

冬期冷熱の長期・大規模貯蔵施設の開発*

(第2報, スケールモデルによる実証実験)

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, 清水 龍哉*⁵

Long-Term and Large-Scale Storage of Natural Cold Thermal Energy in the Winter Season

(2nd Report, Practical Experiment by a Scale Model)

Masayoshi KOBAYAMA, Seitatou FUKUSIMA, Toshihiro KOYAMA
Tadayuki MURAKAMI, Yuichi SATOH, and Tatuya SHIMIZU

It is very important to utilize the local cold energy in the winter season. In the previous paper, the authors suggested a house for large-scale and long-term storage of the natural cold energy such as natural ice or snow, and by theoretical investigation, clarified that this type of storage house is of benefit to users of cold thermal energy in the summer season. In this paper, theoretical results of the previous paper are verified by a practical experiment with a scale model. A storage house used for experiment is buried in the ground except for the roof, and is constructed with concrete, insulators and so on. The measured values of the melting rate of ice, soil temperatures and room temperatures agree well with values estimated by theoretical analysis.

Key Words: Storage House, Cold Energy, Ice, Practical Experiment, Scale Model, Melting Rate, Soil Temperature, Room Temperature

1. 結 言

地域固有のエネルギーを積極的に、有効に利用することは、豊かな地域社会を創る上で重要である。このような考えから、第1報⁽¹⁾において、冬期冷熱を雪あるいは氷の形で長期間貯蔵する、簡便で大規模な貯雪氷施設を提案し、貯雪氷能力の理論予測を行い、その有用性を示唆した。

しかし、このような大形の施設の建設にあたっては、かなりの建設費を必要とするため、あらかじめ小形の施設を建設し、理論的な値の妥当性についての検討、あるいは、施設建設および運用に関する問題点を整理し、対応策について検討を行っておく必要がある。

したがって、本報においては、本研究で提案する貯雪氷施設の実証実験を小形の施設を用い行い、第1報での理論解析による結果の確認を行うことを試み、その結果、第1報での結果は信頼に足るものであることが明らかとなったので報告する。

2. 貯雪氷実証実験施設と実験方法

本報で用いた氷室形貯雪氷施設(半分)を図1に示す。実用性および製作性を考え、平面からみると庫内の一辺の長さが x_0 [m]の正方形で、高さが z_0 [m]の直方体とし製作した。施設側壁および床はコンクリートおよび断熱材の積層から成り、屋根部を除き地下に埋設してある。また、大気に接する屋根部は遮光・防水シート、断熱材および合板から成っている。

図1に示す庫内温度、地中温度および大気温度を連続測定し、また、融解水を毎日定時にポンプにより吸い上げ氷の融解量を測定した。

実験に使用した氷は、雪を圧縮し製作したものであり、実験を開始した昭和62年4月1日の前日の夜間に貯蔵庫へ搬入し、氷が全量融解するまで庫内を閉鎖した。

なお、搬入した氷の融解水としての回収率は99.5%であった。

3. 貯雪氷実証実験施設の熱解析

3.1 基礎方程式

第1報での数値解析法を極力踏襲し、実際の施設の解析を行う。すなわち、径時変化を考慮するため非定常問題とし、また、施設の平面形

* 平成元年7月14日 東海支部岐阜地方講演会において講演、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 室蘭工業大学工学研究科。

*³ 日鋼工営(株)(〒050 室蘭市茶津町2-1)。

*⁴ 学生員、室蘭工業大学大学院。

*⁵ 室蘭工業大学。

状は正方形であるが、第1報と同様に二次元の円筒座標系により解析を行い簡素化を図る。なお、本報における解析では、施設各構造物および土壌の熱物性値の違いを考慮する。以上の伝熱系の設定により、第1報の式(2)に対応し、次の熱伝導方程式を得る。

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

ここで、 r [m]、 z [m] は各々半径および鉛直方向距離であり、 θ [°C]、 τ [h]、 a [m²/h] は温度、時間、温度伝導率である。

また、初期条件、境界条件を次とする。

$$\left. \begin{aligned} \tau=0 & : \theta = t_e(z) \\ r=0 & : \partial \theta / \partial r = 0 \\ z=0, 0 \leq r \leq r_0 & : \theta = \theta_{sol,c} \\ r_0 < r & : \theta = \theta_{sol,e} \\ \text{貯蔵庫内壁} & : \theta = \theta_w(\theta_f, \alpha_w, k, \theta) \end{aligned} \right\} \dots\dots (2)$$

ここで、 r_0 は後述の式(15)により計算される施設の壁までの半径を示している。 z' は庫内壁内面あるいは地表面からの最短距離を示し、 t_e は第1報の式(10)である。日射温度 $\theta_{sol,c}$ or θ_e は施設の外壁(添字 c)および地表面(添字 e) に対し別々に放射率 ϵ [-] を与え、第1報の式(4)を用い計算する。なお、添字 w は施設の内壁、 k は壁の向く方向を示す。また、 θ_w は庫内の壁温であり、式(2)においては関数関係を表している。

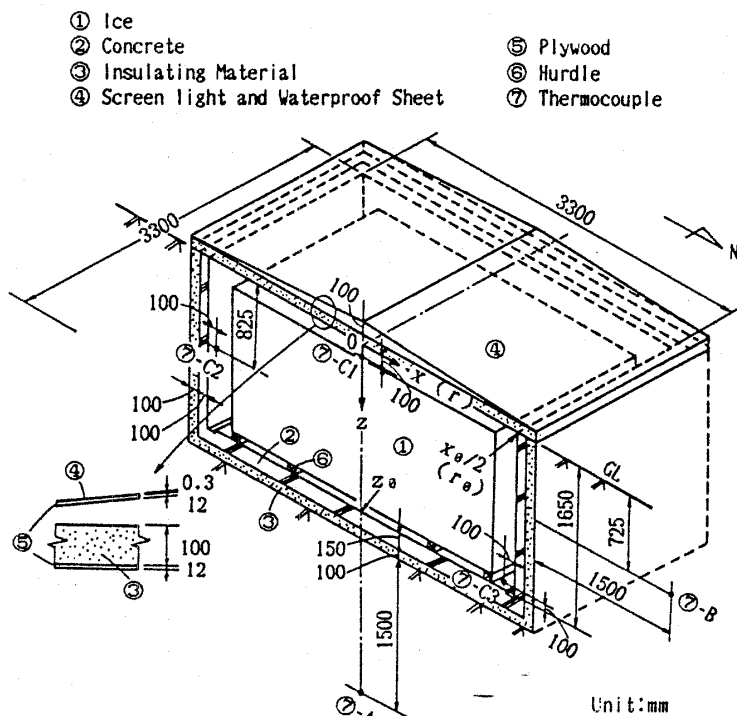


図1 実証実験用水室形貯雪水施設

θ_f は施設内の平衡温度を示し、後述の式(13)により計算する。

3.2 数値解析に用いる計算式 次に微分方程式(2)を図2に示す制御要素において陽差分近似する。要素の代表点を重心に置き、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。

$$\theta_{i,j} = \left(1 - \sum_{i=1}^4 A_i \right) \theta_{i,j} + A_1 \theta_{i,P} + A_2 \theta_{i,M} + A_3 \theta_{j,P} + A_4 \theta_{j,M} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで

$$\begin{aligned} A_1 &= \frac{(r_i + \delta r_i / 2) a \Delta \tau}{r_i (\delta r_i)^2} \\ A_2 &= \frac{(r_i - \delta r_i / 2) a \Delta \tau}{r_i (\delta r_i)^2} \\ A_3 &= \frac{a \Delta \tau}{(\delta z_j)^2}, \quad A_4 = A_3 \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (4)$$

式(3)は、境界以外のすべての制御要素 i, j に対し成立するため、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計算される。

式(3)における θ' は θ に対し $\Delta \tau$ 時間前の制御要素の境界上の温度を示しており、その値の算出方法について述べる。境界条件となる大気温度、日射量は一日の平均値を中心に直線的に変化するものとする。この時、微小時間 $\Delta \tau$ の間の温度分布は定常状態に近い状態にあるものと近似できる。

$\theta_{i,P}$ を例に採り、図2における半径 r 方向の熱伝導場を考える。要素 i, j と $i+1, j$ との境界上では熱流量が等しいことから次式を得る。

$$(r\lambda)_{i,j} \left(\frac{\partial \theta'}{\partial r} \right)_{i,P} = (r\lambda)_{i+1,j} \left(\frac{\partial \theta'}{\partial r} \right)_{i,P} \quad \dots\dots\dots (5)$$

これを次の差分式により近似する。

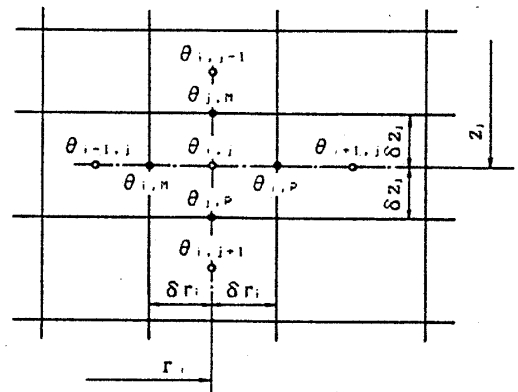


図2 制御要素

$$(r_i + \delta r_i / 2) \frac{\lambda_{i,j}}{\delta r_i} (\theta'_{i,p} - \theta'_{i,j}) = (r_{i+1} - \delta r_{i+1} / 2) \frac{\lambda_{i+1,j}}{\delta r_{i+1}} (\theta'_{i+1,j} - \theta'_{i,p}) \dots\dots (6)$$

この式から $\theta'_{i,p}$ を求めると次式を得る.

$$\theta'_{i,p} = (b_m \theta'_{i,j} + b_p \theta'_{i+1,j}) / (b_m + b_p) \dots\dots (7)$$

ここで

$$\left. \begin{aligned} b_m &= (r_i + \delta r_i / 2) \cdot \lambda_{i,j} / \delta r_i \\ b_p &= (r_{i+1} - \delta r_{i+1} / 2) \cdot \lambda_{i+1,j} / \delta r_{i+1} \end{aligned} \right\} \dots\dots (8)$$

$\theta'_{i,m}$ についても同様に算出することができ、また、 z 方向の温度 $\theta'_{j,p}$, $\theta'_{j,m}$ については、 $r_m = r_p = 1$ (単位量)、 δr を δz と置き換えると境界上の温度が同様に算出される。

次に、天井部を除く庫内壁表面温度の算出について述べる。壁およびその近傍では、次の熱平衡式が成り立つ。

$$\alpha_{w,k} (\theta'_j - \theta_w) = -\lambda_w \left(\frac{\partial \theta}{\partial n} \right)_{n=0} \dots\dots (9)$$

ここで、 $\alpha_{w,k}$ [W/m²·°C] は k の方向を向く壁の熱伝達率であり、 n は対象とする壁面からの垂直、壁内部方向の距離を表す。これに式(6)と同様の差分近似を施し、壁温 θ_w についてまとめると次式を得る。

$$\theta_w = (b_f \theta'_j + \theta_1) / (b_f + 1) \dots\dots (10)$$

ここで、

$$b_f = \alpha_{w,k} \cdot \delta n / \lambda_w \dots\dots (11)$$

なお、 θ_1 は壁内部の最初の要素の温度を示し、 δn はその要素の重心までの距離を示す。

次に、庫内の平衡温度を算出する。庫内温度は定常状態に近い状態にあるものと近似すると、次の熱平衡式が導かれる。

$$Q / \Delta \tau = \sum_{ais} \alpha_{ice,k} (\theta_f - \theta_{ice}) A_{ice} \dots\dots (12)$$

ここで、 Q [kJ] は時間 τ 、時間幅 $\Delta \tau$ において貯蔵庫に侵入する熱量、すなわち、冷凍熱負荷であり、式(14)により計算される。また、添字 ice は水を示し、 A_{ice} は氷表面積、 θ_{ice} は氷の温度で、一般に 0°C である。さらに、 ais はすべての氷表面を示している。式(12)より θ_f を求めると次式を得る。

$$\theta_f = [A_{Kr} \cdot \theta_{sol,c} + \sum_{awe} \alpha_{w,k} \cdot \theta_w \cdot \Delta A_w + \sum_{ais} \alpha_{ice,k} \cdot \theta_{ice} \cdot A_{ice}] / [A_{Kr} + \sum_{awe} \alpha_{w,k} \times \Delta A_w + \sum_{ais} \alpha_{ice,k} \cdot A_{ice}] \dots\dots (13)$$

ここで、 A_{Kr} [m²·W/m²·°C] は屋根の面積と熱通過率との積を示し、屋根が勾配を持ち、また、図1に示すように断熱材などで積層状態にあることを考慮している。また、 awe は屋根以外のすべての壁面要素を示している。なお、氷表面 A_{ice} は貯蔵庫に残存している氷

が直方体をなしているものと近似して算出する。

また、冷凍熱負荷 Q は次式により計算される。

$$Q = A_{Kr} (\theta_{sol,c} - \theta_f) + \sum_{awe} \alpha_{w,k} (\theta_w - \theta_f) \Delta A_w \dots\dots (14)$$

なお、冷凍熱負荷 Q は氷の潜熱および融解した水の 0°C から平衡温度までの顕熱により賄われるものとする。

3.3 数値計算方法

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、円筒座標系を用い、正方形断面を有する貯蔵庫の熱解析を行うにあたり、ここでは、熱伝導距離を重視する。図3に直交座標系における水平方向の制御要素と円筒座標系における制御要素を示す。直交座標系における要素 i の中心からの距離 x_i に対応する線分 a-a' の中心からの平均距離を円筒座標系での距離 r_i とする。また、制御要素の半値幅 δr_i に関しても同様の取扱いを施すと簡単な積分から次の結果を得る。

$$r_i = 1.122 x_i \dots\dots (15)$$

$$\delta r_i = 1.122 \delta x_i \dots\dots (16)$$

なお、この制御要素の占める水平方向の伝熱面積は直交座標系での値、すなわち、実面積を採る。さらに、垂直壁に関しては、中心からの距離は式(15)に従うものとするが、伝熱面積は水平方向と同様に実面積の値を採る。

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が、第1報の結果より貯蔵施設から 10 m 程度離れた場所では、貯蔵庫の熱的影響をほとんど受けないことが明らかとなっているため、安全を見込み貯蔵庫から 15 m 離れた場所に第1報の図2に示す断熱の条件を置く。

実験に用いた施設は図1に示すように、計算の対象とする土壌と比較するとかなり薄いコンクリート層お

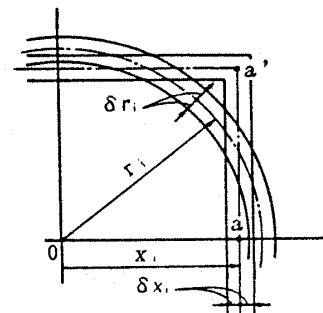


図3 直交座標系と円筒座標系の関係

よび断熱材の層から構成されている。また、施設構造物に比較すると土壌の温度変化は一般に少ない。したがって、演算時間の短縮および計算機の記憶領域の節約から、施設構造物に対し要素寸法の小さい座標系を、土壌に対し要素寸法の大きい座標系を用い、両者を併用する。

また、陽差分形式を用い数値解析を行う場合、差分式の近似度から制御要素の寸法と時間の差分とは密接な関係のあることが知られており⁽²⁾、一般に制御要素の寸法が小さいと時間の差分も小さくなる。本報の例では、施設構造物に関する時間差分($\Delta\tau_v$ と置く)は土壌に関する時間差分($\Delta\tau_e$ と置く)よりもかなり小さな値となる。したがって、ここでは、演算時間の短縮から $\Delta\tau_e$ と $\Delta\tau_v$ とは異なる値を与え($\Delta\tau_e > \Delta\tau_v$)、まず、土壌に関する差分式を $\Delta\tau_e$ を用い時間 τ_e について解き、この微小時間内での変化を直線近似し、 τ_e の進行に対応する値を施設構造物の座標系へ境界条件として受渡し、施設構造物の座標系において($\Delta\tau_e/\Delta\tau_v$)回(ただし、整数値とする)過渡変化の計算を行う。この後、再び、土壌に関する計算に進み、同様の繰返しにより過渡変化の数値解析を行う。

4. 実験結果と解析結果との比較検討

計算に用いたおもな条件および物性値を表1に示す。土壌は粘土質であったのでその熱物性値を採った。なお、 $\Delta\tau_v=0.04$ h、 $\Delta\tau_e=1.6$ hとし、また、 δr および δz は不等間隔で用い、その最小値は構造物に対し0.025 m、土壌に対し0.175 mとした。

庫内においては空気層の厚さが十分あり、温度差が小さい条件をふまえ熱伝達率⁽³⁾を与えた。なお、屋根構造物内部の熱伝達率は、庫内壁と同様の値とした。また、大気と接する屋根面および地表面の熱伝達率は、広く用いられている値とした。

なお、計算に用いた大気温度、日射量(室蘭市の値)は図4に併記してある。

図4は大気温度の実測値(日平均値)と計算に用いた値、日射量および実験による庫内温度、数値解析による平衡温度を示す。実験期間中の大気温度は例年よりも若干高かった。庫内温度は3箇所測定したが、氷の残量の多い6月下旬までは1°C程度の差異しかなく、図にはそれらの温度の平均値を示してある。図5は氷の残存率の時間推移および一日当たりの氷の融解量の変化を、実験値と解析値とを比較し示している。さらに、図6は地中温度の時間推移を、実験値と解析値とを比較し示している。

一日当りの氷の融解量は5月下旬まで計算によるほ

うが高い値を示している。計算により氷の残量の多い6月下旬までの氷の消費の成分を調べると、屋根からの侵入による熱量が約20%、庫内側壁からの熱量が約70%、庫内の床からの熱量が約10%であり、庫内側壁からの侵入熱が支配的であることがわかる。図6に示す側壁方向の温度③(測定値)、④(計算値)を比較すると計算値のほうが高い値を示しており、この差異が氷の融解量および残存率に影響を与えているものと考えられる。なお、図6に示すような地中温度の計算値と実測値との違いは、初期温度の見積りとの差異、土壌の温度伝導率など熱物性値の差異および土壌の不均質性に起因していることは明らかである。しかし、土壌の熱物性値の詳細な資料が少なく、また、施設の熱設計にあたり、設置予定地の地質のすべてを知ることが事実上不可能であることから、本報での数値解析はかなり良く地中温度の過渡変化を予測しており、実際の熱設計に利用できるものと考えられる。

また、図4に示す庫内温度の実測値④と計算に依った平衡温度⑤とは、氷の残量の多い6月下旬まではかなり良い一致を示し、それ以降は氷の残量が同一であ

表1 計算条件

Atmospheric conditions	
Temperature, solar radiation :	
Muroan (shown in Fig.4)	
Coefficient of heat transfer : 23.2 W/m ² °C	
Soil	
Thermal diffusivity :	0.0030 m ² /h
Thermal conductivity :	1.16 W/m°C
Emissivity of ground surface :	0.8
Storage room	
Constraction and dimensions : shown in Fig.1	
Thermal diffusivity	m ² /h
Insulator : 0.0028	Concrete : 0.0025
Thermal conductivity	W/m°C
Sheet : 0.34	plywood : 0.16
Insulator : 0.0034	Concrete : 1.6
Coefficient of heat transfer W/m ² °C	
upper wall : 4.9	side wall : 6.0
lower wall : 6.6	
Emissivity	
inner walls : 0.9	
upper surface of sheet :	0.54
Ice	
Density :	0.26 ton/m ³
Initial stored ice :	6.323 ton

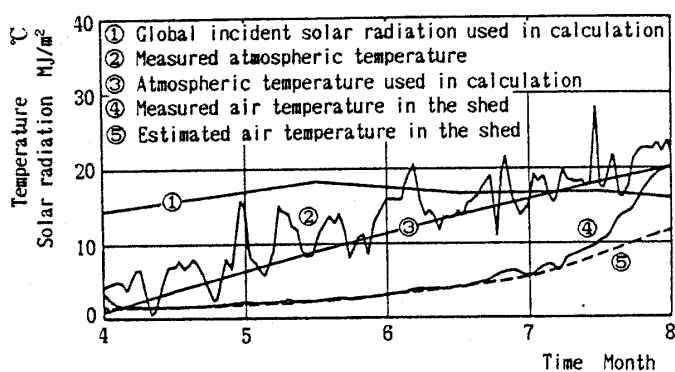


図4 大気温度, 日射量および車内の(平衡)温度

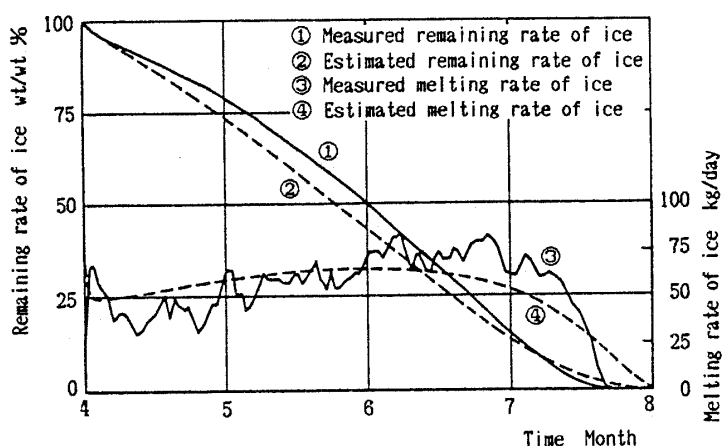


図5 氷の残存率および一日当たりの融解量

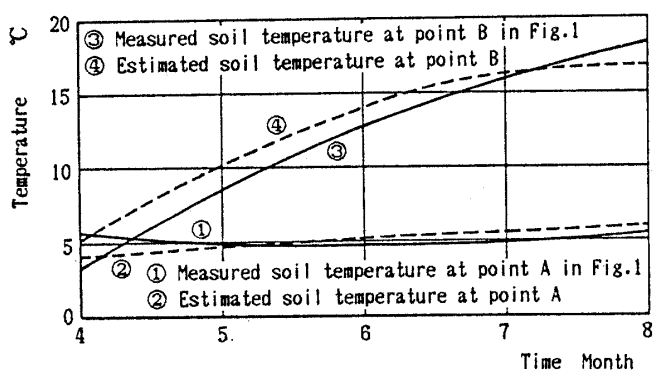


図6 地中温度

れば両者はほぼ一致し, 本報での平衡温度の算出方法は実用的であることがわかる。なお, 既報⁽⁴⁾において報告したように, 6月下旬までの庫内温度は, 多くの農産物の長期貯蔵に適した温度でもある。

図5に示す氷の残存率(測定値③, 計算値④)を比較すると, 若干の差異は認められるものの, 理論解析による結果は, 氷の初期貯蔵量に若干の安全率を見込むことにより, 実用的な熱設計に供しえるものと見ることができる。なお, 図6に示す鉛直方向の温度の経時変化(測定値①, 計算値②)の測定値と計算値との差異が地表面近くでの値(測定値③, 計算値④)の差異に比較すると少ないことから, 第1報で示した, さらに深い地下に埋設する貯雪氷施設に関する理論的な値は, 信頼に足るものであると推定される。また, 直交座標系を円筒座標系で近似する本報の手法は, 利用に値するものであると考えられる。

5. 結 言

本研究は冬期間の冷熱エネルギーを氷の形で長期間, 大規模に貯蔵する施設の利用を提案するものである。本報においては, 本研究で提案する貯雪氷施設の実証実験を小形の施設を用い行い, 第1報での理論解析による結果の確認を行った。その結果, 第1報での結果は信頼に足るものであることが明らかとなった。

本報での実験を行うにあたり既報の謝辞に述べた方々のほかに, 室蘭工業大学の教職員, 卒業生の方々, (株)田上組, 北海道ディーゼル工業(株), (有)谷藤工業, (株)グリンクロス(室蘭)の方々および水野玲子氏など多くの方々のご助言, ご協力をいただいた。付記し深く謝意を表す次第である。

文 献

- (1) 媚山・ほか4名, 機論, 55-517, B (1989), 2886.
- (2) 日本機械学会編, 熱と流れのコンピュータナリシス, (1986), 65.
- (3) 日楽機械学会編, 伝熱工学資料, (1962), 31.
- (4) 媚山, 機論, 53-495, B (1987), 3358.