

国土数値情報を用いた地下帯水層蓄熱システムの導入可能性に関する研究

Feasibility Study on Aquifer Thermal Energy Storage System
by using Digital National Land Information

濱田 靖弘 *1
Yasuhiro HAMADA

中村 真人 *2
Makoto NAKAMURA

窪田 英樹 *3
Hideki KUBOTA

丸谷 薫 *4
Kaoru MARUTANI

淵上 栄樹 *5
Shigeki FUCHIGAMI

長野 克則 *6
Katsunori NAGANO

落藤 澄 *7
Kiyoshi OCHIJI

Abstract

This study describes analyses on characteristics of Aquifer Thermal Energy Storage (ATES) by using digital national land information and system simulations and its feasibility considering the distribution of thermal energy demand. First, we made maps that show the distribution of underground characteristics in Sapporo by using a Geographic Information System (GIS) and hydrogeological information, and evaluations were carried out on the feasibility of ATES. Second, the heat recovery ratio of the seasonal thermal energy storage was calculated from the distribution of thickness of aquifers and the groundwater. Areas in which the heat recovery ratio exceeds 50% account for 41.5%. As a result of comparing the distribution of aquifer heat capacity with that of the thermal energy demand from administrative digital information and solar energy potential, it was clarified that the aquifers in Sapporo have sufficient capacity for space heating and cooling, mitigating the heat island and renewable energy storage.

キーワード： 地下熱， 帯水層， 蓄熱， 国土数値情報

Key Words : Underground Thermal Energy, Aquifer, Thermal Energy Storage, Digital National Land Information

1. はじめに

1997年12月に開催された気候変動枠組条約の第3回締約国会議（COP3）において決定した日本の二酸化炭素排出量6%削減に向け、政府は2010年の削減目標を8360万トンと定めた。このうち、民生部門は2740万トンと全体の約33%を占めており、建築・都市における一層の排出抑制努力が求められている。このため、建築物の断熱・気密性能の向上、機器の高効率化、都市排熱の有効利用などによる省エネルギー対策に加えて、太陽エネルギーなどのように季

時別に偏在する新エネルギーをより積極的に活用するための貯蔵方式の開発が必要不可欠になると考えられる。

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（地盤熱利用方式）と地下水を直接汲み上げる方式（地下水熱利用方式）とに大別される。後者に分類される地下帯水層を蓄熱体として利用する帯水層蓄熱（Aquifer Thermal Energy Storage : ATES）は、立地の制約が多いが、前記の間接熱交換方式と比較して効率は高くなる。これらの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。一方、帯水層蓄熱に関する国内の研究動向については、梅宮らによる研究を始めとして、実験および解析例は見られるものの^{(3)~(13)}、実用化の観点からは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⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾

*1 北海道大学大学院工学研究科助教授
(〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

e-mail: hamada@eng.hokudai.ac.jp

*2 北海道大学大学院工学研究科技術官

*3 北海道大学大学院工学研究科教授

*4 北海道立地質研究所

*5 高砂熱工学株

*6 北海道大学大学院工学研究科助教授

*7 北海道大学名誉教授

(原稿受付：2004年6月8日)

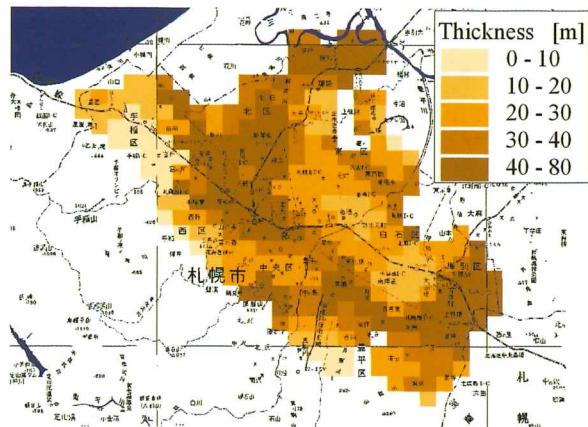


Fig. 1 Distribution of thickness of aquifer.

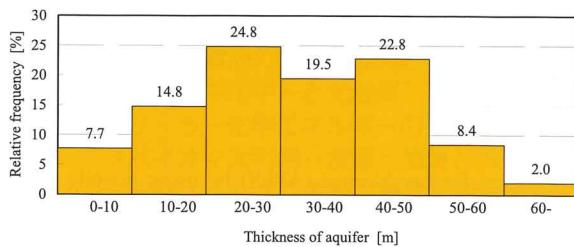


Fig. 2 Distribution of relative frequency of thickness of aquifer.

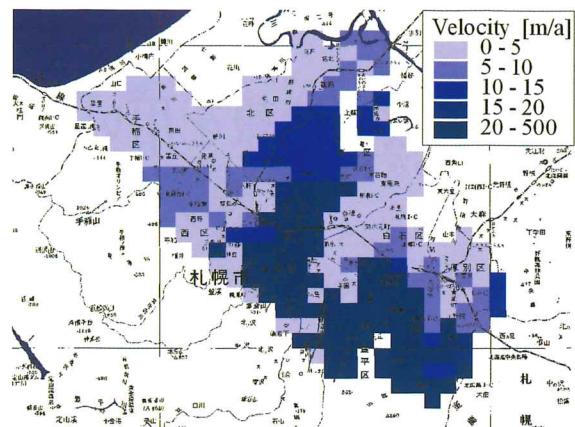


Fig. 3 Distribution of groundwater velocity.

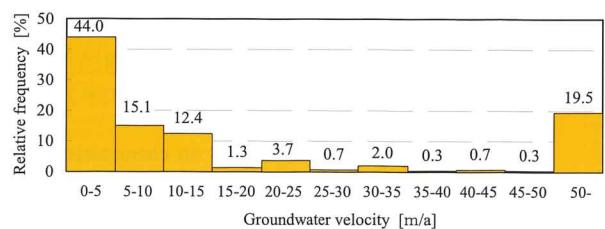


Fig. 4 Distribution of relative frequency of groundwater velocity.

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。

筆者らの研究室においては、これまで、国内では数少ない帶水層蓄熱の実施例である北海道内の施設を取り上げ、実測と解析の両面からシステムの有効性を明らかにしてきた⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾。また、地理情報システム(Geographic Information System: GIS)および水理地質情報を用いた地下熱利用のための地下特性の推定⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾を行った。

本報は、既報⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾の手法とシステムシミュレーションにより地下特性を明らかにするとともに、民生用エネルギー需要分布を考慮したシステムの導入効果について検討したものである。まず、札幌市を取り上げ、地理情報システムと水理地質情報を用いて、地下帶水層の特性の分布を求め、地下熱利用の適性評価を行う。次いで、地域別の帶水層厚さ、地下水流速データを用いて季節間蓄熱利用を想定した熱回収率の解析を実施する。さらに、行政数値情報による札幌市の民生用エネルギー需要分布、太陽エネルギー賦存量と帶水層蓄熱容量との比較を行い、地上部の熱需要、ヒートアイランド抑制、太陽エネルギーなどの自然エネルギーの長期蓄熱の可能性について検討する。

2. 札幌における地下帶水層の分布

2.1 帯水層の厚さ

建築・都市のエネルギーシステムにおける帶水層蓄熱の

導入にあたっては、計画段階において地下熱利用の適性、および地下水の流動特性の評価が必須となる。具体的には、地下帶水層の厚さ、地下水水流速がシステム特性に大きな影響を与えるため、梅宮ら⁽⁵⁾は、蓄熱適正地の選定手法の提案を行っている。本研究では、既報において提示した地理情報システムおよび水理地質情報を用いた地下熱利用のための地下特性の推定結果⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾に基づいて、札幌市を対象として、帶水層の存在および容量を把握するために、帶水層の厚さの地域別分布図を作成した。中部帶水層群を対象に259地点の地質柱状図を用いて玉石や砂礫などの地層を帶水層とみなした。まず、国土地理院発行の地形図(2万5千分の1)を基に、総計468個の格子を作成した。次いで、既存資料を整理し、338箇所の井戸資料から36の地質断面図を作成した。また、地下水位には、37箇所の観測井戸のデータを用いた。図1、図2にそれぞれ帶水層厚さの地域別分布(468個の格子のうちエネルギー需要が高い都心部を中心に228箇所を抽出)、帶水層厚さの相対度数分布を示す。帶水層の厚さが20m~30mの地域は全体の24.8%、30m~40mの地域は全体の19.5%、40m以上の地域は、全体の33.2%を占めていた。

2.2 透水係数と地下水水流速

図3に地下水水流速の地域別分布、図4に地下水水流速の相対度数分布を示す。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

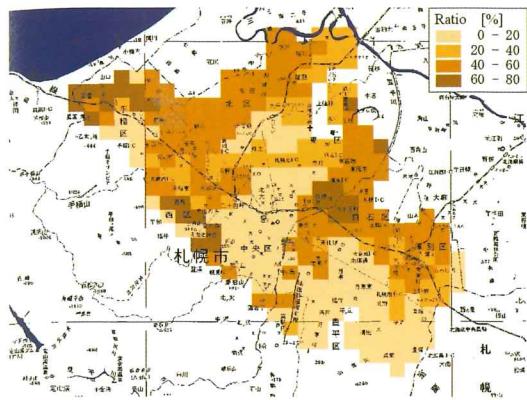


Fig. 5 Distribution of heat recovery ratio (1st year).

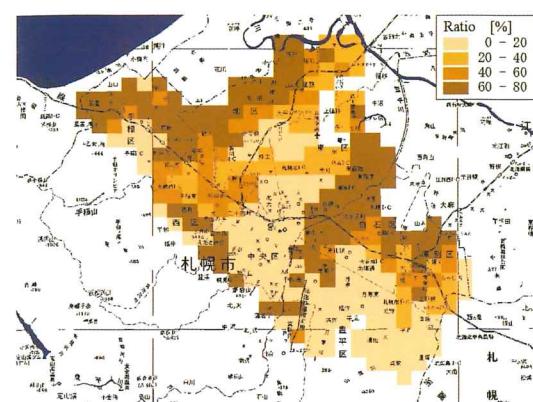


Fig. 6 Distribution of heat recovery ratio (5th year).

なるように各地区に割り当てた（全 20 箇所）。また、地下水流速の推定に関しては、1 km 格子単位で設定した透水係数分布と地下水位データから、Darcy 流れを仮定して求めた。地下水流速が 20 m/年以上の比較的速い地域は、札幌駅などの中央区・豊平区に分布しており、その割合は全体の 27.2% であった。一方、地下水流速が 10 m/年以下の低流速の地域の割合は、全体の 59.1% であり、札幌市においては帯水層蓄熱の導入可能性が高い地域が多いことがわかつた。

3. 季節間蓄熱利用における熱回収特性の評価

3.1 数値解析プログラムの概要

帯水層と周囲地盤の熱特性の解析は、以下の式によった。ただし、周囲地盤に関しては $u = v = 0$ とした。

$$c_a \frac{\partial T}{\partial t} - a \frac{\partial^2 T}{x^2} - a \frac{\partial^2 T}{y^2} - a \frac{\partial^2 T}{z^2} - c_w u \frac{\partial T}{x} - v \frac{\partial T}{y} \quad (1)$$

$$u = k_x \frac{h}{x}, \quad v = k_y \frac{h}{y} \quad (2)$$

帯水層内における自然地下水水流、注入・回収により発生する地下水流动に関しては、水平方向の二次元問題として近似した。地下水流动には Darcy 則を適用し、帯水層および

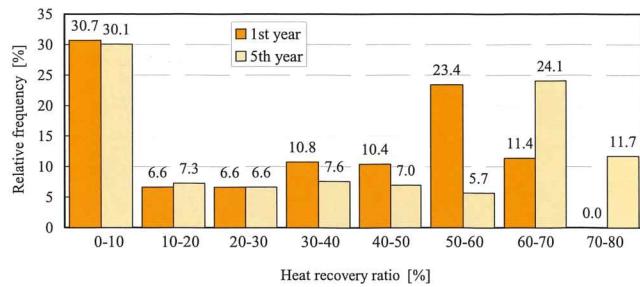


Fig. 7 Distribution of relative frequency of heat recovery ratio.

Table 1
Classification of building uses and their energy intensities
[MJ/(m²·a)]

Building type	Space heating	Space cooling	Domestic hot water	Electric power
Detached house	361	-	139	77
Apartment house	405	-	156	113
Office	26 2	138	82	496
Shop	26 4	348	115	778
Hotel	228	264	53 4	57 5
Hospital	38 2	33	561	502
School	28 5	-	-	54

周囲地盤はいずれも水平方向に等方均質であると仮定している。2 本井戸還元方式（井戸間隔 40 m）を想定し、前進差分法を用いて解析を実施する。2 本の井戸は自然地下水流に沿って配置するものとし、地下水の移流項には風上差分を適用した。系の対称性を考慮し、2 本の井戸を結んだ直線で区切った片側を計算領域とし、水平方向には井戸からの距離 80 m、鉛直方向には、帯水層からの距離 20 m と設定した。不易層以深での熱利用を想定しており、地表面近傍の地中温度解析は行っていない。

3.2 热回収率の解析

帯水層蓄熱の有効性を判断するために、札幌市における地域別の帯水層の厚さと地下水流速データを用いて熱回収率の算出を行った。ここで、温（冷）熱の回収率は、自然地下水温度を基準とした温（冷）熱回収量の期間合計値を温（冷）熱注入量の合計値で除することによって求めるものとし、算出には、3.1 の解析プログラムを使用した。また、運転のサイクルは、温熱蓄熱運転 3 箇月、放置期間 3 箇月、冷熱蓄熱運転 3 箇月、放置期間 3 箇月とする 1 年サイクルとし、運転 1 年目から運転 5 年目までの熱回収率を算出している。運転 1 年目から 5 年目までの熱回収率を示すマップを作成し、ここでは運転 1 年目と運転 5 年目における温熱回収率の地域別分布を図 5、図 6 に示す。また、運転 1 年目と 5 年目における温熱回収率の相対度数分布を図 7 に示す。運転 5 年目の熱回収率が 40% を上回る地域は、

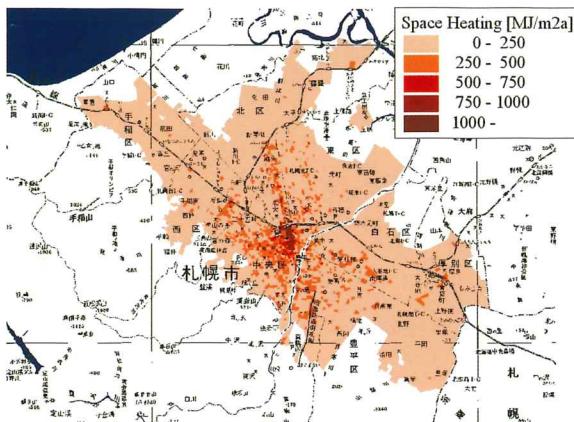


Fig. 8 Distribution of energy demand for space heating.

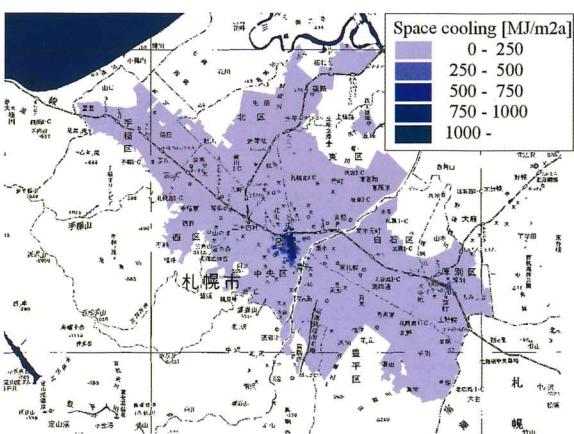


Fig. 9 Distribution of energy demand for space cooling.

手稲区・北区・東区・白石区・厚別区に多く分布していた。これらの地域には帯水層蓄熱利用方式の導入が適している。一方、運転5年目の熱回収率が20%を下回る地域は札幌駅を中心とし、地下水水流速が比較的大きい都心部に広く分布していた。これらについては、帯水層熱源利用方式の導入が望ましい。また、運転1年目における熱回収率50%以上の地域は全体の35.8%であり、運転5年目には全体の41.5%に達した。

4. 行政数値情報による民生用エネルギー需要特性

4.1 建物用途別床面積構成とエネルギー需要原単位

民生用のエネルギー需要の分布を把握することを目的として、行政数値情報、建物用途分類表、および年間のエネルギー需要原単位（表1）を用いて、民生用エネルギー需要密度の地域別分布を作成した。札幌市の行政数値情報を用途ごとに戸建て住宅、集合住宅、事務所、店舗、宿泊施設、病院、学校の7種類に分類した。次いで、行政数値情報から建物用途分類ごとの延べ床面積を小ゾーンごとに集計し、求めた面積に筆者らの研究室にて調査を行った建物用途ごとに設定した単位延べ床面積あたりの暖房、冷房、給湯、電力のエネルギー需要密度⁽²⁰⁾を乗じ、小ゾーンごと

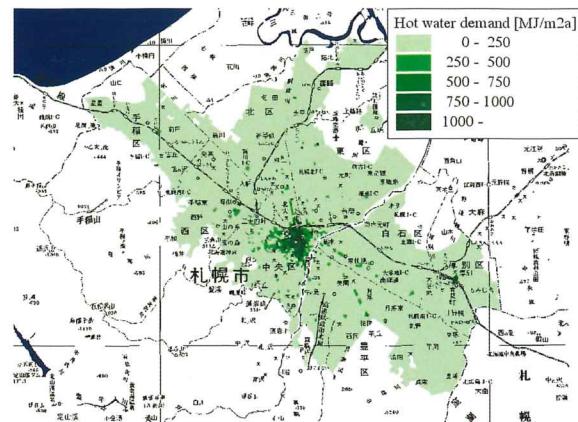


Fig. 10 Distribution of hot water demand.

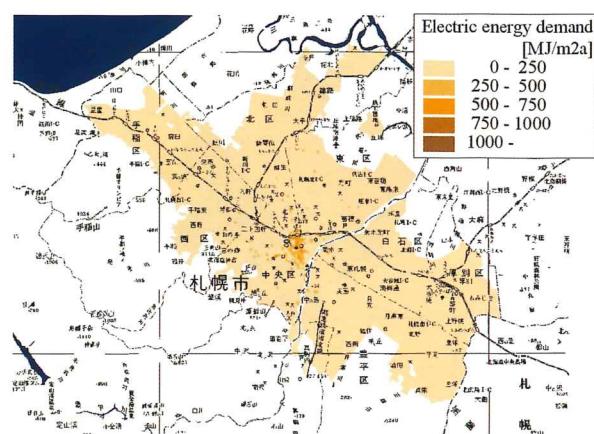


Fig. 11 Distribution of electric energy demand.

のエネルギー需要量を算出した。さらに、このエネルギー需要を各小ゾーンごとのエネルギー需要密度を推計した。

4.2 民生用エネルギー需要量

図8～図11にそれぞれ暖冷房、給湯、電力需要密度の地域別分布を示す。各需要密度とともに市内中心部が最も高く、周辺に広がるにしたがって低い傾向となる。特に、冷熱需要密度の市内中心域での集積度が高い。対象地域全体の各需要量は、それぞれ暖房19.9 PJ、冷房0.9 PJ、給湯8.0 PJ、電力7.9 PJであった。

5. 地下帯水層蓄熱の導入可能性評価

帯水層蓄熱の導入可能性を評価することを目的として、熱需要量、冷房排熱および自然エネルギーと地下部の蓄熱容量との比較を行った。

5.1 熱需要量と蓄熱容量の比較

熱需要量と蓄熱容量の比較を行うために、温熱利用温度差（ T_H ）の地域別分布と冷熱利用温度差（ T_C ）の地域別分布を作成した。ここでは、メッシュ毎の暖房需要量を帯水層の厚さと比熱で除した値を温熱利用温度差と定義した。

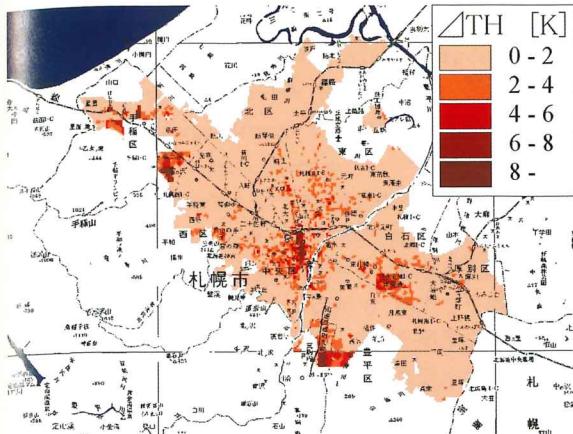
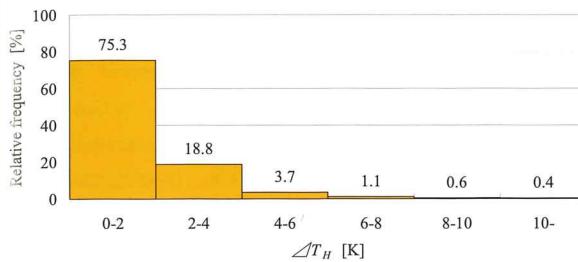
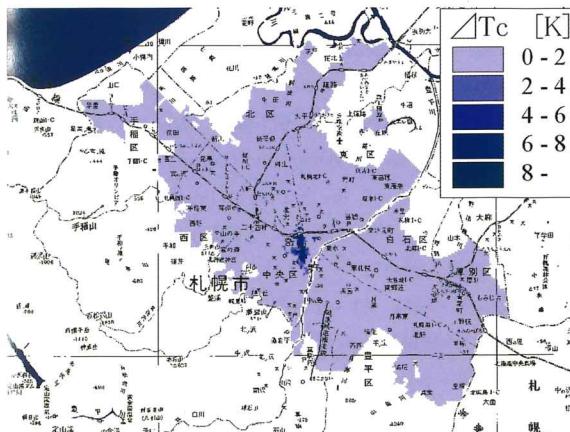
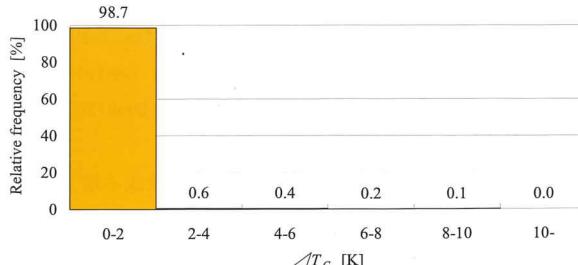
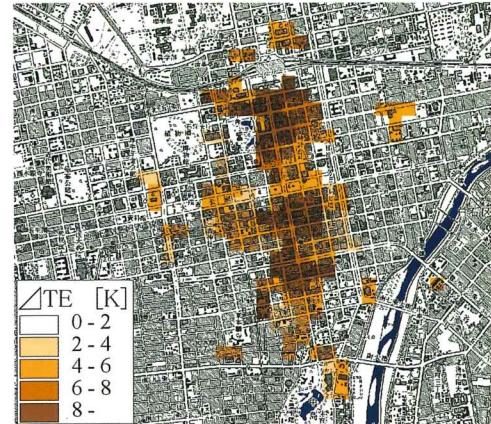
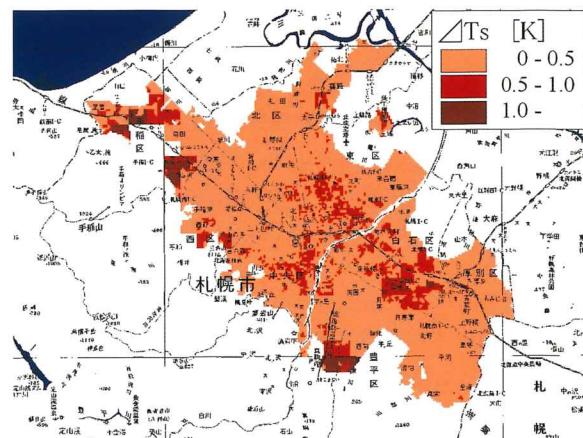
Fig. 12 Distribution of T_H .Fig. 13 Distribution of relative frequency of T_H .Fig. 14 Distribution of T_C .Fig. 15 Distribution of relative frequency of T_C .

図 12, 図 13 にそれぞれ温熱利用温度差地域別分布と相対度数分布を示す。一方、メッシュ毎の冷房需要量を帶水層の厚さと比熱で除した値として定義した冷熱利用温度差について、図 14, 図 15 にそれぞれ地域別分布、相対度数分

Fig. 16 Distribution of T_E .Fig. 17 Distribution of T_S .

布を示す。温熱利用温度差が 2 K 以下となる地域の全体に占める割合は 75.3%、冷熱利用温度差が 2 K 以下となる地域の全体に占める割合は 98.7% であった。このことから、札幌市における大部分の地域では、地上部の熱需要と比較して帶水層が十分に大きな蓄熱容量を有していると言える。また、温熱利用温度差と冷熱利用温度差の高い地域は熱需要量の多い札幌駅を中心に分布しており、周辺に広がるに従って低くなる傾向が見られた。

5.2 ヒートアイランド抑制方策としての可能性

札幌市の都心部を対象としてヒートアイランド抑制方策としての帶水層熱利用の可能性について検討するため、冷房排熱利用温度差 (T_E) の地域別分布を作成した(図 16)。ここで、冷房排熱利用温度差は空気熱源ヒートポンプの凝縮排熱量を帶水層の厚さと比熱で除した値と定義している。冷房排熱利用温度差は多くの地域で 4 K 以下であるが、札幌駅の周辺、大通り、ススキノ駅周辺には 8 K 以上の地域も存在する。しかし、都心部の冷房排熱量と比較すると、帶水層は大部分の地域で十分な蓄熱容量を有しており、ヒートアイランド抑制効果は高いと考えられる。

5.3 太陽エネルギー賦存量との比較

太陽エネルギーの蓄熱効果の可能性について検討を行うことを目的として、太陽エネルギー利用温度差 (T_s) の地域別分布を作成した(図 17)。年積算全天日射量と地域別に建物の建築面積を乗じた値をメッシュの面積、帯水層厚さと比熱で除した値を太陽エネルギー利用温度差と定義している。太陽エネルギー利用温度差は 0~0.5 K の地域が最も多く、都心部などのビルが密集する地域や住宅が密集する地域では 0.5~1 K の地域に分布する傾向となった。また、太陽エネルギー温度差が 1 K 以上となる地域は帯水層の厚さが小さい地域に集中している。このことより、太陽エネルギーの長期蓄熱効果を考慮する場合にも、帯水層は十分大きな蓄熱容量を有することがわかった。

6. まとめ

- 1) 札幌市を対象として、地下帯水層の厚さ、透水係数、地下水水流速の分布を表す数値情報を作成した。帯水層の厚さが 20 m 以上の地域、および地下水水流速が 10 m/年以下の地域の割合はそれぞれ全体の 77.5%, 59.1% 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。
 - 2) 札幌市における地域別の帯水層厚さ、地下水水流速データを用いて季節間蓄熱利用を想定した熱回収率の解析を行った結果、運転 1 年目に熱回収率が 50% 以上となる地域は 35.8% であり、運転 5 年目では 41.5% に達した。一方、5 年目の熱回収率が 20% を下回る地域は 37.4% を占めており、これについては、地盤・地下水熱源ヒートポンプシステムの適用が望ましい。
 - 3) 行政数値情報と用途別エネルギー需要原単位を用いて、暖冷房、電力、給湯需要密度を示すマップを作成した。いずれも市内中心部の需要密度が最も大きく、周辺に広がるにしたがって低くなっている。対象地域全体の暖房需要量は 19.9 PJ、冷房需要量は 0.9 PJ であった。また、電力と給湯については、それぞれ 7.9 PJ、8.0 PJ であった。
 - 4) 温熱利用温度差、冷熱利用温度差を用いて地域毎の熱需要量と蓄熱容量の比較を行った結果、温熱利用温度差、冷熱利用温度差が 2 K 以下となる地域が、それ全体の 75.3%, 98.7% を占めた。このことから、地上部の熱需要と比較して地下帯水層は十分大きな蓄熱容量を有することがわかった。
 - 5) 冷房排熱利用温度差と太陽エネルギー利用温度差に関するマップを作成し、地下帯水層がヒートアイランド抑制と太陽エネルギーなどの自然エネルギーの長期蓄熱に対し十分な容量を有することを明らかにした。
- 終わりに、本研究の遂行にあたり、北海道環境科学センターの関係諸氏に多大なご協力をいただきました。ここに謝意を表します。

記号	
c	: 比熱 [J/(kg·K)]
h	: 水理水頭 [mH ₂ O]
k	: 透水係数 [m/s]
T	: 温度 [°C]
t	: 時間 [s]
u	: 地下水流速 (x 成分) [m/s]
v	: 地下水流速 (y 成分) [m/s]
x	: 直交座標系変位 (水平成分) [m]
y	: 直交座標系変位 (水平成分) [m]
z	: 直交座標系変位 (鉛直成分) [m]
	: 熱伝導率 [W/(m·K)]
	: 密度 [kg/m ³]

添字

a	: 帯水層または地盤
w	: 水
x	: 直交座標系 (水平第一成分)
y	: 直交座標系 (水平第二成分)
z	: 直交座標系 (鉛直成分)

参考文献

- (1) B. Sanner, New trends and technology for underground thermal energy storage (UTES), Proceedings of the 7th International Conference on Thermal Energy Storage—MEGASTOCK '97(1997-6), 677-684, Sapporo, Japan.
- (2) G. Bakema et al., Underground thermal energy storage, IEA ECES State of the Art 1994(1994).
- (3) 梅宮弘道, 地下帯水層による蓄熱, 太陽エネルギー, 9-3(1983), 30-37.
- (4) 梅宮弘道・嶋脇 効・小林弘和, 地下帯水層蓄熱法の野外実験, 日本機械学会論文集(B編), 54-497(1988), 178-184.
- (5) 梅宮弘道・佐々木春人, 地下帯水層蓄熱法における蓄熱適正地の選定法, 日本機械学会論文集(B編), 54-507(1988), 3272-3277.
- (6) H. Umemiya, E. Haga and D. Shirai, Measurement of apparent thermal diffusivity of aquifer for ATES, Proceedings of the 8th International Conference on Thermal Energy Storage—TERRASTOCK 2000(2000-8), 453-458, Stuttgart, Germany.
- (7) 梅宮弘道・白井大介, 見掛け温度伝導率による地下帯水層蓄熱の性能評価, 日本機械学会論文集(B編), 67-655(2001), 222-228.
- (8) T. Yokoyama, Y. Suzuki, M. Asano, T. Takahashi and M. Ichida, Temperature propagation in unconfined aquifer coupled with three dimensional two-phase analysis in multiple layers, Proceedings of the 7th International Conference on Thermal Energy Storage—MEGASTOCK '97(1997-6), 691-696, Sapporo, Japan.

- (9) T. Yokoyama, T. Higuchi, N. Shikama, H. Abiko and K. Hirose, Launcher-typed ATES in laboratory development, Proceedings of the 8th International Conference on Thermal Energy Storage — TERRASTOCK 2000(2000-8), 141-146, Stuttgart, Germany.
- (10) 藤繩克之, 熱対流を伴う飽和多孔体内熱移動に関する理論的検討(III, IV), 農業土木学会論文集, 158(1992), 37-56.
- (11) 藤繩克之, 地下水の熱的性質と帯水層熱エネルギー貯留, 雨水技術資料, 19(1996), 9-25.
- (12) H. Watanabe and T. Fukuhara, Effects of climate on closed type seasonal thermal energy storage in a shallow aquifer, Proceedings of the 7th International Conference on Thermal Energy Storage — MEGASTOCK '97(1997-6), 721-726, Sapporo, Japan.
- (13) M. Nakamura, T. Shimizu, T. Kuroki and S. Hokoi, Study on thermal energy storage system utilizing finite aquifer, Proceedings of the 8th International Conference on Thermal Energy Storage — TERRASTOCK 2000(2000-8), 467-472, Stuttgart, Germany.
- (14) IEA ECES Annex 8 Subtask 4, Inventory of UTSS design and analysis tools, IEA ECES(1996).
- (15) GHP Consortium, An evaluation of geothermal heat pump technology design tools, DynCorp Energy Program(1996).
- (16) 落藤 澄・中村真人・長野克則・池永義啓・小端武治, 帯水層の蓄熱効果に関する長期測定とその考察, 空気調和・衛生工学会論文集, 50(1992), 53-61.
- (17) 中村真人・横山真太郎・濱田靖弘・長野克則・小端武治・落藤 澄, 廃タイヤ焼却による帯水層蓄熱と活性炭生成, 空気調和・衛生工学会論文集, 77(2000), 21-30.
- (18) 濱田靖弘・丸谷 薫・中村真人・永坂茂之・落藤 澄・淵上栄樹・横山真太郎, 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, エネルギー・資源, 23-1(2002), 61-67.
- (19) Y. Hamada, K. Marutani, M. Nakamura, S. Nagasaka, K. Ochifuji, S. Fuchigami and S. Yokoyama, Study on underground thermal characteristics by using digital national land information, and its application for energy utilization, Applied Energy, 72-3/4(2002-7), 659-675.
- (20) 成田樹昭・落藤 澄・横山真太郎・長野克則・中村真人・山縣洋一, 札幌市における低温都市排熱の利用に関する研究, 空気調和・衛生工学会論文集, 59(1995), 49-59.