

仙台平野における地中熱利用に関するシミュレーション

天満 則夫¹⁾・安川 香澄¹⁾・内田 洋平¹⁾・大谷 具幸²⁾・森 康二³⁾

1. はじめに

1997年に気候変動枠組み条約第3回締約国会議(COP3)で採択された京都議定書が, 2005年2月16日に国際法として正式に効力をもつ(発効する)ことになりました。これによって日本は, 温室効果ガスを1990年の排出量から6%削減しなければなりません。そのため, CO₂等の温室効果ガスの排出が少ない自然エネルギーの利用が見直されてきています。その一つとして, 地中熱(エネルギーとして利用可能な地下浅部の熱資源のこと)の利用にも関心が高まってきています。特に, 地中の熱と電気を利用して暖房・冷房そして給湯が可能な地中熱利用ヒートポンプシステムに注目が集まってきています。本システムは, 地下を利用するために, 太陽や風力エネルギーほど外観上は目立ちませんが, 気象条件に関わらず, いつでもどこでも利用できるという特徴を有しています。

この地中熱利用ヒートポンプシステムの利用促進のために, 様々な研究・開発が行われています。ここでは, このシステムの開発に関する研究を幾つか紹介したいと思います。また, システムの普及促進に伴う環境影響の評価として, 内田ほか(2005)によって構築された, 仙台地域を対象とした広域の三次元モデルを用いた数値シミュレーションに関しても簡単に紹介したいと思います。

2. 従来の研究

地中熱の利用形態や地中熱利用ヒートポンプシステムに関する様々な研究・活動については, 落藤ほ

か(2002)や高杉ほか(2004)によって報告されています。ここでは, 特に地下を対象とした研究について紹介したいと思います。地下の利用は, 大きく地下水利用(井水)型と坑内熱交換型に分けられます(安川ほか, 2005)。地下水利用(井水)型には, 例えば年間を通じて温度が一定している地下水を汲み上げ, これを熱源として利用し, 水を河川等に放流したり, 地下に還元する方法があります。一方, 坑内熱交換型は井戸(孔井)を掘削し, その中に二重管やU字管等を挿入して熱交換を行います。この方式は, 地下水利用(井水)型と比較して地下水の汲み上げを行わないため, 法的制約を受けないことや, 不純物を含む地下水が孔井の中を通らないため, 孔井の耐用年数が長くできる等の利点があります。

この坑内熱交換型の地中熱利用は, 我が国でも増えつつあります。この坑内熱交換型を用いた地中熱利用の研究として, 例えば, 垂直熱交換井の温度応答試験に関する数値的検討(Fujii *et al.*, 2004), 地下水流がある場合の垂直熱交換井の充填材や坑井配置に関する数値的検討(藤井, 2002b)や, システムの経済性に関する研究(藤井, 2002a)が行われています。また, 熱交換井の熱抽出特性に関するシングルU字管やダブルU字管方式の比較検討(田子ほか, 2004)も行われています。

さらに, 我が国の地下水流動の影響の大きさに着目して, システム設計と地下水流動との関係の検討(新堀ほか, 2002)や, 主要都市における地中熱利用による冷暖房システムの基本設計と運転特性に関する数値的検討(盛田ほか, 2004)も行われています。

他方, 地中熱利用が普及した場合の地下環境への

1) 産業技術総合研究所 地圏資源環境研究部門

2) 岐阜大学 工学部
〒501-1193 岐阜市柳戸1-1

3) 地圏環境テクノロジー(株)
〒103-0027 東京都中央区日本橋1-20-8

キーワード: 地中熱利用, シミュレーション, 広域3次元モデル, 環境影響評価

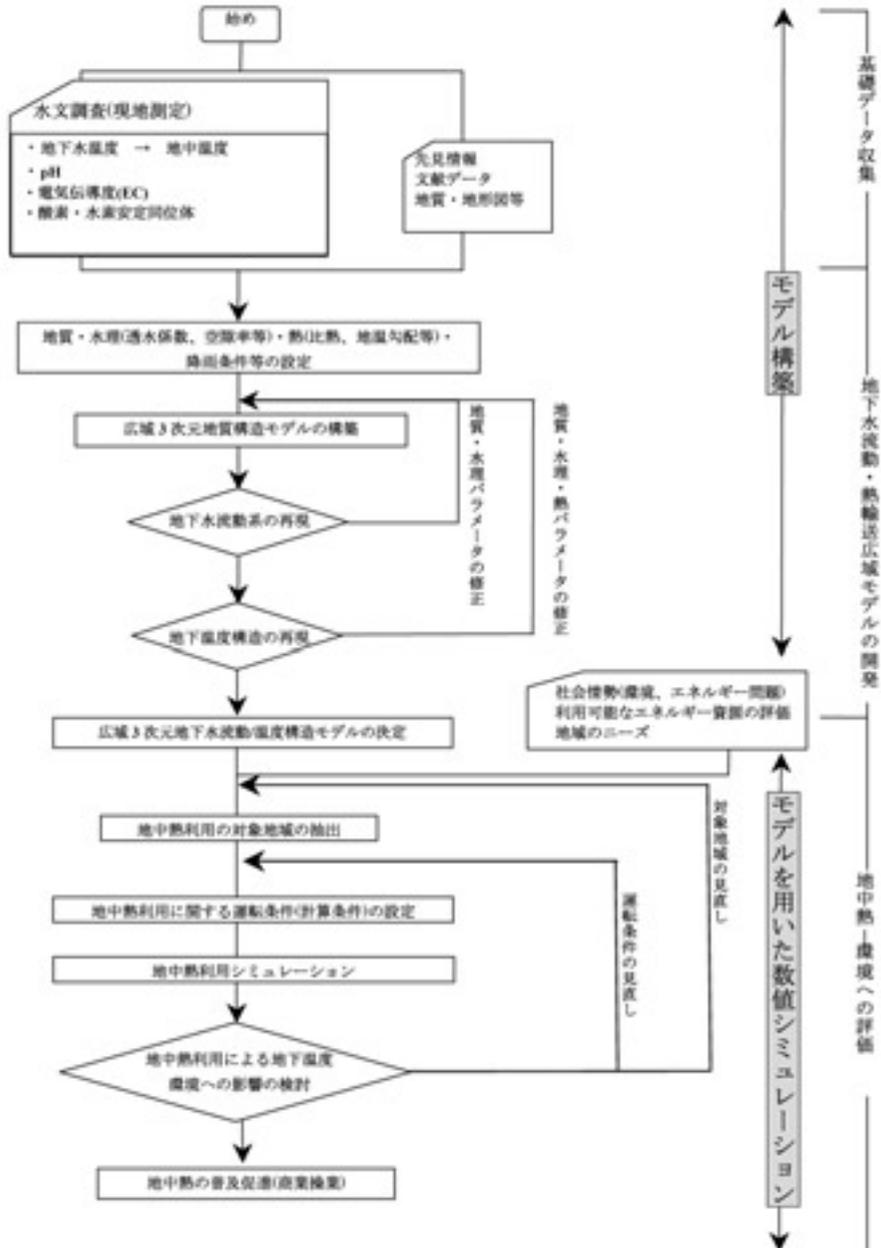
影響, 例えば, 廃熱や採熱に伴う地下温度の変化とその影響範囲の把握には, 広域での地下水流動の把握が必要です (Cathomen, 2002). しかし, これまで我が国では, このような観点からの研究があまり行われていませんでした. そこで本稿では, 仙台地域を対象として構築された広域の3次元モデル (内田ほか, 2005) を用いて, 地中熱利用による地下温度環境への

影響評価に関して行った数値シミュレーションの結果を紹介します.

3. 解析手順

3.1 モデル構築から環境評価までの流れ

第1図にモデル構築から環境評価までの手順を簡



第1図 環境評価における解析の手順.

単に示します。図に示すように、①モデル構築と②モデルを用いた数値シミュレーションの2段階になっています。このうち、モデル構築に関しては内田ほか(2005)にて報告されているので、ここでは概略を示します。なお、6)～8)の計算が環境評価の作業に対応しています。

- 1) 対象とする地域の地下情報を収集する。ここでは、地下水温度、pH、電気伝導度等の水文調査や文献調査等の既存データの活用も含まれる。
- 2) 次に、得られた地下情報を基に地質や流動特性、熱物性等の条件を設定する。
- 3) 広域3次元モデルを構築して、水理水頭分布の実測値と合うよう、地下水流動の境界条件を調整する。
- 4) さらに温度の実測値に合うよう、境界条件を調整する。
- 5) 3)及び4)に関して、それぞれ合うまで計算を繰り返す。
- 6) さらに、得られた広域3次元モデルに対して、地中熱利用の対象地域を設定する。
- 7) 対象地域の流動・温度条件は、広域3次元モデルでの当該地域での値から引き継ぐ。
- 8) 様々なニーズにあわせた運転条件(計算条件)を設定して計算を行い、周辺への影響評価を行う。

解析に用いたシミュレーションコードは、GET-

FLOWS (General-purpose Terrestrial Fluid - Flow Simulator ; 登坂ほか, 1999) です。本解析コードは、地表流体流れと地下流体流れに熱移動も取扱えるように開発されています。なお、計算に用いた物性値等は、本誌の内田ほか(2005)の表1と同じです。

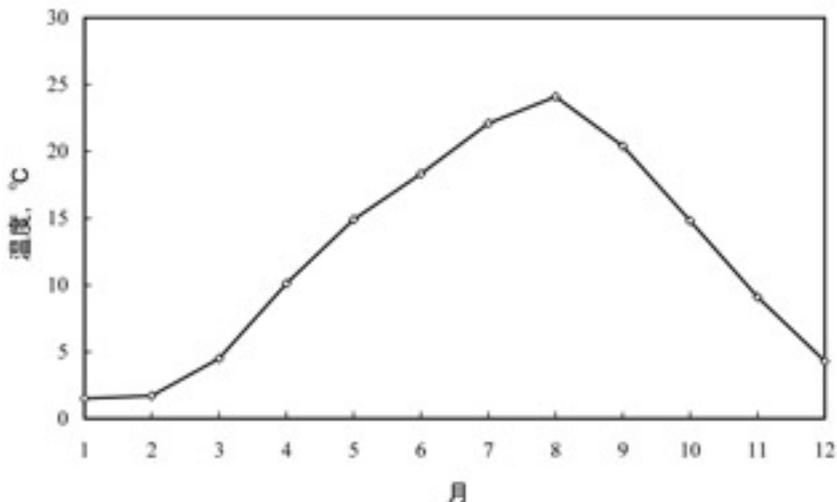
3.2 地中熱利用による地下への採廃熱量の検討

本研究の目的は、地下温度環境への影響評価です。そこで、地中熱利用による影響評価を行うために、まず地中熱を利用することで、どの程度の採廃熱量を地下に与えることになるかを検討しました。

まず、仙台市の1971～2000年までの30年間の平均気温(第2図)を基に、地中熱の利用期間を次のように仮定しました。7～8月の2ヶ月間、11～4月の6ヶ月間にそれぞれ冷房、暖房を行います。図より、これらの時期はそれぞれ、地下温度のほうが平均気温より低い期間と高い期間に相当しますので、地中熱によって冷房、暖房を行えば、空気熱源の場合に比べて温度的なメリットがあると考えられます。

次に、採熱(廃熱)量については、冷房と暖房に分けて次のように仮定しました。東北地方の一世帯あたりの1次エネルギー年間消費量は、給湯24,336MJ(熱量)、暖房19,260MJ(熱量)、冷房468MJ(電力)です(石田, 1997)。

まず、地中熱を利用して冷房を行う場合を考えます。ヒートポンプのCOP(Coefficient Of Performance, 成績係数=得られるエネルギー量/投入エネルギー



第2図 仙台市における過去30年間の平均気温。

量)の値を3と仮定し、1世帯当たりの冷房用エネルギー消費量(=電力消費量)を年間468MJとすると、地下への廃熱量はその4倍の年間1,872MJとなります(COP=3の冷房では、消費電力1に対し、得られる冷熱は3になります。冷熱は熱量3を地下(室外)に移動(廃熱)させることで得られます。また、消費電力1に相当する熱量も廃熱する必要があるため、合計4の廃熱となります)。よって、2ヶ月間の冷房期間では31.2MJ/日の廃熱となります。

他方、給湯は24,336MJ、暖房は19,260MJです。まず、給湯は100%、すなわち、全て地中熱利用すると仮定しました。次に、現状における暖房器具としてはコタツ、電気カーペット、ハロゲンヒーターや石油ファンヒーター等が挙げられます。暖房器具のうち、例えば石油ファンヒーターのようなCO₂排出量の多い一部の機器を置き換える場合を想定し、地中熱利用による熱供給率を50%と仮定しました。年間の地中熱による給湯と暖房による消費熱量は(24,336MJ×100%)+(19,260MJ×50%)=33,966MJになります。ここでもCOP=3とすると、地下からの採熱量と、給湯や暖房による消費熱量が2:3なので(COP=3の給湯・暖房では、消費電力1に対し、得られる熱量は3になります。消費電力に相当する熱量の寄与分1

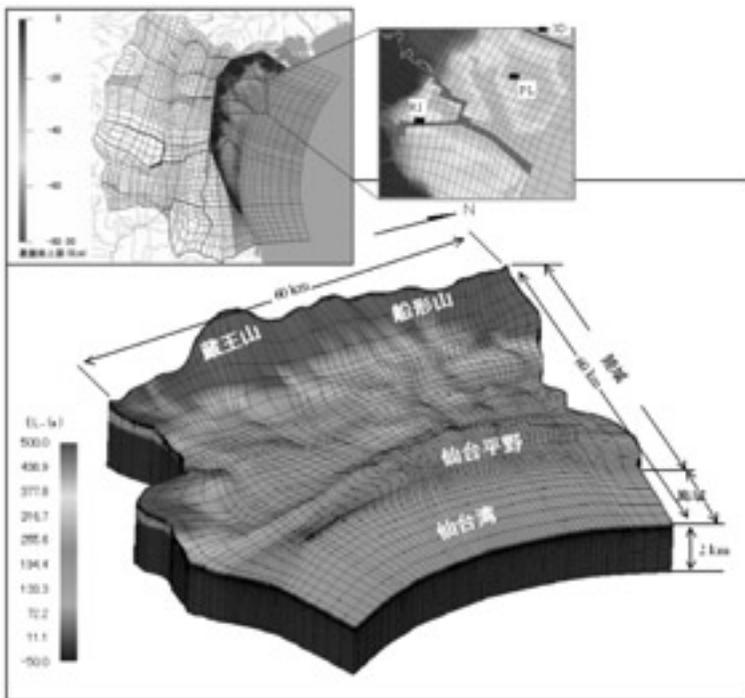
を差し引くと、地下(室外)から必要な採熱量は2となります。よって、地下からの採熱量は消費熱量の2/3になります)、地下からの採熱量は33,966MJ×2/3=22,644MJとなります。6ヶ月間の暖房期間なので、124.1MJ/日の採熱となります。

3.3 計算条件

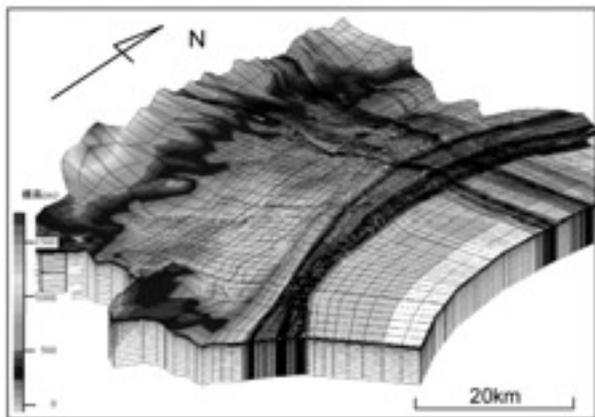
環境評価における地形の影響も検討できるように、3ヶ所を対象に採廃熱シミュレーションを実施します。対象地点は、第3図に■で示すように仙台平野名取川流域の上流(RI)、平坦部(PL)、更に北部の丘陵地での3次元的地形の影響が評価できる地点(3D)としました。

また、広域3次元モデルでは、計算の効率化のために個々の要素(グリッドサイズ)が大きくなっています。そのため、環境影響評価のシミュレーションでは、採廃熱区域とその周囲の各要素が細くなるように要素の幅を約50mで再分割して地中熱利用による影響に関して詳細な解析を可能にしました。なお、水平面における要素の最大値は約5.5kmになっています。

第4図に再分割を行った後のモデルを示します。図に示すように、対象とする名取川流域を中心に要素を細分し、水平面では19,599分割になりました。ま



第3図
採廃熱シミュレーションの実施地点。



第4図 仙台地域の要素再分割.

た、深度方向には地表部分を約1m幅で分割し、徐々に幅を大きくして深度約500mまでを30分割しました。最終的なモデル要素数は587,970です。

対象地点PL, RI及び3Dの採廃熱区域は次のように考えて設定しました。地中熱の利用・普及が進んだ場合を考え、地中熱を利用している320世帯が密集した地区を仮定します。2000年の国勢調査報告によれば、仙台市青葉区における1世帯の人数は2.08人で、人口密度は7,371.8人/km²です。従って、320世帯では、 $320 \times 2.08 \div 7,371.8 = 90,290\text{m}^2$ (300m × 300m) の範囲を占めることになります。よって、300m × 300mの範囲を採廃熱区域としました。前節で述べたように、地下への1世帯当たりの廃熱は31.2MJ/日で採熱は124.1MJ/日です。よって、採廃熱区域320世帯の廃熱は、9.98GJ/日、採熱は39.7GJ/日になります。計算では、暖房運転が6ヶ月、冷房運転が2ヶ月で、それぞれ40GJ/日、10GJ/日の採廃熱が地下に行われるとして、影響の評価を試みました。なお、これらの採廃熱は地下の1グリッドにおいて行われるとして計算しました。

第1表 採廃シミュレーション(地点と深度).

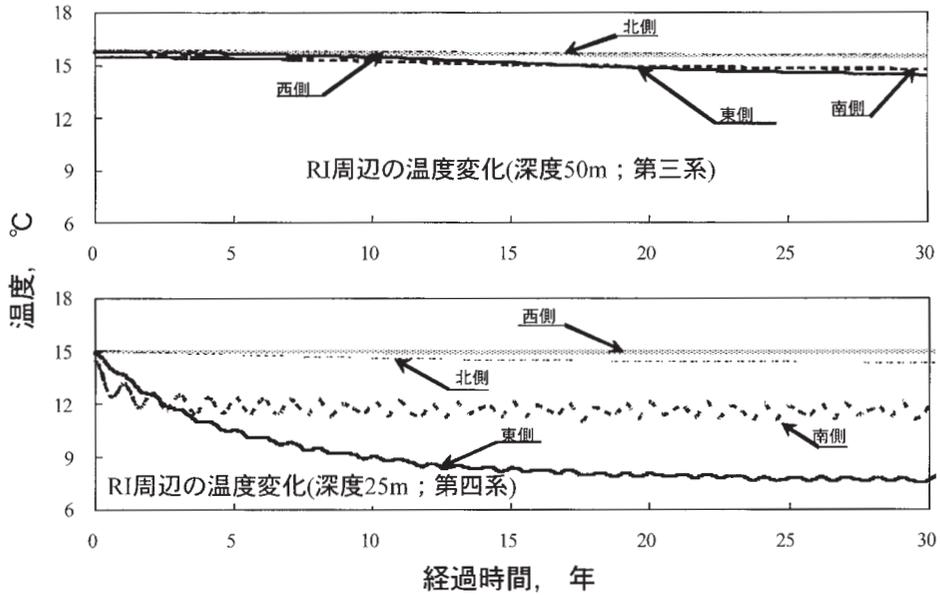
	採廃熱地点	深度, m	備考
条件1	RI	25	第四系
条件2		50	第三系
条件3	PL	25	第四系
条件4		50	第三系
条件5	3D	50	第四系

また、地中熱を利用する上で、孔井の掘削深度は経済性を左右する重要な因子です(NEDO, 1995)。ここでは、掘削費を考慮して、廃熱深度を50mと設定しました。対象とした3ヶ所のうち、3Dは深度50mでも第四系ですが、RIとPLの2ヶ所では第三系となります。本誌の内田ほか(2005)に指摘されているように、第三系と第四系では流体流動が異なることから、RIとPLの2ヶ所に関しては、深度25mでの第四系からの採廃熱も考えることとしました。採廃熱区域の地点と深度より、最終的には第1表に示すように5ケースの計算を30年間にわたって行うことにしました。

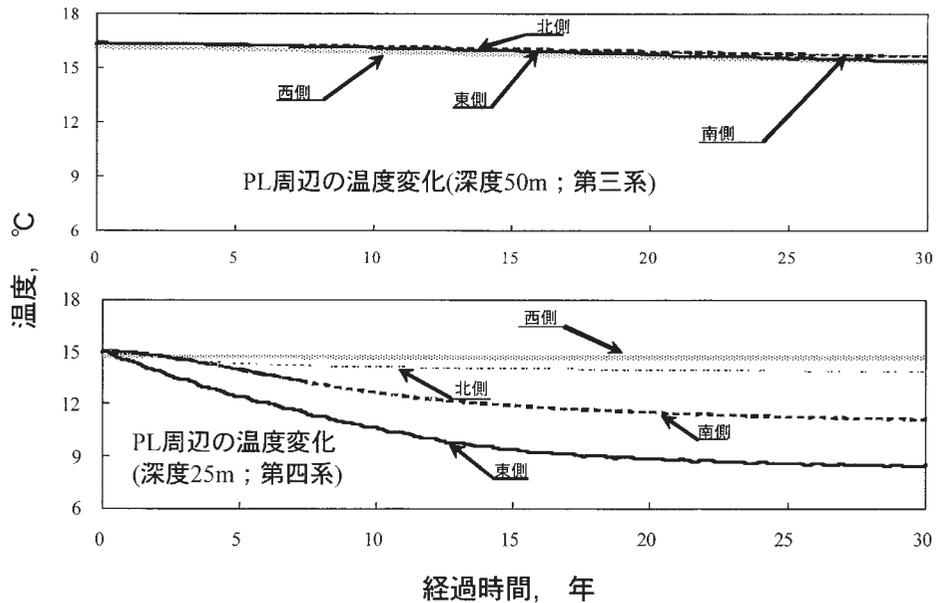
4. 計算結果と考察

第5(a)図と第5(b)図に、採廃熱地点PLとRIに関して、採廃熱深度が異なる場合の、東西南北に隣接するグリッド(採廃熱地点から東西にそれぞれ約40m(RI)と約25m(PL)、南北にそれぞれ約50m(RI)と約30m(PL)離れている)での温度変化を示します。また、第6図にRIとPLの採廃熱深度における地中熱利用30年後の温度差コンターを示します。これは、地中熱の利用開始時の温度を30年後の温度から引いた値であり、温度低下を示しています。第7図に、採廃熱地点3Dの東西南北に隣接するグリッド(採廃熱地点から東西に約40m、南北に約65m離れている)での同深度における30年間の温度変化を示します。なお、第5図および第7図の上図は深度50m(第三系)、下図は深度25m(第四系)からの採廃熱を示しています。

第5(a)図及び第5(b)図より、RIとPLでは、第三系から30年間の採熱を行っても、約50m離れた地点での温度低下が小さいことがわかります。これは、第三系と第四系を流れている地下水の流速の違いによるものと考えられます。第三系では、地下水の流速が小さいために、採熱によって冷却された岩盤は、主に地下深部からの熱伝導によって暖められます。しかし、第四系では流速が大きいために、採熱によって温度低下しても、その冷却域が移動して周辺に拡がります。このことは、第6図からも推定されます。第6図に示されるように、RIとPLでは共に、第三系では採廃熱地点の温度低下が大きくなっています。しかし、採廃熱地点に隣接するグリッドの温度低下は小



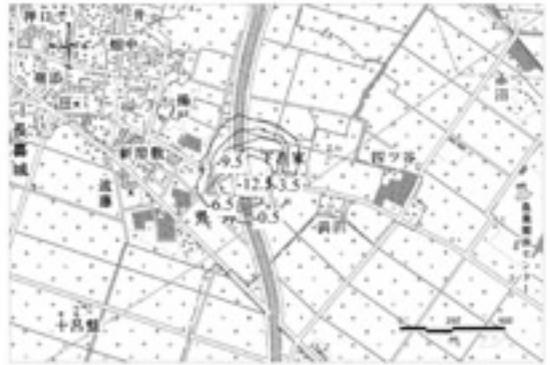
第5(a)図 採廃熱地点RIにおける採廃熱深度が異なる場合の周辺の温度変化。
(採廃熱地点から東西では約40m、南北では約50m離れている)



第5(b)図 採廃熱地点PLにおける採廃熱深度が異なる場合の周辺の温度変化。
(採廃熱地点から東西では約25m、南北では約30m離れている)



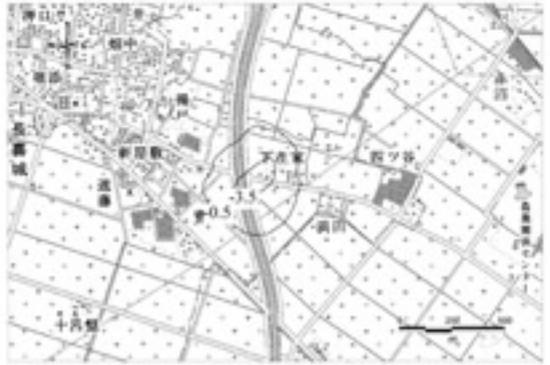
(a) RI, 深度50m (第三系).



(c) PL, 深度50m (第三系).

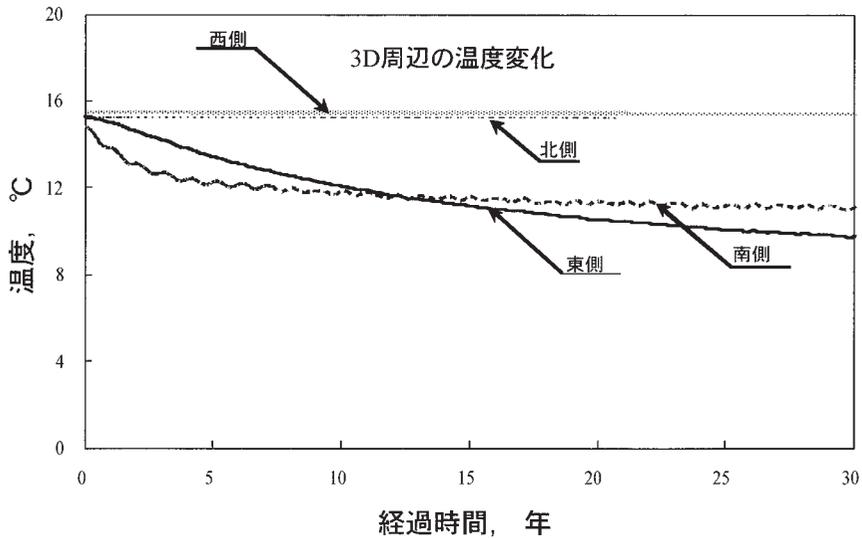


(b) RI, 深度25m (第四系).



(d) PL, 深度25m (第四系).

第6図 採廃熱地点RIとPLにおける異なる採廃熱深度での30年後の温度差コンター.



第7図 採廃熱地点3Dにおける周辺の温度変化。
(採廃熱地点から東西では約40m、南北では約65m離れている)

さいことから、温度低下の範囲が周辺に広がっていないと考えられます。すなわち、第三系を地中熱に利用する場合の影響範囲は、かなり狭い範囲に限られることがわかります。それに対して、第四系では採廃熱地点での温度変化は小さくなっています。これは冷却域が移動したために、採廃熱地点の温度低下が小さくなったためと考えられます。

これらの結果から、第三系では地下水による移流の影響が少なく、蓄熱に適していると推定されます。しかし、流速が小さいことから有効熱伝導率は低く、温度変化が緩和されにくいいため、地中熱利用による局所的な温度変化は大きくなります。それに対して第四系では、第三系と比べて流速が大きいため採熱効率が高くなり、局所的な温度変化は小さいと考えられます。なお、第6図の上図に示したように、地中熱利用による採廃熱地点RIやPLでの温度差は約13℃以上となっています。これは、地下温度が、0℃近くまで低下していることを示しています。よって、採廃熱地点の地質条件にもよりますが、今回の採廃熱の条件が、地下温度を0℃以下にしない最大の熱負荷条件であったことが推測されます。

また、第5(a)図の下図や第5(b)図の下図に示されるように、仙台地域の第四系では、東側(海側)への流動が卓越しているために、採熱地点の周辺でも特に東側の温度低下が大きくなっています。一方、3Dでは南側の温度低下も大きく、第7図に示すように地中熱利用の開始に合わせて急激に温度が低下しています。これは、PLやRIと比較して、3Dにおける流体流動は北側や南側での山地の形状による影響を受けやすいためと考えられます。すなわち、第四系内の流体流動は地形の影響を反映しており、3Dでは採熱によって冷却された流体が南側へ流れたために他の方位と比べてより大きな温度低下になったものと考えられます。

5. まとめ

地中熱利用の普及促進を目的に、様々な研究が進められています。このうち、地中熱利用に伴う影響評価は、これから必要なテーマであると思います。ここでは、仙台地域を例に広域での3次元地下水流動・熱輸送モデルを用いた計算例を示しました。計算の結果、第三系は蓄熱に適していることがわかりまし

た。また、第四系を地中熱に利用する場合でも、採廃熱地点3Dでは地形の影響を受けやすいこと等がわかりました。今後、様々な地域での広域モデルの構築や評価が行われ、地中熱利用が普及することを期待しています。

参考文献

- Cathomen, N. (2002) : Warmetransport im Grundwasser, Auswirkung von Wärmepumpenalagen auf die Grundwassertemperatur am Beispiel der Gemeinde Altach im Vorarlberger Rheintal. Diplomarbeit Wintersemester 2001-02, Eidgenössische Technische Hochschule Zurich.
- 藤井 光 (2002a) : 大地結合ヒートポンプシステムにおける熱交換井設計について最適化手法の検討, 日本地熱学会誌, Vol.24, No.1, 29-46.
- 藤井 光 (2002b) : 地下水流れの存在する大地結合型ヒートポンプシステムにおける熱交換井仕上げおよび坑井配置の検討, 日本地熱学会誌, Vol.24, No.2, 191-205.
- Fujii, H., R. Itoi and T. Ishikami (2004) : Improvements on Analytical Modeling for Vertical U-Tube Ground Heat Exchangers, Geothermal Resources Council Transactions, Vol.28, 73-7.
- 石田健一 (1997) : 戸建住宅のエネルギー消費量, 日本建築学会計画論文集, 第501号, 29-36.
- NEDO (1995) : 地熱坑井内熱交換システム導入に関する調査, 平成7年度報告書, NEDO-P952.
- 新堀雄一・岩田宜己・森不可止・深谷滋三郎 (2002) : 坑井を用いた地中熱利用HPの設計と地下水流動との関係についての一考察, 日本地熱学会誌, Vol.24, No.4, 339-348.
- 盛田耕二・江原幸雄・田子 真 (2004) : 住宅用大地熱源冷暖房システムの開発 - 主要都市におけるシステムの基本デザインと運転特性の検討 -, 日本地熱学会平成16年度学術講演会講演要旨集, A15.
- 落藤 澄 (2002) : 地下熱利用と地下蓄熱の現状と課題, 日本地熱学会誌, Vol.24, No.4, 315-327.
- 田子 真・盛田耕二・菅原征洋・藤田 忠・岩指 匠 (2004) : ダブルU字管型地中熱交換器の熱抽出特性, 日本地熱学会誌, Vol.26, No.4, 317-331.
- 高杉真司 (2004) : 地中熱利用システムの新しい展開に向けて, 地熱エネルギー, Vol.29, 65-80.
- 登坂博行・伊藤 彰・田中将希・岩井 卓 (1999) : 自然水理系の流体・熱移動統合モデリングの試み その1. 流体・熱移動の新しい定式化と実験的検討, 地下水学会誌, Vol.41, No.3, 147-158.
- 内田洋平・安川香澄・天満則夫・大谷具幸・森 康二 (2005) : 仙台平野における地中熱に関するシミュレーション - その1. 3次元地下水動・熱輸送広域モデルの構築 -, 日本地熱学会誌, 27 (2), 115-130.
- 安川香澄・天満則夫・内田洋平 (2005) : 地下の新しい活用法: 地中熱による冷暖房, 地質ニュース(本号).

TENMA Norio, YASUKAWA Kasumi, UCHIDA Youhei, OHTANI Tomoyuki and MORI Koji (2005) : Case study for the direct utilization of geothermal energy at the Sendai plains.

<受付: 2005年4月18日>