no data	no data
EC (μS/cm)	312	166.4	181.2	50.8	986	216.4	134.8	108.9	150.6	87.7	106.4	104.3
T (°C)	12.2	10.3	12.8	8	20.9	12.8	10.7	12.2	12.7	14.4	11.8	11.6
区分	井戸水	井戸水	井戸水	湧水	温泉水	井戸水	湧水	湧水	湧水	湧水	井戸水	井戸水
井戸深度 (m)	7	25	50		1200	unknown					<30	50.5
帯水層	盆地埋積層	盆地埋積層	盆地埋積層	十勝火砕流 堆積物	unknown	unknown	十勝火砕流 堆積物	十勝火砕流 堆積物	十勝火砕流 堆積物	十勝火砕流 堆積物	十勝火砕流 堆積物	十勝火砕流 堆積物
HCO ₃ ⁻ (mg/L)	183.0	97.0	72.7	30.4	280	4.3	27.1	16.4	28.3	36.3	19.8	24.7
Cl ⁻ (mg/L)	11.7	5.31	5.04	2.85	104	14.7	9.05	7.95	11.4	3.26	7.93	5.21
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	20.2	11.7	16.6	2.90	115.7	72.2	21.7	33.4	34.8	6.08	16.5	6.55
NO ₃ ⁻ -N (mg/L)	5.94	2.64	5.47	0.14	0.04	4.03	5.99	0.21	2.75	1.42	4.29	1.17
Na ⁺ (mg/L)	2.93	5.81	5.07	3.16	156	11.6	10.9	5.33	13.5	3.44	7.83	6.71
NH ₄ ⁺ -N(mg/L)	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
K ⁺ (mg/L)	0.80	1.81	0.48	1.22	17.0	3.23	3.71	1.89	3.23	1.47	2.62	2.31
Mg ²⁺ (mg/L)	43.1	13.9	10.6	1.64	16.4	5.07	3.56	2.72	4.21	2.58	3.23	2.64
Ca ²⁺ (mg/L)	10.5	14.3	19.8	5.91	21.0	24.2	12.9	13.7	13.4	9.57	9.60	3.99
Total Mn (mg/L)	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.56	0.08	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	<0.01	<0.01
Total Fe (mg/L)	n.d.	0.15	n.d.	n.d.	0.85	<0.1	n.d.	<0.1	n.d.	n.d.	0.19	<0.1
SiO ₂ (mg/L)	25.7	23.7	23.8	34.5	70.7	61.7	31.5	45.7	40.5	33.7	34.2	42.5
δ ² H (‰)	-85	-81	-81	-86	-93	-82	-81	-89	-86	-85	-82	-80
δ ¹⁸ O (‰)	-13.1	-11.6	-11.5	-12.8	-13.0	-11.7	-11.5	-13.4	-12.3	-12.4	-12.4	-11.7
Chemical type	Mg-HCO ₃	Mg-HCO ₃	Ca,Mg-HCO ₃	Ca,Mg-HCO ₃	Other	Ca-SO ₄	Ca-SO ₄	Ca-SO ₄	Ca-SO ₄	Ca-HCO ₃	Ca-SO ₄	Ca,Mg-HCO ₃

n.a.: Not analyzed, n.d.: Not detected

No.	FRN-51	FRN-52	FRN-53	FRN-54	FRN-55	FRN-56	FRN-57	FRN-58	FRN-59	FRN-60	FRN-61	FRN-62
採水日	2020/10/16	2020/10/16	2020/10/16	2020/10/16	2020/10/16	2021/10/28	2021/10/28	2021/10/28	2021/10/28	2021/10/28	2021/10/27	2022/7/13
WGS84 緯度 (°)	43.51	43.54	43.46	43.47	43.49	43.32	43.32	43.32	43.24	43.25	43.34	43.34
WGS84 経度 (°)	142.42	142.44	142.46	142.46	142.58	142.38	142.38	142.38	142.38	142.38	142.44	142.39
標高 (m)	264	276	203	208	395	176	176	176	231	235	175	172
pH	no data	no data	no data	no data	no data	7.3	7.3	7.8	7.6	7.6	7.3	7.0
T (°C)	no data	no data	no data	no data	no data	10.2	11	10.2	10.3	10.2	9	15.6
EC (μS/cm)	106.2	61.4	163.8	260	122.5	238	216.4	148.8	159	144.3	121.2	300.7
T (°C)	12.3	11.3	11.9	12.7	9.9	10.4	11.3	10.5	10.4	10.4	9.6	15.5
区分	井戸水	井戸水	井戸水	井戸水	湧水	井戸水	井戸水	井戸水	井戸水	井戸水	湧水	井戸水
井戸深度 (m)	50.5	unknown	<30	>50		40	40	50	50	71		<30
帯水層	十勝火砕流 堆積物	unknown	十勝火砕流 堆積物	十勝火砕流 堆積物	十勝火砕流 堆積物	盆地埋積層	盆地埋積層	盆地埋積層	盆地埋積層	盆地埋積層	十勝火砕流 堆積物	盆地埋積層
HCO ₃ ⁻ (mg/L)	35.4	29.8	n.d.	119	24.4	123	116	92.7	62.5	74.7	39.3	120
Cl ⁻ (mg/L)	6.47	5.31	8.46	29.9	8.01	9.40	7.92	5.59	5.15	5.03	8.82	8.60
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	9.25	3.46	54.8	5.97	33.8	34.6	22.6	9.58	19.6	13.0	8.14	27.8
NO ₃ ⁻ -N (mg/L)	3.20	0.70	5.25	0.04	1.80	6.79	5.52	2.83	6.69	5.77	4.63	n.a.
Na ⁺ (mg/L)	10.8	6.94	12.0	34.0	7.53	6.09	6.21	5.58	6.02	6.39	11.4	9.29
NH ₄ ⁺ -N(mg/L)	n.a.	n.a.	n.a.	0.94	n.a.	0.08	0.13	n.a.	0.13	0.09	0.15	0.05
K ⁺ (mg/L)	3.04	2.55	3.65	3.08	3.61	0.75	0.89	0.60	0.51	0.49	3.68	1.90
Mg ²⁺ (mg/L)	3.95	2.04	3.34	7.35	4.10	28.8	24.1	14.4	8.64	7.65	3.72	14.5
Ca ²⁺ (mg/L)	6.71	4.32	15.3	13.4	13.0	13.9	13.9	11.9	20.1	20.7	9.20	20.4
Total Mn (mg/L)	<0.01	n.d.	0.13	1.62	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.98
Total Fe (mg/L)	n.d.	<0.1	0.21	11.1	<0.1	0.01	0.00	0.01	n.d.	0.06	n.d.	2.47
SiO ₂ (mg/L)	49.7	62.8	61.2	40.9	46.6	25.8	26.1	21.8	19.5	21.3	41.3	32.9
δ ² H (‰)	-83	-81	-86	-86	-85	-80	-80	-81	-81	-81	-82	-82
δ ¹⁸ O (‰)	-12.6	-11.8	-12.4	-12.4	-12.2	-11.8	-11.9	-12.1	-12.0	-12.1	-12.3	-12.0
Chemical type	Ca,Mg-HCO ₃	Ca,Mg-HCO ₃	Ca-SO ₄	Na-HCO ₃	Ca-SO ₄	Mg-HCO ₃	Mg-HCO ₃	Mg-HCO ₃	Ca-HCO ₃	Ca-HCO ₃	Ca,Mg-HCO ₃	Ca,Mg-HCO ₃

n.a.: Not analyzed, n.d.: Not detected

表1：続き

Table 1: Continued.

No.	FRN-63	FRN-64	FRN-65	FRN-66	FRN-67	FRN-68	FRN-69
採水日	2022/7/13	2022/7/13	2022/7/13	2022/7/14	2022/7/14	2022/7/14	2022/7/15
WGS84 緯度 (°)	43.34	43.34	43.34	43.34	43.35	43.35	43.48
WGS84 経度 (°)	142.41	142.41	142.40	142.40	142.40	142.40	142.48
標高 (m)	174	173	171	170	170	170	230
pH	8.2	8.9	7.2	8.6	8.5	7.1	7.3
T (°C)	116	12.1	12.3	12.6	12.8	12.6	15.4
EC (μS/cm)	178.2	177.3	239.5	192	196.8	218.3	239.2
T (°C)	11.3	11.9	12.1	12.4	12.5	12.3	15.2
区分	井戸水	井戸水	井戸水	井戸水	井戸水	井戸水	井戸水
井戸深度 (m)	<30	<30	<30	15	15	13	251.5
帯水層	盆地埋積層	盆地埋積層	盆地埋積層	盆地埋積層	盆地埋積層	盆地埋積層	十勝火砕流堆積物
HCO ₃ ⁻ (mg/L)	79.0	79.6	79.0	82.4	86.3	77.5	54.6
Cl ⁻ (mg/L)	5.52	5.93	5.19	6.27	5.18	5.74	8.69
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	7.75	8.36	28.2	11.0	14.2	16.8	38.9
NO ₃ -N (mg/L)	0.04	n.a.	3.84	0.03	0.99	3.95	0.51
Na ⁺ (mg/L)	6.64	7.52	7.73	6.27	6.96	7.28	18.7
NH ₄ ⁺ -N (mg/L)	0.02	0.01	n.a.	0.01	0.00	0.00	0.01
K ⁺ (mg/L)	1.69	2.00	1.59	1.56	1.49	1.51	3.44
Mg ²⁺ (mg/L)	7.79	7.57	11.3	9.05	9.89	10.4	7.18
Ca ²⁺ (mg/L)	13.2	12.9	18.3	15.7	14.5	15.8	11.6
Total Mn (mg/L)	0.22	0.06	0.05	0.15	0.09	0.02	0.05
Total Fe (mg/L)	9.21	2.58	1.45	4.31	3.16	1.73	<0.1
SiO ₂ (mg/L)	7.74	4.22	31.5	6.13	14.1	30.7	52.6
δ ² H (‰)	-83	-83	-83	-83	-83	-83	-85
δ ¹⁸ O (‰)	-12.2	-12.2	-12.2	-12.2	-12.2	-12.3	-12.5
Chemical type	Ca, Mg-HCO ₃	Ca, Mg-HCO ₃	Ca, Mg-HCO ₃	Ca, Mg-HCO ₃	Ca, Mg-HCO ₃	Ca, Mg-HCO ₃	Ca-SO ₄

n.a.: Not analyzed, n.d.: Not detected

表2：地下水試料の化学分析結果

Table 2: Hydrochemical data of groundwater samples.

No.	ヌッカクシ 1-1	ヌッカクシ 1-2	ヌッカクシ 2-1	ヌッカクシ 2-2	ヌッカクシ 3-1	ヌッカクシ 3-2	ヌッカクシ 4-1	ヌッカクシ 4-2	フラノ 1-1	フラノ 1-2	フラノ 2-1	フラノ 2-2
Name	ヌッカクシ 19号橋	ヌッカクシ 19号橋	6線橋上流 デボツナイ川	6線橋上流 デボツナイ川	東4線橋 ホロベツナイ川	東4線橋 ホロベツナイ川	紅葉橋	紅葉橋	富良野川 14号橋	富良野川 14号橋	上富良野橋	上富良野橋
採水日	2021/4/22	2021/10/27	2021/4/22	2021/10/27	2021/4/22	2021/10/27	2021/4/22	2021/10/27	2021/4/22	2021/10/27	2021/4/22	2021/10/27
WGS84 緯度 (°)	43.43	43.43	43.42	43.42	43.44	43.44	43.45	43.45	43.41	43.41	43.46	43.46
WGS84 経度 (°)	142.45	142.45	142.48	142.48	142.48	142.48	142.47	142.47	142.43	142.43	142.46	142.46
標高 (m)	190	190	193	193	214	214	215	215	180	180	202	202
pH	5.2	4.4	7.9	7.4	8.2	7.8	4.8	3.8	7.9	6.4	7.2	6.7
T (°C)	5.7	13.1	10.7	11.8	9.8	10.8	11.6	12.2	6.3	12.9	11.5	12
EC (μS/cm)	190	366	116	163	155	311	329	388	134	210	169	198
T (°C)	5.9	13.8	10.4	13	10	12.4	12.3	12.3	6.5	14.5	12	13
HCO ₃ ⁻ (mg/L)	n.d.	n.d.	36.7	50.3	20.9	78.6	n.d.	n.d.	5.92	15.6	3.78	15.6
Cl ⁻ (mg/L)	17.8	24.7	6.85	13.2	2.99	29.2	21.6	27.7	9.90	15.2	10.3	13.3
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	90.5	145	22.3	31.1	16.0	57.5	102	160	46.7	71.7	46.9	66.3
NO ₃ -N (mg/L)	1.33	1.08	1.57	1.21	0.48	1.53	1.04	0.98	1.53	2.33	1.48	2.29
Na ⁺ (mg/L)	11.0	18.6	10.8	19.3	5.07	14.9	16.7	16.2	6.62	13.0	6.71	12.9
NH ₄ ⁺ -N (mg/L)	0.30	0.89	0.14	0.19	0.11	7.63	0.32	0.64	0.16	0.18	0.16	0.20
K ⁺ (mg/L)	3.45	5.52	3.16	4.33	1.92	37.4	3.95	7.10	3.22	5.30	3.24	4.68
Mg ²⁺ (mg/L)	6.17	7.68	3.13	4.46	1.89	4.26	5.56	10.5	4.05	6.54	4.06	6.01
Ca ²⁺ (mg/L)	26.0	41.5	10.5	11.6	6.62	19.9	29.5	47.4	14.1	22.9	13.8	19.5
Total Mn (mg/L)	0.30	0.57	0.04	0.07	0.03	0.06	0.37	0.66	0.21	0.32	0.20	0.32
Total Fe (mg/L)	1.11	1.99	0.29	1.02	0.38	0.92	1.35	1.92	1.06	1.41	0.84	1.13
SiO ₂ (mg/L)	49.7	49.7	33.4	33.4	31.9	31.9	56.0	56.0	31.0	31.0	30.7	30.7
δ ² H (‰)	-85	-85	-82	-84	-82	-82	-85	-86	-82	-82	-82	-82
δ ¹⁸ O (‰)	-12.7	-12.5	-12.2	-12.4	-12.2	-11.9	-12.8	-12.6	-12.3	-12.2	-12.5	-12.2
Chemical type	Ca-SO ₄	Ca-SO ₄	Other	Other	Other	Other	Ca-SO ₄	Ca-SO ₄	Ca-SO ₄	Ca-SO ₄	Ca-SO ₄	Ca-SO ₄

n.a.: Not analyzed, n.d.: Not detected

表 2：続き

Table 2: Continued.

No.	フラノ 3-1	フラノ 3-2	ベベルイ 1-1	ベベルイ 1-2	ベベルイ 2-1	ベベルイ 2-2	ベベルイ 3-1	ベベルイ 3-2	ヌツカクシ 富良野川	FRN-19	FRN-41
Name	サイクル橋	サイクル橋	東4線橋	東4線橋	旭中橋	旭中橋	9線橋	9線橋	ラベンダー 道路近く	民家	民家
採水日	2021/4/22	2021/10/27	2021/4/22	2021/10/27	2021/4/22	2021/10/27	2021/4/22	2021/10/27	2022/7/14	2020/10/14	2020/10/15
WGS84 緯度 (°)	43.49	43.49	43.35	43.35	43.38	43.38	43.41	43.41	43.46	43.39	43.31
WGS84 経度 (°)	142.49	142.49	142.40	142.40	142.48	142.48	142.49	142.49	142.51	142.48	142.56
標高 (m)	243	243	169	169	196	196	199	199	296	186	379
pH	5.7	6.8	8.2	7.1	9.0	8.0	8.5	8.5	3.6	7.2	6.5
T (°C)	10.2	11.9	7.4	11.7	10.4	9.4	9.2	10	23.7	11.3	13
EC (μS/cm)	204	217	87	123	111	103	73	70	574	120	164
T (°C)	10.9	12.4	7.8	12.9	10.9	9.6	9.5	11.5	23.6	11.9	13.2
HCO ₃ ⁻ (mg/L)	n.d.	5.80	29.7	43.1	36.3	49.7	23.5	31.8	n.d.	49.4	117
Cl ⁻ (mg/L)	15.1	17.8	4.58	4.93	4.98	3.86	2.93	2.85	28.1	6.08	2.90
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	75.7	95.4	15.9	24.7	16.1	11.6	12.6	11.5	144	12.3	5.50
NO ₃ ⁻ -N (mg/L)	1.03	0.76	2.12	1.52	3.79	2.46	0.37	0.19	0.66	3.24	0.51
Na ⁺ (mg/L)	9.8	16.0	5.35	7.24	6.22	6.47	3.17	5.08	15.4	8.07	4.35
NH ₄ ⁺ -N(mg/L)	0.17	0.21	0.10	0.10	0.11	0.11	0.03	n.d.	0.04	n.d.	n.d.
K ⁺ (mg/L)	3.23	4.14	2.72	2.78	2.19	2.30	1.38	1.56	4.48	2.45	1.73
Mg ²⁺ (mg/L)	5.99	7.29	3.40	5.08	3.67	3.52	1.82	2.16	9.64	4.03	4.43
Ca ²⁺ (mg/L)	19.9	22.1	9.44	12.1	14.2	13.1	7.65	7.55	42.2	13.2	29.2
Total Mn (mg/L)	0.30	0.31	0.05	0.10	n.a.	0.01	0.02	n.d.	0.66	0.01	0.05
Total Fe (mg/L)	0.85	0.55	0.42	1.38	0.05	0.28	0.26	n.d.	0.21	0.10	0.33
SiO ₂ (mg/L)	33.6	33.6	30.1	30.1	33.6	33.6	32.6	32.6	69.7	37.2	22.0
δ ² H (‰)	-84	-85	-83	-85	-83	-85	-85	-88	-80	-80	-91
δ ¹⁸ O (‰)	-12.6	-12.7	-12.4	-12.6	-12.3	-12.7	-12.8	-13.2	-11.4	-11.2	-12.6
Chemical type	Ca-SO ₄	Ca-SO ₄	Ca-HCO ₃	Ca-HCO ₃	Ca-HCO ₃	Ca-HCO ₃	Ca-HCO ₃	Ca-HCO ₃	Ca-SO ₄	Ca,Mg-HCO ₃	Ca-HCO ₃

n.a.: Not analyzed, n.d.: Not detected

謝辞

本報告は、北海道立総合研究機構の重点研究課題「水資源開発・管理のための支援システム「水資源 Navi (地域別)」の開発」(令和 2 年度～令和 5 年度の 4 ケ年)の一環で実施した。現地調査では上富良野町、中富良野町、富良野市に便宜を図っていただき、現地の井戸所有者の方々には快く採水に協力していただいた。ここに、感謝の意を示す。

引用文献

- 厚生労働省, 2013, 新水道ビジョン.
- 牛島健, 2019, 地域自立管理型の次世代水インフラマネジメント, ランドスケープ研究, 83, 1, 48-49.
- 牛島健・石井旭・福井淳一・松村博文, 2018, 実態調査に基づいた人口減少地域における地域自立型水インフラマネジメントの可能性, 土木工学会論文集, 74, 143-152.
- 清野馨・余湖典昭・堂柿栄輔, 2006, 地下水を水源とする分散した給水方式の問題点と改善方策, 北海学園大学工学部研究報告, 33, 13-36.
- 牛島健・増田貴則, 2022, 自律的に管理する小規模水供給システムと実践的取り組み, 保健医療科学, 71, 3, 254-263.
- 柳田 誠・平川一臣・大内 定・貝塚爽平, 1985, 富良野盆

地周辺の活断層と金山付近の活褶曲, 地理学評論 Ser. A, 58, 255-265.

- 田近 淳・小板橋重一・大津 直・廣瀬 亘・川井武志, 2007, 北海道中央部の活断層と大規模地すべり地形, 日本地質学会第 114 年学術大会見学旅行案内書, 札幌, 51-63.
- 山口久之助・小原常弘・早川福利・松下勝秀・二間瀬瀨・横山英二・佐藤巖, 1967, 北海道水理地質図幅, 4, 「旭川」及び同説明書, 北海道立地下資源調査所, 43p.
- 国土交通省, 国土数値情報「土地利用細分メッシュ (ラスタ版) データ, 2016 年度」, URL: https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/gml/datalist/KsjTmplt-L03-b_r.html (2024.1.26 取得).
- 佐藤博之・猪木幸男・須田芳朗・松田武雄, 1977, 20 万分の 1 地質図幅「旭川」, 産総研地質調査総合センター.
- 中川充・渡辺寧・紀藤典夫・酒井彰・駒澤正夫・広島俊男, 1996, 20 万分の 1 地質図幅「夕張岳」, 産総研地質調査総合センター.
- 橋本亘, 1953, 5 万分の 1 地質図幅「山部」および説明書, 北海道開発庁, 82p.
- 池田保夫・向山栄, 1983, 北海道, 富良野-旭川地域の火砕流堆積物の層序と対比, 地質学雑誌, 89, 163-172.
- 北海道, 2004, 富良野断層帯に関する調査, 2004 年活断層調査結果および堆積平野地下構造調査成果報告会予稿集, 文部科学省, 35-44.

- 15) 西来邦章・石毛康介・島田駿二郎・中川光弘, 2017, 火山, 2, 83-94.
- 16) 森野祐助・小澤聡, 2016, Terramod-BS を用いた水理地質境界面の推定, 情報地質, 27, 70-71.
- 17) 池田国昭・村瀬正・山屋政美, 1980, 富良野盆地軟弱地盤地帯における表層変動(垂直変動)について, 地質ニュース, 305, 7-19.
- 18) 森野祐助, 2022, 富良野地域の水理地質構造, 第76回地団研総会(長野)講演要旨.
- 19) 北海道立地質研究所, 2009, 上川支庁管内の地質と地下資源 I 上川地方南部, 農業農村整備事業関連地質地下資源調査報告書.
- 20) Piper, A. M., 1944, A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analysis, American Geophysical Union Transactions, 25, 914.
- 21) 広田知保・横山英二・和気徹・佐久間勉, 1978, 上富良野町における温泉調査, 地下資源調査所報告, 50, 57-70.
- 22) 一柳錦平・田上雅浩, 2016, 日本全域における降水の安定同位体比-2013年の集中観測結果より-, 日本水文科学会誌, 46, 2, 123-138.
- 23) 町田功・近藤昭彦, 2003, わが国の天然水における酸素・水素安定同位体比-環境データベースを用いた解析-, 水文・水資源学会誌, 16, 5, 556-569.
- 24) Vespasiano, G., Muto, F., Apollaro, C., 2021, Geochemical, Geological and Groundwater Quality Characterization of a Complex Geological Framework: The Case Study of the Coreca Area (Calabria, South Italy). Geosciences, 11, 121. doi: <https://doi.org/10.3390/geosciences11030121>.
- 25) 黒田啓介・福士哲雄・小熊久美子・滝沢智, 2008, 東京都区部における地下水中の溶存鉄濃度および酸化還元電位の分布特性, 日本水文科学会誌, 38, 2, 63-70.
- 26) Appelo, C.A.J., Postma, D., 2005, GEOCHEMISTRY, GROUNDWATER AND POLLUTION, 2ND EDITION, A. A. Balkema Publishers.
- 27) 北海道立中央農業試験場, 2001, 石狩川水系泥炭層厚分布図及び暗零時版分布図, 北海道立中央農業試験場.
- 28) 厚生労働省, 2020, 水道水質基準 (URL: <https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/topics/bukyoku/kenkou/suido/kijun/kijunchi.html>) (2022.12.14 閲覧)
- 29) 藪崎志穂, 2010, 日本の地下水・湧水等の硝酸態窒素濃度と特徴, 地球環境, 15, 2, 121-131.
- 30) 田瀬則雄, 2014, 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.
- 31) 安原正也・丸井敦尚・田中正・高山茂美, 1990, 河川水の涵養に果たす賦存深度の異なる地下水の役割-SiO₂濃度に基づく事例研究-, ハイドロロジー, 20, 2, 83-95.
- 32) 林武司・丸井敦尚・安原正也, 1999, 利尻島における陸水および海底湧出地下水の水質特性, 日本水文科学会誌, 29, 3, 123-138.
- 33) 早稲田周・中井信之, 1983, 中部日本・東北日本における天然水の同位体組成, 地球化学, 17, 83-91.
- 34) 風早康平・安原正也, 1999, 岩手火山の地下水流動系-同位体水文学的手法による予察結果-, 月間地球, 21, 5.
- 35) 浅井和由・辻村真貴・佐竹洋, 乗鞍岳東斜面における地下水流動系と降雨流出過程, 2001, 日本水文科学会誌, 31, 4, 135-149.

要 旨

本報告では、地域自律管理型水道として利用可能な水資源情報整備の一環として、モデル地域である富良野地域の地下水と表流水の化学分析を実施した。その結果、地下水と表流水の主要溶存化学組成は、採水地点周辺の表層地質や活火山の存在によって異なり、Fe と Mn 濃度は泥炭の存在に影響されることが判明した。さらに、地下水の NO₃-N 濃度は農地利用されている地域で高く、NH₄-N 濃度は稲作利用されている地域で高い傾向がみられた。地下水と表流水の水素と酸素の安定同位体比 ($\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$) は涵養域や涵養プロセスの違いを反映している可能性が考えられた。以上のことから、富良野地域の地下水と表流水の地球化学的特徴や空間分布特性は採水地点周辺の地質環境や土地利用などに関係していることが明らかになった。