

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 31 日現在

機関番号：13102

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560491

研究課題名（和文） 地下水涵養を考慮した水害対策に関する基礎的研究－地域特性を生かした取組み

研究課題名（英文） Fundamental study on measures of flood control considering groundwater recharge - Attempt utilizing regional characteristics -

研究代表者

豊田 浩史（TOYOTA HIROFUMI）

長岡技術科学大学・工学部・准教授

研究者番号：90272864

研究成果の概要（和文）：日本の北陸地方には、多くの消雪井戸が存在する。本研究では、これらの井戸に直接雨水を注入して、台風や大雨時の内水氾濫をおさえる手法について検討した。新潟県見附市で現場注水試験を行ったところ、消雪井戸は十分な注水能力を備えていることが明らかとなった。また、地下水の水質も、注水をやめると徐々に元の地下水と同じ水質に変化することがわかった。しかしながら、注水後は鉄バクテリアが繁殖し、目詰まりの原因となるため、目詰まり防止の対策を講じる必要がある。

研究成果の概要（英文）：The Hokuriku region of Japan has many wells used as snow melting facilities. This study treats the practical applications of inland flood control using those wells. The method, in which rainwater is injected directly to the wells, is proposed to prevent inland flooding during rainy and typhoon seasons. Field injection tests were conducted in Mitsuke city of Niigata to examine the effects of the direct recharge of rainwater on the groundwater environment. It became clear that the wells provided sufficient capacity of injection. Although groundwater in the well was changed to rainwater by the injection, the groundwater quality gradually returned to its prior state after stopping the injection. However, clogging substances such as iron bacteria and iron oxide flocks were detected in the well about two days after the injection.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2011 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2012 年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学，地盤工学

キーワード：地盤防災

1. 研究開始当初の背景

日本においても、総雨量としての変化はそれほど無いが、いわゆる「ゲリラ豪雨」の発生回数は、1976 年～1987 年の 10 年間において全国平均で 1,000 地点あたり 10.3 回であったのに対し、1998 年～2007 年の 10 年間では

18.5 回とほぼ倍増している。現在のところ、世界規模の気象変化を有効に止められる手法は見つかっておらず、今後も地球規模での環境変化が加速していくことが予想できる。このような状況の中で、根本的な気象変化要因を減少させる以外に、我々の取れる手段は、

豪雨に強い都市造りおよび社会基盤整備であろう。このような集中豪雨による災害から、住民の生活と社会基盤施設を守るために、北陸地方特有の取り組みを行う。これらの成果を評価し、最終的には、全国規模で実施できることが目標である。

2. 研究の目的

迅速かつ経済的な雨水流出量の低減策として、さらに地下水涵養や地盤沈下の防止にも繋がる手法として、「消雪井戸を利用した雨水の地下水涵養」を提案する。本手法を実用化するためには、消雪井戸を用いた雨水の直接注入に伴う地下水への影響を検証するとともに、雨水流出量の低減効果を定量的に示す必要がある。そこで、本研究では本手法の実用化が望まれている新潟県見附市今町地区において、雨水の水質や地下水の水位・水質を調査し、原位置試験により、該当地区の雨水を消雪井戸より直接地下帯水層へと涵養することによって生じる地下水位や水質への影響を検討した。

3. 研究の方法

注水試験は、今町地区にある中学校体育館の屋根に降った雨水を集水し、導水管を通じて体育館から約40m離れた消雪井戸（以下、注水井戸もしくはWinと記載）に注入する方法で行った。雨水注入の影響は、WinおよびWin周辺に設置されている井戸（観測井戸もしくはW1～W6と記載）の水位・水質計測、水質試験より検証した。Fig. 1に、注水井戸および観測井戸の位置を示す。同図には、今町地区の井戸20箇所で行ったレベル測量と地下水位計測結果より推定した地下水流動方向を併記した。なお、事前調査より、注水試験対象地域の地下水と雨水は、地下水環境基準を満たしていることを確認した。

本実験は、実験設備の準備と、消雪井戸利用の都合上、試験期間が2010年9月から11月半ばの2ヶ月半に限られた。そのため、30mm/d程度の降雨が予想される場合には雨水の注入を行い、帯水層に雨水を注入する機会を多くした。また、水質試験のための地下水採水は、できる限り注入の前後に行った。

Fig. 2に注水井戸および観測井戸周辺の地質断面図を示す（Fig. 2には断面位置を提示）。同図には、各井戸のストレーナー位置、計測器設置位置、地下水採水箇所等を併記した。今町地区の帯水層は3つに大別される。そのうち、第II帯水層を本研究の対象とした。今町地区の第II帯水層は、層厚約35mの砂礫層で、層厚約5mの粘土層が中間部に挟在し、上部層と下部層に分かれている。なお、注水井戸と観測井戸の帯水層が連続していることは、揚水試験で確認した。

雨水注入時の水位計測には、Winおよび

W1～W6に設置した水圧式水位計を用いた。水質計測にはWin, W3, W5, W6のストレーナー位置に設置した水質計を用いた。Win, W5に設置した水質計では、pH, 溶存酸素（以下、DOと記載）、電気伝導率（以下、ECと記載）、濁度、水温を、W3, W6に設置した水質計ではECと水温を計測できる。また、水質計を利用して井戸深度方向の水質計測も行った。水質試験用の地下水の採水は、Winのストレーナー位置とストレーナーよりも上部、W3, W5, W6のストレーナー位置で行った。

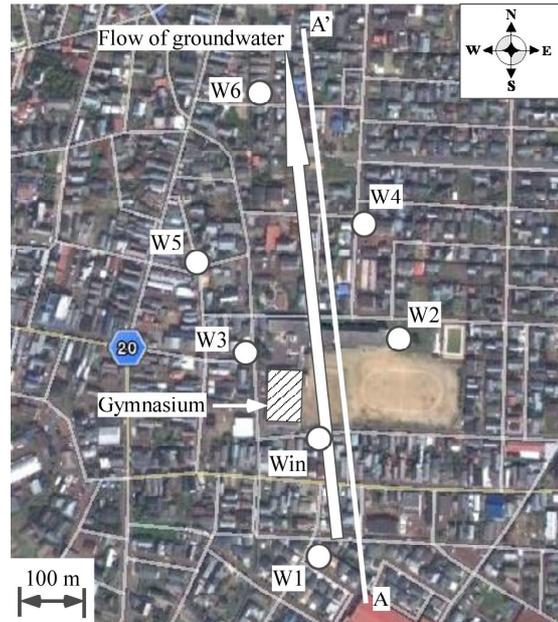


Fig. 1: 注水井戸と観測井戸の位置関係

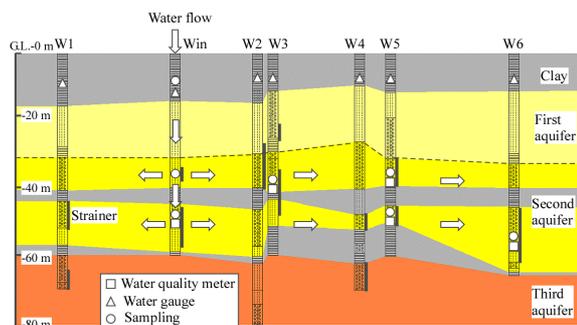


Fig. 2: 利用井戸周辺の地質断面図

4. 研究成果

(1) 雨水の水質調査結果

水質調査を行った雨水の採水方法は以下のとおりである。(a)簡易採水装置を用いた雨水の採水方法では、降雨時に採水装置を設置し、降雨を容器で直接受けるため、本研究で行った雨水の採水方法の中では最も降雨に近い雨水を採水することができる。(b)屋根排水は、図に示した1×2mの亚克力性屋

根に降った雨を、樋や塩ビパイプ等で小屋内に設置したポリ容器に採水する方法と、今町中学校体育館の屋根に降った雨が消雪井戸に至るまでの導水管に設けた採水孔より、サイフォン式ポンプで導水管を流れる雨水を汲み上げポリ容器に移す方法で採水した。(c)道路排水は道路側溝を流れる水をポリ容器で採水した。これら、採水した雨水で水質試験を実施した。

水質試験の結果より、簡易採水装置で採水した雨水に比べ屋根排水・道路排水は、窒素、塩化物イオン、全有機体炭素（以下、TOCと記載）、ECが増加していた。特に、小屋で採取した雨水のTOCは、降雨の前に小屋を蒸留水で洗浄していたにも関わらず体育館屋根からの排水と変わらないほど増加していた。また、道路排水では塩化物イオンや電気伝導率が雨水の10倍以上に増加する場合もあり、道路排水は屋根排水以上に様々な物質を含む可能性が示された。これらの結果は、簡易計測のみ実施された長岡技術科学大学敷地内での計測結果と同様の傾向であった。今回計測した範囲では、いずれの方法でも、地下水に含まれる物質の含有量を大きく超過する項目はなかったため、屋根排水を用いた注水試験を実施した。ただし、注水量が多くなると、浮遊物質が注水井戸に堆積する可能性が考えられる。例えば、体育館から採水した屋根排水には22mg/lの浮遊物質が含まれており、1日あたり100m³（注水試験期間中の最大注水量は102m³/d）の注入で、注水井戸内には2.2kgもの浮遊物質が混入することになる。すべてが沈降堆積するわけではないが、長期間の注入において浮遊物質混入の影響を検討しておく必要がある。

(2) 注水井戸の水位変動と注水量の関係

Fig. 3に注水井戸の地下水位変動と注水量の経時変化を示す。同図の下部には、降雨イベント毎の注水量の総量を示した。注水井戸の地下水位は、雨水の注入により急上昇するが、注入終了後は速やかに注入前の水位まで戻ることより、帯水層には十分な貯留浸透能力が備わっていることがわかる。9/14や9/17の注入では、水位上昇が標高約14mで頭打ちとなった。これは、井戸管頭（標高約13.5m）から注入水が溢れたためである。

Fig. 4に、注入による注水井戸の水位上昇量と注水量の関係を示す。同図には、W2とW6の井戸掘削時に行った揚水試験より得られた透水係数から、定常法により求めた水位上昇量と注水量の関係（以下、理論直線と記載）を併記した。W2は第II帯水層の中でも上部層に、W6は下部層にストレーナーが設けられている井戸である。実験では、水圧計により10分間隔で地下水位を計測した。なお、Fig. 4には、10分間で生じた水位変動が

1m未満の計測結果のみを図示した。これは、できるだけ定常的な注入のみを抜き出す目的であり、実際、水位変動1m以上のものは理論直線から大きく逸脱していた。しかしながら、注水量の小さいところでは、依然としてばらつきが大きいので、2本の理論直線に囲まれているプロット点のみを抜粋して近似直線を求め、平均的な注水量と水位上昇量を求めるのが望ましいと思われる。

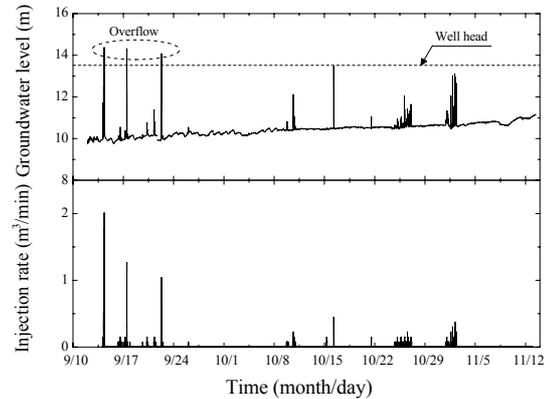


Fig. 3: 注水井戸の水位変動と注水量の経時変化

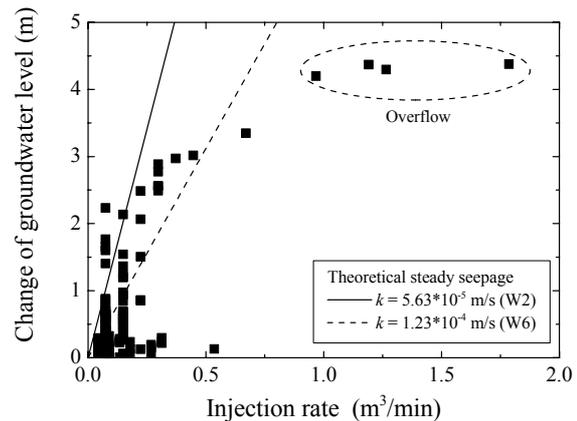


Fig. 4: 地下水位上昇量と注水量の関係

注水試験実施期間における注水井戸の管頭から自然水位までの距離は、おおよそ4mであった。つまり、注水試験期間中は0.48m³/min程度の連続注入で井戸から注入水が溢れる計算になる。一方、予備実験で行った見附市役所近辺の消雪井戸を利用した注水試験では、井戸径150mmと井戸径250mmの消雪井戸に対して60分間一定量で水道水の注入を行った結果、井戸から溢れない注水量は井戸径150mmの井戸で0.665m³/min、井戸径250mmの井戸では0.770m³/minと、本実験結果の1.4~1.6倍の注入が可能であることが報告されている。これは、実験を行った井戸の地下水面はおおむねGL-7mであり、今回の地下水面位置（約GL-4m）との差にあると

思われる。なお、市役所近辺の帯水層の透水係数は $10^{-4} \sim 10^{-5} \text{m/s}$ の範囲にあり、今町地区第Ⅱ帯水層の透水係数 ($10^{-4} \sim 10^{-5} \text{m/s}$) とそれほど差異はないようである。また、井戸へ注入可能な流量は、実用式として、地表から自然水位までの距離の一次式で表せるとしている。これらより、消雪井戸へ注入可能な流量は、本手法を適用する地域の井戸管頭から井戸内地下水面までの距離を考慮して決定する必要がある。

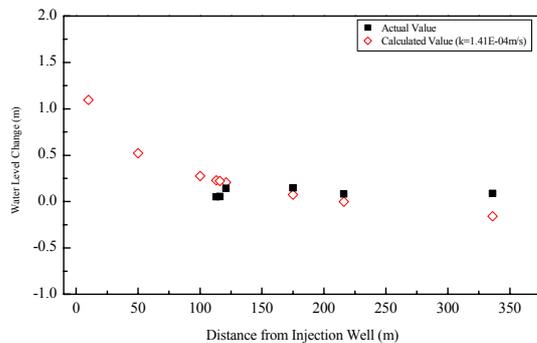


Fig. 5: 注水井戸と観測井戸の水位上昇量

Table 1: 平衡法より求めた透水係数

観測井戸			W1	W2	W3	透水係数の平均値k
注水井戸からの距離	r	m	121	113	116	
水位上昇量	s ₂	m	0.143	0.052	0.053	
透水係数	k	m/s	1.37E-04	1.32E-04	1.32E-04	
透水量係数	T	m ² /min	1.81E-01	1.74E-01	1.75E-01	
観測井戸			W4	W5	W6	透水量係数の平均値T
注水井戸からの距離	r	m	175	216	336	1.86E-01
水位上昇量	s ₂	m	0.148	0.081	0.088	
透水係数	k	m/s	1.44E-04	1.45E-04	1.53E-04	
透水量係数	T	m ² /min	1.91E-01	1.91E-01	2.02E-01	

(3) 注水井戸周辺地盤の透水係数の算定

注水井戸周辺地盤の透水係数を、平衡法により求めた。平衡法は、平衡状態での注水量および水位上昇計測結果から透水係数を求める方法である。しかしながら、注水装置の構造上、平衡状態を維持した注入を行うことは不可能であったため、本研究では注入時間が長く、かつ注水量の多い9/22 5:50~7:30(この直後、観測井戸の水位でピークが見られたため)の注入による各井戸の水位上昇量から透水係数を算出した。この時間には、総量 41.7m^3 の注入があり、透水係数の算出には5:50~7:30における注水量の平均値 ($0.417 \text{m}^3/\text{min}$)、注水井戸の水位上昇量の平均値 (2.842m)、観測井戸の水位上昇量の最大値(平衡に至るまで長時間注入すると、さらに水位が上昇する可能性があるため、ここでは最大値を取った)を用いた(Table 1 参照)。

Fig. 5 に各井戸の水位上昇量を、Table 1 に平衡法により求めた透水係数を示す。なお、Fig. 5 には求めた透水係数を用いて逆算した

各井戸の水位上昇量を併記した。また、Table 1 に示した注水井戸から各観測井戸までの距離 r は、Google Earth を利用して計測した各井戸の緯度経度から算出したものである。

本研究では Table 1 に示した透水係数の平均値 $k=1.41 \times 10^{-4} \text{m/s}$ を注水井戸周辺地盤の透水係数とした。これは、Fig. 4 中に書いてある単孔を利用した透水係数 ($9.19 \times 10^{-5} \text{m/s}$) より、少し大きいものとなった。

(4) 注水井戸の深度方向水質計測結果

雨水注入に伴う注水井戸の pH, DO, EC, 濁度、水温の変化を深さ方向に計測した。計測は、予め井戸内に設置しておいた水質計を、2分間隔で約 2m ごと引き上げる方法で行った。計測結果を Fig. 6 に示す。9/2 の計測結果は、注水試験を開始する前のもの、10/25 の計測結果は雨水を注入している最中、10/28 の計測結果は雨水注入終了から2日後である。注水試験開始前の地下水の DO は、全深度においてほぼ 0mg/l であり、pH, EC, 濁度はストレーナー位置を境に変化しているようである。10/25 の計測結果から、雨水注入により井戸内の地下水は、雨水に置き換わる様子がわかる。事前に行った注入雨水の水質調査で、pH は7程度、EC は $20 \mu \text{S/cm}$ 以下、濁度は 10NTU 以下、DO は飽和溶存酸素に近い値を示したことから、上記のように判断した。また、注入時の雨水の水温は約 18°C であったことから、注入後の井戸内の水温は注入する雨水の水温とほぼ同じになることがわかる。10/28 の計測では、pH, DO, EC, 水温が、ストレーナー位置で雨水注入前の水質に次第に戻っていく様子が示されている。ただし、濁度はストレーナー位置で注入前および注入中より高い、最大 15NTU が計測された。濁度の上昇については事項で考察する。

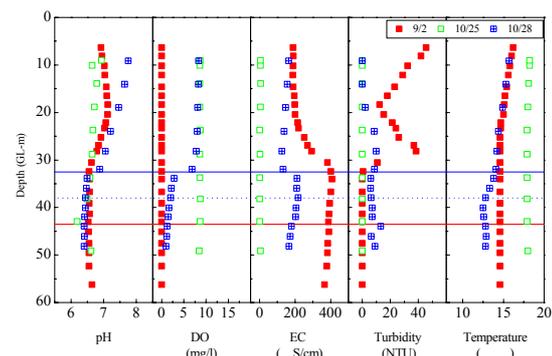


Fig. 6: 注水井戸深度方向水質計測結果

(5) 注水井戸の水質モニタリング結果

Fig. 7 に注水井戸 GL-48m 地点で計測した濁度の変化を示す。同図には、注水量も併記した。計測期間中の濁度は、雨水注入中を除いて、注入前の濁度 (Fig. 6 の9/2) や雨水の

濁度よりも常に高い値を示した。第Ⅱ帯水層の地下水は約 30mg/l の鉄分を含んでおり、水道水水質基準値 0.3mg/l を超過している。そのため、溶存酸素濃度の高い雨水と地下水中に溶存している鉄分が反応し、酸化第二鉄が生成されたことが濁度上昇の原因の1つであると考えられる。また、濁度が上昇した時期に採水した注水井戸の地下水からは、鉄細菌や酸化鉄フロックが検出された。これらは注水井戸のストレーナーを詰まらせる原因であるが、揚水を行うことで除去できる可能性が高い（逆洗浄）。

図の掲載は割愛したが、計測期間中の pH は 5.9~7.3 の間で変動し、水道水の水質基準（pH 5.8~8.6）を越える変化は見られなかった。DO や EC、水温は Fig. 6 に示したように雨水の注入に伴って一時的に変化が生じた。注入により気泡を一緒に取り込むからか、DO は飽和溶存酸素量以上に上昇するが、注入が終了して1日後にはほぼ 0mg/l まで低下した。注入により、EC は約 30 μ S/cm まで低下し注入終了後に増加した。ただし、計測期間中に初期値まで戻ることにはなかった。水温は注入により変化した後、1週間程度で注入前の水温まで戻った。EC や水温の計測結果から、雨水注入により変化した注水井戸の水質は、注入前の状態まで戻するには、帯水層の地下水移動量に応じて、ある程度の時間がかかるようである。

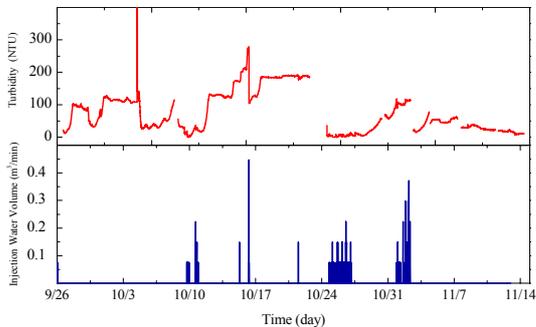


Fig. 7: 注水井戸の濁度の変化

(6) 雨水注入による地下水質への影響

Fig. 8~9 に、注水試験の前後で採水した地下水の窒素・TOC の水質試験結果を示す。窒素含有量は、全ての井戸で注水試験前の最大値を越える値を示さなかった。また、TOC に関しても一部で初期値を上回る計測結果が得られたが、一時的なものであり、上昇量も初期値を大幅に超えることはなかった。他の地域では、40mg/l を超える TOC が検出された例もある。このように、窒素含有量と TOC は、試験期間中において注水井戸・観測井戸ともに注入前の値を大幅に超過することはなかった。注水試験期間中に W6 から採水した地下水の水質を地下水環境基準と比較し

た結果でも、特に地下水汚染物質の発生は見られなかった。また、観測井戸で行った水質モニタリング結果では、注水井戸で生じたような濁度の上昇や水温の変化は見られなかった。

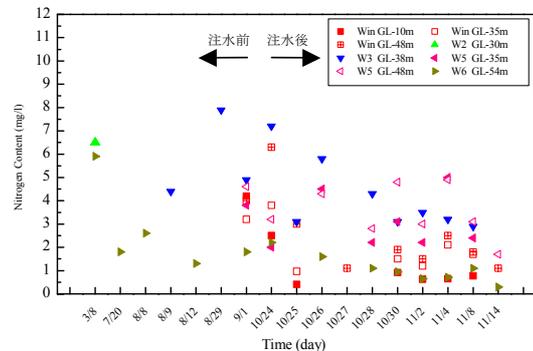


Fig. 8: 雨水注入による地下水の窒素含有量の変化

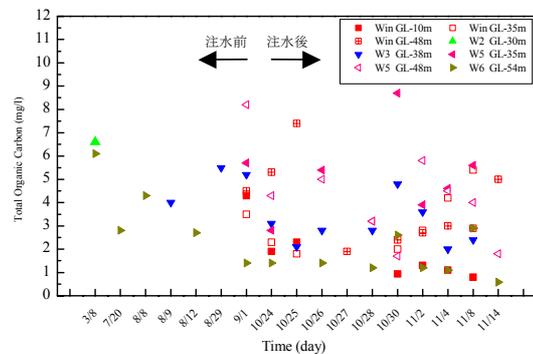


Fig. 9: 雨水注入による地下水の TOC の変化

(7) まとめ

2010 年度に行った消雪井戸への雨水注入実験を中心にとりまとめた。以下に本研究で得られた知見を示す。

- ① 今町地区で採取した降雨および地下水は、地下水環境基準を満たしており、汚染物質が基準値以上に含まれていない。
- ② 非定常な雨水注水試験の結果から、注入による注水井戸の水位上昇量と注水量の関係を推定した（単孔法）。
- ③ 雨水注水試験の結果から、注水井戸周辺地盤の透水係数を算定した。得られた透水係数は $k=1.41 \times 10^{-4}$ m/s である（揚水試験法）。
- ④ 雨水採取に関して、屋根や道路を経由することで、採取した雨水に含まれる物質が増えていくことを確認した。
- ⑤ 注水井戸では、屋根で集水した雨水の注入から 1~2 日後に鉄細菌や酸化鉄が発生し、濁度と浮遊物質が増えることがわかった。しかしながら、鉄細菌や酸

化鉄の発生に伴うストレーナーの目詰まりは、揚水を行う事で除去できる可能性が高い。

- ⑥ 注水井戸で目詰まり物質が発生したこと以外は、雨水の注入に伴う地下水質の悪化は見られなかった。

雨水注入で最も懸念される事項は注入から1~2日後に、井戸内で鉄細菌や酸化鉄フロックなどの目詰まり物質の発生である。目詰まり物質は揚水により除去できる可能性が高い。どの程度での頻度で注入と揚水を繰り返す必要があるのか検証することが課題となる。さらに、好気性・嫌気性細菌の混在による土壌や地下水環境への影響が未知数であるだけに、今後の細心のモニタリングが不可欠である。現時点で得られた知見では、本手法は、雨水採取方法に問題がなければ、地下水汚染が生じる可能性が低く、内水氾濫を防ぐ効果が期待できるといえる。

2012年度には、見附市役所敷地内に、消雪井戸を2本新設して、モニタリングを行う予定であったが、発注業務の遅れにより、完成が3月下旬となり、モニタリングを行うことはできなかった。2013年度には、見附市庁舎屋根で採取した雨水を、これらの井戸に注入してモニタリングを行い、本手法のパフォーマンスを実証する予定である。

(8) 謝辞

本研究を行うにあたり、見附市役所、(株)雨水貯留浸透技術協会、(株)アトシビルテクノより、実験に対するご配慮や様々なデータを提供して頂きました。ここに謝意を表します。

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)

[学会発表] (計5件)

- ① 豊田浩史、高田晋. 砂の液状化強度に及ぼす応力履歴および液状化履歴の影響、土木学会第67回年次学術講演会、第Ⅲ部門, pp. 33-34, 名古屋, 2012.
- ② 中村浩士, 豊田浩史, 高田晋. 礫混じり砂のせん断弾性係数と液状化強度に与える礫分の影響, 第47回地盤工学研究発表会, pp. 423-424, 八戸, 2012.
- ③ Toyota, H., Matsumoto, Y., Kaneko, T., Fukuda, M., Okui, H. and Hiraga, D., Variation of Groundwater Level and Quality Induced by Direct Recharge of Rainwater Using Wells for Snow-melting Facilities, Proceedings of the International Conference Geotec Hanoi 2011 - Geotechnics for Sustainable Development, Hanoi, Vietnam,

pp. 653-660, October 6-7, 2011.

- ④ 松本陽介, 竹中光一郎, 豊田浩史, 金子誓, 福田誠, 屋井裕幸, 平賀大介. 消雪用井戸を用いた内水氾濫対策—雨水注入による注水井戸の水質変化—, 第46回地盤工学研究発表会, pp. 977-978, 神戸, 2011.
- ⑤ 竹中光一郎, 豊田浩史, 松本陽介, 高田晋. 冬季における消雪井戸の地下水質の経時変化について, 第28回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会, No. 3104, pp. 168-171, 2010.

[産業財産権]

○出願状況 (計1件)

名称: 雨水の活用方法及び設備

発明者: 福田 誠, 屋井 裕幸, 豊田 浩史

権利者: 社団法人雨水貯留浸透技術協会, 株式会社アトシビルテクノ

種類: 特許

番号: 特願 2008-327430

出願年月日: 平成20年12月24日

国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1)研究代表者

豊田 浩史 (TOYOTA HIROFUMI)

長岡技術科学大学・工学部・准教授

研究者番号: 90272864

(2)研究分担者

杉本 光隆 (SUGIMOTO MITSUTAKA)

長岡技術科学大学・工学部・教授

研究者番号: 50196755

(3)連携研究者

細山田 得三 (HOSOYAMADA TOKUZO)

長岡技術科学大学・工学部・教授

研究者番号: 70262475

山口 隆司 (YAMAGUCHI TAKASHI)

長岡技術科学大学・工学部・教授

研究者番号: 10280447

向後 雄二 (KOGO YUJI)

東京農工大学・大学院共生科学技術研究院・准教授

研究者番号: 30414452

西村 友良 (NISHIMURA TOMOYOSHI)

足利工業大学・工学部・教授

研究者番号: 00237736

酒井 直樹 (SAKAI NAOKI)

独立行政法人防災科学技術研究所・水・土砂防災研究部・主任研究員

研究者番号: 40414990

中村 公一 (NAKAMURA KOICHI)

鳥取大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号: 90530642