

〔農工研技報 217〕
〔13 ~ 28, 2015〕

浸透型洪水調整池における湛水時の浸透水の地下水環境への影響 —地下水中の主要イオン組成とラドン濃度を指標としたモニタリング方法の検討—

吉本周平* 澁谷達也** 酢谷 岳** 黒田清一郎*** 土原健雄*
白旗克志* 石田 聡*

*資源循環工学研究領域水資源工学担当

**富山県砺波農林振興センター

***施設工学研究領域構造担当

要 旨

富山県砺波市の庄川扇状地に位置する砺波西中調整池で実施された浸透試験において、周辺の地下水の主要イオン組成やラドン濃度を測定し、これらの結果を踏まえて、調整池への湛水が地下水環境に与える影響を把握するためのモニタリング方法について検討した。調整池近傍の地下水面付近については、ラドン濃度を指標として調整池からの浸透水による地下水への寄与を把握できる。また、カルシウムイオンや硝酸性窒素の濃度変化もこれと整合的である。比較的深層の地下水については、ラドンやカルシウムイオン、硝酸性窒素の濃度に明瞭な低下傾向がみられないことから、浸透水による寄与は僅かか、ないものと考えられる。このことは、必ずしも深層の地下水に浸透水が到達しないことを意味しないが、深層への地下水の到達までには時間が掛かる一方、浅層では浸透水の影響が比較的早く、かつ大きく出ることから、地下水環境への影響の把握のためには、まず浅層での水質変動のモニタリングが不可欠であるといえる。

キーワード：地下水流動，涵養，洪水調整池，扇状地，ラドン

I 緒 言

近年の地球規模の気候変動によって、豪雨や渇水などの極端な気象現象による洪水や水不足のリスクが将来的に増大する可能性が指摘されている (IPCC, 2007)。日本においても、豪雨や渇水のリスクが増大すると予測されている (例えば、和田ら, 2005)。このような気候変動に伴う将来の水循環の変化を考慮した上で、災害対策を含めた河川管理を実施していくことが求められている。

扇状地を流れる河川は、かつては流路を不規則に変える暴れ川であり、これまでに多くの洪水災害が発生し、霞堤などによる洪水対策がなされてきた (例えば、水谷, 2012)。一方で、特に扇状地の扇状部は一般的に乏水地帯であることから、かんがいのための用水網が扇頂部から放射状に発達してきた。また、生活用や工業用、消雪用の井戸の掘削、扇端部の湧泉のかんがいへの利用など、扇状地では地下水も利用されている。揚水量の増大に伴う地下水位の低下への対策として、人工涵養による地下水強化が試みられている地域もある (例えば、肥田ら, 1999; 肥田, 2002)。

人工涵養の際には、浸透する水が地下水の流動状況や水質に影響を与えることが想定される。これまでの人工

涵養の現地試験では、水温の測定によって地下水流動への影響を評価されている事例がある (例えば、利部, 2007)。地下水環境への影響としては、流動状況や水温のみでなく、農業用水や生活用水としての地下水利用に適うような水質項目の評価も課題になる。海外では、人工涵養による地下水質への影響をモデル予測やフィールド観測によって調査している事例がある (例えば、Grove and Wood, 1979)。また、アメリカ土木学会 (2005) の地下水人工涵養の標準ガイドラインにおいても、人工涵養に伴う地下水質の変化へのモニタリングの重要性が記載されている。

富山県では、近年頻発している局地的な豪雨による洪水災害の被害軽減を目的として、庄川と小矢部川の複合扇状地である砺波平野に洪水調整池を設置している。これらのうち、砺波西中調整池などいくつかの調整池は、扇状地の透水性の高い砂礫地盤を自然排水システムとみなす浸透型の洪水調整池として建設されている (澁谷ら, 2008, 2011)。砺波平野には散居村が広がり、調整池の近隣には井水を生活用に汲み上げている民家がある。このため、浸透型洪水調整池の運用においては、扇状地地下水への涵養といった利点への評価のみならず、水質面への影響の検討も求められる。

本研究では、調整池の湛水時における地下水環境の変

化を把握するためのモニタリング方法を提示することを目的とする。まず、全体的な流動状況を把握するために、調整池周辺の地下水質の状況を既往文献とともに整理する。また、浸透試験の際に、調整池近傍の観測用ボーリング孔で地下水を採取して主要イオン組成とラドン濃度の変化を観測する。これらの結果をとりまとめて、調整池への湛水が地下水環境に与える影響を評価する方法を検討する。

II 調査地区の概要

庄川は、岐阜県高山市の烏帽子岳（標高1,625m）および山中峠（標高1,375m）を水源に、岐阜県北部と富山県南西部の山地部を北流した後、砺波平野を縦断して富山湾に注ぎ込む一級河川である。庄川扇状地（Fig.1）は、砺波市庄川町金屋を扇頂部として北～東の方向に発達し、高岡市中心部を扇端部とする。富山県南西部において、庄川の西には大門山（標高1,572m）に端を発する小矢部川が平行して北流し、砺波平野は庄川と小矢部川の複合扇状地となっている。扇状地の表層地質は透水性のよい砂礫層からなり、その層厚は扇中央部において350mを超えるとされる（山本，1988）。

庄川扇状地の地下水の概略については、高岡市による調査報告で記されている（中崎，1965）。これによれば、扇状地地下水は自由水面をもつ浅層地下水と被圧の深層地下水に大別され、これらは扇端部から下流の三角州にかけての区域で湧水または自噴井として現れる。また、庄川扇状地の地下水流動および水質形成の機構は、富山大学の研究グループ（水谷・小田，1983；加藤ら，1984；水谷ら，1987）などによって明らかにされている。水谷・小田（1983）は、庄川と小矢部川の河川水の酸素・水素安定同位体比が明瞭に異なることを利用して、庄川と小矢部川が庄川扇状地を東西にほぼ二分して双方から浅層地下水を涵養していることを示した。また、加藤ら（1984）は、主要イオン濃度の組成から、庄川扇状地の浅層地下水がその涵養源ごとに水系として区分され、それぞれ庄川、小矢部川および周辺山地を主な涵養源とすることを示した（Fig.1）。扇状地の地下水流動については、水谷・小田（1983）が、庄川の影響下にある地下水について酸素・水素安定同位体比の一時的变化の追跡と溶存アルゴン濃度の測定から流動速度が10–13m day⁻¹であると推定した。水谷ら（1987）は、地下水中のトリチウム濃度から地下滞留時間を推定し、^{たかしょうす} Fig.1の庄川系地下水で1年以内、小矢部川系と高清水

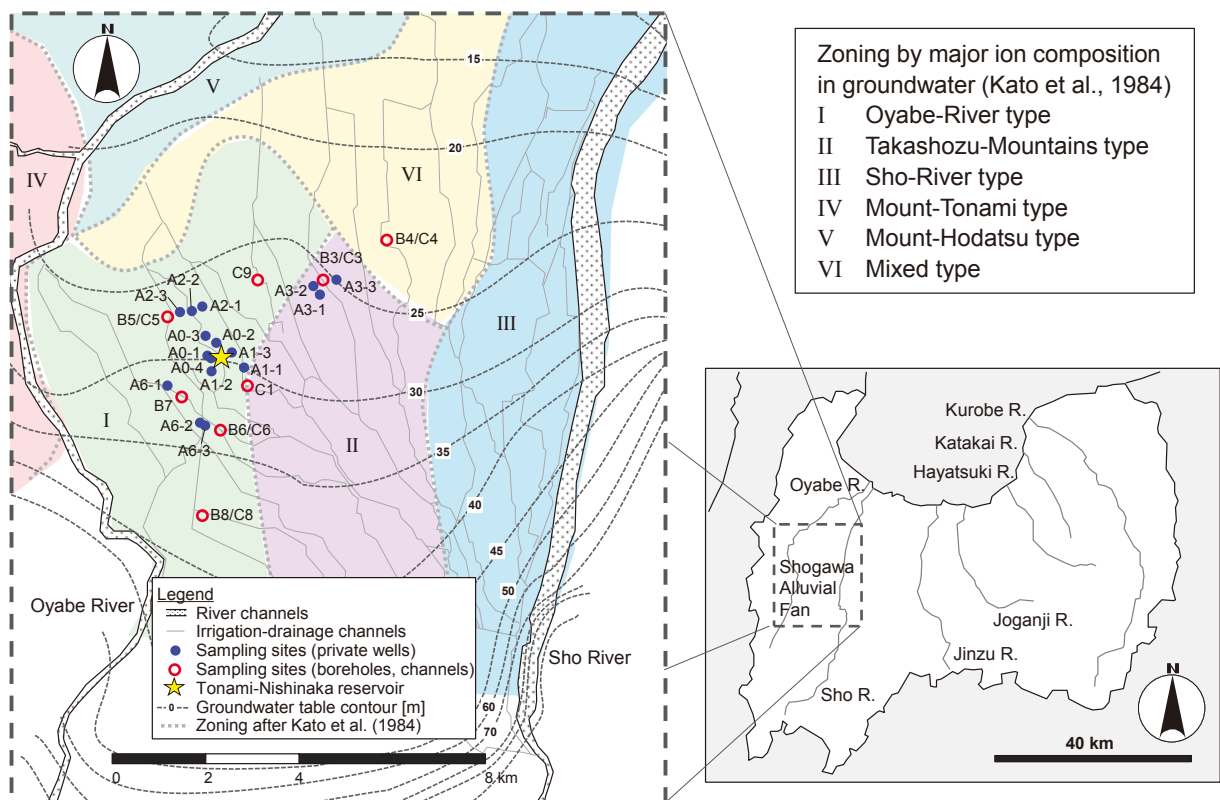


Fig.1 砺波西中調整池および採水地点の位置，地下水位の分布（2002年2月；庄川扇状地水環境検討委員会，2004），ならびに主要イオン濃度による地下水区分（加藤ら，1984）
 Locations of the Tonami-Nishinaka reservoir and the sampling sites, distribution of the groundwater level (February, 2002; Shogawa Fan Environment Committee, 2004), and classification of the groundwater in terms of major ion compositions (Kato et al., 1984)

山系の地下水で3年以内であるとした。地下水位の分布は、庄川扇状地水環境検討委員会（2004）によって示されている（Fig.1）。

庄川扇状地の地下水は、その豊富な水量と良好な水質から、生活用水や工業用水として広く用いられている。しかし、高度経済成長期以降の地下水利用量の増加によって、地盤沈下や沿岸域帯水層の塩水化などの地下水障害が発生してきた（富山県，2006）。また、河川以外の涵養源として水田への灌漑水や直接的な降水の浸透が挙げられるが、近年の水田面積の減少が地下水位の低下を引き起こし、流域の水環境に悪影響を及ぼすことが懸念されている（庄川扇状地水環境検討委員会，2004；富山県，2006）。そこで、現在では、地下水の適正利用に関する指針や、水田の利用や雨水浸透施設の設置などによる地下水涵養の取組の方針が示されている（富山県，2006）。

庄川扇状地には、河道跡を利用した用水路が網目状に張り巡らされている。これらは、農地排水や湧水を集めて流下する。大雨の時には、その流量を増して洪水となる危険性を孕んでいる。富山県は、庄川扇状地の洪水対策として11箇所の洪水調整池の設置を進めている。砺波西中調整池は、これらの調整池のひとつであり、広域的な地下水位の低下傾向や臨海部における塩水化などの諸問題の顕在化を踏まえて地盤への自然排水による地下水涵養の機能も持たせた浸透型の洪水調整池である（澁谷ら，2011）。

Ⅲ 方法

本研究では、砺波西中調整池（Fig.1）で計4回実施された浸透試験（試験1：2012年12月5日および7日，試験2：12月20日，試験3：2013年10月9日，試験4：11月26日）を検討の対象とした。試験1では、2012年12月5日と7日の両日に湛水し、それぞれ16,000m³，13,100m³を調整池に導水した。試験2，試験3，試験4では、それぞれ一度ずつ導水して湛水し、調整池への流入水の量は14,000m³，13,500m³，18,500m³であった。

本研究では、まず、庄川扇状地の地下水および農業用水の水質の一般的傾向を把握するために、2012年11月30日-12月1日と2013年2月12-13日に、それぞれ、民家井戸16地点、調整池建設のために設置された観測用ボーリング孔（以下、観測孔）6地点、調整池に近接する農業用水路7地点（Fig.1）で採水を実施し、試料を水質測定に供した。

浸透試験では、調整池直近にある観測孔（Fig.2のW-3，W-4，W-8，W-9；ストレーナ部はFig.3のとおり）と調整池から北北西に250mの地点にある民家井戸（Fig.1のA0-2；取水深度G.L.-30m）において地下水を採取した。試験1では、湛水直前から9日後までの間にW-4で8回，試験2では、流入直前から7日後までの間にW-4で7回，それぞれ地下水を採取した。試験3では、試験前の9月24日から湛水3週間後の10月30日までの間にW-4とW-9で11回，地下水を採取した。試験4では、試験前の11月25日から湛水1週間後の12月3日までの

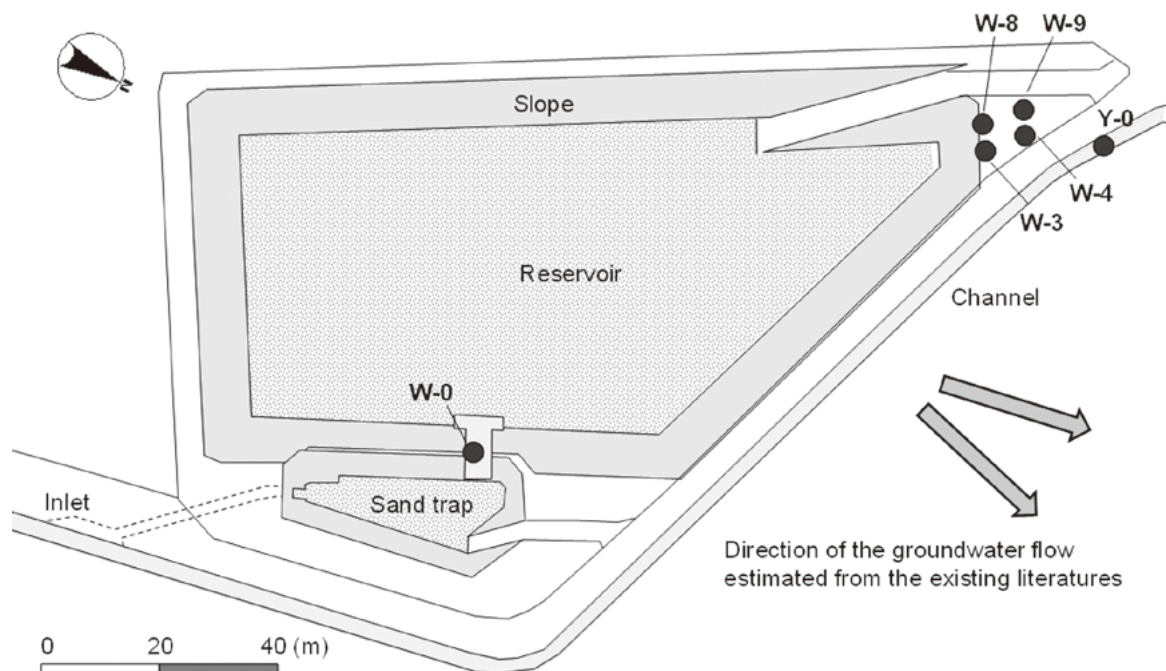


Fig.2 砺波西中調整池における地下水と流入水の採取地点

Locations of sampling points for groundwater and inflowing surface water at the Tonami-Nishinaka reservoir

間にW-3, W-4, W-8, W-9で各42回, 近傍の民家井戸A0-2で7回, それぞれ地下水を採取した。また, 2013年の2回目の試験ではW-4から直近の用水路(Y-0)から, その他の試験では調整池への流入口(W-0)から, 湛水中にそれぞれ2-3回, 調整池への流入水として採水を行った。採水のために, 観測孔ではペーラーを, 用水路や流入口では投げバケツを使用した。民家井戸では, 設置されているポンプで揚水し, 揚水管の水が十分に置換された後に採水した, 採水量は, 各種水質測定のために, 1.5L程度を必要とした。

採水試料は持ち帰りイオンクロマトグラフ(TOA-DKK製ICA-2000)によって主要なイオン(Na^+ , K^+ , NH_4^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , NO_3^- , NO_2^- , SO_4^{2-})の溶存濃度が測定された。重炭酸(HCO_3^-)濃度は, 滴定法によるpH4.8アルカリ度測定から換算された。 NO_3^- 濃度は, 以下では硝酸性窒素($\text{NO}_3\text{-N}$)濃度として取り纏められた。

また, 浸透水の到達状況を調べるために, 試験4で採取した試料のラドン(^{222}Rn)濃度を測定した。現地でトルエン抽出法(濱田ら, 1997)によって抽出した試料を持ち帰り, 液体シンチレーションカウンタ(Packard社製2250CA; 検出限界 0.10Bq L^{-1})で測定した。

浸透試験時の採水では, 現地で電気伝導度, pH, 水温(TOA-DKK製WM-32EP), 溶存酸素濃度(HACH製HQ30d), 酸化還元電位(TOA-DKK製RM-30P)を測定した。また, 2013年2月の民家井戸, ボーリング孔, 用水路での採水では, 現地でpH, 電気伝導度, 水温も測定した。

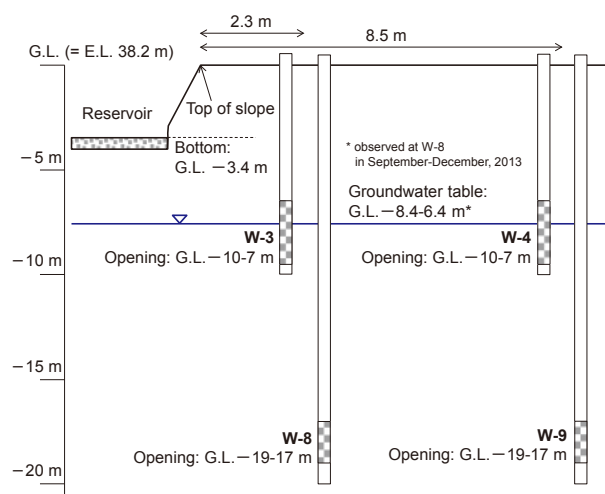


Fig.3 砺波西中調整池の近傍に設置された観測孔の構造
Structure of the observation boreholes for groundwater close to the Tonami-Nishinaka reservoir

IV 結果

4.1 調整池周辺の浅層地下水の水質分布

庄川扇状地の民家井戸と観測孔の地下水ならびに農業用水の主要イオン濃度の測定結果について, イオンバランスは $\pm 10\%$ の範囲に収まっていた。これらの試料の NH_4^+ と NO_2^- については, 窒素量(それぞれ $\text{NH}_4\text{-N}$ と $\text{NO}_2\text{-N}$)で 0.2mg L^{-1} を超えて検出されることはなかった。民家井戸の電気伝導度は, $130\text{--}200\mu\text{S cm}^{-1}$ の範囲にあった。

地下水の水質組成を検討するために, これらの試料の主要イオン組成をトリリニアダイアグラムにプロットした結果をFig.4に, ヘキサリニアダイアグラムで示した結果をFig.5に, それぞれ示す。庄川扇状地の地下水の主要イオン組成は, 浅層地下水の一般的な水質組成であるアルカリ土類炭酸塩型に分類される。また, 農業用水の各種イオン濃度は地下水に比べて小さいが, 主要イオン組成は類似しており, トリリニアダイアグラムでは農業用水のプロットの範囲は地下水のものと似通っている。

庄川扇状地の民家井戸と観測孔の地下水44試料について, 主要イオン濃度の相関行列をTable 1に示す。有意水準 $p < 0.01$ となる相関係数は $R > 0.38$ である。この相関性から, 主要イオンを $\{\text{Na}^+, \text{Cl}^-\}$ とそれ以外の2つのグループに分類することができる。なお, Na^+ と Cl^- の当量比(Na/Cl)の範囲は $0.82\text{--}1.66$ で, 平均は 1.19 である。

4.2 浸透試験における調整池直近の地下水の水質変動

浸透試験前後に測定された電気伝導度は, 地下水は

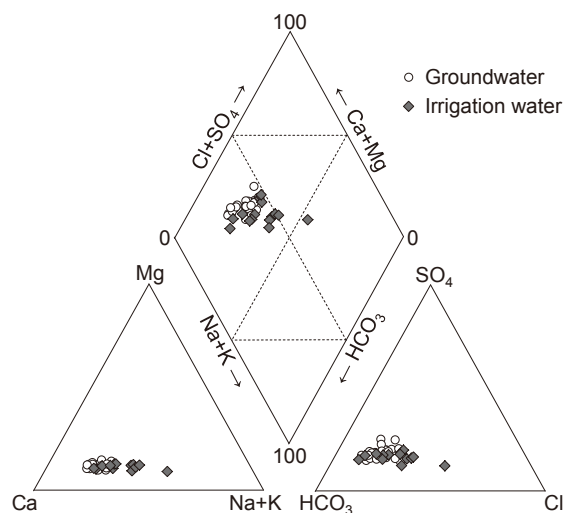


Fig.4 砺波西中調整池周辺の地下水および農業用水の主要イオン組成を示すトリリニアダイアグラム
Trilinear diagram for groundwater and irrigation water around the Tonami-Nishinaka reservoir

W-3で8.8–44.2mS m⁻¹と比較的大きく変動し、それ以外の地下水は10.4–24.6mS m⁻¹、流入水は7.1–8.3mS m⁻¹であった。pHは地下水で6.0–7.5、流入水で6.8–8.0の範囲であった。地下水の水温の平均値は14.0℃で、AMeDAS 砺波の年平均気温の平年値13.4℃と大きくは異ならないが、採取時刻によって変動しており、採取から測定までの間に気温などの影響を受けていると思われる。溶存酸素濃度は、地下水で5.8–10.5mg L⁻¹、流入水で11.8–12.1mg L⁻¹の範囲であった。酸化還元電位は、地下水で106–376mV、流入水で238–258mVの範囲であった。

浸透試験における地下水と流入水の主要イオン濃度について、イオンバランスが±10%の範囲に収まることを確認した。全試料のNH₄⁺とNO₂⁻は、窒素量（それぞれNH₄-NとNO₂-N）で0.2mg L⁻¹を超えては検出されな

かった。

調整池近傍における地下水の水質組成の変化を検討するために、主要イオン組成をトリリニアダイアグラムにプロットした結果をFig.6に示す。W-8、W-9、A0-2の地下水、ならびに流入水の主要イオン組成は、概ねアルカリ土類炭酸塩型に分類される。一方、地下水表面付近を開口部とするW-3とW-4の地下水については、アルカリ土類炭酸塩型とアルカリ炭酸塩型の混合状態として示される。

試験4の前後におけるW-3、W-4、W-8、W-9およびA0-2の地下水の電気伝導度、Na⁺濃度、Ca²⁺濃度、NO₃-N濃度、ラドン濃度の変化をFig.7に示す。

W-3では、電気伝導度やNa⁺、HCO₃⁻濃度が他の観測孔と比較して高く、湛水開始後にCa²⁺など他のイオン濃度とともに低下し、その後、Na⁺、HCO₃⁻濃度は湛水

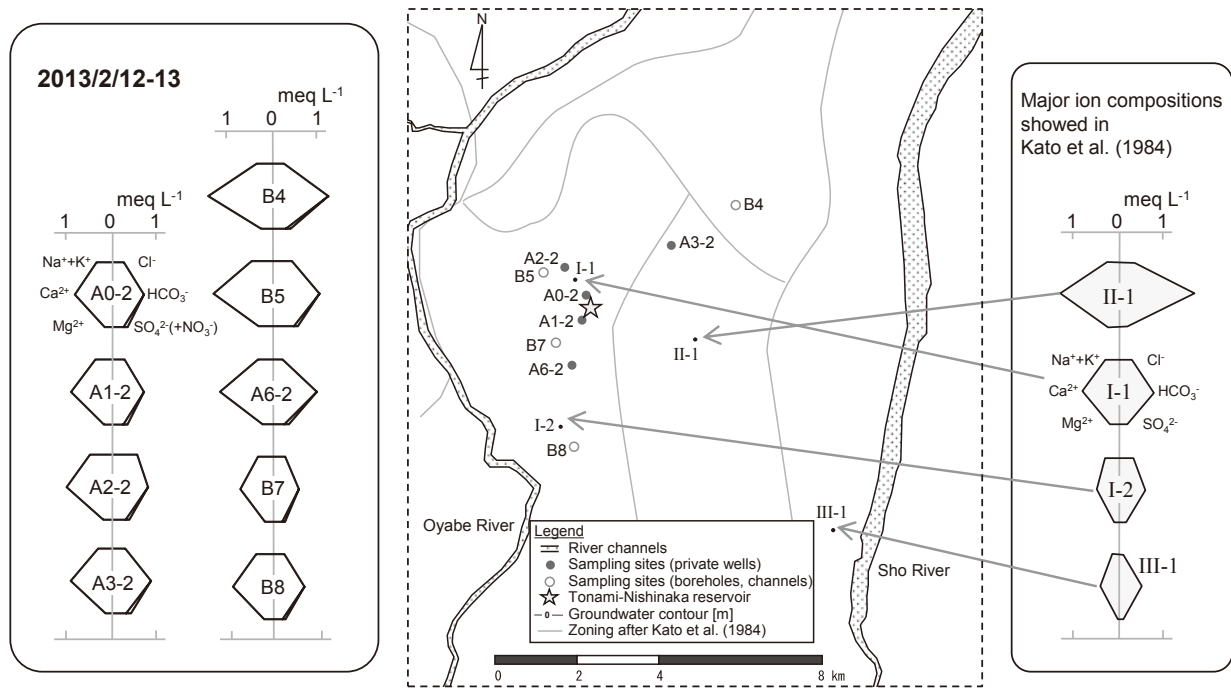


Fig.5 砺波西中調整池周辺の地下水の代表的な主要イオン組成を示すヘキサリニアダイアグラム
Major ion compositions, showed as Stiff diagrams, of groundwater around the Tonami-Nishinaka reservoir

Table 1 砺波西中調整池周辺の地下水の主要イオン濃度の相関行列

Correlation matrix for major ion composition of groundwater around the Tonami-Nishinaka reservoir

R	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ -N
Na ⁺	1.00							
K ⁺	0.17	1.00						
Mg ²⁺	0.27	0.64*	1.00					
Ca ²⁺	0.14	0.60*	0.80*	1.00				
HCO ₃ ⁻	-0.05	0.56*	0.76*	0.95*	1.00			
Cl ⁻	0.90*	0.19	0.31	0.13	-0.02	1.00		
SO ₄ ²⁻	0.31	0.75*	0.73*	0.68*	0.57*	0.32	1.00	
NO ₃ -N	-0.15	0.51*	0.64*	0.71*	0.73*	-0.16	0.53*	1.00

* Significance level $p < 0.01$ at Pearson's product-moment correlation coefficient $R > 0.38$ (number of samples $N = 44$)

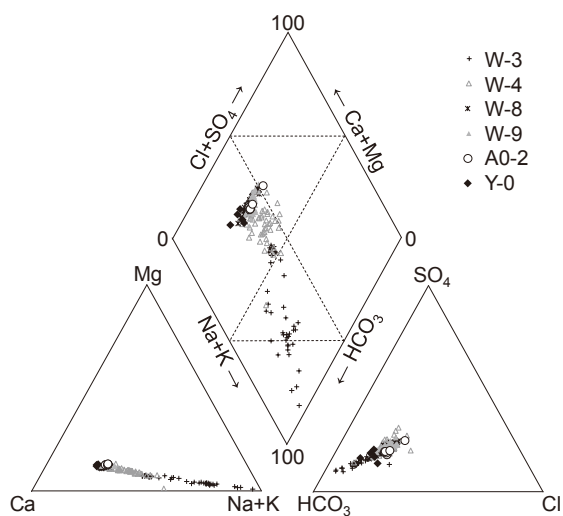


Fig.6 浸透試験（試験4）における砺波西中調整池の近傍の地下水の主要イオン組成を示すトリリニアダイアグラム
Trilinear diagram for groundwater and inflowing water adjacent to the reservoir, during the waterlogging test (Test 4)

開始前を上回った。W-4の電気伝導度は、W-3と同様に湛水開始後に低下し、その後上昇したが、湛水開始前の水準までは回復しなかった。W-4の Na^+ 、 HCO_3^- 濃度は電気伝導度のように顕著に低下せず、むしろ湛水開始後に上昇することもあった。W-8の地下水の電気伝導度は大きく変動せず、主要イオン濃度は若干変動したが明瞭な増減は見られなかった。W-9の電気伝導度は、湛水開始後に若干上昇したが、主要イオン濃度の変動について明瞭な増減は見られなかった。

試験4の前後での地下水と流入水の Na^+ 濃度と HCO_3^- 濃度の関係、ならびに Na^+ 濃度と SO_4^{2-} 濃度の関係をFig.8に示す。W-3では、 Na^+ 濃度と HCO_3^- 濃度の間に明瞭な相関性がみられるとともに、 Na^+ 濃度と SO_4^{2-} 濃度の間については他の観測孔の地下水と異なる関係性がみられる。

ラドン (^{222}Rn) は、帯水層を構成する土粒子に含まれるラジウム (^{226}Ra) の α 崩壊により生成される水溶性の放射性ガスであり、半減期が3.8日と短く揮発性であることから、供給源のない地表水に殆ど含まれず、地下水中には地表水よりも 10^1 – 10^3 倍高濃度で存在する（例

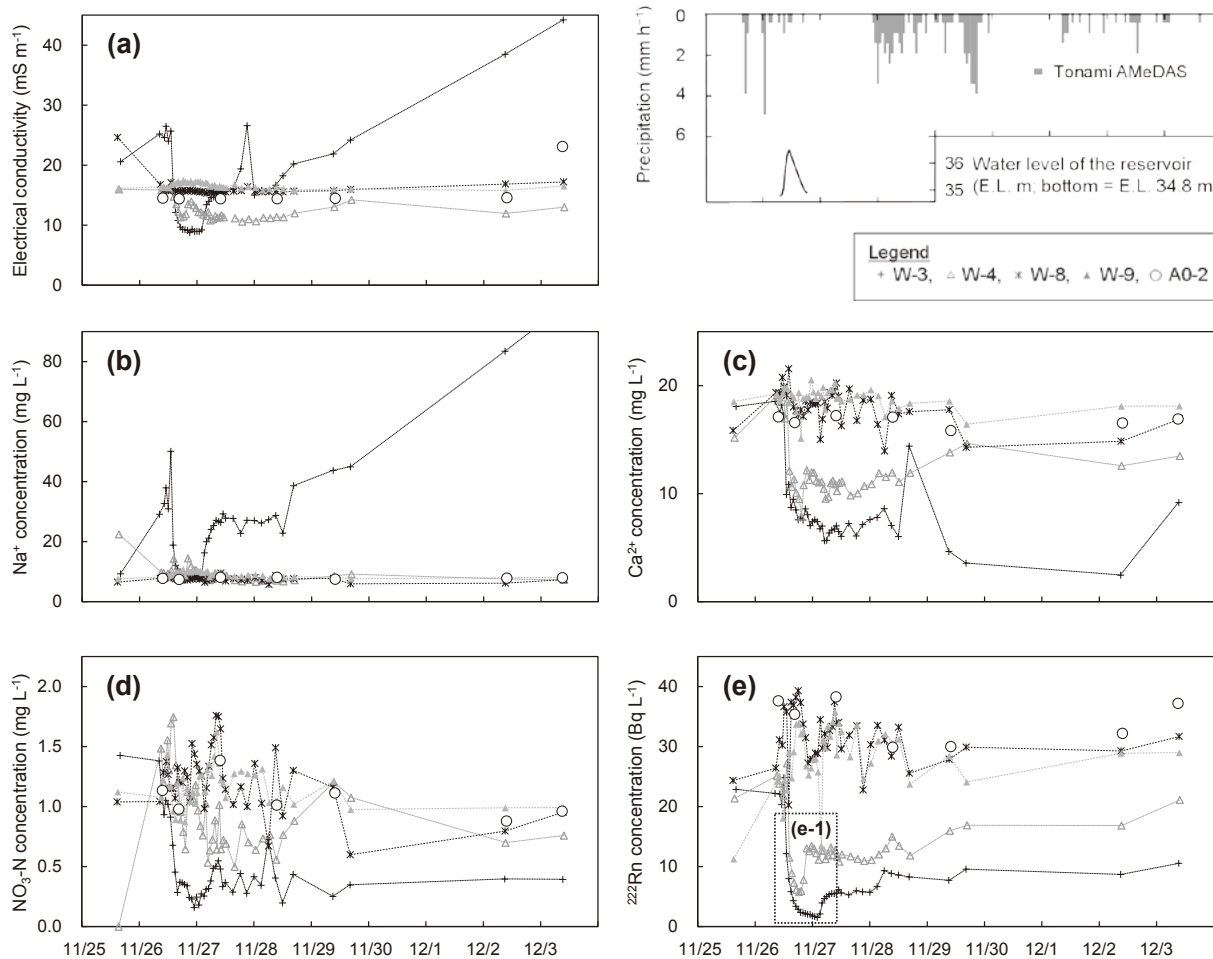


Fig.7 浸透試験（試験4）における地下水の各種水質（a：電気伝導度，b： Na^+ ，c： Ca^{2+} ，d： $\text{NO}_3\text{-N}$ ，e：ラドン）の変化
Variations in EC, Na^+ , Ca^{2+} , $\text{NO}_3\text{-N}$ and ^{222}Rn of groundwater adjacent to the reservoir, during the waterlogging test (Test 4)

えば、濱田ら, 1997)。試験4の前後での地下水ラドン濃度の最大は 35.8Bq L^{-1} 、平均は 20.6Bq L^{-1} であった。一方、流入水のラドン濃度は 0.1Bq L^{-1} で、地下水に比べて十分に低い濃度であった。W-3とW-4のラドン濃度は、湛水開始からそれぞれ3時間後および4時間後に低下し始め、W-3では16時間後に 1.5Bq L^{-1} （湛水開始時 22.1Bq L^{-1} の7%）、W-4では8時間後に 5.8Bq L^{-1} （湛水開始時 23.8Bq L^{-1} の24%）にまで低下した。W-8、W-9とA0-2では、湛水開始後1週間は $13.5\text{--}39.3\text{Bq L}^{-1}$ の間で変動していたが、湛水に関連するとみられる明瞭な濃度低下の傾向はみられなかった。

試験4の前後での地下水と流入水のラドン濃度と Ca^{2+} 濃度および $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の関係を、それぞれFig.9に示す。ラドン濃度と Ca^{2+} 濃度および $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の間には、正の相関性がみられる（ここでは図示していないが、ラドン濃度と Mg^{2+} 濃度、 Cl^- 濃度の間にも同様の相関性がみられる。）

試験1、試験2、試験3の前後におけるW-4とW-9の地下水 Ca^{2+} 濃度の変化をFig.10に示す。W-4では、湛水開始後に Ca^{2+} 濃度が低下した。試験3では、10月16日の降水後に再び Ca^{2+} 濃度が低下した。W-9では、試験3のみ観測ではあるが、明瞭な濃度低下の傾向はみられなかった。

V 考察

5.1 調整池周辺の浅層地下水の地下水流動と水質分布

庄川扇状地の地下水は、庄川、小矢部川、高清水山地からの涵養の影響を受けている。砺波西中調整池の周辺の地下水は、その位置から小矢部川からの涵養水の影響が大きく、地下水位の分布から判断すると地下水は北から北東の方向に流動していると考えられる（Fig.1）。2012年に採取した周辺の民家井戸および観測孔の地下水の主要イオン組成（Fig.5）を、加藤ら（1984）が示

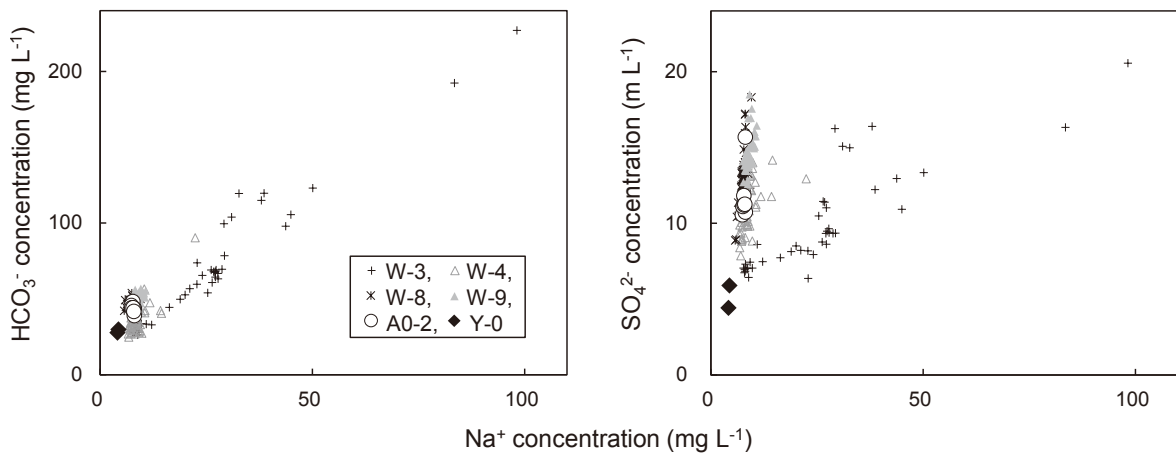


Fig.8 浸透試験（試験4）における地下水の Na^+ 濃度と HCO_3^- 濃度、 SO_4^{2-} 濃度の関係
Relationship of Na^+ to HCO_3^- and SO_4^{2-} in groundwater adjacent to the reservoir, during the waterlogging test (test 4)

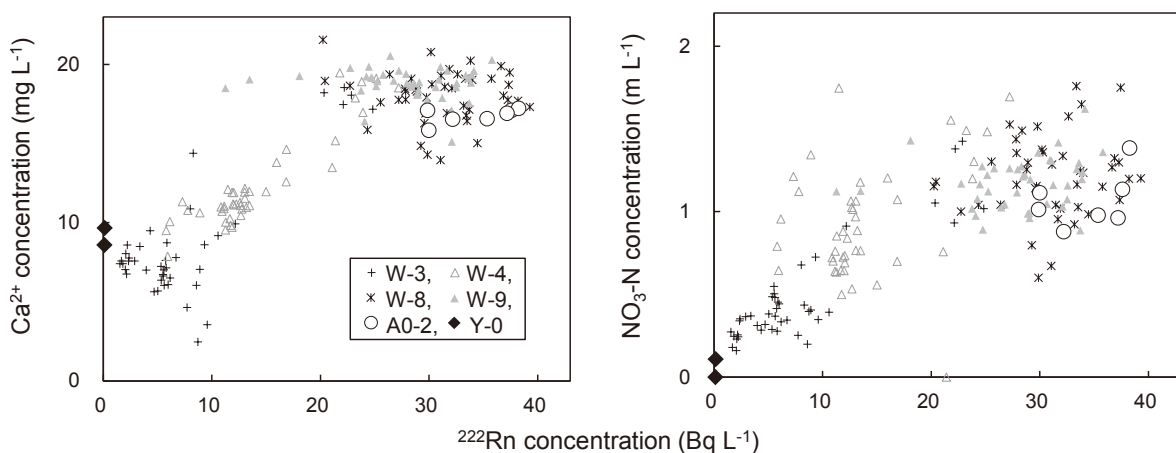


Fig.9 浸透試験（試験4）における地下水のラドン濃度と Ca^{2+} 濃度、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 濃度の関係
Relationship of ^{222}Rn to Ca^{2+} -N in groundwater adjacent to the reservoir, during the waterlogging test (test 4)

した結果 (Fig.1) と照らし合わせてみると、砺波西中調整池の周辺 (A0-2, A1-2) では、小矢部川水系の地下水に近いことが読み取れる。

相関行列 (Table 1) でひとつのグループとしてみられる Na^+ と Cl^- は、海岸線から 20km 以上離れているため風送塩の影響は小さいと推察されることや、加藤ら (1984) でも言及されているように、岩石中にこれらの供給源が考えられないことやこれらの当量比 (Na/Cl) が 1 に近いものがみられることから、人間活動の影響を受けた扇面からの浸透水の寄与による可能性が考えられる。 $\text{NO}_3\text{-N}$ もまた、人的な負荷である施肥が起源のひとつで、庄川扇状地では水田での中干し・耕起後の浸透によって窒素が溶脱していると考えられている (奥川ら, 2010)。 $\text{NO}_3\text{-N}$ や Ca^{2+} 、 Mg^{2+} など相関行列における残りのグループの溶存イオンは、帯水層中の鉱物の溶解や人的な負荷による影響を受けて、地表水より高濃度で存在していることが考えられる。 $\text{NO}_3\text{-N}$ は、 Cl^- とともに人間活動の影響を受けていることが考えられるが、 Cl^- との相関係数が小さく、負荷源が異なる可能性がある。

観測孔 (W-3, W-4, W-8, W-9) は調整池の北西側に位置している (Fig.2)。地下水位の分布 (Fig.1) から、観測孔は調整池の直下流ではなく、調整池から見ると地下水の流動方向から左側に逸れたところに位置しているといえる。

5.2 浸透試験による調整池直近の地下水への影響

ラドン濃度は地下水中で比較的高く、地表水に殆ど含まれていないことから、浸透水による地下水への影響は、ラドン濃度の変化 (Fig.7(e)) によって明示的に把握できる。

採水試料のラドン濃度を測定した試験4について、湛水開始時における観測孔のラドン濃度を本来の地下水のラドン濃度とみなせば、最もラドン濃度が低下した時点において W-3 では約 95%、W-4 では約 80% が浸透水による寄与と考えられる。湛水開始後のラドン濃度の低下は、調整池への流入水の浸透による部分が大きいと推察されるが、AMeDAS 砺波で 11 月 26 日の 24 時間に 10mm、28 日から 29 日までの 48 時間に 53mm の降水量を観測しているため、28 日以降のラドン濃度の低下については、これらの降水が浸透したことによる影響も考えられる。

ラドンと同様に、 Ca^{2+} や $\text{NO}_3\text{-N}$ などについても湛水開始後の濃度低下が確認できる (Fig.7(c, d))。湛水開始後のこれらの溶存イオン濃度の低下は、ラドン濃度の挙動 (Fig.7(e)) と整合的であり、互いによく相関していることから (Fig.9)、流入水や降水による希釈によるものと考えられる。

一方、電気伝導度については、W-3 や W-4 において湛水開始後の浸透水による希釈とみられる値の低下がみられるが、その後、W-3 では湛水開始前の値よりも上昇している (Fig.7(a))。このような挙動は Na^+ 濃度について

も同様にみられ (Fig.7(b))、W-3 では Na^+ 濃度と HCO_3^- 濃度や SO_4^{2-} 濃度が相関している (Fig.8)。このことから、W-3 の周囲で何らかの影響 (例えば、観測孔設置時の充填資材などが考えられる) によって重炭酸ナトリウムや硫酸ナトリウムが溶出したことにより電気伝導度が上昇しているものと考えられる。この影響は、トリリニアダイアグラム (Fig.6) で示されるように W-4 にも現れており、湛水開始後に W-4 の Na^+ 濃度の上昇がみられる (Fig.7(b)) ことから、W-3 付近を通過した地下水が W-4 にも到達していることが示唆される。

もし、W-3 と W-4 が扇状地全体の地下水流動場における調整池の下流側に位置しているとすれば、W-4 への浸透水の寄与は W-3 とほぼ同等で、かつ W-3 よりも長く寄与が残るものと考えられる。しかし、ラドン濃度の変化から把握される地下水への浸透水の寄与は、W-4 より W-3 のほうが常に大きく、W-3 に比べて W-4 は遅れて上昇するとともに先に減少している (Fig.7(e-1))。このことは、W-3 と W-4 は、調整池の直下流の位置ではなく、浸透試験によって水平方向に広がった浸透水の塊の影響を受けていることを示唆している (Fig.11)。

比較的深層の地下水を対象としている W-8 と W-9 では、浸透試験後に各種水質が若干変動しているものの、ラドンや Ca^{2+} 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ などの濃度に明瞭な低下傾向はみられない (Fig.11)。このことから、浸透水による寄与は僅かか、あるいはないものと考えられる。これは、一般的に鉛直方向に比べて水平方向の透水係数が大きい傾向があること (例えば、Domenico and Schwartz, 1997) や、帯水層に比較的透水性の低い層が存在している可能性があり、その影響で浸透水が鉛直方向よりも水平方向に卓越して移動したためと考えられる。

試験1、試験2、試験3では、ラドン濃度の測定はされていないが、試験4と同様に、 Ca^{2+} などの濃度変化から、浅層にある W-4 の観測孔で浸透水による地下水の希釈を確認することができる (Fig.10)。試験3では、調整池に導入した流入水の量が試験4に比べて約 3 割少ないが、W-4 でみられる Ca^{2+} 濃度の低下の程度も小さく (導水による低下のピーク時で、試験3は 14.5mg L^{-1} 、試験4は 7.9mg L^{-1} ; Fig.10)、W-4 の地下水への浸透水の寄与はより限定的である。このことは、W-4 が調整池の直下流ではなく、浸透水の塊が水平方向に広がると推察されること (Fig.11) と整合的で、浸透水の塊が小さいほど水平方向への広がりによる影響がより一層小さくなるためと考えられる。

このように、砺波西中調整池の近傍にある地下水面付近を対象とした観測孔では、扇状地全体の地下水流動場における調整池の下流側ではないとみられるものの、流入水の浸透による地下水への寄与を確認することができる。一方、地下水面から約 10m の深度を対象とした観測孔では、ラドン濃度や主要イオン濃度から浸透水の到達を確認することはできなかった。このことは、必ずし

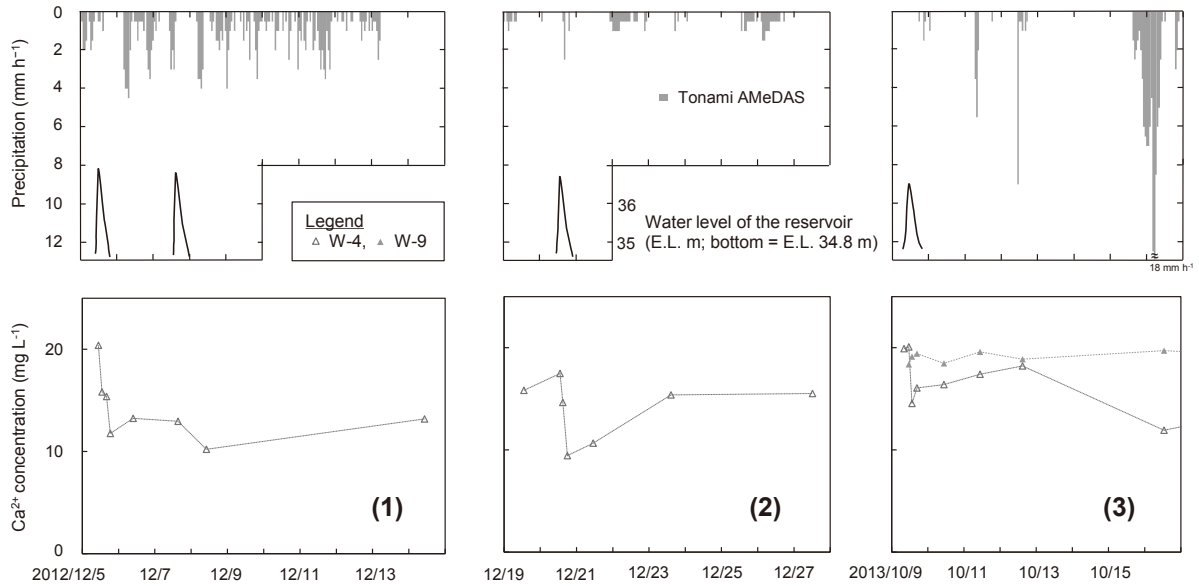


Fig.10 浸透試験（1：試験1，2：試験2，3：試験3）における地下水のCa²⁺濃度の変化
Variations in Ca²⁺ of groundwater adjacent to the reservoir, during the waterlogging tests (Tests 1, 2, and 3)

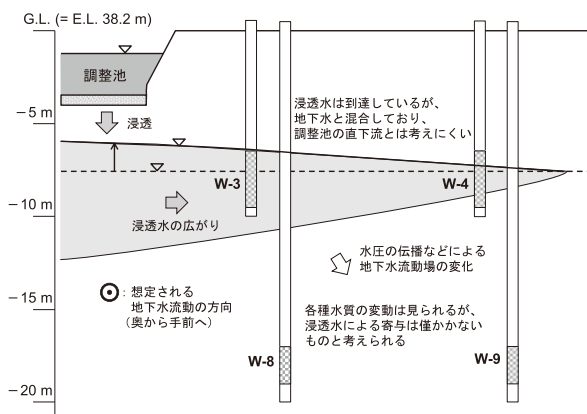


Fig.11 砺波西中調整池の近傍において推測される調整池からの浸透水の挙動の模式図

Schematic explanation for behavior of the percolating water in the aquifer adjacent to the Tonami-Nishinaka reservoir, during the waterlogging tests

も深層の地下水に浸透水が到達しないことを意味しないが、深層への地下水の到達までには時間が掛かる一方、浅層では浸透水の影響が比較的早く、かつ大きく出るといえる。よって、地下水環境への影響の把握のためには、まず浅層での水質変動のモニタリングが不可欠である。

VI 結 言

本研究では、砺波西中調整池で実施された浸透試験において、調整池への流入水と調整池の近傍に設置された

観測孔の地下水の主要イオン組成とラドン濃度の変化を観測した。また、調整池周辺の地下水の主要イオン組成を測定した。これらの結果を踏まえて、調整池への湛水が地下水環境に与える影響を把握するためのモニタリング方法について検討した。以下に、結果の概要を示す。

- ・地下水の主要イオン組成から、既往の報告と同様に、砺波西中調整池の周辺の地下水は、小矢部川からの涵養の影響を大きく受けていることが示された。また、人間活動の影響を受けた扇面からの浸透水による寄与を受けている可能性も考えられた。
- ・砺波西中調整池での浸透試験において、調整池近傍の地下水面付近については、ラドン濃度を指標として調整池からの浸透水による地下水への寄与を把握できるとともに、Ca²⁺やNO₃-Nの濃度変化もこれと整合的であった。
- ・調整池近傍の観測孔は、扇状地全体の地下水流動場における調整池の下流側ではないものの、水平方向に広がった浸透水の塊の影響を受けていることが示唆された。2013年の2回目の浸透試験（試験4）では、調整池直近の観測孔W-3において、地下水中の浸透水による寄与が最大で約95%を占めることが推定された。
- ・比較的深層の地下水を対象としている観測孔では、浸透試験後に各種水質が若干変動しているものの、ラドンやCa²⁺、NO₃-Nの濃度に明瞭な低下傾向がみられないことから、浸透水による寄与は僅かか、ないものと考えられる。
- ・上述の結果は、必ずしも深層の地下水に浸透水が到達しないことを意味しないが、深層への地下水の到達までには時間が掛かる一方、浅層では浸透水の影響が比較的早く、かつ大きく出ることから、地下水環境への

影響の把握のためには、まず浅層での水質変動のモニタリングが不可欠であるといえる。

謝辞：本研究を実施するにあたって、富山県砺波農林振興センター、応用地質株式会社、株式会社ウエノの関係各位には、浸透試験の実施や資料の提供、地下水試料の採取など多大なご尽力をいただいた。また、庄川左岸地区洪水調整池技術検討会に参画された各位からは、貴重なご意見を賜った。記して感謝申し上げる。

付録：水質測定結果の一覧

砺波西中調整池の周辺の民家井戸と観測孔の地下水ならびに農業用水について、主要イオン濃度の測定結果の一覧を **Table A1** に示す。また、浸透試験時における調整池近傍の地下水と調整池への流入水について、水質測定の結果の一覧を **Table A2** に示す。

参考文献

アメリカ土木学会 (2005)：地下水人工涵養の標準ガイドライン (肥田 登・水谷宣明・荒井 正訳), 築地書館, 193p.

Domenico, P. A. and F. W. Schwartz (1998): Physical and Chemical Hydrogeology (2nd ed.), John Wiley & Sons, Inc., 506p.

Grove, D. B. and W. W. Wood (1979): Prediction and Field Verification of Subsurface-Water Quality Changes During Artificial Recharge, Lubbock, Texas. *Ground Water* **17**, 250-257

濱田浩正・今泉真之・小前隆美 (1997)：ラドン濃度を指標とした地下水調査・解析法, 農業工学研究所報告, **36**, 17-50

肥田 登 (2002)：地下水人工涵養の実施と展望, 日本水文科学会誌, **32**, 63-70

肥田 登・石川悦郎・太田由紀子 (1999)：六郷扇状地における池を用いた地下水人工涵養の実験, 地下水学会誌, **41**, 23-33

IPCC (2007): Climate Change 2007: the physical science basis.

Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK

利部 慎 (2007)：地下水人工涵養の実施に伴う地下水温の対応：六郷扇状地の例, 秋大地理, **41**, 23-33

加藤 聡・水谷義彦・内田啓男・飯田忠三 (1984)：富山県庄川扇状地浅層地下水の水系区分, 地球化学, **18**, 1-9

水谷武司 (2012)：自然災害の予測と対策：地形・地盤条件を基軸として, 朝倉書店, 306p.

水谷義彦・小田松尚 (1983)：安定同位体比による富山県庄川扇状地地下水の涵養源および流動状況の研究, 地球化学, **17**, 1-9

水谷義彦・佐竹 洋・高島秀樹 (1987)：富山県庄川扇状地地下水の滞留時間, 地球化学, **21**, 49-54

中崎一之 (1965)：庄川水系地下水調査報告, 水道協会雑誌, **367**, 36-45

奥川光治・村塚理恵・畑 由紀・安田郁子・広瀬慎一 (2010)：休耕田を利用した地下水涵養における肥料成分の水質変化特性, 用水と廃水, **52**(5), 393-400

澁谷達也・松岡 樹・東 孝宏・和田健一・辻野 篤・南 幸男 (2008)：太郎丸調整池の設計と浸透挙動について, 水と土, **154**, 42-51

澁谷達也・黒田清一郎・瀧本裕士・和田健一 (2011)：庄川扇状地における浸透型洪水調整池の浸透挙動：扇状地地盤の高透水性を活用した洪水調整池の取り組み, 地盤工学会誌, **59**(2), 28-31

庄川扇状地水環境検討委員会 (2004)：流域における健全な水循環系の構築に向けて—富山県庄川扇状地—, 66p.

富山県 (2006)：富山県地下水指針, 93p.

山本莊毅 (1988)：日本の地下水 (297) 庄川扇状地の地下水, 月刊「水」, **30**(7), 75-77

和田一範・村瀬勝彦・富澤洋介 (2005)：地球温暖化に伴う降雨特性の変化と洪水・渇水リスクの評価に関する研究, 土木学会論文集, **796**, 23-37

受理年月日：平成26年10月27日

Table A1 砺波西中調整池周辺の地下水および農業用水の主要イオン濃度の測定結果
Concentrations of major ions of groundwater and irrigation water around the Tonami-Nishinaka reservoir

採水地点	採水日	地点標高	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ -N	C/A	Na/Cl
A0-1	2012/11/30	38	7.1	1.1	1.8	15.9	40.7	8.1	10.2	0.9	1.09	1.35
A0-2	2012/11/30	37	7.4	1.2	1.8	16.9	42.0	8.6	10.8	1.0	1.10	1.33
A0-3	2012/11/30	37	7.0	1.2	1.8	17.8	44.2	8.8	11.3	1.0	1.07	1.23
A0-4	2012/11/30	39	7.3	1.2	2.0	16.3	41.7	9.3	9.0	1.2	1.09	1.21
A1-1	2012/11/30	39	7.3	1.3	1.9	20.0	49.3	7.8	16.2	1.2	1.04	1.44
A1-2	2012/11/30	39	7.2	1.1	1.7	15.5	41.1	8.4	9.1	0.9	1.08	1.32
A1-3	2012/11/30	38	7.1	1.1	1.8	17.6	46.8	8.9	11.1	1.1	1.03	1.24
A2-1	2012/11/30	34	7.0	1.5	1.8	17.8	44.9	8.6	10.2	1.1	1.09	1.25
A2-2	2012/11/30	34	10.4	1.3	2.3	21.5	49.7	15.7	12.8	1.2	1.08	1.02
A2-3	2012/11/30	34	10.0	1.0	2.1	22.4	53.0	16.4	10.2	0.7	1.10	0.94
A3-1	2012/11/30	35	7.1	0.6	1.7	13.3	36.2	9.8	7.6	0.7	1.04	1.12
A3-2	2012/11/30	35	6.9	0.9	1.7	16.4	42.0	8.5	9.7	0.7	1.09	1.25
A3-3	2012/11/30	35	7.4	0.9	1.9	14.6	41.1	8.3	9.2	0.7	1.07	1.36
A6-1	2012/12/01	39	6.3	1.4	2.3	23.2	67.3	8.0	12.1	1.5	0.98	1.22
A6-2	2012/12/01	42	6.7	1.1	2.4	25.0	67.0	7.9	13.0	1.5	1.04	1.31
A6-3	2012/12/01	42	6.6	1.1	2.7	25.0	67.2	8.1	10.8	1.5	1.08	1.26
B3	2012/12/01	35	6.3	1.3	2.0	23.1	60.0	7.3	13.1	1.6	1.03	1.34
B4	2012/12/01	31	6.7	2.1	2.5	28.3	76.3	7.1	14.1	1.3	1.07	1.46
B5	2012/12/01	33	8.3	2.2	3.0	25.0	61.0	10.3	17.7	1.7	1.07	1.25
B6	2012/12/01	43	6.5	1.1	1.6	18.4	45.1	8.2	10.9	1.1	1.07	1.24
B7	2012/12/01	40	6.6	1.5	1.9	15.0	47.3	8.0	9.3	1.4	0.95	1.27
B8	2012/12/01	46	7.1	0.9	1.7	16.2	38.4	9.1	10.5	0.8	1.10	1.20
C1	2012/12/01	41	4.3	1.5	1.0	9.3	24.9	5.6	5.6	0.4	1.08	1.18
C3	2012/12/01	35	4.1	0.6	1.1	12.1	42.8	3.8	6.7	0.4	0.91	1.66
C4	2012/12/01	31	3.8	0.7	1.1	12.2	38.7	4.2	7.2	0.4	0.95	1.39
C5	2012/12/01	33	7.9	2.9	1.5	11.9	33.9	12.1	7.7	2.4	0.94	1.01
C6	2012/12/01	43	5.9	1.3	0.9	8.0	21.3	8.3	5.1	0.5	1.05	1.10
C8	2012/12/01	46	4.1	1.2	0.9	8.7	24.4	4.8	5.2	0.3	1.08	1.32
C9	2012/12/01	31	4.1	0.9	1.2	10.9	30.2	4.8	6.4	0.4	1.06	1.33
A0-1	2013/02/13	38	7.3	1.1	2.0	16.5	40.7	9.1	11.4	1.1	1.07	1.24
A0-2	2013/02/13	37	7.2	1.0	2.0	16.4	43.3	9.4	12.4	1.3	1.00	1.19
A0-3	2013/02/13	37	7.6	1.2	2.1	18.1	43.3	10.0	12.2	1.3	1.08	1.17
A0-4	2013/02/13	39	6.9	1.0	1.9	14.4	45.0	8.8	9.8	0.9	0.96	1.22
A1-1	2013/02/13	39	7.1	1.2	2.2	18.9	50.5	9.1	13.3	1.5	1.00	1.20
A1-2	2013/02/13	39	7.0	1.0	2.0	14.6	39.2	9.1	9.7	1.0	1.04	1.19
A1-3	2013/02/13	38	7.3	1.1	2.1	17.0	47.7	9.1	12.5	1.3	0.98	1.24
A2-1	2013/02/13	34	7.8	1.3	1.9	18.2	43.7	9.9	11.8	1.0	1.10	1.22
A2-2	2013/02/13	34	10.4	1.4	2.3	20.1	48.3	19.6	14.4	1.2	0.97	0.82
A2-3	2013/02/13	34	10.9	1.5	2.7	22.5	54.4	15.8	13.6	1.2	1.09	1.07
A3-1	2013/02/13	35	8.1	0.9	1.8	13.0	34.7	10.2	7.8	0.7	1.10	1.23
A3-2	2013/02/13	35	8.2	1.0	2.2	18.0	42.5	11.8	11.6	0.9	1.09	1.08
A3-3	2013/02/13	35	7.4	1.1	2.1	14.2	40.3	10.3	8.6	1.0	1.03	1.11
A6-1	2013/02/13	39	7.1	1.3	2.7	24.1	59.3	8.8	13.1	1.6	1.10	1.23
A6-2	2013/02/13	42	6.6	1.1	2.6	23.2	59.9	8.0	12.7	1.4	1.07	1.28
A6-3	2013/02/13	42	6.9	1.3	2.9	24.4	65.5	8.8	11.5	1.6	1.07	1.21
B3	2013/02/12	35	7.0	1.4	2.7	24.2	61.0	10.2	10.9	1.7	1.08	1.06
B4	2013/02/12	31	6.9	1.4	2.9	28.1	75.7	9.3	14.7	1.5	1.03	1.15
B5	2013/02/12	33	9.0	2.2	3.6	25.9	63.8	15.6	23.1	1.2	0.99	0.89
B6	2013/02/12	43	6.4	1.2	1.9	17.2	52.6	11.3	10.5	0.9	0.90	0.87
B7	2013/02/12	40	6.4	1.6	2.0	14.1	35.6	10.0	10.5	0.9	1.03	0.98
B8	2013/02/12	46	7.5	1.1	2.1	17.3	43.3	9.5	10.8	1.0	1.10	1.22
C1	2013/02/12	41	6.5	1.0	1.2	8.5	25.3	8.7	6.1	0.1	1.04	1.16
C3	2013/02/12	35	5.1	0.7	1.3	9.9	33.9	6.7	6.3	0.3	0.94	1.17
C4	2013/02/12	31	5.7	0.7	1.4	10.6	26.6	8.2	7.2	0.3	1.09	1.08
C5	2013/02/12	33	9.0	1.7	2.3	19.3	47.1	15.1	13.8	0.6	1.04	0.91
C6	2013/02/12	43	14.6	0.9	1.3	9.1	25.6	19.9	6.2	0.3	1.08	1.12
C8	2013/02/12	46	7.0	0.8	1.3	8.9	27.0	8.1	6.8	0.1	1.06	1.33
C9	2013/02/12	31	7.4	0.7	1.2	8.8	30.5	9.9	5.0	0.2	0.98	1.16

地点標高は、地理院地図 (<http://maps.gsi.go.jp/>) によって数値地図5mメッシュ標高値を読み取り、単位はm (小数第一位は四捨五入)。主要イオン濃度の単位はmg L⁻¹。C/Aは陽イオンと陰イオンの当量比。Na/ClはNa⁺とCl⁻の当量比を表す。全試料のNH₄⁺とNO₂⁻は、窒素量 (それぞれNH₄-NとNO₂-N) で0.2mg L⁻¹を超えては検出されなかった。

Table A2 浸透試験における直近の地下水と流入水の各種水質の測定結果
Results of the water quality measurements during the waterlogging tests at the Tonami-Nishinaka reservoir

採水日時	EC	pH	DO	ORP	水温	²²² Rn	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ -N	C/A
試験1 (2012年1回目)															
W-0															
2012/12/05 11:10	—	—	—	—	—	—	4.5	1.0	1.1	8.6	30.5	6.1	5.8	0.2	0.92
2012/12/05 12:35	—	—	—	—	—	—	5.1	1.1	1.1	10.6	28.2	7.4	7.3	0.3	1.02
W-4															
2012/12/05 10:40	—	—	—	—	—	—	30.8	1.4	2.0	20.4	52.1	42.6	12.3	1.9	1.04
2012/12/05 13:05	—	—	—	—	—	—	10.9	1.3	1.9	15.8	53.3	14.3	10.8	1.5	0.90
2012/12/05 16:00	—	—	—	—	—	—	9.0	1.2	1.7	15.4	40.7	13.1	10.5	1.4	0.98
2012/12/05 18:30	—	—	—	—	—	—	7.0	1.1	1.4	11.8	36.4	10.1	9.6	0.8	0.90
2012/12/06 9:40	—	—	—	—	—	—	7.8	1.2	1.3	13.2	32.0	9.2	9.7	0.8	1.09
2012/12/07 15:20	—	—	—	—	—	—	6.7	1.2	1.4	13.0	37.2	9.1	10.1	0.9	0.95
2012/12/08 10:05	—	—	—	—	—	—	6.9	1.0	1.1	10.2	21.5	14.1	8.8	0.4	0.97
2012/12/14 10:20	—	—	—	—	—	—	9.8	1.1	1.4	13.2	34.2	15.6	9.6	1.1	0.97
試験2 (2012年2回目)															
W-0															
2012/12/20 11:10	—	—	—	—	—	—	6.4	0.5	1.1	9.1	27.0	9.1	7.3	0.3	0.96
2012/12/20 13:30	—	—	—	—	—	—	4.8	0.6	1.0	8.0	30.2	5.9	5.3	0.1	0.90
W-4															
2012/12/19 13:10	—	—	—	—	—	—	8.0	1.4	1.7	15.8	43.0	11.8	11.4	1.9	0.93
2012/12/20 13:05	—	—	—	—	—	—	9.7	1.4	1.8	17.5	47.4	9.8	12.1	1.8	1.03
2012/12/20 14:55	—	—	—	—	—	—	16.1	1.2	1.5	14.6	61.0	10.4	12.2	1.6	0.96
2012/12/20 18:00	—	—	—	—	—	—	15.9	1.0	0.9	9.4	37.7	9.3	11.7	0.9	1.07
2012/12/21 11:00	—	—	—	—	—	—	6.8	1.0	1.2	10.7	25.1	9.2	9.7	0.7	1.03
2012/12/23 14:35	—	—	—	—	—	—	9.4	0.8	1.3	15.4	37.8	9.5	9.5	1.4	1.10
2012/12/27 12:15	—	—	—	—	—	—	7.7	0.9	1.7	15.5	41.4	10.0	10.2	2.0	0.96
試験3 (2013年1回目)															
W-0															
2013/10/09 8:32	7.1	7.4	18.1	—	—	—	3.3	0.7	1.1	9.2	29.4	4.1	6.4	0.3	0.95
2013/10/09 9:24	7.6	6.8	18.7	—	—	—	3.3	0.7	1.1	9.6	33.4	3.4	5.8	0.2	0.94
2013/10/09 11:04	7.7	8.0	18.7	—	—	—	3.5	0.6	1.1	9.9	28.5	4.3	7.0	0.2	1.00
W-4															
2013/09/24 12:20	15.7	6.0	16.8	—	—	—	7.0	1.4	2.0	18.6	49.5	11.0	11.9	1.9	0.95
2013/10/09 8:10	15.9	6.4	17.5	—	—	—	7.6	1.5	2.1	19.9	45.3	12.0	13.3	2.2	1.02
2013/10/09 11:10	16.2	6.5	17.5	—	—	—	7.5	1.5	2.2	20.1	49.9	13.4	15.1	2.4	0.92
2013/10/09 13:33	15.1	6.4	17.0	—	—	—	6.4	1.2	1.7	16.1	46.1	7.3	9.0	1.4	1.00
2013/10/09 16:45	12.9	6.3	15.3	—	—	—	8.9	1.7	2.3	16.4	40.3	16.0	13.0	1.8	0.95
2013/10/10 10:50	12.8	6.3	16.4	—	—	—	6.5	1.3	1.6	14.5	43.1	6.2	8.9	1.1	1.03
2013/10/11 10:45	14.0	6.6	16.4	—	—	—	7.1	1.4	1.9	17.4	44.3	8.7	10.7	1.6	1.05
2013/10/12 14:40	15.2	6.6	16.4	—	—	—	7.1	1.4	1.9	18.2	45.9	11.0	13.8	2.0	0.95
2013/10/16 12:55	10.4	6.7	15.8	—	—	—	5.7	1.2	1.3	11.9	33.7	6.7	10.6	0.9	0.95
2013/10/23 11:00	13.0	6.4	—	—	—	—	7.0	1.4	1.8	16.9	39.5	9.1	10.0	1.5	1.09
2013/10/30 9:00	14.0	6.2	—	—	—	—	6.9	1.4	1.9	17.1	45.3	9.1	11.0	1.4	1.01
W-9															
2013/09/24 11:12	16.0	6.7	15.8	—	—	—	7.9	1.2	2.3	19.6	46.5	13.3	15.4	1.4	0.99
2013/10/09 8:10	16.4	6.8	16.4	—	—	—	7.4	1.1	2.1	18.1	44.3	12.2	14.5	1.4	0.97
2013/10/09 11:15	15.4	6.4	15.9	—	—	—	7.4	1.1	2.1	18.4	46.2	9.4	12.2	1.0	1.07
2013/10/09 13:28	16.1	6.5	16.5	—	—	—	7.7	1.2	2.2	19.1	43.1	13.4	16.5	1.6	0.97
2013/10/09 16:42	15.7	6.3	15.3	—	—	—	7.8	1.2	2.2	19.4	48.8	13.7	16.8	1.6	0.92
2013/10/10 10:40	15.5	6.2	15.2	—	—	—	7.4	1.1	2.2	18.5	46.5	12.6	15.0	1.4	0.95
2013/10/11 10:40	14.5	6.6	15.2	—	—	—	7.8	1.2	2.3	19.6	46.7	12.8	16.0	1.5	0.98
2013/10/12 14:50	15.3	6.5	14.9	—	—	—	7.6	1.2	2.2	18.9	49.5	13.3	16.4	1.5	0.91
2013/10/16 12:50	15.4	6.8	15.2	—	—	—	7.9	1.2	2.3	19.7	45.2	10.8	13.1	1.3	1.10
2013/10/23 10:50	15.0	6.4	—	—	—	—	7.5	1.2	2.2	18.5	42.2	11.0	12.9	1.1	1.08
2013/10/30 9:10	15.0	6.3	—	—	—	—	7.6	1.2	2.2	18.8	42.7	10.9	13.2	1.2	1.08
試験4 (2013年2回目)															
Y-0															
2013/11/26 9:30	8.6	7.1	12.1	258	8.6	0.1	4.2	0.7	1.1	8.6	27.8	5.3	4.4	n.d.	1.03
2013/11/26 15:33	8.3	7.0	11.8	238	8.0	0.1	4.3	0.6	1.2	9.7	30.0	5.0	5.9	0.1	1.03
W-3															
2013/11/25 16:05	20.6	7.2	7.2	217	15.6	22.9	9.3	1.5	1.9	18.1	47.9	8.8	12.3	1.4	1.08
2013/11/26 8:23	25.2	6.5	6.6	222	13.5	22.2	29.2	1.5	2.0	18.6	99.6	10.9	16.3	1.4	1.01
2013/11/26 10:25	24.6	6.5	6.0	238	14.5	22.1	32.7	1.5	1.9	17.5	119.6	9.6	15.0	0.9	0.95

Table A2 浸透試験における直近の地下水と流入水の各種水質の測定結果（続き）

		(cont.)														
採水日時	EC	pH	DO	ORP	水温	²²² Rn	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ -N	C/A	
試験4（続き）																
W-3																
2013/11/26 11:05	26.5	6.5	6.1	237	13.5	20.3	38.0	1.5	1.9	18.2	115.1	9.8	16.4	1.1	1.07	
2013/11/26 12:03	24.0	6.4	6.1	302	14.6	24.8	31.0	1.4	1.8	17.2	104.1	9.5	15.1	1.0	1.01	
2013/11/26 13:05	25.7	6.7	8.6	271	15.4	12.2	50.2	1.5	1.0	9.9	123.2	10.6	13.4	0.9	1.05	
2013/11/26 14:03	15.7	6.7	9.7	257	16.4	8.0	18.9	1.2	0.9	10.9	50.0	12.9	8.2	0.7	1.05	
2013/11/26 15:02	12.1	6.6	9.7	274	16.4	5.9	12.2	0.9	0.8	8.7	33.0	8.2	7.5	0.5	1.10	
2013/11/26 16:03	10.8	6.6	9.9	263	16.4	4.3	10.9	1.0	0.8	9.5	33.5	7.4	8.6	0.3	1.09	
2013/11/26 17:02	9.7	6.5	10.0	280	16.4	3.4	9.2	0.9	0.8	8.5	28.4	6.5	7.5	0.4	1.10	
2013/11/26 18:01	9.3	6.5	10.0	272	16.2	2.9	8.1	0.9	0.7	7.6	27.6	6.1	6.9	0.4	1.03	
2013/11/26 19:02	9.3	6.5	10.0	328	16.1	2.4	8.1	0.8	0.7	7.8	29.3	6.0	7.3	0.4	0.99	
2013/11/26 20:01	9.1	6.6	10.2	326	14.6	2.3	7.9	0.7	0.7	7.6	29.1	5.4	7.0	0.3	1.00	
2013/11/26 21:00	8.8	6.3	10.3	354	15.1	2.2	8.6	0.9	0.7	8.6	29.1	6.0	7.0	0.2	1.10	
2013/11/26 22:00	9.3	6.5	10.2	357	14.8	2.1	9.8	0.8	0.8	8.1	33.9	6.2	7.1	0.2	1.02	
2013/11/26 23:02	9.0	6.5	10.3	347	14.5	2.0	7.9	0.8	0.6	7.0	28.8	5.6	6.7	0.2	0.98	
2013/11/27 0:00	9.0	6.7	10.3	347	14.4	1.8	8.5	0.8	0.7	7.4	30.2	6.1	7.1	0.2	0.98	
2013/11/27 1:00	9.0	6.4	10.5	347	14.3	1.7	7.6	0.7	0.7	7.6	28.4	6.3	7.1	0.2	0.98	
2013/11/27 2:00	9.2	6.5	10.5	332	14.1	1.5	8.9	0.7	0.7	7.4	26.5	6.1	6.4	0.3	1.09	
2013/11/27 3:10	11.7	6.7	10.1	334	13.9	2.2	16.3	0.8	0.6	6.8	44.6	6.2	7.7	0.3	1.03	
2013/11/27 4:01	13.4	6.8	9.6	307	13.7	4.0	20.0	0.8	0.6	7.0	52.8	6.8	8.5	0.3	1.03	
2013/11/27 5:02	14.0	6.7	9.7	321	14.0	4.7	21.2	0.8	0.5	5.7	56.9	6.5	8.2	0.3	0.97	
2013/11/27 6:00	14.6	6.7	9.5	298	14.2	5.0	24.1	0.8	0.5	5.7	65.7	6.1	7.9	0.4	0.97	
2013/11/27 7:03	14.7	6.7	9.3	275	14.1	5.4	25.4	0.8	0.6	6.4	54.1	8.5	10.5	0.5	1.08	
2013/11/27 8:05	15.5	6.8	9.3	260	14.1	5.5	27.2	1.0	0.6	6.6	64.5	8.8	11.0	0.5	1.01	
2013/11/27 9:09	14.7	6.6	9.1	244	15.5	5.5	26.8	0.9	0.7	6.7	68.1	8.7	11.4	0.5	0.97	
2013/11/27 10:01	15.3	6.7	9.2	238	15.5	5.6	26.4	0.9	0.6	7.0	61.0	7.8	11.5	0.5	1.06	
2013/11/27 11:00	16.2	6.8	9.1	222	15.8	6.2	29.3	0.9	0.6	6.5	78.6	6.7	9.4	0.3	0.99	
2013/11/27 12:00	15.6	7.0	8.8	235	15.8	5.6	27.8	1.0	0.4	6.1	63.4	6.3	9.4	0.4	1.10	
2013/11/27 15:13	16.0	7.0	8.8	205	15.2	5.3	27.7	1.0	0.7	7.3	66.9	6.8	9.7	0.3	1.09	
2013/11/27 18:22	19.4	7.0	8.8	215	15.0	6.0	22.8	0.8	0.6	6.1	59.9	5.9	8.2	0.4	1.01	
2013/11/27 21:00	26.6	6.9	8.7	198	15.3	5.8	27.2	0.9	0.7	7.2	68.2	6.5	8.6	0.3	1.08	
2013/11/28 0:05	15.0	6.7	8.4	201	14.4	5.7	27.1	0.9	0.7	7.6	67.5	7.0	9.4	0.4	1.07	
2013/11/28 3:03	15.8	6.7	8.4	208	14.3	6.7	26.2	0.9	0.8	7.8	69.2	6.7	8.8	0.3	1.06	
2013/11/28 6:02	15.7	6.8	8.3	226	13.4	9.3	27.4	1.0	0.7	8.6	69.2	6.3	9.5	0.7	1.09	
2013/11/28 9:00	16.7	6.7	8.0	222	14.5	8.9	28.8	1.0	0.5	7.1	69.7	6.0	9.3	0.4	1.09	
2013/11/28 12:00	18.3	6.9	8.2	217	14.0	8.6	22.9	0.6	0.5	6.1	73.9	4.4	6.4	0.2	0.92	
2013/11/28 16:28	20.2	6.9	8.3	224	14.5	8.3	38.7	0.9	1.0	14.4	119.8	6.0	12.2	0.4	1.04	
2013/11/29 9:06	21.9	7.2	7.9	215	14.1	7.7	43.7	0.9	0.5	4.7	98.1	7.1	13.0	0.3	1.05	
2013/11/29 16:15	24.2	7.3	7.7	202	13.2	9.6	45.0	0.7	0.4	3.6	105.8	5.2	10.9	0.3	1.02	
2013/12/02 9:01	38.5	7.5	6.5	203	14.1	8.7	83.5	0.9	0.3	2.5	192.4	6.6	16.3	0.4	1.02	
2013/12/03 9:18	44.2	7.1	6.1	196	14.6	10.6	98.2	1.3	0.7	9.2	227.2	7.6	20.6	0.4	1.10	
W-4																
2013/11/25 15:27	16.0	6.3	7.2	223	15.9	21.4	22.4	2.2	0.2	15.2	90.4	7.5	13.0	n.d.	0.92	
2013/11/26 9:08	15.9	6.2	7.1	279	14.6	25.1	9.8	1.5	2.1	19.1	54.5	10.1	13.6	1.5	1.01	
2013/11/26 10:09	16.2	6.0	7.7	258	14.1	23.8	9.6	1.6	2.1	18.9	52.8	10.2	12.2	1.2	1.06	
2013/11/26 11:51	15.9	6.0	7.5	305	14.3	21.8	9.4	1.4	2.2	19.5	52.6	10.1	13.3	1.6	1.04	
2013/11/26 12:30	16.1	6.0	7.6	325	14.6	23.9	8.5	1.4	1.9	17.0	53.8	8.7	11.5	1.3	0.96	
2013/11/26 13:23	16.6	6.1	7.6	307	14.6	27.2	10.5	1.5	2.1	18.5	56.8	9.3	12.7	1.7	1.01	
2013/11/26 14:20	14.8	6.3	9.3	251	15.6	11.5	14.3	1.2	1.3	12.1	42.5	7.7	11.8	1.7	1.06	
2013/11/26 15:26	13.6	6.3	9.6	275	15.3	8.9	9.1	1.0	1.1	10.6	34.5	7.1	12.3	1.3	0.93	
2013/11/26 16:19	12.3	6.3	9.6	287	15.7	7.3	9.9	1.1	1.1	11.3	27.5	7.3	14.0	1.2	1.08	
2013/11/26 17:17	11.3	6.3	9.6	290	15.8	6.2	9.2	1.0	1.0	10.1	28.2	7.0	13.1	1.0	1.01	
2013/11/26 18:26	11.5	6.3	9.7	330	15.6	5.8	9.4	1.0	1.0	9.5	29.1	7.1	12.2	0.8	1.00	
2013/11/26 19:19	11.9	6.3	9.6	341	15.1	5.9	8.6	0.8	0.8	7.9	31.1	5.7	9.9	0.6	0.92	
2013/11/26 20:17	13.5	6.4	9.4	351	15.1	7.8	14.5	1.1	1.2	10.8	40.7	7.8	14.2	1.1	1.03	
2013/11/26 21:40	14.0	6.3	8.7	376	14.4	13.0	11.8	1.2	1.3	12.2	47.7	7.7	11.8	1.1	0.95	
2013/11/26 22:40	13.3	6.2	8.7	363	14.0	12.6	10.6	1.1	1.3	11.3	42.5	8.2	11.3	1.1	0.94	
2013/11/26 23:40	12.9	6.2	8.9	344	13.9	13.5	10.5	1.2	1.3	12.0	41.1	8.2	11.1	1.2	0.98	
2013/11/27 0:35	12.2	6.2	8.9	374	14.2	13.0	9.7	1.2	1.4	11.9	41.4	7.8	8.8	1.0	1.01	
2013/11/27 1:40	12.2	6.2	9.0	351	13.8	12.3	9.0	1.1	1.3	11.2	31.1	7.6	10.8	0.8	1.07	
2013/11/27 2:37	11.8	6.2	9.1	346	14.1	11.1	8.5	1.1	1.3	11.1	36.0	7.8	10.4	0.8	0.98	
2013/11/27 3:50	11.6	6.2	9.1	326	13.7	12.7	8.7	1.1	1.2	11.1	35.7	7.8	10.9	1.0	0.96	

Table A2 浸透試験における直近の地下水と流入水の各種水質の測定結果 (続き)

		(cont.)														
採水日時	EC	pH	DO	ORP	水温	²²² Rn	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ -N	C/A	
試験4 (続き)																
W-4																
2013/11/27 4:45	12.2	6.2	9.2	334	13.0	12.7	8.1	1.1	1.1	10.5	33.5	6.5	9.1	0.5	1.04	
2013/11/27 5:33	10.8	6.2	9.1	319	13.6	11.3	7.2	1.0	1.1	9.5	32.8	5.9	8.8	0.6	0.97	
2013/11/27 6:38	11.0	6.2	9.2	280	13.4	11.9	7.6	1.0	1.1	9.7	28.1	7.8	10.6	0.7	0.98	
2013/11/27 7:45	11.5	6.3	9.2	282	13.3	13.2	9.5	1.2	1.2	11.0	33.2	8.7	13.2	0.9	0.97	
2013/11/27 8:33	11.2	6.2	9.3	261	14.4	12.0	8.0	1.2	1.2	11.2	32.6	7.8	10.6	0.6	1.01	
2013/11/27 9:35	11.3	6.3	9.2	249	14.9	12.8	8.2	1.0	1.3	10.9	27.0	9.4	12.5	1.0	0.99	
2013/11/27 10:17	11.7	6.3	9.1	251	15.3	11.7	8.1	1.1	1.2	10.3	29.7	7.1	9.9	0.6	1.06	
2013/11/27 11:17	11.3	6.3	9.2	244	15.3	10.8	8.7	1.1	1.3	11.0	34.9	6.8	9.8	0.7	1.04	
2013/11/27 12:23	—	—	9.2	—	15.0	12.0	8.7	1.2	1.2	11.1	35.0	7.0	10.1	0.7	1.03	
2013/11/27 15:59	11.2	6.2	9.2	247	14.8	11.7	7.2	1.1	1.1	9.9	29.6	6.7	8.9	0.5	1.03	
2013/11/27 18:57	10.6	6.2	9.3	239	14.7	11.3	6.8	1.1	1.2	10.0	24.9	7.0	8.4	0.9	1.09	
2013/11/27 21:40	11.0	6.0	9.2	223	15.0	11.0	7.3	1.2	1.2	10.7	27.3	6.9	9.8	0.7	1.09	
2013/11/28 0:46	10.7	6.1	9.2	232	14.1	11.1	6.7	1.1	1.2	10.9	27.0	7.1	9.3	0.6	1.09	
2013/11/28 3:50	11.3	6.2	9.2	229	14.0	12.0	7.0	1.2	1.2	11.9	32.8	6.6	7.9	0.7	1.10	
2013/11/28 6:45	11.2	6.1	9.1	235	13.6	13.0	7.3	1.2	1.4	11.5	31.7	7.7	9.0	0.8	1.06	
2013/11/28 9:22	11.4	6.2	8.9	235	13.7	15.0	7.1	1.2	1.3	12.0	30.2	7.9	9.4	0.6	1.10	
2013/11/28 12:18	11.3	6.3	8.8	228	14.3	13.5	6.8	1.2	1.2	11.1	31.6	7.4	9.9	0.8	0.99	
2013/11/28 16:54	12.0	6.1	8.8	252	14.8	11.9	7.2	1.3	1.4	11.9	34.7	7.5	10.1	0.9	1.00	
2013/11/29 9:32	13.0	6.3	8.3	234	13.9	16.0	8.6	1.3	1.5	13.8	45.5	7.4	9.9	1.2	0.98	
2013/11/29 16:44	14.3	6.2	8.4	246	13.9	16.9	9.2	1.3	1.6	14.7	51.1	7.7	9.8	1.1	0.97	
2013/12/02 9:23	12.0	6.5	9.1	233	15.1	16.9	7.5	1.3	1.4	12.6	34.5	6.9	10.9	0.7	1.07	
2013/12/03 9:44	13.0	6.2	8.4	213	15.1	21.1	7.3	1.3	1.5	13.5	37.5	7.7	8.9	0.8	1.07	
W-8																
2013/11/25 14:50	24.6	6.8	6.5	111	14.6	24.3	6.5	1.1	1.9	15.9	43.7	8.6	10.5	1.0	1.00	
2013/11/26 8:46	16.8	6.2	7.1	232	12.5	26.4	7.8	1.2	2.2	19.4	47.9	11.0	13.6	1.0	1.05	
2013/11/26 10:15	15.8	6.2	7.2	249	12.9	31.1	7.7	1.2	2.2	19.3	50.0	10.9	14.9	1.3	0.99	
2013/11/26 11:25	16.0	6.2	7.8	325	12.6	30.2	8.3	1.3	2.2	20.8	46.3	11.0	14.6	1.4	1.10	
2013/11/26 12:11	15.7	6.3	7.6	285	13.1	36.6	8.0	1.3	2.3	19.9	46.3	10.6	15.9	1.3	1.06	
2013/11/26 13:12	17.1	6.4	8.6	296	14.1	35.8	7.9	1.2	2.2	19.1	48.8	10.5	13.4	1.1	1.04	
2013/11/26 14:07	16.1	6.3	7.8	264	13.7	20.2	8.8	1.5	2.2	21.6	52.0	11.5	13.3	1.2	1.09	
2013/11/26 15:07	15.7	6.2	7.7	293	13.1	37.3	7.6	1.1	2.2	18.7	48.6	9.8	12.8	1.1	1.04	
2013/11/26 16:07	15.7	6.2	7.5	301	12.3	36.9	7.4	1.1	2.1	18.0	45.2	9.7	13.2	1.3	1.03	
2013/11/26 17:07	15.6	6.0	7.6	292	13.2	38.2	7.3	1.1	2.1	17.7	49.5	10.1	13.4	1.2	0.96	
2013/11/26 18:08	15.8	6.1	7.5	300	13.2	39.3	7.2	1.1	2.0	17.3	49.0	10.1	13.3	1.2	0.94	
2013/11/26 19:07	15.7	6.1	7.6	342	13.3	37.3	7.7	1.1	2.0	17.8	52.1	10.5	13.5	1.3	0.93	
2013/11/26 20:06	15.7	6.1	7.6	348	12.8	33.7	7.2	1.1	2.0	17.1	46.2	9.8	12.9	1.2	0.98	
2013/11/26 21:13	15.8	6.0	7.9	367	12.3	31.5	7.5	1.1	2.2	18.6	53.7	9.6	12.6	1.0	0.98	
2013/11/26 22:12	15.8	6.0	7.7	369	12.4	27.2	7.6	1.1	2.1	17.8	45.8	10.6	13.1	1.5	0.99	
2013/11/26 23:15	15.6	6.1	7.3	356	12.4	27.8	8.0	1.2	2.2	18.5	48.8	10.6	13.5	1.4	1.00	
2013/11/27 0:12	15.7	6.0	8.1	370	12.5	27.9	7.8	1.2	2.1	18.3	43.4	10.3	13.0	1.4	1.06	
2013/11/27 1:15	15.5	6.0	8.2	361	12.1	28.9	7.5	1.2	2.1	18.3	42.3	10.0	12.4	1.3	1.09	
2013/11/27 2:12	15.6	6.0	8.1	345	12.3	28.8	7.7	1.1	2.1	18.4	44.1	9.7	13.5	1.3	1.07	
2013/11/27 3:22	15.4	6.0	8.2	345	12.0	34.5	6.4	1.0	1.7	15.0	46.7	8.2	11.4	1.0	0.92	
2013/11/27 4:11	15.3	6.1	8.2	324	12.2	29.7	7.1	1.1	2.0	16.9	42.6	8.8	12.4	1.2	1.04	
2013/11/27 5:12	15.5	6.1	8.2	328	12.0	32.1	7.7	1.1	2.1	18.5	48.8	9.9	13.8	1.3	1.00	
2013/11/27 6:12	15.4	6.1	8.2	309	11.8	29.8	7.5	1.1	2.1	17.9	46.2	9.8	13.5	1.5	1.00	
2013/11/27 7:15	15.4	6.1	8.1	284	12.2	32.6	8.2	1.2	2.3	19.4	43.7	12.3	16.3	1.6	1.02	
2013/11/27 8:15	15.5	6.0	8.3	278	12.5	33.4	8.1	1.2	2.2	19.1	48.3	12.7	17.2	1.8	0.93	
2013/11/27 9:12	15.5	6.1	8.0	264	13.3	37.5	8.1	1.2	2.3	19.5	45.6	13.0	17.2	1.7	0.97	
2013/11/27 10:06	15.5	6.2	7.9	266	13.6	33.8	9.6	1.2	2.5	20.2	50.0	13.9	18.3	1.6	0.97	
2013/11/27 11:05	15.6	6.1	8.0	252	13.6	34.0	8.2	1.2	2.1	19.0	44.8	9.8	14.0	1.2	1.09	
2013/11/27 12:06	15.5	6.2	7.9	254	13.7	29.6	6.9	0.9	1.8	16.3	49.5	7.7	10.9	1.1	0.96	
2013/11/27 15:29	15.7	6.2	7.9	236	13.5	31.9	7.7	1.2	2.2	19.7	51.6	10.6	12.9	1.0	1.03	
2013/11/27 18:35	15.7	6.2	8.0	229	13.3	33.4	7.3	1.0	2.0	16.8	49.3	9.5	12.4	1.2	0.95	
2013/11/27 21:13	16.4	6.2	8.4	217	14.3	22.8	7.2	1.2	2.1	18.6	48.8	8.9	12.5	1.0	1.05	
2013/11/28 0:23	15.7	6.3	8.0	216	12.7	30.3	8.1	1.2	2.2	18.7	46.7	9.9	14.0	1.4	1.05	
2013/11/28 3:18	15.5	6.1	7.9	233	12.5	33.5	7.0	1.1	2.0	16.4	48.3	8.2	11.4	1.0	0.99	
2013/11/28 6:15	15.6	6.1	7.7	240	12.2	31.1	5.7	0.9	1.6	13.9	42.2	6.6	8.9	0.7	0.99	
2013/11/28 9:08	15.7	6.1	7.6	246	12.6	28.4	8.7	1.3	2.2	19.1	47.4	10.5	13.6	1.5	1.06	
2013/11/28 12:06	15.5	6.2	7.9	233	13.0	33.2	7.6	1.1	2.0	17.4	44.1	8.7	13.4	0.9	1.06	

Impact of percolating water on the groundwater environment during waterlogging in a permeable flood-control reservoir

— an application of major ions and radon in groundwater to indicating percolation contribution —

YOSHIMOTO Shuhei*, SHIBUYA Tatsuya**, SUDANI Gaku**, KURODA Seiichiro***,
TSUCHIHARA Takeo*, SHIRAHATA Katsushi* and ISHIDA Satoshi*

*Water Resources Engineering, Renewable Resources Engineering Division

**Tonami Agriculture and Forestry Promotion Center, Toyama Prefecture

***Engineering Analysis, Facilities and Geotechnical Engineering Research Division

Abstract

Measurement of ^{222}Rn in the groundwater during waterlogging tests revealed that percolating water from a permeable flood-control reservoir influenced the adjacent aquifer. The ^{222}Rn results were consistent with those of Ca^{2+} and $\text{NO}_3\text{-N}$. On the other hand, there was no obvious declining trend in ^{222}Rn , Ca^{2+} and $\text{NO}_3\text{-N}$ of the deeper groundwater, thus contribution of the percolating water to the deeper aquifer seemed to be little or absent. Although this would not necessarily indicate that any percolating water does not reach the deeper aquifer, it could be said that contribution of the percolating water would appear more highly and rapidly in the shallower aquifer. Therefore, early monitoring of water quality in the shallower groundwater would be of importance for understanding impact of percolation from permeable flood-control reservoirs on the groundwater environment.

Key words: Groundwater flow, Recharge, Flood-control reservoir, Alluvial fan, Radon