流れの中におかれた潜熱蓄熱カプセル群の伝熱*

(第2報, 放熱過程の解析)

平田 哲夫**, 植田 秀樹***, 藤原 正典****

Heat Transfer of Latent Thermal Energy Storage Capsules Arranged in Alignment with Fluid Flow

(2nd Report, Analysis for Solidification Process)

Tetsuo HIRATA, Hideki UEDA, and Masanori FUJIWARA

Analytical considerations were presented for the solidification process of latent thermal energy storage capsules. The arrangement of the capsules was in alignment with the flow direction. It was shown that good agreement between the predicted and the experimental results can be obtained by application of the quasisteady assumption on the solidification process. Numerical calculations for fifty rows of capsules showed that there is a certain location in the rows where the heat transfer rate between the capsules and the flow shows a maximum value, and the location moves to the downstream rows as time proceeds.

Key Words: Phase Change, Convective Heat Transfer, Solidification, Analysis, Thermal Energy Storage, Aligned Capsules

1. 緒 言

凝固や融解に伴う相変化潜熱を利用した蓄熱方法は、例えば空気調和装置の蓄熱槽や、太陽エネルギー利用の際の間欠性を補う装置などに関連して、最近多くの研究が報告されている。蓄熱装置の一つの熱交換法である円筒カプセル形では、従来、単一管の放熱・蓄熱特性について実験的あるいは理論的に詳細な検討をしたもの^{(1)~(3)}があり、その特性についてはほぼ明らかになってきたといえよう。しかし、蓄熱カプセル群についての詳細な研究⁽⁴⁾は少ないように思われる。

前報⁽⁵⁾では、空気流中にごばん目状におかれた3列7段のカプセル群の放熱・蓄熱特性について実験的に調べ、各段のカプセル温度の変化や相変化量との関連などについて明らかにした。一般に、実際に使用される蓄熱槽としては何百本ものカプセルより構成されるので、このような放熱・蓄熱特性を明らかにすることは重要であり、また、それを簡便に予測する方法があれば大変有用である。伊藤⁽²⁾はn-オクタデカンを充て

んした円筒カプセルを毎分1°C以内で温度変化させた実験を行い、その凝固量を準定常解と比較したところ両者はよく一致し、準定常法の応用性について述べている。

本報では、空気流中にごばん目状におかれた蓄熱カプセル群よりの放熱特性について、凝固を伴わない液相・固相の顕熱放出過程には非定常法を、一方、凝固進行中の潜・顕熱放出過程には準定常法を用いて解析を行い、前報⁽⁵⁾の実験結果と比較しその妥当性を検討した。さらに、一例として50段よりなるカプセル群の放熱特性を試算し、各段の放熱量の変化などを明らかにした。

2. 主 な 記 号

$A(t)$: 無次元液相面積 $= s^2(t)/r_w^2$

B_i : ビオ数 $= h_m r_w / \lambda$

D : カプセル直径

h_m : 平均熱伝達率

L : 凝固潜熱

N_{um} : 平均ヌセルト数 $= h_m D / \lambda_\infty$

p : カプセルのピッチ

Pr : プラントル数

$q_L(t), q_s(t)$: 潜熱量および顕熱量

* 昭和61年10月25日 山梨地方講演会において講演、原稿受付 昭和61年2月17日。

** 正員、信州大学工学部 (〒380 長野市若里500)。

*** 学生員、信州大学大学院。

**** ダイキン工業(株) (〒591 堺市金岡町1304)。

r_w : カプセル半径 Re : レイノルズ数 $= u_\infty D / \nu_\infty$ $s(t)$: 固液界面半径 t : 時間 $T_o, T_w(t)$: カプセル初期温度および壁温 $T_s, T_\infty(t)$: 凝固温度および周囲流体温度 u_∞ : 周囲流体 (管群上流) 速度 λ^* : 蓄熱材固相と空気の熱伝導率比 $= \lambda_s / \lambda_\infty$ θ^* : 温度の時間積分値, 式(8), (13) κ : 温度伝導率

添 字

 n : カプセル段数 s : 固相 L : 液相 ∞ : 周囲流体

3. 放熱過程の解析

蓄熱カプセル内の蓄熱材が液相より固相へ相変化し放熱される時, その過程は一般に三つの段階より成る。第一段階は, 蓄熱材 (カプセル) 初期温度 T_o から凝固温度 T_s まで冷却される間の液相の顕熱放出過程, 第二段階は, 凝固開始から凝固終了までの潜・顕熱放出過程, そして第三段階は凝固終了時の温度から周囲流体温度まで冷却される間の固相の顕熱放出過程である。ここでは, 第一, 第三段階には非定常法, 第二段階には準定常法を用いた。

解析にあたり以下の仮定をもうけた。(1) カプセル軸方向の熱移動は半径方向に比べ無視できる。(2) 凝固開始時において液相の過冷却は起こらない。(3) 固液界面は滑らかであり, 凝固は同心円状に進行する。(4) 液相内の自然対流の影響は無視できる。(5) カプセル壁温は軸・周方向とも一様である。(6) カプセル容器の顕熱は全体の放熱量に比べ無視できる。

3.1 液相の顕熱放出過程 ごばん目状に配列されたピッチが p なる蓄熱カプセル群の一行を考え, その任意の段として図1に示すような n 段めについて考える。いま, 仮定により液相内の自然対流を無視し, また時刻 t における周囲流体温度 $T_{\infty, n}(t)$ の時間的变化が小さい (本報では $3^\circ\text{C}/\text{h}$ 程度を対象) とすれば, こ

図1 顕熱放出モデル

の場合, 初期温度 T_o なる無限円柱が $T_{\infty, n}(t)$ なる流体との間で平均熱伝達率 $h_{m, n}$ により冷却される非定常熱伝導問題⁽⁹⁾として近似できる。

カプセルの肉厚は無視し, 半径 r_w の容器に蓄熱材が充てんされているとすれば, 時刻 t におけるカプセル中心温度 $T_{c, n}(t)$ と壁温 $T_{w, n}(t)$ は Bessel 関数 $J_0(\alpha_m), J_1(\alpha_m)$ を用い次式で表される。

$$T_{c, n}(t) = T_{\infty, n}(t) + [T_o - T_{\infty, n}(t)] \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2}{\alpha_m} \times \frac{J_1(\alpha_m)}{J_0^2(\alpha_m) + J_1^2(\alpha_m)} \exp\left(-\alpha_m^2 \frac{\kappa_L t}{r_w^2}\right) \quad \dots\dots (1)$$

$$T_{w, n}(t) = T_{\infty, n}(t) + [T_o - T_{\infty, n}(t)] \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2}{\alpha_m} \times \frac{J_0(\alpha_m) J_1(\alpha_m)}{J_0^2(\alpha_m) + J_1^2(\alpha_m)} \exp\left(-\alpha_m^2 \frac{\kappa_L t}{r_w^2}\right) \quad \dots\dots (2)$$

ここで α_m は $B_{in} = x J_1(x) / J_0(x)$ の根であり, κ_L は液相の温度伝導率である。また, $n \sim n+1$ 段間の熱バランスより

$$[T_{\infty, n+1}(t) - T_{\infty, n}(t)] Re Pr \frac{p}{\pi D} = [T_{w, n}(t) - T_{\infty, n}(t)] Num_{n, n} \quad \dots\dots\dots (3)$$

となる。ここに, $D = 2r_w$, $Re = u_\infty D / \nu_\infty$, $Num_{n, n} = h_{m, n} D / \lambda_\infty$ である。式(1)~(3)より初期温度 T_o と試験部入口温度 $T_{\infty, 1}(t)$ (=一定) が与えられると各段の温度が順次計算できる。

3.2 凝固時の潜・顕熱放出過程 蓄熱カプセル壁温は時間の経過に伴い凝固温度 T_s に達する。液相の過冷却が起こらないとすれば, 凝固開始の条件は $T_{w, n}(t) < T_s$ で与えられる。

一般に潜熱が比較的大きい物質が凝固する場合, 相変化の速度が遅いので準定常法で十分近似できることが報告されている⁽¹⁾⁽²⁾。ここでは準定常法を用い, 凝固時の顕熱放出は潜熱放出に比べ無視できるとしてカプセル壁温を求め, あとで顕熱項を補正する方法をとった。

3.2.1 凝固量とカプセル壁温 図2に示すように時刻 t において凝固が $s_n(t)$ まで進んだ状態を考える。このとき n 段めのカプセルより単位長さ当たり放出される熱量 $q_{L, n}(t)$ は, 円筒の定常熱伝導問題の解より

図2 凝固中の潜・顕熱放出モデル

$$q_{L,n}(t) = -2\pi\lambda_s \frac{\theta_{w,n}(t)}{\ln[r_w/s_n(t)]} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに $\theta_{w,n}(t) = T_{w,n}(t) - T_s$, λ_s は固相の熱伝導率である。一方、固相内の半径 r の位置における温度差 $\theta_n(t) = T_n(t) - T_s$ は次式で与えられる。

$$\theta_n(t) = \theta_{w,n}(t) \frac{\ln[r/s_n(t)]}{\ln[r_w/s_n(t)]} \quad \dots\dots\dots (5)$$

したがって、固液界面の位置が dt 時間に $ds_n(t)$ 変化したとすれば、界面における熱バランスは次式で表される。

$$2\pi s_n(t) \rho_s L ds_n(t) = 2\pi s_n(t) \lambda_s \frac{\partial \theta_n(t)}{\partial r} \bigg|_{r=s_n(t)} dt \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに ρ_s は固相の密度、 L は凝固熱である。式(5)を式(6)へ代入し、境界条件 $t=0 \sim t$, $r=r_w \sim s_n(t)$ で積分すれば、

$$A_n(t)[1 - \ln A_n(t)] = 1 + \frac{4\lambda_s \theta_{w,n}^*(t)}{\rho_s L r_w^2} \quad \dots\dots\dots (7)$$

となる。ここに、 $A_n(t) = s_n^2(t)/r_w^2$ であり $\theta_{w,n}^*(t)$ は温度変化の時間積分値で次式で表される。

$$\theta_{w,n}^*(t) = \int_0^t \theta_{w,n}(t) dt \quad \dots\dots\dots (8)$$

式(7)は凝固量とカプセル壁温との関係を表している。

3・2・2 凝固量と周囲流体温度 各段の温度変化が緩慢である (3°C/h 程度) とすれば、カプセル表面の平均熱伝達率の定義⁽⁵⁾を次式に書き換えることができる。

$$q_n(t) = \pi Dh_{m,n} [T_{w,n}(t) - T_{\infty,n}(t)] \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここに $q_n(t)$ はカプセル単位長さ当たりの熱量である。したがって、 dt 時間におけるカプセル表面の熱バランスは式(4), (9)を等置し整理すると

$$\frac{\theta_{w,n}(t)}{\ln A_n(t)} dt = \frac{N_{um,n}}{4\lambda^*} [\theta_{w,n}(t) - \theta_{\infty,n}(t)] dt \quad \dots\dots\dots (10)$$

となる。ここに $\theta_{\infty,n}(t) = T_{\infty,n}(t) - T_s$, $\lambda^* = \lambda_s/\lambda_\infty$ である。式(7)の左辺を $A_n(t)$, 右辺を t で各々微分して整理し、式(10)左辺へ代入すると、

$$-\frac{\rho_s L r_w^2}{4\lambda_s} dA_n(t) = \frac{N_{um,n}}{4\lambda^*} [\theta_{w,n}(t) - \theta_{\infty,n}(t)] dt \quad \dots\dots\dots (11)$$

さらに境界条件 $t=0 \sim t$, $A_n(t)=1 \sim A_n(t)$ で積分し式(7)へ代入すると、

$$A_n(t)[1 - \ln A_n(t)] = 1 + \frac{4\lambda_s \theta_{w,n}^*(t)}{\rho_s L r_w^2} + \frac{4\lambda^*}{N_{um,n}} [1 - A_n(t)] \quad \dots\dots\dots (12)$$

ここに

$$\theta_{w,n}^*(t) = \int_0^t \theta_{w,n}(t) dt \quad \dots\dots\dots (13)$$

である。式(12)は凝固量と周囲流体温度との関係を表しており、伊藤⁽²⁾の結果と同形である。

3・2・3 顕熱放出によるカプセル壁温の補正 顕熱を潜熱に比べ小さいとして無視してしまうと、カプセル壁温は凝固終了とともに周囲流体温度に一致してしまい現実的でない。ここでは、第一次近似として以下の簡単な補正をした。式(9)において左辺の熱量に顕熱分を加え、補正した壁温を $T'_{w,n}(t)$ で表すと

$$q_{L,n}(t) + q_{s,n}(t) = \pi Dh_{m,n} [T'_{w,n}(t) - T_{\infty,n}(t)] \quad \dots\dots\dots (14)$$

となる。ここで顕熱量の変化に伴う発熱分 $q_{s,n}(t)$ は次式で与えられる⁽¹⁾。

$$q_{s,n}(t) = \frac{16\pi\lambda_s C_{ps} \theta_{w,n}^2(t)}{L} \times \frac{\lambda_s \theta_{w,n}^*(t)}{\rho_s L r_w^2 A_n(t) [\ln A_n(t)]^3} \quad \dots\dots\dots (15)$$

したがって、式(4), (15)より潜・顕熱量を求め式(14)へ代入すれば、補正された壁温 $T'_{w,n}(t)$ が求まる。

以上より、 n 段めの $T_{\infty,n}(t)$ が定まれば式(12)より $A_n(t)$ が求まり、式(7)より $T_{w,n}(t)$ が計算でき、式(14)より補正された $T'_{w,n}(t)$ を求め、さらに式(3)より $n+1$ 段めの $T_{\infty,n+1}(t)$ が求まるので順次計算することができる。

3・3 凝固終了後(固相)の顕熱放出過程 凝固終了時の $T_{w,n}(t)$, $T_{c,n}(t)$ の値は、前節の計算により求まっているので、その後の固相の顕熱放出過程は3・1節の場合と同様にして式(1), (2)を用い、物性値は固相の値を使用する。ただしこの場合凝固終了直後においては、カプセル中心付近の凝固潜熱は熱伝導の遅れのため一部はカプセル内を伝はん中であると考えられる。ここではこの熱量を比熱に含めて扱うこととした。すなわち、所定の温度差間でカプセルが放出すべき全熱量を Q_a とし、一方、凝固終了時まで放出した熱量を Q_s とすると、残りの熱量を所定の温度差間で放出せねばならないから、

$$Q_a - Q_s = mC'_{ps}(T_s - T_{\infty,1}) \quad \dots\dots\dots (16)$$

と書ける。ここに C'_{ps} は凝固終了時にカプセル内を伝はん中の潜熱量を考慮した固相の等価比熱であり、計算にはこの値を用いた。なお、5・1節における計算の場合 $C'_{ps}/C_{ps} = 1.29 \sim 1.30$ 程度である。

3・4 放出熱量の算出 n 段めカプセル単位長さ当たりの下流断面における周囲流体の持つ熱量 $Q_{n+1}(t)$ (W/m) は空気熱伝導率を λ_∞ とすると、

$$Q_{n+1}(t) = \rho_\infty u_\infty C_{ps} p T_{\infty,n+1}(t)$$

$$= R_e P_r \frac{p}{D} \lambda_{\infty} T_{\infty, n+1}(t) \dots\dots\dots (17)$$

となる。したがって1~ n 段全体よりの放出熱量は

$$Q_{n+1}(t) - Q_1 = R_e P_r \frac{p}{D} \lambda_{\infty} [T_{\infty, n+1}(t) - T_{\infty, 1}] \dots\dots\dots (18)$$

より求めることができる。ここに Q_1 は試験部入口の空気が保有する熱量である。

4. 計 算 方 法

カプセル壁温や周囲流体温度は式(8), (13)にみられるように, 時間的積分値を求める必要がある。台形積分による方法では時間きざみ Δt の大きさが解の精度に影響する。本計算では, $\Delta t = 0.01$ h としているが, この点について $\Delta t = 0.01 \sim 0.05$ h で検討した結果, 各段の放熱量の相違は最大3%程度であった。

凝固終了の条件は理論的には $A_n(t) = 0$ であるが, 式(4), (15)の分母が発散してしまうため計算では近似的に $A_n(t) < 0.001$ とした。

対象とした蓄熱材は n -オクタデカン ($n\text{-C}_{18}\text{H}_{38}$) であり, 凝固点は実測値より 27.8°C とした。また, 物性値は文献値⁽¹⁾⁽⁴⁾を用い温度に対して一定とし, 相変化による体積変化はないとした。以下の計算では, 直径 $D = 38$ mm のカプセル群がピッチ $p = 65.2$ mm なるごばん目状に配列された場合について取扱う。

5. 計 算 結 果 と 考 察

5.1 計算値と実験値の比較 図3(a)~(c)は, 3列7段のごばん目状に配列された蓄熱カプセル群が, 初期温度 $T_0 = 28.4^\circ\text{C}$ の液相状態より, 試験部入口温度 $T_{\infty, 1} = 10.0^\circ\text{C}$, $Re = 957$ の一様な空気流により冷却された場合の凝固(放熱)特性について, 計算結果と前報⁽⁵⁾で行った実験結果とを比較したものである。ここで計算に必要な $N_{um, n}$ は前報の実測値を用いている。

図3(a)は各部の温度変化であり, カプセル温度については1, 3, 5, 7段め ($n = 1, 3, 5, 7$) について示してある。カプセル壁温 $T_{w, n}(t)$ は, 放熱実験開始直後液相の過冷却現象を示しているが, その後徐々に温度が下がり, 入口温度 $T_{\infty, 1}$ に漸近してゆく。一方, カプセル中心温度は, $t = 3$ h 前後で凝固温度から急激に低下し, この点は凝固終了時刻を示している。これら二つの温度変化からも明らかなように, $n = 7$ におけるカプセルは $n = 1$ に比べて相変化が遅い。これは n が大きいほど周囲流体温度が高いためである。また第7段下流における周囲流体温度 $T_{\infty, n}(t)$ は放熱開始時が最大で以後徐々に低下しているが, これはカプセルの壁

温変化と対応している。計算値と実験値との比較について考えると, 放熱開始後のカプセル壁温は実験値のほうが低い。時間の経過とともにこれが逆転する傾向がみられる。これは, n -オクタデカンの固相の密度が液相より大きいため, 凝固時の体積減少により液相部に生じた真空部が, 固液界面の針状結晶へとり込まれつつ凝固するため(このことは融解時に観察により確認) 固相の熱伝導率がみかけ上小さくなっていること, さらに, 固体状蓄熱材の熱伝導率は温度が低いほど大きい特性をもっている⁽⁷⁾ためと考えられる。また, 凝固終了後の中心温度 $T_{c, n}(t)$ の低下割合は計算値のほうが緩やかとなっている。これは, 3.3節で導入した等価比熱 C_p の値として, 凝固終了時に伝ばん中の潜熱が放出し終ると蓄熱材の C_p を用いるべきであるが,

(a) 放熱過程の温度変化の比較

(b) 凝固量の比較

(c) 放熱量(カプセル単位長さ当たり)の比較

図 3

本計算では放熱終了まで $C_{p,s}$ = 一定としているためと考えられる。

図3(b)は凝固量について比較したものであり、 n が大きいほど凝固終了が遅くなる。図3(c)は、カプセル群全体よりの放熱量を示している。放熱開始時において放熱量が最大となり以後徐々に減少する。計算値と実験値の相違は図3(a)の説明と同様の原因によるものと思われる。これら図3(a)~(c)の比較において、計算結果は実験値をかなりよく予測できることが明らかとなった。

図4には、蓄熱カプセル初期温度が、凝固温度よりかなり高い場合についての結果を示してある。この場合放熱開始直後の液相では、自然対流の影響がかなり

大きく作用していることがわかる。すなわち、計算値はカプセルの壁温と中心温度とにかなりの差がみられるが、実験値のそれはずっと小さくっており、このことはさらに凝固終了時間にも影響を与えていると思われる。解析の3・1節では、自然対流の影響を無視できるとしたが、 T_o が凝固温度 T_s に近い場合を除いては適用できないことがわかる。この適用限界については明確に求めているが、斉藤ら⁽³⁾によれば融解時の液相の自然対流の影響は $Gr < 3 \times 10^3$ では無視できるとしている結果が参考になるであろう。

以上、解析による結果と実験結果との比較を行ってきたが、 T_o が T_s に近い条件においては、両者の一致の程度もよく工業的な有用性からすれば満足できるものと思われる。

5・2 50段からなるカプセル群よりの放熱特性

実用上の蓄熱槽では多数本のカプセルよりの伝熱が問題となるから、その放熱特性を明らかにすることは重要である。ここでは一例として $n=50$ の場合について計算を行い、放熱特性などを調べた。計算にあたってパラメータの決定は、前節で実験結果とよく一致し液

図4 カプセル初期温度が高い場合の比較

(a) 周囲流体温度

(b) カプセル壁温

(c) 凝固量

(d) カプセル単位長さ当たりの放熱量

図5 カプセル群の放熱特性, $Re=1000$, $T_o=27.8^\circ\text{C}$, $T_{w,1}=10.0^\circ\text{C}$

相の自然対流の影響の小さい条件を選び, $R_e=1\,000$, $T_o=27.8^\circ\text{C}(=T_s)$, $T_{\infty,1}=10.0^\circ\text{C}$ とした。また, 各段の平均熱伝達率の値は Zhukauskas⁽⁸⁾の式を用いた。

段数が多い場合の実験結果はあまり見当たらず, 比較はできないので定量的な妥当性は検討できないが, 少なくとも準定常法の適用に関しては, n が大きいほど相変化の速度が遅いので, その条件に合っていると見える。

図5(a)は, 周囲流体温度の各段における変化を, 時間 t をパラメータにとって示している。 t が小さい時は $T_{\infty,n}(t)$ は上に凸となっているが, 時間の経過とともに n の小さい所での放熱が終了し下に凸となっていく様子がわかる。また図中破線は凝固終了時間を示しているが, 凝固の終了とともに周囲流体温度は $T_{\infty,1}(=10.0^\circ\text{C})$ に急速に近づいていく。

図5(b)はカプセル壁温の時間的变化を示しており, 破線は凝固終了時間である。ここで $n=40$ に注目してみると, $t=0\sim 6\text{h}$ での $T_{w,40}(t)$ においては約 1°C/h 程度の割合で温度低下しているが, 凝固終了時の $t=7\sim 8\text{h}$ では著しい低下となっている。これは図5(a)でみられるように40段めに接近する流体温度がある程度低くなっているためと, 凝固終了に伴う潜熱放出の終了によるためであり, このような過程が1段めから順次進んでいく様子がわかる。

図5(c)は凝固量の時間的变化を示している。 $A_n(t)=0$ で凝固終了を表す。カプセル初期温度 T_o が凝固温度 T_s と等しいので, この場合 $t>0$ で各段とも凝固開始となるが, n が大きいほど凝固進行が遅く同時に凝固終了も遅いことが明らかである。これは図5(a)にみられるように, n が大きい段の $T_{\infty,n}(t)$ がある程度温度が低下するまで時間を要するためである。

図5(d)は各段の放熱量の時間的变化を示したものである。時間の経過に伴う変化をみると, $t<2\text{h}$ では,

n の小さい所での放熱量が大きい, $t>3\text{h}$ では放熱曲線に極大値をもち, それが徐々に n の大きい段へ変化してゆく様子がよくわかる。このことから, 蓄熱カプセル群からの時間的な放熱量の変化は, 全体のカプセルから均等に放熱されるのではなく, 局部的に放熱量最大となる段があり, それが時間の経過とともに n の大きいほうへ移動していくことが明らかとなった。

なお, 凝固開始前の液相の自然対流や過冷却の影響, あるいはカプセル群の融解(吸熱)過程の解析などは今後の検討課題であると思われる。

6. 結 言

蓄熱材として n -オクタデカンを用いたごぼん目状蓄熱カプセル群が空気流中におかれた場合の放熱特性について, 準定常法を適用した簡便な一解析法を提示し, 実験結果と比較検討した。その結果, カプセル(蓄熱材)初期温度が凝固温度にほぼ等しい場合は, 本解析法でよく近似できることがわかった。

さらに, 一例として50段からなるカプセル群よりの放熱特性を解析した結果, 局部的に放熱量が最大となる段があり, その前後のカプセルが放熱の中心的役割をになっていること, また, それが時間の経過とともに順次段数の大きいほうへと移動していく特性などを明らかにした。

文 献

- (1) 伊藤・三浦, 冷凍, 56-645 (昭56), 573.
- (2) 伊藤, 機論, 50-450, B (昭59), 556.
- (3) 斉藤・ほか3名, 機論, 49-440, B (昭58), 843.
- (4) 伊藤, 機論, 50-456, B (昭59), 1912.
- (5) 本論文集 204 ページ.
- (6) 川下, 熱伝導論, (昭50), 197, 生産技術センター.
- (7) 梁取・増田, 冷凍, 56-643 (昭56), 367.
- (8) 例えば, Eckert, E. R. G. and Drake, R. M. Jr., *Analysis of Heat and Mass Transf.*, (1972), 409, McGraw-Hill.