

冬期冷熱の長期・大規模貯蔵施設の開発*

(第1報, 貯雪氷能力の理論予測)

媚山 政良*¹, 福島 清太郎*², 小山 敏弘*³
村上 忠幸*⁴, 佐藤 雄一*⁴,

Long-Term and Large-Scale Storage of Natural Cold Thermal Energy in the Winter Season (1st Report, Theoretical Investigation)

Masayoshi KOBİYAMA, Seitaroh FUKUSHIMA, Toshihiro KOYAMA
Tadayuki MURAKAMI, and Yuichi SATOH

It is very important to utilize the local energy, such as natural cold energy in the winter season. In this paper, the authors suggest the house for large-scale and long-term storage of natural cold energy, such as natural ice or snow, in order to use it as a cold thermal energy source in the summer season. This storage house is buried in the ground and is simply construction. By theoretical thermal investigation, it is shown that about 80% of the stored ice in this house remains, even after one year, without melting by circumferential thermal condition and the density of ice or snow must be higher to use this storage house effectively.

Key Words: Storage House, Cold Thermal Energy, Large-scale, Long-term Storage, Theoretical Investigation

1. 緒 言

地域固有のエネルギーを積極的に、そして、有効に利用することはゆとりのある成熟した地域社会を創るうえで重要である。

著者らはすでに冬期間の冷熱を雪氷の形で貯蔵し、それを夏期にかけて農産物の氷温貯蔵の冷熱源とし利用する、いわゆる、氷室形農産物保冷库の開発研究を終え⁽¹⁾北海道内あるいは東北地方など雪国各所においてその建設が始まった。このような冬期間の冷熱を貯蔵し、夏期など冷熱を必要とするときにそれを利用するシステム開発および付帯する関連技術の開発の全体を著者らは「氷室計画」と呼んでいる。同計画の一環として、雪国の多くの地方から強く要求が出されている、さらに簡便で、経済効果の高い冬期間の冷熱エネルギーの貯蔵施設の研究開発を本研究において試みる。

雪氷はその有する冷熱量に対し体積は大きく、また、

環境温度によっては融解するなど、エネルギー資源として他の石炭あるいは石油系燃料に比較し貯蔵に不向きである。この対策としては、貯蔵する雪氷の密度を上げ冷熱量に対する容積を小さくし、また、貯蔵規模を大きくすることにより、貯蔵熱量に比例する体積に対し貯蔵時の侵入熱に比例する表面積を相対的に少なくする、いわゆる、寸法効果を利用し貯雪氷施設を建設することが考えられる。このような方策を用い、熱的により合理的な雪氷の長期貯蔵庫を開発するには、貯蔵雪氷の密度および施設の寸法が雪氷の長期貯蔵に与える影響をあらかじめ定量しておく必要がある、まず、本報においては、上記諸量を理論的に明らかとする。

また、この結果をもとに、都市部において夏期などに冷熱利用者へ雪氷を供給する冷熱貯蔵・供給センタ(アイスセンタ)を設置することを想定し、地下埋設形あるいは半地下埋設形とした数千tから数万tの雪氷を貯蔵する大規模な貯蔵施設を提案する。

なお、冬期間の冷熱を圧雪の形で貯蔵し、それを夏期にかけて利用する技術は、古くからの「氷室」にその例を見いだすことができるが、ここで提案する施設は、古くにはできなかった大規模な土木工事が現在では可能であり、また、断熱性に優れた安価な材料の入手、

* 昭和62年11月11日 第25回シンポジウムにおいて講演、原稿受付 昭和63年9月28日。

¹ 正員、室蘭工業大学工学部 (〒050 室蘭市水元町 27-1)。

² 室蘭工業大学工学部。

³ 日綱工管(株) (〒050 室蘭市茶津町 2-1)。

⁴ 学生員、室蘭工業大学大学院。

開発が可能となったことにより初めて実現できるものである。

2. 貯雪氷施設の熱解析

2.1 氷室形大規模貯雪氷施設および解析モデル

ここで、理論的な解析を行うにあたり次のような解析モデルおよび解析条件を設定する。

(1) 天然氷あるいは著者らの開発した雪氷変換機⁽²⁾による氷(雪)の貯蔵を考えるため雪氷の密度 $\rho_{ice}[t/m^3]$ をパラメータとする。なお、密度の違いにより雪と氷を一般には区別しているが、本研究においては密度もパラメータとして取扱うため名称上両者を区別せず雪氷と呼ぶ。

(2) 貯雪氷施設は都市部において利用することを想定し、地下埋設形とする。なお、施設の地上部には、家屋を建てることも可能ではあるが、駐車所、緑地帯あるいは公園、スポーツ施設とすることが望ましい。本報で熱的な解析の対象とする貯雪氷施設を図1に示す。直径が $d_0[m]$ 、高さが $z_0[m]$ の円筒形のものとし、地表面から $l_0[m]$ の地下に埋設する。なお、実用的には角形の施設が望ましいように思われるが、本報のモデルを表面積および中心から施設外縁までの平均水平距離が等しい正角形に置き換えると、本研究の範囲では、熱伝達量は円筒形のほうが約1/15多いものの大差はなく、経時変化も同様の変化を示し、角形の場合の熱的な性質は本報の結果から推定される。

(3) 土壌と主な施設構造物であるコンクリートとの熱物性値(温度伝導率、熱伝導率)は同程度であり、地域による気象の差異あるいは工法、材料による差異が大きいため、ここでは熱物性値を土壌、構造物ともに同一の値とし、また、パラメータとして解析を行う。

なお、本研究ではより簡便な施設の開発を目的としており、さらに、本報の解析では貯蔵施設の熱的特性の限界を明らかにするため施設構造材に断熱材を用いない。また、施設構造物の熱物性値の差異を考慮することは、実際の施設の設計時には条件によっては必要

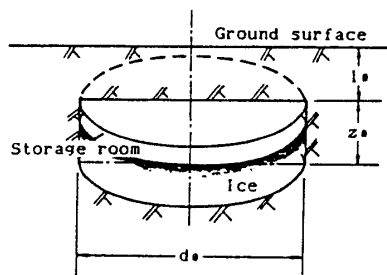


図1 氷室形大規模貯雪氷施設のモデル

であり、これらを考慮した解析およびその検証結果については次報において報告する。

(4) 雪氷の形で貯蔵した冬期間の冷熱は貯蔵庫内で農産物などの長期貯蔵に直接利用することも可能であるとともに、施設をアイスセントとみなし雪氷を庫外に搬出し利用することも可能であり、さらに、融解した水を冷水として施設内外で利用するなど、施設の利用形態は多岐にわたる。したがって、より一般的に、また、安全側に施設の熱的特性を明らかにするため、施設外部からの侵入熱は雪氷の融解潜熱によってのみ吸収されるものとし、融解水は融解後全量施設外部へ排出され、その顕熱は利用しないものとする。また、施設の温度は庫内の熱的条件、利用形態が設定されると平衡温度などを用い推定することもできるが、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、安全側に見積もり施設内壁温度を氷の温度 0°C とする。

2.2 基礎方程式 施設内の全容積 $V_0[m^3]$ に占める氷の容積割合(雪氷の体積充てん率)を $\eta_v[m^3/m^3]$ とすると初期に貯蔵される雪氷の重量 $W_0[t]$ は次式により計算される。

$$W_0 = \rho_{ice} \cdot \eta_v \cdot V_0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

経時変化を考慮するため非定常問題とする。上記の伝熱系の設定条件より次の熱伝導方程式を得る。

$$\frac{1}{a_e} \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \quad \dots\dots\dots (2)$$

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、 $\theta[^\circ\text{C}]$ 、 $\tau[h]$ 、 $a_e[m^2/h]$ は温度、時間、土壌の温度伝導率である。

また、初期条件、境界条件を次とする。

$$\left. \begin{array}{l} \tau=0 \quad \quad \quad : \theta = t_e(z) \\ r=0 \quad \quad \quad : \partial\theta/\partial r = 0 \\ z=0 \quad \quad \quad : \theta = \theta_{sol} \\ r=r_0, l_0 \leq z \leq l_0 + z_0 : \theta = 0 \\ z=l_0, l_0 + z_0, 0 \leq r \leq r_0 : \theta = 0 \end{array} \right\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

太陽からの日射を考慮した日射温度 $\theta_{sol}(t_0(M, D), i_p(M, D))$ を、大気温度 $t_0[^\circ\text{C}]$ とは別に推定しておく。ここで、 $i_p[W/m^2]$ は水平面直達日射量であり、 M, D, H は月日時である。比較的良好な近似として全天日射量を日射量 i_p とし日射温度 θ_{sol} を次式に示す相当温度差法を用い求め、これを地表面温度とする⁽¹⁾。ここで $\varepsilon_e, a_{atm}[W/(m^2 \cdot ^\circ\text{C})]$ はおのおの地表面の放射率、大気の熱伝達率を示す。

$$\theta_{sol} = t_0 + \varepsilon_e \cdot i_p / a_{atm} \quad \dots\dots\dots (4)$$

施設外部からの侵入熱量、すなわち、冷凍熱量 $q(M, D, H)[\text{kJ}/h]$ は次式により求められる。

$$q = \sum_{\text{all well}} \lambda_e \cdot \left(\frac{\partial \theta}{\partial n} \right)_{n=0} \cdot \Delta A \cdot 3.6 \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 λ_e [W/(m²·°C)]は熱伝導率、 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、雪氷の貯蔵全期間における冷凍熱量 Q [kJ]は次式により算出される。

$$Q = \sum_{M=M_s}^{M_e} \sum_{D=1}^{30} \sum_{H=1}^{24} q(M, D, H) \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 M_s, M_e は貯蔵開始月、終了月を示す。また、雪氷の持つ冷熱のうち潜熱 L [kJ/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 [kg/kg]を次式により定義する。

$$\eta = (W_0 - Q \cdot 10^3 / L) / W_0 \dots\dots\dots (7)$$

2.3 数値解析 数値解析においては一般に広く知られている差分法を用いる。微分方程式(2)を図2に示す差分格子を用い陽差分近似する。差分式を従属変数 $\theta_{i,j}$ について整理すると次式を得る。

$$\begin{aligned} \theta_{i,j} = & (1 - \sum_{i=1}^4 A_i) \theta'_{i,j} \\ & + A_1 \theta'_{i,j+1} + A_2 \theta'_{i,j-1} + A_3 \theta'_{i+1,j} \\ & + A_4 \theta'_{i-1,j} \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

ここで

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= \frac{a_e \Delta r r_p}{\Delta r^2 r_j} & A_2 &= \frac{a_e \Delta r r_M}{\Delta r^2 r_j} \\ A_3 &= \frac{a_e \Delta r}{\Delta z^2} & A_4 &= A_3 \\ r_p &= \frac{r_{j+1} + r_j}{2} & r_M &= \frac{r_j + r_{j-1}}{2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (9)$$

ここで、 θ' は θ に対し Δr [h]前の温度である。この方程式は、境界以外のすべての制御要素 i, j に対して成立するため、境界条件と初期条件を与え解くと各時間での温度分布が算出される。

地中温度の初期条件 t_e は経時変化を考慮して施設運用開始時の温度分布を用い次式により与える。

$$\begin{aligned} t_e = & \frac{t_h + t_l}{2} + \frac{t_h - t_l}{2} \exp\left(-\frac{z}{\sqrt{a_e}} \sqrt{\frac{\pi}{\tau_0}}\right) \\ & \times \cos\left(\frac{2\pi\tau}{\tau_0} - \frac{z}{\sqrt{a_e}} \sqrt{\frac{\pi}{\tau_0}}\right) + 0.03 z \dots\dots\dots (10) \end{aligned}$$

ここで、 t_h は毎日最高気温の月平均の最高月の値、 t_l は毎日最低気温の月平均の最低月の値を示し、 τ_0 は通年時間を示している。なお、右辺第3項は地下温度こう配を示している。

数値計算においては有限の温度場を設定する必要があるため図2に示すように貯蔵施設から十分離れた場所に断熱の境界条件を置く。なお、式(10)右辺第3項における地中鉛直方向の温度こう配は、図2のように地表面および施設底面から十分な距離を置くとこの伝熱

系では小さな値となり零と近似できる。また、壁面の熱流束を算出するにあたり、壁面上も含めた3点の格子上的温度を放物線近似し、壁面での温度こう配を求め利用した。

3. 解析結果およびその検討

計算に用いた主な条件を表1に示す。なお、時間差分、空間差分はおのおの $\Delta t = 12$ h, $\Delta r = \Delta z = 0.5$ mとした。

大気温度、日射量、地表面温度および1日あたりの雪氷の融解量を図3に示す。なお、温度の初期条件は図9に併記してある。雪氷の融解量は貯蔵を開始する初年度(④-1: 3月1日~翌年2月末日)の初期には地中温度が高いため、高い値を示しているが、1箇月後には安定し極小値を示し、その後夏にかけての地表面温度の上昇にともない融解量は増加し、土壌の熱伝

表1 計算条件

Atmospheric conditions	
Temperature, solar radiation :	Sapporo (shown in Fig.3)
Coefficient of heat transfer :	$\alpha_{atm} = 23.2$ W/m ² °C
Soil	
Thermal diffusivity :	$a_s = 0.0015$ m ² /h ^(*)
Thermal conductivity :	$\lambda_s = 0.58$ W/m°C ^(*)
Emissivity of ground surface :	$\epsilon_s = 0.8$
Storage room	
Height :	$z_0 = 5$ m
Diameter :	$d_0 = 50$ m ^(*)
Burying depth :	$l_0 = 2$ m ^(*)
Packing density of ice :	$\eta_v = 0.8$ m ³ /m ³
Density of ice :	$\rho_{ice} = 0.80$ ton/m ³ ^(*)
Initial stored ice	
$d_0 = 10$ m :	$W_0 = 250$ ton
$d_0 = 50$ m :	$W_0 = 6280$ ton ^(*)
$d_0 = 100$ m :	$W_0 = 25130$ ton

(*)'s mean standard values. Parameters are shown in corresponding figures.

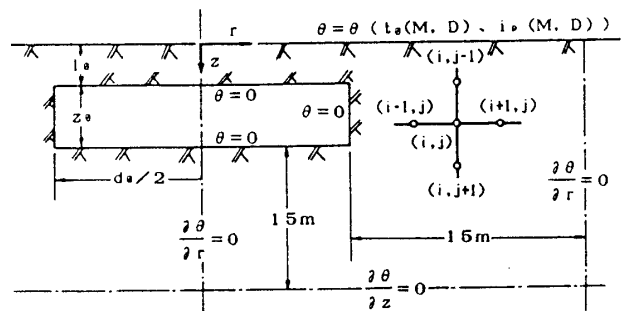


図2 解析モデルおよび座標系

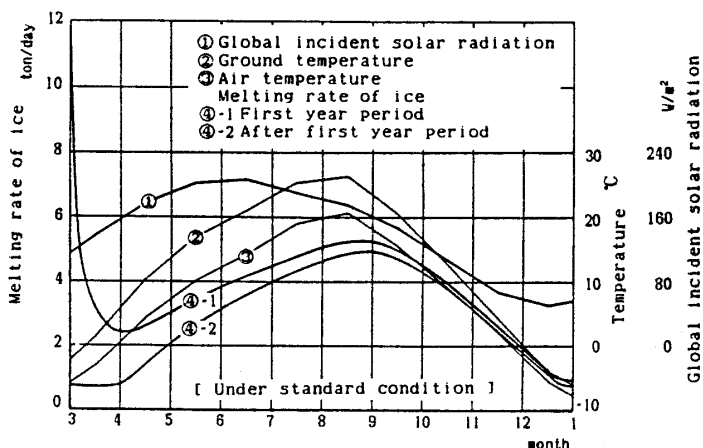


図3 大気、地表面温度、日射量および雪氷の融解量

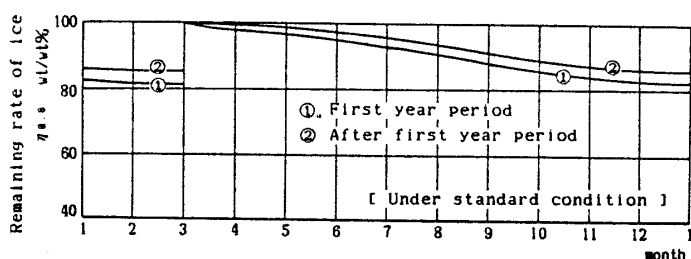


図4 雪氷の残存率の経年変化

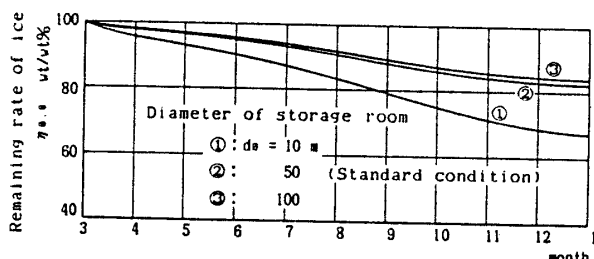


図5 貯蔵施設の直径が雪氷の残存率に及ぼす影響

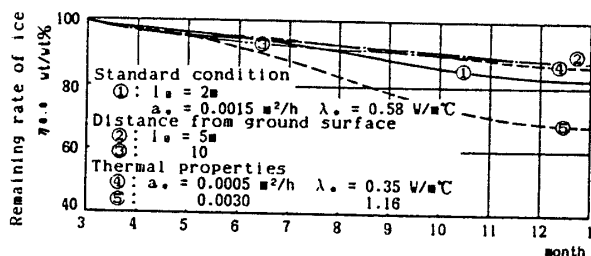


図6 施設の埋設深さおよび熱物性値の残存率に及ぼす影響

導の遅れにより地表面温度よりも約10日間遅れ8月下旬に極大値を示している。次年度以降(④-2)は、地中温度が安定するため、雪氷の融解量は初年度よりも低い値を示し、また、年度による差異はほとんどなく

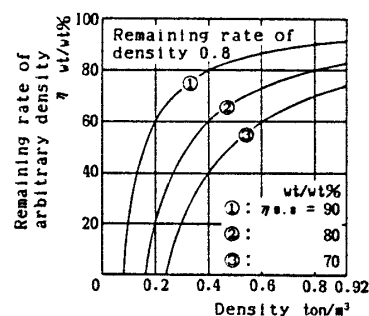


図7 貯蔵する雪氷の密度の残存率に及ぼす影響

なる。

雪氷の残存率の経年変化を図4に示す。初年度(①)では地中温度が安定しておらず高いため、次年度以降(②)よりも残存率は低いが、なら特別な断熱構造を採らない本報の結果においても、82%の雪氷が残存し、このすべてを0°Cの冷熱源として利用できることがわかり、貯雪氷施設は利用に値するものであることが想像される。次年度以降は地中温度は安定し12月末で86%の残存率を示す。なお、初年度の結果は熱設計において安全側の値となっている。

貯蔵施設の寸法(直径)が雪氷の残存率に及ぼす影響を図5に示す。直径 d_0 が50m以上では残存率に及ぼす影響は少なく本報で意図する大規模と言える。なお、直径が10m程度であっても残存率は2/3程度もあり断熱構造を施すと実用の可能性は高い。なお、残存雪氷量は直径 d_0 が10mの場合には170t、50mの場合には5170t、100mの場合には21100tである。

施設の埋設深さ(②、③)および熱物性値(④、⑤)の残存率に及ぼす影響を図6に示す。標準計算条件による結果(①)に比較すると本計算範囲では施設の埋設深さが深くなるほど残存率は高い値を示すが、5m程度以上になるとその効果は少なくなる。なお、施設の埋設深さの検討には、施設の建設費、雪氷の輸送など施設の建設、運用面からの検討も必要である。残存率に及ぼす熱物性値の影響は少なからずあるが⑤は水分を多く含む粘土質土壌の場合であり、特殊な場合に相当する。

図7は貯蔵する雪氷の密度 ρ_{ice} の残存率に及ぼす影響を示している。パラメータは標準計算条件下(0.80 t/m³)における残存率($\eta_{a,s}$ と表示)である。たとえば、密度以外の計算条件が標準条件と同一であり、その残存率が $\eta_{a,s}=80\%$ であったとすると、対象とする雪氷の密度が0.40 t/m³の場合には図7より残存率は60

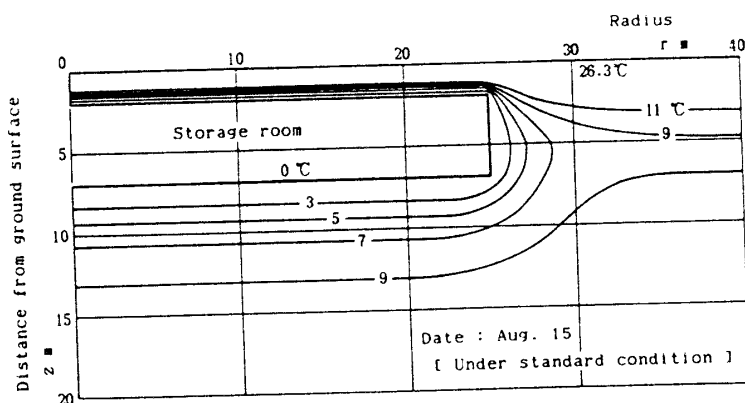


図8 8月15日の地中温度

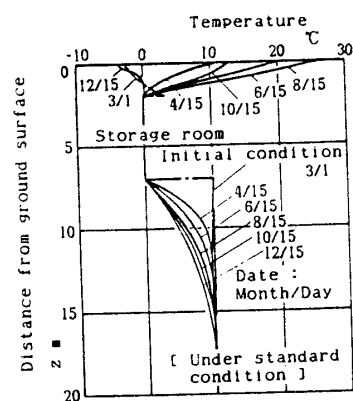


図9 施設中心軸に沿う地中温度

%となることが読取れる。このように図7より貯蔵する雪氷の密度が高くなると残存率も急激に低くなることがわかる。さらに、任意の密度 ρ_{ice} を有する雪氷の初期貯蔵重量は表1における雪氷初期貯蔵量に $\rho_{ice}/0.80$ を乗じた値となり、冷熱源の有する冷熱量は初期貯蔵重量に比例するため、貯蔵対象冷熱源である雪氷の密度を高めることは本研究などで提案する貯雪氷施設を有効に利用するうえでとくに重要である。

図8, 9に初年度の地中温度の分布例を示す。図8は8月15日の地中温度を等温線で示したものであり、図9は施設中心軸に沿う地中温度を月ごとに示したものである。なお、図9には初期条件(3月1日)も併記してある。いずれの図からも貯雪氷施設から10m程度離れた地点での地中温度は貯雪氷施設の熱的影響を受けることの少ないことがわかる。

4. 結 言

本研究は、雪国の多くの地方から強く要求が出されている、簡便で、経済効果の高い冬期間の冷熱エネルギーの貯蔵庫に関する研究を行い、雪氷の形の冬期間の冷熱エネルギーを大規模に貯蔵する施設を提案し、その熱的特性を明らかとするものである。

本報においては、特別な断熱構造を用いない、最も簡素な地下埋設形の大規模な貯雪氷施設を想定し、その貯雪氷能力など熱的特性の理論的な定量を行った。その結果、安全側に見積もり解析を行ったにもかかわらず

らず、とくに直径が50m程度以上の大規模貯雪氷施設では、80%以上の雪氷が融解せず通年保存することが可能であることが明らかとなり、十分利用に値するものであることが推定された。また、貯蔵する雪氷の密度が低くなると、残存率は急激に低下するため、貯蔵対象冷熱源である雪氷の密度を高めることは本研究で提案する施設を有効に利用するうえでとくに重要である。さらに、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的影響を受けることの少ないことがわかった。

なお、本研究で提案する貯雪氷施設の実証実験を行ったが、その結果については次報において報告する。

本研究を行うにあたり北海道庁、山形県庁、札幌通商産業局、室蘭市役所、山形県舟形町役場および農協、北海道美深町役場および農協、岩手県沢内村役場および農協、北海道開発技術センター、北海道地域技術振興センター、(有)ヒムロ(室蘭)、三菱重工業(株)、新日本製鉄(株)の方々、さらに、室蘭ヒートパイプ研究会の方々など多くの方々のご助言、ご協力を賜った。ここでは機関名だけを付記させて戴き、深く謝意を表す次第である。

文 献

- (1) 蝦山, 機論, 53-495, B(1987), 3358.
- (2) 蝦山, 第1回寒地環境工学合同シンポジウム講演集, (1987), 167.