

研究論文

国土数値情報を用いた地下熱特性の分析と 地下熱利用形態に関する研究

Study on Underground Thermal Characteristics by Using Digital National Land Information,
and Its Application for Energy Utilization

濱田 靖弘*・丸谷 薫***・中村 真人*・永坂 茂之****
Yasuhiro Hamada Kaoru Marutani Makoto Nakamura Shigeyuki Nagasaka

落藤 澄**・淵上 栄樹*・横山 真太郎*
Kiyoshi Ochifuji Shigeki Fuchigami Shintaro Yokoyama

(原稿受付日2000年11月27日, 受理日2001年6月20日)

Abstract

This paper describes a method for evaluating characteristics on underground thermal properties and groundwater which are essential for designing system of underground thermal energy utilization.

Firstly, the thermal systems using underground are classified into two categories; borehole system with indirect heat exchange and aquifer system with direct usage of underground water. These systems are also divided into thermal storage system and heat source/sink system.

Secondly, the characteristics of underground in domestic area are analyzed by using Geographical Information System (GIS) and hydrogeological information.

From the viewpoints of regulations on environmental protection, national parks for instance, and existence of the thermal energy demand, the percentage of areas eliminated from underground thermal energy utilization is 77% of a total land area of Japan. The percentage of areas limited to borehole thermal energy utilization is 17% of the applicable areas, while 74% of them is suitable for both borehole and aquifer.

Finally, we estimate the thickness of aquifer and groundwater velocity in Sapporo. As a result, it is shown that most parts of area in Sapporo are suitable for Aquifer Thermal Energy Storage (ATES).

1. はじめに

本研究は、建築・都市におけるエネルギーシステムを計画する際の基礎的資料とすることを目的として、蓄熱体あるいは熱源として多様な利用形態の可能性をもつ地下の熱特性を分析したものである。

地下熱利用システムは、海外では既に多くの実施例^{1), 2)}があるのに対して、国内においては地中熱交換器の伝熱特性などに関する実験と解析例^{3)~11)}が見られるものの、今日に至るまで普及するには至っていないのが現状である。その原因として、地盤構造が複雑で、流動性の地下水が豊富に存在するために、地下の熱を利用するという着想が、海外と比較して生まれ難かったこと、および建築・設備設計に関わる技術者への設計指針が、海外^{12), 13)}と比較すると日

本では未だ確立されていないことが挙げられる。また、これまでの研究では、主にシステム上の技術開発に重点が置かれ、実用化を視野に入れた場合の立地条件の評価、検討手法に関する研究例^{14), 15)}は、極めて少ないと言える。

筆者らの研究室においては、これまで、地中温度予測手法の開発¹⁶⁾、長期蓄熱効果と伝熱特性の評価^{17)~19)}、住宅への導入可能性の検討²⁰⁾を行い、本システムの有効性を実証してきた。

本研究では、地下熱利用を導入した建築・都市のエネルギーシステムの計画段階で必須となる地下熱利用の適性、および地下水の流動特性の評価方法を示すとともに、地域の地下特性に応じた熱利用形態を提案する。この手法を日本全土に適用して、その地下特性を評価するとともに、適用可能な熱利用形態を提示する。

まず、地理情報システム (Geographic Information System : GIS) を用いて、任意の地域を地盤熱利用および地下水熱利用の可能性の観点から評価し、次いで水理地質情報に基づきその熱利用形態を蓄熱型と熱源型に分類する手法を提案する。次いで、GISを用いたこの地下熱利用システムの選定手法を日本全土に対して適用するとともに、

*北海道大学大学院工学研究科都市環境工学専攻

**名誉教授

〒060-8628 札幌市北区北13西8

***北海道立地質研究所環境地質部水理地質科

〒060-0819 札幌市北区北19西12

****新日本空調株式会社技術統括部技術部

〒103-0021 東京都中央区日本橋本石町4-4-20

表1 地下熱利用システムの分類

方式	地盤熱利用（間接熱交換）方式		地下水熱利用方式	
	地盤蓄熱 (Borehole Thermal Energy Storage: BTES)	地盤熱源ヒートポンプ (Ground Source Heat Pump: GSHP)	帯水層蓄熱 (Aquifer Thermal Energy Storage: ATES)	地下水熱源ヒートポンプ (Groundwater Heat Pump: GWHP)
概念図				
システム概要	■地中熱交換器を埋設して、熱媒を用い、間接的に地盤と熱交換を行う ■停滞性地下水だけでなく、地盤そのものの膨大な熱容量を利用して蓄熱を行う	■地中熱交換器を埋設して、熱媒を用い、間接的に地盤と熱交換を行う ■地盤の恒温性に着目して、ヒートポンプの熱源・熱シンクとして利用する方式	■揚水井・還元井を敷設して、地下水を直接的に利用する ■停滞性の地下水を有する帯水層を利用して蓄熱を行う方式	■揚水井・還元井を敷設して、地下水を直接的に利用する ■流動性地下水を有する帯水層をヒートポンプの熱源・熱シンクとして利用する
特徴	■地下水の存在の有無に関わらず、不飽和の地盤においても適用が可能 ■日本の複雑な地盤性状に比較的適したシステム ■地下水を直接汲み上げる必要がない		■帯水層の存在または形成が前提となるため、立地の制約が多い ■間接方式と比較して、システム効率が高い ■地下水を直接汲み上げるため、地域によっては諸規制による制約を受ける	

都市・地域単位における地下熱利用の導入可能性について検討することを目的として、札幌と旭川を取り上げて評価を行う。さらに、札幌を対象として、水理地質情報を用いて、地質柱状図から推定した帯水層の厚さ、および地下水位データと透水係数から推定される地下水流速の分布を表すマップを作成する。

2. 地下熱利用のための地下特性の推定手法

2.1 地下熱利用システムの利用形態と地下特性

地下熱利用システムは、地中熱交換器を用いて地下熱を間接的に利用する方式と地下水を直接汲み上げる方式とに大別される。本研究では、国際エネルギー機関 (International Energy Agency: IEA) などにおいて、広く用いられている用語²¹⁾ にしたがって、前者を地盤熱利用方式、後者を地下水熱利用方式と称することにする。

地盤熱利用方式は、帯水層の有無あるいは地下水の有無に関わらず、水分不飽和の地盤においても適用が可能である。この方式は、停滞性の地下水だけでなく、地盤そのものの膨大な熱容量を利用して長中期の蓄熱を行う地盤蓄熱型 (Borehole Thermal Energy Storage: BTES) と地盤の恒温性に着目して、ヒートポンプの熱源・熱シンクとして利用する地盤熱源ヒートポンプ型 (Ground Source Heat Pump: GSHP) に分けられる。地下水の汲み上げを伴わないなど、日本の複雑な地盤性状に適したシステムと言える。

一方、地下水熱利用方式に関しても、蓄熱型と熱源型に

分類できる。すなわち、帯水層を利用する帯水層蓄熱 (Aquifer Thermal Energy Storage: ATES) と地下水熱源ヒートポンプ (Groundwater Heat Pump: GWHP) である。帯水層の存在が前提となるため、立地の制約が多いが、前記の間接熱交換 (地盤熱利用) 方式と比較して、システム効率は良い。しかし、地下水を直接汲み上げるため、諸規制による制約を受ける。以上の内容をまとめると表1と表2のようになる。

2.2 地下特性の推定

図1にGIS²²⁾ および水理地質情報を用いて地下の特性を推定する手法を示す。手順は大きく二段階に分けられる。第一段階では、全国の地下熱利用可能地域の分布の概略を把握することを目的として、GISを用いて対象地域の地下

表2 地下特性と地下熱利用形態

		地下水なし	地下水あり	
			停滞性	流動性
地盤熱利用	蓄熱型	◎	◎	×
	熱源型	○	○	◎
地下水熱利用	蓄熱型†	×	◎	×
	熱源型	×	○	◎

注 † 本論文では特に「帯水層蓄熱」と称する

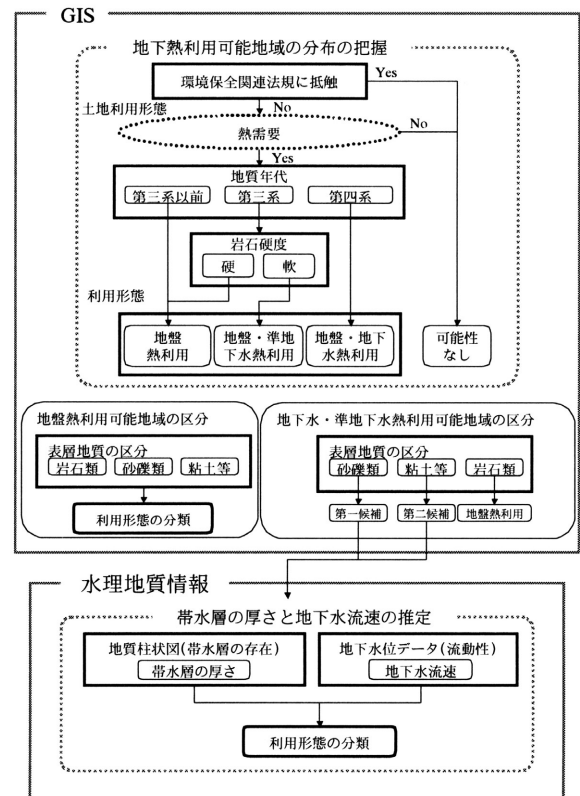


図1 地下熱利用のための地下特性の推定手法

特性を分析する。数値情報は、地形図（2万5千分の1）を基に位置の計測が行われ、地形、水系、土地利用、地域指定、道路・鉄道網、地価などの基本的な地理的情報を数値情報（メッシュデータ：100mあるいは1km四方）として整備されたものである。

(1) 熱利用対象除外地の選定

環境保護の観点から、熱利用プラントなどの開発が相応しくないと考えられる自然環境保全法に基づく環境保全地域と自然公園法に基づく自然公園位置などは除外した。次いで、土地利用形態から熱需要の有無を判断し、熱需要のない地域を除外した。

(2) 帯水層有無の推定

地質年代から帯水層が存在する可能性を判断する。次に、地盤熱利用方式、地下水熱利用方式それぞれにおける熱物性値による区分を表層地質に基づいて行う。36種類に区分された地層を熱物性値によって、さらに砂礫類、粘土等、岩石類の3区分に再構成し、地盤熱利用方式では利用形態の区分を、地下水熱利用方式では帯水層が存在する可能性の高さにより地域の順位付けを行う。

第二段階では、帯水層が存在する地域を対象として、各地域ごとに水理地質情報を用いて、地質柱状図から地質断面図を作成するとともに帯水層区分を行い、帯水層の厚さを推定する。

(3) 地下水特性の推定

地下水位データおよび透水係数から地下水流速を推定する。地下水流速を判定基準に利用形態を蓄熱型と熱源型に分類することになる。

これらの手法により、帯水層利用システムの導入が決定した際には、第三段階として建設地点における電気検層、土壌物性値の試料採取あるいは現位置による測定を詳細に実施する必要がある。本論文では、これらオンサイト情報の評価に較べ、研究の遅れている第二段階までを研究対象とし、札幌地区を対象に応用例を示した。

3. 地域と地下の特性分析に用いる数値情報

3.1 GISの利用＜第一段階＞

(1) 規制地域（地下熱利用地域から除外）

環境基本法の中には、自然環境保全に関する各種の法律があるが、特に考慮すべきと考えられる自然環境保全法、自然公園法を地下熱利用可能地域の選定項目とした。規制地域として除外した地域は、自然環境保全法に基づく原生自然環境保護地域、立入規制地区、普通地区、特別地区、野生動植物保護地区と自然公園法に基づく普通地域、特別地域、特別保護地区、海中公園である。また、本論文中の4.4における選定では、鳥獣保護および狩猟に関する法律、森林法、農地法に基づく地域を熱利用プラントなどの建設に相応しくない地域（鳥獣保護地区、森林地域、農業地域）と判断し、地すべり等防止法と砂防法に基づく地域（地すべり危険地域、砂防指定地域）についても除外するものとした。

(2) 土地利用形態（熱需要の有無の判定）

土地利用形態を参考にして、熱需要の有無を判断する。地下熱利用システムは、民生、工業、農業、および未開発地に適用できるものとし、区分定義による田畑、建物用地、荒地などで適用可能とした。また、森林地域は多年生植物が密生している地域を含むため、森林法を考慮して地下熱利用可能地域から除外した。

(3) 地質条件^{23), 24)}

我が国の帯水層は第四系が主体をなし、このほか新第三系の一部および第三紀から第四紀に噴出した火山岩類が主要なものである。そこで、帯水層の存在する可能性を判断することを目的として、一般に地下水開発の対象となりうる地質系統であるか否かを判断基準とし、指標に地質年代と地質硬さを利用した。この背景には、古い地質ほど固結した岩盤となり、帯水層を含む可能性が低くなるという考えがある。表3に筆者らが適用した地質条件による分類方法を示す。ここでは、地質年代から第四系の沖積層、洪積層の分布する地域を帯水層が存在する可能性の高い地域と判断し、地盤熱利用方式・地下水熱利用方式のいずれにも適する地域とした。また、第三系より古い白亜系、ジュラ系、中生界、古生界の分布する地域を帯水層の存在しない地盤熱利用方式に限定される地域とした。第三系の新第三系と古第三系については、地質硬さを利用して地下熱利用システムの分類を行うものとし、比較的柔らかい地質を第

表3 地質条件による分類方法

地質年代			岩石の硬さ（第三紀）		
年代		利用手法	岩体-岩片	硬度	利用手法
古生代	古 ↓ 新	地盤熱利用	硬-硬	硬 ↓ 軟	地盤熱利用
中生代			硬-中		
ジュラ紀			中-硬		
白亜紀			軟-硬		
古第三紀		地盤・準地下水熱利用	硬-軟		地盤・準地下水熱利用
新第三紀			中-中		
洪積世		地盤・地下水熱利用	軟-中		
沖積世			中-軟 軟-軟		

四系より可能性は低い地下水熱利用の可能性もある地域（準地下水熱利用方式）とした。このようにして、地盤熱利用方式のみの地域と準地下水熱利用方式も可能な地域に分類した。なお、第一段階では各地質系統ごとに帯水層の存在する確度を念頭に置きつつも、その程度を定量化しようとするものではなく、地下熱利用可能地域の分布の概略を把握することを目的として導入したものであり、具体的な検証は第二段階で実施することになる。

3.2 水理地質情報＜第二段階＞

（準）地下水熱利用を対象とした第二段階での作業（帯水層厚さ、地下水流速の推定など）は、以下の手順によって、水理地質情報を用いて行った。

- 1) 国土地理院発行の地形図（2万5千分の1）を基に地域別のメッシュデータを作成する。
- 2) 既存の井戸資料（地質柱状図^{25)~26)}を用いて地質断面図を作成する。これについては、全国的に整理された資料がないため、関係論文、井戸資料、地質調査ボーリングの資料などで、比較的入手しやすいものを各地域ごとに収集しなければならない現状にある。
- 3) 地形の特徴（扇状地、山地、台地、低地などの分類）、および地質の特徴（砂・礫・粘土などの分類、電気検層図など）を考慮し、浅部帯水層・中部帯水層・深部帯水層の3種類に区分する^{27), 28)}。
- 4) 各井戸について、地表から帯水層の底部（不透水層上面）までの厚さを求める。
- 5) 地盤標高（海拔）から帯水層の底部の標高（基準海面より下部はマイナス表記）を求める。

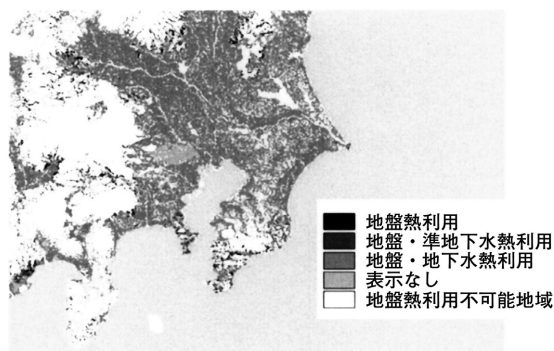


図2 関東地方における地下熱利用可能地域

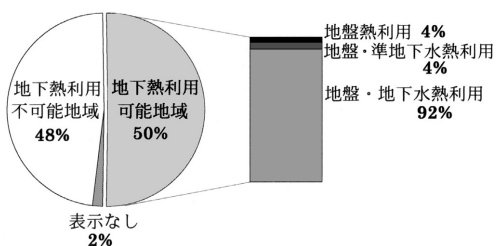


図3 関東地方における地下熱利用可能地域の割合

- 6) 曲面推定²⁹⁾により対象地域内の帯水層の底部の標高を把握し、コンターマップ³⁰⁾を作成する。
- 7) 地域内の地下水位データ³¹⁾を基に、水理水頭（地下水位）の分布（コンターマップ）を求める。
- 8) 得られた水理水頭分布を用いて、前進差分法により水理水頭勾配を求める。
- 9) Darcyの法則により、水理水頭勾配および地域別に与えた透水係数分布から地下水流速分布を算定する。透水係数の与え方は、分布する地質を考慮し、地質ごとに実測箇所が代表する地区のほぼ重心となるように各地区に割り当てた（全20箇所）。

4. GISによる地下特性と地下熱利用形態に関する分析結果および考察＜第一段階＞

4.1 関東地方

図2、図3にそれぞれ関東地方（陸地面積41,705km²）における地下熱利用可能地域とその割合を示す。地盤熱利用方式に限定される地域は、関東平野周辺地域と房総半島先端部に分布している。地盤熱利用・地下水熱利用のいずれにも適する地域は、関東平野と甲府盆地に分布しており、特に東側に分布が集中している。関東地方における地下熱利用可能地域の割合は50%を占め、そのうち地盤熱利用に限定される地域、準地下水も含まれる地域は、いずれも4%、両方式に適した地域は92%であった。

4.2 北海道

図4、図5（陸地面積77,004km²）にそれぞれ北海道における地下熱利用可能地域とその割合を示す。地盤熱利用

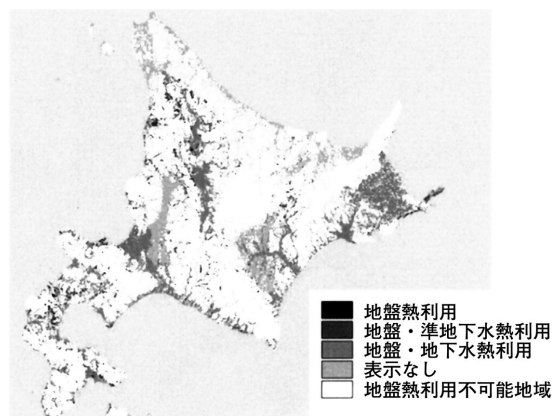


図4 北海道における地下熱利用可能地域

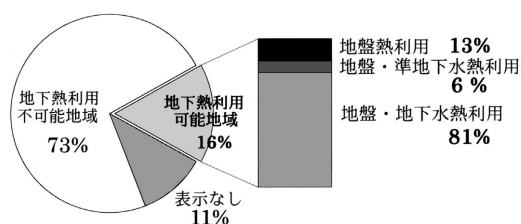


図5 北海道における地下熱利用可能地域の割合

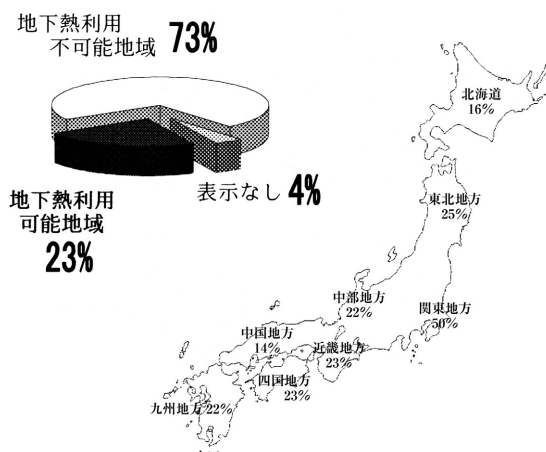


図6 日本全体の地下熱利用可能地域(円グラフ)および地域別分布

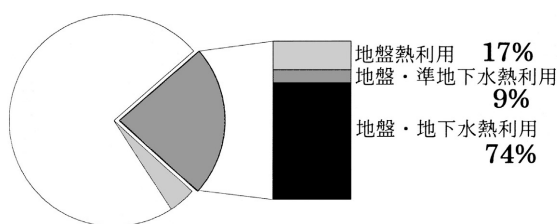


図7 日本全体の地下熱利用可能地域の割合

に限定される地域は点在する傾向にある。準地下水も含まれる地域は、石狩平野周辺に分布しており、地盤熱利用・地下水熱利用のいずれにも適した地域に隣接している。両方式に適した地域については、石狩平野、十勝平野、釧路平野、根釧台地、富良野盆地、函館平野に分布している。北海道における地下熱利用可能地域は16%を占めており、そのうち地盤熱利用に限定される地域は13%、準地下水を含む地域は6%、両方式に適した地域は81%を占める結果となった。

4.3 日本全域

図6に日本全体の地下熱利用可能地域(円グラフ)および地域別分布を示す。ここで、地域別に記載された数値は、各地域の地下熱利用可能地域の割合を表している。また、図7には日本全体の地下熱利用可能地域の割合を示した。日本全国について地下熱利用可能地域の選定を行った結果、地盤熱利用・地下水熱利用のいずれにも適した地域は、大規模な平野や盆地に分布している傾向があった。地盤熱利用に限定される地域については、顕著な特徴は見られなかった。全国各地域における地下熱利用可能地域の割合は、特に関東地方で高い数値が得られた。また、地下熱利用可能地域の日本全体の国土面積に占める割合は、23%という結果になった。そのうち地盤熱利用に限定される地域は17%、準地下水も含まれる地域は9%、両方式に適した地域は74%であった。全国各地域についてみると、両方式に適した地域が大きな割合を占める中、中国地方と四国地方

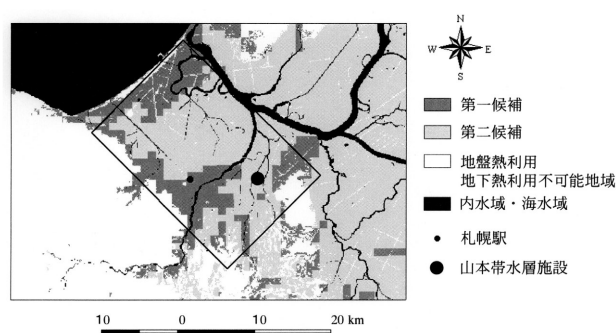


図8 札幌における地下熱利用可能地域

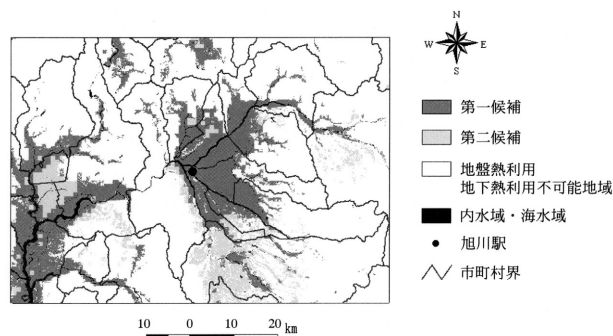


図9 旭川における地下熱利用可能地域

では、地盤熱利用に限定される地域が50%以上を占める結果となった。

4.4 都市・地域単位における地下熱利用の導入可能性

地下熱利用の対象地域として札幌と旭川を取り上げ、詳細な選定を行った。図8と図9にそれぞれの都市における選定結果を示す。図中の第一候補と第二候補は、図1の地下水熱利用可能地域の順位付けにしたがっている。図8の

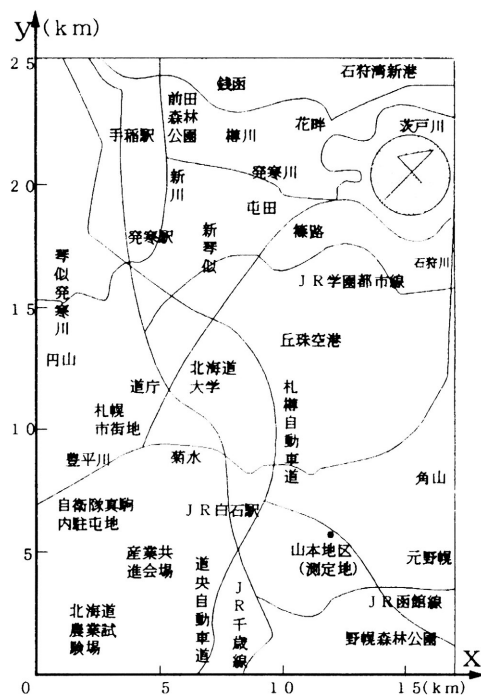


図10 対象地域の概要図

山本帯水層施設は、筆者らの研究室で1995年から2000年にかけて帯水層蓄熱の長期実証試験を行った地点である³²⁾。いずれの地域においても、地下水熱利用可能地域の広い分布が見られる。札幌においては、第一候補、第二候補の面積割合が、それぞれ34%、55%という結果となった。

5. 水理地質情報による地下水熱利用可能地域の評価<第二段階>

5.1 帯水層の厚さ

3.2における手順に基づいて、札幌市を対象として、帯水層の存在および容量を把握するために、帯水層の厚さについて推定を行った。中部帯水層群を対象に259地点の地質柱状図を用いて玉石や砂礫などの地層を帯水層とみなした。図10に対象地域の概要図を示す。国土地理院発行の地形図（2万5千分の1）を基に、北海道農業試験所の南部が原点、x軸が北東（17km）、y軸が北西方向（25km）となる座標を設定し、1km四方の総計468個の格子を作成した。次いで、既存資料^{25)~28)}を整理し、338箇所の井戸資料から36の地質断面図を作成した。また、地下水位のコンターマップ作成にあたっては、37箇所の観測井戸のデータを用いた。図11に帯水層の厚さに関するコンターマップを示す。帯水層厚さが10m以上の地域は、全体の74%の面積割合を占めている。図中座標（10.8, 5.7）の厚別区山本における実験地点の帯水層厚さは約32mであり、今回の推定結果（33.1m）と比較的良好な整合性が得られている。

5.2 地下水流速

図12に地下水流速のコンターマップを示す。地下水流速の推定に関しては、1kmメッシュ単位で設定した透水係数分布と地下水位データ³¹⁾から、Darcy流れを仮定して求めた。地下水流速が10m/年以下の地域の割合は、全体の69%であり、札幌は帯水層蓄熱に適した地域が多いことが

わかった。

なお、地下水の汲み上げなどに関する諸規制の存在する地域は、地下水熱利用方式の採用を避ける必要があるが、これらの規制に関する数値情報の整備については、今後の課題である。

6. まとめ

(1) GISおよび水理地質情報を用いた地下水熱利用のための地下特性の推定手法を提案した。本手法では、環境保全、エネルギー需要に関わる土地利用形態などの地上部の数値情報から候補地を抽出し、地質情報を用いて地盤熱利用および地下水熱利用の適用可能性を評価するとともに、水理地質情報により帯水層の三次元的分布、地下水流動場を把握し、蓄熱型と熱源型の利用形態に分類するものとしている。

(2) GISを用いた地下特性の推定手法を日本全国について適用した結果、関東地方では50%、その他の地方では14~25%の面積割合で地下水熱利用可能地域が存在することを示した。また、日本全土の国土面積に占める割合は23%であった。

(3) 日本全土における地下水熱利用可能地域内の74%の地域が地盤熱利用・地下水熱利用のいずれにも適していることがわかった。一方、地盤熱利用方式に限定される地域は17%であった。

(4) 都市・地域単位における地下水熱利用の導入可能性について検討することを目的として、札幌と旭川を取り上げて評価を行った。札幌においては、地下水熱利用可能地域の第一候補、第二候補の面積割合が、それぞれ34%、55%という結果となった。

(5) 札幌を対象として、水理地質情報を用いて、地質柱状図から求められる帯水層の厚さ、および地下水位データと

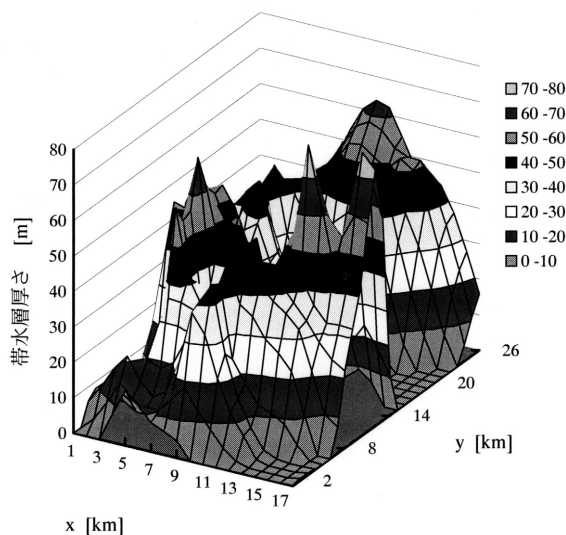


図11 札幌における帯水層厚さの分布

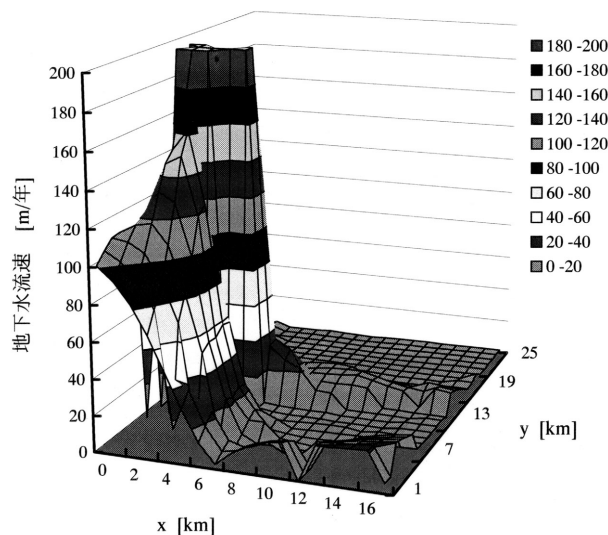


図12 札幌における地下水流速の分布

透水係数から推定される地下水流速の分布を表すマップを作成した。帯水層厚さが10m以上の地域、および地下水流速が10m/年以下の地域の割合は、それぞれ全体の74%、69%であり、札幌は帯水層蓄熱に適した地域が多いことがわかった。

終わりに、本論文作成にあたって、ご指導頂きました窪田英樹教授（北海道大学）、本研究の大学院生であった岡本大介氏（現新菱冷熱工業）、瀧下裕明氏（現日立ビルシステム）に深く感謝いたします。また、本研究の遂行にあたり、北海道環境科学研究センター、北海道立地質研究所の関係諸氏に多大なご協力を頂きました。ここに謝意を表します。

本研究は、科学技術振興事業団戦略的基礎研究推進事業における“環境低負荷型の社会システム”研究領域〔研究統括：茅陽一教授（慶應義塾大学）〕の公募研究“自立型都市をめざした都市代謝システムの開発”〔研究代表者：柏木孝夫教授（東京農工大学）〕による。

参考文献

- 1) B. Sanner; New Trends and Technology for Underground Thermal Energy Storage (UTES), Proceedings of 7th International Conference on Thermal Energy Storage – MEGASTOCK '97, (1997), 677-684.
- 2) G. Bakema et al.; Underground Thermal Energy Storage, IEA ECES State of the Art 1994, (1994)
- 3) 中島康孝; 土壌蓄熱について, 空気調和・衛生工学, 52-9 (1978), 53-60.
- 4) 田中辰明, 宮川保之, 岡建雄, 小宮英孝, 岩波洋; 長期蓄熱システムに関する研究, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, (1985), 517-520.
- 5) 森野仁夫, 岡建雄; 鋼管杭による土壌放熱・採熱に関する研究, 日本建築学会計画系論文報告集, 404 (1989), 49-57.
- 6) 松本衛, 永井久也, 牛尾智秋; 年周期蓄熱媒体としての地盤利用に関する研究 (その1), 日本建築学会計画系論文集, 464 (1994), 31-38.
- 7) S. Sayama; Computer Simulations of Heat Transfer in Soil for Ground-Source Heat Pump, Report of Hokkaido National Industrial Research Institute, 61 (1994), 1-4.
- 8) 大橋一正ら; 建物を利用した地中熱利用ヒートポンプシステムの試算, 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, (1991), 273-276.
- 9) 玄地裕ら; 地下ヒートシンク冷房を利用した新しいヒートアイランド対策の提案とその可能性の検討, エネルギー・資源, 18-5 (1997), 491-497.
- 10) エンジニアリング振興協会地下開発利用研究センター; 深部地盤直接蓄熱システムに関する調査研究報告書, (1998).
- 11) 新エネルギー財団; 地下水・地層等の温度差エネルギー導入促進基礎調査, (1998).
- 12) IEA ECES Annex 8 Subtask 4; Inventory of UTES Design and Analysis Tools, IEA ECES, (1996).
- 13) GHP Consortium; An Evaluation of Geothermal Heat Pump Technology Design Tools, DynCorp Energy Program, (1996).
- 14) 梅宮弘道, 佐々木春人; 地下帯水層蓄熱法における蓄熱適性地の選定法, 日本機械学会論文集 (B), 54-507 (1988), 3272-3277.
- 15) IEA ECES; Annual Report 1997, IEA Working Party on End-Use Technologies, (1998), 13-14.
- 16) 濱田靖弘, 中村真人, 長野克則, 落藤澄ら; 積雪地における地下熱利用のための地中温度の予測に関する研究, 空気調和・衛生工学会論文集, 68 (1998), 91-100.
- 17) 落藤澄ら; 太陽熱による垂直管方式の長期地中蓄熱の特性と暖房への応用に関する研究 (第2～4報), 空気調和・衛生工学会論文集, (1985～1986).
- 18) 長野克則, 落藤澄ら; 土壌熱源ヒートポンプシステムに関する研究 (第1～4報), 空気調和・衛生工学会論文集, (1994～1996).
- 19) 濱田靖弘, 落藤澄ら; 垂直埋設U字管を用いた地中蓄熱型冷暖房システムの実験と解析, 空気調和・衛生工学会論文集, 61 (1996), 45-55.
- 20) 濱田靖弘, 落藤澄ら; 標準熱回収率による地下熱利用システムの評価方法および住宅への導入効果に関する研究, 空気調和・衛生工学会論文集, 71 (1998), 53-62.
- 21) B. Sanner and B. Nordell; Underground thermal energy storage with heat pumps – An international overview, IEA Heat Pump Newsletter, 16-2 (1998), 10-14.
- 22) 建設省国土地理院; 数値地図ユーザズガイド, (1998), 日本地図センター.
- 23) 農業用地下水研究グループ「日本の地下水」編集委員会; 日本の地下水, (1986), 8, 地球社.
- 24) 市川正巳; 総観地理学講座8「水文学」, (1990), 172, 朝川書店.
- 25) 山口久之助ら; 北海道水理地質図幅第8号「札幌別冊」および同説明書, (1965), 北海道立地下資源調査所.
- 26) 高橋功二ら; 北海道地盤地質図No.2「野幌」および同説明書, (1981), 北海道立地下資源調査所.
- 27) 岡孝雄; “厚別低地帯”北方地域の地下地質, 地下資源調査所報告, 50 (1975), 81-107.
- 28) 山口久之助; 石狩湾岸低地の地下構造と地下水, 地下資源調査所報告, 41 (1970), 1-33.
- 29) 塩野清治, 升本眞二, 弘原海清; BASICによるコンターマップ・応用編, (1985), 共立出版.
- 30) 塩野清治, 升本眞二, 弘原海清; BASICによるコンターマップ・基礎編, (1985), 共立出版.
- 31) 建設省河川局; 地下水位年表 (平成5年), (1995), 全国鑿井協会.
- 32) 落藤澄, 中村真人; 帯水層による短期・長期蓄熱とその応用 (第1～7報), 空気調和・衛生工学会学術講演会講演論文集, (1998～1999).