

シーム溶接をされた U 字型フィンの フィン効率と有効度

山崎 郭 滋*・八 田 桂 三

Fin Efficiency and Effectiveness of Seam-Welded U-Type Fin

By

Kakuji YAMASAKI and Keizō HATTA

Abstract: The steady state conduction equations of a seam-welded U-type fin were solved under the assumptions of constant heat-transfer coefficient all over the fin surface and of constant thermal resistance uniformly distributed between the non-welded portion of the fin base and the wall surface to calculate the temperature distribution of the fin, the fin efficiency, the fin effectiveness, and the over-all fin effectiveness corresponding to the total area of the wall surface. The effects of the heat-transfer coefficient, of the thermal resistance of the non-welded gap, and of the fin size upon those efficiencies were studied.

The temperature of the fin decreases rapidly along the direction of the fin length as the heat transfer from the fin surface to the surrounding fluid becomes much or as the thermal resistance of the non-welded gap large.

The fin efficiency increases as the heat transfer, the thermal resistance, or the fin height decreases. The efficiency of the fin with large heat-transfer coefficient is improved by the increase of the width of the non-welded portion of the fin base, while the fin with small heat-transfer coefficient has the opposite tendency. But in case that the heat transfer from the fin surface is much (the dimensionless quantity of heat transfer M larger than about from 0.3 to 1.0), it is nonsense that such a fin is used. The dimensionless quantity of thermal resistance of gap N has little effect upon the fin efficiency, and for the values of N larger than about 0.2 the fin efficiency is almost constant.

Upon the fin effectiveness the heat-transfer coefficient and the thermal resistance of the nonwelded gap have the same effect as upon the fin efficiency. The fin effectiveness increases up to an asymptotic value as the width of the non-welded portion decreases or as the fin height increases. Accordingly an appropriate fin height exists, and for the range of the heat-transfer coefficients as they occur under usual engineering conditions, the dimensionless fin height L_2 is about from 2 to 10 for air and about from 1 to 3 for water.

The over-all fin effectiveness has the same tendency as the fin effectiveness, and approaches to an asymptotic value as the fin pitch is made large under the condition of the constant values of the dimensionless quantity of heat transfer M , the dimensionless quantity of thermal resistance of gap N , the width of the non-welded portion, and the fin height.

* 内地研究員，高知工業高等専門学校 機械工学科

概 要

シーム溶接をされた厚さの薄いフィンに関して、フィン表面に一定の熱伝達率およびフィン底部とフィン取付板との溶接されていない部分の間隙に一樣な熱抵抗を仮定して、その温度分布、フィン効率、フィン有効度、フィン取付板全体に対する有効度（総フィン有効度）を計算し、熱伝達率、すなわちフィン表面からの放熱量（放熱無次元量 M ）、間隙熱抵抗（間隙熱抵抗無次元量 N ）および無次元フィン形状（ L_1, L_2, L ）がこれらにどのように影響するかを調べた。

フィンの長さ方向（横方向）の温度分布は、フィン表面からの放熱量が多いか、または間隙熱抵抗が大きくなるにしたがって急激に降下する。

フィン効率はフィン表面からの放熱量、間隙熱抵抗あるいはフィン高さが減少するにしたがって増加する。放熱量が非常に大きい場合には、フィン底部の溶接をされていない非溶接部の幅が大きくなるほどフィン効率は多少よくなるが、放熱量が小さい場合は逆となる。しかし放熱量の大きい（ M が 0.3~1.0 より大きい）場合にはこの様なフィンを付けること自身あまり意味がない。間隙熱抵抗のフィン効率への影響はあまり大きくはなく、間隙熱抵抗無次元量 N がほぼ 0.2 を越すとフィン効率はほとんど変化しなくなる。

フィン有効度については、フィン有効度と M あるいは N の関係はフィン効率と M あるいは N の関係と同じ傾向を有すること、またフィン有効度はフィンの非溶接幅が減少するかあるいはフィン高さが増すと増加するが、しかしその値は飽和することがわかった。したがって最適フィン高さが存在し工業上普通使われる場合空気では無次元フィン高さ L_2 は 2~10、水では 1~3 くらいの範囲内にある。

総フィン有効度はフィン有効度と同じ傾向を示し、かつ M, N , 非溶接幅およびフィン高さを一定にしてフィンピッチを大きくしていくと、漸近的に一定値に近づく。

記 号

b	フィンの縦方向の長さ
t	フィンの厚さ
l	フィンピッチの半分
l_0	シーム溶接幅の半分
l_1	フィン底部の非溶接幅の半分
l_2	フィン高さ
l'	フィン幅の半分
o	座標の原点（フィンの非溶接部の始点）
o'	フィンの中心点
x	原点 o からのフィンの長さ方向に沿った座標
x_1	フィンの非溶接部の終点の座標
x_2	フィンの最先端の座標
X	無次元座標（代表長さ l_0 ）
X_1	フィンの非溶接部の終点の無次元座標

X_2	フィンの最先端の無次元座標
L	無次元フィンピッチの半分 (代表長さ l_0)
L_1	無次元半非溶接幅 (代表長さ l_0)
L_2	無次元フィン高さ (代表長さ l_0)
L'	無次元フィン幅の半分 (代表長さ l_0)
T	点 x におけるフィンの温度
T_w	フィン取付板の温度
T_∞	周囲の流体の主流温度
θ	点 x におけるフィンと周囲の流体との無次元温度差 (代表温度差 $T_w - T_\infty$)
M	放熱無次元量 ((6) 式で定義)
N	間隙熱抵抗無次元量 ((6) 式で定義)
P	M と N で表わされる無次元量 ((6) 式で定義)
h	フィン表面と周囲の流体の間の熱伝達率
k	フィンの熱伝導率
r	フィン底部の非溶接部の間隙熱抵抗
η	フィン効率 ((9) 式で定義)
ϕ	フィン有効度 ((11) 式で定義)
Φ	総フィン有効度 (フィン取付板全体に対する, すなわち単位ピッチ当りの有効度 ((13) 式で定義))

1. ま え が き

熱交換器などにおいて見られるように, 金属壁を通して一つの流体から他の流体への伝熱量を増加するために, 伝熱面積を増大しようとしてフィンが用いられることは周知の通りである. フィンの種類も縦型フィン, 横型フィン, らせん型フィンなど数多くある [1]. フィン効率あるいはフィン有効度に関する研究も多数表わされている注 [1]. しかしながらどの研究においても, フィンはそのフィン取付板との間に熱抵抗がないと考えられており, シーム溶接フィンのようにフィン取付板との間に一部熱抵抗が存在するようなものは取り扱われていない. U字型シーム溶接フィン, すなわちみぞ型鋼板の底部中央をフィン取り付け板にシーム溶接をしたシーム溶接フィンの場合には, 溶接されなかったフィンの底部が存在しており, そこではこのフィン底部とフィン取付板とは不完全な接触状態にある. したがってこのフィン底部とフィン取付板との間, すなわちフィン底部の非溶接部には相当大きな熱抵抗

注 [1] たとえば, 対流放熱フィンに関してフィン効率を種々の形のフィンに適用できる一般式で表わした Gardner の研究 [2]. 棚沢による種々のフィンのフィン有効度を求めるための計算図表の作製 [3]. デジタル計算機を用いて内部発熱を伴うふく射対流フィンの温度分布とフィン効率を求めた岡本の研究 [4]. 同じく岡本のフィン厚さを考慮した場合のフィン付伝熱面の解析 [5]. Avrami と Little による長方形フィンの温度分布および冷却効果に関する理論的研究 [6]. Knudsen と Katz による環状フィン付管の熱伝達と圧力降付に関する実験的研究 [7]. 一様な厚さの環状円盤あるいはフィンの放熱に関する Murray の理論的研究 [8] などがある.

が生ずるものと思われる。

近年溶接工法としてシーム溶接が相当普及してきており、これによってフィンを取り付ける方法は工業上簡単で有用な方法であるにもかかわらず、シーム溶接フィンに関する研究は我々の知るかぎりではまだどこにも見当らない。我々はU字型シーム溶接フィンの伝熱に関する実験を行なうことになったので、この様なフィンの伝熱特性の見当をつけるために、一般にこのような場合によく用いられるフィン効率、フィン有効度などを計算した。計算はフィン底部の非溶接部に一様な熱抵抗を仮定し、またフィン表面の熱伝達率はフィン効率、フィン有効度などの計算において通常よく行なわれるように、フィン表面全体を通じて一定の熱伝達率を仮定して行なった。シーム溶接部にも熱抵抗を考慮することも考えたが、実用上必要ないとみられたのでこれを無視した。

計算された結果は、このようなU字型シーム溶接フィンの設計の際の指針として、概略の見当をつけるためにもなにかしかなら参考になると思われるので、それをここに報告する。

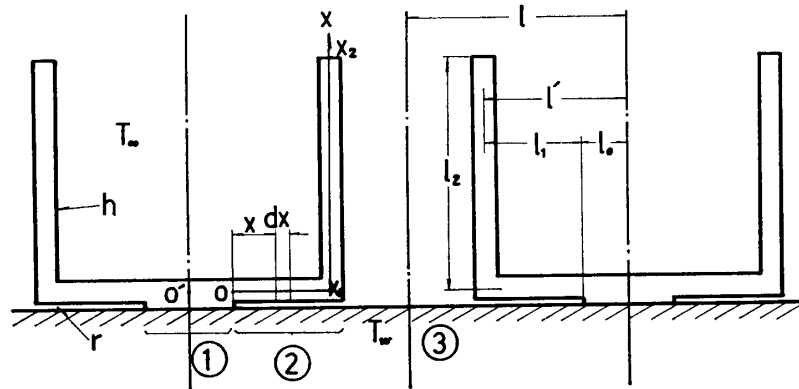
2. 温度分布、効率および有効度

シーム溶接をされたフィンの温度分布、フィン効率などを求めるための基礎式を誘導するにあたり、次に述べるような仮定を設ける。

- (1) フィンの放熱量および温度分布は時間に関係せず定常現象である。
- (2) フィンの材料は熱的に等質、等方である。
- (3) フィンの厚さはフィン高さに比べて十分小さく、したがってフィン表面に垂直な方向の温度こう配は無視できる。すなわちフィン断面内での温度分布は一様である。
- (4) フィンの縦方向の長さはその方向への熱流束が無視できるぐらい十分に長い。
- (5) フィンの熱伝導率は一定である。
- (6) 熱伝達率はフィン表面全体を通じて一定である。(ただしここで熱伝達率とはフィン表面から熱伝導、対流、ふく射によって流体に放熱する熱流束をフィン表面の温度と流体の主流温度との差で除した値をいう。)
- (7) フィン取付板の温度は一様である。
- (8) フィンの最先端からの放熱量はフィン側面からの放熱量に比して無視できる。すなわちフィン最先端は断熱されている。
- (9) シーム溶接部の温度はフィン取付板の温度と同じである。
- (10) シーム溶接をされていないフィン底部とフィン取り付け板との間にはある一定の熱抵抗が一様に存在する。

これらの仮定のうち(1)から(8)までは、フィン効率やフィン有効度などを計算する場合一般に用いられている。(9)の仮定は、フィンの厚さが薄く、シーム溶接をされた部分は非常によくフィン取り付け板とくっついているので妥当であろう。(10)の仮定については我々は次のように考える。もしこのフィン底部がフィン取付板と完全に離れており、しかもその間隙が小さければ、この間隙内で対流による熱伝達は生じていないと考えてよく、したがってこの場合、フィン取付板からこのシーム溶接をされていないフィン底部へ伝わる

熱はこの間隙内の流体を通して主として熱伝導で伝えられる。間隙の大きさを d 、間隙内の流体の熱伝導率を k' とすれば、このとき間隙の熱抵抗は d/k' となる。さらにこの間隙が大きくなった場合には、この間隙内に対流が生じ、その結果フィン底部への熱伝達が間隙の小さい場合よりもよくなることもありうる。あるいは熱を周囲流体へ奪われるような流れが間隙内に生じれば、フィン底部への熱の伝達は悪くなり熱抵抗が大きくなることもありうるであろう。一方もしこの溶接をされていないフィン底部がフィン取付板と幾分金属的に接触していたならば、この非溶接部の熱抵抗は上の場合よりも小さくなる。実際には非溶接部ではフィン底部とフィン取付板とは不規則にところどころ接触していたり、間隙の大きさも一様とは限らない。したがって実際の熱抵抗の値としては上に述べたような場合のある中間の値を取り、また熱抵抗が非溶接部全体に一樣に分布するとは限らない。しかしそのような場合でも計算に用いた上述のほかの諸仮定を考えると、非溶接部全体の熱抵抗の平均値を用い、非溶接部全体に一樣にこの熱抵抗があるものとして取り扱って十分であると思う。



第 1 図 シーム溶接をされたフィンを単純化したモデルの断面図
①シーム溶接部、②非溶接部、③フィン取付板、 h : 表面熱伝達率、 r : 間隙熱抵抗、 T_{∞} : 主流温度、 T_w : フィン取付板温度

以上の仮定のもとにフィンの温度分布をきめるための基礎式を導く。第 1 図に示すような長さ dx のフィンの一部について熱量のバランスを考える。点 x においてフィンの中を伝導によって伝わる熱流量を Q 、点 $x+dx$ におけるそれを $Q+dQ$ 、シーム溶接をされていないフィン底部とフィン取付板との間の間隙を通して dx の部分に入ってくる熱流量を Q' 、長さ dx の部分のフィン表面から周囲の流体へ奪われる熱流量を Q'' とすれば

($0 \sim x_1$) の部分については

$$Q - (Q + dQ) + Q' = Q'' \quad (1)$$

($x_1 \sim x_2$) の部分については

$$Q - (Q + dQ) = 2Q'' \quad (2)$$

の関係がある。フィンの熱伝導率を k 、フィンの厚さを t 、フィンの縦方向の長さを b と

すれば, $dQ = ktb(d^2T/dx^2)dx$, Q' は非溶接部の熱抵抗 (これを間隙熱抵抗と名づける) を r とすれば, $Q' = b(T_w - T)/r \cdot dx$, Q'' はフィン表面の熱伝達率を h とすれば, $Q'' = hb(T - T_\infty)dx$ と表わされるから, 仮定によりフィンの温度分布に関して次の諸式が成り立つ.

$$\left. \begin{aligned} (0' \sim 0) \text{ に対して} \quad & T = T_w \\ (0 \sim x_1) \text{ に対して} \quad & kt \frac{d^2T}{dx^2} + \frac{T_w - T}{r} - h(T - T_\infty) = 0 \\ (x_1 \sim x_2) \text{ に対して} \quad & kt \frac{d^2T}{dx^2} - 2h(T - T_\infty) = 0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

境界条件は点 x_1 で温度および熱流量が連続であること, 点 x_2 では仮定 (8) より, 次のようにかける.

$$\left. \begin{aligned} x = x_1 \text{ で} \quad & (T)_{x=x_1-0} = (T)_{x=x_1+0} \\ & \left(\frac{dT}{dx} \right)_{x=x_1-0} = \left(\frac{dT}{dx} \right)_{x=x_1+0} \\ x = x_2 \text{ で} \quad & \frac{dT}{dx} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

つぎに温度の基準に $(T_w - T_\infty)$, 長さの基準にシーム溶接部の幅の半分 l_0 を用いて温度と長さを次のように無次元化する.

$$\theta = \frac{(T - T_\infty)}{(T_w - T_\infty)}, \quad X = \frac{x}{l_0}$$

このとき (3) 式と (4) 式は次のように無次元表示される.

$$\left. \begin{aligned} (0' \sim 0) \text{ に対して} \quad & \theta = 1 \\ (0 \sim X_1) \text{ に対して} \quad & \frac{d^2\theta}{dX^2} - P^2\theta + \frac{M^2}{2N} = 0 \\ (X_1 \sim X_2) \text{ に対して} \quad & \frac{d^2\theta}{dX^2} - M^2\theta = 0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\text{ただし} \quad M = l_0 \sqrt{\frac{2h}{kt}}, \quad N = \frac{r}{1/h}, \quad P = M \sqrt{\frac{1+N}{2N}} \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} X = X_1 \text{ で} \quad & (\theta)_{X=X_1-0} = (\theta)_{X=X_1+0} \\ & \left(\frac{d\theta}{dX} \right)_{X=X_1-0} = \left(\frac{d\theta}{dX} \right)_{X=X_1+0} \\ X = X_2 \text{ で} \quad & \frac{d\theta}{dX} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

無次元量 M は, フィン表面からの放熱量とフィン内の伝導熱量との比を支配する無次元量であり, フィンの問題において非常にしばしば表われる量であって, 我々はこれを放熱無次元量と呼ぶことにする[2]. N はフィン底部の非溶接部の間隙熱抵抗とフィン表面からの放熱の熱抵抗との比を表わし, シーム溶接フィンを特徴づけている無次元量である. 我々は

注 [2] 岡本は対流による熱伝達率 (h) を用いて対流無次元量と名づけている [4].

これを間隙熱抵抗無次元量と呼ぶことにする. P は M と N の関数であり, フィン表面からの放熱量と非溶接部の間隙を通る熱量との和とフィンの伝導熱量との比を支配する無次元量である.

境界条件 (7) 式とともに基礎式 (5) を解くと, フィンに沿った温度分布が次のように得られる.

$$\left. \begin{aligned} & (0' \sim 0) \text{ に対して} \quad \theta = 1 \\ & (0 \sim X_1) \text{ に対して} \\ & \theta = \frac{N}{1+N} \left\{ \cosh PX - \frac{M(\cosh PL_1 + 1/N) \sinh ML_2 + P \sinh PL_1 \cosh ML_2}{M \sinh PL_1 \sinh ML_2 + P \cosh PL_1 \cosh ML_2} \sinh PX \right. \\ & \quad \left. + \frac{1}{N} \right\} \\ & (X_1 \sim X_2) \text{ に対して} \\ & \theta = \frac{P(\cosh PL_1 + N)}{(1+N)(M \sinh PL_1 \sinh ML_2 + P \cosh PL_1 \cosh ML_2)} \cosh M(X_2 - X) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

ただし $L_1 = l_1/l_0$, $L_2 = l_2/l_0$

L_1 はフィン底部のシーム溶接をされていない部分の無次元幅の半分であり, 無次元半非溶接幅と呼ぶことにする. L_2 は通常呼ばれているような無次元フィン高さである.

フィン効率を, 求められた温度分布の場合のフィンからの放熱量とフィン全体がフィン取付板の温度と同じ温度であると仮定した場合のフィンからの放熱量との比, すなわちフィンの実際の熱伝導率の場合の放熱量と熱伝導率が無限大であると仮定したときの放熱量との比として定義すると, フィン効率 η は次のように表わされる.

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{hbl_0(T_w - T_\infty) + \int_0^{x_1} hb(T - T_\infty)dx + \int_{x_1}^{x_2} 2hb(T - T_\infty)dx}{hb(l_0 + l_1 + 2l_2)(T_w - T_\infty)} \\ &= \frac{1 + \int_0^{x_1} \theta dX + 2 \int_{x_1}^{x_2} \theta dX}{1 + L_1 + 2L_2} \end{aligned} \quad (9)$$

この定義は原理的には通常のフィン効率の定義にしたがっているけれども, 溶接された部分を通常のフィンのように壁面と見なさずフィンの一部と考えて効率を定義した. この方がシーム溶接をされたフィンを扱う場合, フィン効率の定義としては妥当である.

(8) 式を (9) 式に代入すると, フィン効率が次のように表わされる.

$$\begin{aligned} \eta &= \left[\frac{N}{1+N} \left\{ 2P/M \sinh ML_2 (1/N \cosh PL_1 + 1) - 1/P (\cosh PL_1 - 1) \{ M \sinh ML_2 (\cosh PL_1 \right. \right. \\ & \quad \left. \left. + 1/N) + P \sinh PL_1 \cosh ML_2 \} \right\} [M \sinh PL_1 \sinh ML_2 + P \cosh PL_1 \cosh ML_2]^{-1} + \right. \\ & \quad \left. 1/P \sinh PL_1 + L_1/N \right\} + 1 \Big] (1 + L_1 + 2L_2)^{-1} \end{aligned} \quad (10)$$

次にフィン有効度を通常の定義のように, 1 個のフィンからの放熱量とフィンが無い場合のフィン 1 個当りのフィン取付板からの放熱量の比として定義すると, フィン有効度 ϕ は次のように表わされる.

$$\phi = \frac{hbl_0(T_w - T_\infty) + \int_0^{x_1} hb(T - T_\infty)dx + \int_{x_1}^{x_2} 2hb(T - T_\infty)dx}{hb(l_0 + l_1)(T_w - T_\infty)}$$

$$= \frac{1 + \int_0^{x_1} \theta dX + 2 \int_{x_1}^{x_2} \theta dX}{1 + L_1} \quad (11)$$

(9) 式を用いるとフィン有効度 ϕ がフィン効率 η によって次のように表わされる。

$$\phi = \left(1 + \frac{2L_2}{1 + L_1}\right) \eta \quad (12)$$

さらに同じようにして、フィン取付板の全面積にもとずいた有効度、これはとりもなおさずフィン付面の単位ピッチ当りの有効度になるが、これを総フィン有効度 Φ として定義すると、

$$\Phi = \frac{2\{hb(l - l_1)(T_w - T_\infty) + \int_0^{x_1} hb(T - T_\infty)dx + \int_{x_1}^{x_2} 2hb(T - T_\infty)dx\}}{2hbl(T_w - T_\infty)}$$

$$= \frac{L - L_1 + \int_0^{x_1} \theta dX + 2 \int_{x_1}^{x_2} \theta dX}{L} \quad (13)$$

ただし $L = l/l_0$

L は相隣る二つのフィンの中心間の無次元距離、すなわち無次元フィンピッチの半分である。(9) 式あるいは (11) 式を用いると総フィン有効度 Φ がフィン効率 η あるいはフィン有効度 ϕ によって次のように表わされる。

$$\Phi = 1 + \frac{(1 + L_1 + 2L_2)\eta - L_1 - 1}{L} = 1 + \frac{(1 + L_1)(\phi - 1)}{L} \quad (14)$$

つぎにこれらの関係を用いてフィンの温度分布、フィン効率、フィン有効度、総フィン有効度が放熱無次元量 M 、間隙熱抵抗無次元量 N によりどのような影響を受けるか、また、それはフィンの形状 L_1 , L_2 , L によりどのように異なるかについて調べる。

まず上述のことを調べるに先だって、放熱無次元量 M と間隙熱抵抗無次元量 N の値について、實際上概略どのくらいの値であるかを見積ってみる。流体として、暖房用あるいは給湯用の熱交換器の場合などに主として用いられる空気と水の場合を考えてみる。工業上用いられる熱伝達率の概略の値として、強制対流熱伝達率の値は Eckert と Drake によると空気に対して $10 \sim 250 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ 、水に対して $500 \sim 5000 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ くらいの範囲であるが[9]、ふく射も含めた場合にはこれよりも幾分増加すると思われる。フィン材料としては、鉄板、鋼板、不銹鋼板が主として用いられているが、参考のためにアルミと銅についてもあためてみる。シーム溶接を行なうときの電極の幅は 8 mm 前後のものがよく用いられているようである。幅 8 mm の電極を用いてシーム溶接を行なった場合、溶着された部分の幅、すなわちシーム溶接幅は約 6 mm であり、したがって l_0 の値としてはとりあえず 3 mm を用いた。フィン底部の溶接をされていない部分とフィン取付板との間の熱抵抗値の決定は非常にむづかし問題であるが、非溶接部は金属的な接触よりはむしろ実際には間隙があるように思われる。特にフィン取付板が円筒の場合にはこの間隙は大きい。ここでは 0.05 mm

および 0.1 mm の一定の間隙が静止流体でみたされ、その流体の中を伝導で熱が伝わるものと仮定した。またフィンの厚さは 1 mm とする。実際に用いられるフィンの厚さは 1~1.5 mm くらいのもので多いようである。以上のような仮定をして M と N の値を計算すると第 1 表および第 2 表のようになる。

第 1 表 放熱無次元量 M の概略値

		熱 伝 達 率 $h(\text{kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C})$														
フィン材料	熱伝導率 $k(\text{kcal/mh}^\circ\text{C})$	← 空 気 →								← 水 →						
		10	50	100	200	300	400	500	700	1000	1500	2000	3000	4000	5000	6000
鉄	50	0.060	0.13	0.19	0.27	0.33	0.38	0.42	0.50	0.60	0.74	0.85	1.04	1.20	1.34	1.47
鋼 (1.0 C)	40	0.067	0.15	0.21	0.30	0.37	0.42	0.47	0.56	0.67	0.82	0.95	1.16	1.34	1.50	1.64
クロム鋼 (5~10Cr)	30	0.077	0.17	0.24	0.35	0.42	0.49	0.55	0.65	0.77	0.95	1.09	1.34	1.55	1.73	1.89
” (23 Cr)	20	0.095	0.21	0.30	0.42	0.52	0.60	0.67	0.79	0.95	1.16	1.34	1.64	1.90	2.12	2.32
アルミニウム	200	0.030	0.067	0.095	0.130	0.160	0.190	0.220	0.250	0.300	0.370	0.420	0.520	0.600	0.670	0.74
銅	320	0.024	0.053	0.075	0.110	0.130	0.150	0.170	0.200	0.240	0.290	0.340	0.410	0.470	0.530	0.58

ただし、 $l_0=3\text{ mm}$, $t=1\text{ mm}$, 熱伝導率の値は鋼については炭素含有量 1.0% の場合の 20°C における概略値, クロム鋼はクロム含有量 5~10% と 23% の場合の 20°C における概略値, 残りの三つは温度 300°C における概略値である。

第 2 表 間隙熱抵抗無次元量 N の概略値

間隙の大きさ $d(\text{mm})$	間隙熱抵抗 $r=d/k'$ ($\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C/kcal}$)	空 気							
		熱伝達率 $h(\text{kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C})$							
		10	50	100	200	300	400	500	
0.05	1.25×10^{-3}	0.013	0.063	0.13	0.25	0.38	0.50	0.63	
0.1	2.50×10^{-3}	0.025	0.13	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	

間隙の大きさ $d(\text{mm})$	間隙熱抵抗 $r=d/k'$ ($\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C/kcal}$)	水								
		熱伝達率 $h(\text{kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C})$								
		500	700	1000	1500	2000	3000	4000	5000	6000
0.05	9.09×10^{-3}	0.045	0.064	0.091	0.14	0.18	0.27	0.36	0.45	0.55
0.1	1.82×10^{-4}	0.091	0.13	0.18	0.27	0.36	0.55	0.73	0.91	1.09

ただし、空気の熱伝導率 $k'=0.04$ (約 330°C), 水の熱伝導率 $k'=0.55$ (約 50°C) を用いた。

これらの表からわかるように M の値としては 0.02~2.4, N の値としては 0.01~1.3 の範囲を検討すれば十分である。したがってフィン効率, フィン有効度などの吟味もほぼこれらの範囲内で行なう。

つぎにフィン底部の非溶接部の幅 $2l_1$ に関して少し検討しておく。無次元半非溶接幅 L_1 のフィン効率などに対する影響は、あとで述べるようにフィン有効度に対してはかなり影響があるが、フィン効率および総フィン有効度に対してはあまり影響を与えない。しかしフィ

ンの効果から考えると L_1 はできる限り小さくした方がよいが、フィンをシーム溶接によって取付ける場合、非溶接部の幅をあまり小さくすると溶接電極とフィンの垂直部（高さ）がショートするなどのシーム溶接の工作上、ある程度の非溶接部の幅がどうしても必要である。フィン高さにもよるが概略幅 8 mm の電極に対して最小限フィン幅 $2l'$ は 15 mm くらい必要であり、したがってこの場合のシーム溶接幅の半分 l_0 が 3 mm に対して、無次元半非溶接幅 L_1 は 1.5 となる。電極幅が大きくなれば l_1 もそれに従って幾分大きくしなければならないが、 l_0 に比例して l_1 を大きくする必要はないので $L_1 = l_1/l_0$ は幾分小さくなる。これらの理由により L_1 を固定してフィンの効果をうんぬんする場合には主として $L_1 = 1.0$ の場合を扱った。なおのちに示されるけれども、 L_1 によってフィン効率と総フィン有効度はあまり変わらず、またフィン有効度も L_1 が 1.0 以上ではそれほど大きくは変化しない。

(1) 温度分布とフィン効率

まずフィンの長さ方向に沿った温度分布について簡単に調べてみる。さて上に述べたような考察をもとに考えると、工業上ごく普通の場合に適用できる熱伝達率の値として、空気の場合ふく射も含めて $50 \sim 300 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ 水の場合 $700 \sim 3000 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ くらいまでの範囲と考え、フィン材料は鉄、鋼およびクロム鋼として、このとき M の値は空気に対してほぼ $0.1 \sim 0.6$ 、水に対して $0.5 \sim 1.7$ 、 N の値は空気に対して $0.06 \sim 0.8$ 水に対して $0.06 \sim 0.6$ くらいの範囲内にある。 M と N のこれらの範囲内で、フィンの効果に対する無次元フィン高さ L_2 の適当な値は後で示す第 10 図と第 11 図からわかるように、空気の場合ほぼ $2 \sim 10$ 水の場合 $1 \sim 3$ の範囲にわたっている。したがって L_2 を固定する場合には代表として主として以後その値を 2.0 かまたは 5.0 にとることとする。

これまでに述べた議論に従って温度分布に対して $L_1 = 1.0$ 、 $L_2 = 5.0$ の場合において、 N の代表として $N = 1$ および $N = 0.1$ のときの例と、 $L_1 = 1.0$ 、 $L_2 = 2.0$ 、 $N = 0.1$ の例を第 2 図に示す。

ここで $M = l_0 \sqrt{2h/kt}$ において l_0 、 k 、 t は通常一定であるので M の大小は熱伝達率の大小、すなわちフィン表面からの放熱量の大小を表わしており、また $N = r/(1/h)$ の大小は h すなわち M が一定のもとでは間隙熱抵抗の大小を表わしているということを特に注意しておく。

第 2 図から M が大きくなるかあるいは N が大きくなって、フィン表面からの放熱量が増大していくとフィンに沿った温度降下は急激になり、そしてフィン最先端の温度もより低くなるが、フィン先端部の温度はフィン高さが一定ならばおもに M により決まり N ではあまりかわらないことがわかる。もちろんフィン高さが高いほど先端の温度も低い。そして $L_2 = 5.0$ の場合には最先端の温度は M がほぼ 1.0 くらいになると周囲の流体の温度と同じになり、 M が 1.0 以上の場合にはフィン先端部は無効となりフィンとして働くところ、すなわちフィンの有効長さが短くなる。また N が小さいとフィン底部の非溶接部の温度降下はより小さくなるが、これは非溶接部の熱抵抗が小さくなることを考えれば明らかである。

第 3 図は $L_1 = 1.0$ および $L_1 = 2.0$ の場合に対してそれぞれ L_2 が 2.0, 5.0, 10.0 のときの η と M の関係を N をパラメータとして示している。これらの図からわかるように M の値が大きく、すなわちフィン表面からの放熱量が多くなればなるほどフィン効率は悪くな

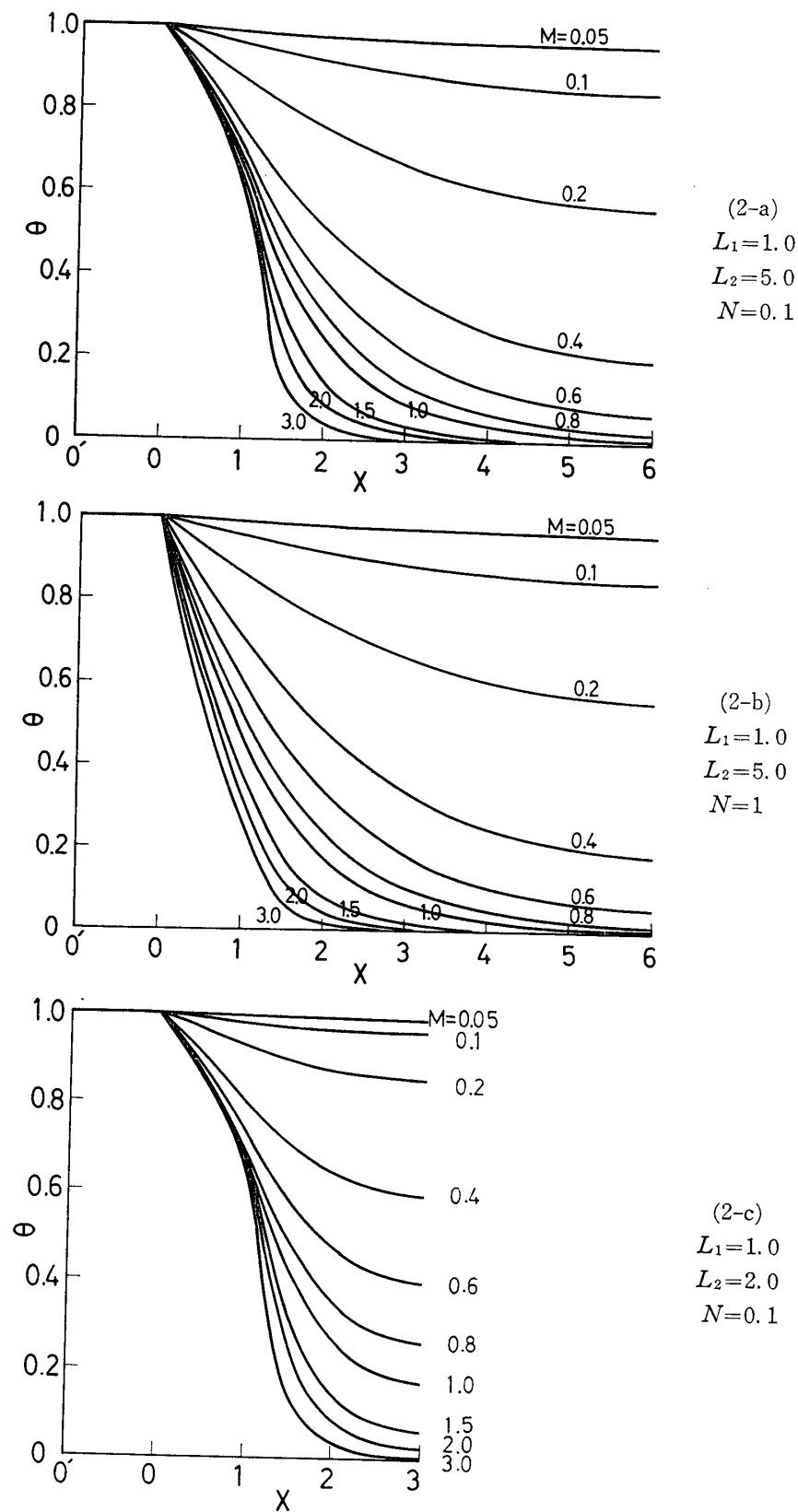
り、第 2 図の結果からも分るように M が 1.0 くらいまでは効率は急速に減少し、ほぼ 1.0 を越すとその減少は非常に緩慢になる。また L_1 すなわち非溶接部の幅が一定のときは間隙熱抵抗あるいはフィン高さが小さい方が効率は大きく、そしてフィン高さが小さくなるほど M に対する効率の減少の仕方も小さいことがわかる。フィン高さが小さいとフィン先端での温度降下は小さくフィンとして働くところの有効な長さのフィン全長に対する割合が大きくなり、したがって効率もよくなる。当然のことながら、フィン表面からの放熱量が少ない場合ほどフィンがフィンとしての効果を発揮するということである。

フィン効率に対する L_1 , L_2 および N の影響についてもう少し詳細に調べてみよう。第 4 図には η と L_1 の関係が M をパラメータとして二三の L_2 と N の値に対して示されている。これらの図から、フィン表面からの放熱量が少ないときは、非溶接部の幅（非溶接幅）が大きくなるにしたがって効率は悪くなるが、放熱量が多くなると非溶接幅の増大にともなう効率が増大しはじめることがわかる。この様子は間隙熱抵抗が小さいほど著しいが、効率変化の値はそれほど大きくはない。間隙熱抵抗が小さいほど非溶接部の温度降下は小さく（第 2 図参照）、さらに非溶接幅が大きくなるほどこの部分からの周囲の流体への放熱量は増加し、フィン高さの部分からの放熱量に比較して非溶接部からの放熱がだんだん支配的になってくる。この傾向はフィン表面の熱伝達率が大いほど著しくなり、その結果非溶接幅の増大にともなう効率の増大が生じるものと思われる。フィン効率が良くなるといえども、非溶接幅を大きくすることはフィンを取付けたために放熱量が増すかどうかというフィンの有効さの面から見れば、あとで示されるようになりかなり悪い結果をもたらすということに注意しておく。

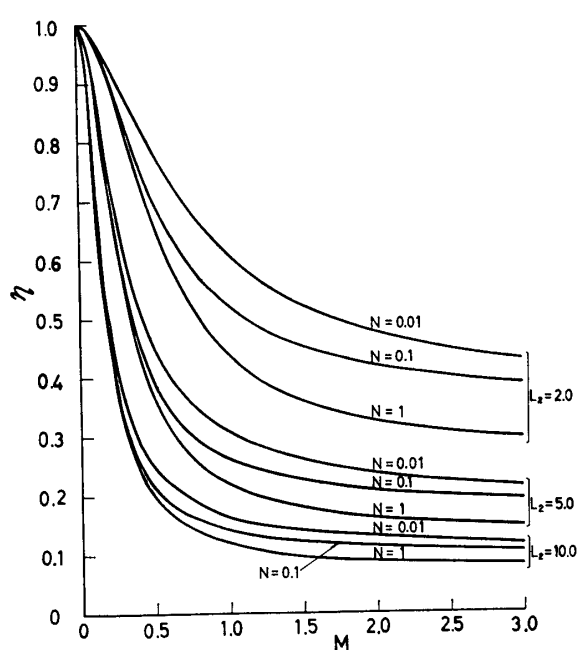
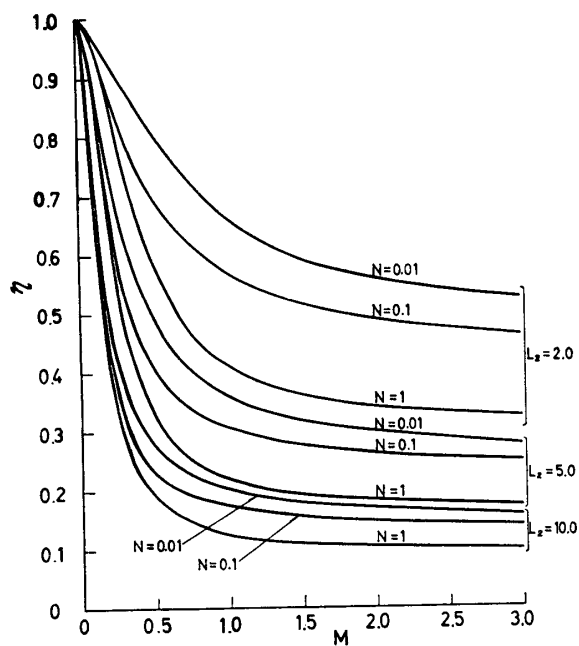
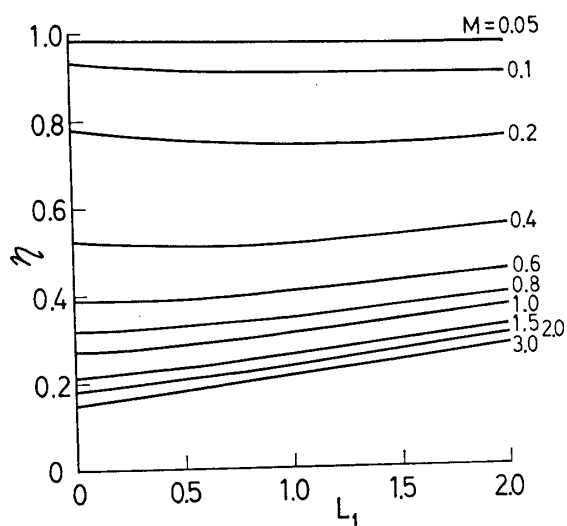
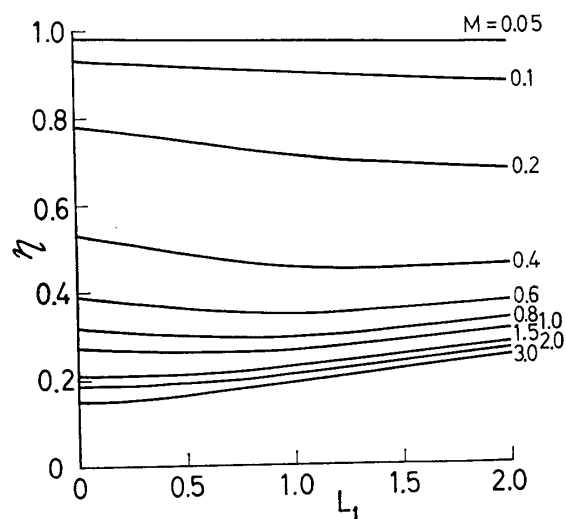
M をパラメータとして L_2 にともなう η の変化を L_1 と N の数種の値に対して示したのが第 5 図である。フィン高さによる効率の変化はフィン表面からの放熱量が少ない間は比較的緩慢であるが、放熱量が多くなるとフィン高さが小さい間に効率は急激に減少して行き、そして漸次その減少は緩慢になっていくことがこれらの図よりわかる。この傾向は種々の L_1 と N の値に対してほとんど同じである。 M の値が大きい場合には第 2 図に示されているように周囲の流体の温度に近いフィン先端部の長さが増加し、フィンとしての有効な長さが減少するので効率も悪くなる。したがってフィン表面からの放熱量が多い場合には特にフィン高さはできるだけ小さい方がフィンとしての効果を発揮する。ただしフィンを付けることにより放熱量が増大するかどうかの有効度に関しては後で述べる。

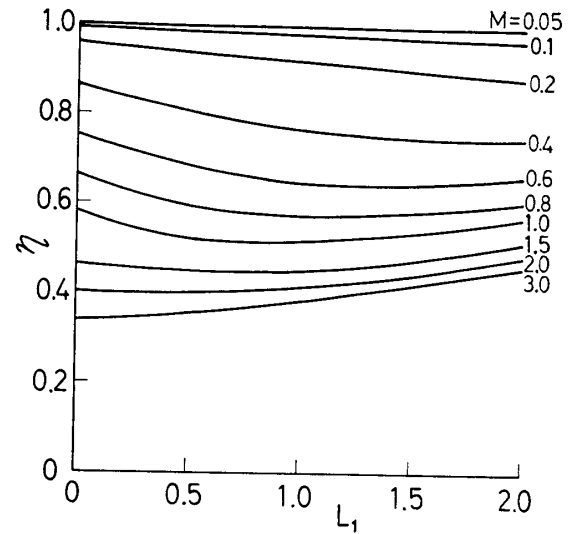
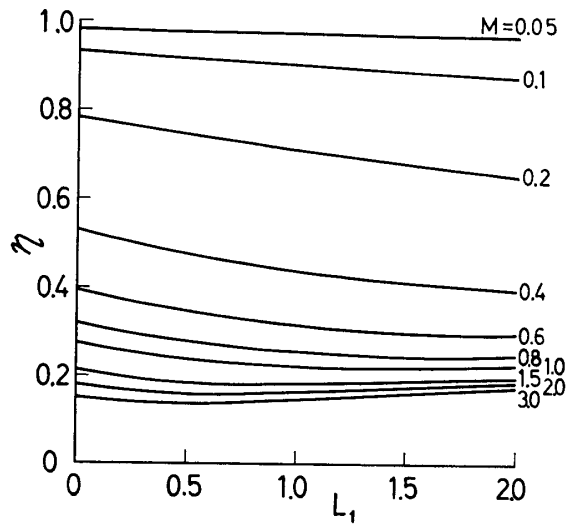
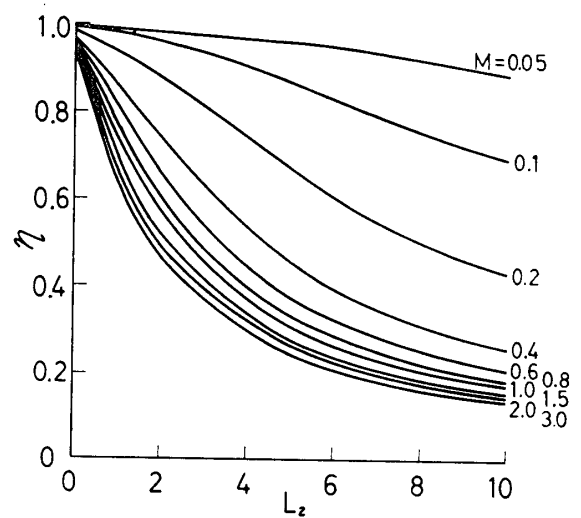
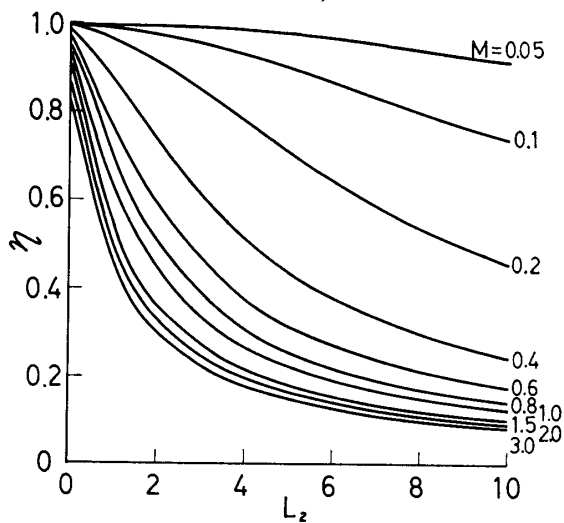
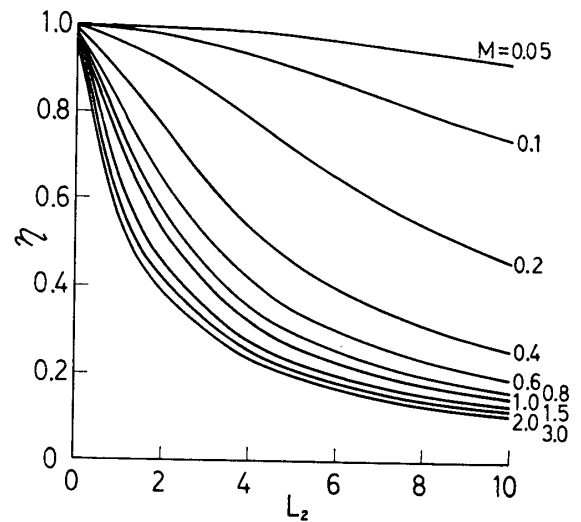
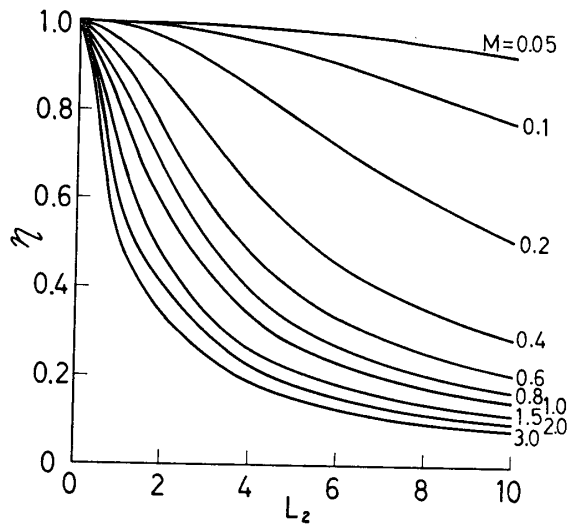
ここで $L_1=0$ の場合には当然のことながら N の値を考える必要はない。この場合のフィン効率は通常の縦型フィンにシーム溶接部に相当する部分をつけ加えて計算した場合の効率を意味していることになる。参考のために $L_1=0$ の場合と Gardner による通常の縦型フィン、すなわちシーム溶接部に相当する部分を含めない場合のフィン効率 [2]、 $\eta = \tanh u / u$ ただし $u = L_2 \sqrt{2h/kt} = L_2 M$ 、を第 6 図に示す。 $L_1=0$ の場合の効率の方が通常のフィンの場合よりも大きな値を示しているが、この差はシーム溶接部をフィンに含めたか含めないかの違いに基づくもので決して本質的なものではない。

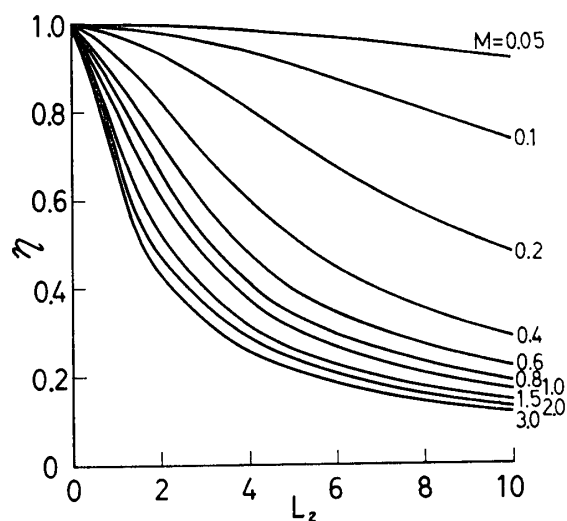
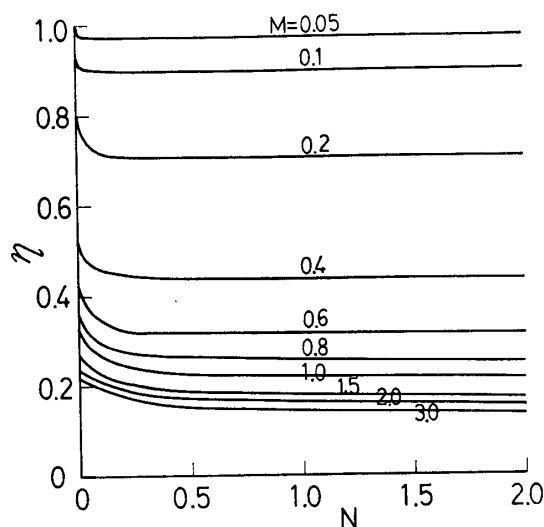
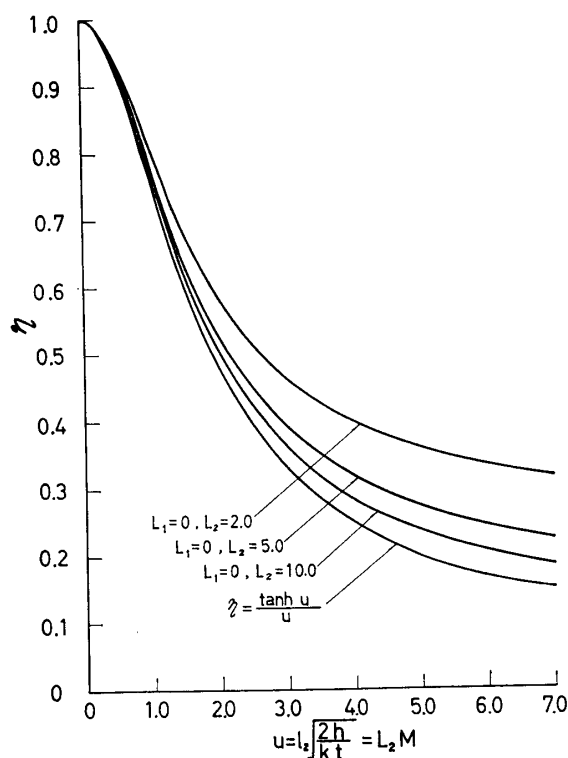
η と N の関係の 1 例として M をパラメータとして $L_1=1.0$, $L_2=5.0$ の場合のグラフを第 7 図に示す。この図から N がほぼ 0.2 を越すと効率はほとんど一定になることがわか



第 2 図 フィンの温度分布

(3-a) $L_1 = 1.0$ (3-b) $L_1 = 2.0$ 第 3 図 η と M の関係(4-a) $L_2 = 5.0, N = 0.01$ (4-b) $L_2 = 5.0, N = 0.1$

第 4 図 η と L_1 の関係

(5-e) $L_1=0$ 第5図 η と L_2 の関係 $L_1=1.0, L_2=5.0$ 第7図 η と N の関係第6図 通常のフィンと $L_1=0$ の場合との比較

る。このことは間隙熱抵抗が大きくなると非溶接部の間隙を通してフィンへ入ってくる熱量が減少し、シーム溶接部を経てフィンへ流入してくる熱量が流入熱量のほとんどの割合を占めるようになることを意味している。なお $N=0$ の場合は L_1 もシーム溶接部として加えた場合の効率となる。

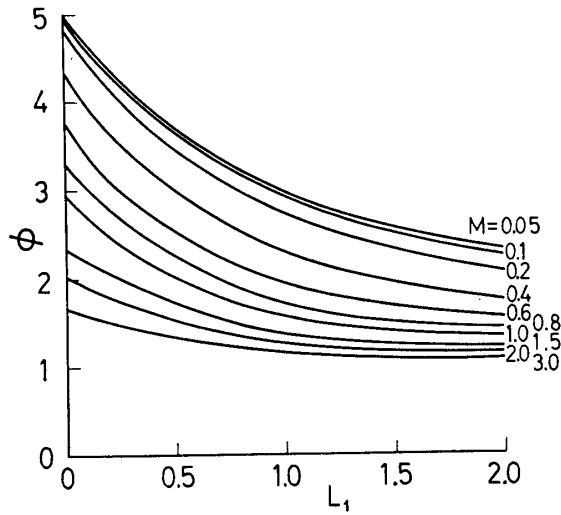
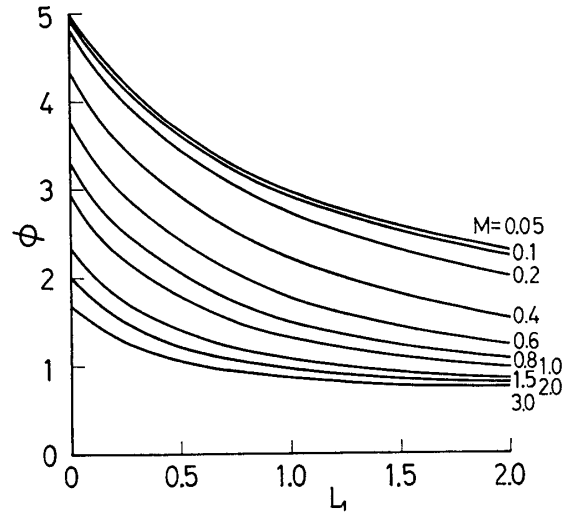
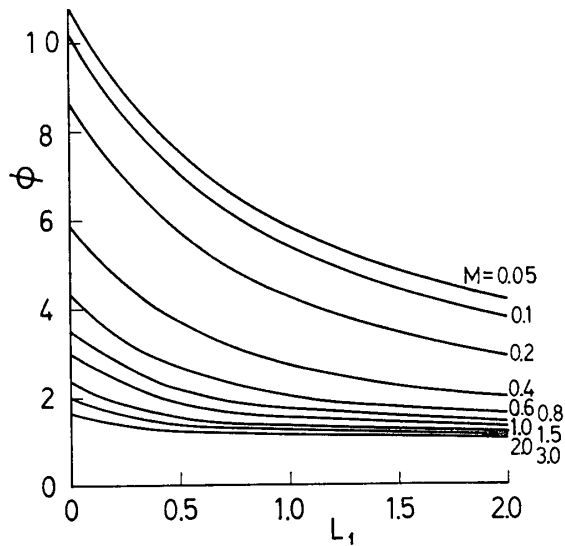
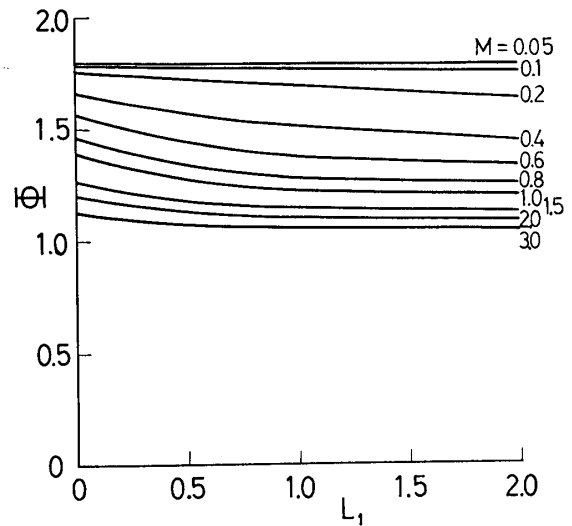
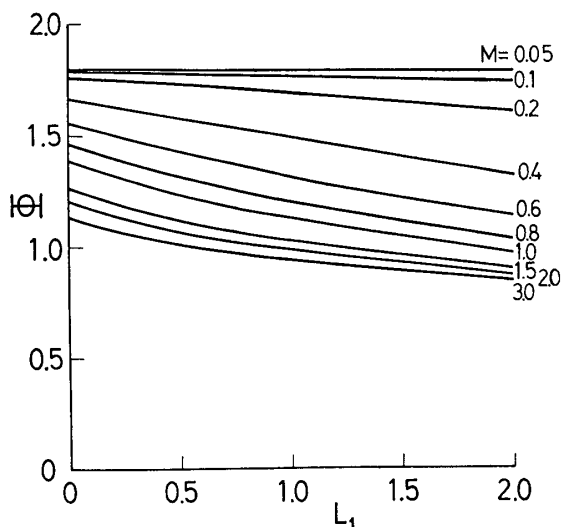
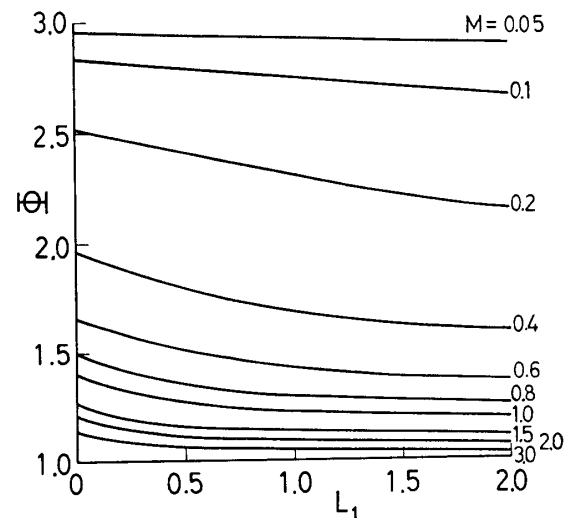
(2) フィン有効度と総フィン有効度
まず ϕ あるいは Φ の L_1 による影響を

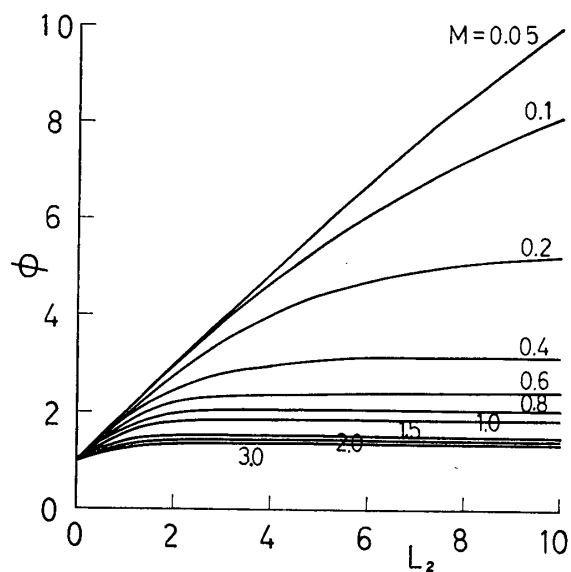
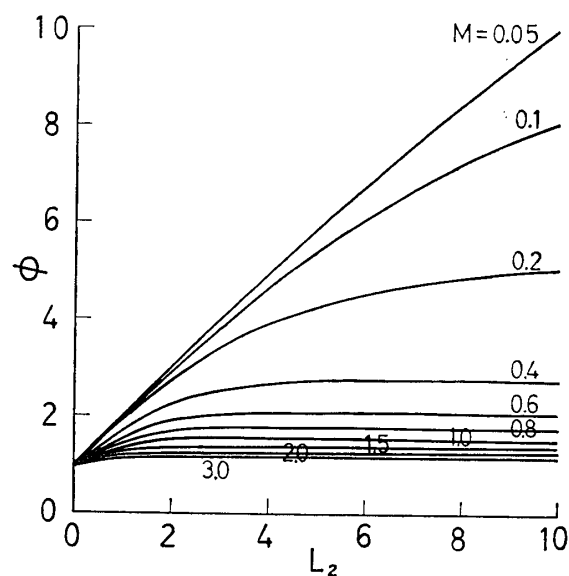
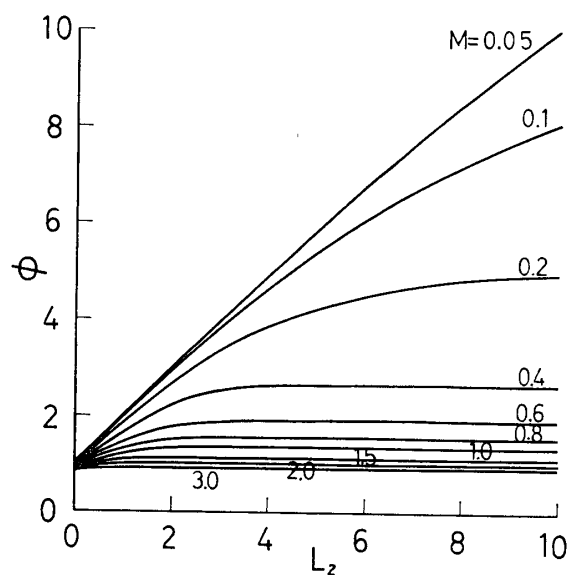
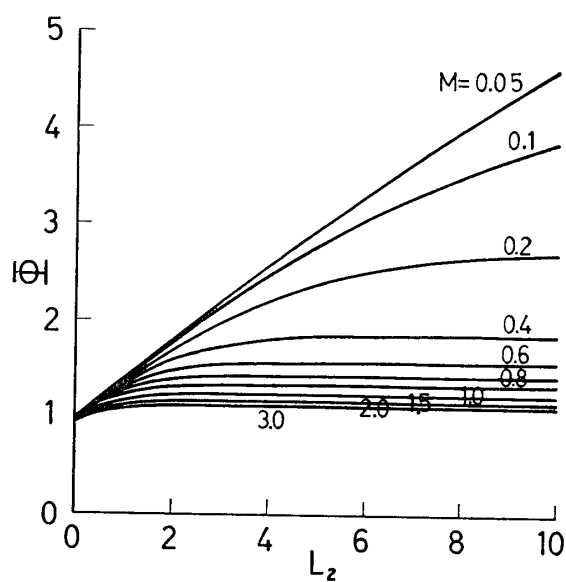
調べてみる。第8図と第9図にそれぞれ ϕ と L_1 および Φ と L_1 の関係を示す。図には L_2 が2.0と5.0の場合を示したが、 Φ に対してはさらにフィンピッチを指定する必要があるが、 Φ と L の関係はあとに検討されるが、5位が L の適当な値であるのでこれを代表的に用いた。フィン効率は L_1 の増加にしたがって増大する場合もあることはすでに示したが、フィンの有効度は ϕ , Φ とともに L_1 の増加にしたがって減少することをこれらの図は示している。総フィン有効度の L_1 による変化はあまり著しくはないが、フィン有効度の方は特にフィン表面からの放熱量が小さい場合には、かなり顕著に影響を受ける。さらに M および N が大きくて L_1 も大きい場合には ϕ および Φ は1より小さくなっているが、これはフィン

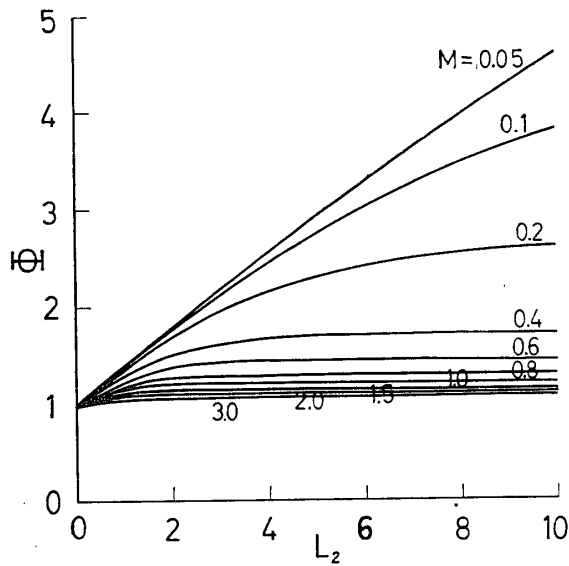
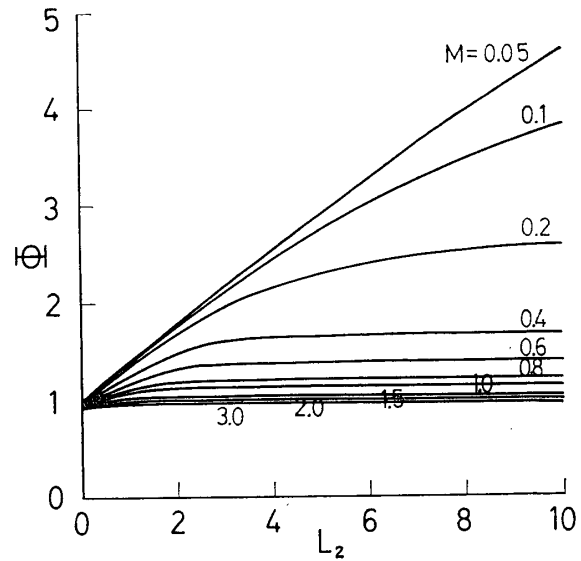
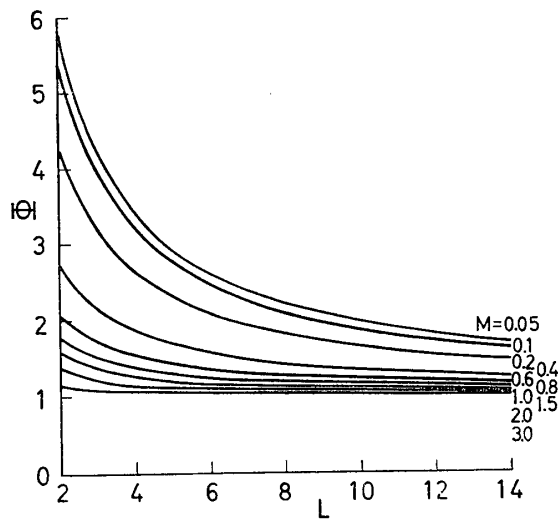
底部の非溶接部が間隙熱抵抗のため保温効果をもたらすためである。フィン有効度あるいは総フィン有効度が1より小さいということは、フィンを取付けた意味が無くかえって放熱を悪くすることを意味している。放熱をよくするための有効度の点からは非溶接幅はできる限り小さい方がよい。

第10図および第11図に M をパラメータとして ϕ および Φ と L_2 との関係を $L_1=1.0$, $L=5.0$ および N が 0.01, 0.1, 1 の各場合について示す。フィン有効度および総フィン有効度はフィン高さが増すにしたがって増大するが、その値はやがて飽和してそれ以上増大せず、フィン高さには適値がありそれより増大することはむしろ損失を増すだけであることがこれらの図よりわかる。また M が大きいほど速く飽和し、その飽和値も小さい。工業上普通の場合 M , N の範囲はさきに吟味したような値になるので、これらの図から最も適当な L_2 の値はその使用時の M , N の値で異なるが空気の場合 2~10, 水の場合 1~3 ぐらいの範囲内にあることがわかる。なお M の値が大きいと L_2 の最適値は非常に小さく、また有効度自身の値も小さいので、このような形のフィンを取付けることはあまり意味がない。さらにこれらの図より M に対する有効度の変化は M の小さい値に対して著しいことなどもわかるが、 ϕ あるいは Φ と M の関係は (12) 式からわかるように、 L_1 と L_2 が一定の場合は ϕ は η の定数倍になっており、さらに L を一定にすると (14) 式より Φ は η あるいは ϕ の一次関数であることから、第3図に示した η と M の関係と同じ傾向を示す。すなわち M がほぼ 0.3~1.0 以下でしかフィンはそれほど有効でなく、 L_2 の大きいほどこの有効な M の最大値もより小さくなる。上に M について述べたことは N に対しても全く同じように言えることであり、 ϕ と N あるいは Φ と N の関係は第7図に示した η と N の関係と全く同じ傾向を示す。それゆえ N がほぼ 0.2 を越すとフィン有効度および総フィン有効度はほとんど一定となることがわかる。

次にフィンピッチによる総フィン有効度への影響を調べる。第12図は $L_1=1.0$, $L_2=5.0$ $N=0.1$ の場合に対して M をパラメータとした Φ と L との関係を示す。この図から L が小さい間は L の増加に対して Φ は急速に減少するが L がだんだん大きくなるにしたがって Φ はほとんど変らなくなることがわかる。すなわちこのグラフは L について Φ が双曲線を示しているが、これは (14) 式の示す通りである。 Φ は L を小さくして行くと増加するけれども、フィンに関するこの計算は熱伝達率がどんな場合にも一定であるという仮定に基づいてなされているということに特に注意すべきである。フィンピッチが小さくなれば熱伝達率は相隣るフィン同志の影響などにより小さくなるので、実際には L が無次元フィン幅の半分 L' の値に近ずいた場合には Φ の値は第12図が示している値よりもっと小さい値になっているはずである。またさらに $L=L'$ の場合は、各隣り同志のフィンがくっついてしまうことになるので Φ の値はさらに図の場合より小さくなるだろう。したがって本計算からは L の適値をうんぬんすることはできないが、上述の様な考慮から図に示した場合に対する L の適当な値は、しいて言えばほぼ 3~5 くらいであろうと思われる。しかしながら前にも述べたように、この図からも M が大きくなると Φ は1に近い値となりフィンを取り付けてもあまり意味が無いことがわかる。

(8-a) $L_2=2.0, N=0.1$ (8-b) $L_2=2.0, N=1$ (8-c) $L_2=5.0, N=0.1$ (9-a) $L_2=2.0, L=5.0, N=0.1$ 第 8 図 ϕ と L_1 の関係(9-b) $L_2=2.0, L=5.0, N=1$ (9-c) $L_2=5.0, L=5.0, N=0.1$ 第 9 図 ϕ と L_1 の関係

(10-a) $L_1=1.0$, $N=0.01$ (10-b) $L_1=1.0$, $N=0.1$ (10-c) $L_1=1.0$, $N=1$ 第 10 図 ϕ と L_2 の関係(11-a) $L_1=1.0$, $L=5.0$, $N=0.01$

(11-b) $L_1=1.0$, $L=5.0$, $N=0.1$ (11-c) $L_1=1.0$, $L=5.0$, $N=1$ 第 11 図 Φ と L_2 の関係第 12 図 Φ と L の関係

3. 結 論

シーム溶接をされたU字型フィンのフィン効果、フィン有効度、総フィン有効度を一般のフィンの場合と同様に単純化されたモデルに基づいて定義し、これらの値およびフィンに沿った温度分布を普通使用されるような条件のもとで計算し、放熱無次元量 M 、間隙熱抵抗無次元量 N およびフィンの形状を示す無次元量 L_1 , L_2 , L による影響を吟味した。多くの大きい仮定のもので結果ではあるが、これによりU字型シーム溶接フィンの大ざっぱな次のような

特性がわかった。

- (1) M が約 0.3~1.0 より大きい場合にはこのようなフィンはいずれも有効でない。
- (2) フィン底部の非溶接幅は工作上的制限があるが、フィン有効度の点からはできるだけ小さい方がよい。
- (3) フィン高さには最適値があり、最適フィン高さは M の値により大きく異なるが、工業上多く用いられる熱伝達率の値に対して無次元フィン高さは空気では 2~10、水で 1~3 位の範囲である。
- (4) シーム溶接フィンの特徴づけている間隙熱抵抗無次元量 N の変化にともなうフィ

ン効率, フィン有効度などの変化はあまり大きくなく, N がほぼ 0.2 以上の値ではほとんど変化しない.

1969 年 2 月 28 日 原動機部

参 考 文 献

- [1] 橘 藤雄, 岡本芳三: 機械学会誌, 第 65 巻, 第 525 号 (1962—10), p. 1410.
- [2] K. A. Gardner.: Trans. ASME., Vol., 67, No. 8, (1945—11), p. 621.
- [3] 棚沢 泰: 機械学会論文集, 6 巻 23 号, (1940—5), p. 1.
- [4] 岡本芳三: 機械学会論文集, 30 巻 210 号, (1964—2), p. 267.
30 巻 219 号, (1964—11), p. 1361.
31 巻 226 号, (1965—6), p. 964.
31 巻 226 号, (1965—6), p. 975.
- [5] 岡本芳三: 機械学会論文集, 31 巻 244 号, (1965—4), p. 624.
- [6] M. Avrami and J. B. Little.: Journ. Applied Physics., Vol. 13, (1942—4), p. 255.
- [7] J. G. Knudsen and D. L. Katz.: Chem. Engineering Progress., Vol. 46, No. 10, (1950—10), p. 490.
- [8] W. M. Murray.: Journ. Applied Mechanics., (1938—6), p. 78.
- [9] E. R. G. Eckert and R. M. Drake.: Heat and Mass Transfer., McGraw-Hill, p. 12.