

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 31 日現在

機関番号：23201

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22760376

研究課題名(和文) 黒部川流域における地下水位漸減現象の解明に関する研究

研究課題名(英文) STUDY ON GRADUAL DECREASE IN GROUNDWATER LEVELS OVER THE KUROBE ALLUVIAL FAN

研究代表者

手計 太一 (TEBAKARI, TAICHI)

富山県立大学・工学部・講師

研究者番号：70391620

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円、(間接経費) 900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究によって、黒部川扇状地における観測井の地下水位が統計的に極めて有意に漸減していることを明らかにした。また、降水量や積雪深の有意な増減傾向は認められなかったにもかかわらず、地下水位は季節によらず極めて有意に減少していることが明らかになった。黒部川愛本地点における河川水位と地下水位の関係において、相関性が高い観測井と相関性が低い観測井を明らかにした。既往研究においても、黒部川が地下水涵養に大きな影響を及ぼしていることを指摘しており、最近の状況も同様の傾向であると考えられる。水田面積や畑地面積は減少、宅地面積は増加している。水田面積の変化が地下水位の漸減現象の要因の一つである可能性がある。

研究成果の概要(英文)：To understand the characteristics and seasonal changes in flowing artesian wells in the Kurobe River alluvial fan (KRAF), the discharge, water quality, and isotope ratio of 23 flowing wells were observed for 18 months from March 2011. This paper newly reports the monthly discharge and water quality of these flowing wells. Variation in water flow at 10-minute intervals is also presented. All wells exhibited the same seasonal changes, and no spatial difference in water quality was found. Analysis of isotope ratios indicated that three wells located on the left bank of the KRAF were recharged from different sources than the other wells that were recharged by the Kurobe River. Comparison with previous water quality measurements taken 10 to 20 years ago showed that the water quality had not changed. However, further research is needed to clarify long-term trends of the flowing water discharges.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・水工学

キーワード：地下水 黒部川扇状地 数値実験 自噴井

1. 研究開始当初の背景

帯水層に貯えられている地下水は、世界人口のおよそ 1/4 の人々にとって唯一の飲料水源である。帯水層が涵養されているところであっても、水が帯水層に到達するには何百年や何千年もかかる場合もある。地球上で利用可能な地下水は 1050 万 km³(淡水資源の約 30%)に過ぎないにもかかわらず、技術革新や電力の安定供給に伴い効率的なポンプが利用され、世界各地で地下水の過剰揚水による地盤沈下や塩害等の大きな問題が発生している。

現在、我が国では都市用水と農業用水の全使用量のうち約 13%(104 億 m³)を地下水に依存している。近年、地下水使用量に占める生活用水量は横ばい、工業用水量と都市用水量は減少傾向にある。しかしながら、一般に良質で水温の変化が少なく、大規模な取水施設を要しない地下水は、今後の水資源政策にとって極めて重要な要素である。

富山県は三方を急峻な山岳地域に囲まれ、また年平均降水量が約 2500 mm と非常に多いため、多くの急流河川を持ち、活発な侵食作用による広大な扇状地を形成している。このような自然環境の特徴を活かし、富山県では古くから盛んに地下水が利用されてきた。しかし、昭和 56 年の豪雪以降、消雪用水施設が急激に普及し、冬期における顕著な地下水位低下がみられるようになった(図-1 参照)。最近では、黒部川扇状地に位置する黒部市生地地区における自噴井の減少が懸念されており、黒部川流域の地下水環境の悪化が危惧されている。

黒部川扇状地を対象とした地下水研究は古くから多くの成果が報告されている。例えば、黒部川の河川水が地下水を涵養していることを明らかにし、黒部川の流下に伴う失水量は一日約 121 万 m³と推定されている。他にも様々なアプローチによって黒部川扇状地の地下水に関する研究がされている。その多くは黒部川扇状地における地下水の流動や水質を明らかにするものである。最近では地下水流動解明に同位体を用いた研究がされている。さらに、黒部川扇状地において 1977 年から 1990 年までの地下水位の季節変化や経年変化を捉えた研究がされている。しかしながら、特に近年の地下水の経年変化傾向や季節変化、さらにその要因を明らかにした既往研究はない。

以上を鑑み、研究代表者が黒部川流域に位置する 19 の観測井のデータを分析した結果、18 の観測井の地下水位が減少傾向であり、そのうち 14 地点において有意水準 5%以上で有意な減少傾向であることが明らかにした。その要因の一つとして、前述した既往研究でも指摘されているように、河川流量の減少が挙げられる。さらに、地下水採取量の変化、扇状地における土地利用変化や平野部での降雪量・降雨量の変化が挙げられる。しかしながら、いずれの要因によって、地下水位が

漸減しているのかは全くわかっていないのが実情である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、黒部川流域における地下水位漸減現象の原因を解明することである。研究代表者の最近の研究によって、黒部川扇状地を中心とする観測井の地下水位が最近 20 年間で統計的に極めて有意に減少していることを明らかにしている。本研究では、この漸減現象が気候・気象変化に因るものなのか、それともダム建設や土地利用変化(特に水田面積の減少)、地下水取水量や農業用水取水量の変化等の社会・経済活動に因るものなのかを既存データを利用した統計分析、河川・地下水位の時空間連続観測、数値モデルの 3 つのアプローチから明らかにした。

3. 研究の方法

(1) 地下水位データの統計解析

富山県では最も古くは昭和 34 年から地下水位の観測を実施している。現在では、33 観測所(34 水位)について観測を継続している。先述したように、条例で定められた高岡地域は 11 観測所、富山地域は 7 観測所、条例外の地域である氷見地域は 2 箇所、魚津・滑川地域は 4 箇所、黒部地域は 9 箇所の観測井がある。なお、観測井は主に河川中流域から平野部にかけて設置されている。

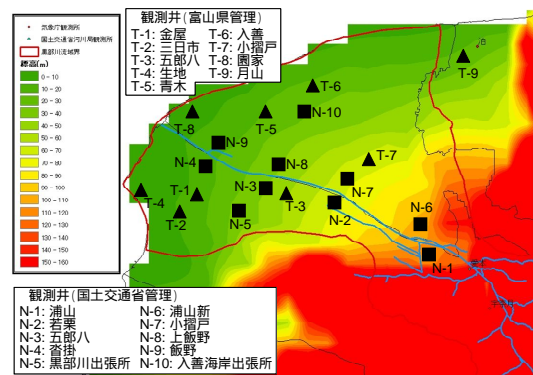


図-1 黒部川扇状地に位置する観測井

図-1 は黒部川扇状地に位置する観測井を示す。国土交通省が管理する観測井は 10 箇所、富山県が管理する観測井は 9 箇所である。本研究では合計 19 箇所の観測井の地下水位データを利用した。国土交通省が管理する観測井データについては、黒部河川事務所がインターネットで公開している日平均値の速報値を使用した。富山県が管理する観測井データについても同様に日平均値を使用した。さらに、日降水量は、仙人谷、猫又、黒薙、泊、宇奈月の 5 箇所、河川流量と河川水位については宇奈月観測所と愛本観測所のデータを使用した。なお、流域内の平野部に降水量観測所がないため、AMeDAS の泊観測所のデータを利用した。

(2) 自噴井戸を対象とした定期調査

黒部川左岸(6)と右岸(9)の湧水地点及び黒部川1地点の計16地点において、毎月1回採取を行った。採取期間は、2011年6月から継続的に実施している。

湧水量は、自噴している左岸2地点と右岸9地点において、規定容量の容器が満水になる時間を測定することで求めた(3回平均値)。また、これら地点とは別に左岸に1地点(A地点)センサーを設置し、10分ごとに湧水量データを取得した。

水質測定項目は、水温、pH、電気伝導率(EC)、重炭酸イオン、溶性ケイ酸、溶存イオン成分(Na^+ 、 NH_4^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-})、酸素水素同位体比である。重炭酸イオンは、pH4.8のアルカリ度滴定法により得られた炭酸イオン濃度から算出を行った。溶性ケイ酸は、モリブデン黄吸光度法を用いた。溶存イオン成分はイオンクロマト(IC)分析法により濃度を求めた。

(3) 数値実験

本研究では、アメリカ合衆国地質調査研究所(USGS)が開発し、ソースコードが公開されているMODFLOW-2000を利用して非定常3次元地下水モデルを構築した。支配方程式は、連続の式(質量保存則)とダルシー則から導かれる。

モデル領域は、境界条件の影響を受けないように実際の扇状地よりやや広い14 km × 14 kmと設定した。

図-2は降水量と湛水深の時系列である。涵養量は、魚津と泊(AMeDAS)の日平均降水量に水田の湛水深を加えた値を用いた。水田の湛水深は、富山県農林水産部と黒部農業協同組合が農業事業者に推奨している値を使用した。

流動境界条件は、富山湾(観測潮位)と黒部川(愛本観測所の日平均水位)を設定した。また黒部川流域の上流域からの地下水の供給を想定して、既往文献を参考に扇頂部の地下水位を設定した。

層の条件は、CASE.1とCASE.2では不圧の条件である。CASE.2では1層目が不圧の条件で、2層目が透水係数と飽和層厚の関係で不圧もしくは被圧の条件が決まる。

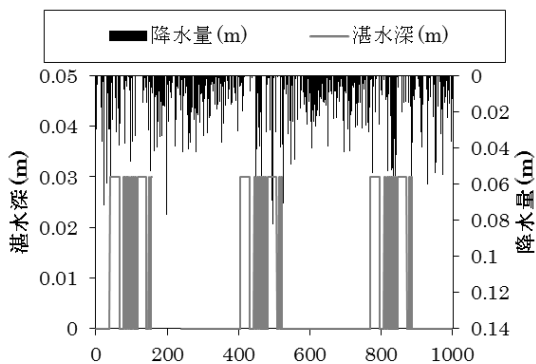


図-2 降水量と湛水深

本研究では、地下水理パラメータの最適化アルゴリズムとしてPEST(Parameter ESTimation code)を利用した。本アルゴリズムは、非線形最小二乗法を解く手法であるGauss-Marquardt-Levenberg法を用いている。これは、Gauss-Newton法の効率性と最急降下法の安全性を組み合わせた手法である。

ここでは、透水係数(K_x 、 K_y 、 K_z)、比貯留率(S_s)、比産出率(S_y)の地下水理パラメータを推定した。

黒部川扇状地は主に砂礫層で構成されている。既往文献より、この層は少なくとも表層から150 mまで堆積している。本モデルでは基盤までの深さを表層から200 mとした。

金屋、三日市、黒部川出張所は黒部市市街地の中心部に位置しており、冬季における地下水を利用した消雪用水の影響で短時間に大きな水位低下が生じている。また、園家と生地は被圧地下水である。また、月山は黒部川流域外である。計算地点はこれら6地点を除いた13地点とした。

本研究ではPESTによる地下水理パラメータの推定の感度分析を行った。また、メッシュサイズの変化による地下水理パラメータの影響を評価した。

4. 研究成果

(1) 黒部川流域における地下水位の変化とその要因分析

図-3は黒部川流域において富山県によって地下水位データのデジタル化が整備されている1986年から2008年までの月平均地下水位の経年変化を示している。全体的に極端に経年的な増減傾向は見られないものの、横ばいもしくは漸減しているように読み取れる。

そこでケンドールの順位相関を用いて月平均地下水位のトレンド検定を行った。その結果、T-3、T-4、T-5、T-6、T-7、T-8、T-9の7観測水位については、有意水準1%以下で有意に減少傾向である。一方、T-2の地下水位の経年傾向は有意水準1%以下で有意に増加していることがわかった。なお、T-1については、有意性のある増減傾向は得られなかった。

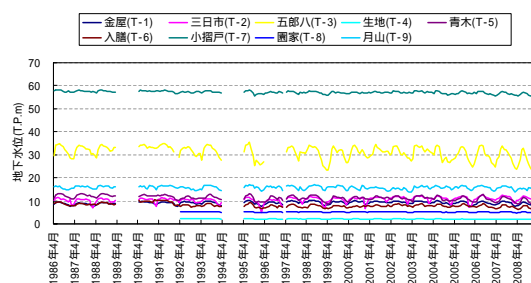


図-3 富山県が管理する観測井における月平均地下水位の経年変化

図-4a,b,c はそれぞれ T-3, T-4, T-2 における 2004 年度から 2008 年年度までの各年の日平均地下水位の時系列を示している。T-3 の季節変化は、4 月から 6 月にかけて地下水位は上昇し、7 月から 8 月にピークを迎え、その後 12 月から 1 月にかけて低下し、2 月から 3 月にかけて再び小さいピークを迎える。このような季節変化については、1970 年代の地下水変化傾向と非常に良く酷似している。しかしこの中 16) では、6 月から 8 月にかけて台形状を呈したハイドログラフであったと報告されているが、本結果では台形状ではなく、7 月から 8 月にかけて凸のピークが鋭くなっている。また、地下水位の変化は合口用水の引用水量の変化と良く対応していると報告されており、T-3 の観測井は黒部川の近傍に位置しているため、河川流量の影響を強く受けているものと考えられる。

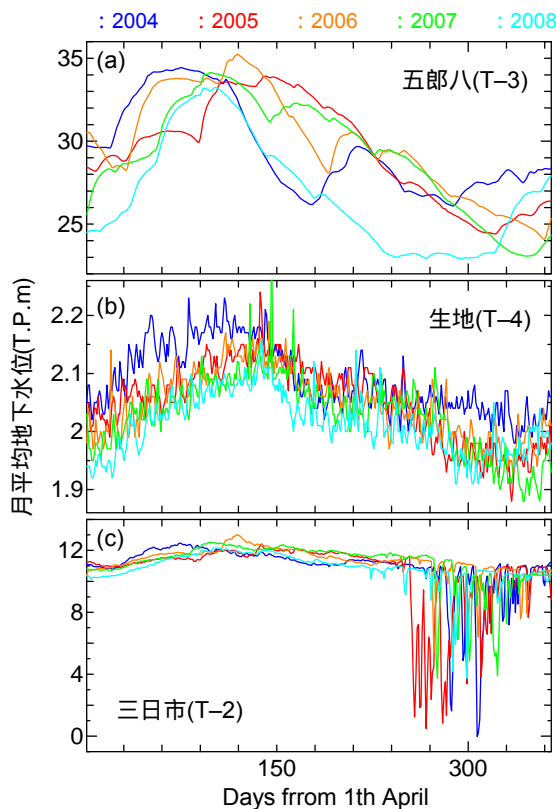


図-4 (a)五郎八(T-3), (b)生地(T-4), (c)三日市(T-2)における 2004 年度から 2008 年年度までの各年の日平均地下水位の時系列

次に、T-4 の地下水位の季節変化は、T-3 の季節変化と似ており、3 月下旬から地下水位は上昇し始め 7 月下旬から 8 月上旬にピークを迎える。特徴的なのは、平均 1~2cm 程度の微小な日変化がある。生地地域は自噴井が多く在り、生活用水として多用されている。最近では余剰水の有効利用や節水対策が推進されているため、微小な日変化が観測されているものと推察される。

最後に、T-2 の地下水位の季節変化を図-4c に示す。全体的な傾向は、前述した 2 つの観

測井と同様であるが、12 月から 3 月にかけての著しい地下水位の低下が特徴的である。2009 年 1 月には一日で最大 6.7m の地下水位低下が観測されている。このような 12 月から 3 月にかけて急激に地下水位が低下する原因は、消雪用の地下水揚水である。例えば、各年 12 月 1 日を基準にして、12 月から 3 月までの間の地下水位最大低下量を算出すると、2004 年度と 2005 年度には約 11m、2006 年度は約 6m、2007 年度は 8m、2008 年度は 7m であった。2005 年の 2 月と 12 月は非常に多雪であったため、消雪用水が大量に必要であり、上述のような顕著な地下水位低下に繋がったものと考えられる。また、T-2 の観測井は JR 黒部駅に近く、市街地が広がっているため、道路への消雪用水のみならず、大規模民間施設の駐車場等にも消雪用水として地下水が利用されているため、他の観測井と比較すると顕著に地下水位が低下し易いと考えられる。同様の傾向は、T-2 の観測井の近くに位置する N-5 においても観測されている。

地下水位と降水量の関係については、いくつかの既往研究がある。例えば、東京都世田谷区の小面積の敷地内における観測の結果、降水量と地下水位の上昇や低下の一般的な傾向が得られている。

本対象流域においても、上流域 4 箇所、平野部 1 箇所の降水量と地下水位との関係について検討を行った。いずれの観測所においても両者の相関係数は -0.31 ~ 0.27 と非常に低い値であった。また、月毎においても、-0.31 ~ 0.47 と相関性は低い結果が得られた。また、地下水位の上昇高や低下高と降水量との比較を行ったが、同様に相関性は認められなかった。これらの要因の一つとして、観測井と降水量観測所の距離が離れているために、局地的な降水現象を捉えられていない可能性が挙げられる。

一方、積雪深と地下水位の関係について相関係数を用いて検討を行った。T-1, T-2, T-9, N-5 の地下水位と各積雪深との関係は強い負の関係が認められる。いずれの観測井について、負の相関係数が得られている月は、消雪用水と思われる顕著な地下水位低下が認められる。

逆に、いずれの積雪深観測所と正の相関のある観測井は、T-3, T-5, T-6, T-7 の 4 箇所である。しかしながら、櫻平、宇奈月ダム、泊観測所における積雪深が直接的に地下水位に影響しているとは考え難いが、流域全体に降雪があったと仮定すると、降雪が地下水位の上昇に寄与していると推察できる。

土地利用と地下水の関係については、特に水田面積と地下水位の関係についての既往研究が多い。例えば、両筑平野における地下水位低下傾向が水田の減少や比高が高い地域での建物用地の増加に因る可能性を示唆している。また、農作物を変えたことで地下水涵養量が増加した例もある。

本研究においても、黒部川流域の土地利用

と地下水位の関係について検討を行った。本研究では、黒部市（旧黒部市，旧宇奈月町）と入善町の土地利用データを利用した。対象とした12年間に土地利用は微小な変化しかしていない。水田は4.8%の減少，畑は7.5%の減少，宅地は8.8%の増加，山林は10.5%の減少である。このように，地下水位の漸減現象と土地利用の変化には定性的な対応は認められるものの，相互の統計的相関性は認められない。一方で，黒部川流域における土地開発はそのほとんどが黒部川扇状地で行われている。土地利用割合の基準を扇状地面積に仮定すると，水田は約56% ，畑地は1.4% ，宅地は約15%と地下水涵養には極めて大きな影響を及ぼしていると考えられる。

(2) 自噴井戸調査結果

冬季の消雪による影響をみるため，消雪が稼働していない6-11月と12-3月の湧水量の比較を行った。6-11月の湧水量は12-360ℓ/min(平均72ℓ/min) ，12-3月は0-292ℓ/min(平均53ℓ/min)であり，消雪の稼働している冬季に湧水量が減少していることが分かった。

観測期間中の最大湧水量と最少湧水量を比較した減少率は約20%-100%（自噴停止は2地点 No.6,11）であり，平均で約60%の減少であった。

水質の特徴は多くの地点において季節変化が見られなかった。No.2,15 がアルカリ土類非炭酸塩型を示す以外，アルカリ土類炭酸塩型を示し，過去の調査研究と同じ傾向を示した。図示していないが，ヘキサダイアグラムの結果から，黒部川に近いほど濃度が低く，離れていくにつれて高くなる傾向を示した。

平成19年度の地下水観測井の水位変化から冬季における観測井の特徴の把握を試みた。地下水位の変動幅が100cm以上あった観測井を「水位変動がある地点」，100cm未満は「水位変動がみられない（消雪による影響があまりない）地点」とした。

水位変動がある地点は，三日市，金屋，五郎八，入膳，月山の5地点，水位変動がない地点は，生地，園家，青木，子摺戸の4地点であった。この結果は，観測井周辺の消雪道路の有無を反映した結果と言える。三日市は約1000cm(10m)の水位低下があり，消雪道路による影響を強く受けている地点と考えられる。平成23年12月の三日市の水位変動幅は-6.2m~-15.4mであり，26日に最低水位を記録した。12月の降雪量は112cm（富山気象台魚津観測所）であり，16日から26日まで断続的に降雪を観測していることから消雪道路の影響を受けている。一方，水位変動があるその他の地点は，約100~200cmの水位低下であった。そのなかで入膳は三日市と同様に近傍に消雪道路が存在するが，水位低下は三日市と比較し少なかった。

自噴水量は95-120ℓ/minの範囲で推移をしており，平均水量は107ℓ/minであった。

まとまった降雪を観測した23日から26日にかけて，自噴水量が徐々に低下する傾向がみられその減少量は約14%であった。最も低下した28日は，降雪を観測はしていなかった。

一般的に消雪道路のセンサーは気温と降雪のセンサーからなっており，気温の標準設定は2~3が多い。28日の平均気温が0.5であったことから降雪を観測していないが，消雪ポンプが稼働していた可能性が考えられる。しかし，A地点にもっとも近い生地観測井はほとんど水位低下がみられなかったこと及びA地点の自噴水量の回復が早いことから，周辺に新たに消雪道路が設置されない限り，湧水量の大きな低下はみられないものと考えられる。

一方，黒部川右岸の調査地点（No.4,5,6,8）も冬季に湧水量が減少していた。特にNo.6は，湧水が停止した。この地点の周辺に3基の消雪ポンプが存在している。3基同時に稼働した場合，1分間に約2.1m³揚水するため，この影響を受けているものと考えられる。

(3) 数値実験結果

CASE.1の全CASEにおいて， K_x の推定値が約0.6cm/s，CASE.3の全CASEにおいてはの推定値が約0.7cm/sと安定的に算出された。CASE.2-A(K)の1層目は透水性が高く，2層目は透水性が低い結果となった。しかしCASE.2-B(K)，CASE.2-C(K)では，2層共に透水性が高い結果となった。

透水係数 K_y については，いずれのCASEとも初期値から変化することがなかった。全てのCASEで K_y の推定値が初期値から変化したことから，観測地点付近では地下水の流動の向きはX方向であると考えられる。

CASE.1，CASE.3において， K_z の推定値は初期値から変化することはなかった。これは1層であるため，上層または下層への地下水の浸透がなかったからだと考えられる。

CASE.2-A，B，D，E，F，Gにおいて， K_z の推定値は2層共に概ね同程度の算出結果となった。黒部川扇状地の透水係数は 10^{-1} cm/sから 10^{-3} cm/sであるので，透水係数の実測値の範囲内という結果となった。CASE-C(K)では透水係数が高い値を算出した。初期値への依存性が考えられ，適切な初期値設定が必要である。

CASE.1とCASE.3の S_0 は初期値から変化しなかった。比貯留率は不透水層に対して使われるパラメータである。CASE.1，CASE.3共に不圧帯水層であるため初期値からの変化がなかったと考えられる。

CASE.2-E(S_0)の2層目の S_0 は24.8/mになった。観測値に合わせるように推定された結果であると考えられ，他パラメータとの整合性を検討する必要がある。

CASE.1とCASE.3の S_0 の推定値は安定的に算出された。CASE.2-F(S_0)では他のCASEと比較して低い値を算出した。CASE.2-F(S_0)での比産出率の平均値は約0.05となった。ここ

でも初期値への依存性が考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計3件)

Tebakari, T., Mizoguchi, T., Motoyoshi, Y. and Zhang, J. (2013): Discharge and water quality characteristics of flowing artesian wells in the Kurobe River alluvial fan, Japan, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering), Vol.69, No.4, pp. I_589-I_594, 2013. 査読有

Tebakari, T. and Hirata, H., 2012: Changes in the hydrological environment and watershed conditions of the Kurobe River basin, Japan, Proceedings of 5th International Perspective on Water Resources & the Environment Conference, Marrakech, Morocco. 査読有

手計太一 (2010): 黒部川扇状地における地下水位の漸減現象に関する基礎的研究 水工学論文集 第54巻 pp.565-570. 査読有

[学会発表](計8件)

Tebakari, T. 2013: Seasonal change characteristics in water discharge and quality of flowing wells in the Kurobe River alluvial fan, Japan, R428, HS8.2.2/IG13, EGU General Assembly 2013 in Vienna, European Geophysical Union.

Tebakari, T. 2010: Long term trend in groundwater levels and watershed condition in the Kurobe River alluvial fan in Japan, H31C-1450, AGU Fall Meeting in San Francisco, American Geophysical Union.

北隆平, 手計太一 (2014): MODFLOW を利用した PEST による黒部川扇状地における地下水理パラメータの推定, 2014 年春季講演会講演予稿, 日本地下水学会, pp.30-33.

北隆平, 手計太一 (2014): 黒部川扇状地を対象とした地層構造の変化が地下水流動に与える影響, 平成 25 年度土木学会中部支部研究発表会, II-34.

元由友佳, 手計太一, 溝口俊明, 松本卓大 (2013): 黒部川扇状地における非定常地下水モデルの構築と精度検証, 第 40 回土木学会関東支部技術研究発表会, II-46.

元由友佳, 手計太一, 溝口俊明, 張勁 (2012): 黒部川扇状地の湧水調査, 日本地下水学会秋季講演会講演要旨, pp.52-55.

平田大道, 中易佑平, 張勁, 手計太一, 上田晃 (2012): 熱利用のための黒部川扇状地地下水系の流動解析 - 基礎的研究 -, 日本地熱学会学術講演会, A41. 手計太一 (2012): 黒部川扇状地における自噴井の水量・水質の現地観測, 水文・水資源学会 2012 年研究発表会要旨集, pp.184-185.

[図書](計0件)

[産業財産権]

出願状況 (計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況 (計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

[その他]

ホームページ等

<http://www.pu-toyama.ac.jp/EE/tebakari/index.htm>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

手計 太一 (TEBAKARI, Taichi)

富山県立大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 70391620

(2) 研究分担者

なし ()

研究者番号:

(3) 連携研究者

なし ()

研究者番号: