

メンブレン水壁の伝熱特性

Heat Conduction Characteristics of Membrane Wall

三 浦 一 夫*
Kazuo Miura

内 容 梗 概

ボイラの水冷壁は高い熱負荷を受けるために、そのメタル温度上昇には特に注意を払う必要がある。本報は大容量貫流ボイラに対するB & W社UPボイラの特徴であるメンブレン水壁の温度分布を計算する方法を示すとともに、若干の計算例を紹介してその伝熱特性を明らかにしたものである。

1. 緒 言

UPボイラ用の水冷壁には、第1図に示すように水壁管をフィンで溶接した、いわゆるメンブレン水壁が採用されている。

この構造は

- (1) 熱吸収が管の全周にわたって均一化する。
- (2) 伝熱量に対して管内流速を適当な値に計画できる。
- (3) 起動が容易になる。
- (4) 燃焼ガスのシールが完全である。
- (5) 強度が大である。
- (6) 据付期間が短縮される。
- (7) 軽量で簡単な構造である。

など、数多くの利点を持っているが、最近、大容量ボイラの高温、高圧、高性能化の要求に応じて水壁は熱的にますます過酷な条件にさらされるようになってきたため、最高メタル温度、メタル温度分布などの伝熱特性については十分な検討を加えておくことが必要になってきた。

従来からフィン付き管の温度分布については多数の計算方法が提案されているが、多くはフィンの加熱側と非加熱側の温度差を無視した1次元的な取り扱いをしており^{(1)~(4)}、メンブレン水壁に適用するには不十分である。そこで、電子計算機を利用して温度分布をかなり詳細に計算するプログラムを開発した。種々の条件を与えて計算した結果、メンブレン水壁は伝熱の点からはきわめて無理のない合理的な構造であることが明らかになった。

2. 計 算 方 法

2.1 仮 定

計算を容易にするために次のような仮定を設ける。

- (1) 管軸方向の熱流を無視し二次元問題として取り扱う。
- (2) 材料の熱伝導率は場所的に一様である。
- (3) 材料の熱伝導率は温度によって変化しない。
- (4) 水壁表面からの単位投影面積当たりの吸収熱量は一定である。
- (5) 水壁裏面からの放熱を無視する。
- (6) 管内熱伝達率は円周に沿って一様である。
- (7) 定常温度分布を考える。

上記の各仮定は通常の運転条件を考えたとき、いずれも妥当なものである。

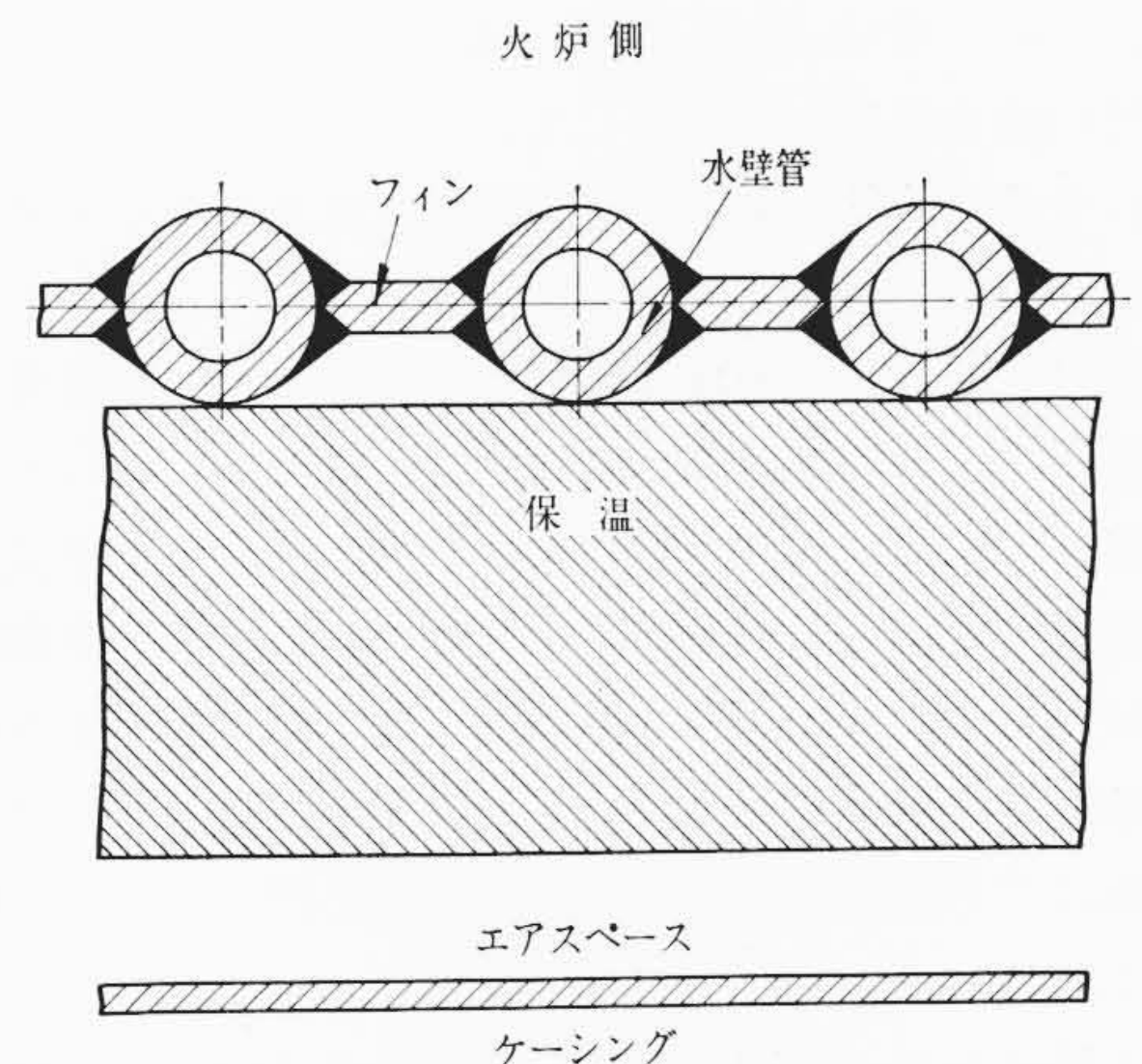
2.2 基 礎 式

水壁のメタル温度分布は次のラプラス方程式の解として得られる。

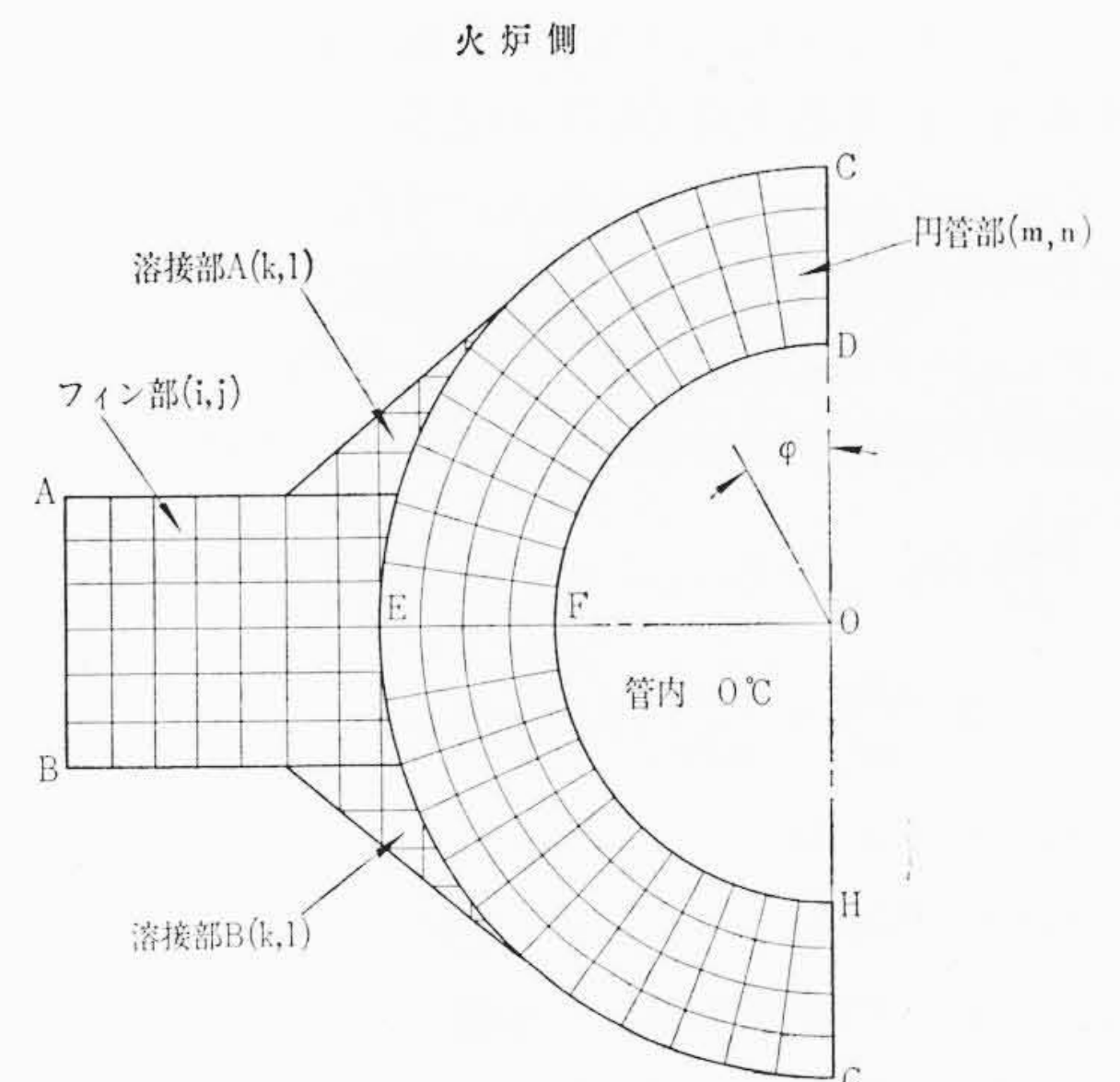
$$\nabla^2 \theta = 0 \quad (1)$$

ここに、 θ : メタル温度 (°C)

* 日立製作所日立研究所



第1図 メンブレン水壁の構造



第2図 格子点分割方法

ここで、さきに設けた仮定を考慮して境界条件を定めることにする。第2図において対称の中心面A-B, C-D, G-Hおよび熱的絶縁面B-Gでは面に直角な方向の温度こう配はない。

$$\frac{\partial \theta}{\partial n'} = 0 \quad (2)$$

ここに、 n' : 面に直角な方向の距離 (m)

次に、火炉に面した表面のうちフィンの部分では

$$\frac{\partial t}{\partial n'} = \frac{q}{\lambda} \quad (3)$$

ここに、 t : フィン部温度 (°C)

q : 伝熱面熱負荷 (kcal/m²h)

λ : 熱伝導率 (kcal/mh°C)

溶接部Aの表面においては

$$\frac{\partial t'}{\partial n'} = \frac{q}{\lambda} \cos \frac{\pi}{4} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 t' : 溶接部Aの温度 (°C)

溶接部表面の傾斜はフィン表面に対して $\pi/4$ にとってある。円管部の表面においては

$$\frac{\partial \theta}{\partial n'} = \frac{q}{\lambda} \cos \varphi \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 θ : 円管部温度 (°C)

φ : 管頂Cからの角度 (°)

管内流体温度を0°Cとすると、管内面では

$$\frac{\partial \theta}{\partial n'} = \frac{h}{\lambda} \theta \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 h : 管内熱伝達率 (kcal/m²h°C)

最初は管内流体温度を0°Cとして、メタルと流体の温度差分布を求め、次に全体に流体温度を加え合わせて温度分布を求める。

2.3 計 算 式

電子計算機を使用して複雑な境界をもつ固体内の温度分布を求めるには弛緩法によるのが普通である。これは問題になっている領域を適当な形の格子に区切り、各格子の間に成立する関係式を連立させて未知温度を求めるものである。対称の性質から第2図のような半ピッチ分を計算すれば十分である。全体を第2図のようにフィン部、溶接部A、溶接部Bおよび円管部の4領域に分け、フィン部および溶接部は正方形格子、円管部は放射軸と同心円による格子によって区切る。

(1)式の関係式をフィン内部の任意の格子点 (i, j) およびこの点から微小距離 δ だけ離れた隣接格子点 $(i-1, j)$, $(i+1, j)$, $(i, j-1)$, $(i, j+1)$ から成る微小部分に適用すると

$$t_{i-1,j} + t_{i+1,j} + t_{i,j-1} + t_{i,j+1} - 4t_{i,j} = 0 \quad \dots\dots\dots (7)$$

溶接部A内の任意格子点 (k, l) の近傍については

$$t'_{k-1,l} + t'_{k+1,l} + t'_{k,l-1} + t'_{k,l+1} - 4t'_{k,l} = 0 \quad \dots\dots\dots (8)$$

溶接部B内の任意格子点 (k, l) の近傍については

$$t''_{k-1,l} + t''_{k+1,l} + t''_{k,l-1} + t''_{k,l+1} - 4t''_{k,l} = 0 \quad \dots\dots\dots (9)$$

円管部内の任意格子点 (m, n) の近傍については

$$\frac{s\Delta x}{\pi r} (\theta_{m-1,n} + \theta_{m+1,n}) + \frac{\pi}{s\Delta x} (r_a \theta_{m,n-1} + r_b \theta_{m,n+1}) - 2 \left(\frac{s\Delta x}{\pi r} + \frac{\pi r}{s\Delta x} \right) \theta_{m,n} = 0 \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$r_a = r + 0.5 \Delta x \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$r_b = r - 0.5 \Delta x \quad \dots\dots\dots (12)$$

ここに、 s : 円管部放射状分割数 (°)

Δx : 同心円間隔 (m)

r : 管中心と (m, n) 格子点の間の距離 (m)

境界面および2個の領域がたがいに接触する面においては(7)~(10)式の未知温度の係数を変化してこれらと同等の式を導くことができる。このような式は未知温度の数だけできるから、これらを連立して反復計算により各格子点の温度の近似値を求めることができる。

最初は適当な温度分布を仮定して、その後(7)~(10)式を満足するように逐次変化させて真の値に近づくわけであるが、その場合反復の方法として1点1点操作するものと、ある1行の修正を一度に行ってしまうものとが考えられる。前者は収れん性は悪いがプログラミングが容易であるので格子点数が少なく形状が不規則な溶接部に応用し、後者はプログラミングは複雑になるが収れん性が高いので格子点数が多く形状が比較的簡単なフィン部および円管部に適用する。

フィン部内の任意の1行(第 i 行)に着目すると隣接する $i-1$ 行、

$i+1$ 行との間に次の関係が成立する。

$$\begin{bmatrix} u_1 & 1 & & & \\ 1 & u_2 & 1 & & \\ & & \ddots & \ddots & \\ & & & 1 & u_j & 1 \\ & & & & & 1 & u_{js-1} & 1 \\ & & & & & & 1 & u_{js} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_{i,1} \\ t_{i,2} \\ \vdots \\ t_{i,j} \\ \vdots \\ t_{i,js-1} \\ t_{i,js} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_j \\ \vdots \\ v_{js-1} \\ v_{js} \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (13)$$

ここに、 js : 最終列番号 (°)

u_j : j によって変化する係数 (°)

v_j : 隣接する $i-1$, $i+1$ 行の温度によって変化する値 (°C)

(13)式を解くと

$$t_{i,js} = \frac{\alpha_{js} v_{js} - \beta_{js-1}}{1 + \alpha_{js} u_{js}} \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$t_{i,j} = \frac{t_{i,j+1} + \beta_j}{\alpha_{j+1}}, \quad (j=js-1, js-2, \dots, 1) \quad \dots\dots\dots (15)$$

ここに、

$$\alpha_2 = 2 \quad \dots\dots\dots (16)$$

$$\beta_1 = -v_1 \quad \dots\dots\dots (17)$$

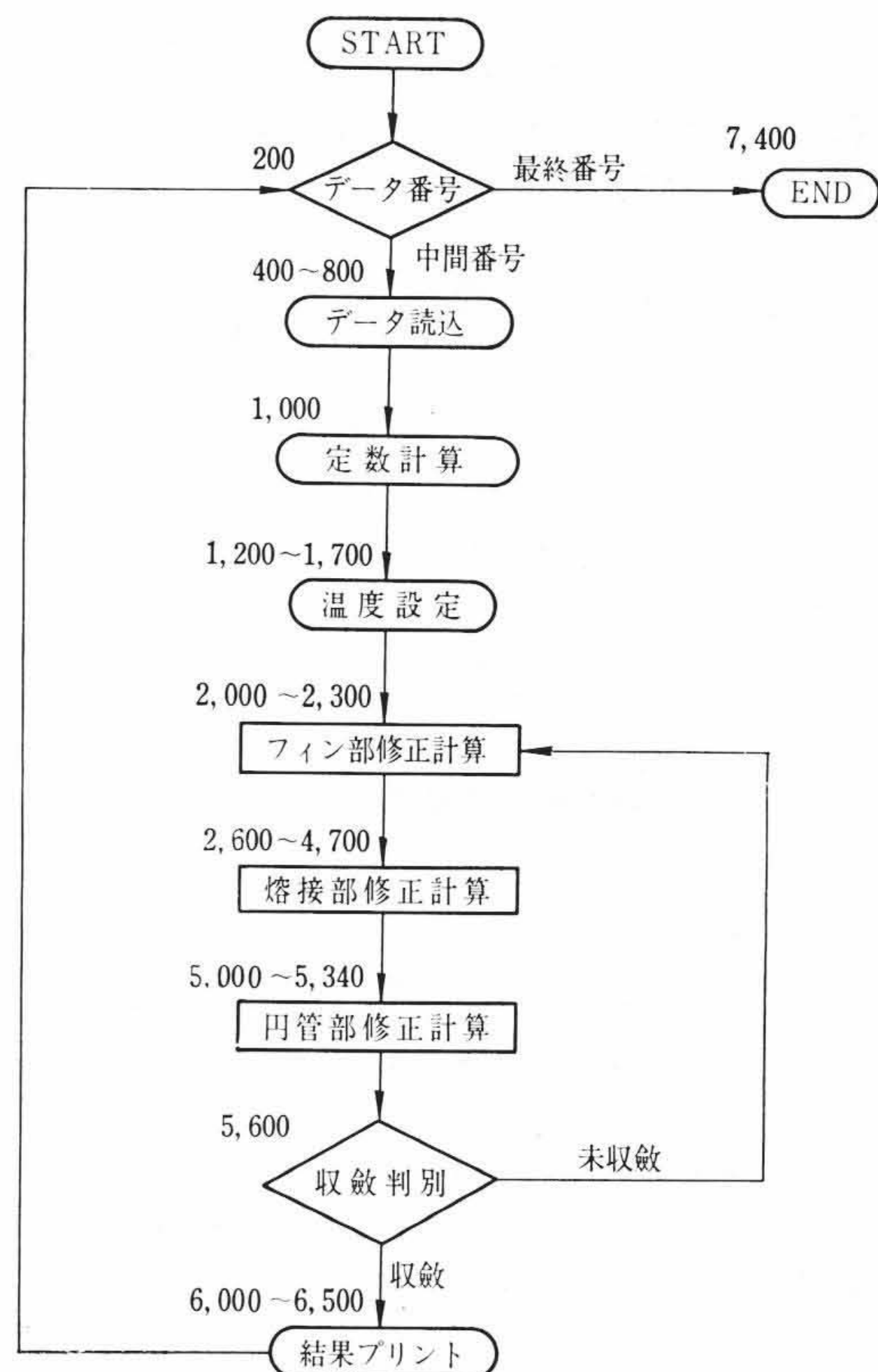
$$\alpha_{j+1} = -\left(u_j + \frac{1}{\alpha_j}\right), \quad (j=2, 3, \dots, js-1) \quad \dots\dots\dots (18)$$

$$\beta_j = \frac{\beta_{j-1}}{\alpha_j} - v_j, \quad (j=2, 3, \dots, js-1) \quad \dots\dots\dots (19)$$

溶接部は1点ごとに修正するため容易に処理できる。また、円管部はフィン部とまったく同様の考え方で取り扱うことができる。

2.4 プログラミング

第3図に計算手順の概略を示す。入力データ(400~800)としてはメンブレン水壁の構造、熱的条件、格子の分割方法、計算精度などを読み込む。反復計算を必要としない定数群(1,000)はあらかじめ計算しておく。最初に適当な温度分布(1,200~1,700)を設定し、そ



第3図 概略のフローチャート

の後次々に修正して真の温度に近づける。フィン部(2,000~2,300), 溶接部(2,600~4,700), 円管部(5,000~5,340)の順にメタル温度の修正を行なう。解が収れんしたかどうかを判別し, 収れんするまで反復する。(5,600~2,000) 収れんしたならば解を印刷して(6,000~6,500) 次の問題に進む。(200) 全部の問題を解いてデータが終わると自動的に停止する。(7,400)

弛緩法によってこのような問題を解くにあたって N 回の反復によって得られた値 θ_N が十分真の値に近いかどうかを判別するには次のような方法が考えられる。

- (1) 残差の絶対値 $|R(N)|$ の最大値 $R_{\max}(N)$ と十分小さい一定値 ε_R を比較する。ここに残差 $R(N)$ とは N 回目の反復計算の結果を(7)~(10)式の左辺に代入した値をいう。
- (2) 残差の絶対値 $|R(N)|$ の和 $\Sigma|R(N)|$ と十分小さい一定値 ε_S を比較する。
- (3) 温度修正量 $|\theta(N-1)-\theta(N)|$ の最大値 $|\theta(N-1)-\theta(N)|_{\max}$ と十分小さい一定値 ε_θ を比較する。
- (4) 温度修正量 $|\theta(N-1)-\theta(N)|$ の和 $\Sigma|\theta(N-1)-\theta(N)|$ と十分小さい一定値 $\varepsilon_{\Sigma\theta}$ を比較する。
- (5) ある特定の面で熱量バランスがとれているかどうかを判別する。たとえばこの問題では水壁表面からの吸収熱量と管内面における交換熱量のバランスする条件を求め, これを判別の基準とする。

今回は(3)の方法と(5)の方法を併用し, 両者を同時に満足する温度分布を求めた。

3. 計算結果および検討

3.1 計算条件

メンブレン水壁の温度分布を支配する最も基本的な因子として, 伝熱面熱負荷, 管内熱伝達率, 材料の熱伝導率, 管外径, 管内径, ピッチおよびフィン厚さの7項目が考えられる。そこで, これらを種々に変化した多数の条件について逐一計算してUPボイラの水壁の条件として考えられる種々の場合の温度分布を容易に求め得る資料を完備することができた。今回は計算の一例としてこれらのうち第1表に示すような5個の例を紹介する。

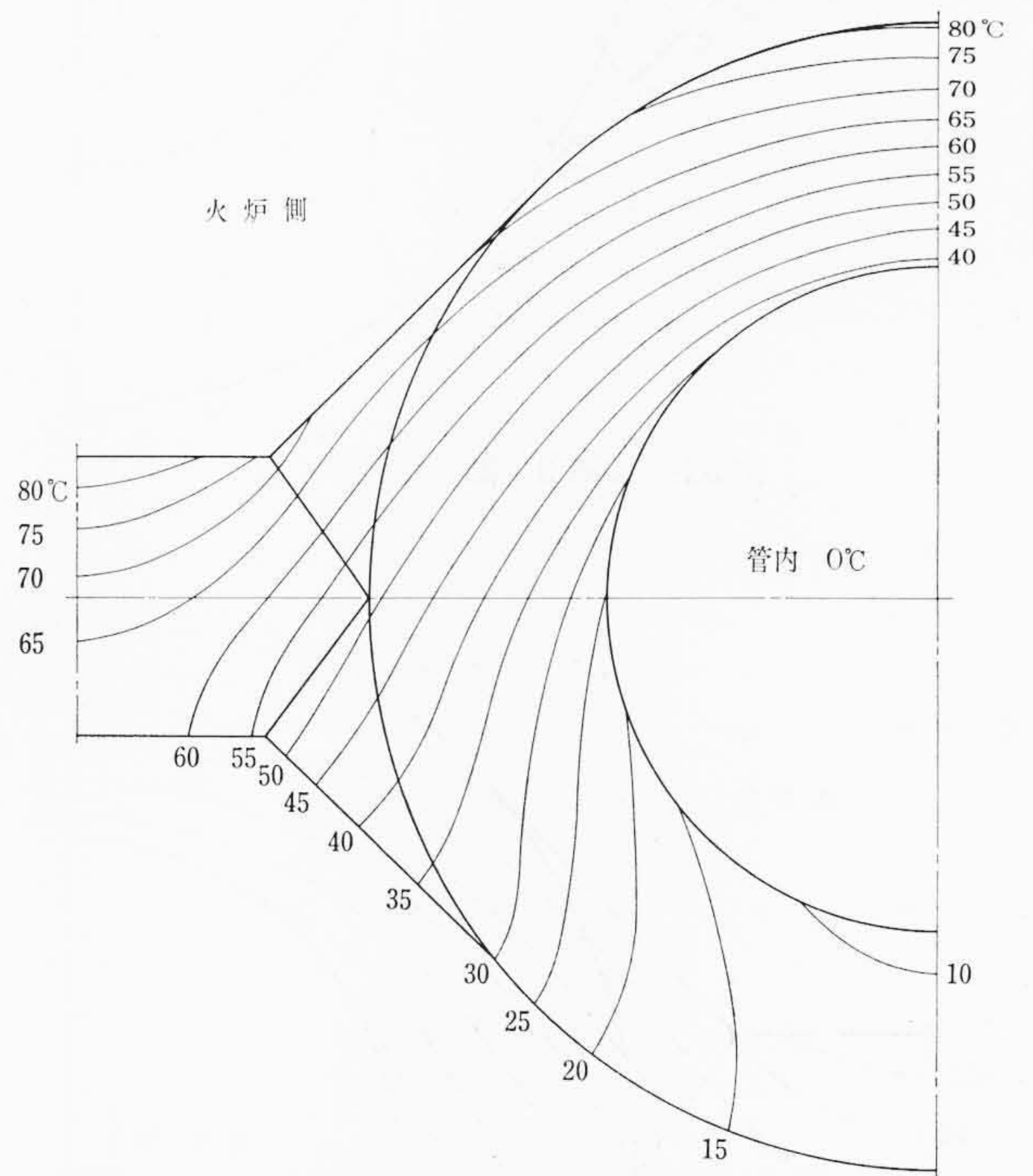
なお, 上記7項目のほかに溶接肉盛方法, 隣接管の管内流体温度が異なる場合, 隣接管で管内熱伝達率に相違がある場合, メンブレンを仕切壁に利用して両面から熱吸収を行なう場合などについても多数の計算を実施し伝熱特性を明らかにすることができた。

3.2 計算例および検討

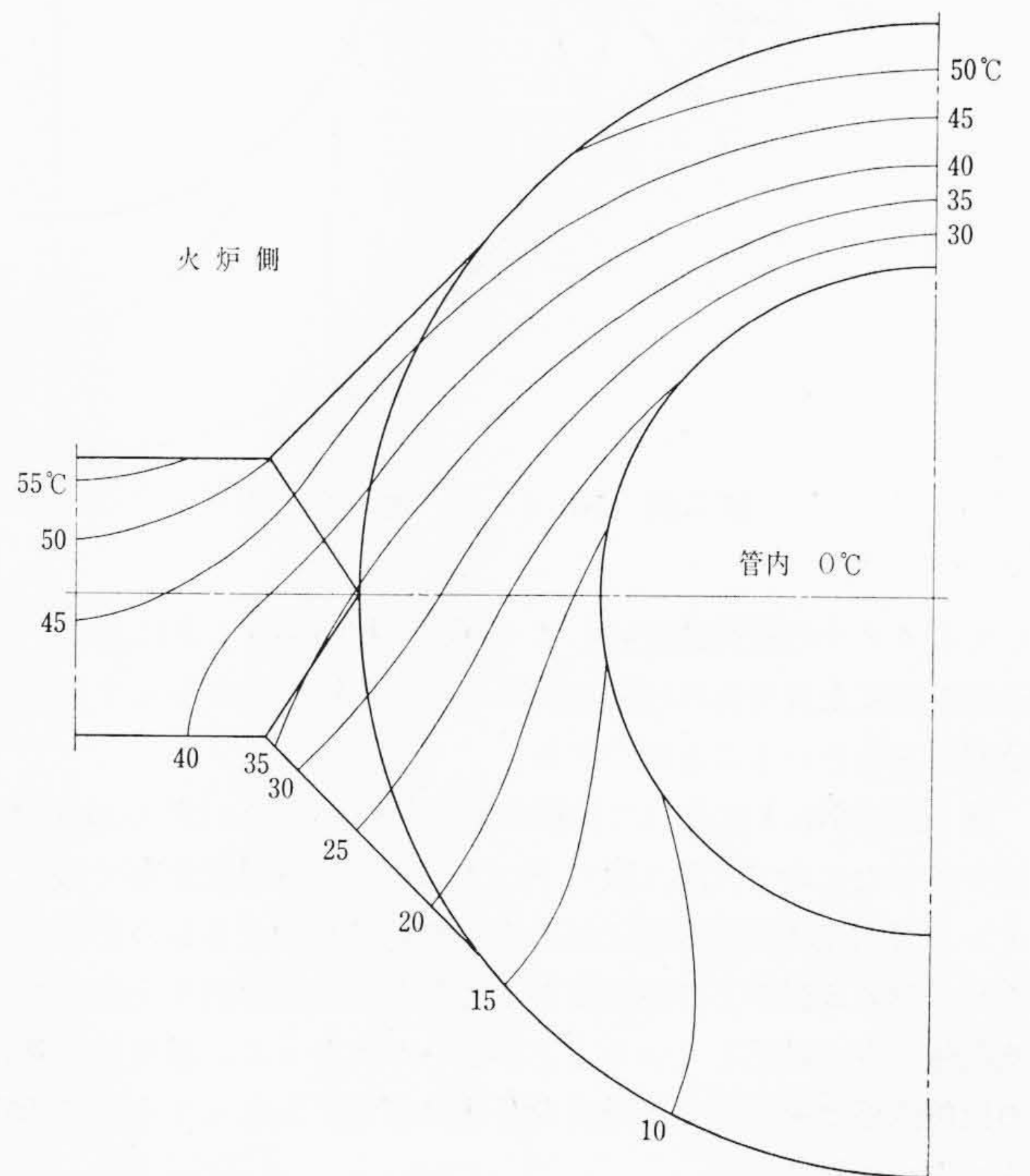
第1表の計算条件No.1~5に対する温度分布を第4~8図に示す。No.1を基準としてNo.2~5はそれぞれ基準条件に比べて伝熱面熱負荷, 管内熱伝達率, 熱伝導率, ピッチのうちいずれか1種類だけを変化し, ほかの条件を一定にしたものである。第4~8図はいずれもメタルと管内流体の温度差の分布を5°Cおきの等温線で示したものである。

第4図はNo.1の計算条件を与えて求めた温度分布である。この

例ではフィン中心の火炉に面する部分の温度が最高になり, 次は管頂部になっているが, 両者の温度はあまり違っていない。フィンのない, いわゆるタンジェントチューブ水壁の管内面では火炉に面した半面からの熱吸収が大部分であり, 裏側半面からの熱吸収が少ないため火炉側と裏側のメタル温度差が大きくなる傾向がある。これに反してメンブレン水壁ではフィン部から吸収された熱の大部分が裏側にまわって吸収されるため, 管内面からの吸収熱量はタンジェントチューブ水壁の場合より全周にわたって均一になる。したがってメタル温度のむらもそれだけ少なくなり, 全体として無理のない設計をすることが容易になる。第4図の例では伝熱面熱負荷を $3 \times 10^5 \text{ kcal/m}^2\text{h}$ 加えたとしてメタルと管内流体の温度差は最大85°C程度であるが, これはたとえば375°Cの超臨界圧流体を使用すると



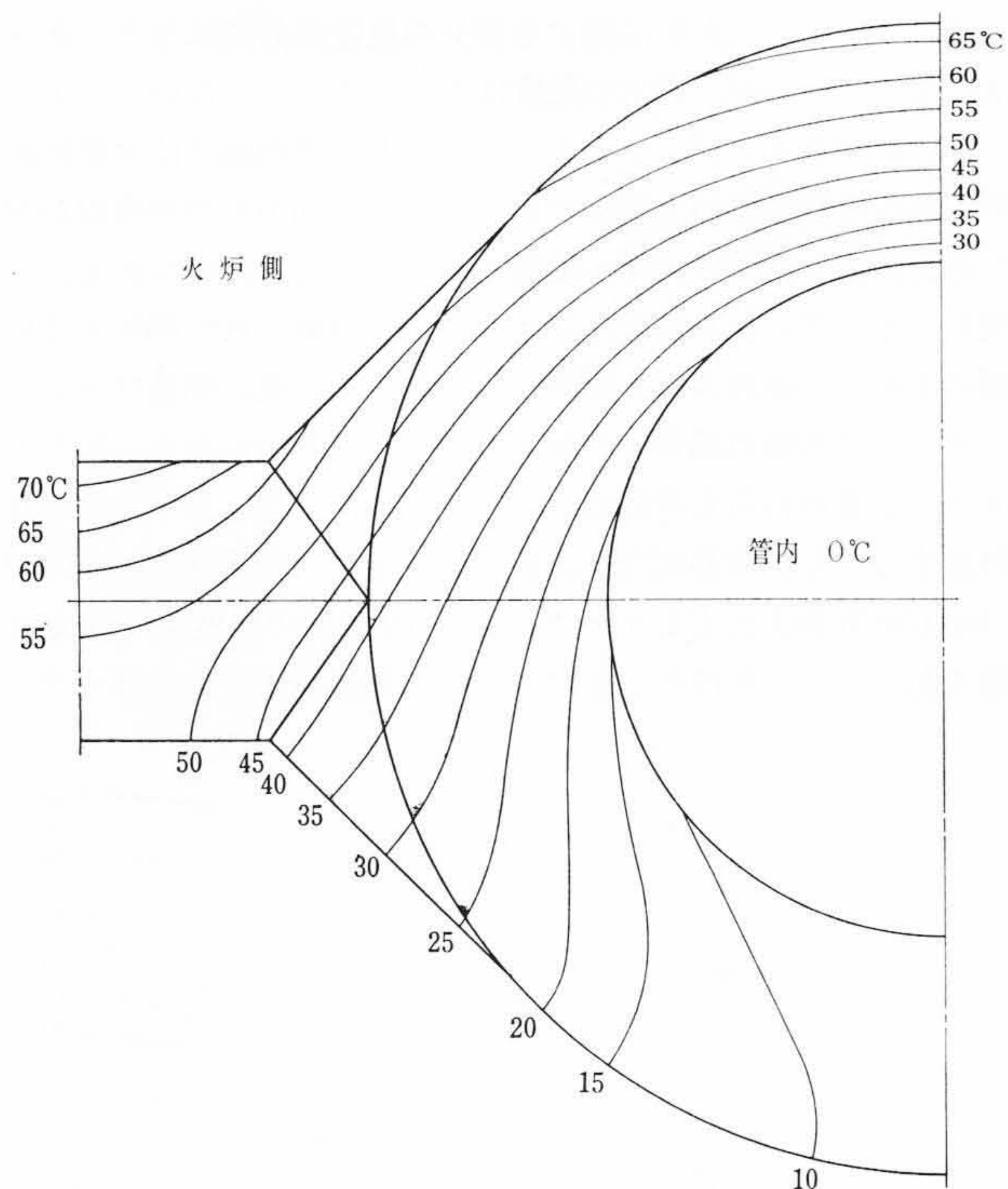
第4図 No.1 温度分布



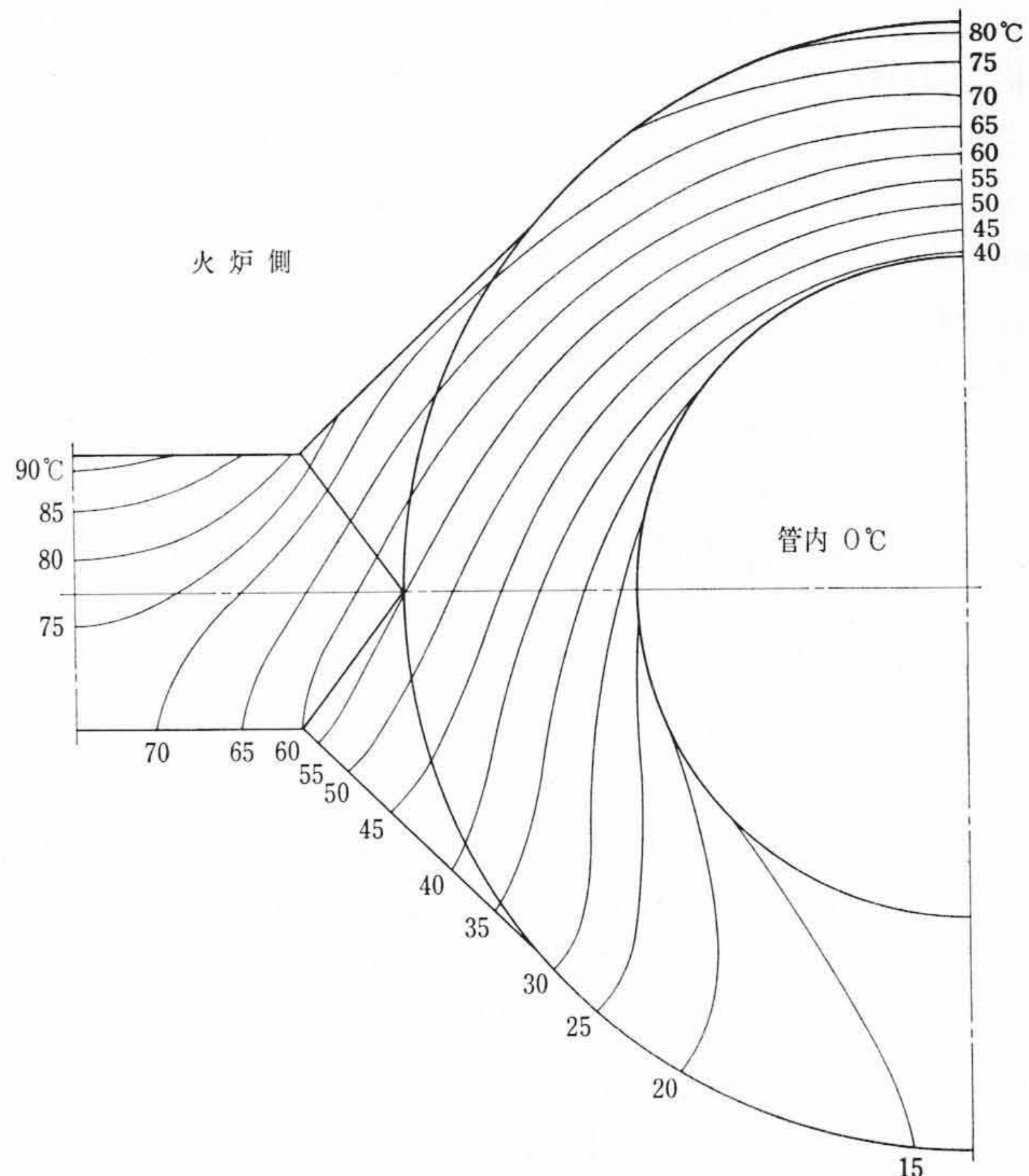
第5図 No.2 温度分布

第1表 計算条件

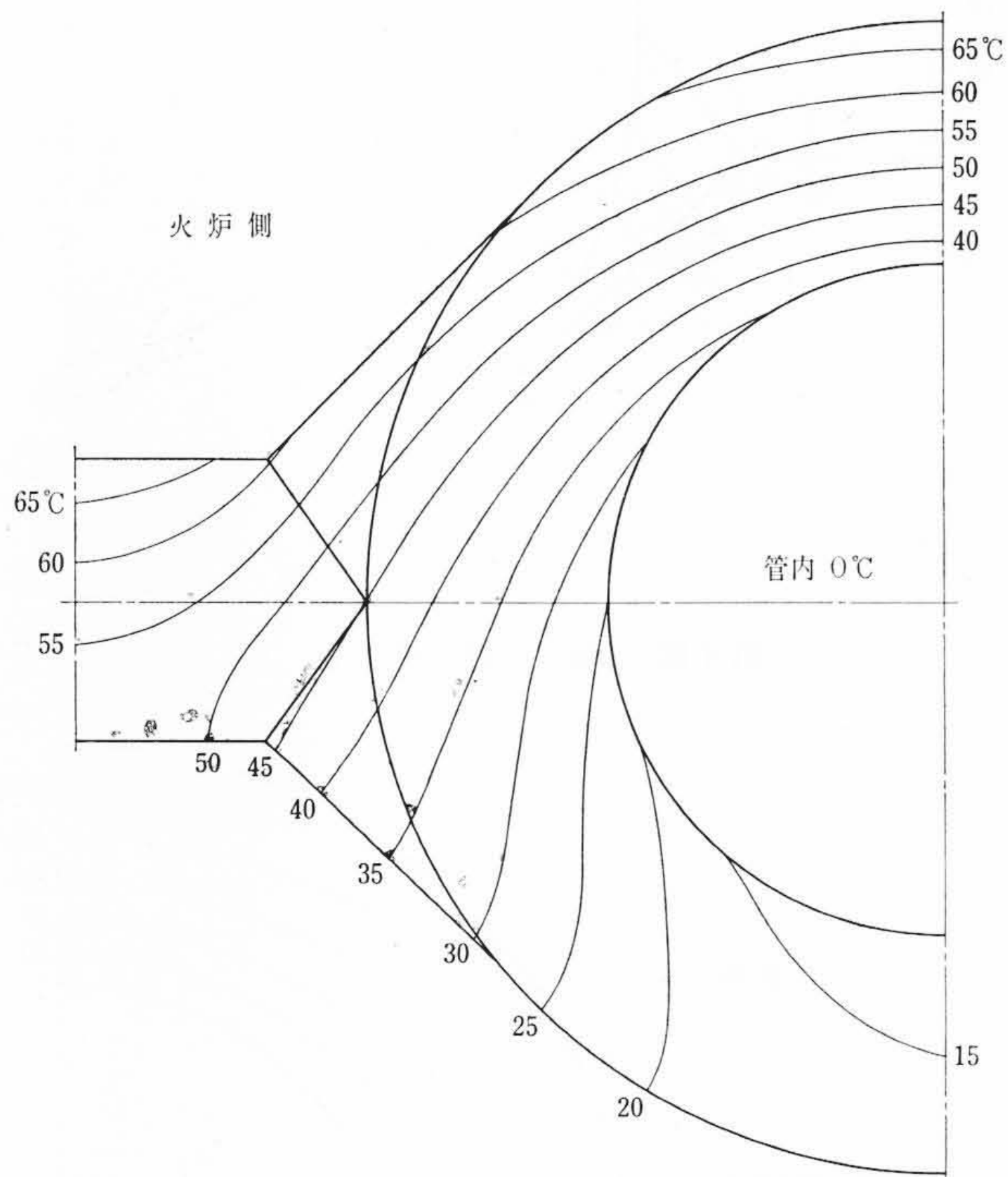
番号 No.	熱 的 条 件			構 造 的 条 件			
	熱 負 荷 kcal/m ² h	熱 伝 達 率 kcal/m ² h°C	熱 伝 導 率 kcal/mh°C	管外径 mm	管内径 mm	ピッチ mm	フィン厚 mm
1	3×10^5	1.0×10^4	40	24	14	36	6
2	2×10^5	1.0×10^4	40	24	14	36	6
3	3×10^5	1.5×10^4	40	24	14	36	6
4	3×10^5	1.0×10^4	50	24	14	36	6
5	3×10^5	1.0×10^4	40	24	14	38	6



第6図 No.3 温度分布



第8図 No.5 温度分布



第7図 No.4 温度分布

してもメタルの最高温度にして 460°C に相当することになり、この程度の温度上昇であれば強度的にも耐酸化性の点からも十分安全な範囲にあるといえることができる。

第5図は No. 1 に比べて伝熱面熱負荷のみを $2 \times 10^5 \text{ kcal/m}^2\text{h}$ に減少させたもので、第1表の No. 2 に相当する温度分布である。メタルと管内流体の温度差は伝熱面熱負荷に比例するものと考えられるが、第4, 5図および熱負荷を変化した他の計算例を比較しこの比例関係を良く満足していることが明らかになった。温度差と熱負荷の比例関係は火炉伝熱面熱負荷分布の算定にあたって有効に活用することができる。

第6図は No. 1 に比べて管内熱伝達率を $15,000 \text{ kcal/m}^2\text{h}^{\circ}\text{C}$ に増

加した場合で No. 3 に相当する。管内面と流体の温度差は管内熱伝達率が大きくなるとこれに反比例して低くなり、全体の温度分布もほぼ内面温度の変化に見合っただけ増減する。

第7図は No. 1 に比べて材料の熱伝導率のみを $50 \text{ kcal/mh}^{\circ}\text{C}$ に増加した場合で No. 4 に相当する。熱伝導率は管内面温度にはあまり影響を与えないが、メタルの温度こう配にはかなり大きな影響を及ぼすため、熱応力の大小と関係することになり注意を要する。普通の炭素鋼では計算例のように熱伝導率を $40 \sim 50 \text{ kcal/mh}^{\circ}\text{C}$ と考えてさしつかえない。

第8図は No. 1 に比べてピッチのみを 38 mm に変化した場合で No. 5 に相当する。ピッチを大きくすると、円管1本当たりの吸収熱量は増大し、一般にメタル温度は上昇する。特にフィン部は高温になる傾向がある。しかし、No. 5 のような計算条件にしても、フィン部と円管部の温度差は小さく、比較的均一な熱吸収を行なっている。

以上のほかにも種々の条件について温度分布を求め、これらを分類、整理してUPボイラの炉壁の計算を容易にできる形にしたが、これはたとえば次のように多方面に利用することができる。

- (1) 水壁の温度分布を求め、設計の資料とする。
- (2) 水壁の構造、寸法を検討する。
- (3) 管内流動系統を検討する。
- (4) 伝熱面熱負荷分布の解析の資料とする。
- (5) 温度分布の計算結果を基礎として熱応力解析を行なう。

なお最後の熱応力解析の問題は、温度分布をもとにして、現在日立製作所日立研究所材料強度研究室において進められている。

4. 結 言

電子計算機によりUPボイラ用メンブレン水壁の温度分布を求める一方法を紹介し、数例の計算結果を示した。火炉伝熱面熱負荷、管内熱伝達率、材料の熱伝導率、管外径、内径、ピッチ、フィン厚さなど各種の条件を変化して計算した結果、メンブレン水壁はメタル温度むらが少なく、熱吸収が管の全周にわたって比較的均一であるなど伝熱特性の点からはきわめて有利な構造であることを確認した。

さらに溶接部肉盛方法、隣接管との管内流体温度の差、隣接管との管内熱伝達率の差、両面から熱吸収を行なう場合と片面から熱吸収を行なう場合の相違など、あらゆる面から検討を加え、メタルの最高温度と温度むらを明らかにすることができた。現在すでに一部は進められているが、水壁温度分布および熱吸収量分布を実験的に求めること、熱応力を算定することなどが今後の重要な問題となり、その際、本計算結果が有効な役割を果たすことが期待できる。

終わりに臨み、この研究に種々便宜を与えられた日立ボイラ株式会社呉工場横田部長ほか関係かたがた、ならびに直接ご指導をいた

だいた日立製作所日立研究所高橋主管研究員と、田村主任に心から感謝の意を表する。

参 考 文 献

- (1) K. Becker: Energie, 11, 59 (Feb. 1959)
- (2) J. G. Bartas, W. H. Sellers: ASME Paper 59-HT-17
- (3) R. Pich: Energie, 15, 12 (Jan. 1963)
- (4) R. Dolezal: Großkessel-Feuerungen, 170 (Springer Verlag)
- (5) 朝倉, 吉原: 日立評論 45, 525 (昭 38-3)
- (6) 日本機械学会: 伝熱工学資料 (昭 37, 日本機械学会)



特 許 の 紹 介



特 許 第 281266 号

大 岡 宏

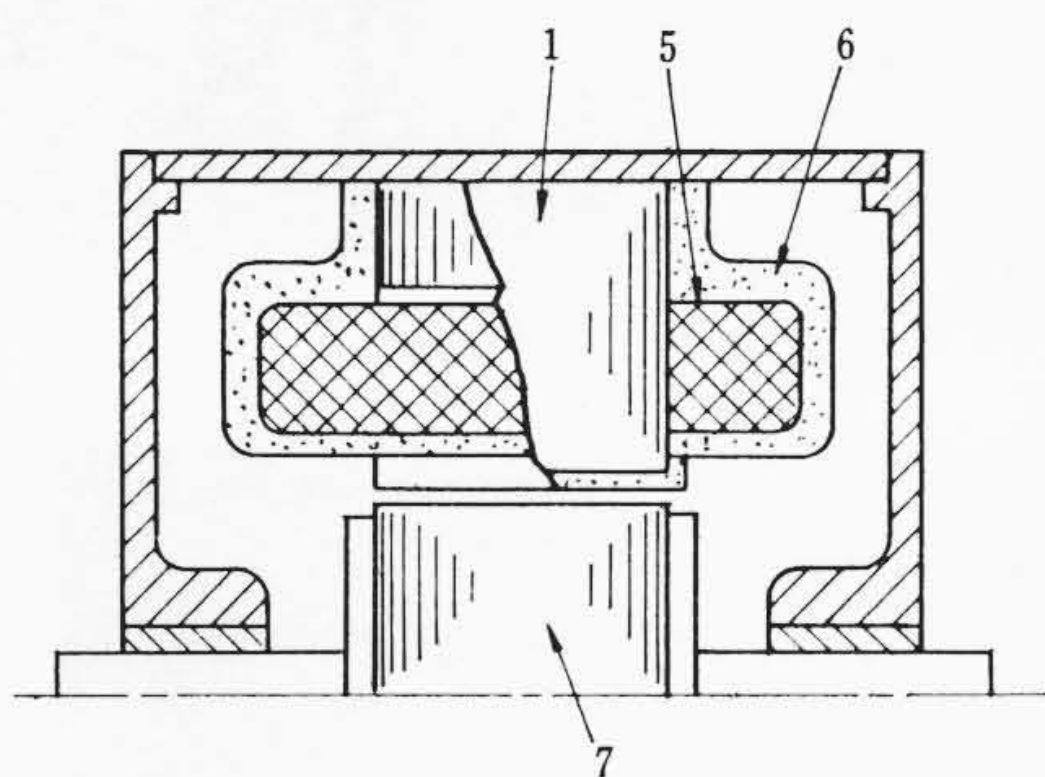
樹 脂 注 型 電 機

固定子鉄心 1 および固定子スリット 2 内にそう入される導線 3 および絶縁被覆 4 ならびにコイルエンド 5 を含む空間を金型で包囲してこの空間内に注型樹脂 6 を注入して硬化させた樹脂注型電機においては、一般に充填せられた樹脂 6 がスリット 2 の開口部に露出している。この種の樹脂注型電機は一般に水あるいはその他の液体中に浸漬せられるが、樹脂表面が浸漬液に接するとその化学作用と内部温度上昇の影響により膨潤してスリット 2 の開口部から突き出し回転子 7 に接触し電機の破壊事故を生ずることがある。

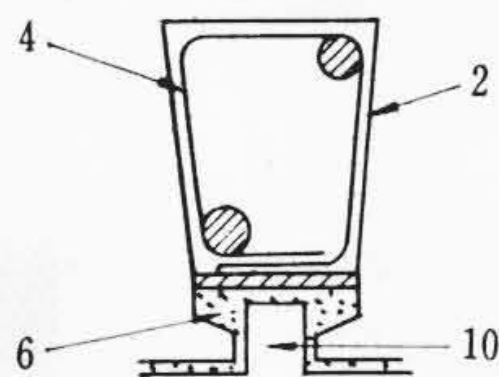
これに対し本発明電機は、樹脂注型作業に当たって歯状突起部 8

を有する歯車状円筒型 9 をその円筒面が固定子鉄心 1 の回転子 7 との対向面に接するようにかつその歯状突起部 8 が固定子スリット 2 の開口部内に嵌合するように設定して樹脂注型を行ない、第 2 図にその断面を示すような注型固定子を得るようにした。

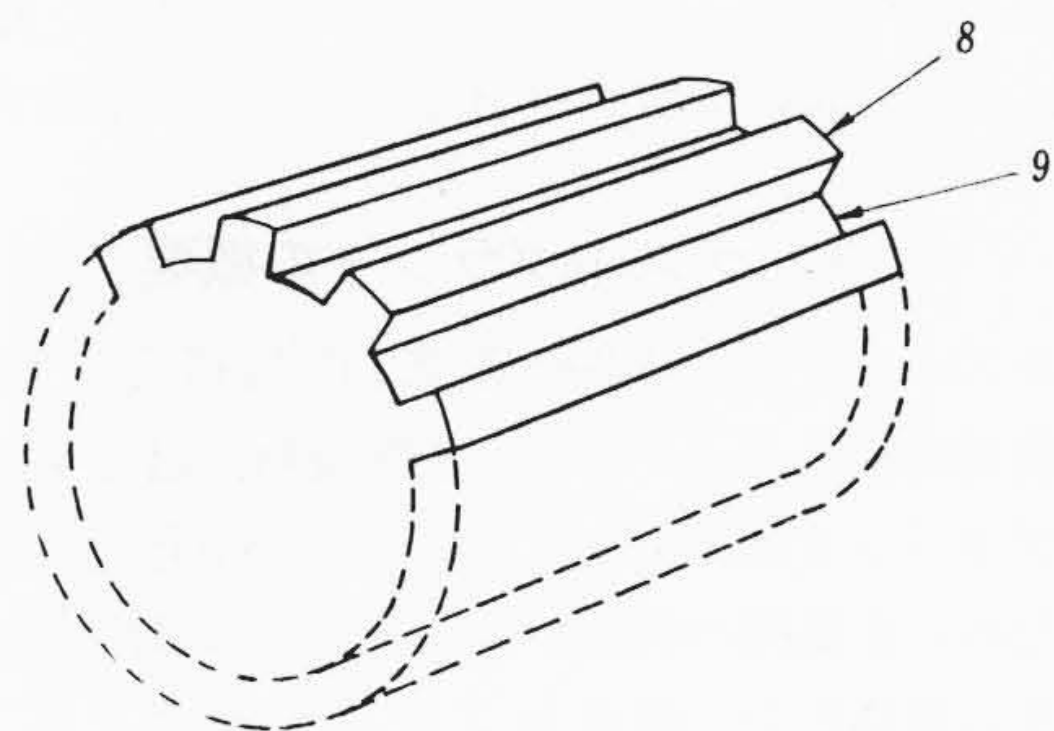
この場合、スリット開口部には円筒型 9 の歯状突起 8 に対応する凹陷部 10 が形成されるため、注型樹脂 6 が多少膨潤しても凹陷部 10 によって吸収されるから外部に突出して回転子 7 に接続するような欠点なくなる。(仙波)



第 1 図



第 2 図



第 3 図