

# 空港などを対象としたボアホール エネルギーシステムの提案

## PROPOSAL OF BOREHOLE SEASONAL ENERGY SYSTEM FOR AIRPORT AND HIGH-STORY BUILDINGS

齋藤 武雄\*<sup>1</sup>  
Takeo SAITOH

篠宮 純三\*<sup>2</sup>  
Junzo SHINOMIYA

### Abstract

In this paper, a seasonal solar energy heating system which can be applicable to large facilities including the airport was proposed. The present system provides energies for melting of snow covered the runways and also for space heating/cooling of the airport buildings.

The three-dimensional computer simulations were carried out for the borehole seasonal energy storage system in which vertical boreholes as deep as 100 meters are drilled in the ground. The system recovers the heat generated by the space cooling and refrigeration counters utilized in the summer season. During the summer months, this excess heat is used for charging a heat store (borehole unit). This heat is then extracted during the winter season to heat the airport facilities and melting of snow covering the runways.

**Key Words:** Borehole Energy System, Three-dimensional Simulation, Airport, Space Heating/Cooling, Seasonal Storage, Snow Melting

### 1 緒言

近年、二酸化炭素( $CO_2$ )などの温室効果ガスによる地球の温暖化、硫酸酸化物( $SO_2$ )および窒素酸化物( $NO_x$ )による酸性雨の森林や湖沼に対する深刻な影響が顕在化している。これは、いずれも人類による化石エネルギーの大量消費に起因するものであり、このままの形で化石エネルギーを使い続けられれば、2060年には、地球大気中の $CO_2$ 濃度は倍増し、地球平均気温は約2.5℃も上昇するものと世界の研究機関は予測している。また、本研究と別に行った筆者らの東京の温暖化予測<sup>(1),(2)</sup>によれば、このまま推移すれば2030年には、東京の夏(7月末)の大手町の夕方6時の気温は40℃を越えたとみられ、地球全体だけではなく、とくに都市温暖化が顕著になりエネルギー対策を包含した何らかの抜本的対策を講じる必要がある。

これらの対策の一つとして、著者らは、すでに自然エネルギーを用いた大規模顕熱エネルギーシステム<sup>(3),(4)</sup>を提案している。来世紀後半には、世界の人口は100億を越えたと予想されており、世界のエネルギー需要も、開発途上国や中国を中心に、現在の消費量の5倍ないし、10倍に増えるものと考えられ、これを賄うには、もはや太陽エネルギーを中心とした自然エネルギーしかないかと判断するからである。

原稿受付 平成4年9月29日

\*1 東北大学工学部 教授  
Dept. of Aeronautics and Space Eng. Tohoku Univ. Professor

\*2 東北大学工学部 大学院生  
Dept. of Aeronautics and Space Eng. Tohoku Univ. Graduate Student

本報は、これらの研究の一環としてボアホール式(Borehole-type)長期蓄熱を用いた大規模施設(空港、超高層ビルなど)の空調システムを提案するものである。

ボアホールシステムは、すでにスウェーデン<sup>(5)</sup>およびドイツ<sup>(6)</sup>で一部実用化が進んでいる。スウェーデン方式は比較的ボアホール深さが深く(~100m)、岩盤を対象としているのに対し、ドイツ方式は、掘削が容易なようにボアホール深さは10~15mとした一般の土壌を対象としたものである。

本研究では、具体的適用対象として、北国の空港を選び、ボアホール長期蓄熱を用いた滑走路の融雪と空港ビルの暖冷房システムに対し、コンピュータによる3次元性能シミュレーションを行って、実現可能性について論じた。

このようなシステムは、大規模であるためプロトタイプ施設を建設して長期実験を行うことは、費用および時間の制約上無理なため、できるだけ正確なコンピュータモデルを作成し、3次元性能シミュレーションを行うことが望ましい。本論文では、このような線に沿うモデルによる3次元シミュレーションを行って、気象条件、ボアホールピッチ、パイプピッチ、コレクタの面積、および土壌の物性などをパラメータとして、具体的な仕様を決定し、ボアホールシステムの有効性を確認した。

本システムでは、夏期の空港ビルの冷房排熱や滑走路の集熱、および、ボアホールユニットの上に設置されたソーラーコレクタの集熱をボアホールに蓄え、冬の暖房・給湯、滑走路の融雪などに用いることができ、また、結果的に冬の冷熱を夏に冷房源としても用いることができる。すなわち、アニュ

アルサイクル利用ができる。

このことは、次世紀の地球環境対応型エネルギーシステムとして重要な要素であって、例えば、東京などの大都市では、夏の冷房排熱やビルの吸収熱を地下のボアホールに蓄え、冬の暖房給湯に用いれば、都市温暖化（ヒートアイランド）を本格的に解決できる可能性がある。

従って、このようなシステムの導入は、化石エネルギー代替化によるCO<sub>2</sub>削減だけでなく、都市そのものの温暖化および大気汚染を防ぐ大きな効果を期待できる。

記号表

$a_1, a_2$	: 土壌の温度伝導率	$\Delta t$	: 時間ステップ
$A$	: 無次元パイプ表面積	$t_s$	: 立ち上がり時間
$B(\phi)$	: 形状関数	$T$	: 温度
$B_i$	: 水の融解熱	$T_0, T_1$	: 代表温度
$C_s$	: 雪の比熱	$T_a$	: 気温
$C_w$	: 水の比熱	$T_i, n$	: 入口温度
$D_1, D_2$	: 代表長さ	$T_s$	: 路面温度
$F_R$	: リムバルファクタ	$t_w$	: 熱媒体温度
$F(\phi)$	: 形状関数	$x, y, z$	: 空間座標
$h_i$	: 大気-水膜熱伝達率	ギリシャ文字	
$H$	: 降雪速度	$\gamma$	: 雪の密度
$I_p$	: 日射量	$\eta$	: 独立変数
$K_g$	: 物質移動係数	$\eta_c$	: 集熱効率
$K_t$	: 熱通過率	$\Delta\eta$	: 法線方向の格子間隔
$L$	: 0℃における蒸発潜熱	$\zeta_c$	: 吸収率
$n$	: 法線方向	$\tau_G$	: ガラスの透過率
$P$	: -5℃における水蒸気圧	$\phi$	: 角度
$P_s$	: 0℃における水蒸気圧	$\Delta\phi$	: 角度方向の格子間隔
$Q$	: 無次元熱量	添字	
$q$	: 熱流束	+ : 有次元数	
$r$	: 半径		
$t$	: 時間		

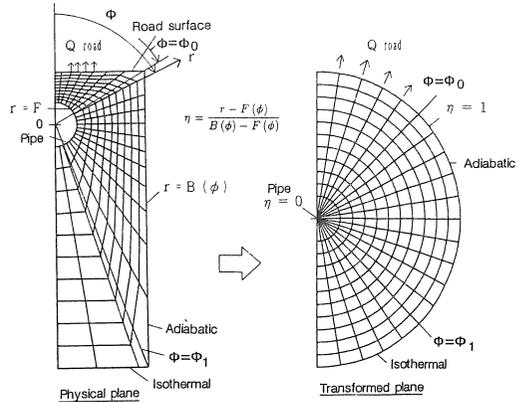


図1 BFMによる変換

- 1) 物性値は一定である。
- 2) 土壌中の湿分の移動はない。
- 3) 伝熱機構は2次元熱伝導のみである。

以上の仮定を導入すると、円筒座標系における基礎式は次のようになる。(記号は記号表を参照) 円筒座標系の基礎式:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} \quad (2)$$

を式(1)の独立変数で変換すると変換後の基礎式は次のようになる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} = & \left[ \frac{1}{(B-F)^2} + \frac{1}{(\pi r)^2} \left( \frac{\partial \eta}{\partial \phi} \right)^2 \right] \frac{\partial^2 T}{\partial \eta^2} \\ & + \left[ \frac{1}{r(B-F)} + \frac{1}{(\pi r)^2} \frac{\partial^2 \eta}{\partial \phi^2} \right] \frac{\partial T}{\partial \eta} \\ & + \frac{1}{(\pi r)^2} \frac{\partial \eta}{\partial \phi} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi \partial \eta} + \frac{1}{(\pi r)^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} \end{aligned} \quad (3)$$

ただし、 $r, t, T$ は次のように無次元化されている。

$$r = \frac{r^+}{D_1}, \quad t = \frac{a_1 t^+}{D_1^2}, \quad T = \frac{T^+}{T_0} \quad (4)$$

なお、代表長さ  $D_1$  は、パイプ半径にとった。

境界条件として、側面は断熱、また底面は等温条件と仮定し、上面からは、次のように融解熱および熱損失により熱が奪われているとした。路面からの伝熱量<sup>(6)</sup>は、次の4つの合計として求められる。

a. 融解熱  $Q_1 = B_i H \gamma \quad (5)$

b. 顕熱量  $Q_2 = (C_s T_a + C_w T_s) H \gamma \quad (6)$

c. 対流による放熱量  $Q_3 = h_i (T_s - T_a) \quad (7)$

d. 気化熱  $Q_4 = L (P_s - P) K_g \quad (8)$

従って、総熱量は次式で与えられる。

## 2 滑走路融雪システム

本ボアホール空港融雪・空調システムは、大きく分けて埋設コイルによる滑走の融雪システムとボアホール蓄熱・放熱システムの2つの部分に大別できる。まず、前者についてその設計法を述べる。

滑走路に埋設したコイルに、熱媒体を通したときのアスファルト中の温度分布を数値計算により求め、コイル径、パイプピッチ、パイプ深さ、土壌の物性、および熱媒体温度などの設計パラメータの最適化を行う。

### 2.1 解析方法

解析には、ピッチなどのパラメータの変化に容易に対応できるよう、境界固定法(BFM)<sup>(7)</sup>を用いた。境界固定法は、次に示す独立変数を用いることにより計算領域を、原点をタンク中心に置く半円領域に置き換え、円筒座標系による2次元熱伝導問題に帰着するものである。

$$\eta = \frac{r - F(\phi)}{B(\phi) - F(\phi)} \quad (1)$$

図1に変換前の領域形状と変換後の計算領域形状をそれぞれ示した。格子分割の1例を示してあるが、いわゆる非直交座標系を用いることになる。

次に基礎式を導くにあたり、次の仮定を導入する。

$$Q_{road} = \sum_{i=1}^4 Q_i \quad (9)$$

本報で用いた諸定数および諸物性値を表1に示す。

表1 計算に用いた諸定数および物性値

unit		unit			
B	kJ/kg	334.4	$K_g$ kg/m <sup>2</sup> ·s·mmHg	$1.34 \times 10^{-5}$	
$C_s$	kJ/kg·°C	2.09	L	kJ/kg	2495.46
$C_w$	kJ/kg·°C	4.18	P	mmHg	1.7
$h_1$	kJ/m <sup>2</sup> ·s·°C	$1.85 \times 10^{-2}$	$P_s$	mmHg	2.5
H	m/s	$8.33 \times 10^{-6}$	$\gamma$	kg/m <sup>3</sup>	60.0

このようにして求めた総熱量から上面の温度勾配(すなわち熱流束)が境界条件として与えられる。これは路面温度、降雪量などの関数となる。

### 2.2 計算方法

計算は、多点前進差分法<sup>(7)</sup>を用いて行った。たとえば、式(3)の多点差分表示は次のように表すことができる。

$$T_{i,j,k+1} = T_{i,j,k} + \Delta t \left\{ \frac{\Lambda_1}{12(\Delta\eta)^2} \sum_{n=1}^5 \beta_n T_{i+n-3,j,k} + \frac{\Lambda_2}{12\Delta\eta} \sum_{n=1}^5 \alpha_n T_{i+n-3,j,k} + \frac{\Lambda_3}{144\Delta\eta\Delta\phi} \sum_{m=1}^5 \sum_{n=1}^5 \alpha_m \alpha_n T_{i+n-3,j+m-3,k} + \frac{\Lambda_4}{12(\Delta\phi)^2} \sum_{n=1}^5 \beta_n T_{i,j+n-3,k} \right\} \quad (10)$$

ここで、

$$\begin{aligned} \Lambda_1 &= \frac{1}{(B-F)^2} + \frac{1}{(\pi r)^2} \left( \frac{\partial\eta}{\partial\phi} \right)^2 \\ \Lambda_2 &= \frac{1}{r(B-F)^2} + \frac{1}{(\pi r)^2} \frac{\partial^2\eta}{\partial\phi^2} \\ \Lambda_3 &= \frac{1}{(\pi r)^2} \frac{\partial\eta}{\partial\phi}, \Lambda_4 = \frac{1}{(\pi r)^2} \\ \alpha_1 &= 1, \alpha_2 = -8, \alpha_3 = 0, \alpha_4 = 8, \alpha_5 = -1 \\ \beta_1 &= -1, \beta_2 = 16, \beta_3 = -30, \beta_4 = 16, \beta_5 = -1 \quad (11) \end{aligned}$$

### 2.3 解析結果

図2にパイプ深さを0.035m、パイプピッチを0.12mとした場合のアスファルト中の温度分布を示す。管表面温度は30°Cとし、降雪速度を $0.28 \times 10^{-5} m/s$ 、および $0.83 \times 10^{-5} m/s$ とした。図2に示した無次元時間は、パイプ中間点の温度が初期条件の0°Cから1°Cなるまでにかかる時間である。今後この無次元時間を立ち上がり時間 $t$ と定義して、融雪パイプピッチの評価の指標とすることにする。

図3に降雪速度をパラメータとしたピッチと立ち上がり時間 $t$ の関係を示した。この結果より、その地域の降雪速度に対する最適な融雪パイプピッチを推定できる。仙台においては大雪に相当する $0.56 \times 10^{-5} m/s$ の降雪速度に対して、ほぼ30分で融雪が完了するという条件の場合、ピッチは0.12mが適当であるということが出来る。

次に、0.12mのピッチに対して、降雪速度と熱媒体温度をパラメータとしたときの、パイプ表面から

の無次元放熱量 $Q$ の変化の1例を図4に示した。このときの操作は表面温度が2°Cを越えたときは熱媒体の循環をオフにし、1°Cを下回ったときに再びオンにするというものである。ここで1サイクルに放出した熱量を1サイクルにかかった時間で割った熱量を、そのピッチにおける時間平均熱量とする。熱媒体温度をパラメータとしたときの降雪速度と時間平均熱量の関係を図5に示す。これより、その時のピッチにおいて、パイプから放出される熱量を熱媒体温度と降雪量より推定することができる。

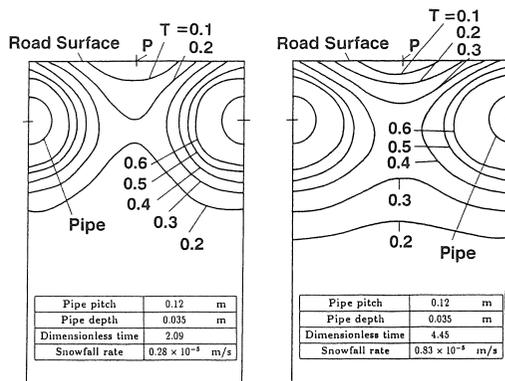


図2 アスファルト中温度分布

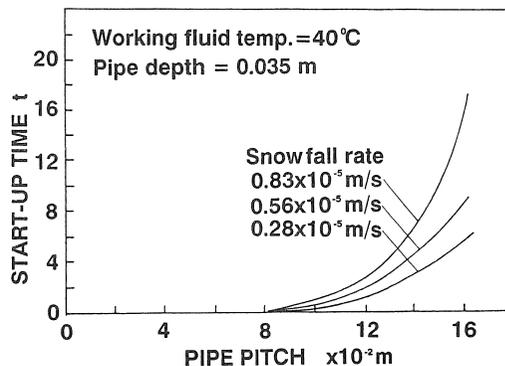


図3 ピッチと立ち上がり時間の関係

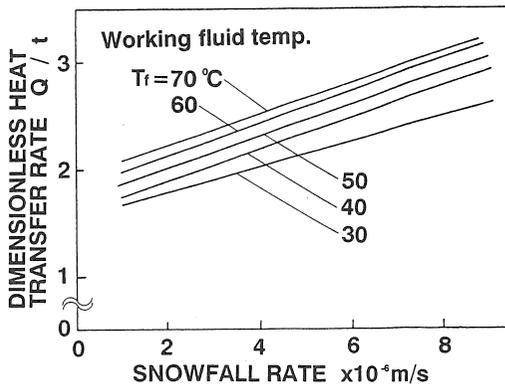


図4 無次元時間と放出熱量の関係

融雪熱量の推定式：

$$Q/t = (0.585 + 0.475 \times 10^5 H) T_w^{0.277} \quad (12)$$

ただし、 $Q = q \cdot t \cdot A$ である。

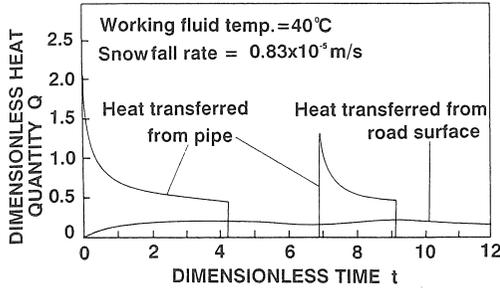


図5 降雪速度と無次元伝熱量の関係

### 3 ポアホール蓄熱システム

次に夏期の空港施設の冷房排熱、滑走路による集熱およびソーラーコレクタによる集熱を蓄熱しておき、冬期に融雪および暖房・給湯に用いるポアホール蓄熱システムを考える。ポアホールシステムはスウェーデンで広く用いられているが<sup>(5)</sup>、詳細なシミュレーションはまだ行われていない。ここでは、直径0.1mの垂直管を100mの深さまで埋設したもの25本で1ユニットとし、その1辺の長さをポアホールサイズと定義した。そして、その性能をコンピュータによる3次元シミュレーションにより検討した。

図6に提案する空港用ポアホールシステムの模式図を示す。滑走路には、滑走路融雪システムで求めたパイプピッチ0.12m、パイプ深さ0.035mで融雪パイプを埋設し、これに熱媒体を流通する事により冬期の融雪と、夏期の集熱を行う。さらに、広大な空港敷地内にソーラーコレクタを設置角度0度で設置し、集熱を行う。そして、このコレクタの下に、図6に示すようなポアホールシステムを設置する。夏期には、滑走路とコレクタによる集熱と、空港ビルの冷房用の冷凍機を用いたときの冷房排熱を蓄熱し、冬期には融雪と、空港ビルの暖房・給湯に放熱する。

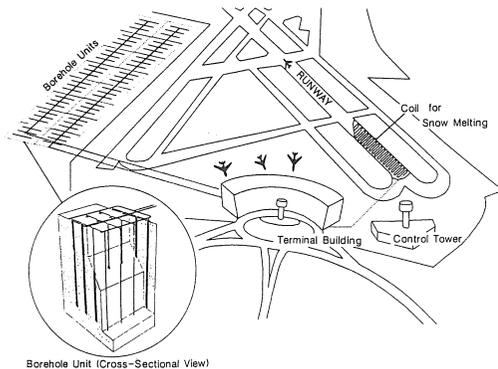


図6 ポアホール式空港融雪システムの模式図

また、今回のモデル空港である仙台空港の現況を表2に示す。

190 ha	
Total area	190 ha
Operation hours	8:00 ~ 19:30
Runway	A: 1200m × 45m
	B: 2000m × 45m
Area of terminal building	6632m <sup>2</sup>

### 3.1 解析方法

解析は、3次元熱伝導問題とし、多角形要素法(MEM)<sup>(7)</sup>を用いた。多角形要素法とは、分割要素そのものの形状が任意の多角形(本報では、四角形)であり、任意幾何形状領域に対する本格的な解法である。

基礎式を導くにあたり、次のような仮定を導入した。

1) 土壌中の湿分の移動、地下水の影響はない。

2) 伝熱機構は3次元熱伝導のみである。

以上の仮定を導入すると、直角座標系の基礎式は次のようになる。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (13)$$

ただし、次のように無次元化されている。

$$\{x, y, z\} = \frac{1}{D_2} \{x^+, y^+, z^+\}, \quad t = \frac{a_2 t^+}{D_2^2}, \quad T = \frac{T^+}{T_1} \quad (14)$$

境界条件は以下のとおりである。

$$\begin{aligned} x = x_2 &: T = const. \\ y = y_1 &: \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \\ x = y &: \frac{\partial T}{\partial n} = 0 \\ z = 0 &: T = const. \\ z = z_2 &: T = const. \end{aligned} \quad (15)$$

図7に解析に用いた水平面方向のメッシュをと垂直方向の断面図を示す。

表3に解析対象とする地盤条件<sup>(9)</sup>を示す。今回、実際の地盤により近づけるために7層に分け解析を行った。

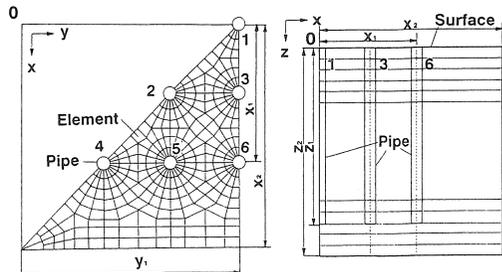


図7 計算に用いた格子分割例(全体の8分の1)

表3 地盤条件

深度 (m)	地層	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	比熱 (kJ/kg·K)	熱伝導率 (W/m·K)	含水率 (%)
0 ~ 9	砂質土層	1510	1.1	1.1	7.9
9 ~ 36	粘性土層	1700	1.8	1.2	27.7
36 ~ 44	砂泥互層	1960	1.2	2.1	21.6
44 ~ 46	砂礫層	1990	1.6	1.6	18.4
46 ~ 71	砂質土層	1510	1.1	1.1	7.9
71 ~ 76	粘性土層	1700	1.8	1.2	27.7
76 ~ 130	砂質土層	1510	1.1	1.1	7.9

### 3.2 数値シミュレーション

#### 3.2.1 蓄熱過程

夏期における蓄熱過程では、太陽熱の集熱を想定し、入口温度40℃の熱媒体をボアホール1本あたり流量20 l/minで1日のうち8時間通すと仮定する。初期条件は、地中の平均温度を10℃として、一様であるとした。図8にボアホールのサイズが4m×4mと6m×6mの場合の深さ50mの地点の水平温度分布を示す。当然のことながら大きなユニットの方が小さなユニットよりも、温度変化が遅い。図9には蓄熱開始後の経過時間と熱量の関係を示す。4m×4mのサイズでは、60日経過の時点で定常状態に達しているが、6m×6mのサイズは、60日では定常には達せず、さらに蓄熱することができる。また、中心部に位置するパイプ1は蓄熱過程においては、最も速く定常に達し、放出熱量は小さい。

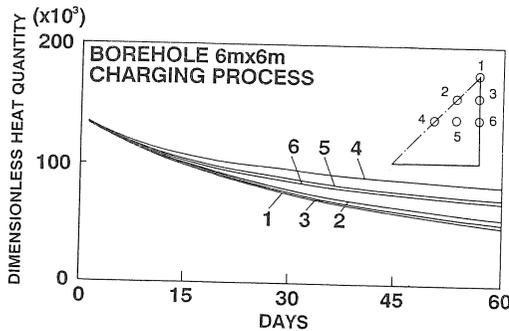
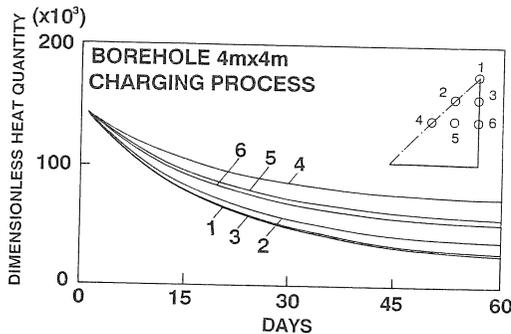


図9 蓄熱量の時間変化

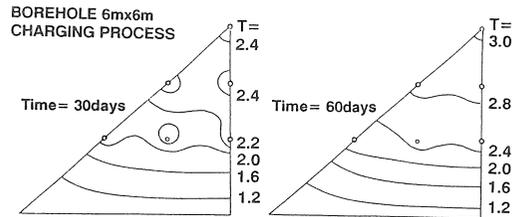
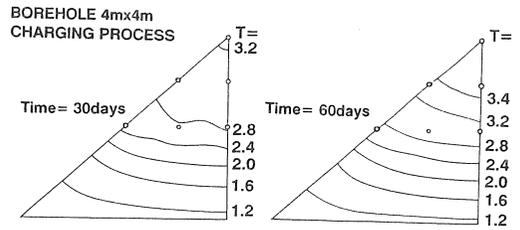


図8 地中温度分布 (深さ50m)

#### 3.2.2 放熱過程

冬期における放熱過程では、暖房時を想定し、入口温度10℃の熱媒体をボアホール1本あたり流量10 l/minで、1日のうち12時間通す。初期条件は、蓄熱過程の60日後の結果を用いる。図10に深さ50mの地点の地中温度分布を示す。サイズ4m×4mでは、30日で蓄熱分の熱量が放熱されることが解る。図11には時間と放熱量の関係を示す。これにより、サイズ4m×4mは、短期的に放熱するのに適し、サイズ6m×6mは長期的に放熱するのに適していることが解る。

計算結果から得られた蓄熱量、および放熱量を表4に示す。

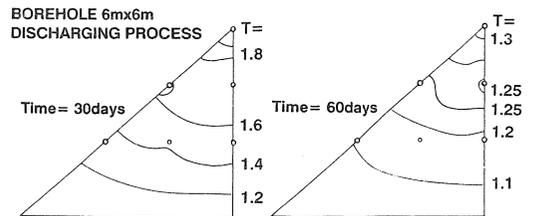
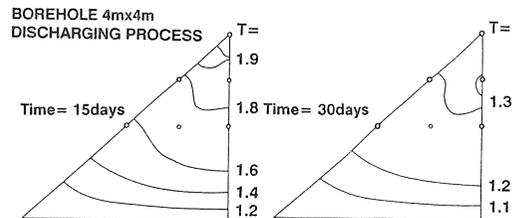


図10 地中温度分布 (深さ50m)

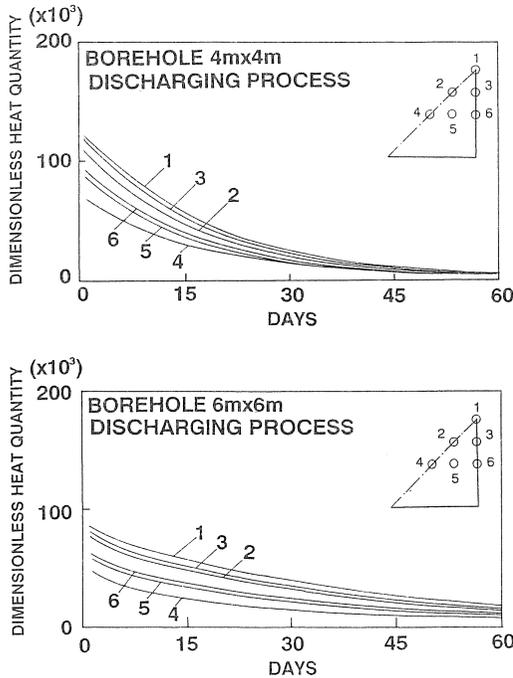


図11 放熱量の時間変化

表4 蓄熱・放熱量

Borehole size	Process	Total heat
4m x 4m	Charging process after 60 days	$2.3 \times 10^5$ MJ
	Discharging process after 30 days	$7.4 \times 10^4$ MJ
6m x 6m	Charging process after 60 days	$2.8 \times 10^5$ MJ
	Discharging process after 60 days	$9.1 \times 10^4$ MJ

### 3.3 季節蓄熱シミュレーション

長期間の数値シミュレーション結果を示す。シミュレーションは6月から11月まで集熱し、その後放熱する。本報では仙台市における気象データに基づき計算を行う。気象データは、一日ごとの平均気温、水平面全天日射量、蒸気圧、風速を用いた。図12に平均気温と水平面全天日射量を示す。ボアホールサイズは、長期に適しているサイズ6m x 6mのユニットを用いた。また、空港ビルの空調は冷凍機を用いた冷房とし、その冷凍機の成績係数は3.6とし、熱需要は省エネルギーを考慮したビルを想定し $0.12\text{kW/m}^2$ と仮定し計算を行った<sup>(10)</sup>。さらに、冷房使用期間は、7月20日から9月20日までの2ヶ月間とし、使用時間は、AM8:00からPM7:00とする。熱媒体入口温度は、それぞれの時間の出口温度に集熱量(滑走路、冷房排熱、コレクタ)を加えた温度として計算を行った。

#### 3.3.1 滑走路と冷房排熱による集熱

図13は、滑走路による集熱と冷房排熱を集熱した結果を示す。6月と8月が集熱量が多い。これは、6月は初期土壌温度が低く集熱効率が高いからである。これに対し8月は日射量が多く気温も高いことが効いている。7月前半の落ち込みは、梅雨の時期で日射量が少ないことに起因する。9月以降は集熱量は次第に小さくなる。

6ヶ月間の総集熱量は、 $5.8 \times 10^5 \text{ MJ}$ である。また、放熱過程と同じ条件で2ヶ月間放熱したときの、総放熱量は、 $0.9 \times 10^5 \text{ MJ}$ である。

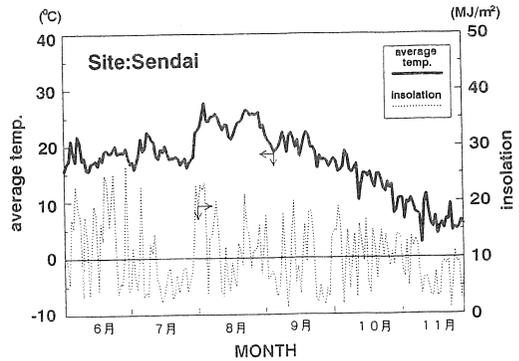


図12 計算に用いた気象データ

#### 3.3.2 滑走路と冷房排熱とソーラーコレクタによる集熱

図14は、6月から11月にかけての滑走路による集熱と、空港の冷房排熱と、ソーラーコレクタを用いて集熱した結果を示す。ソーラーコレクタの設置角度は0度とし、コレクタ面積は滑走路面積の1割とした。またコレクタの効率は次の式により求めた。

$$\eta_c = F_R \left\{ (\tau_G \xi_C)_E - K_t \frac{T_{in} - T_a}{I_p} \right\} \quad (15)$$

ここで、 $F_R = 0.967$ 、 $(\tau_G \xi_C)_E$ は集熱器の長期使用に対して見込まれる、性能低下などを考慮した相当効率で $(\tau_G \xi_C)_E = 0.8$ 、 $K_t$ は熱透過率で $K_t = 3.3$ を用いた。また滑走路による集熱は、1次元熱伝導として求めた。

図14より、6ヶ月間の総集熱量は、 $8.9 \times 10^5 \text{ MJ}$ であり、総放熱量は、 $1.5 \times 10^5 \text{ MJ}$ である。

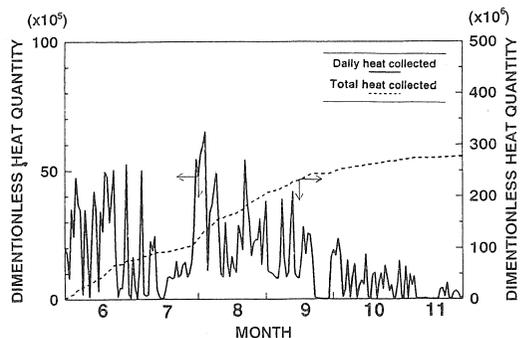


図13 蓄熱量の時間変化(滑走路+冷房排熱)

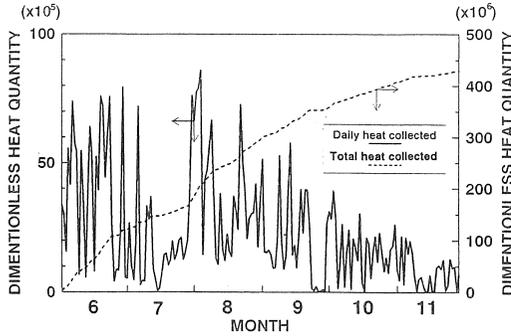


図14 蓄熱量の時間変化(滑走路+冷房排熱+コレクタ)

3.3.3 解析結果

表5に解析結果を示す。仙台空港の年間融雪熱量は $2.0 \times 10^6 MJ$ 、暖房に必要な熱量は、 $1.0 \times 10^6 MJ$ と推定され、よって年間で $3.0 \times 10^6 MJ$ 必要である。ところで、冬期の昼間の日射が滑走路に蓄えられ、これ自体が融雪熱量となりうる。この熱量を計算により求めると、 $3.0 \times 10^5 MJ$ である。よってこのボアホールエネルギー蓄熱システムにより必要な熱量は $2.7 \times 10^6 MJ$ である。滑走路による集熱と冷房排熱を夏期に蓄え、冬期に放熱した結果、ボアホール20ユニットで $1.8 \times 10^6 MJ$ であり必要量を満たすことができない。しかし、滑走路による集熱と、冷房排熱に加え、ソーラーコレクタを滑走路面積の1割配置し集熱を行うと、ボアホール20ユニットで $2.9 \times 10^6 MJ$ の放熱量が得られ、十分賄うことができる。このシステムの年間消費エネルギーは、 $1.0 \times 10^6 MJ$ であり、年間成績係数は4.8である。表6に従来のボイラを用いたシステムとの比較を示す。システムとしての年間消費エネルギーは約2分の1に、また、滑走路の融雪に要する二酸化炭素排出量は約4分の1に削減することができる。さらに、空港という広大な敷地を有効利用する方法として、太陽電池の利用が考えられる。太陽電池で年間消費エネルギーの半分を賄うとすると、二酸化炭素排出量は約8分の1に削減することができる。

表5 解析結果

	集熱量	放熱量	
		1ユニット	20ユニット
滑走路+冷房排熱	$5.8 \times 10^6 MJ$	$0.9 \times 10^6 MJ$	$1.8 \times 10^6 MJ$
滑走路+冷房排熱 +ソーラーコレクタ	$8.9 \times 10^6 MJ$	$1.5 \times 10^6 MJ$	$2.9 \times 10^6 MJ$
融雪・暖房に必要な熱量			$2.7 \times 10^6 MJ$

表6 従来のシステムとの比較

	従来のシステム (ボイラ)	ボアホール システム 1	ボアホール システム 2 (太陽電池)
融雪に対する CO <sub>2</sub> 排出量	1	1/4	1/8
年間エネルギー 使用量	1	1/2	1/4

4 結言

空港および超高層ビルに応用できるボアホール長期エネルギーシステムの提案を行った。具体的適用例として滑走路の融雪と空港ビルの冷・暖房のシミュレーションを行い次の知見をえた。

- (1) 滑走路の融雪過程の解析を行いその特性を明らかにし、最適設計手法を示した。
- (2) ボアホールユニットの3次元熱伝導解析を行い、蓄熱および放熱過程を明らかにした。
- (3) 25本で1ユニットとした垂直管を、深さ100 mに埋設したボアホール蓄熱システムの年間蓄熱のシミュレーションを行い、その特性を明らかにした。
- (4) 具体的例として、中規模の空港の融雪・暖房に対して本システムを適用し、滑走路、冷房排熱を集熱するだけでなく、ソーラーコレクタを滑走路の1割の面積に設置することにより、ボアホール約20ユニットで必要熱量を賄うことを示した。
- (5) ボアホールエネルギーシステムは、ボイラを用いるときと比較して排出二酸化炭素量を最大8分の1に、エネルギー消費量を4分の1に削減することができる。

今後、超高層ビルなど都市のエネルギーシステムへの応用を提案して行きたい。

参考文献

1. 齋藤武雄・島田達哉：都市における都市温暖化の3次元シミュレーション, 第29回伝熱シンポジウム講演論文集(1992-3), 192, 大阪
2. 島田 達哉：都市温暖化の3次元モデリングとシミュレーションに関する研究, 修士学位論文(東北大学)(1992-3), 仙台
3. T. Saitoh and T. Ono : Solar Energy Eng., Trans. ASME, 106 (1984), 403
4. 齋藤 武雄：地下大型蓄熱槽を用いた太陽エネルギーの長期蓄熱法の研究, 第18回伝熱シンポジウム講演論文集(1981-6), 37, 仙台
5. SCANDENERGY社技術資料(1989)
6. M. REUSS, H. SCHULZ and B. WAGNER : Workshop on Seasonal Thermal Energy Storage in Duct Systems (1990-6), 79-91, Freising, Germany
7. 齋藤 武雄：数値伝熱学(1986), 116-125, 養賢堂, 東京
8. ユニチカ技術資料(1988)
9. 陶野 郁雄：大深度地下開発と地下環境(1990), 120-221, 鹿島出版会, 東京
10. 井上 宇市：空気調和ハンドブック(1984), 85-109, 丸善, 東京
11. 齋藤武雄・篠宮純三：ボアホールエネルギーシステムの3次元シミュレーション, 第29回伝熱シンポジウム講演論文集(1992-5), 19, 大阪