

地下水の熱的機構の解明に
関する研究 (第1報)

東浦將夫*・佐藤 威**・木村忠志***

防災科学技術研究所

横山孝男⁺・丹野清輝⁺⁺

山形大学工学部

**Experimental and theoretical study on heat mechanism of
groundwater flow (First report)**

By

Masao HIGASHIURA, Takeshi SATO, Tadashi KIMURA

National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japan

and

Takao YOKOYAMA and Kiyoteru TANNO

Faculty of Engineering, Yamagata University

Abstract

In recent years, the snow melting system of sprinkling groundwater has come into wide uses in urban areas in Japan-Sea side, which have repeatedly experienced large amounts of snow in winter season. In this system, a large volume of groundwater has been drawn up into confined areas. However, several kinds of problems, such as land subsidence accompanied by the lowering of the groundwater level, have frequently occurred. In replacement of the old-fashioned system, the new snow-melting method

* 新庄雪氷防災研究支所雪氷防災第2研究室 ** 新庄雪氷防災研究支所

*** 新庄雪氷防災研究支所長

+ 前客員研究官 (山形大学工学部機械システム工学科) ++ 工学部大学院

using only groundwater-reserved heat has been gradually increased, and now there are sixteen facilities of this new method in Yamagata Prefecture.

The purposes of this study are to elucidate the heat diffusion mechanism of groundwater and to improve the technology of snow treatment before the appearance of heat problems underground. The Shinjo Branch of Snow and Ice Studies of the National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention has carried out field studies on the heat diffusion mechanism of groundwater associated with the snow melting system using heat from groundwater.

Seven experimental wells of 30m-deep were set up in the precincts of the Shinjo Branch. By installing a cold junction to the thermobath, the accuracy of temperature measurements of better than $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ was achieved.

Warm and cool waters were injected to recharge the well during the period Apr. 3 to May 11, 1990. The volumes were 500m^3 each and their temperatures were 40°C and 6°C , respectively. The distribution of the groundwater temperature was numerically simulated in a computer system by the use of the explicit finite difference method in a three dimensional model. The warm water distribution such simulated was compared to the observed data, and the result of this simulation showed good agreement with the observed data.

Another heat collecting experiment with a vertical double tube was carried out during Feb. 25 to Mar. 6, 1990 and the total volume of the collected heat was 2568.18MJ(619.23 Mcal). The distance between the double tube, D-2, and the well, W-1, was 1.78 meters, and the groundwater temperature of well W-1 changed 24 to 36 hours after the measurements. The thermal conductivity of the soil was evaluated as $11.6\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ through the simulation model.

Key words: field experiment, recharge, measurement of groundwater temperature, aquifer thermal energy storage, numerical analysis.

キーワード：野外実験，涵養，地下水温度測定，帯水層蓄熱，数値解析

1. はじめに

消雪パイプによる融雪は非常に効果的であるのと、他の融雪方法に比べて安価であるとの理由により、昭和38年以降、多雪都市の市街地を中心に急激に普及していった。この装置の敷設されている多雪都市では、冬期間限られた地域で多量の地下水が過剰に揚水されるため、地盤沈下、地下水位の低下など種々の問題が生じている。

そのため、この方式に変わるものとして地下水の熱のみを融雪に使う無散水融雪技術の実用化が現在進みつつある。山形県内でこの技術を駆使した装置が設置されている箇所は、平成2年10月現在で16箇所に達している。しかし、科学技術庁資源調査所(1988)の報告書においても指摘されている様に、地中熱環境については不明な点が多く、問題の生じる前に地下水の熱的機構を明らかにする必要がある。

地下水の熱エネルギーや帯水層の蓄熱に関する研究は、石油危機以降の代替エネルギーとして数多く研究されてきたが、融雪用熱源である比較的深度の浅い地下水を対象とした研究は、それ程多くなされてはいない(横山ほか, 1975, 1980; 横山・桂木, 1990; 谷口ほか,

1982; 小林ほか, 1989).

地中における熱的機構を明らかにし, 融雪技術の高度化に資するために, 昭和 63 年度(1988 年度) から科学技術振興調整費による中課題研究「生活空間における雪処理技術の高度化に関する研究」を開始した. この研究課題の中で, 防災科学技術研究所は, 「広域地下水の量的熱的流動機構の研究」と「屋根雪処理システムの通年的利用法」を組み合わせた研究を行っている (東浦・佐藤, 1989, 1990; 東浦ほか, 1991). 第1期の研究期間は3ヵ年で, 第2期は, 2ヵ年で行われる予定である.

本研究は, 野外実験場において, 人為的に種々の条件で地中に熱を与える実証的観測研究を行うと共に熱移動現象の数値シミュレーションを行い, 浅層地熱の熱移動機構と帯水層の蓄熱機構を解明し, 自然環境のバランスを壊さない地熱の利用技術の開発を行うことを目的としている.

そのため, 新庄雪氷防災研究支所構内に深度 30 m の実験用観測井 7 本を掘削し, 研究項目「屋根雪処理システムの通年的利用法の研究」で行う垂直二重管による採熱実験にともなう地下水温の変化を観測する (図 1). また, 実験井の任意の深さに発熱率 10 kw, 温度制御可能な熱発生源 (電気ヒーター) を設置し, 条件を任意に変えて地中放熱実験する. さらに,

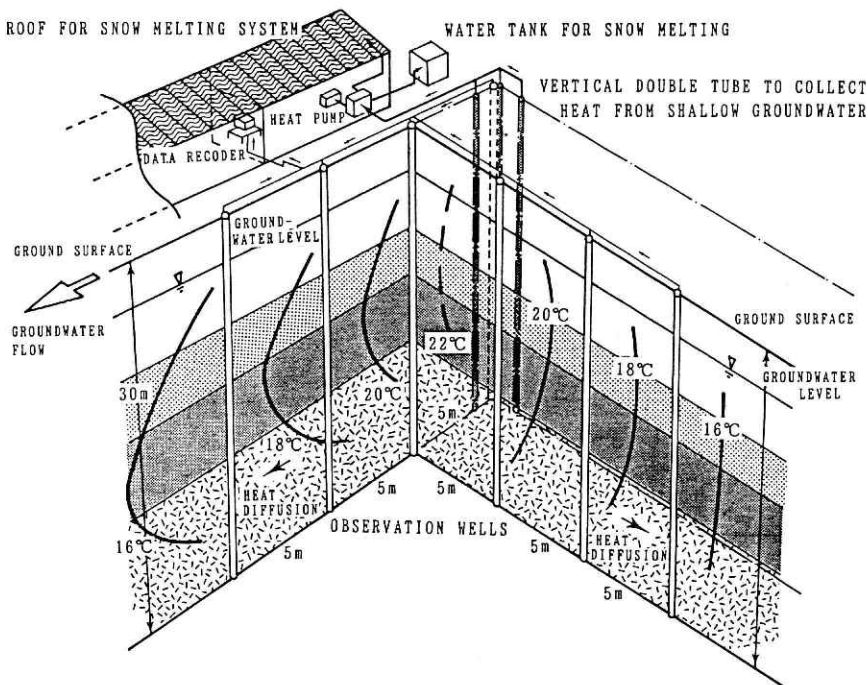


図1 地下水の熱移動実験に関する研究の概念図 (新庄雪氷防災研究支所構内)

Fig.1 Schematic plan of the experimental equipment for heat diffusion of groundwater.

温水・冷水井戸注入実験装置を製作し、任意の温度の水を注入する実験も行う。これらの実験と並行して三次元熱流動モデルを用いてシミュレーション解析を行い、浅層地熱の熱移動機構を明らかにする。

本報告では、第1期の研究目標、研究方法と研究経過等について述べる。

2. 研究方法

2.1 実験設備

昭和63年度(1988年度)は、当支所構内に深度30mの実験用観測井4本(W-1~W-4)を地下水流動方向に5m間隔で掘削し、「屋根雪処理システムの通年的利用法の研究」の中で行われる浅層地熱の採熱の影響を調べるため、各井戸の孔底から5m間隔に熱電対を設置し、また各井戸に水圧式水位計を設置した。それぞれの測定値は、データロガーで集中記録した。

観測井はロータリー式掘削機を使用し、32.0mまで掘削し、各井戸には開孔率5.5%にスリット加工したケーシングパイプ(配管用炭素鋼鋼管, JIS-G-3452 SGP)を挿入した。W-1の内径は150mmで、W-2~W-4の内径は60mmであり、それぞれの完成深度は30mである(図2)。各井戸の周囲を小粒の砂利で充填したが、浸透した雨水などにより地下水温の異常が測定された。そこで、ケーシングパイプの地上周囲に50×50×50cmのコンクリートを打ち、浸透水の影響を取り除いた。なお、ストレーナー(スリット加工を施した部分)は地下8m以下の地層の透水性等から判断して、孔底から22mまでとした。

平成元年度(1989年度)は、上記の実験用観測井と配列方向をずらして、深度30mの観測井3本(W-5, W-6, W-7)を増設し、地中における3次元的な熱移動が測定できるようにした(図3, 写真1, 2)。W-6の内径150mmで、W-5, W-7の内径は60mmである。なお、井戸の構造および水位、水温の測定法などは、前年度と同様である。また、屋根雪処理実験に関係なく熱移動実験ができるように、井戸内熱発生装置を製作すると共に簡易温水・冷水注入装置を使用して予備的な実験を行った。

平成2年度(1990年度)は、温水・冷水井戸注入実験装置を製作し、温水・冷水の地中注入の本格的実験を行った。

冬期の積雪重量や野ネズミ等による信号線の被害を防ぐため、観測井から小屋までの地上部は全てコンクリートトラフを埋設し、その中に配線した。また、無停電電源装置を設置した。データは、通常1時間毎に収録しフロッピーディスクに書き込んだが、1日1回の割合で印字記録もした。

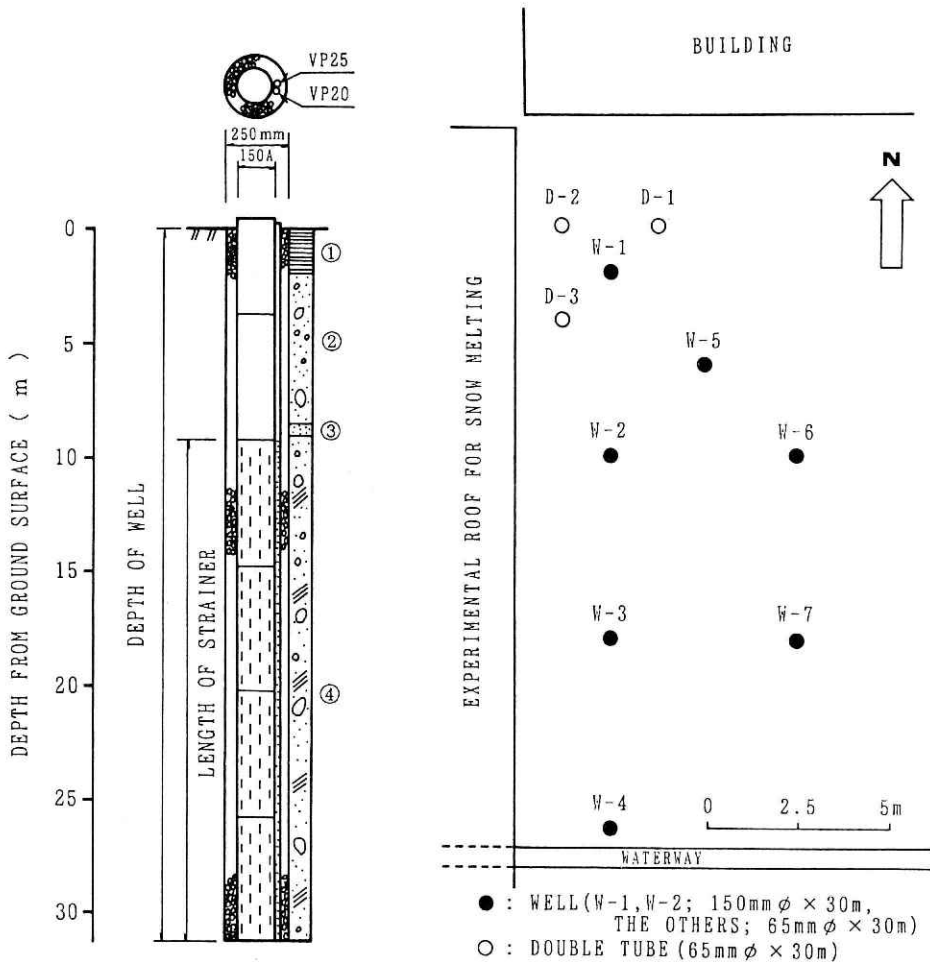


図2 観測井 W-1 の井戸構造と地質柱状図
 ①：表土，②：玉石混じり砂礫層，③：砂層，
 ④：粘土混じり砂礫層

Fig.2 Structure of the observation well(W-1) with the geological profile.

①: Surface soil, ②: Sandy gravel with boulder, ③: Sand, ④: Sandy gravel with clay

図3 地下水の熱移動実験施設の観測井と垂直二重管の位置図

黒丸：観測井(W-1, W-2; 150mm ϕ \times 30m, その他; 65mm ϕ \times 30m),
 白丸：垂直二重管 (65mm ϕ \times 30m)

Fig.3 Locations of the observation wells and the vertical double tubes.

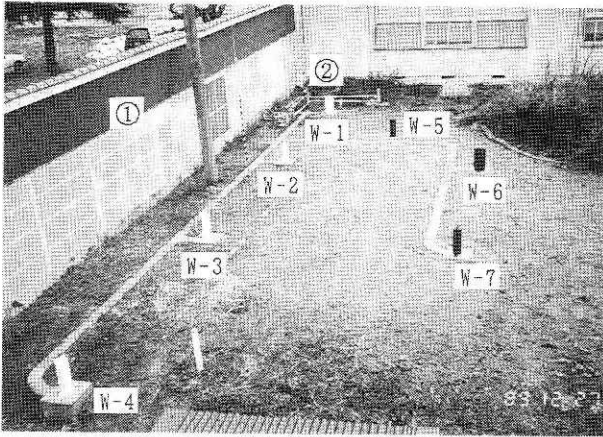


写真1 地下水の熱移動実験装置の全景
(新庄雪水防災研究支所構内)
W-1~W-7: 観測井, ①: 屋根
雪実験施設, ②: 採熱用垂直2
重管

Photo 1 A complete view of the
experimental facilities for
heat diffusion of ground-
water.

W-1~W-7: Observation
wells, ①: Roof for snow
melting system, ②: Vertical
double tube to collect heat
from shallow groundwater

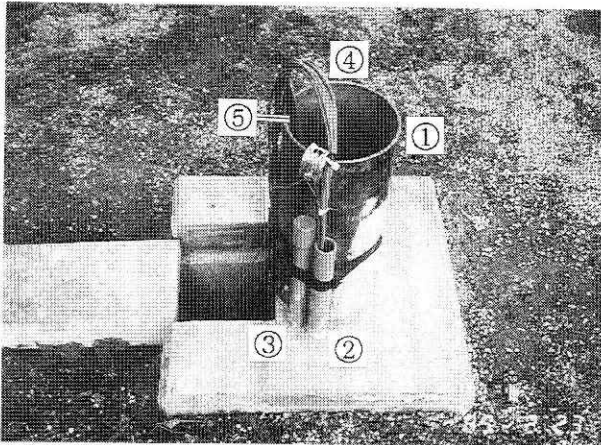


写真2 センサーを設置した観測
井 (W-1)

①: 観測井 W-1, 150 mm
 $\phi \times 30$ m ②: 塩化ビ
ニールパイプ 25 mm $\phi \times$
30 m, ③: 塩化ビニール
パイプ 20 mm $\phi \times 30$ m,
④: c-c 熱電対, ⑤: 水
圧式水位計

Photo 2 The observation well,
W-1, with sensors.

①: Observation well,
W-1, 150 mm $\phi \times 30$ m
②: VP, 25 mm $\phi \times 30$ m,
③: VP, 20 mm $\phi \times 30$ m,
④: c-c thermocouple,
⑤: water level gauge
measured by water
pressure

2.2 温度の測定精度の向上法

野外で地下水温の3次元分布を測定するためのセンサーとして、経年変化が少なく価格の安いC-C熱電対を使用した。また、多点のデータを自動記録するために使用したデータロガーは、熱電対の基準接点を内蔵し、熱電対による温度測定値が直接記録可能なものである。データロガーは屋根雪実験施設内に設置したが、測定値にはロガー周囲温度の影響と考えられる誤差が認められた。このため、昭和63年(1988年)の垂直二重管(図4)の採熱実験では、温度の測定誤差($\pm 0.3^{\circ}\text{C}$, 後述)に隠されて、採熱による地下水温の変化が記録されなかった。また、熱発生源からの距離が増すほど地中温度変化が小さくなるので、それを検出

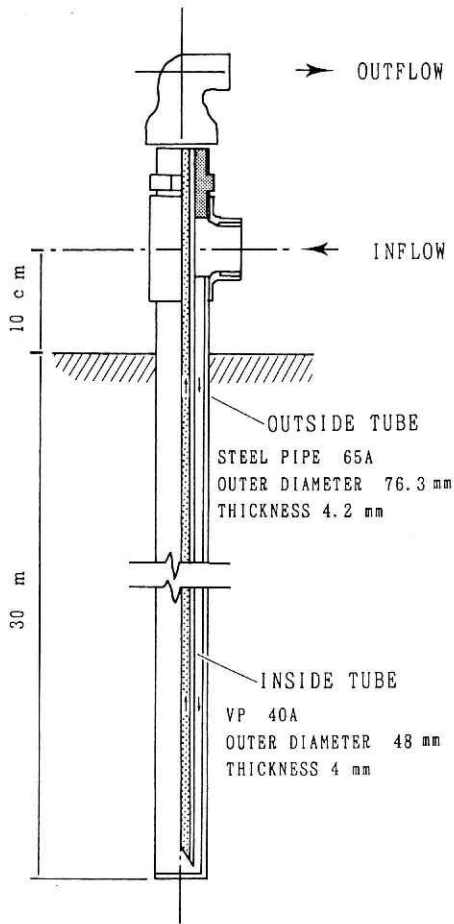


図4 垂直二重管熱交換器の概念図 (熱媒:自動車用不凍液30%水溶液)

Fig.4 Vertical double tube to collect heat from shallow groundwater.

して数値解析の結果と比較するためには、温度測定精度を $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ 程度まで向上させることが必要であった。

以下では、このデータロガー自体の誤差を除去し、温度の測定精度を向上させる方法について本研究で改良した順に述べるが、その方法は、測定環境が良くない野外実験等において同様のデータロガーを使用する場合に参考となるであろう。

① スキャナーの内部基準接点使用

当初使用した温度記録装置の内部基準接点の温度は、スキャナーに内蔵された温度検出用センサー (薄膜白金センサー) でモニタリングしていたが、内部基準接点の温度不均一によると考えられるチャンネル間の系統的な誤差が確認され、また、測定値に気温依存性 (負の相関) の在ることが確認された。即ち、地上の温度変化と関係なく一定値を示すと考えられる地下30mの地下水温の測定値より、スキャナーに起因する測定誤差は $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ であることが分かった。この値は、使用した記録装置の仕様精度の範囲内であったが、前述の通り、本

研究で必要とする測定精度を満足しない。

② 外部基準接点使用 (循環水槽)

内部基準接点に起因するチャンネル間の系統的誤差を除くため、熱電対の基準接点を 1 箇所にとり、約 2 ℓ の水が小型の遠心ポンプによって循環する水槽に投入した。そして、水槽内の水温を白金抵抗線温度計 (JIS 0.5 級) で、熱電対起電力と同時測定し、両者から測定対象の温度を算出した。なお、白金抵抗線温度計は、時々標準温度計で検定した。測定期間中の循環水温は、外気温の影響を受けて $25 \pm 2^\circ\text{C}$ の範囲で変化した。この結果、測定値には循環水温の変化と負の相関をもつ変動がみられたが、①の場合より変動幅は縮小した。測定誤差は、 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 強であった。

③ 外部基準接点使用 (恒温水槽)

②と同様であるが、基準接点の温度の変化幅を更に小さくするため、循環水槽の代わりに PID 制御 (比例—積分—微分動作) 方式の電子恒温水槽を使用した (図 5, 写真 3)。①の場合と同様に、地下 30 m の水温をモニターした結果、測定値の変動幅は $\pm 0.05^\circ\text{C}$ 以下と精度が向上した。さらに、測定精度を確認するため、水と氷の比率を常に一定に制御する形式の零コントローラ (0°C 基準温度装置) の試料挿入筒内の温度を長期間測定したが、この場合も測定値の変動幅は $\pm 0.05^\circ\text{C}$ 以下であった。しかし、 0.15°C の系統的誤差が観測され (図 6)、これは白金抵抗線温度計の検定が不十分であるための誤差と推定された。そこで、地下水温分布の測定はこのシステムで行うことにし、表示値から 0.15°C を差し引いた値を測定値とすることとした。

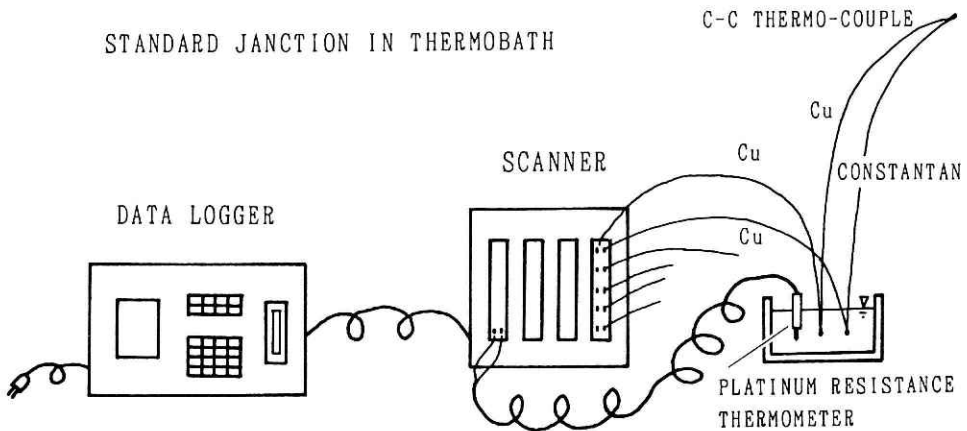


図 5 C-C 熱電対による精密温度測定システムの概念図 (白金抵抗温度計; 0.5 級)

Fig.5 Schematic diagram of the precise measurement of temperature by a c-c thermo-couple.

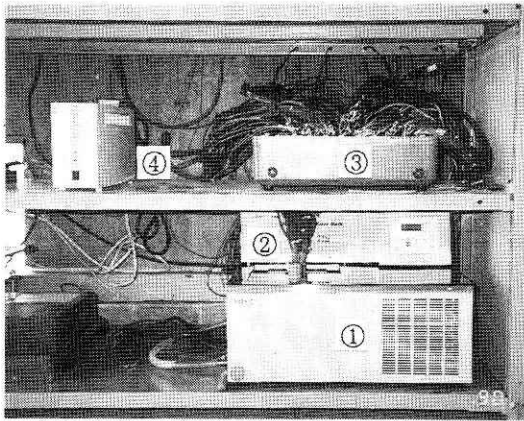


写真3 恒温水槽中に挿入された外部基準接点

①：恒温水槽，②：挿入された熱電対外部基準接点と白金抵抗温度計③；スキャナー，④；無停電電源

Photo 3 External standard junctions in a thermobath.

①: Waterbath of controlled temperature, ②: External standard junctions of c-c thermo-couple and a platinum resistance thermometer, ③: Scanner, ④: Power source for power failure

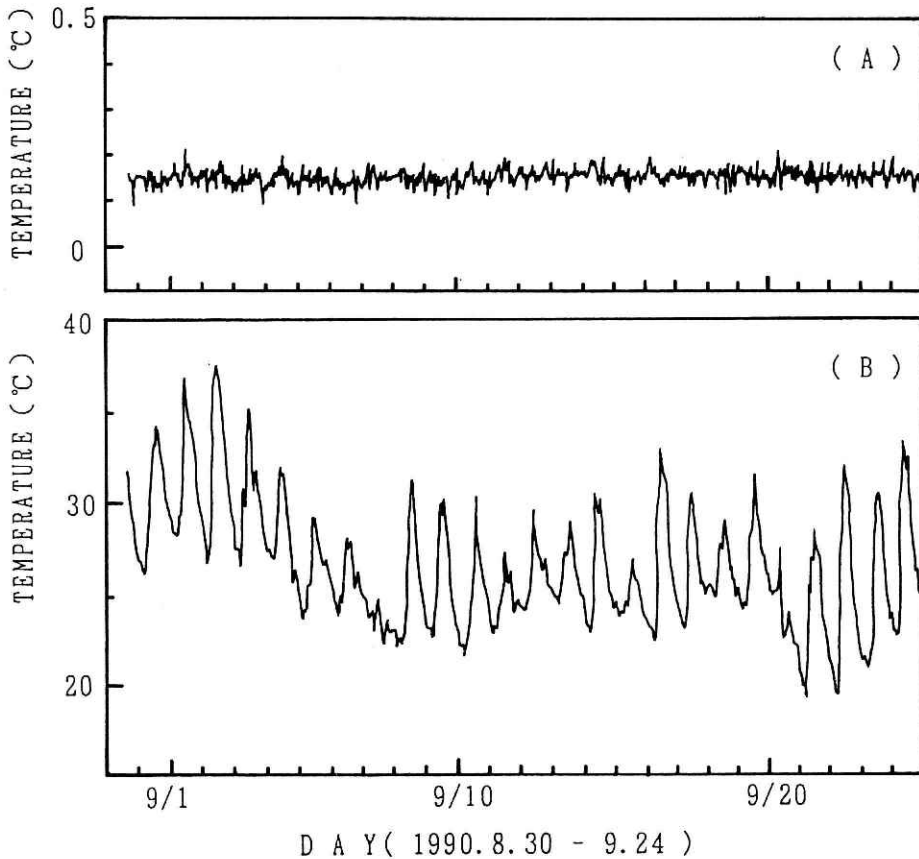


図6 白金抵抗温度計で測定した0°C標準温度装置(零コントローラ)の試料挿入筒内温度(A)と気温(B)

Fig.6 Temperature of a platinum resistance thermometer in the 0°C standard temperature regulator (A) and air temperature (B).

2.3 熱移動シミュレーションモデル

本実験施設で行っている様々な熱移動実験結果を解析するために、フルスケールの3次元シミュレーションモデルを構築し、最終的な詰めを行っている。数値計算は、著者の一人が開発した方法（農林水産省北陸農政局計画部資源課・国際航業㈱, 1988）を基に、更に改良した手法で行なっている。なお、計算手法の詳細については、本誌の次号で掲載する予定である。地下水の熱移動シミュレーションを行うには、1. 地下水の流れ場、2. 熱移動場を連立で解析する必要がある。

1 の流れ場を飽和流と仮定すると、それを支配する方程式は、

$$S_b \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} - q_0 \dots\dots\dots(1)$$

で、 S_b は貯留係数、 h は地下水位（圧力水頭）、 q_0 は単位時間、単位体積当たりの揚水量である。 u , v , w は、それぞれ x , y , z 方向の地下水流速である。なお、 x 方向は野外実験場の東西方向、 y 方向は南北方向、 z 方向は鉛直方向とした。

$$\left. \begin{aligned} u &= -K_x \frac{\partial h}{\partial x}, \\ v &= -K_y \frac{\partial h}{\partial y}, \\ w &= -K_z \left(\frac{\partial h}{\partial z} + \frac{\rho}{\rho_0} \right) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(2)$$

また、 K_x , K_y , K_z は x , y , z それぞれの方向の透水係数である。 ρ は水の密度、 ρ_0 は基準温度（15°C）での水の密度（999.0709 kg/m³）である。なお、(2)式の w の導出については、Appendix 1 に示す。

2 の熱移動場については、次の支配方程式が成立する。

$$\begin{aligned} c\rho_e \frac{\partial \theta}{\partial t} &= \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \\ &+ c\rho_f \left(u \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \frac{\partial \theta}{\partial y} + w \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) \dots\dots\dots(3) \end{aligned}$$

ここで、 θ は温度、 $c\rho_e$ は一相モデルの等価熱容量、 $c\rho_f$ は水の熱容量である。見掛けの熱

伝導項 q_x, q_y, q_z は、

$$q_x = \lambda_e \frac{\partial \theta}{\partial x}, q_y = \lambda_e \frac{\partial \theta}{\partial y}, q_z = \lambda_e \frac{\partial \theta}{\partial z} \dots \dots \dots (4)$$

に従う、なお、 λ_e は熱伝導率である。

計算コードは、大別して4部から構成される。①領域内の岩体、つまり不透壁体まで含めた3次元形状認識及び境界条件設定、②グリッド単位の不均質、異方性を加味した物性値入力、③数値計算本体、④結果の表示から成っている。

③では熱および流れ場の連立解析を3次元かつ非定常で行う。その際、透水係数の不均一性および異方性を考慮すると共に自然対流をも加味し、任意の境界、初期条件のもとで、前進差分法により解析する。ところが、注入実験の場合、流れ場は注入開始後、直ちに準定常状態に移行するので、注入開始・終了時を除き、(1)式のかわりに、定常状態における次の支配方程式を使用し、計算時間を短縮する。

$$0 = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} - q_0 \dots \dots \dots (5)$$

(5)式は(1)式に対し、プリシネスク近似を適用したものと等価である。プリシネスク近似とは、質量保存則において、密度 ρ を不変と考えるが、鉛直方向流速 w の評価においてのみ ρ の温度依存性を考慮することである。通常、(5)式はアイタレーション法で解析する。本論文では、更に必要に応じ有限要素法でも解析し、アイタレーション法で解析した結果の精度についても検討する。これら解析手法（アイタレーション法と有限要素法）は、計算の精度と能率のかねあいにより使い分け、解析を総合的に高めながら計算を進める。これらのことが、前報（農林水産省北陸農政局計画部資源課・国際航業㈱、1988）に比べ改良された点である。

3. 研究結果

実験観測データは現在解析を進めているが、ここでは現時点までに解析された成果について述べる。

3.1 注水による熱移動

簡易の井戸注入装置を用いて、1990年4月3日～4月13日の期間に温水の注入予備実験を行った（図7、写真4）。注入水の温度はヒートポンプで40°Cに設定し、2 m³/hの割合で注水した。注水量は水道用のメーターの針を適時目読みし、注入総量が500 m³になるようにした。注入井の温度化は、図8と図9に示した。実験値と比較するためのシミュレーション解析に

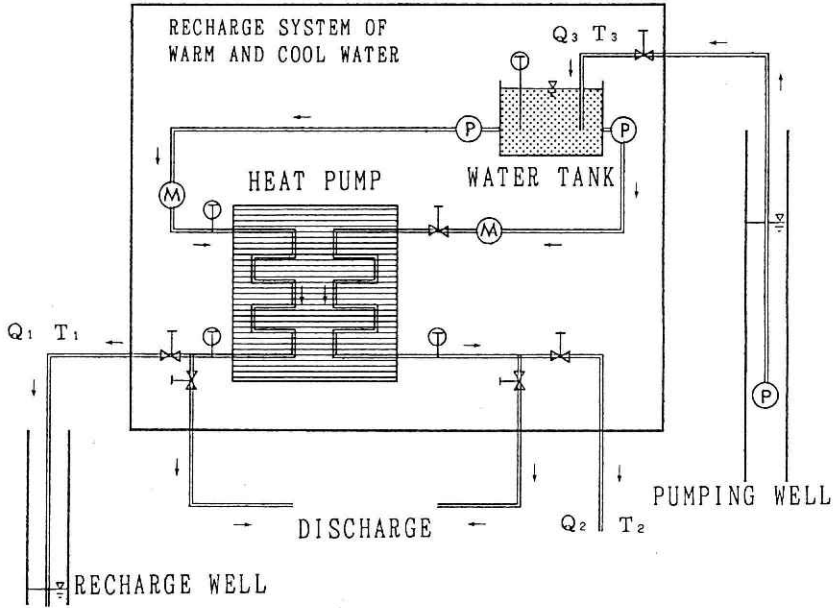


図7 温水・冷水井戸注入実験装置の概念図
 $Q_1 \sim Q_3$: 流量, $T_1 \sim T_3$: 水温, T : 水温計, P : ポンプ, M : 流量計
 Fig.7 Schematic diagram of the experimental setup.

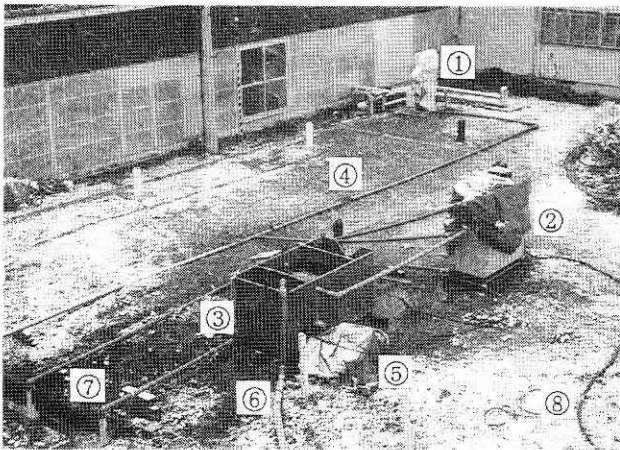


写真4 簡易温水・冷水井戸注入実験装置の全景

- ① : 注入井 (W-1), ② : ヒートポンプ, ③ : 水槽, ④ : 流量計, ⑤ : 送水ポンプ, ⑥ : 水源(地下水), ⑦ : 排水, ⑧ : 電源

Photo 4 A complete view of experimental recharge equipment.

- ① : Recharge well (W-1), ② : Heat pump, ③ : Water tank, ④ : Flowmeter, ⑤ : Pump, ⑥ : Water source (groundwater), ⑦ : Discharge, ⑧ : Power source

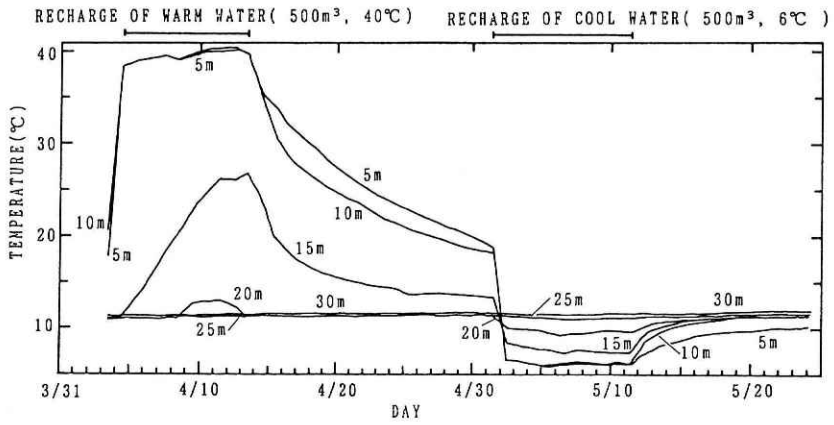


図8 40°Cの温水及び6°Cの冷水をそれぞれ500 m³注入した時の注入井(観測井 W-1)における地下水温の経時変化

Fig.8 Time variation of groundwater temperature at the observation well W-1 (recharge well).

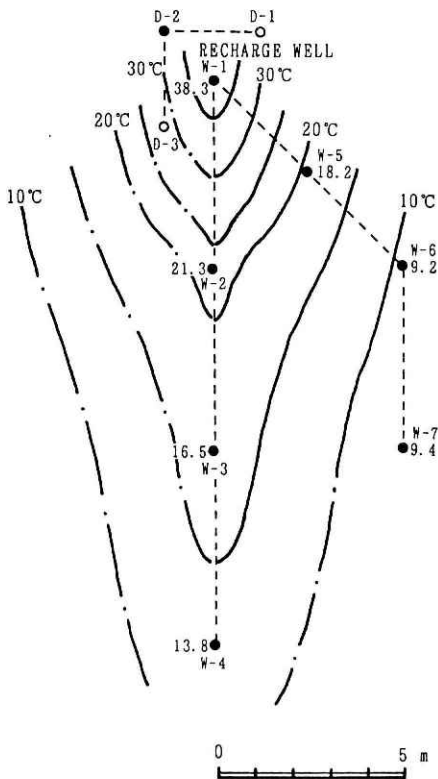


図9 40°Cの温水を2 m³/hの割合で500 m³注入した直後の地下5mの温度分布

Fig.9 Horizontal distribution of groundwater temperature under 5m from the ground surface after 500 m³ recharge of 40°C water at a rate of 2 m³/hour.

用いた計算領域等の設定は、次のような条件で行った (図10)。

境界条件 (フィールド全体) :

グリッド ; $d_x=1.0\text{m}, d_y=2.5\text{m}, d_z=3.0\text{m}$

南北方向両側面 ; 不透壁

上面と下面 ; 不透壁

透水係数 : 粘土層 ; 0 m/h ,

玉石混じり砂礫層 ; 1.26 m/h ,

粘土混じり砂礫層 ; 0.13 m/h

注入量 : 座標 (I, J, K) ; (11, 8, 8) ~

(11, 8, 9) においてそれぞれ $1.0\text{m}^3/\text{h}$

物性値 : 貯留係数 ; 1×10^{-4}

空隙率 ; 0.25

土の熱容量 ; $2.18\text{MJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$

水の熱容量 ; $4.10\text{MJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$

熱分散率 ; $5.82\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

注水温度 ; 40°C

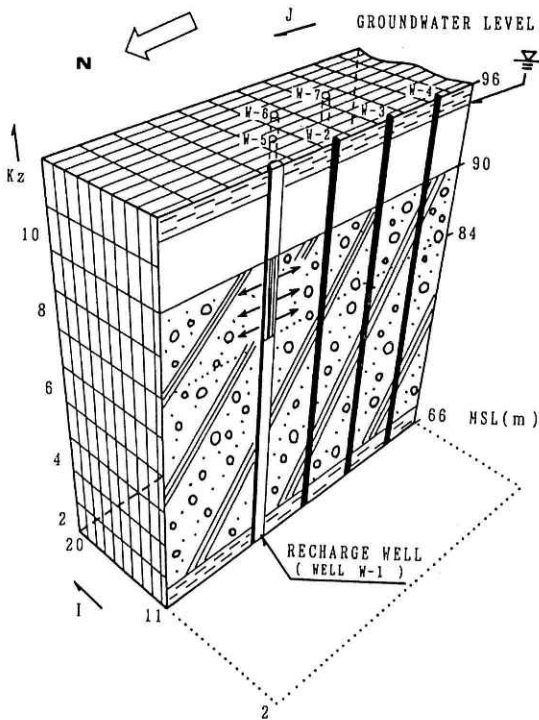


図10 シミュレーションモデルの計算領域と構造

Fig.10 Structure of computed region in a simulation model.

シミュレーションの結果と実測値の比較の1例を図11と図12に示す。図11は地下5mの水温の面的分布で、黒丸は、注入井(W-1)と観測井(W-2~W-7)を示し、各黒丸に添付した数字は、標高91.5m(深さ5m)における注水200時間後の実測水温である。図12の

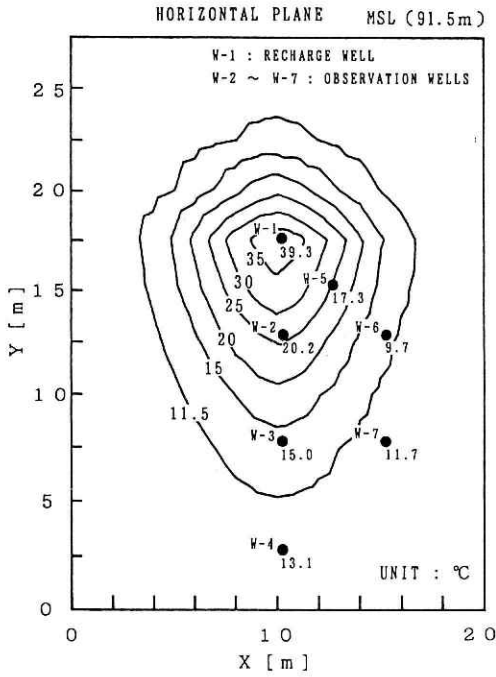


図11 40°Cの温水を2m³/hの割合で200時間注入した後のシミュレーション結果(標高91.5m(地下5m)の水平分布)

Fig.11 Result of simulation after 200 hours' recharge of 40°C groundwater at a rate of 2m³/hour. Black dots show locations of observation points of each well and numerals show observed values. [Horizontal distribution at 91.5m MSL (5m below the ground)]

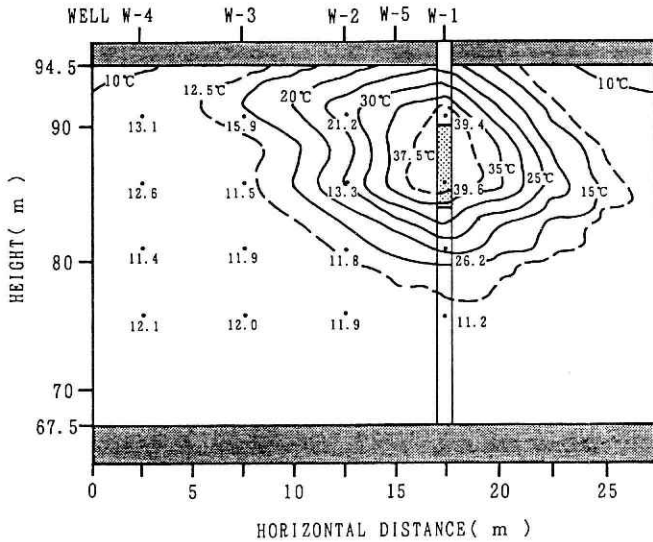


図12 40°Cの温水を2m³/hの割合で200時間注入した後のシミュレーション結果(観測井W-1~W-4方向の垂直分布)

Fig.12 Simulated distribution of groundwater temperature after 200 hours' recharge. Recharge rate is 2m³/h and temperature of the recharge water is 40°C. Black dots show locations of wells and numerals of each well show the observed values. (Vertical profile in the direction of W-1 to W-2)

断面は観測井 W-1~W-4 方向の水温の垂直分布を示し、黒丸は同様に実測値である。算定された水温分布と実測値とは、概ね満足いく一致をしている。今後、観測井の構造、温度測定方法、物性値、地下水流の局所的差異などの影響を考慮し、実験条件に合わせてシミュレーションを行い、さらに精度を高めていく予定である。

3.2 地熱の採熱による熱移動

屋根雪処理システムによる地熱の採熱実験にともない生ずる地下水温の変化を測定した。地下水の熱移動の結果を図13に示す。採熱実験には、深さ30m、内径65mm、内管内径40mmの垂直二重管熱交換器を使用した(図4)。これを多目的ヒートポンプに接続して、熱効率を向上させた地熱採熱装置とした。

垂直二重管熱交換器(D-2)の採熱期間は1990年2月25日12:30~3月5日8:30であり、採熱量は2568.18MJ(612.93Mcal)であった。採熱量は垂直二重管の流入口、流出口における循環液の温度差から算出したが、採熱された地層の位置は不明である。図13に垂直二重管の30mの温度と観測井W-1の水温の時間-深度断面を示した。観測井W-1は、垂直二重管から1.78m離れているが、観測井のW-1の水温変化は、1~1.5日後に現れてきた。また、深度30mの温度にも数日後変化が現われてきたのが分かる。

図示していないが、W-2、W-5の観測井には、採熱の影響と考えられる顕著な水温の低下は見られなかった。なお、2月20日に、地下5mの水温に0.5°Cの急激な低下が現れているが、これは融雪水の浸透のためと考えられる。

採熱実験の解析の場合、融雪水の浸透、地下水流など水温を変化させる要素が存在するため、それらの影響を特定するのが困難であった。今後、熱の影響要素が特定できるように実験を行い、熱移動現象を解明する必要がある。

なお、垂直二重管の採熱に伴う水温の変化を対象として、前述の熱移動モデルを用いてシミュレーション解析を行った。解析では、流れ場は、地下水の自然流のみの影響を受けるものとし、一様かつ定常と仮定した。熱源は30m×65mmφの垂直二重管から一様に吸熱し、二重管を含む部分の熱容量は、その体積を省くように考慮した。

先の注水実験においては、エンタルピー項((3)式の右辺第4項)が優勢であるため、熱伝導率の大小は温度場に大きな影響を与えない。しかし、採熱実験に関しては、逆に熱伝導項が支配的になるため、シミュレーション解析より熱伝導率を推定することが可能となる。本研究では、地層の熱伝導率(λ)を5.82、11.6、17.5W/(m·K)に設定して模擬計算を行った。その結果、この地層の熱伝導率(λ)は、11.6W/(m·K)前後が妥当な値と算定された(図14)。

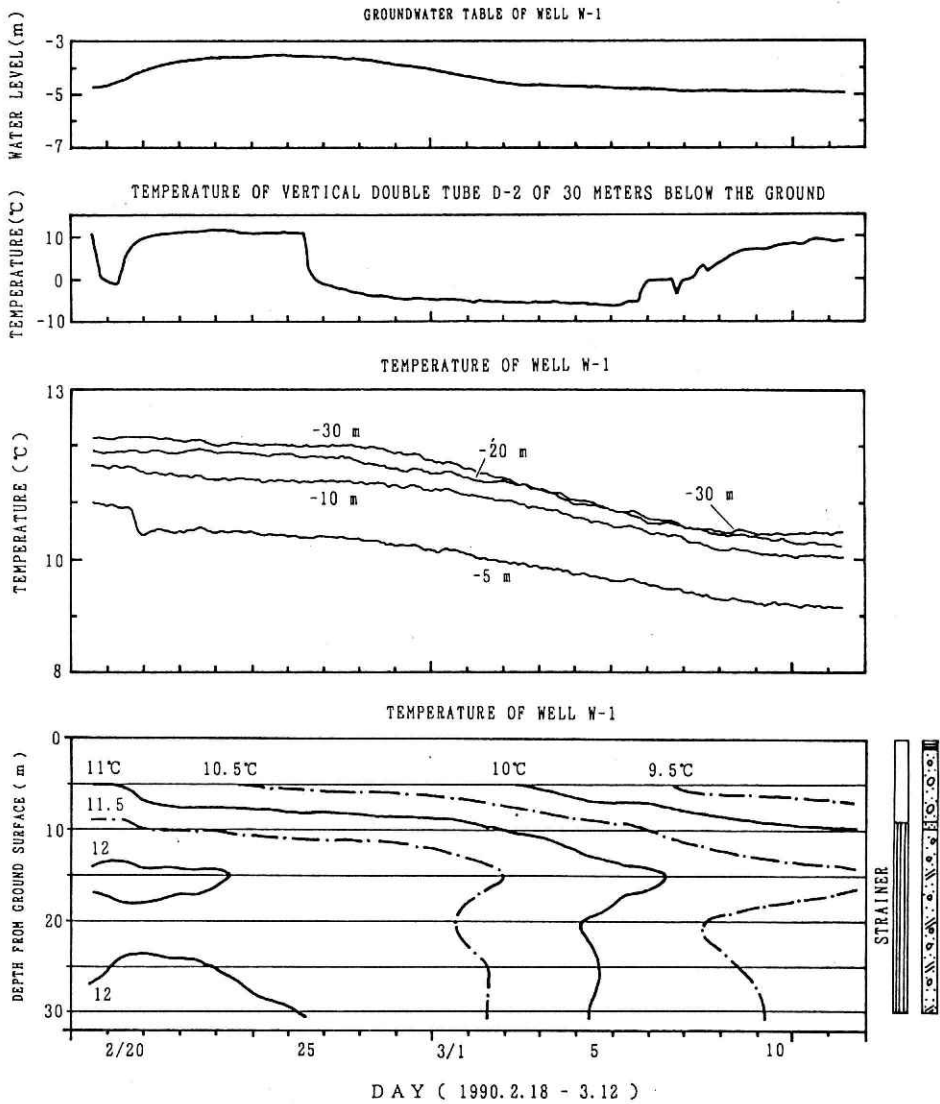


図 13 垂直二重管 (D-2) による採熱に伴う地下水の熱移動実験結果 (垂直二重管の採熱期間は、1990.2.25~3.5 であり、採熱量は 2568.18 MJ (612.93 Mcal) である。右の柱は観測井 W-1 のストレーナーの位置と地質柱状図を示す。)

Fig.13 Experimental results of heat collection from the underground. [Period of heat collection of the vertical double tube D-2 is from Feb. 25, to Mar. 5, in 1990 and collected heat is 2568.18MJ(619.23Mcal).]

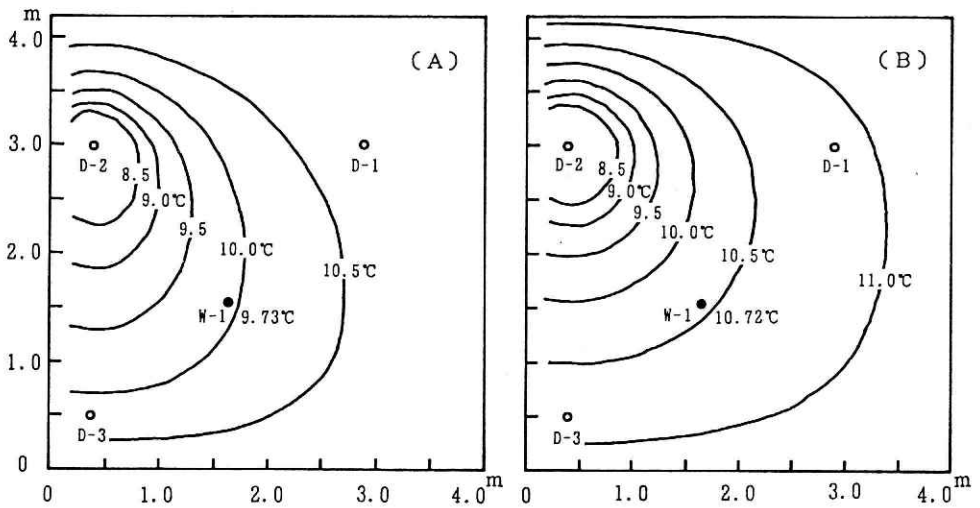


図14 仮定した熱伝導率(λ)を用いて垂直二重管(D-2)の採熱実験による温度分布をシミュレーションした結果
($\lambda=11.6\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ の場合, A; 地表から5m下の温度分布, B; 地表から10m下の温度分布)

Fig.14 Simulated groundwater temperature with an estimated heat conductivity, $\lambda=11.6\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. A: temperature under 5m from the ground surface, B: temperature under 10m from the ground surface

4. おわりに

第2期研究計画(平成3~4年度)は, 現在予算要求中であるが, 研究を更に進展させるために, 次の事を今後の課題として考えている。

- ①平成2年度の研究結果をふまえて, 観測井をさらに密に配置すると共に, 地下水温測定法も井戸ケーシングの外測の温度を測るなど自然状態の温度を測定して, 測定精度を高めた野外実験を行ない, 浅層地熱の熱移動機構を解明する。
 - ②地下水流動の速い地域において, 周囲の地下水位を制御することから, 蓄熱した「温(冷)水塊」流出を防ぎ, 長期保存を行う技術の開発研究も併せて行う。
 - ③さらに, この研究の小課題「地中における熱的機構に関する研究」で地熱移動を研究している他の4人の研究分担者の成果が有機的に関連づけられるように, この実験施設に地下水流速測定装置, 不飽和層の熱移動測定装置などを整備し, 総合的研究として進めていく。
- この研究では, 熱源が1ヵ所の単一システムの実験を通して, 自然状態における人工熱の浅層地熱環境への影響範囲, 影響速度, 滞留時間などが調査される。多雪都市の市街地に集中して普及される可能性の大きい, 地熱を熱源とした雪処理システムによる地下環境への影響予測が可能になることが期待される。

謝 辞

研究の推進については、新藤静夫千葉大学教授、金山公夫北見工業大学教授、中村勉長岡雪氷防災実験研究所長から貴重な助言をいただいた。また、長岡雪氷防災実験研究所の中尾正義第2研究室長には、貴重なコメントをいただいた。ここに記し感謝いたします。なお、この研究は、科学技術振興調整費「降積雪対策技術の高度化に関する研究」(昭和63年度～平成2年度、第1期)により行われた。

参 考 文 献

- 1) 東浦將夫・佐藤威 (1989) : 地熱の流動機構に関する研究。日本地下水学会秋期講演会予稿集, 講演番号 S4.
- 2) 東浦將夫・佐藤威 (1990) : 地下水の熱的機構の研究, その1。日本水文科学会春期学術大会予稿集, 104-107.
- 3) 東浦將夫・佐藤威・木村忠志・横山孝男・丹野清輝 (1991) : 地下水の熱移動機構の解明に関する研究—野外における地下水の熱移動計測—。ハイドロロジー, 21, 19-26.
- 4) 小林郁雄・山本昭夫・川崎敏・橋田知幸・中川耕二・小屋開地稔 (1989) : 砂丘地の不圧帯水層を利用した熱エネルギーの地下水貯留と回収。地下水と井戸とポンプ, 31(3), 1-11.
- 5) 科学技術庁資源調査所 (1988) : 地下水の熱的利用に関する調査—帯水層の熱的利用を中心として—。資料第151号, 238p.
- 6) 農林水産省北陸農政局計画部資源課・国際航業(株)(1988) : 三里浜地区地下水還元利用計画検討業務報告書, 36-65.
- 7) 谷口真人・鈴木裕一・大場孝夫・榎根勇 (1982) : 長岡市周辺の地下水温について。ハイドロロジー, 12, 25-30.
- 8) 横山孝男・梅宮弘道・安彦宏人 (1975) : 人工涵養法による帯水層の蓄熱利用。日本地下水学雑誌, 17, 55-67.
- 9) 横山孝男・梅宮弘道・寺岡達夫・渡辺英男・桂木公平 (1980) : 帯水層を用いた季節的熱量。日本機械学会論文集 (B編), 402, 322-330.
- 10) 横山孝男・桂木公平 (1990) : 地下水流の熱輸送。土と基礎, 38, 83-89.

(1991年7月31日 原稿受理)

Appendix 1 流速 w の導出について

温度 θ における圧力 p は $p = g\rho(\theta)h(x,y,z,t)$ である。ここで g は重力加速度である。基準温度 (15°C) における密度 ρ_0 を用いて、これと等しい圧力を与える圧力水頭 h' を導入する。即ち、 $h'(x,y,z,t) = (\rho(\theta)/\rho_0)h(x,y,z,t)$ とすれば、 $p = g\rho_0 h'(x,y,z,t)$ と表せる。ここでダルシー則が $\mathbf{V} = -\mathbf{k}/\mu \nabla(P + \rho gz)$ であるから (\mathbf{k} は透過率、 μ は水の粘性係数)、

$$\begin{aligned} w &= -\frac{k_z}{\mu} \frac{\partial h'}{\partial z} (g\rho_0 h' + g\rho z) \\ &= -\frac{k}{\mu} g\rho_0 \left(\frac{\partial h'}{\partial z} + \frac{\rho}{\rho_0} \right) \end{aligned}$$

さらに基準温度 15°C における透水係数 K_0 は一般的に $K_0 = (k/\mu_0)g\rho_0$ で得られるので、

$$\begin{aligned} w &= -\frac{k_z g \rho_0}{\mu_0} \frac{\mu_0}{\mu} \left(\frac{\partial h'}{\partial z} + \frac{\rho}{\rho_0} \right) \\ &= -\frac{\mu_0}{\mu} K_{0z} \left(\frac{\partial h'}{\partial z} + \frac{\rho}{\rho_0} \right) \end{aligned}$$

ここで改めて $K_z = (\mu_0/\mu)K_{0z}$ とおくと、

$$w = -K_z \left(\frac{\partial h'}{\partial z} + \frac{\rho}{\rho_0} \right)$$

となる。