

論文審査報告書

氏名	まつうら たくや 松浦 拓哉
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博環第4号
学位授与日	令和3年3月20日
論文題目	水質と安定同位体の長期観測データを用いた地下水涵養線の不 確実性に関する研究
論文審査委員	(主査) 富山県立大学 准教授 手計 太一 教授 川上 智規 教授 渡辺 幸一 教授 脇坂 暢 准教授 黒田 啓介 長崎大学 教授 中川 啓

内容の要旨

本論文はpH、電気伝導率、溶存イオン、水温、放射性同位体、水素・酸素安定同位体の長期観測データを用いて、不確実性を考慮した地下水涵養線の精度を向上させること、及び、気候変動が水収支、地下水位に与える影響を評価することである。

地下水は世界各国で生活用水、農業用水、工業用水、再生可能エネルギーとして多数の用途で利用されている。しかし、地下水の過剰揚水は地下水の塩水化、地盤沈下、井戸枯れといった地下水障害を引き起こしている。また、近年、気候変動や土地利用変化は地下水環境に大きな影響を与えると指摘されている。以上を鑑み、本論文では地下水資源の保全を考える上で地下水の流動、涵養源の推定を行う必要がある。また、長期的な地下水利用を考える上で、現況の地下水環境の再現、気候変動による地下水環境への影響評価をした。

地下水環境の推定する研究は数多く行われている。手軽に観測が可能なpH、電気伝導率、水温を用いた地下水流動、地下水涵養源の推定する研究は世界中で数多く行われている。しかし、前処理が必要な分析や分析費用が高価な放射性同位体、水素・酸素安定同位体を用いた地下水涵養源の推定する研究は特定の時期や短期的な観測結果の平均値を用いて地下水涵養源を推定しており、十分に検討されているとは言い難い。従って、本論文では水素・酸素安定同位体を用いた地下水涵養線の推定法の不確実性に着目して検討をした。既往研究で提案されている地下水涵養線の算出法は上述した時間変化を考慮しな

い手法に加えて、数地点の観測地点から算出されており、空間変化も考慮していない。しかし、本論文では流域全域に位置する 75 地点の観測地点のデータにおいて、2011～2020 年の 9 年間の水質の観測結果と 2014～2018 年の 4 年間の水素・酸素安定同位体の観測結果を使用し、高密度、高頻度の大規模水質データセットを用いて、時空間変化を考慮した新しい地下水涵養線のアルゴリズムを開発した。また、上記の観測結果を基に、定常 3 次元地下水モデルを用いて、扇状地全域の地下水流動を推定し、気候変動が地下水位に与える影響を検討した。

このような課題認識に基づき、本論文では 6 つの章に分けて検討を行った。まず、第 1 章では本論文の背景と目的、研究方法について示した。本論文では地下水涵養源を推定するために、pH、電気伝導率、溶存イオン、水温、放射性同位体、水素・酸素安定同位体をトレーサーとして用いて、大規模データセットを作成し、時空間変化を考慮した地下水涵養源推定法を提案した。また、気候変動が地下水位に与える影響を評価するために、河川流量、地下水位、トリチウムの分析結果から得られた沿岸部地下水の滞留時間の結果を基に、分布型水収支モデル、地下水モデルを結合したモデルを開発し、数値実験を行った。本論文では第 4 章と第 5 章に具体的な課題に対する研究結果を示した。

第 2 章では研究対象領域の水文・地質データと土地利用データについて示し、第 3 章では観測概要、現地観測での観測方法、実験室での分析方法について示した。

第 4 章では第 3 章で示した観測地点における 9 年間の観測結果、及び、長期観測データを用いた地下水涵養源の推定結果を示した。本論文ではトレーサー毎に第 4 章 1 節～5 節で観測結果と地下水涵養源の推定結果を示した。

第 4 章 1 節では pH、電気伝導率の観測結果を示した。黒部川流域全域の河川水の pH、電気伝導率は時空間変化の幅が小さく、トレーサーとして利用できないことが明らかになった。一方、扇状地地下水の pH、電気伝導率は時間変化の幅は小さく、空間変化の幅は大きい観測結果が得られた。従って、pH、電気伝導率を観測することで、扇状地の地下水流動は推定することができることが明らかになった。

第 4 章 2 節では地下水と河川水の溶存イオン 10 項目の観測結果、観測結果を用いた主成分分析によって、地下水涵養源を推定した結果を示した。地下水の電気伝導率は時間的変化が少ないため、主成分分析を行う際、地下水、河川水の溶存イオンの平均値を用いて解析をした。その結果、固有値が 1 以上の主成分は第 1 主成分と第 2 主成分であった。その 2 つの主成分の累計寄与率は 77.85 %であった。従って、黒部川流域の地下水と河川水の水質特徴は第 1 主成分と第 2 主成分でその特性を集約させることが明らかになった。各主成分の固有ベクトルを詳しくみると、第 1 主成分は花崗岩の岩石風化による鉱物溶解を示し、第 2 主成分は地下水の陽イオン交換反応を示している主成分であることが明らかになった。第 1 主成分得点と第 2 主成分得点の関係から地下水涵養源は標高 86 m であると推定された。

第 4 章 3 節では 9 年間にわたる長期かつ高頻度の河川水温、地下水温の観測結果、観測結果を用いた地下水涵養源の推定方法と推定結果を示した。河川水温、地下水温は気温と同様に夏季 (6～8 月) に上昇し、冬期 (12～2 月) に低下する季節変化が観測された。扇状地の地下水温は年平均気温より低く、扇央部の河川水、扇頂部の河川水温より低い結果であった。その結果、地下水の涵養源は扇頂部より上流域の河川水であると推察された。河川水温は標高が上がるにつれ、低下する空間変化が観測された。標高と河川水温の関係から地下水涵養源は標高 142～450 m であると推定された。

第 4 章 4 節では放射性同位体の分析結果、分析結果を用いた地下水涵養源の推定結果を示した。本論文では地下水のトリチウムと放射性炭素の分析をした。深度 87 m 以浅の地下水のトリチウムを分析した結果、地下水の滞留時間は 32～35 年であり、循環が早い地下水であることを明らかになった。一方、

深度 222 m、800 m の深井戸は滞留時間がそれぞれ 1680±30 年、2800±30 年と滞留時間が長い地下水であることを明らかになった。本論文では 87 m 以浅の地下水の滞留時間から算出した透水係数と現場透水試験・簡易揚水試験で得られている透水係数の類似性を用いて 87 m 以浅の地下水涵養源を推定した。その結果、地下水涵養源は標高 125～202 m であると推定された。

以上の溶存イオン、水温、放射性同位体を用いた地下水涵養源の推定結果は概ね一致しており、標高 86～450 m であると明らかになった。

第 4 章 5 節では水素・酸素安定同位体の観測結果、観測結果を用いた地下水涵養源を推定した結果を示した。地下水の水素・酸素安定同位体は年間を通して変動が少ない結果が得られた。また、降水の水素・酸素安定同位体の平均値と概ね一致する地点と扇頂部の河川水の水素・酸素安定同位体の平均値と概ね一致する地点が観測された。その結果、黒部川扇状地地下水の涵養源は扇状地の降水が主な涵養源である地点と河川水が主な涵養源である地点があることが明らかになった。河川水の水素・酸素安定同位体は 3～5 月にかけて、小さくなる季節変化が観測された。また、標高が上がるにつれ、小さくなる空間変化が観測された。地下水涵養源は標高と河川水の酸素安定同位体の関係から推定した。既往研究で提案されている集水域の河川水の酸素安定同位体の平均値と標高の関係から地下水涵養源を推定した結果、地下水涵養源は標高 0～824 m であると推定された。標高 0～824 m は黒部川流域の 1/3 に相当した。この結果は、上述した 3 つのトレーサーを用いて推定した結果と大きく異なる結果であるとともに、過大に推定されることが示された。過大評価の要因は水素・酸素安定同位体の季節変化、ダム貯水池内の湖水の蒸発、扇状地内の降水浸透の影響であることが明らかになった。その要因を考慮した地下水涵養線を用いて、地下水涵養源を推定した結果、地下水涵養源は 132～438 m であると推定された。この結果は、上述した 3 つのトレーサーを用いた結果と同様であり、地下水涵養線の精度を向上させることができた。

第 5 章では数値実験を用いて気候変動による黒部川流域の水収支と扇状地の地下水位に与える影響を評価した。本論文では分布型水収支モデルと地下水解析モデル *Dtransu* を結合したモデルを開発し、数値実験を行った。モデルの妥当性評価は上流域に水工施設が存在しない河川流量を観測している黒薙地点、扇状地に位置する 18 地点の地下水位観測所、トリチウムの分析結果から算出した地下水の滞留時間で行った。その結果、河川流量、地下水の滞留時間は概ね再現することができた。一方、地下水位の再現性については、一部の観測所を除いて概ね再現することができた。特に、扇状地全域の地下水位の等高線図の再現性は高かった。このモデルを用いて現在気候(1981～2000 年)と RCP8.5 シナリオの 21 世紀末(2081～2100 年)を用いて気候変動が黒部川流域の水収支と扇状地の地下水位に及ぼす影響を評価した。黒部川流域の水収支は気温の上昇に伴い、21 世紀末で現在気候と比較して積雪水量が 23 % (260 mm)減少し、融雪時期が 1 ヶ月早期化することが明らかになった。その結果、黒部川流域の水収支は表面流出量、地下浸透量のピークが 1 ヶ月早まり、11～2 月にかけて表面流出量、地下浸透量が増加する結果が得られた。扇状地の地下水位は 1～3 月に上昇し、5～7 月に低下する結果が得られた。気候変動により、耕作期である 5～6 月では表面流出量の減少、地下水位の低下が生じることが明らかになり、現在の水システムのままでは耕作期の水供給を十分に行う事が出来ない可能性が示唆された。

第 6 章では、すべての章での結果をまとめ、結論を述べている。

審査の結果の要旨

本論文は pH、電気伝導率、溶存イオン、水温、放射性同位体、水素・酸素安定同位体の長期観測データを用いて地下水涵養線の精度を向上及び気候変動が扇状地地下水に与える影響を明らかにすることを目的とする。本論文は全 6 章で構成されており、各章の概要は以下の通りである。

第 1 章では水質・安定同位体を用いた地下水環境の推定方法と気候変動が地下水環境に与える影響評価の現状と課題について述べるとともに、本論文の背景や水質・安定同位体の大規模データセットを作成する意義及び研究目的を述べている。

第 2 章では研究対象領域の水文・地質データ、土地利用の推移について述べている。本論文では富山県東部に位置する黒部川流域を研究対象領域とした。黒部川により形成された扇状地では近年、浸透域である水田の面積が減少し、不浸透域である建物用地・道路・鉄道の面積が増加しており、市街地化が進行している地域であることが示されている。黒部川の河川流量、流域の降水量、積雪深、扇状地地下水の地下水位が示されており、冬期に山間部で積雪した雪が 3 月末～5 月の時期に溶け、河川に流出することにより河川流量、地下水位が増加する季節変化が示されている。それに加えて、黒部川流域の表層地質、扇状地の地形分類図、透水係数の空間分布が示されている。黒部川流域の山間部は火成岩である花崗岩、花崗閃緑岩から形成されており、黒部川扇状地では扇状地堆積物である砂礫層に覆われており、透水性が高いことが示されている。

第 3 章では各観測地域における観測期間、観測頻度について述べている。また、現地観測での観測方法、実験室での分析手法について述べている。

第 4 章では観測結果と地下水涵養源の推定結果について述べている。黒部川流域全域での高密度、高頻度の水質観測・分析を実施した結果、河川水の pH、電気伝導率は流域全域での時空間変化の幅が小さくトレーサーとして利用できないことを明らかにした。一方、水温、溶存イオン、放射性同位体、水素・酸素安定同位体はトレーサーとして利用できることを示し、この 4 つの手法を用いて地下水涵養源を明らかにした。

第 4 章 2 節では地下水と河川水の溶存イオン 10 項目を用いた主成分分析によって、地下水涵養源を推定した結果を示している。その結果、黒部川流域の地下水と河川水の水質特徴は第一主成分と第二主成分に集約され、第一主成分は花崗岩の岩石風化による鉱物溶解を表し、第二主成分は地下水の陽イオン交換反応を表している主成分であることを明らかにした。第一主成分得点と第二主成分得点の関係から地下水涵養源は標高 86 m であると推定している。第 4 章 3 節では 9 年間にわたる長期かつ高頻度の河川水温、地下水温を用いた地下水涵養源の推定方法、その結果を示している。沿岸部の地下水温を観測した結果、扇中部や扇頂部の河川水や扇状地の年平均気温よりも低く、扇頂部より上流域の河川水が涵養源であると明らかにしている。以上のことから、河川水の水温と標高の関係から地下水涵養源は標高 142～450 m であると推定している。第 4 章 4 節では放射性同位体を用いた地下水涵養源の推定結果を示している。地下水のトリチウムを分析した結果、地下水の滞留時間は 32～35 年であり、循環が早い地下水であることを明らかにしている。この滞留時間から算出した透水係数と現場透水試験・簡易揚水試験で得られた透水係数の類似性を利用して涵養源の推定を行った。その結果、地下水涵養源は標高 125～202 m であると推定している。

以上の溶存イオン、水温、放射性同位体を用いた地下水涵養源の推定結果は概ね一致しており、標高 86～450 m であると明らかにしている。

第4章5節では水素・酸素安定同位体を用いて地下水涵養源を推定した結果を示している。まず既往研究で提案されている地下水涵養線を用いて扇状地地下水の涵養源を推定した結果、流域の約1/3(標高0~824m)が涵養源であると推定された。この結果は、上述した3つのトレーサーを用いて推定した結果と大きく異なる結果であるとともに、過大に推定されることが明らかになった。その要因は水素・酸素安定同位体の季節変化、ダム貯水池内の湖水の蒸発、扇状地内の降水浸透の影響によるものであることを明らかにし、これらの過大評価要因を考慮することで、地下水涵養線の信頼幅を狭めることができ、地下水涵養源は標高132~438mであると推定することができた。この結果は、上述した3つのトレーサーを用いた結果と同様であり、精度を向上することができた。

第5章では数値実験を用いて気候変動による黒部川扇状地の地下水環境に与える影響評価について述べている。本論文では分布型水収支モデルと地下水解析モデルを結合したカップリングモデルを開発し、数値実験を行っている。気温の上昇に伴い21世紀末では現在気候と比較して積雪水量が23%(260mm)減少し、消雪時期が1ヶ月早期化することを明らかにしている。その結果、表面流出量、地下浸透量のピークは1ヶ月早期化し、扇状地地下水位は1~3月に上昇し、5~7月に低下することを明らかにしている。気候変動により、耕作期である5~6月では表面流出量の減少、地下水位の低下が生じることを明らかにし、現在の水システムのままでは耕作期の水供給を十分に行う事が出来ない可能性を示唆している。

第6章では前章までの内容を総括し結論を述べている。

以上の研究成果は水素・酸素安定同位体を用いた地下水涵養源の推定に対して、過大評価要因を考慮することで、他の3つの手法を用いた地下水涵養源と概ね一致しており、地下水涵養線の精度を向上させるものであった。また、気候変動の影響により現在の水システムのままでは耕作期の水供給を十分に行う事が出来ない可能性があることを示唆しており、工学的観点から重要な知見が得られたと評価できる。上記の知見は筆頭著者の論文5報が掲載され、その内1報が国際誌である。加えて関連論文が4報ある。これらのことから審査委員会は令和2年12月17日に博士論文の審査及び最終試験を実施し、令和3年2月5日に博士論文公聴会を開催した。申請者は当該分野および周辺分野に関して博士としての十分な全般的知識を持ち、学術研究にふさわしい討論ができ、独立して研究を遂行する能力を有するものと判定し、博士(工学)の学位論文として合格であると認められた。