

消雪井戸への雨水注入による地下水位・水質の変動

地盤工学研究室 松本 陽介
指導教員 豊田 浩史

1. はじめに

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水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。さらに、今町地区の中でも、浸水被害が多発している地域に本手法を適用した際の、雨水流出量の低減効果を検討した。

2. 注水試験の概要

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 9 月はじめから 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.1 には断面位置を提示)。同図には、

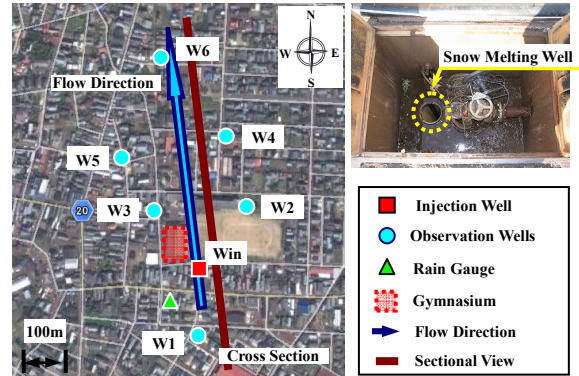


Fig.1 注水井戸と観測井戸の位置関係

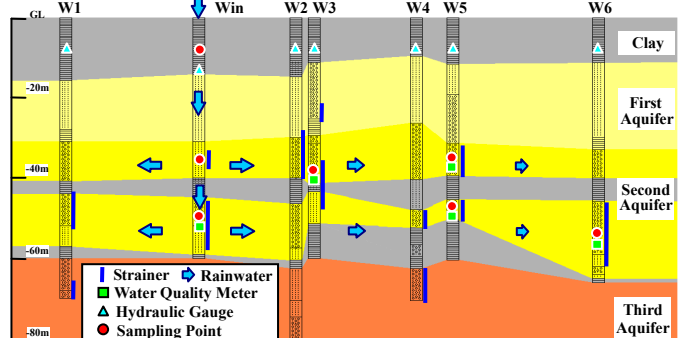


Fig.2 注水井戸・観測井戸周辺の地質断面図

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.3 雨水の採水方法

3. 雨水の水質調査結果

Fig.3 に水質調査を行った雨水の採水方法を示す。

(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 のアクリル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かか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る¹⁾。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²⁾。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。

4. 注水井戸の水位変動と注水量の関係

Fig.4 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 (b) 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.5 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³⁾ から、定常法⁴⁾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.5 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ため、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た（図中、青色実線）。近似直線から推定される注水量 Q と水位上昇量 s の関係は下記の式で表される。

$$Q = \frac{s}{8.3558} \quad (1)$$

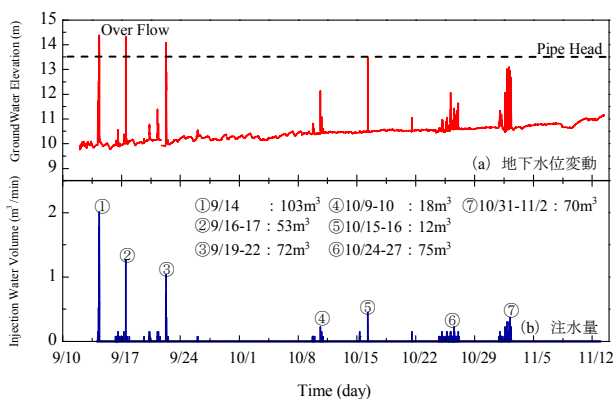


Fig.4 注水井戸の水位変動と注水量の経時変化
また、単孔を利用して透水係数を算出する方法の1つである定常法⁴⁾と式(1)より、注水井戸周辺地盤の透水係数を算出した。計算方法を下記に示す。

$$k = \frac{1.15Q}{\pi S L} \log(4L/d) \quad (2)$$

$$= \frac{1.15 \times (0.120) / 60}{\pi \times 1 \times 22} \log(4 \times 22 / 0.15)$$

$$= 9.19 \times 10^{-5} (m/s)$$

ここで、注水量 Q は、式(1)より求めた1mの水位上昇量に対応する注水量(m^3/min)、 S は注水井戸の水位上昇量(m)、 L は注水井戸のストレーナー長(m)、 d は注水井戸の直径(m)である。

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、式(1)に従えば、注水試験期間中は $0.48m^3/min$ 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、丸山⁵⁾が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 $0.665m^3/min$ 、井戸径250mmの井戸では $0.770m^3/min$ 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 $10^{-4} \sim 10^{-5} m/s$ の範囲にあり、今町地区第II帯水層の透水係数($10^{-4} \sim 10^{-5} m/s$)とそれほど差異はないようである。また、安彦⁶⁾は、井戸へ注入可能な流量を、実用式として、地表から自然水位までの

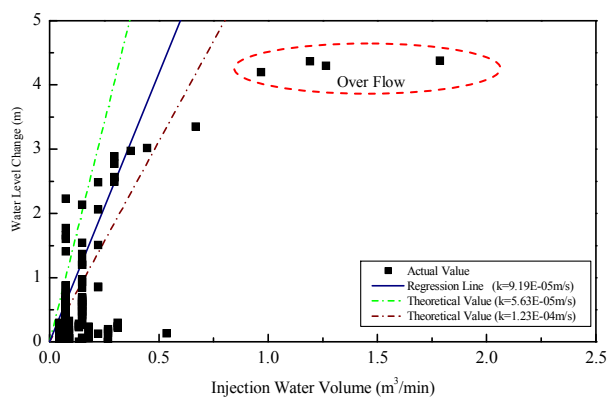


Fig.5 地下水位上昇量と注水量の関係
距離の一次式で表せるとしている。これらより、消雪井戸へ注入可能な流量は、本手法を適用する地域の井戸管頭から井戸内地下水面までの距離を考慮して決定する必要がある。

5. 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⁷⁾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($0.417m^3/min$)、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.6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.6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。

一例として、注水井戸と観測井戸W1の水位上昇量より、平衡法を利用して透水係数を算出した計算過程を示しておく。

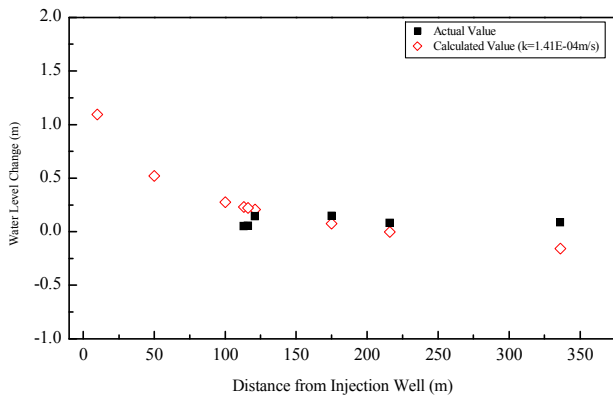


Fig.6 注水井戸と観測井戸の水位上昇量

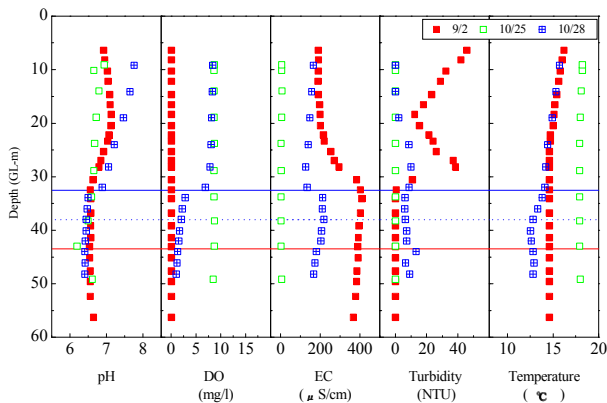


Fig.7 注水井戸深度方向水質計測結果

$$k = \frac{1}{60D} \frac{2.3Q \log \frac{r_2}{r_1}}{2\pi(s_1 - s_2)} \quad (3)$$

$$= \frac{1}{60 \times 22} \times \frac{2.3 \times 0.417 \times \log \frac{121}{0.075}}{2 \times \pi \times (2.842 - 0.143)}$$

$$= 1.37 \times 10^{-4} \text{ (m/s)}$$

ここで、 Q は観測された注水井戸へ平均的な注水量 (m^3/min)、 r_1 は注水井戸の半径 (m)、 r_2 は注水井戸から観測井戸 W1 までの距離 (m)、 D は注水井戸のストレーナー長 (m)、 s_1 は注水井戸の水位上昇量 (m)、 s_2 は観測井戸 W1 の水位上昇量 (m) 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.5 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。

6. 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

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	1.41E-04
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
水位上昇量	s_2	m	0.148	0.081	0.088	m^2/min
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	

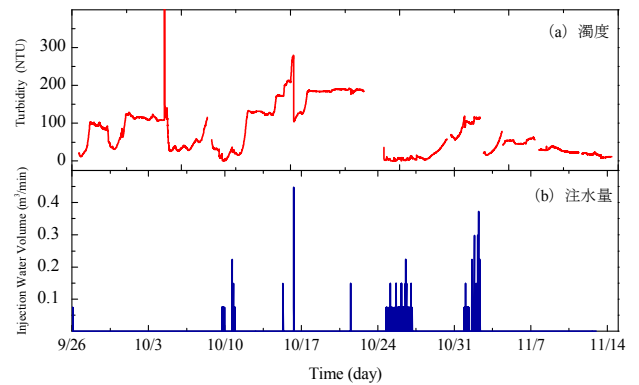


Fig.8 注水井戸の濁度の変化

ごと引き上げる方法で行った。計測結果を Fig.7 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 0 mg/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 $20 \mu\text{S}/\text{cm}$ 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。

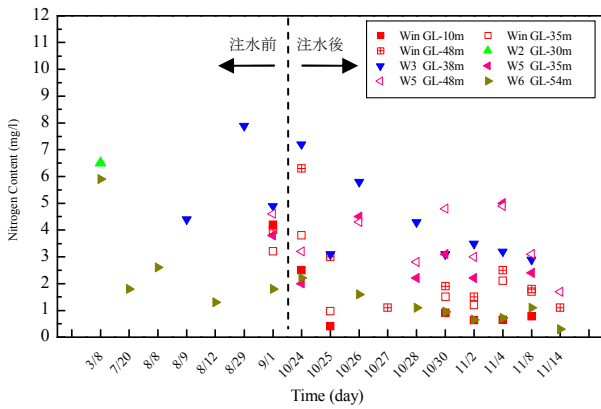


Fig.9 雨水注入による地下水の窒素含有量の変化
7. 注水井戸 GL-48m 地点の水質モニタリング結果

Fig.8 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.7 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ことが, 既往の文献⁸⁾ に述べられている.

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.7 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.

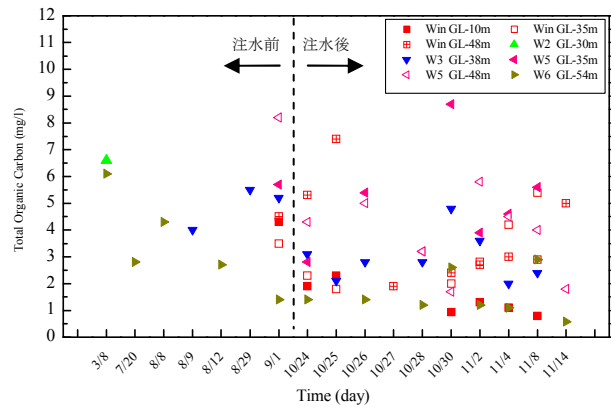


Fig.10 雨水注入による地下水の TOC の変化
8. 雨水注入による地下水質への影響について

Fig.9~10 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 につい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⁹⁾ 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.

9. 消雪井戸へ注入可能な雨水量の算定方法の提案

Fig.11 に W2 で計測した今町地区の年間地下水位変動を示す. 2005 年は計測を行った中で最も地下水位が低かった年, 2008 年は最も地下水位が高かった年である. 図より, 注入により地下水位が上昇可能な範囲 (井戸管頭から地下水面までの距離) は, 年や季節によって異なることがわかる. Fig.12 には, 年間地下水位変動と式 (1) より求めた消雪井戸に注入可能な流量を示す. 注入可能な流量は, 春季と秋季では 2~3 倍程度の差が生じることがわかる. また, 両年では秋季の注入可能な流量は年によって差があまりないが, 冬季の地下水位低下量の違いによって春季の注入可能な流量は 2 倍近く異なる. これより, 消雪井戸へ注入可能な流量を算定する場合には, 本手法を適用する地域の年間地下水位変動を考慮して算定する必要があるといえる.

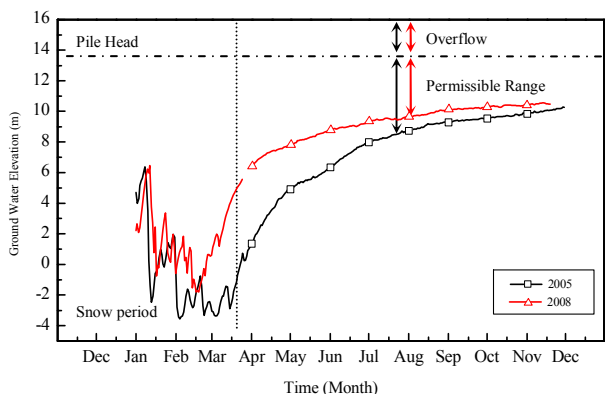


Fig.11 今町地区の年間地下水位変動

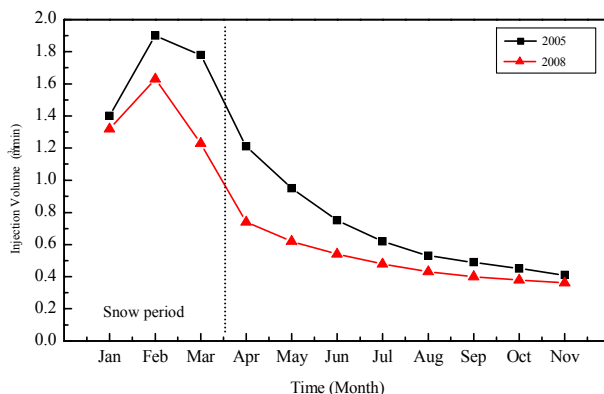


Fig.12 注入可能な雨水の流量

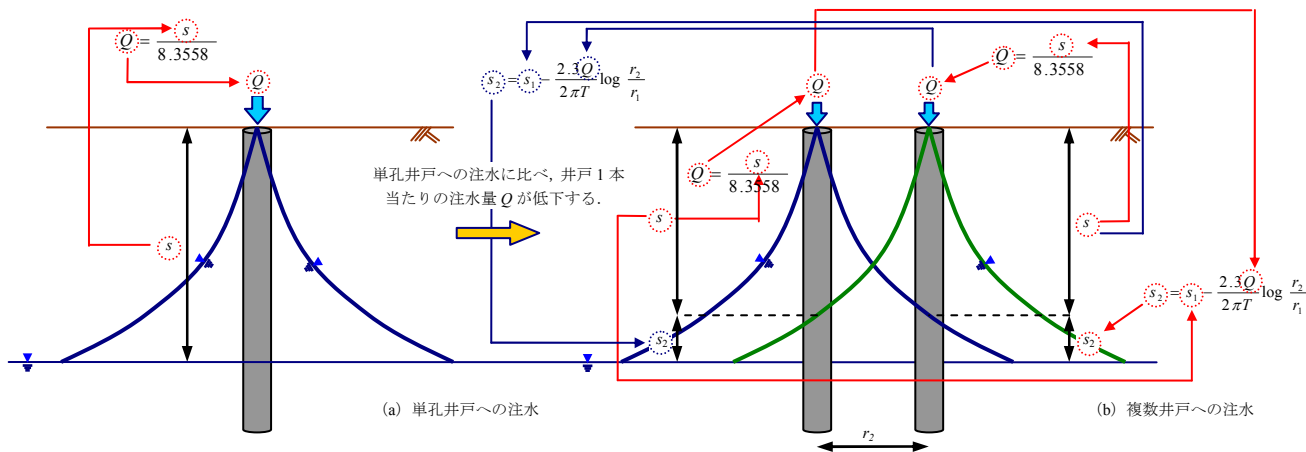


Fig.13 複数の井戸への雨水同時注入による注水量を算定する簡易手法の概要

100~200m 間隔で設置されている消雪井戸に注入を行った場合には、注水井戸の水位上昇が注水井戸の影響圏内にある他の井戸の地下水位を上昇させる。また、この水位上昇には、重ね合わせ（群井の理論）が成立する¹⁰⁾。本研究では、式(1)と式(4)を用いて逐次計算（収束計算）を行うことにより、注水井戸の影響圏内にある全ての井戸に対して注水井戸の水位上昇の影響 s_2 を考慮して、注入により水位上昇が可能な範囲 s を決定し、流量 Q を簡易的に算定する方法を提案する (Fig.13)。

$$s_2 = s_1 - \frac{2.3Q}{2\pi T} \log \frac{r_2}{r_1} \quad (4)$$

ここで、 s_1 は注水井戸の水位上昇量 (m)、 s_2 は任意地点の水位上昇量 (m)、 Q は注水井戸の注水量 (m^3/min)、 T は注水井戸周辺地盤の透水量係数 (m^2/min)、 r_1 は注水井戸の半径 (m)、 r_2 は注水井戸から任意地点までの距離 (m) である。簡易手法では、複数井戸に同時注入を行った場合における、 s_2 の発生に伴う s の低下、注水量 Q の低下が表現できる。ただし、簡易算定法は、単孔への注水理論に基づいており、井戸間の動水勾配の変化を考慮してい

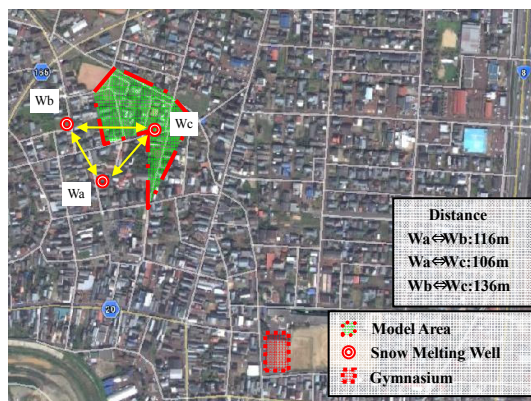


Fig.14 モデル地域

ないため、実際に注入可能な流量は更に低下する可能性がある。

10. 消雪井戸への雨水注入による流出量低減効果

今町地区の中で、特に浸水被害が多発している地域をモデル地域 (Fig.14) として取り上げ、本手法導入による雨水流出量の低減効果を検討した。ここでいう低減効果は、今町地区における計画降雨強度のハイドログラフより得られた雨水流出量から現状流下能力を差し引いた流出量（超過流出量）と、モデル地域近辺にある消雪井戸3本を利用した注水量の比で表すことにする。

雨水流出量は、見附市の雨水量算出水準¹¹⁾¹²⁾に基づいて計算した。モデル地域に選定した今町地区の雨水流出量は、式(5)に示す合理式より求めることができる。

$$Q = 1/360 \times C \cdot I \cdot A \quad (5)$$

ここで、 Q は雨水流出量 (m^3/s)、 C は流出係数、 A は排水面積 (ha)、 I は降雨強度 (mm/h)である。このうち、流出係数 C は、文献¹²⁾に記された今町排水区の流出係数を引用し、0.5とした。また、排水面積 A はモデル地域の面積1.65ha、降雨強度 I は、式(6)に示す今町地区の計画降雨強度である。合理式における計画降雨強度は、5年確立降雨(33.4mm/h)を対象としてタルボット型の降雨強度公式により求めたもので、下記の式で示される。

$$I = (2639 / (t + 19)) \quad (6)$$

本研究では、式(6)をもとにモデル地域のハイエトグラフ・ハイドログラフを作成した。雨水流出量の低減効果を検討するために用いるハイエトグラフは、計画確率年の降雨強度曲線によって作成した中央集中型ハイエトグラフで、その降雨継続時間は24時間を標準としたものである¹³⁾。ハイエトグラフは

Fig.15に示す方法で作成し、得られた降雨強度 I のもとに、式(5)よりハイドログラフを作成した。

次に、現状流下能力の計算方法を説明する。モデル地域では、過去の浸水状況より10mm/h程度の降雨により道路冠水が発生していたことから、下記の方法で現状流下能力を算出した。なお、現状流下能力の算定は、見附市役所が提示した算定条件¹¹⁾と同様の条件で計算した。算定条件は、対象面積 A :1.65ha、流出係数 C :0.5、流達時間 t :10minである。

浸水発生降雨(10mm/h)の降雨強度式を下記の方法で算出した。

降雨強度式は

$$I = a / (t + 19) \quad (7)$$

で表される。式(7)より、 $I=10mm/h$ 、 $t=60min$ を代入して、

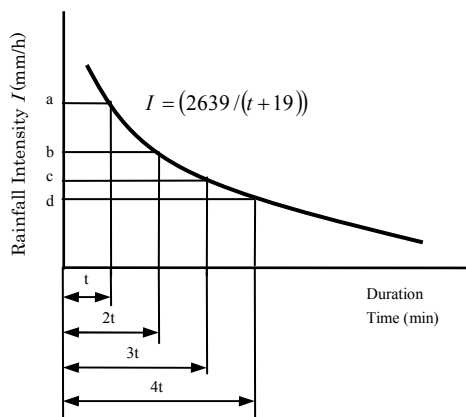
$$10 = a / (60 + 19) \quad (8)$$

となり、 $a=790$ が求まった。したがって、浸水発生降雨(10mm/h)の降雨強度式は式(9)と仮定できる。

$$I = 790 / (t + 19) \quad (9)$$

式(5)、(9)より、現状流下能力を算出した。

(a) 降雨強度曲線



(b) 中央集中型ハイエトグラフ

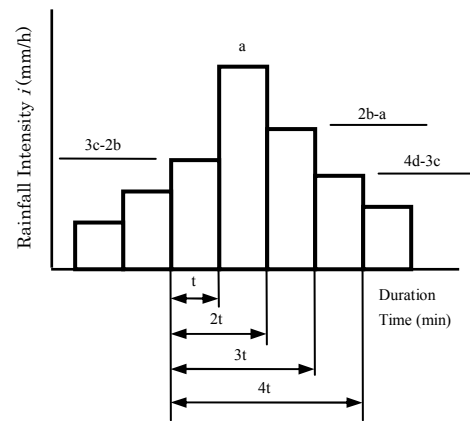


Fig.15 中央集中型ハイエトグラフの作成方法

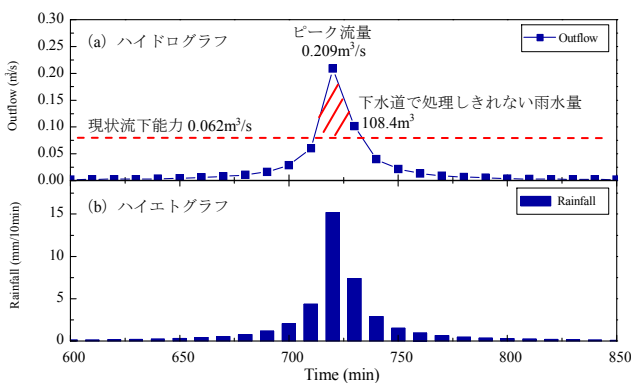


Fig.16 ハイドロ・ハイエトグラフ

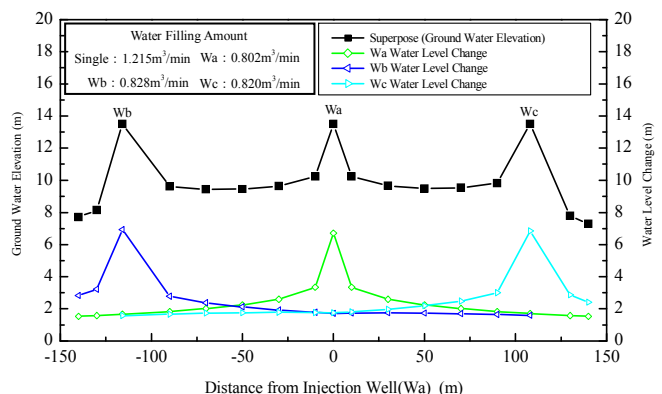


Fig.17 注水量と井戸周辺の地下水位分布

Table.2 雨水流出量の低減効果

2005	流下能力を 超過する時間 t	流下能力を 超過する流出量 Q	消雪井戸3本の注入容量		平均的な 雨水流出量低減効果 $E_c=C/Q$	2008	流下能力を 超過する時間 t	流下能力を 超過する流出量 Q	消雪井戸3本の注入容量		平均的な 雨水流出量低減効果 $E_c=C/Q$	備考
			Wa+Wb+Wc	27分間					Wa+Wb+We	27分間		
	min	m ³	m ³ /s	m ³	%		min	m ³	m ³ /s	m ³	%	
Jan	27	108.4	0.047	76	70.6	Jan	27	108.4	0.044	72	66.1	降雪期
Feb			0.064	104	95.6	Feb			0.055	89	82.1	
Mar			0.060	97	89.6	Mar			0.041	67	61.5	
Apr			0.041	66	61.0	Apr			0.025	41	37.4	地下水位 回復時期
May			0.032	52	47.6	May			0.021	34	31.2	
Jun			0.025	41	37.8	Jun			0.018	29	26.9	
Jul			0.021	34	31.0	Jul			0.016	26	24.1	
Aug			0.018	29	26.7	Aug			0.015	24	21.9	
Sep			0.016	27	24.5	Sep			0.013	22	20.0	
Oct			0.015	25	22.9	Oct			0.013	20	18.9	
Nov			0.014	23	20.8	Nov			0.012	20	18.2	

$$\begin{aligned}
 Q &= (1/360) \times C \times I \times A & (10) \\
 &= (1/360) \times 0.5 \times (790/(10+19)) \times 1.65 \\
 &= 0.062
 \end{aligned}$$

以上の計算より、現状流下能力を 0.062m³/s とした。

Fig.16 にモデル地域のハイドロ・ハイトグラフを示す。同図には、モデル地域の現状流下能力を併記した。ハイドログラフより、ピーク時には 0.209m³/s の雨水流出量が発生し、約 27 分の間、現状流下能力を超過した雨水が発生することがわかる。また、約 27 分間で下水管からあふれた雨水量は 108.4m³になる。

消雪井戸へ注入可能な雨水量は、今町地区の地下水位を 2005～2009 年にかけて計測した中で、冬季を除き地下水位が最も低かった 2005 年と、地下水位が最も高かった 2008 年の地下水位を用いて、複数井戸での同時注入を考慮した簡易推定法により決定した。なお、本検討で使用する消雪井戸の雨水処理能力は注水井戸 Win と同等であると仮定した。Fig.17 に、一例として 2005 年 4 月の地下水位をもとに簡易推定法により計算した注水量と、式 (4) より計算した注入に伴う井戸周辺の地下水位分布を示した。同図には、単孔井戸に注入を行った場合の注入可能な流量と、3 本の消雪井戸への同時注入に伴う各井戸の地下水位上昇量（重ね合わせる前）を併記した。図より、3 本の井戸に同時注入を行った場合の各井戸の注水量は、単孔井戸への注水量に比べて低下することがわかる。Table.2 に、現状の排水能力を超過した 27 分間における平均的な雨水流出量の低減効果を示す。今町地区で最も浸水被害の多い地域 (1.65ha)

を対象として計算した、今町地区の計画降雨強度と同程度の降雨に対して消雪井戸 3 本を利用して雨水を注入した場合の雨水流出量低減効果は、現状の雨水処理施設では処理しきれない雨水流出量に対して、春季で 6 割程度、秋季で 2 割程度であることがわかった。

11. 結論

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ことが文献に述べられている。
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。
7. 雨水注水試験結果を用いて、消雪井戸に注入可

能な水量について、地下水位が低い春季から地下水位が高い秋季にわけて試算を行った。

8. 複数の消雪井戸に同時注入を行う場合、それぞれの井戸の水位上昇は他の井戸の水位に影響を与える。この影響を組み込んだ注水量の簡易推定法を提案した。
9. 今町地区で最も浸水被害の多い地域（1.65ha）を対象として雨水流出量の低減効果を試算した。今町地区の計画降雨強度と同程度の降雨に対して消雪井戸3本を利用して雨水を注入した場合の雨水流出量低減効果は、現状の雨水処理施設では処理しきれない雨水流出量に対して春季で6割程度、秋季で2割程度あることがわかった。

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。

謝辞

本研究を行うにあたり、見附市役所と（株）アートンシビルテクノより、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。

<参考文献>

- 1) 柿沼宏和：消雪井戸利用のための水位・水質の年間変化計測，長岡技術科学大学学士論文，2010。
- 2) 建設省土木研究所：注水井による地下水の人工涵養，土研資料，第1498号，pp.21-48，1979。
- 3) 通商産業省関東通商産業局：新潟県見附市地域地下水利用適正化調査，pp.11-13，1991。
- 4) 土質調査法改訂編集委員会編，地盤調査法，社団法人地盤工学会，pp.388-393，1995。
- 5) 丸山達也：消雪井戸を利用した雨水の地下水涵養に関する基礎的検討，長岡技術科学大学学士論文，pp.45-52，2009。
- 6) 安彦：帯水層の熱エネルギー貯蔵，土の環境圏，

pp.639-646，1997。

- 7) 土質調査法改訂編集委員会編，地盤調査法，社団法人地盤工学会，pp.296-304，1995。
- 8) アメリカ土木学会編，肥田登，水谷宣明，荒井正訳：地下水人工涵養の標準ガイドライン，築地書館，pp.54-55，2005。
- 9) 井岡聖一郎，酒井利彰，石島洋二，五十嵐敏文：北海道幌延地域における地下水中の有機態炭素濃度の分布特性，2008年度日本水文科学会学術大会発表要旨集，Vol.23，pp.63-64，2008。
- 10) 松尾新一郎，河野伊一郎：地下水位低下工法，鹿島出版会，pp.63-90，1970。
- 11) 見附市：消雪井戸への雨水の注入による流出量の低減効果の検討，2010。
- 12) 見附市：見附市公共下水道事業計画変更認可申請書，pp.68-74，2008。
- 13) 社団法人日本下水道協会編：下水道雨水調整池技術基準（案）-解説と計算例-，1984。