

六郷扇状地における地下水人工涵養の実施と成果

肥 田 登*

Experience of Artificial Recharge of Ground Water in the Rokugo Alluvial Fan, Akita Prefecture

Noboru HIDA*

Abstract

The Rokugo alluvial fan lies around 39° 25' N and 140° 34' E in northern Japan. The distance between the proximal fan at 90 meters above sea level and the distal fan at 45 meters is about four kilometers. The unconfined aquifer of the fan consists mainly of gravel and sand. Four artificial recharge basins were constructed on the central part of the fan. Observation instruments are wells and piezometers installed in depths of 20 m and 50 m. In this paper, the author discusses the effects of artificial recharge using the basin No.2 at the center of the fan. The recharge experience was done during the period when ground water level was affected by melting snow, from April 8 to May 2, 1998. Results obtained are as follows: first, artificial recharging caused a rise in the hydraulic head, which was related to the Rokugo town area situated on the distal fan, and second, because the author supplied the basin No.2 with water with a low water temperature after snow melted, the characteristic phenomenon of ground water temperature was recorded by piezometers in a depth of 20 m at both sites of central and distal fan. Consideration of this point is a theme for future studies. As a synthetic judgment, the artificial recharge of ground water contributes to sustainable aquifer management in the alluvial fan.

Key words : artificial recharge of ground water, aquifer, hydraulic head, ground water temperature, Rokugo alluvial fan

キーワード : 地下水人工涵養, 帯水層, 水理水頭, 地下水温, 六郷扇状地

I. はじめに

地下水、湧水の管理は地下水の循環系を配慮して多角的に考えられようが、一つの有効な手法として地下水人工涵養がある (Bundesminister des Innern, 1985; O'Hare *et al.*, 1986; Dillon *et al.*, 2002; 肥田, 1990, 2002)。

秋田県六郷扇状地においては 2006 年現在で 4 か所の人工涵養池が稼動しており、各施設においてそれぞれの成果を挙げている (太田, 2000;

肥田ほか, 1999; 肥田, 2005; Hida and Ohizumi (Ohta), 2005)。小論では、このうち池 No. 2 を使って扇状地の不圧地下水 (以下、地下水と記す) を強化するための実験を試みた。給水期間を 1998 年 4 月 8 日 10:00 から 5 月 2 日 10:50 までの融雪後の低水位期とした。ねらいは、六郷扇状地におけるこれまでの人工涵養に関する考察をさらに深化させることを考慮して次の点においた。

① 涵養池に給水することによって、池 No. 2

* 秋田大学教育文化学部

* Faculty of Education and Human Studies, Akita University

(中央)の西方 274 m にある野中ピエゾメータと、さらにその西方 1,200 m の扇端・市街地にある馬町(湯川)ピエゾメータ(各深度の先端にスクリーン、水圧と水温のセンサーを置く。ここでは 20 m 深および 50 m 深の記録を使用)の水理水頭と地下水温にどのような反応が現れるのかを確かめる。

② 人工涵養によって上昇した地下水面が、給水を停止した後、どのように低下するのかを池 No. 2 周辺の観測井を使って確かめる。

II. 六郷扇状地の水文環境(肥田, 1990)

位置、地形、帯水層：六郷扇状地は北日本にあり、奥羽山脈から西側に開く扇状地は、東西約 4 km、南北約 5 km の扇形をなす(図 1)。扇頂の標高は 90 ~ 100 m、扇端の標高は約 45 m であり、扇央部は 39° 25' N, 140° 34' E の周辺に

ある(図 2)。扇状地の圧帯水層は主に砂礫から成り、透水係数は $10^0 \sim 10^{-2}$ cm/sec のオーダーにあり、比産出率は 10% 強である。帯水層厚は、扇央で約 100 m 強である。

降水量、可能蒸発散量：年平均の降水量は、1,653 mm、年平均の可能蒸発散量は、660 mm と推計される(1977-2000 年の横手、大曲地点の観測値を使用。可能蒸発散量は Thornthwaite 法による)。六郷市街地の最大積雪深は、平年で 130 cm ほどである。近年の例では、1985-86 年冬のピークは、2月17日に 194 cm、雪の少なかった 1986-87 年冬のピークは、1月26日に 86 cm を記録した。積雪深は扇端から扇頂に向けて約 20 cm ほどの増加を見る。

土地利用：扇状地面の約 70% は水田から成る。市街地は扇端部に位置する(図 1 および図 2)。

地下水位の年変化特性：六郷扇状地における地



図 1 研究地域：六郷扇状地 (1994 年 8 月)。

写真の手前が六郷町の市街地、奥に六郷扇状地、さらに奥羽山脈と並ぶ。土地利用は主に水田。扇央部は 39° 25' N, 140° 34' E。写真：六郷町による。

Fig. 1 Research area: Rokugo alluvial fan (Aug., 1994).

The front side is the town area of Rokugo-machi. To the back side is the Rokugo alluvial fan (center: 39° 25' N, 140° 34' E) and Oou Mountains. The land use on the fan is mainly rice fields. Photo by Rokugo-machi town.

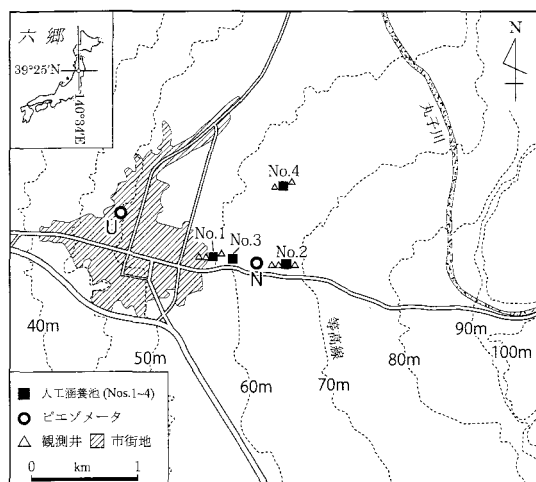


図 2 六郷扇状地，地下水人工涵養池およびピエゾメータ．

人工涵養池：Nos. 1～4 の位置およびピエゾメータ：野中(N)と馬町(湯川)(U)の位置を含む(2006年現在)．

Fig. 2 Rokugo alluvial fan, artificial recharge basins of ground water and piezometers.

Included are the sites of artificial recharge basins, Nos. 1-4, and of piezometers, Nonaka (N) and Umamachi (Yukawa) (U) in 2006.

地下水位の平定的な変化特性は次のとおりである。

① 顕著な高水位期が2回現れる。1回は扇状地の積雪深がゼロになる，3月末から4月初旬である。もう1回は5月中旬から8月下旬までの水田灌漑の期間である。

② 融雪末期の高水位と灌漑初期の高水位の間に一時的な低水位期が生ずる。

③ 灌漑期が終わる8月下旬から地下水位は降下を始めて低水位期に入る。年間を通して地下水位が最も低下するのは，積雪深が最多となる1月中旬から2月中旬までの約1か月間である。この間，扇端に分布する約70か所の湧泉群の内，70～80%は涸渇する。

地下水と湧水の利用：扇端に人口約6,000人から成る六郷町（合併により，2004年11月より美郷町）の市街地がある。市街地の住民は，各家々に私的な井戸，揚水機，給水施設を持って，生活用水を得ている。併せて，扇端には大小合わ

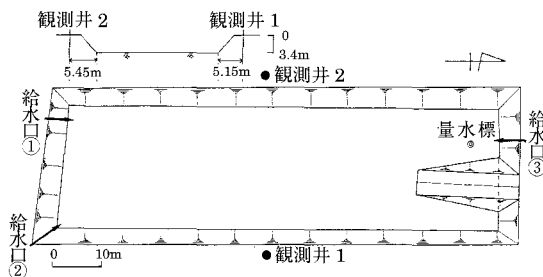


図 3 人工涵養池 No.2 の概要図，1998 年．
太田 (2000, p.3) による．

Fig. 3 Overview of the artificial recharge basin No. 2, 1998.

By Ohta (2000, p.3).

せて約70か所の湧泉があり，水環境を構成すると同時に生活の補助用水に充てられている。水質は良好である（島野・肥田，2006）。

III. 地下水人工涵養池および観測装置

(Hida and Ohizumi (Ohta), 2005)

人工涵養池 No. 2 (図3)：池 No. 2 は扇中央部に設置されている ($39^{\circ} 25' 00'' \text{N}$, $140^{\circ} 34' 05'' \text{E}$, 標高 68.0 m)。1992 年に新設，さらに 1994 年に拡張され，池底の総面積は $2,120 \text{ m}^2$ となった。池底は地表面より 3.4 m 掘り下げた状態であり，扇状地の砂礫層が露出している。池底に堆積したシルト・粘土等，目詰まりを起こす原因となる物質は毎秋に一度除去される。その作業のために池底に重機，ダンプカーを出入りさせる通路を池の北側に取り付けた。

給水：池 No. 2 への給水口は，池の南側に2か所（内，1か所に量水計がある），北側に1か所取り付けである。池への給水量は，1998年4月8日～5月2日の期間内において若干の変動はあったが，平均してほぼ 60 l/sec である。給水した水は，丸子川から取水された灌漑用水である。4月の給水当時は融雪期にあたり，水温は $4 \sim 5^{\circ}\text{C}$ であった。池 No. 2 に水を張った状態は，図4に示すとおりである。

観測装置-観測井 (図5)：人工涵養池 No. 2 を挟んで池の東側と西側に観測井の No. 1 と No. 2



図 4 人工涵養池 No. 2 に水を張った状態, 1998 年.
給水停止直前: 1998 年 5 月 2 日. 筆者撮影.

Fig. 4 The artificial recharge basin No. 2 filled with water, 1998.

Just before water supply was stopped: May 2, 1998. Photo by the author.

を 1995 年に設置した。No.1 は池の縁から 1.8 m 東側, No. 2 は池の縁から 2.3 m 西側にある。No. 1 と No. 2 の間は 36 m である。天端からの井戸深は, No. 1 が 17.90 m, No. 2 が 15.05 m である。各井戸の最深部に 4.0 m のスクリーンを取り付けた。

観測井 Nos. 1～2 のボーリング地質柱状図および次のピエゾメータ 2 地点の各深度別のボーリング地質柱状図も Hida and Ohizumi (Ohta), (2005) に示した。観測井 Nos. 3～4 は, 観測井 Nos. 1～2 の近傍にあることから, 観測井 Nos. 3～4 のボーリング地質柱状図は, 観測井 Nos. 1～2 のボーリング地質柱状図 (No. 1: 17.90 m 深, 全層ほぼ砂礫, 下部約 7 m に若干の粘土が混じる, No. 2: 15.05 m 深, 全層ほぼ砂礫, 下部約 2 m に若干の粘土が混じる) に類似するものと推測される。

観測装置-ピエゾメータ: ピエゾメータ群は六郷扇状地の扇央の野中 ($39^{\circ}25'02''\text{N}$, $140^{\circ}33'55''\text{E}$) と扇端の馬町 (湯川) ($39^{\circ}25'18''\text{N}$, $140^{\circ}33'03''\text{E}$) に 1991 年に設置した。野中, 馬町 (湯川) とともに, ピエゾメータの深度は,

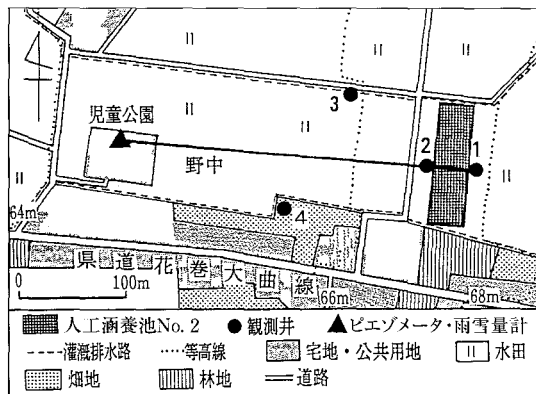


図 5 観測装置-観測井 Nos. 1～4 と野中ピエゾメータ, 1998 年.

太田 (2000, p.2) に一部加筆した。観測井の位置は 1998 年当時と 2006 年 (図 2) とでは異なる。

Fig. 5 Measuring instruments -observation wells, Nos. 1-4 and Nonaka piezometer, 1998.

Modified after Ohta (2000, p.2). Sites of observation wells in 1998 were subsequently changed as shown in Fig. 2 (triangle mark).

20 m, 50 m, 100 m, であり, 先端にスクリーンをおき, 各水圧 (20 m, 50 m, 100 m), 水温センサー (20 m, 100 m) を付けてある。野中のピエゾメータは, 池 No. 2 (中央) の西側 274 m, 上の観測井 No. 1 の西側 256 m の位置にあり (図 5), 馬町 (湯川) のピエゾメータは, 野中のピエゾメータの西方 1,200 m の扇端・市街地の中にある。

IV. 結果と考察

1) ピエゾメータ (Pzm.) に現れた水理水頭と地下水温の反応

野中, 馬町 (湯川) の各ピエゾメータの記録から次の点が確認された (図 6 を参照, 両図の縦軸のスケールは異なる)。

野中 Pzm.:

① 給水開始 (1998 年 4 月 8 日) の 1 日後から水理水頭の上昇が現れた。20 m 深において約 80～100 cm の上昇, 50 m 深において約 40～60 cm の上昇を記録した。

② 給水停止 (1998 年 5 月 2 日) 後とほぼ同時に, 20 m 深, 50 m 深とも水理水頭の低下が現

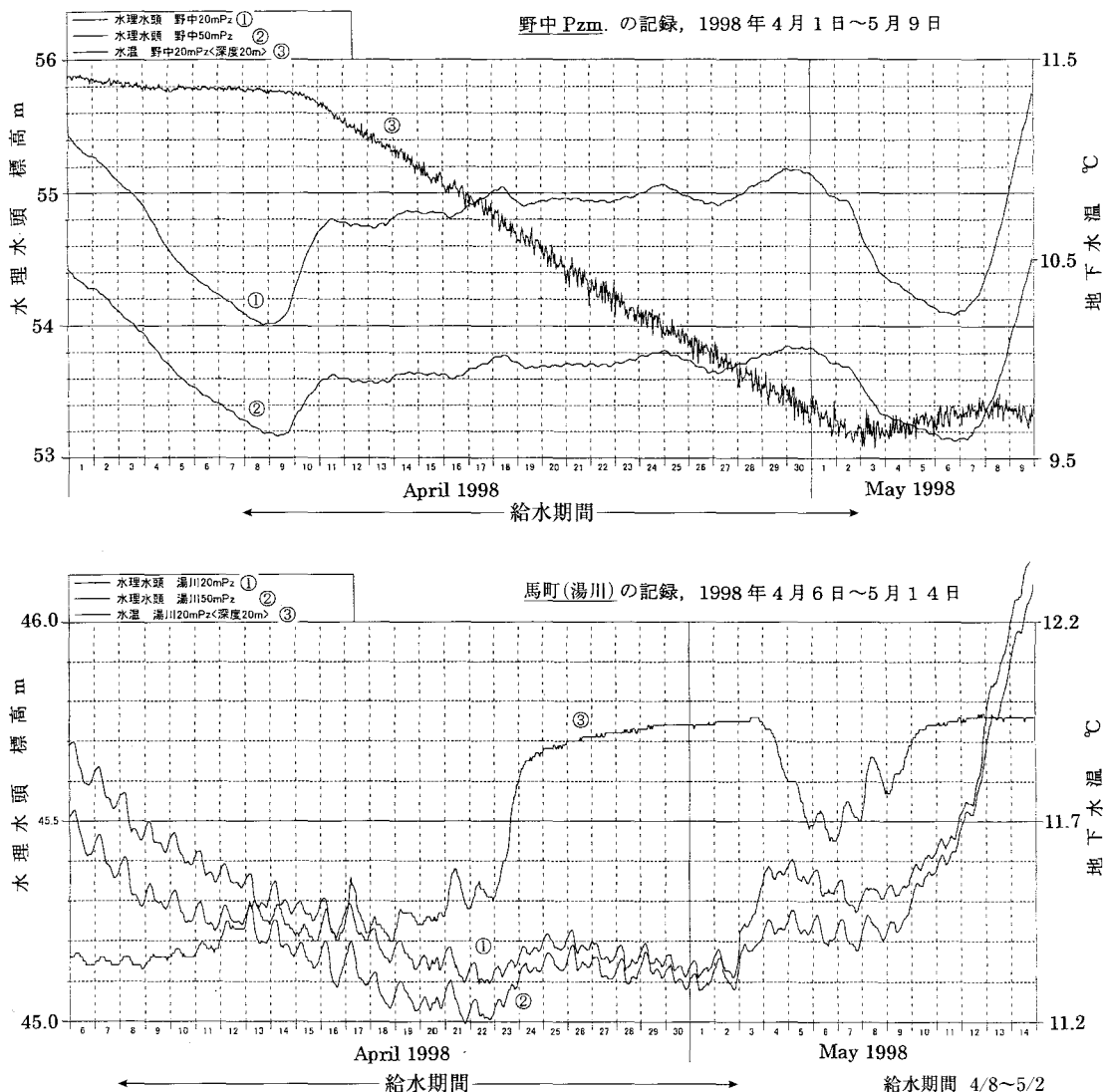


図 6 野中ピエゾメータの記録: 1998 年 4 月 1 日～5 月 9 日 (上) および 馬町 (湯川) ピエゾメータの記録: 1998 年 4 月 6 日～5 月 14 日 (下).

Fig. 6 Records at Nonaka piezometer: April 1 to May 9, 1998 (upper) and records at Umamachi (Yukawa) piezometer: April 6 to May 14, 1998 (lower).

れた。

③ 20 m 深における地下水温は、給水開始 2 日後から給水停止までの間、低下を続けた。この間、11.4℃から 9.6℃まで水温が低下した。低水温水 (4～5℃) の池への供給が影響しているのか、2005 年より記録を採り現在検討中である。

馬町 (湯川) Pzm. :

① 人工涵養に伴う水理水頭の上昇が認められる (人工涵養の効果)。上昇は給水開始後 14 日目の 22 日から現れた。Pzm. : 20 m 深において約 10～30 cm の上昇, Pzm. : 50 m 深において約 10～20 cm の上昇を記録した。

ここで、池 No. 2 への給水期間（1998 年 4 月 8 日～5 月 2 日）中の総降水量は、六郷扇状地の扇端から北西へ 7 km 離れた大曲の観測値で 73 mm であった（気象庁, 2006）。この間、日最大の降水量は 4 月 14 日の 16 mm であった。六郷扇状地では、2000 年 9 月より降水量の観測を継続しているが、日降水量による地下水位への一時的な応答が現れるのは少なくとも 20 mm を超えた場合である。また、六郷と大曲の降水量には経験的に大きな相違はない（ちなみに、大曲の 4 月の総降水量は 73 mm であり、5 月の総降水量は 184 mm であった）。

② 給水停止約 60 時間後の 5 月 5 日に入って、20 m 深、50 m 深とも水理水頭の低下が現れた。給水後から地下水堆の形成が始まるまでの時間に対して、給水停止後から地下水堆の消滅が始まるまでの時間の方がきわめて短い。この現象は不飽和帯の涵養（人工涵養池に限らず水田灌漑によって生じる地下水堆の形成と消滅においても同じ）の特徴である。

③ 20 m 深における地下水温は、4 月 23 日から 5 月 4 日までの間、約 0.4 °C の上昇をきたした。この現象は、上の水頭の上昇期間と重なり、人工涵養に起因するものと思われる。六郷扇状地の扇端における比較的浅い層の地下水温は、融雪の終了する時期の違いにもよるが、一般に 6 月初めから上昇期に入る。

上に記した水温の上昇は、周期的には水温の低下期にありながらなお一時的に上昇をきたした事例である。同様の現象は、灌漑初期の地下水位の急激な上昇期においても現れる。上の約 0.4 °C の上昇は、人工涵養によって加圧された地下水が、すでに貯留されていたやや暖水温の地下水を一時的に押し出しているものとも考えられる。いずれ詳細についてはさらに検討を加えたい。

2) 給水停止後の池 No. 2 周辺の地下水面低下

人工涵養の効果の時間的な持続性を知るために、池 No. 2 への給水を停止した後、池周辺の地下水面がどのように低下するのかを観測井 No. 1 ～ No. 4（図 5）の水位観測により把握した。観測は 1998 年 5 月 2 日 10:50 の給水停止直後か

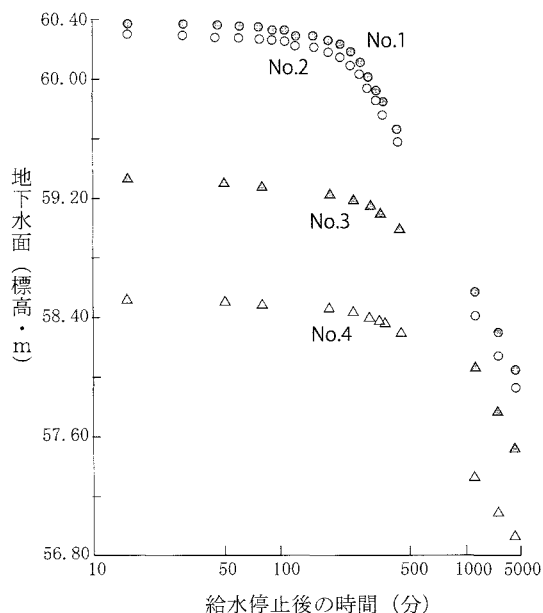


図 7 給水停止（1998 年 5 月 2 日 10:50）後の人工涵養池 No. 2 周辺の観測井 Nos. 1～4 における地下水面の低下。観測井の位置は図 5 を参照。

Fig. 7 Water table decline at observation wells Nos. 1-4 near the basin No. 2 after water supply was stopped (May 2, 1998 10:50). The sites of observation wells Nos. 1-4 are shown in Fig. 5.

ら水位変動が微量となった、5,000 分（約 3.5 日）後まで継続的に続けた。

各観測井における地下水面の低下経過は、図 7 に示すとおりである。この図から次の点が読み取れる。

① 地下水面の値は、地表面の標高の高低に準じて、観測井 No. 1 から No. 4 の順に低い。停止直後の各観測井の地下水面は、約 58.40 ～ 60.40 m の間にある。

② 各観測井の地下水面とも、給水停止より 300 分後頃から急激に下がる。

③ 給水停止直後から 5,000 分（約 3.5 日）後までの間の地下水面の変動幅は、観測井 No. 1 において最も大きく 2.33 m、同 No. 4 において最も小さく 1.57 m であった。

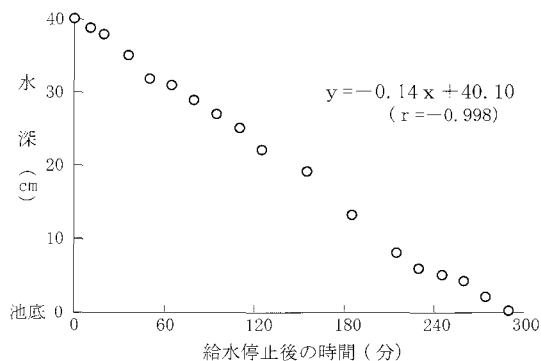


図 8 給水停止 (1998 年 5 月 2 日 10:50) 後の人工涵養池 No. 2 における水深の経時変化。

Fig. 8 Water depth changes in the basin No. 2 after water supply was stopped (May 2, 1998 10:50).

現地における観測に基づき、図 8 に給水停止後の池 No. 2 の水深の経時変化を示した。この図から次の点が指摘される。

① 給水停止時の水深は 40 cm であり、停止 290 分後に水深はゼロとなった。この間の水位の通減は、一次回帰式で表され、

$$y = -0.14x + 40.10 \quad (r = -0.998) \text{ となる。}$$

ここで、 y は水深 (cm)、 x は給水停止後の時間 (分)

② この関係から、給水停止 290 分後までの池 No. 2 の浸透能は 8.27 cm/時となる。

③ 地下水面が急激に低下を始める、給水停止より約 300 分後の時間は、池 No. 2 の水深が給水停止後ゼロに達する時間とほぼ一致する。この現象は、池の水圧との関係から検討中である。

V. 扇状地における地下水人工涵養の指針

六郷扇状地における地下水人工涵養の一連の研究に基づいて、日本の国土の扇状地を前提とした地下水人工涵養 (不飽和帯、池方式) の設置指針の概要を提示する (参考: アメリカ土木学会著, 肥田ほか訳, 2005)。主に適地条件, 適地 (用地), 用水, 地元住民協力, 維持管理の観点からである。

1. 適地条件

扇状地, 砂丘地

2. 適地の選定 (前調査) と用地の確保

(1) 適地の選定

地下水流動の解析

(2) 帯水層厚, 不飽和帯の厚さ

不飽和帯の厚さ, 池の深さ → 浸透量・能の多少に影響を与える。

3. 用地の確保

用地の購入: 私有地の有無, 農家等の理解と協力

4. 給水源の確保

(1) 水量

水利権の交渉, 特に農業用水を使用の場合

(2) 水質

前処理の有無

5. 地元地域住民の協力

地下水人工涵養についての説明と理解

土地改良区の理解, 協力

6. 維持管理

(1) 池の清掃, 堆積土の除去

(2) モニタリング

観測井, ピエゾメータの設置 (基本: 涵養池を挟んで地下水の流線の上に並べる)

(3) それらに要する費用

VI. むすび

小論では、六郷扇状地に設置されている池 No. 2 を使って融雪後の地下水位の低下期に地下水人工涵養の実験を試みた。その結果、

① 扇央の池 No. 2 を使って実施した人工涵養の効果は、水理水頭の上昇という点において扇端の市街地にまで及んでいることが確認された。この点は、涵養池の下部とその周辺域における地下水堆の形成と消滅のプロセスに関する解明に焦点をしばってきたこれまでの研究を踏まえて、小論において始めてとり扱った内容である。

② 融雪後の低水温を池 No. 2 に給水した結果、扇央と扇端の双方とも 20 m 深ピエゾメータの地下水温の記録に特徴的な現象が現れた。この点に関する詳細な解明はさらに今後の課題である。

総合判断として、扇頂から扇端に向けて流れる扇状地の地下水循環の特徴を活かし、扇頂から扇中央部に地下水人工涵養の手法を導入すれば、人工涵養は扇状地の地下水環境の持続的な保全に資するものである。

謝 辞

本論は、2006年度科学研究費補助金・萌芽研究（課題番号：18650265，代表：肥田 登）の一部を使用した。また、現地調査の当時、秋田県六郷町（2004. 11より美郷町）、太田由紀子氏（当時、秋田大学院生）の協力を得た。記して深謝申し上げる。

文 献

- アメリカ土木学会著，肥田 登・水谷宣明・荒井 正共訳（2005）：地下水人工涵養の標準ガイドライン。築地書館，193p.
- Bundesminister des Innern（1985）：*Kuenstliche Grundwasseeanreicherung*. Schmidt, Berlin, 559s.
- Dillon, P.J. ed.（2002）：*Management of Aquifer Recharge for Sustainability*. A.A. Balkema Publishers, 567p.
- 肥田 登（1990）：扇状地の地下水管理。古今書院，

263p.

- 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（2005）：地下水人工涵養（池法）の実施と成果。水循環 貯留と浸透，**58**, 21-25.
- Hida, N. and Ohizumi (Ohta), Y.（2005）：Basin artificial recharge of groundwater in the Rokugo alluvial fan, northern Japan. *Mem. Fac. EHS, Akita Univ. (Human. & Soc. Sci.)*, **60**, 29-39.
- 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.
- 気象庁（2006）：気象庁統計情報 気象観測（電子閲覧室）地点毎のデータ（昨日）まで。
<http://www.data.kishou.go.jp/etrn/index.html> [Cited 2006/9/10].
- O'Hare, M.P., Fairchild, D.M., Hajali, P.A. and Canter, L.W.（1986）：*Artificial Recharge of Groundwater*. Univ. of Oklahoma, 419p.
- 太田由紀子（2000）：浸透池を用いた地下水人工涵養に関する研究—秋田県六郷扇状地を事例として—。秋大地理，**47**, 1-8.
- 島野安雄・肥田 登（2006）：六郷扇状地における地下水の水質特性。秋田大学教育文化学部研究紀要（人文・社会），**61**, 1-11.

（2006年9月19日受付，2006年12月22日受理）