

# 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

利 部 慎

キーワード：人工涵養 地下水温 水収支 六郷扇状地

## I はじめに

地下水の人工涵養は、地下水貯留量の増強をはじめ、地下水の水質改善、地下水位の低下、塩水浸入、地盤沈下の防止などを行われ、地下水の強化、保全策として有効に機能する（肥田，2002）。

人工涵養に関する実施基準（ガイドライン）によると、人工涵養の方法として以下の方法が挙げられている（アメリカ土木学会著，肥田ほか訳，2005）。まず、人工涵養の方法は、井戸涵養法と地表涵養法に大別される。さらに地表涵養は、浸透池法、水路法、溝渠法、洪水法、水田法、地下埋管法などに細別される。

人工涵養に関する研究は、秋田県六郷扇状地において数多く行われている。水田法を用いた研究例として肥田（1989）は、水田を用いた地下水の人工涵養を積雪期間中に試み、地下水位と水質の測定を行った。その結果、人工涵養は地下水位の上昇や井戸の涸渇期間の短縮などの効果を生み出し、人工涵養を実施しても、地下水の水質に特異な影響は現れないことを明らかにした。

また、浸透池法を用いた研究例として、肥田ほか（1999）は、旧六郷町が水田用地から造成した涵養池を用いて人工涵養の実験を行い、人工涵養によって涵養池の下部に地下水堆が形成されることを明らかにした。さらに人工涵養により地下水位の保全を図ることのできる範囲を確認している。

さらに太田（2000）は、人工涵養の実施による地下水堆の形成と、人工涵養の停止による地下水堆の消滅を、地下水位の連続的な測定により明らかにした。

また、人工涵養の水路法に関連する研究例としては、若狭ほか（2006）が秋田県成瀬川扇状地の扇中央域に広がる灌漑用の土水路<sup>1)</sup>の地下水涵養機能を考察した研究がある。土水路の上下流間の浸透量をもとに浸透能を実測した結果、18.8cm/h という値が得られた。この浸透能は非常に大きく、六郷扇状地

において、太田（2000）が浸透池法で行った人工涵養の実験例と同等の浸透能となった。

上記のように、国内における人工涵養に関する研究は、秋田県での実施例を除くと決して多くない。さらに、浸透池法の研究に関しては、六郷扇状地以外ではほとんどなされていない。

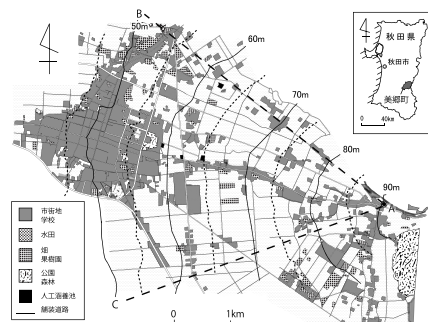
六郷扇状地で行われた従来の研究は、人工涵養の実施に伴い、涵養池の下部に地下水堆が形成されることを明らかにしている。これら一連の研究では、人工涵養を地下水位の変動という視点から考察してきた。一方で、人工涵養による効果を定量的に明らかにする研究はいまだなされていない。

そこで本研究では、第一に、六郷扇状地における水収支を定量的に考察することで、水収支に対する人工涵養の寄与を明らかにすること。

第二に、人工涵養により涵養された地下水の流動過程を、水温をトレーサーとして明らかにすること。以上を明らかにすることを目的とする。

## II 六郷扇状地の概要

六郷扇状地は横手盆地のほぼ中央に位置しており、



第1図 研究対象地域（2005年）

（国土地理院発行1：25,000地形図「六郷」「金沢本町」（1999年修正測量）および2005年5月1日の現地調査により作成）  
注）図中の扇形ABCは第三章において水収支を算定する際に設定した区域である。

東縁は断層崖によって奥羽山脈に接する。同扇状地は丸子川の氾濫により運搬された土砂が堆積して形成された。六郷扇状地は新期扇状地と古期扇状地とに分類され、古い扇状地の上に新しい扇状地が重なり合ってきた沖積・合成扇状地である(肥田, 1990)。ただし、本研究では標高45m以上の新期扇状地をもって六郷扇状地を指すものとする(第1図)。この意味においての六郷扇状地は、南北約5.5km、東西約4kmの楕円形をなし、面積は約14km<sup>2</sup>である。扇頂、扇中部は大部分が水田化されている。扇中部の水田は1963年に国営田沢疏水<sup>2)</sup>が完成し、玉川からの灌漑水が導入されてから開田されたものである。現在では、国の減反政策による水田の畑地化が進んでいるため、水田地帯の中に畑地が点在しており、水田面積は年々減少傾向にある。

### Ⅲ 六郷扇状地の水収支

#### 1. 水収支に関する前提条件

##### 1) 基礎条件

本節では、六郷扇状地における水収支を考察する。第1図に示したように、六郷扇状地上において、円筒分水施設を頂点とし、標高50mの等高線とで結ばれる扇形ABCを水収支区として定め、その範囲における水収支をもって六郷扇状地全体の水収支として検討した。扇形ABCは肥田(1990)に従ったものであり、面積は5.810km<sup>2</sup>である。

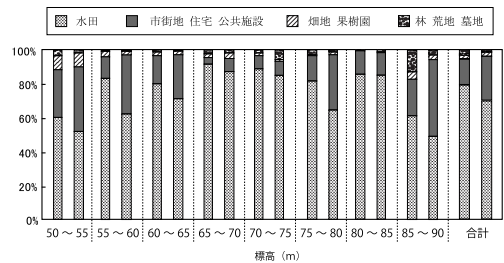
また、水収支区外から水収支区内への地下水の流入量は無いものとする。すなわち、地下水は扇頂から扇面の最大傾斜の方向に放射状に流れるため、扇形ABCのAB、AC両サイドから扇形内への地下水流入は無視する。さらに、六郷扇状地を形成した丸子川は、現在、扇頂付近で北流していること、そして地下水の流線の形状から判断して、丸子川から水収支区への地下水涵養は無いものとする。扇状地の透水係数は一定とする。

また、水収支期間は肥田(1990)においては5期間に分けられていたが、本研究では地表における自然活動および人間活動を考慮して6期間に分けた<sup>3)</sup>。

##### 2) 土地利用の割合

各水収支項目の考察をする上で、インプットおよびアウトプット項目に大きな影響を与えるものと予想される、土地利用の割合を検討する。

扇形ABC内の土地利用割合については、肥田



第2図 六郷扇状地における土地利用割合 (肥田(1990)および2005年5月1日の現地調査より作成) 各標高の左側は1972年、右側は2005年である。

(1990)が1972年について検討しているものの、土地利用割合は近年大きく変化していることが予想される。そこで、土地利用割合を現地調査により求め、1972年との比較、検討を行った。

土地利用割合の変化を1972年と2005年において比較した結果を第2図に示す。第2図によると、2005年における水田の総面積は1972年と比較して9.5%の減少であり、市街地の総面積は逆に10.9%の増加となった。各標高において市街地の割合が増加しており、特に扇端部での市街地の割合の増加が際立つが、標高75-80m、85-90mの扇頂部における増加も見逃せない。

市街地の増加に伴い、大きく減少したのが水田の割合である。水田の面積が減少することは地下水涵養量の減少を招き、市街地の面積の増加は地下水揚水量の増加と地下水涵養量の減少を引き起こすことが考えられる。

#### 2. 水収支の検討

##### 1) インプット項目

水収支におけるインプット項目として取り上げるのが、「降水」、「水田灌漑」、そして「人工涵養」の3項目である。

まず「降水」に関しては、気象台による大曲地点<sup>4)</sup>の降水量データ(1977年から2000年の平均値)を用いてインプット量を算出した。なお、積雪も降水として考慮し、融雪水によるインプットは第Ⅲ期にすべて加算した。また、「水田灌漑」に関しては肥田(1990)による浸透能と2005年における水田面積の割合から算出した。さらに、「人工涵養」は、扇面に存在する4ヶ所の涵養池からの涵養総量を150ℓ/sと仮定し<sup>5)</sup>、人工涵養は積雪期および非灌漑期の2期間に行われるものとして算出した。

第1表 六郷扇状地における水収支

(単位はm<sup>3</sup>)

水収支期間	I	II	III	IV	V	VI	全年
	9/1~12/15	12/16~2/15	2/16~4/6	4/7~5/6	5/7~5/22	5/23~8/31	9/1~8/31
日数	106	62	50	30	16	101	365
特色	非灌漑期	積雪期	融雪期	融雪終了	水田灌漑初期	水田灌漑期	
イン プ ツ ト	降水量	3003834	270699	2682015	622144	339246	10005422
	水田灌漑	0	0	0	0	6399414	34272861
	人工涵養	1373760	803520	648000	0	0	2825280
	合計	4377594	1074219	3330015	622144	6738660	30960931
ア ウ ツ プ ツ ト	蒸発散	940640	3400	66038	255015	229456	3895409
	生活用水	189090	94046	73921	43148	23268	583034
	消雪用揚水	99101	447379	159408	0	0	705888
	湧水	1373760	428544	1728000	388800	552960	7962624
	地下水流出	8022758	4349722	4475520	2208384	1775002	31311792
合計	10625349	5323092	6502887	2895347	2580685	16531386	44458746
収支	-6247755	-4248872	-3172872	-2273203	4157974	14429545	2644816

注) 第III章、第2節の各算定条件を基に作成

## 2) アウトプット項目

水収支におけるアウトプット項目として取り上げるのが、「蒸発散」、「生活用水」、「消雪用揚水」、「湧水」、そして「地下水流出」の5項目である。

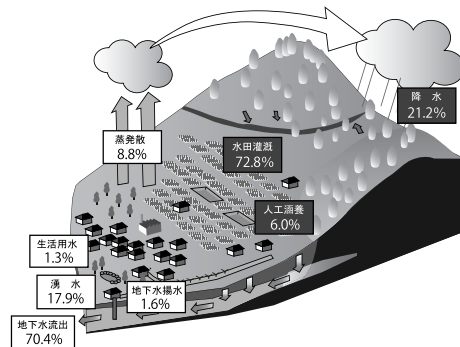
「蒸発散」は気象台による大曲地点の気温データ(1977年から2000年の平均値)からソーンスウェイト法により可能蒸発散量を算出し、その値を蒸発散量として置き換えた。「生活用水」に関しては、扇状地に住民は上水道として地下水を揚水しているが、その上水道使用量が不明であったため、旧六郷町より下水道使用量を借用し、その値を基に算出した<sup>6)</sup>。「消雪用揚水」は、積雪期に消雪口から揚水される量を数地点において実測し、その揚水量を基に全揚水量を算出した<sup>7)</sup>。「湧水」に関しては、全湧出量を各期で仮定し算出した<sup>8)</sup>。「地下水流出」は扇形ABCのBC断面を通過する地下水量を地下水流出量として考え、各期においてその値を算出した<sup>9)</sup>。

## 3. 水収支の算定結果

## 1) 水収支の定量化

土地利用割合と前節の算出条件により求められた各水収支項目の値を基に、水収支の一覧を作成した(第1表)。さらに、第1表の値を基に、各期間における各水収支項目の水収支に対する寄与率を百分率で求め、模式図によって第3図に表した。

まず、インプット項目で最も大きな寄与を果たし



第3図 六郷扇状地における各水収支項目の寄与率(年間)

(第1表を基に作成)

ているのが水田灌漑である。灌漑期間は1年の約3分の1にあたる117日にすぎないことから、水田のもつ地下水涵養機能の大きさをうかがうことができる。また、人工涵養によるインプット量も見逃すことができない。水田灌漑や降水量と比較すると、人工涵養によるインプット量は決して大きな値とはいえないが、積雪期や非灌漑期などのインプット量が少なくなる時期には、地下水を生み出す主要因として機能していることが分かる。

一方で、アウトプットに関して注目すべきは、年間の生活用水量に対して、冬期間にのみ行われる消雪用の揚水量が上回ることである。消雪用の揚水は

積雪期間に24時間連続で揚水をしている場合も見受けられるので、消雪用の揚水量を少しでも抑える工夫をすることで、冬期間の地下水位の低下が食い止められるものと思われる。また、地下水流出によるアウトプットが大きくなったのは、扇状地における地下水の循環する速度が速いことが要因であると思われる。

水収支を総合すると、本研究ではインプット量がアウトプット量を上回り、年間の水収支はプラスとなった。しかし、仮に人工涵養を行っていない場合、水収支はマイナスとなり、地下水位は低下し続けることが考えられる。

#### IV 地下水人工涵養による地下水温の対応

##### 1. 観測施設

人工涵養を行う涵養池は、六郷扇状地上に4ヶ所設置されている。本研究において使用した涵養池は、北緯39° 25' 02"、東経140° 34' 06"、標高68mに存在する。池底の面積は2120m<sup>2</sup>、深さは3.4mである(太田, 2000)。涵養池は素掘りの状態であり、扇状地礫層が露呈している。涵養池に給水される水は、六郷扇状地の扇頂部で取得される丸子川の水であり、年間を通して流れている。排水路の水は前処理を施さずに、直接涵養池に給水されている。

また、地下水位および地下水温を測定するために、観測井を3本用いた。地下水が東から西方向へ流動していることを考慮し、観測井は涵養池から地下水流線に沿って一直線に配置されている。さらに、

涵養池から西へ308mの地点にピエゾメータ(20m深、50m深、100m深)が存在する。

##### 2. 人工涵養に伴う涵養池下の地下水温分布

###### 1) 調査概要

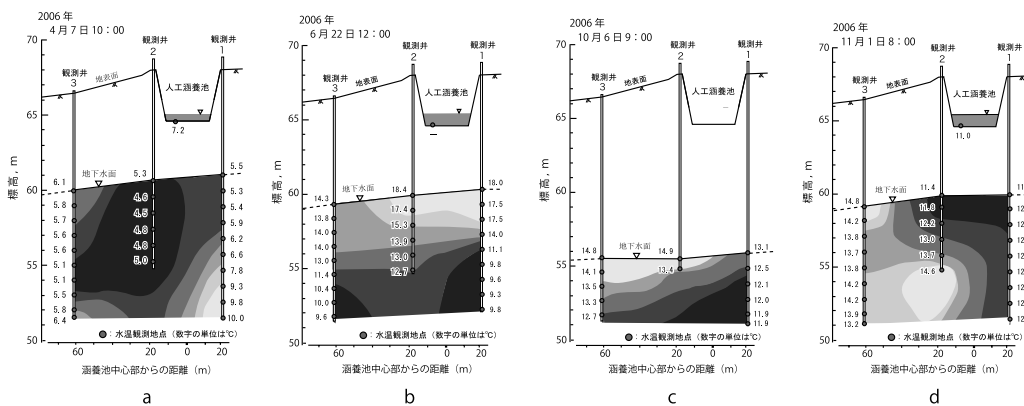
人工涵養によって涵養池に給水された水が、地下水を涵養した後どのような流動をするのかについて、地下水温をトレーサーとして考察した。

地下水流動を把握するうえで、地下水温はトレーサーとして用いることができる(佐倉, 1993)。また、観測井の口径は50mmであるため、観測井内に現れた地下水温は周囲の地下水温と温度平衡にあるとみなすことができる(谷口, 1987)。

人工涵養に伴う涵養池下の地下水温の変化を把握するために、3本の観測井(第4図中、観測井1~3)を用いて地下水温の観測を行い、地下水温の分布を考察した。観測を行ったのは、2006年3月20日から2007年1月5日までの計66回である。

なお、涵養池の水温が地下水温に及ぼす影響を考察するために、地下水温測定時の涵養池内の水温を測定した。観測井内の地下水温を測定するための操作は、地下水位を測定したのち、水温計を地下水面から1m間隔で井底まで静かに下ろした。涵養池内の水温測定に用いた機材は、2006年3月~8月までは多項目水質計(東亜ディーケー株式会社 WQC-24)を、その後はサーミスタ水温計(株式会社 東邦電探 ET-50X型)によって測定した。

涵養池への給水量は約60l/sである。なお、給水温は人為的な影響を受けていないため、季節によ



第4-a図~第4-d図 人工涵養に伴う涵養池下の地下水温分布(2006年)

(第4-a図は4月7日、第4-b図は6月22日、第4-c図は10月6日、第4-d図は11月1日の現地調査(いずれも2006年)の観測結果を基に作成)

て変動する。

## 2) 涵養池下の地下水温度分布

地下水温度の分布を可視化するために、地下水温度の低いところから高いところにかけて、黒色から白色に変化するように相対的に色分けを施した。

年間を通して行った計66回の現地調査から、代表的な地下水温度分布を示した4時点を取り上げて考察を行う。

まず、給水水温が5℃前後と低温である時期(第4-a図)では、観測井3における鉛直水温が地下水水面と観測井底では高く、地下水水面から深度7m付近で低くなっている。このことは、給水された水が地下水となった後に、標高の低い方向へ向かって下方に潜り込みながら流動していることを示唆させる。

給水水温が15℃以上と高温である時期(第4図-b)では、涵養池からの給水によって、それまで観測井2から3にかけて存在していた周囲に比べて相対的な低温塊が、下方に押し下げられている。そして、給水水温が低温の時期にみられたような下方に潜り込むような流動はみられなかった。

非灌漑期に入り、人工涵養も停止された時期(第4図-c)では、涵養池への給水に伴う鉛直方向の流動がなくなったことで、12℃前後の自然状態の地下水が標高の高い方向から浸入してきていることがわかる。

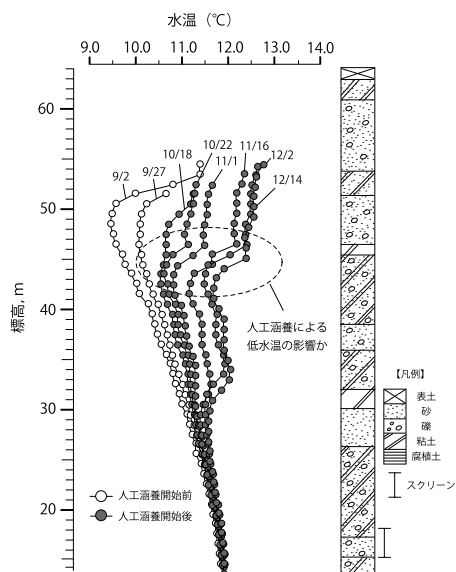
そして、第4図-dは、徐々に給水水温が下がり、地下水温度に比べて給水水温が低い時期であったため、相対的な高温域が残されたまま、涵養池下に低温域が分布している状態であった。

このように、給水水温と涵養池下の地下水温度の年間を通じた調査により、給水水温が地下水温度に比べて低い場合は、標高の低い方向へ向かって下方に潜り込むように流動し、地下水温度に比べて高い場合は下方に潜り込まずに、低温域の上部に乗るような状態で流動することが明らかとなった。

## 3) ピエゾメータ地点の地下水温度

涵養池から地下水の流線に沿って308m下方にあるピエゾメータ地点において、人工涵養に伴う地下水温度の影響について考察した。

ピエゾメータにおける地下水の鉛直水温は、2006年2月から12月までの間に計16回の観測を行った。なお、ピエゾメータ内の地下水の鉛直水温は、20m深、50m深、100m深で観測したが、本論では50m深のみの鉛直水温を示す。



第5図 ピエゾメータにおける地下水温度の鉛直分布(2006年)

(現地調査の観測結果を基に作成)

注) 図中の地質柱状図はピエゾメータの50m深のものである(太田, 2000)。

人工涵養は2006年8月下旬に停止し、10月13日に再び開始したことを踏まえ、全観測のうちで2006年9月2日から12月14日までの計8回の鉛直水温のみを取り上げて第5図に示した。

人工涵養を停止している期間の鉛直水温分布を示す2006年9月2日と9月27日では、地下水面より数m以深の地点から恒温である約11.5℃に向かって、直線的な勾配を保ちながら温度が上昇している。しかし、人工涵養を開始した10月13日以降の鉛直水温分布は直線的な勾配をもたない。特に標高45mから40mにかけての地下水温度の低下が約1℃と、極端な変動を示す。

涵養池への給水水温は、10月から11月にかけては10~12℃、12月から1月にかけては5~7℃であった。そして、人工涵養を行っている時期の鉛直水温が極端な変動を示す標高40~45m付近では、いずれの時点においても水温が低下している。このことから、人工涵養による地下水温度の影響が、ピエゾメータ地点においても現れていることが示唆される。

しかし、本研究でどのようなプロセスを経て、どの程度の影響を与えているのかについては把握できなかった。

## V 結 論

本研究により明らかになったことを以下に示す。

1. 六郷扇状地の水収支を算定した結果、地下水人工涵養による水収支に対するインプット量は年間で $34,272,861\text{m}^3$ となり、寄与率は約6.0%となった。ただし、積雪期に限ると寄与率は約74.8%となり、地下水位が低下する時期の重要な地下水供給源となることが明らかとなった。
2. 涵養池に給水する水温が涵養池下の地下水温に比べて低い場合、涵養された地下水は標高の低い方向へ向かって下方に潜り込むように流動し、涵養池に給水する水温が涵養池下の地下水温に比べて高い場合、涵養された地下水は、涵養池下に存在していた低水温域を押し下げ、その低水温域の上部に乗るような状態で流動することが明らかになった。
3. 人工涵養の開始に伴い、涵養池から地下水の流線に沿って308m下方にある地点において、地下水温の点で影響を受けることが明らかとなった。しかし、影響を与えるまでのプロセスや影響の大きさなどの詳細は明らかにできなかった。

本稿は、2006年度秋田大学大学院教育学研究科に提出した修士論文の一部を加筆・修正してまとめたものである。本稿の作成にあたり、秋田大学教育文化学部の肥田 登先生には、終始丁寧なご指導と貴重なご助言をいただきました。現地調査に際しては、美郷町役場および町民の方々から、ご理解と多大なご協力をいただきました。末筆ながら、以上の方々深く感謝申し上げます。

### 注

- 1) 土水路とは、コンクリート等で兩岸、底ともに舗装されていない素掘りの水路のことである。
- 2) 田沢疎水は仙北郡東部地域5町村にわたる用水路であり、国営事業として1963年に完成した。
- 3) 6期間は第Ⅰ期（非灌漑期）、第Ⅱ期（積雪期）、第Ⅲ期（融雪期）、第Ⅳ期（融雪終了）、第Ⅴ期（水田灌漑初期）、第Ⅵ期（水田灌漑期）である。
- 4) 大曲气象台までは、旧六郷町の市街地から直線距離にして約9kmである。
- 5) 4つの涵養池に対する平均給水量の総和である。

- 6) 旧六郷町より下水道水の使用量のデータ（2004年度）を借用し、下水道の敷設状況なども考慮したうえで、上水道水の使用量を下水道水の使用量の3倍と仮定して生活用水量を求めた。
- 7) 実測した値から $1\text{m}^2$ 当たりの揚水量を求め、総消雪面積（ $\text{m}^2$ ）との積により全揚水量を算出した。
- 8) 実測した値と肥田（1990）を参考にして、第Ⅰ期・第Ⅳ期： $150\text{l/s}$ 、第Ⅱ期： $80\text{l/s}$ 、第Ⅲ期・第Ⅴ期・第Ⅵ期： $400\text{l/s}$ と仮定した。
- 9) 地下水流出量は第Ⅰ期： $0.88\text{m}^3/\text{s}$ 、第Ⅱ期： $0.81\text{m}^3/\text{s}$ 、第Ⅲ期： $1.04\text{m}^3/\text{s}$ 、第Ⅳ期： $0.85\text{m}^3/\text{s}$ 、第Ⅴ期： $1.28\text{m}^3/\text{s}$ 、第Ⅵ期： $1.20\text{m}^3/\text{s}$ と算定された。

### 参考文献

- アメリカ土木学会著、肥田 登・水谷宣明・荒井正訳（2005）：『地下水人工涵養の標準ガイドライン』築地書館，193p.
- 太田由紀子（1997）：扇央から扇端間における地下水位変動の相関—秋田県六郷扇状地を事例として—。秋大地理，第44号，15-20.
- 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，第47号，1-8.
- 佐倉保夫（1993）：温度をトレーサーとした地下水流動の研究。日本水文科学会誌，第23巻，35-45.
- 谷口真人（1987）：長岡平野における地下水温の形成機構。地理学評論，第60巻，725-738.
- 肥田 登（1989）：水田を用いた積雪期間の地下水人工かん養—秋田県六郷扇状地の例—。ハイドロロジー，第19巻，85-95.
- 肥田 登（1990）：『扇状地の地下水管理』古今書院，263p.
- 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。日本地下水学会誌，第41巻，第1号，23-33.
- 肥田 登（2002）：地下水人工涵養の実施と展望。日本地下水学会誌，第32巻，63-70.
- 若狭真紀・利部 慎・肥田 登（2006）：秋田県成瀬川扇状地の扇央域における水田灌漑用土水路の涵養機能に関する考察。日本地下水学会誌，第36巻，第4号，191-195.