室蘭工業大学
学術資源アーカイブ
Muroran Institute of Technology Academic Resources Archive

地下の熱環境の利用に関する研究
(主に貯雪氷施設と関連して)

メタデータ	言語: jpn 出版者: 室蘭工業大学 公開日: 2014-03-04 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 媚山, 政良, 斎藤, 図, 岸浪, 紘機, 横田, 亮則, 渡辺, 泰文 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10258/775

地下の熱環境の利用に関する研究
(主に貯雪氷施設と関連して)

媚山政良，斉藤　図，岸浪紘機，横田亮則，渡辺泰文

Thermal Utilization of underground Environments
(On Storage of Cold Energy)

Masayoshi KOBIYAMA, Hakaru SAITO, kohki KISHINAMI, Akinori YOKOTA*1
and Hirofumi WATANABE*2

Abstract

The outer part of the earth crust on which we live has been producing many kinds of natural resources and it maintains moderate temperatures on the earth by acting as a thermal storage with global scale. In order to save the energy consumption, it is necessary to develop new technologies for utilization of the underground environments.

The authors have been developing underground facilities for utilization of the so-called cold energies obtained by strong ice or snow of winter season, and have found that these systems are very effective in performance.

The thermal characteristics of the underground storage systems have been analyzed in this paper and are compared with those of some ground storage systems. A simple method has been proposed to predict the thermal performance of different types of thermal storage system. Finally a model, in which accumulation of snow on the ground was taken into account, was introduced to clarify the insulating offects of snow layer upon the total thermal performance of storage system.

1. 緒　言

われわれの生活している地表は地殻の一番外側に位置しており，この地殻は熱的に見ると遮熱性，蓄熱性および恒温性に優れた材料として種々の利用法が考えられ，その開発利用は今後に残された重要な研究課題である。これまで著者らは冬期間の冷熱を雪あるいは氷の形で長期間貯蔵し農産物の長期貯蔵などの冷熱源とする貯雪氷施設を提案し，貯雪氷能力の理論予測および実証実験を行いその有用性を明かとした。また，数千トンから数万トンの雪氷を長期間保存する簡便で大規模な貯雪氷施設を地下に設置することを想定し，それら貯蔵施設の貯雪氷能力の理論的な予測および実証実験を行って来た。[1,2] しかし，地上に施設を設置した場合との熱的な差異，あるいは，地下に設置することを想定した場合の固有の熱解析手法の開発などさらに検討を進めてお

*1 大学院工学研究科（産業機械工学専攻）　*2 北海製缶株式会社

かなければならないいくつかの課題が残されていた。したがって，本研究においては，地上に施設を設置した場合との熱的な差異を検討し，地下に埋設した場合の熱的な優位性について明かとし，地下埋設型貯雪氷施設の複雑で計算時間の多くかかる理論的な熱解析をより簡便な方法によって行うため，3次元の角形施設を2次元の円柱形で近似する方法を導入し，その妥当性と近似の有効な範囲，近似の程度を明かとした。さらに，冬期間の積雪による地面の保温効果をも考慮し地中温度の過渡変化についての検討も行った。

記　号

A ：面積　m^2

A_A ：施設構造物の全表面積　m^2

A_S ：施設構造物の影の面積　m^2

a ：温度伝導率　m^2/h

d_0 ：円柱施設の直径　m

d_w ：側壁面積に関する直径　m

h_{atm} ：大気の熱伝達率　W/m^2K

i_p ：水平直達（全天）日射量　W/m^2

i ：日射量　W/m^2

K ：熱通過率　W/m^2K

L ：施設の代表長さ　m

Lh ：潜熱　W・h/kg

l_0 ：地表面からの距離　m

y_0 ：角柱施設の奥行き　m

z ：鉛直方向距離　m

z_0 ：施設の高さ　m

n ：施設壁面に対する垂直方向距離　m

Q ：全冷凍熱量　W・h

q ：冷凍熱量　W

q_s ：日射による熱量　W

r ：半径方向距離　m

t_0 ：大気温度　K

t_h ：毎日最高気温の月平均の最高月の値　K

t_l ：毎日最低気温の月平均の最低月の値　K

V_0 ：貯蔵庫有効容積　m^3

W_0 ：氷の重量　ton

x ：水平方向距離　m

x_0 ：角柱施設の幅　m

y ：水平方向距離　m

α ：縦横比　-

ϕ ：近似誤差　-

ε ：放射率　-

η ：重量割合（残存率）ton/ton

η_v ：氷の容積割合（雪氷充填率）m^3/m^3

θ ：温度　K

θ_{sol} ：日射温度　K

λ ：熱伝導率　W / mK

ρ_{ice} ：氷の密度　ton/m^3

τ ：時間　h

τ_0 ：通年時間　h

添字

e ：土壌

b ：施設構造物

2. 地下埋設型貯雪氷施設と地上設置型施設との熱的特性の比較検討

2.1 大規模貯雪氷施設および解析モデル

解析の対象とする地下埋設型の貯雪氷施設を図２－１－Ａに，また，地上設置型の貯雪氷施設を同図Ｂに示す。いずれの施設も直径 d_0 [m]，高さが Z_0 [m] の円柱形のものとする。地下埋設型の施設は地表面から l_0 [m] の地下に設置する。なお，地下埋設型の施設は貯蔵施設の熱的特性の限界を明かとするため施設構造物に断熱材を用いず，土を素堀りした構造とする。したがって，本章での解析は実際より安全側に見積っていることとなる。

なお，実際の施設は角形のものが望ましいように思われるが，この点についての検討は第３章において行う。

2.2 基礎方程式

天然氷あるいは雪氷変換機による氷（雪）の貯蔵を考えるための氷の密度 ρ_{ice} [ton/m^2] をパラメータとする。また，貯蔵庫有効容積 V_0 [m^3] に占める氷の容積割合（雪氷充塡率）を η_v [m^3／m^3] とすると初期に貯蔵される氷の重量 W_0 [ton] は次式により計算される。

$$W_0 = \rho_{ice} \cdot \eta_v \cdot V_0 \qquad (2.1)$$

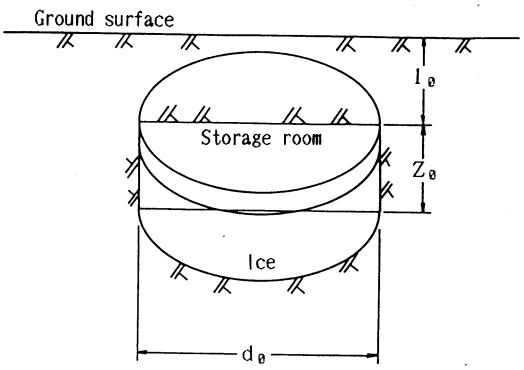

図２－１－Ａ　地下埋設型貯雪氷施設モデル

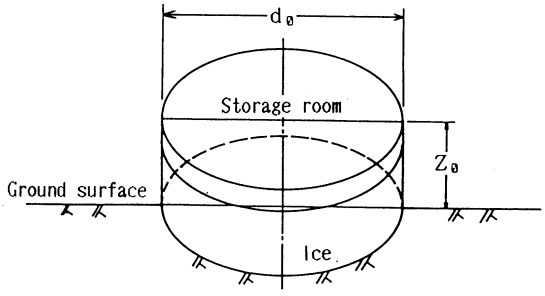

図２－１－Ｂ　地上設置型貯雪氷施設モデル

経時変化を考慮するため非定問題とする。土壌と施設構造物（コンクリート，断熱材）の熱物性値（温度伝導率，熱伝導率）は，それぞれの値を用い，境界関数を利用して，各物質中においては一定物性問題とする。また，熱物性値は，地域による差異あるいは工法，材質による差異が大きいため，ここでは，熱物性値を土壌，構造物ともに代表的な値を用いる。以上の解析方法および伝熱系の設定条件により次の２次元円柱座標系の非定常熱伝導方程式を得る。

$$\frac{1}{a}\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial \theta}{\partial r}\right) + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \qquad (2.2)$$

ここで，r [m]，z [m] はおのおの半径および鉛直方向距離であり，θ [K]，τ [h]，a [m^2/h] は，温

度，時間，温度伝導率（土壌，断熱材，コンクリート）である。なお，施設内の温度は平衡温度を用いることもできるが，その温度は断熱構造，施設の運用にもかかわるため，ここでは安全側に見積り氷の融解温度である0℃とする。このとき，初期条件および境界条件を次のように与える。

地下埋設型に対し

$$\begin{aligned}
&\tau = 0 && : \theta = t_e(Z) \\
&r = 0 && : \partial\theta / \partial r = 0 \\
&z = 0 && : \theta = \theta_{sol,e} \\
&r = r_0, \quad l_0 \leqq z \leqq z_0 && : \theta = 0 \\
&z = l_0,\ l_0 + z_0, \quad \leqq r \leqq r_0 && : \theta = 0
\end{aligned} \tag{2.3}$$

地上設置型に対し

$$\begin{aligned}
&\tau = 0 && : \theta = t_e(Z) \\
&r = 0 && : \partial\theta / \partial r = 0 \\
&z = 0, \quad 0 \leqq r \leqq r_0 && : \theta = 0 \\
&\qquad\qquad r_0 < r && : \theta = \theta_{sol,e} \\
&\text{施設外壁} && : \theta = \theta_{sol,b}
\end{aligned} \tag{2.4}$$

ここで，z は庫内壁内面あるいは地表面からの最短距離を示している。

地表面温度は，太陽からの日射を考慮した日射温度，$\theta_{sol}(t_o(M, D), i_p(M, D))$ を大気温度 t_0 [K] とは別に推定しておく。ここで，i_p [W/m²] は水平面直達日射量であり，M，D，Hは，月，日，時である。日射温度は，太陽からのふく射熱および建物周囲からのふく射熱が屋根に入射した場合，その一部は反射されるが，残りは吸収される。吸収された熱量の一部は二次ふく射として放出されるが，残りは壁面を伝熱で伝わり氷室内に侵入する。このように，太陽および周囲環境殻のふく射による熱取得計算方法はいろいろあるが，ここでは比較的良近似として全天日射量を日射量 i_p とし，地表面の日射温度 $\theta_{sol,e}$ を現在広く用いられ，結果の取扱いも容易な相当温度差法を用いて求め，これを地表面温度とする。ε_e [−]，h_{atm} [W/ m²・K] はおのおの地表面の放射率，大気の熱伝達率を示す。

$$\theta_{sol,e} = t_0 + \varepsilon_e \cdot i_p / h_{atm} \tag{2.5}$$

施設外部からの侵入熱，すなわち，冷凍熱量 q (M, D, H) [W] は次式よりもとめられる。

$$q = \Sigma \lambda_e \cdot \left(\frac{\partial\theta}{\partial n}\right)_{n=0} \cdot \Delta A \cdot 3.6 \tag{2.6}$$

ここで，λ_e [W / mK] は土壌の熱伝導率，n [m] は施設の壁面に対し土壌側に向いた垂直方向を示し，ΔA [m²] は壁面上の制御要素の面積を示す。以上より地下埋設型の全冷凍熱量 Q [W・h]

は次式より算出される。

$$Q = \sum_{M=Ms}^{Me} \sum_{D=1}^{30} \sum_{H=1}^{24} q\,(M, D, H) \tag{2.7}$$

ここで，Ms，Me は貯蔵開始月，終了月を示す。

なお，地上設置型では施設構造物に対しても，太陽からの日射を考慮した日射温度，$\theta_{sol,b}$ を推定しておく。ここで，施設が日射を受ける部分を施設の影の面積で近似し，施設の全表面積でその日射を受けたと仮定したときの日射量 i_b [W / m²] を次式より求める。

$$i_b = q_s / A_A \tag{2.8}$$

また，

$$q_s = A_s \cdot i_p \tag{2.9}$$

ここで，q_s[W] は日射を受けた部分の熱量，A_s [m²] は月，日，時間による太陽高度による変化を考慮した施設構造物の影の面積，A_A [m²] は施設構造物の全表面積を示す。よって，相当温度法により施設構造物の表面温度は次式より求められる。

$$\theta_{sol,b} = t_0 + \varepsilon_b \cdot i_b / h_{atm} \tag{2.10}$$

ここで，ε_b [−] は施設構造物表面の放射率を示す。したがって，この施設の冷凍熱量 q_b (M, D, H) [W] は次式よりもとめられる。

$$q_b = K \cdot (\theta_{sol,b} - \theta) \cdot A_A \tag{2.11}$$

ここで，K [W／m²K] は施設の熱通過率を示す。施設の地面と接する面での冷凍負荷 q を式(2.6)により計算するものとすると，地上設置型の全冷凍熱量 Q [W] は次式より算出される。

$$Q = \sum_{M=Ms}^{Me} \sum_{D=1}^{30} \sum_{H=1}^{24} (q + q_b) \tag{2.12}$$

また，雪氷の持つ冷熱のうち潜熱 Lh [W・h/kg] のみを冷凍熱量に用いるとし，初期に貯蔵した雪氷 W_0 の残存する重量割合（残存率）η [ton／ton] を次式により定義する。

$$\eta = (W_0 - Q / Lh \cdot 10^{-3}) / W_0 \tag{2.13}$$

2.3 数値解析

微分方程式（2.2）を図２－２に示す差分格子を用いて差分近似する。変物性を考慮して時間差分，格子差分を十分小さく取り，また，演習時間の短縮を図るため，陽差分形式を用い時間に対して連続的な微分方程式(2.2)式の代わりに，時間を有限の $\Delta\tau$ の間隔に分解した次の差分方程式を得ることができる。

$$\frac{1}{a}\frac{\Delta\theta}{\Delta\tau} = \frac{1}{r}\frac{\Delta}{\Delta r}\left(r\frac{\Delta\theta}{\Delta r}\right) + \frac{\Delta^2\theta}{\Delta z^2} \tag{2.14}$$

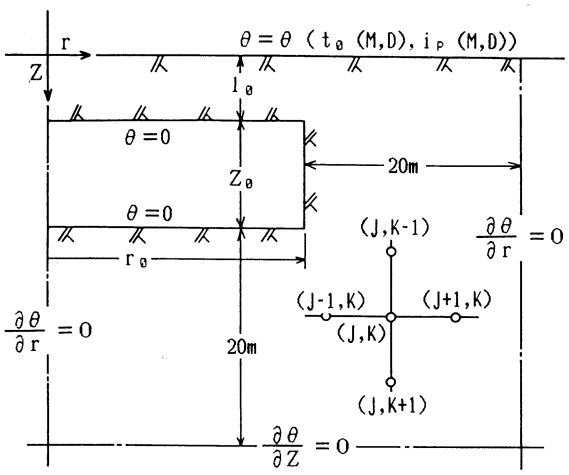

図2－2－A　地下埋設型貯雪氷施設解析モデル座標系

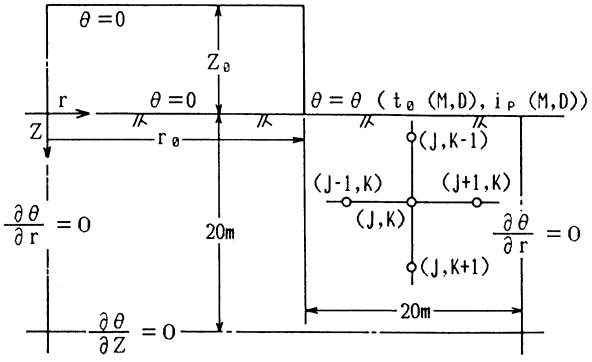

図2－2－B　地上設地型貯雪氷施設解析モデル座標系

したがって，$\Delta\tau$だけ経過した後の任意の点の温度をθ'とし，従属変数$\theta_{j,k}$について整理すると，

$$\theta'_{j.k}=(1-\sum_{i=1}^{4}A_i)\,\theta_{i.k}+A_1\theta_{j+1.k}+A_2\theta_{j-1,k}+A_3\theta_{j.k+1}+A_4\theta_{j.k-1} \tag{2.15}$$

となる。この方程式は，全ての要素j，kに対して成立するため境界以外の全制御要素数と同数導かれる。したがって，これらを一つの連立方程式とみなし，境界条件と初期条件を与えて解くと各時間での温度分布が導かれる。

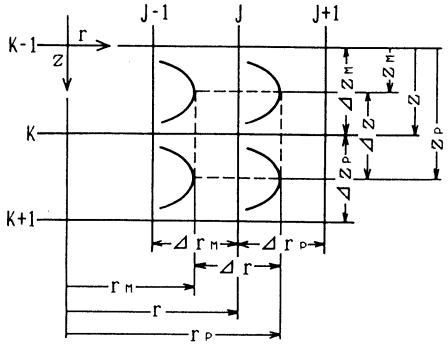

図2－3　制御要素

ただし，

$$A_1=\frac{a\,\Delta\tau}{\Delta r^2}\,\frac{r_p}{r}$$

$$A_2=\frac{a\,\Delta\tau}{\Delta r^2}\,\frac{r_M}{r} \qquad (2.16)$$

$$A_3=\frac{a\,\Delta\tau}{\Delta z^2}$$

$$A_4=A_3$$

なお，初期条件である地中温度 t_e [K]は経時変化を考慮し，施設運用開始時の温度分布として次式により与える。[3)]

$$t_e=\frac{t_h+t_l}{2}+\frac{t_h-t_l}{2}\exp\left(\frac{z}{\sqrt{a}}\sqrt{\frac{\pi}{\tau_0}}\right)\cos\left(\frac{2\pi\tau}{\tau_0}-\frac{z}{\sqrt{a}}\sqrt{\frac{\pi}{\tau}}\right)+0.03z \qquad (2.17)$$

ここで，t_h [K] は毎日最高気温の月平均の最高月の値，t_l[K] は毎日最低気温の月平均の最低月の値，τ_0[h] は通年時間，τ [h] は経過時間，z [m] は地表面下の深さ，a [m^2/h] は土壌の温度伝導率を示している。

2.4 解析結果

計算に用いた主な条件，値を表１に示す。

表１ 計算条件[3,4)]

［気象条件］		
大気温度、日射量（札幌）は図２－４に併記。		
大気の熱伝達率：		$h_{atm}=23.26$ W／m^2K
［土壌］	温度伝達率：	$a_e=0.0015$ m^2／h
	熱伝導率：	$\lambda_e=0.62802$ W／mK
	表面の放射率：	$\varepsilon_e=0.8$
［貯蔵施設］		
高さ	：	$z_0=5$ m
直径	：	$d_0=50$ m （2章）
代表長さ	：	L＝10m,20m,30m,50m（3章）
埋設深さ	：	$l_0=2$ m （地下埋設型）
氷の充塡率	：	$\eta_v=0.8$
［氷の密度］		$\rho_{ice}=0.8$ ton／m^3
［氷の初期貯蔵量］		w＝6280 ton

地下埋設型貯雪氷施設と地上設置型貯雪氷施設を比較した場合，地下埋設型のほうが地上設置型よりも簡単な構造でかなり良い性能を得られる。

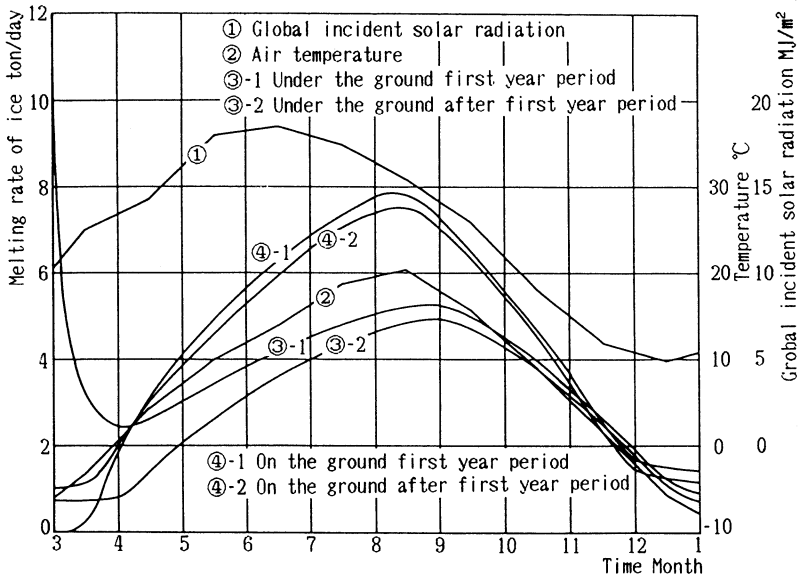

図２－４　大気温度，日射量および雪氷融解量

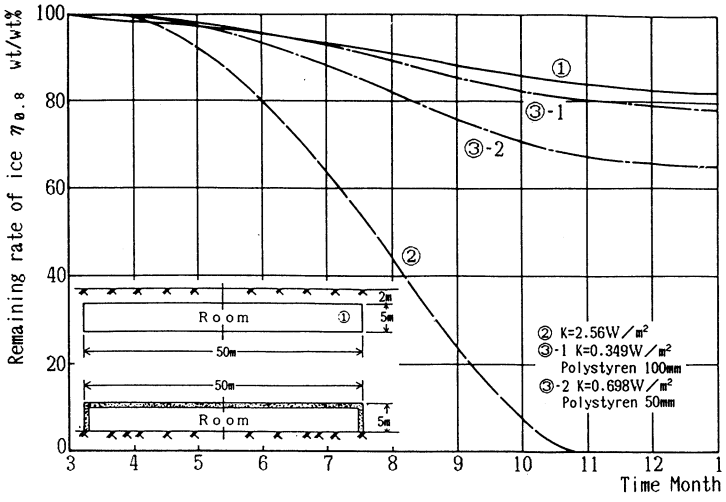

図２－５　地下，地上施設の残存率比較

図２－４における１日当りの融解量は、地下埋設型も地上設置型も初年度（施設運用開始年度）はどちらも地中温度が安定していないため高い値を示しているが，次年度以降からは地中温度も安定し低い値となっている。しかし，地上設置型は施設構造物に直接大気温度，日射の影響を受

けて地下埋設型よりも融解量が多く，11月中旬から３月中旬までの外気の影響を受けて地下埋設型よりも少なくなっている。

雪氷の残存率についてみてみると，地下埋設型は地面に穴をあけた素堀の状態で12月末日で82％の雪氷を残している。一方，地上設置型はコンクリート200mmの壁だけでは全ての雪氷が10月末に融けてしまう。そのため，断熱材としてスタイロホーム断熱を50mm施すと，12月末で65％，100mmで78％の雪氷が残る。よって，地上設置の場合には十分な断熱を施さなければ地下埋設の

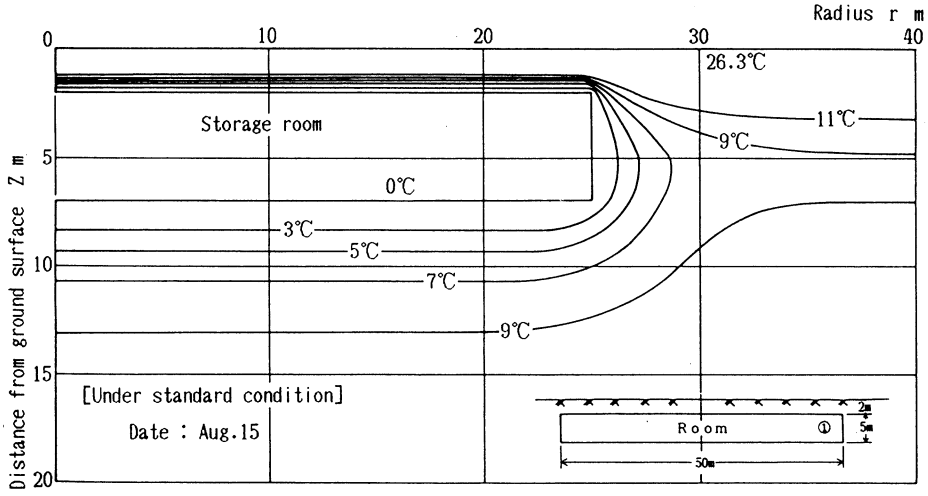

図２－６－A　地下施設の１年目８月15日の地中温度分布

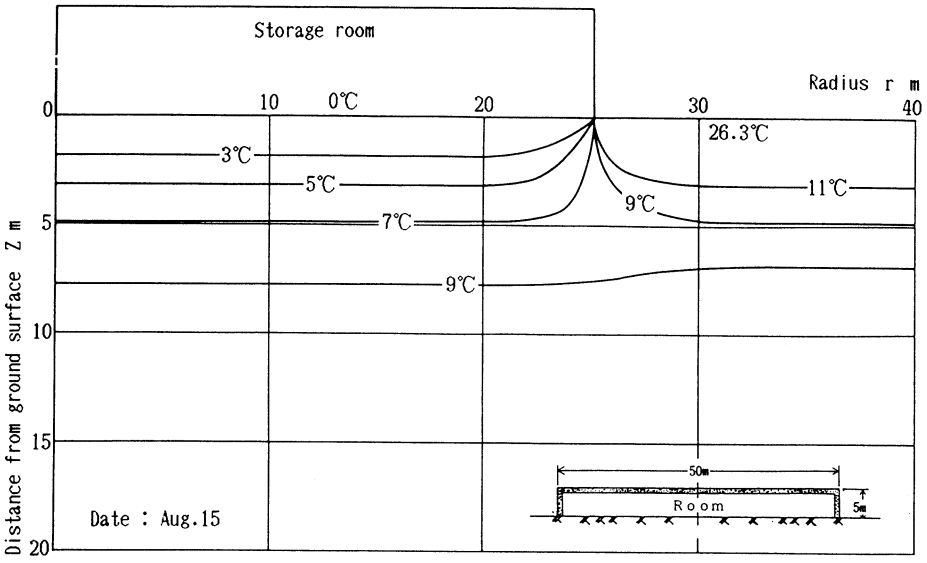

図２－６－B　地上施設の１年目８月15日の地中温度分布

場合と同等の性能を得ることはできない。

地中温度の初年度は，地下埋設型と地上設置型のいずれも貯雪氷施設から10m程度離れた地点での地中温度は貯雪氷施設の熱影響をあまり受けていないが，3年後の地中温度はどちらの場合も冷熱の影響を受けて各等温線が初年度よりも施設の外側に移動している。しかし，地上設置型の方は地表面より受ける日射温度が徐々に施設下部に影響を与えつつある。

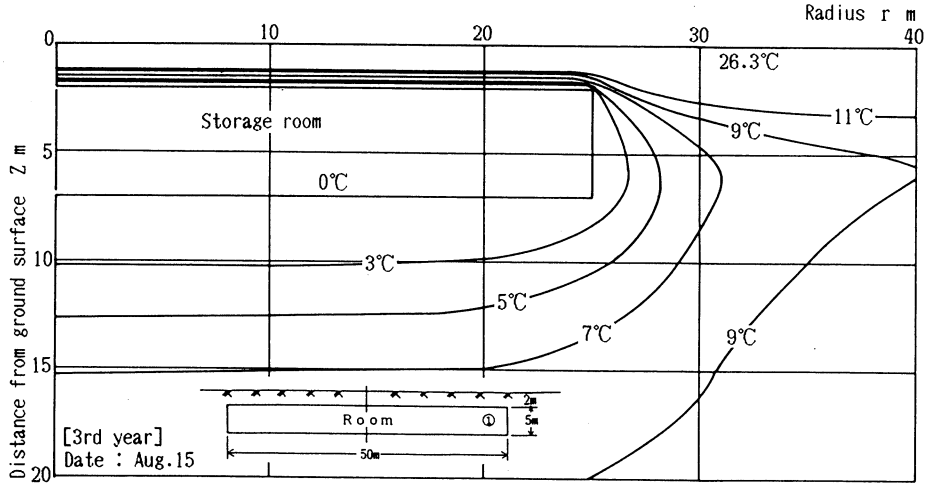

図2－7－A　地下施設の3年目8月15日の地中温度分布

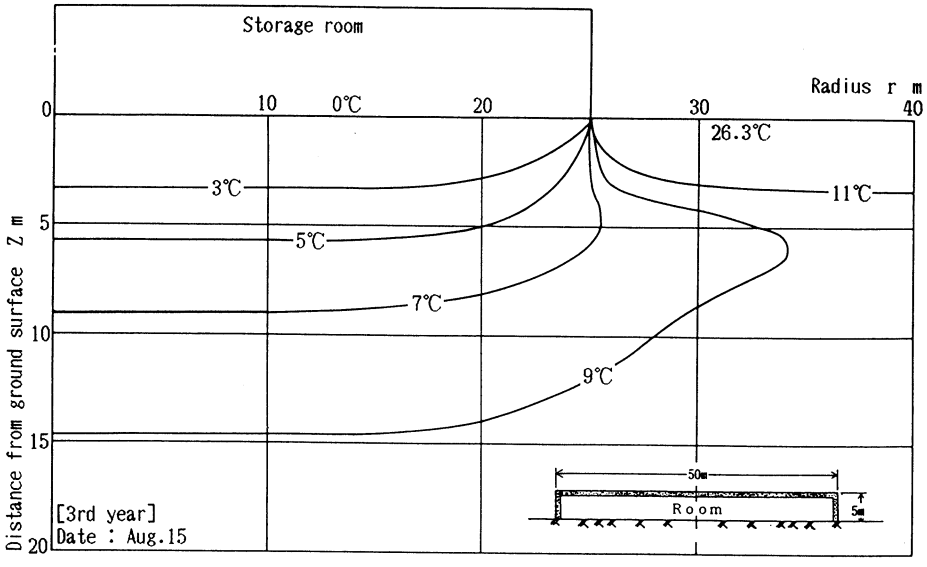

図2－7－B　地上施設の3年目の8月15日の地中温度分布

以上より，地下埋設型は断熱施工をしなくても十分な貯雪氷能力を得られるが，地上設置型は十分な断熱施工をしなければ地下埋設型と同じくらいの貯雪氷能力を得ることはできなく，コスト的にも地下埋設型のほうが有利であることが確認できた。

3. 地下埋設型大規模貯雪氷施設の熱解析の方法に関する検討

3.1 大規模貯雪氷施設の解析モデル

前章において解析の対象とした貯雪氷施設は図２－１に示したように円柱形のもとであった。なお，実際の施設は施工上角柱形のものが望ましいように思われるが，数値解析を行う観点に立つと，２次元で立体を表すことのできる円柱座標系を用いた数値計算は直交座標系を用いた数値計算に比較すると使用する記憶領域および計算時間の著しい減少化が可能となる優れた性質を有している。したがって，もし，角柱形の解析モデルを円柱形のモデルで置き換え近似できるならば工学的に多くの利得を得ることができる。本章においては地下埋設型の貯雪氷施設に関するこのような座標系間の近似についての検討を行う。

円柱形の施設と熱的な差異を検討する角柱形の施設を図３－１に示す。同施設は幅が X_0 [m]，奥行 Y_0 [m]，高さがZ_0 [m] の角柱で，地表から l_0 [m] の地下に埋設してある。ここで，底面の縦横比を α [－] とし，次式により定義する。

$$\alpha = Y_0 / X_0$$

比較のため，この角形の貯蔵施設を上下壁（天井および床）の面積が等しく，また，施設の高さ，側壁の面積および体積の等しい円柱形状を有する施設で近似する。すなわち，体積および上下壁の面積からみると体積および上下壁の面積が等しいことから，体積および上下壁の面積に関する直径 d_0 [m] は次式より求められる。

$$d_0^2/4\pi \times Z_0 = X_0 \times Y_0 \times Z_0 \quad (3.2)$$

以後，記述の簡便さから，このd_0 [m] を対象とする施設の代表長さ L [m] とする。また，側壁の面積は等しいことから側壁の面積に関する直径 d_w [m] は次式より求められる。

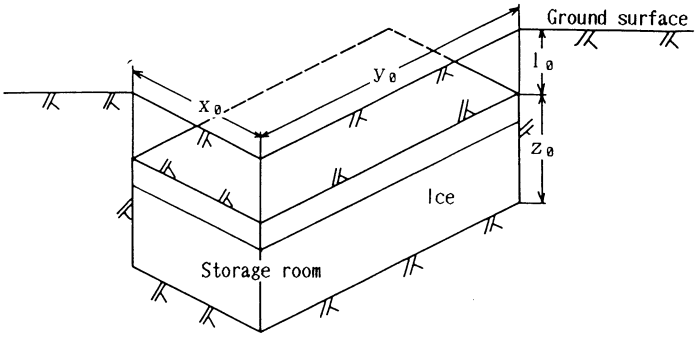

図３－１　大規模貯雪氷施設モデル

$$\pi \times d_w = 2 Z_0 (X_0 + Y_0) \quad (3.3)$$

なお，解析例においては，施設の高さ Z_0 [m] を一定とし，施設の大きさを代表寸法 L (＝ d_0) [m] で与え，角形での縦横比 α をパラメータとする。

3.2 基礎方程式

第2章での伝熱系の設定条件をここでも踏襲すると，次の直交座標系の非定常熱伝導方程式を得る。

$$\frac{1}{a}\frac{\partial\theta}{\partial\tau}=\frac{\partial^2\theta}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\theta}{\partial y^2}+\frac{\partial^2\theta}{\partial z^2} \tag{3.4}$$

ここで，x [m]，y [m]，z [m] はおのおの水平 x，y 方向および鉛直方向 z の距離である。また，θ [K]，τ [h]，a[m^2 / h] は温度，時間，温度伝導率である。

初期条件，境界条件を次とする。

$$\begin{aligned}
&\tau=0 && :\theta=t_e(Z)\\
&x=0 && :\partial\theta/\partial x=0\\
&y=0 && :\partial\theta/\partial y=0\\
&z=0 && :\theta=\theta_{sol}\\
&z=z_0+l_{inf} && :\partial\theta/\partial Z=0\\
&x=x_0/2 && :\theta=0\\
&y=y_0/2 && :\theta=0\\
&z=l_0,\ l_0+z_0 \quad 0\leqq x\leqq x_0/2 && \\
&\qquad\qquad 0\leqq y\leqq y_0/2 && :\theta=0
\end{aligned} \tag{3.5}$$

ここで，l_{inf} は施設の熱的な影響をほとんど受けない十分な長さを示す距離である。なお，円柱に置き換えた場合の2次元円柱座標系の非定常熱伝導方程式は第2章の式(2.2)～(2.3)で表される。ただし，式(2.3)の施設の半径 r_o の値については後述する。

また，冷凍負荷，すなわち，貯蔵雪氷の自然融解量の算出などは第2章におけると同様である。

3.3 数値解析

微分方程式(3.4)を図3－2に示す差分格子を用いて陽差分近似を施すと次式を得る。

$$\frac{1}{a}\frac{\Delta\theta}{\Delta\tau}=\frac{\Delta^2\theta}{\Delta x^2}+\frac{\Delta^2\theta}{\Delta y^2}+\frac{\Delta^2\theta}{\Delta z^2} \tag{3.6}$$

よって$\Delta\tau$だけ経過した後の任意の断面の温度をθ'とし，この差分方程式を従属変数θ_{ijk}について整理すると，

$$\theta'=C_0+C_1\theta_{i+1}+C_2\theta_{i-1}+C_3\theta_{j+1}+C_4\theta_{j-1}+C_5\theta_{k+1}+C_6\theta_{k-1} \tag{3.7}$$

となる。この方程式は全ての要素 i，j，k に対して成立するため，境界以外の全制御要素数と同数導かれる。したがって，これらを一つの連立方程式とみなし，境界条件と初期条件を与えて解くと各時間での温度分布が導かれる。

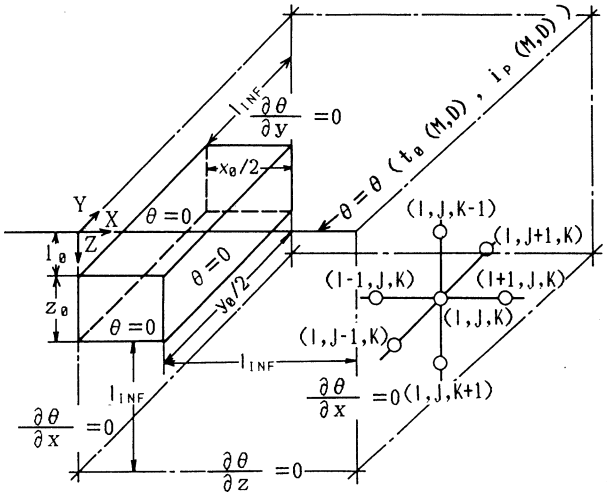

図3－2　大規模貯雪氷施設解析モデル

ただし，

$$C_0 = 1 - 2\left(\frac{a\Delta\tau}{\Delta x^2} + \frac{a\Delta\tau}{\Delta y^2} + \frac{a\Delta\tau}{\Delta z^2}\right)$$

$$C_1 = \frac{a\Delta\tau}{\Delta x^2}$$

$$C_3 = \frac{a\Delta\tau}{\Delta y^2} \qquad (3.8)$$

$$C_5 = \frac{a\Delta\tau}{\Delta z^2}$$

また，円柱に置き換えたときの2次元円柱座標系の熱伝導方程式の差分式は，第2章式(2.14)～(2.16)と同様である。また，初期条件の与え方についても第2章におけると同様である。

円柱座標系を用い，角形断面を有する貯蔵庫の熱解析を行うにあたり，貯蔵庫内側壁の水平方向の温度は，初期，境界条件が同一であれば，貯蔵庫中心からの距離により決まる。また，床の温度分布も同様である。したがって，熱伝導距離を重視し，式(2.3)での r_0 および半径方向の座標に関与する諸量を決める。直交座標系の水平方向の中心からの距離の平均値は，図3－3における関係を利用して次の積分により与えられる。

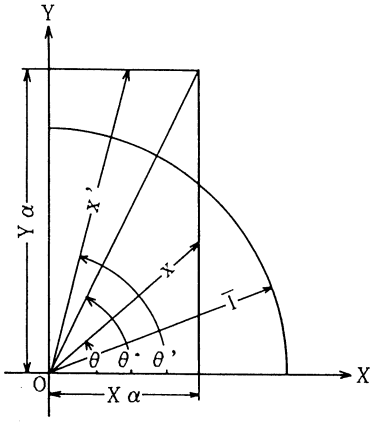

図3－3　直交座標と円柱座標の関係

$$\overline{1} = \frac{\int_0^{\theta^*} x\,d\theta + \int_{\theta^*}^{\frac{\pi}{2}} x'\,d\theta'}{d\theta}$$

$$= \frac{\int_0^{\tan^{-1}\alpha} \frac{x_\alpha}{\cos\theta}\,d\theta + \int_{\tan^{-1}\alpha}^{\frac{\pi}{2}} \frac{\alpha x_\alpha}{\cos(\pi/2-\theta')}\,d\theta'}{\frac{\pi}{2}}$$

$$= \frac{2}{\pi}\left\{\log\left[\tan\left(\frac{\pi}{4}+\frac{1}{2}\tan^{-1}\alpha\right)\right] + \alpha\log\left[\tan\left(\frac{2}{\pi}-\frac{1}{2}\tan^{-1}\alpha\right)\right]\right\} x_\alpha \tag{3.9}$$

この$\overline{1}$を(3.4)式でのr_0とし，また，制御要素の半径方向微小距離にも同様の補正を施す。なお，伝熱面積は直交座標系での値，すなわち，実面積を採る。

以上の方法による，直交座標系に対する円柱座標系の近似度を，12月末日における雪氷の残存率η [−]を用いた次式の近似誤差ϕにより表す。

$$\phi = (\eta_{KAC} - \eta_{EN}) / \eta_{KAC} \tag{3.10}$$

ここで，η_{KAC}は角形での残存率，η_{EN}は円柱系に近似した場合の残存率を示す。

3.4 解析結果

計算に用いたおもな条件，値を表1に示す。

それぞれの代表長さLにおけるαの変化にともなう角柱と円柱の近似誤差を図3－4に示す。代表長さL＝10mの場合では，αが大きくなるにつれて誤差が急激に，大きくなるが，代表長さLが大きくなるにつれてαにともなう誤差が小さくなっていくのがわかる。小規模施設では，αが大きくなるとかなり細長い施設となり中心からXZ平面までの伝熱距離が極端に短くなり，YZ平面の伝熱面積が大きくなるためにYZ平面からの侵入熱の量がXZ平面からのものよりかなり多くなるためYZ平面が支配的となり氷の消費率が多くなる。この角柱を円柱に置き換えたとき伝熱距離がXZ，YZ方向の平均の伝熱距離となるため，平均円柱の近似誤差が大きくなる。しかし，大規模になるにつれて小規模なものほど極端に細長くはならないため，近似度がよくなる。α＝1，4，8における代表長さLにともなう近似度を図3－5に示した。代表長さLが15m以上のものに対しては，3％以下の誤差を示している。このことから，大規模なものに対して角柱を円柱で近似する本章での計算方法は有効な解析方法と言える。

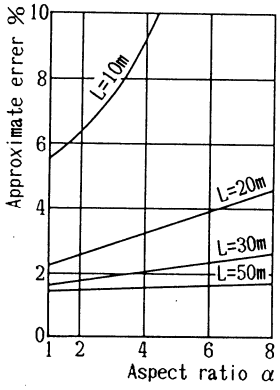

図3－4　縦横比αによる近似誤差

角柱，円柱の代表長さL＝10mのときのα＝1，4の場合の地中温度を図3－6に示す。同図

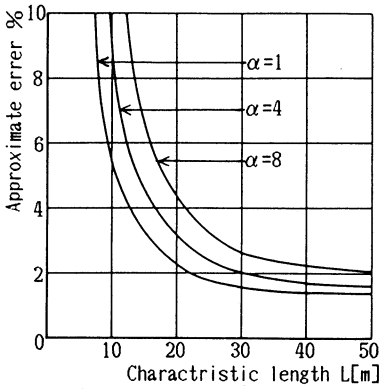

図3－5　代表長さLによる近似誤差

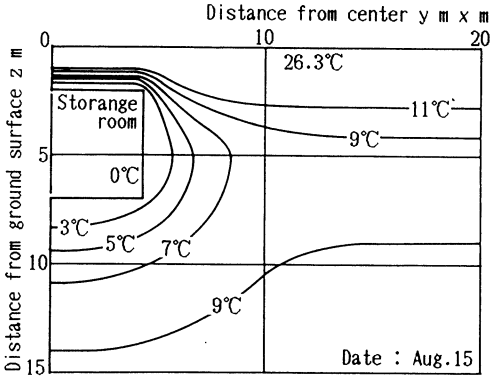

図3－6－A　角柱施設（L＝10m，α＝1）のXZ，YZ断面の地中温度分布

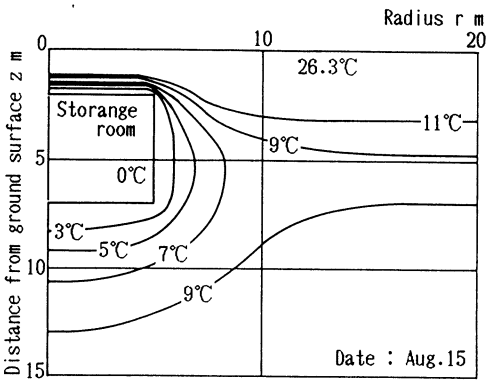

図3－6－B　円柱施設（L＝10m，α＝1）の地中温度分布

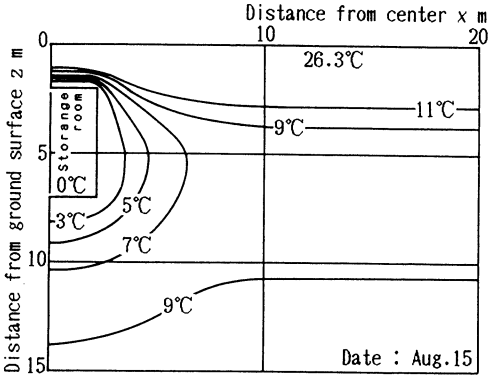

図3－7－A　角柱施設（L＝10m，α＝4）のXZ断面の地中温度分布

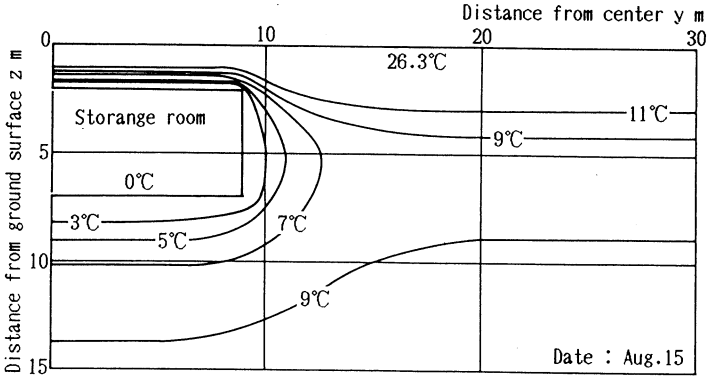

図3－7－B　角柱施設（L＝10m，α＝4）のYZ断面の地中温度分布

Aは，$\alpha=1$のときの角柱のＸＺ，ＹＺ断面で，同図Ｂは，$\alpha=1$のときの円柱の断面を示している。これを比べると角柱の各等温線よりも側壁からわずかに外側に位置している。また図３－７－Ａ，Ｂは，それぞれ角柱のＸＺ，ＹＺ断面で，同図Ｃは円柱の断面を示している。これにより，伝熱距離の短いｘｚ断面での各等温線は，円柱断面の各等温線よりも側壁側が外側に位置しているが，ＹＺ断面とではほとんど変化はない。これは，円柱よりも角柱のＸＺ方向からの侵入が多いことを表している。

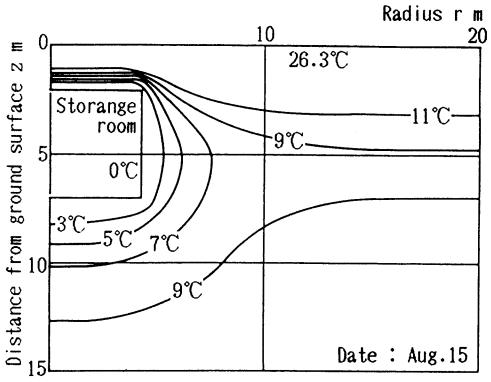

図３－７－Ｃ　円柱施設（Ｌ＝10m，$\alpha=4$）の地中温度分布

これらの結果から角形を円柱形に置き換えて解析を行う際，大規模なものに対してはかなり有効ではあるが，小規模のものにはあまり適してはいないと考えられる。

また，演習時間は角柱の場合と比較すると1／30までに短縮することができ，角柱モデルでは３次元解析のため計算機のメモリーが10ＭＢ以上になるのに対し円柱モデルでは４ＭＢ程度の少量で済むことも明かとなった。

4.　地中温度の理論的解析（雪の保温効果を考慮した）

4.1　解析モデルおよび基礎方程式

前章までの解析では，大気温度とは別に太陽および周囲環境のふく射による熱の取得の計算方法として，水平面直達日射量の比較的よい近似として全天日射量を用いた相当温度差法を用いて求めたものを地表面温度としていた。しかし，地域によっては積雪期間では雪による地表面の保温効果も無視できない程度にあることが数年来継続し測定を行ってきた地中温度の結果より明かとなってきた。したがって，本章では12月～翌年３月までを積雪期間と見なし，非常に広い地表面が冬期間積雪により覆われており，また，その厚さが十分あり地表面では外気温の周期的な影響を受けず０℃に保たれている伝熱モデルを想定し解析を行う。このモデルを記述する経時変化を考慮した地表面に垂直下向きの非定常１次元熱伝導方程式は次のように表すことができる。

$$\frac{1}{a}\frac{\partial\theta}{\partial\tau}=\frac{\partial^2\theta}{\partial z^2} \qquad (4.1)$$

ここで，z [m] は鉛直方向距離である。また，θ [K]，τ [h]，a [m^2 / h] は温度，時間，温度伝導率である。初期条件，境界条件を次とする。

$\tau=0$　　：$\theta=t_e(Z)$

$$z = 0 \quad : \text{without snow coverd} \quad : \theta = \theta_{SOL.e} \qquad (4.2)$$
$$: \text{with snow covered} \quad : \theta = 0$$

積雪のない期間の地表面温度は，太陽からの日射を考慮した日射温度θ_{sol}は前述の式(2.5)により表される。

4.2 数値解析

微分方程式(4.1)を図4－1で示す差分格子を用いて次のように陽差分近似する。

$$\frac{1}{a}\frac{\Delta\theta}{\Delta\tau} = \frac{\Delta^2\theta}{\Delta z^2} \qquad (4.3)$$

よって$\Delta\tau$だけ経過した後の任意の断面の温度をθ'とし，従属変数θ_Kについて整理すると，

$$\theta_K' = \frac{(A_1 - A_2 - A_3)\theta_K + A_2\theta_{K+1} + A_3\theta_{K-1}}{A_1} \qquad (4.4)$$

この方程式は全ての要素kに対して成立するため，境界以外の全制御要素数と同数導かれる。したがって，これらを一つの連立方程式とみなし，境界条件と初期条件を与えて解くと各時間での温度分布を導くことが出来る。

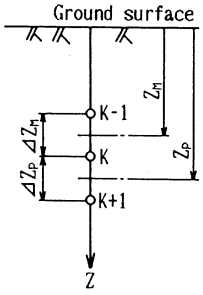

図4－1 解析モデルの座標系

ただし，

$$A_1 = \frac{1}{a\Delta\tau}$$
$$A_2 = \frac{1}{Z_P - Z_M}\frac{1}{\Delta Z_P} = \frac{1}{\Delta Z^2} \qquad (4.5)$$
$$A_3 = \frac{1}{Z_P - Z_M}\frac{1}{\Delta Z_P} = \frac{1}{\Delta Z^2}$$

初期条件の地中温度t_eは式(2.19)により与える。

4.3 解析結果

計算に用いたおもな条件，値を表1に示す。

12月から2月中旬または3月中旬までは，これまでの日射温度の代わりに雪と地表面の界面を0℃として計算を行った。

図4－2－Aは従来どうりに冬期間も日射温度を使った場合で，図4－2－Bは冬期間だけ日射温度の代わりに雪と地表面の界面を0℃とした場合の3年間の温度変化である。

地表面から50cmの地点での地中温度変化は，12月から4月までは雪による保温効果が見られるが，5月から11月にかけてはさほど変化がない。図4－3は地表面から100cmの地点のものであるが，雪の保温効果が徐々に現れてきている。また，保温効果を考慮した場合としなかった場合および初期条件での周期関数での温度変化の2年目について比較したものであるが，保温効果を

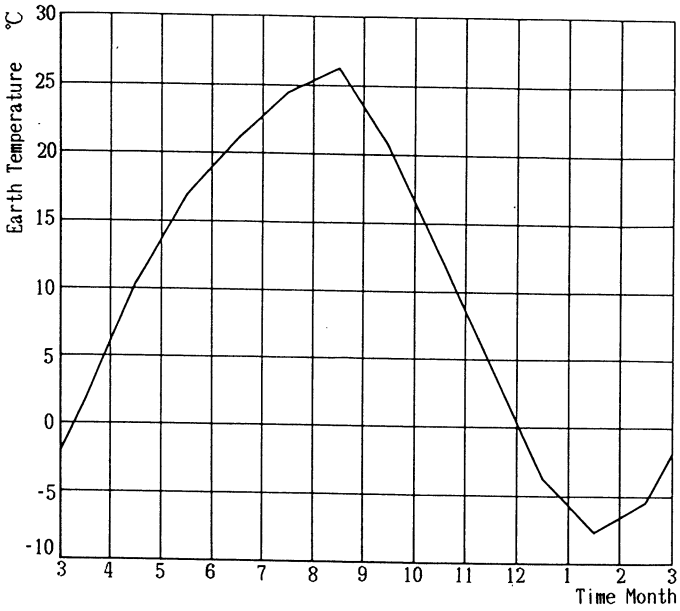

図4－2－A　地表面温度 (Without snow cover model)

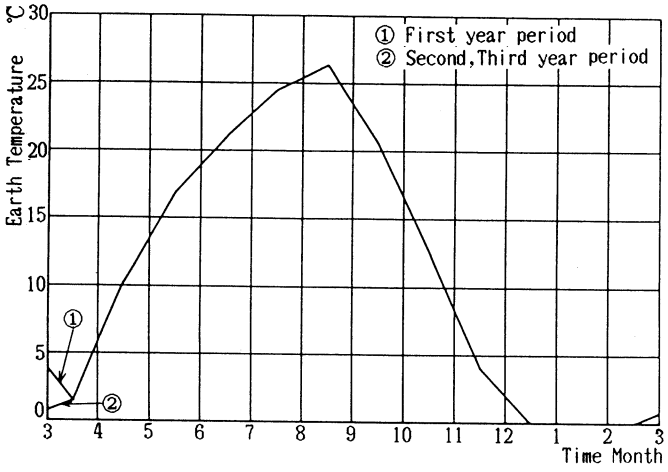

図4－2－B　地表面温度 (With snow cover model)

考慮したものは冬期間は他のものに比べて4℃ぐらい高くなっている。地表面より500cmの地点になると土壌の勢伝導の時間遅れにより地中温度の周期性が現れてきているが，保温効果はよりはっきりしてくる。

このように，積雪は空気の割合が多いため極めて熱伝導の悪い物質である。そのため冬の気温が低いときでも，積雪深さが50cmを越えると外気温度の影響が積雪面下まで及ばず，界面は常に

地温によって加熱されている。したがって，積雪による保温効果によって地中温度が極端に下がらないことが明かとされる。[6)]

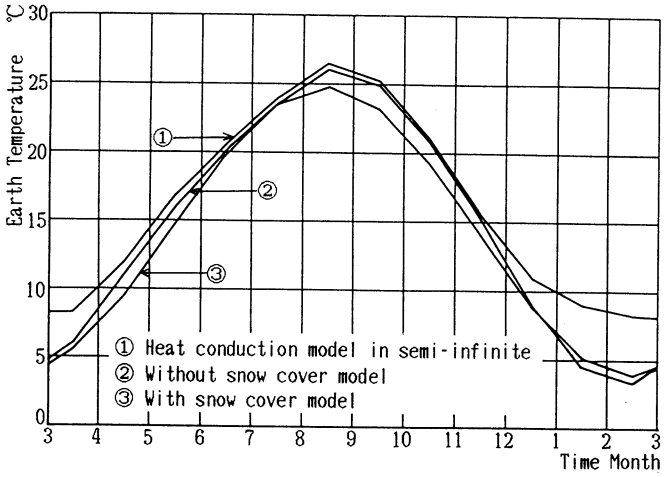

図4－3　地中深さ1mでの地中温度の比較

5. 結　言

本研究では冬期間の冷熱を雪あるいは氷の形で長期間，大規模に貯蔵する地下埋設型施設の熱解析を行った。

(1) 地下埋設型大規模貯雪氷施設については，特別な断熱構造を用いずに，安全側に見積り解析を行ったにもかかわらず，十分な断熱構造を持つ地上設置型のものと比較すると雪氷が12月末日で5％以上も多く融解せずに残り，通年保存するために十分利用可能であることが明かとなり，地下の優れた断熱性を確認することができた。

(2) 大規模貯雪氷施設の熱解析における演算時間の短縮を目的とした，角柱モデルを円柱モデルに置き換え近似し解析する方法は，大規模な施設あるいは小規模の縦横比の小さなものに対しては誤差も少なく，よい解析方法であることが明かとなり，貯雪氷施設の熱設計に十分利用に値するものである。

(3) 積雪による地面の保温効果は，これまでの地中温度の解析方法では実際の地中温度よりも低い値であったが，冬期間の積雪による地面の保温効果を考慮した場合の解析方法でかなり実際の地中温度に近い値を得た。

冬期間の雪氷など冷熱を長期間，大規模に貯蔵する施設を地下に埋設することを想定し，熱設計の実際において重要な問題の検討を行い，あらためて本施設の有用性などを示した。本研究結果が積雪寒冷地での生活の向上に役立つものであれば幸いである。

なお，本研究は「氷室計画」の一環として行われたものであり，産学官の多くの方々のご支援，ご教示を賜った。付記し謝意を表す次第である。

参考文献

1）媚山・ほか4名：機論(B)，55-517（1989-9），2886.
2）媚山・ほか4名：機論(B)，55-518（1989-10），3178.
3）西川兼康，藤田添伸：理工学社，伝熱学（昭和60-12），66.
4）日本機械学会：伝熱工学資料，（昭和43-10），31，258，259.
5）日本気象協会北海道支部：北海道の気候，（昭和58-7），24，36.
6）木下誠一：技報堂出版，雪と氷のはなし，（昭和63-1），96.