

マイクロコンピュータによる 間接式電気抵抗炉の温度制御†

南 里 孝 行*

ABSTRACT It is very useful for the design and operation of the heat and treatment furnace to analyse precisely the process heating charge and to obtain the temperature-rise characteristics of charge, heating element and furnace wall and the heat efficiency of furnace. Author has proposed a mathematical model for analysing the process of giving heat to charge.

In this paper, he gives a more precise mathematical model in which some changes are made in modeling of heating element.

He proposes a new furnace temperature control system in which at first the controlled variable is not the temperature inside the furnace but the surface temperature of the charge computed by a micro-computer in the real time and after it reaches a set temperature, the controlled variable is the temperature inside the furnace.

He ascertains that the new temperature control system enables the heating time to be considerably reduced and the heat efficiency to be remarkably improved accordingly to the measurements made for an experimental furnace.

1. まえがき

熱加工，熱処理用の箱形間接式抵抗炉（以下単に抵抗炉または炉と言う）によりチャージ（被熱物）を加熱する場合，普通炉内温度はオン・オフまたはPID制御されている。温度検出装置は，先端部が炉内空間に適当に位置する保護管付熱電対が使用され，その先端部検出温度が制御量となる（炉内制御温度はもちろんチャージ加熱温度に等しくとる）。

筆者は，すでに従来皆無であったが，もし得られれば炉設計および炉操業上資する所が大きい，炉によるチャージ加熱過程のデジタルシミュレーション法を段階的に得ている。まず炉設計上有用な基礎資料を得るため，少々厳密性を欠いてもよしとして，熱電対保護管と発熱体，チャージ間の熱放射交換を考慮に入れず（保護管と発熱体，炉壁，チャージ間の形態係数算定がかなり面倒なため），熱電対検出温度はチャージ

表面温度に等しいと単純に仮定して，炉の熱計算モデルを作成した¹⁾（これを計算モデル1と言う）。また，このモデルを用い，炉設計上有用な資料を得た。しかし，チャージ加熱中，炉内空間温度（熱電対検出温度）が制御温度に到達したとき，炉内空間温度とチャージ表面温度間に大きな差がある炉（加熱温度が600°C以下の炉）では，計算モデル1による制御開始後の加熱過程計算結果には大きな誤差を生じる。それゆえ，熱電対保護管と発熱体，炉壁，チャージ間の放射交換を考慮に入れ炉内空間温度を制御量とした，熱計算モデルを作成した²⁾（これを計算モデル2と言う）。これら計算モデル1，2により，オン・オフ制御によるチャージ加熱過程を計算し，両計算結果を比較検討中，次の重要なことが知られた。計算モデル1による炉の熱効率の計算値は計算モデル2によるそれより大きくなる。これは，炉を温度制御する場合，もしチャージ表面温度を制御量にとることができれば，炉内空間温度を制御量とする通常の炉の場合に比し，炉の熱効率が向上し，したがって加熱時間も短縮されることを意味する。しかし，実炉においてチャージ表面温度を制御量にとることは難かしい。

本文では，炉温制御はオン・オフ制御による通常の炉に，数値計算および制御用としてマイクロコンピュ

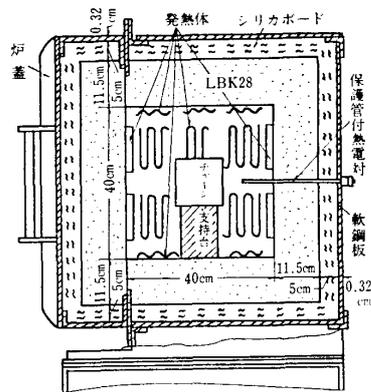
Temperature Control of Indirect Electric Resistance Furnace by Micro Computer. By Takayuki Nanri (Faculty of Engineering, Nagoya Institute of Technology).

*名古屋工業大学工学部

† 1985年6月15日受付

ータ（以後単にマイコンと言う）を導入する。この炉でチャージを加熱中、加熱時間とシミュレーション時間を同一にとりマイコンで加熱過程をデジタルシミュレーションする。制御量としてこのシミュレーションによる算定チャージ表面平均温度（以後“平均”をとり簡単に温度という）をとり、これが制御温度に到達したとき制御を開始し、加熱電力をオフにする。それ以後は実測炉内空間温度を制御量にとり、オン・オフ制御を続行する、というマイコンによる新しい“算定チャージ表面温度”制御方式を提案する。そして、実験炉により、通常の炉内空間温度制御方式を用いた場合と筆者の新制御方式を用いた場合の両者に関し実験し、新方式によれば、従来の方式と比較し、熱効率が向上し、加熱時間を短縮されることを定量的に示している。また、新制御方式でマイコンによりチャージ加熱過程をシミュレーションするとき、計算モデル2によるチャージ温度上昇の計算精度は、炉設計および炉操業上は問題にならないが、これを温度制御に用いると良い結果が得られない。それゆえ、チャージ温度上昇が、制御に用いるうえで問題にならないような十分よい精度で求められるように、計算モデル2の発熱体部のモデルを次のように変える。

計算モデル2では、炉内壁各面に面する発熱体を板状に展開し、それらにより炉内壁面を各面とする六面体と類似の六面体を構成し、その中にチャージを包み込むようにしている。これは、チャージ、発熱体、炉壁、保護管付熱電対相互間の形態係数の算定を簡単にする反面、チャージが炉内壁面を見ない、すなわちチャージと炉内壁面との形態係数を0と見なす、という事実と異なる欠点を有する。もちろん、形態係数が0であっても熱エネルギーの相互反射効果によって、それらの間の放射熱交換係数は0とならず、それらの間でわずかではあるが放射熱交換がある。また、チャージは発熱体を介して炉内壁面と熱交換を間接的に行なっている。本文では、発熱体を板状に展開した後、発熱体各面をそれぞれ炉内壁面に平行に間隔0で対面するように配置する（間隔0で対面とは、間隔はほとんど0であるが接触していない状態を言う）。このモデルを用いた場合、チャージ、発熱体、炉内壁面、保護管付熱電対相互間の形態係数の算定は相当面倒になるが、前述の欠点が解消され、チャージ温度上昇の計算精度は向上する。この、計算モデル2において発熱体のモデルを前述のように部分的に変更した計算モデルを、あらためて計算モデル3と称す。計算モデル3を温度制御に用いる。



発熱体：パイロマックス N(20.2% Cr, 1.09% Si, 残り Ni 及びその他微量元素), 第1層炉壁：LBK28, 第2層炉壁：シリカボード, 第3層炉壁：軟鋼板, チャージ：10cm 立方の炭素鋼 (0.23% C), 保護管付熱電対：保護管はインコネル (80% Ni, 14% Cr, 6% Fe), 熱電対はクロメル・アルメル (保護管内充てん物は MgO)

図1 実験用箱形電気抵抗炉

2. 計算モデル3の構成

2.1 実験炉

本文で取扱う実験炉を図1に示す。この実験炉は立方体状で、炉温制御盤上に据えつけられており、炉内中央部には立方体のチャージが耐火断熱レンガで支持されている。図に見られる保護管付熱電対は炉内空間温度検出用である。チャージ中央部温度測定用保護管付熱電対はチャージ表面から中央部へ真っ直ぐに保護管径とほとんど等しい穴をあけて図のチャージ後方炉外壁からそう入されている。発熱体は波付加工された带状で、炉内壁面とわずかな間隔を保ち、発熱体と同一材料からなるピンで支持されている。また発熱体は炉内空間にほとんど一様に分布・配置してある（なおこの炉の発熱体細部については文献2参照）。

炉によるチャージ加熱過程をデジタルシミュレーションするための計算モデルは以下の仮定に基づき作成する。

- (1) 炉内空気の熱容量は無視し、炉内各物体（チャージ、発熱体、保護管付熱電対、炉内壁面）間における熱の授受は放射、自然対流伝熱による。
- (2) 炉壁、チャージ内の熱伝導計算モデルには熱伝導が一次元的なモデルを用いる。
- (3) 炉内空間に適当に位置するよう炉外壁中央部か

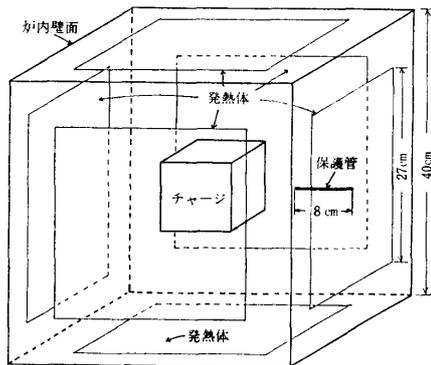


図2 計算モデル3における発熱体のモデル化

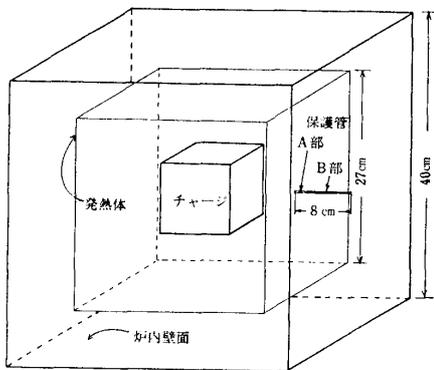


図3 計算モデル2における発熱体のモデル化

らそう入された温度検出用保護管付熱電対をモデル化し、炉内空間温度で制御する炉ではその先端部温度をオン・オフ制御温度とする。

(4) 炉内各物体相互間の放射伝熱計算に用いる交換係数は、発熱体表面積を板状に展開して形態係数を求め、これを用いて算定する。

(5) 発熱体の温度分布は一樣とし、発熱体の熱容量は考慮に入れる。

(6) 発熱体支持用ピンは、発熱体と同一材料からなり、炉内壁に多数埋め込まれているのでピンから炉壁への熱伝達の影響も考慮する。また、発熱体と接触し炉内空間に露出するピン部の温度は発熱体温度に等しいとする。

(7) チャージは炉内空間中央部に耐火・断熱れんがで支持されているが、支持台が炉内における放射、対流、伝導伝熱に及ぼす影響は小さいので無視する。

上記仮定は、すでに発表した計算モデル2を作成する際に用いたものと同様である。計算モデル2と計算モデル3は発熱体のモデル化のみが異なる（これに伴

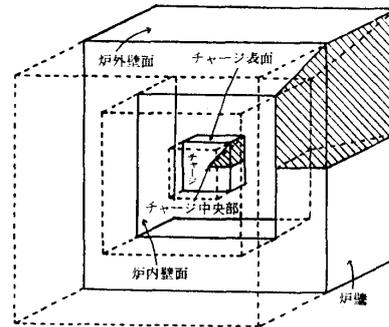


図4 図1の炉のチャージ、炉壁の単純化モデル

ない、保護管付熱電対の炉内露出部の処理が少し異なる)だけで、他の、炉壁、チャージ内の熱伝導モデルなどはほとんど同じである。ここではまず発熱体部のモデル化について言及し、次いで炉壁、チャージ内熱伝導モデルについては簡単に言及する(詳細は文献2参照)。

2.2 発熱体部のモデル化と炉壁、チャージ熱伝導モデル

2.2.1 発熱体部のモデル化

前掲図1の炉内における発熱体モデルを図2に示し、参考のため計算モデル2の発熱体モデルを図3に与える。図3において、炉内に露出している保護管付熱電対部とチャージ、発熱体及び炉内壁面との形態係数の計算を幾分簡単化するため、その露出部を図のようにA、B部の二つに分割し(各部の温度分布は一樣とする)、A部の温度を空間温度とする。A部はチャージと発熱体のみを見、炉内壁面を見ないため、実際の空間温度よりかなり高めになることが計算及び実験結果の比較から知られた(文献2参照)。図2においては、炉内保護管付熱電対部の温度分布は一樣としてこれをA部とし(この温度が制御量となる)、発熱体、チャージ、炉内壁面のすべてを見る。しかし、炉内各部分間の形態係数の算定は、図3の場合は比較的簡単であるが、図2の場合は相当面倒になる(附録1参照)。

2.2.2 炉壁、チャージの熱伝導モデル

図1における炉のチャージと炉壁の単純化モデルを図4に示す。チャージと炉壁内の熱伝導をシミュレーションする場合、チャージ表面、炉内、炉外壁面の各平均温度を考え、各面の温度は、それぞれ一樣で平均温度に等しいと仮定し、更に、チャージ内の等温面はその外表面と相似形をなし、外表面からその中心に向かって連続的に存在するものとする。また、炉壁内等温面は、その内面と相似形をなし、内面から外面に向

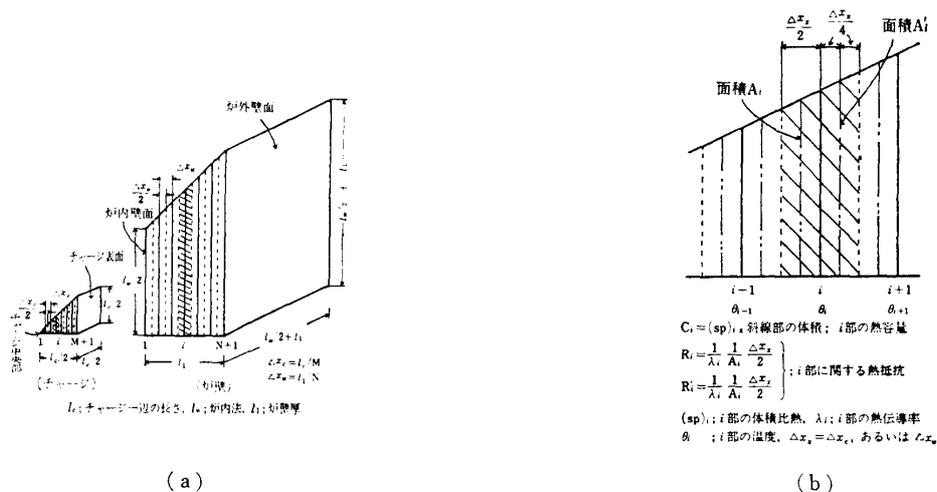


図5 炉壁，チャージ熱伝導領域の分割

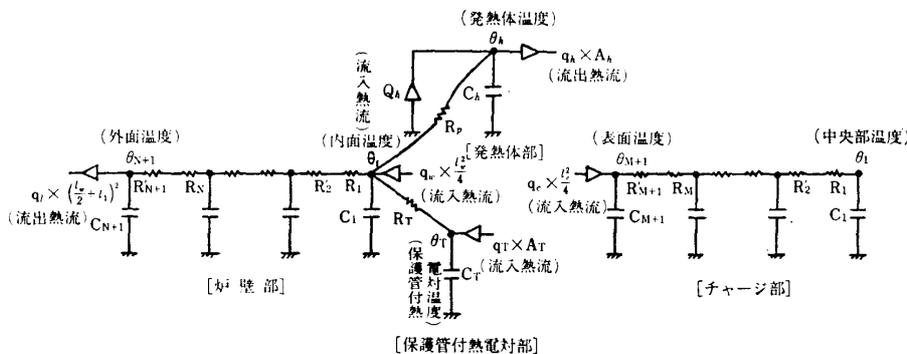


図6 炉系伝熱解析用熱回路

かって連続的に存在するものとする（炉壁，チャージの等温面において熱流密度は均斉とする）。これらの熱伝導は，図4の斜線部（それぞれ全体の $1/2$ の部分）に関し解析すればよい。そこで，図5(a)に示すように解析する炉壁とチャージ部をそれぞれ N ， M 等分割する。ここで，各微小分割領域（例えば斜線部）において温度は至る所一様とする。また，炉壁，チャージ内の保護管付熱電対，発熱体支持ピンの占有体積は小さいので無視する。チャージあるいは炉壁内の斜線部（節点 i ）に関し，図5(b)に示すような熱回路が構成される。この回路方程式は

$$C_i d\theta_i/dt = (\theta_{i-1} - \theta_i)/(R_i + R'_{i-1}) + (\theta_{i+1} - \theta_i)/(R'_i + R_{i+1}) \quad (1)$$

となり，この式の θ_i の時間微分を差分化すれば，次式のように変形される。

$$\theta_{i,t+dt} = \left\{ 1 - \frac{dt}{C_{i,t}} \left(\frac{1}{R_{i,t} + R'_{i-1,t}} + \frac{1}{R'_{i,t} + R_{i+1,t}} \right) \right\} \theta_{i,t} + \frac{dt}{C_{i,t}} \left(\frac{\theta_{i-1,t}}{R_{i,t} + R'_{i-1,t}} + \frac{\theta_{i+1,t}}{R'_{i,t} + R_{i+1,t}} \right)$$

$$(\Delta t \text{ は微小時間}) \quad (2)$$

ここで， Q ， R ， $(R'$ も含む)， C はそれぞれ温度，熱抵抗，熱容量を意味し，上記記号の添字 $i, i \pm 1$ は節点番号， $t, t + dt$ は時間を意味する。たとえば $\theta_{i,t}$ は時間 t における節点 i 部の温度を意味する。

図1の炉系解析用の全体の熱回路は図6のようになる。ただし，発熱体支持ピンが埋め込まれた炉壁部においては，炉壁部の熱抵抗，熱容量とそれぞれ並列にピンの熱抵抗，熱容量をそり入る必要がある。また炉壁内の保護管付熱電対の温度分布は炉壁の温度分布と一致するものとしている。図中の流入熱流密度 q_w ， q_c ， q_r ，流出熱流密度 q_h は，同形式となり，次式で代表して表わせる。

$$q_k = H_k(\theta_a - \theta_k) + \sigma \sum_j F_{kj} \{ (\theta_j + 273)^4 - (\theta_k + 273)^4 \}, \quad (k = w, c, T, h) \quad (3)$$

ここで， q_h は他の熱流密度と異なり流出熱流密度であるから，(3)式で得られた値の符号を変えた値（これは正值となる）を改めて q_h とする。また， σ はステファン・ボルツマン定数， θ_a は炉内空気温度， H_k

表1 各種物質の熱定数

各種物質	熱伝導率(cal/cm·s·°C)	体積比熱(cal/cm ³ ·°C)	放射率
LBK-28	$4.17 \times 10^{-4}(1+0.00133\theta)$	$0.163(1+0.000294\theta)$	0.5
シリカボード	$1.14 \times 10^{-4}(1+0.00232\theta)$	$0.034(1+0.000323\theta)$	
炭素鋼 (0.23% C)	$0.1239(1-2.61 \times 10^{-4}\theta - 4.55 \times 10^{-7}\theta^2)$ ($0 \leq \theta \leq 800^\circ\text{C}$)	$0.8792(1+4.17 \times 10^{-4}\theta + 1.19 \times 10^{-6}\theta^2)$ ($0 \leq \theta \leq 600^\circ\text{C}$)	0.6
インコネル	$0.0023891 + 15.0217 - 0.007145(\theta+273) + 0.144974 \times 10^{-4}(\theta+273)^2$	$2.0426 \times 10^{-3} \{307.563 + 0.504143(\theta+273) - 0.270627 \times 10^{-3}(\theta+273)^2\}$ ($0 \leq \theta \leq 600^\circ\text{C}$)	0.6
マグネシア	$0.1099 - 0.229424 \times 10^{-3}(\theta+273) + 0.14647 \times 10^{-6}(\theta+273)^2$	$3.651 + 0.252475 + 0.431561 \times 10^{-4}(\theta+273) - 3669.46(\theta+273)^{-2}$	
発熱体、ビン	$0.0225(1+0.00187\theta)$	$1.98287 \times 10^{-3} \{308.054 + 0.540935(\theta+273) - 0.292051 \times 10^{-3}(\theta+273)^2\}$ ($0 \leq \theta \leq 500^\circ\text{C}$) $1.98287 \times 10^{-3} - 468.871 + 2.1(\theta+273) - 0.001(\theta+273)^2$ ($500^\circ\text{C} \leq \theta$)	0.9

*文献4参照

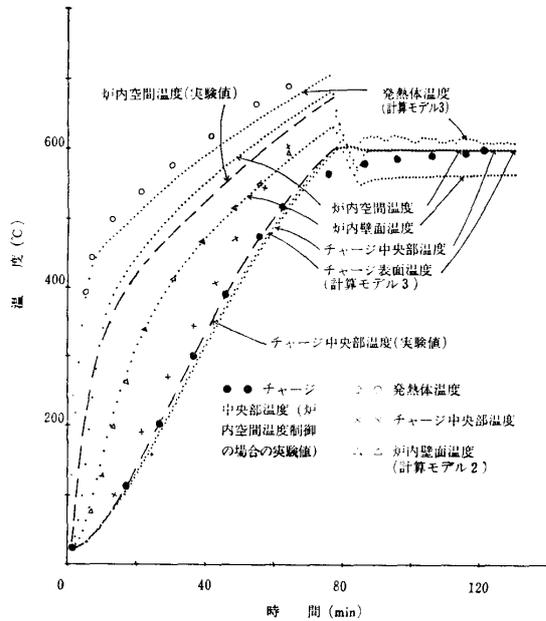


図7 炉内各部温度上昇(制御温度=600°C, 制御量はチャージ中央部温度)

は炉内空気とk部間の対流熱伝達率, \sum_j はjをw, c, T, hと変化した総和, \mathcal{F}_{kj} はk部とj部との間の熱交換係数であり, \mathcal{F}_{kj} は附録1の形態係数を用いてホテルの方法³⁾により求まる。図中の損失熱流密度 q_i は, 炉外壁から周囲空気への対流及び放射による流出熱流密度である。

したがって, 炉のチャージ加熱過程のデジタルシミュレーションは, 図6の各節点に関し, (1)式と類似の熱回路方程式をつくり, 各方程式から(2)式と同様な差分方程式を得, 時間ステップ Δt 毎に各節点の温度を求めて行なう。ただし, 時間tにおける炉内空

気温度 $\theta_{a,t}$ は, 仮定により炉内空気にエネルギーが蓄積されないことから

$$\sum_k A_k H_k (\theta_{k,t} - \theta_{a,t}) = 0 \quad (4)$$

を得, この式から求められる。ここで \sum_k は $k=w, c, T, h$ に関する総和を意味する。

2.3 実験結果とシミュレーション結果の比較検討

前掲図1の実験炉系における各物質の熱定数を表1に示し, その他の諸定数を以下に与える。

- ・発熱体表面積=8707 cm² [図2, 図3における炉内壁各面に対する正方形発熱体の辺の長さ=27 cm, 発熱体と炉内壁との間隔=0 cm (図2), =6.5 cm (図3), 発熱体体積=600 cm³
- ・制御温度=600°C
- ・オン時発熱体加熱電力=5.85 kW
- ・保護管付熱電対において, 保護管外径=0.578 cm, 内径=0.378 cm, 素線と保護管との電気的絶縁のため, MgO が充てんされている。

なお, その他については文献2参照。

実験炉において, チャージ表面温度は精度よく測定できないので, チャージ中央部温度を制御量にとる。

図7は, 実験炉において, オン・オフ調節計による制御温度を600°Cと設定し, 初期温度が23°C一様のチャージ加熱過程から得られたチャージ中央部および炉内空間温度上昇測定結果(ここで, 炉系各部の初期温度分布も一様で, チャージ温度と同じとし, チャージ加熱中, 炉周囲温度もほぼ23°C一定に維持), 並びに計算モデル2と3によるこの加熱過程のデジタルシミュレーション結果を示す。ただし, 実験炉では, チャージ表面温度, 発熱体温度の測定は難しいので行なわなかったが, 炉内壁面温度は測定した。しかし, 本実験のように時間的温度変化が大きい場合は, 保護管先端部と温度測定炉壁部との接触熱抵抗による影響を受け, この測定値は実際よりかなり全体的に低めになるので, 図7では省略している。また, 計算法2によるチャージ中央部, 炉内壁面, 発熱体温度上昇計算値, 及び実験によるチャージ中央部, 炉内空間温度上昇値は, 図が煩雑になるので, 制御開始以後は省略した(計算モデル2による炉内空間温度上昇は省略した)。なお, ここで通常の炉内空間温度制御による加熱実験も行ない, 参考のため, このときのチャージ中央部温度実測値を図7に合せ示している。計算によるチャージ表面の中央部各温度上昇はほとんど一致する。

計算及び実験結果, 図7から以下のことが分かる。計算モデル3によるチャージ中央部温度上昇, 炉内空間温度上昇計算値は, 計算モデル2によるものより精

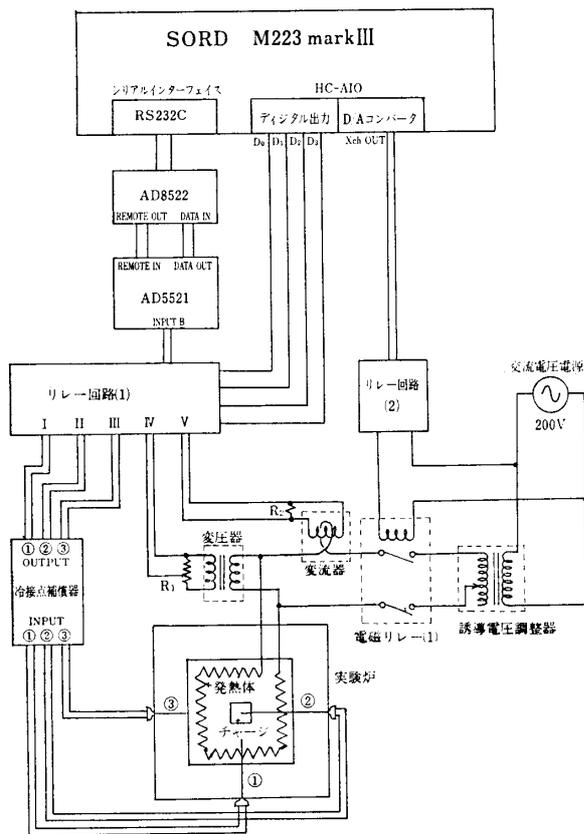


図8 マイコンによる温度制御システムの全体図

度が大幅に向上し、実験値に相当よく近似する。

3. マイコンによる温度制御

3.1 温度制御システムの概要

計算モデル3による加熱過程のデジタルシミュレーションと実験データの取り込み及び制御に用いるマイコンは、ソード(株)製の M223 mark III である。このマイコンの CPU は Z80A (クロック周波数 4 MHz) で、主記憶容量は 64K バイトであるが、ユーザーエリアは 55K バイトで本シミュレーションと制御に必要なぎりぎりの容量である。シミュレーションは時間ステップ $\Delta t = 1.5$ 秒毎に行なうが、各ステップに要する計算時間は 1 秒である。外部記憶装置としては、記憶容量 350K バイトの 5 インチ・フロッピーディスク・メディアを使用するフロッピーディスク装置 2 台が装備されている。また RS-232C タイプのシリアルインターフェイスが 2 ポートとアナログ入出力ユニット (HC-AIO) を装備している。HC-AIO は D/A, A/D コンバータと 4 ビットのデジタル電圧を出力する機能を有する。マイコン、実験炉、測定機器などからなる温度制御システムの全体接続図を図 8 に

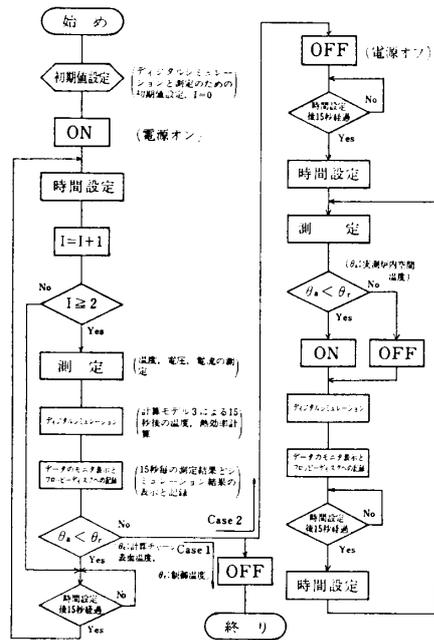


図9 温度制御システムの動作過程の流れ図

示す。ここで、AD5521 はデジタル電圧測定器 (表示桁数は 5 桁で最大表示が 19999 であり、マイコンからの命令で 200mV レンジを使用)、AD8522 はマイコンとこの電圧測定器とを接続するインターフェイスである (これらはエイ・アンド・ディ(株)製)。実験炉において、①、②、③は、それぞれ炉内空間温度、チャージ中央部温度、炉内壁温度測定用の保護管付熱電対であり、それらの起電力は冷接点補償器の出力側に生じる。炉供給電力は、変圧器二次側電圧と変流器二次側電流を測定してそれらの積により求める。ただし、マイコンに取り込まれるのは、抵抗 R_1 と R_2 の電圧降下 V_1 , V_2 であるが、これらの電圧をもちいてマイコン内でそれぞれ、発熱体の供給電圧 V_R 、供給電流 I_R が変圧変流を考慮して $V_R = V_1 / 0.0415 [V]$, $I_R = V_2 / 0.125 [A]$ として計算される。リレー回路(1)の I, II, III, IV, V は、それぞれ熱電対①、②、③の起電力と R_1, R_2 の電圧を、HC-AIO のデジタル出力電圧により、適当に 1 つずつ測定器 AD5521 に入力するためのリレー回路である。デジタル出力電圧の電圧レベルの指定はマイコン内臓のサブルーチンプログラムによる。炉供給電圧のオン・オフは、D/A コンバータのアナログ出力電圧によって、リレー回路(2)の電磁リレーをマーク・ブレイクさせて行なう。

マイコンによる温度制御システムの動作過程の簡単な流れ図を図 9 に示す。ここでは、熱電対①、②、③

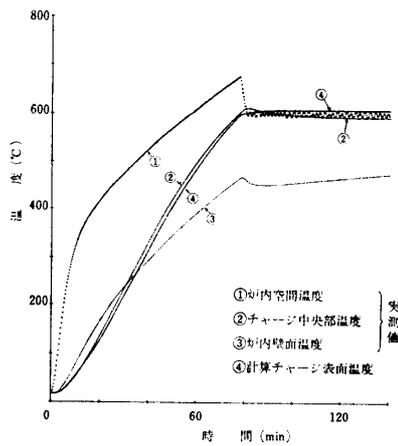


図10 炉内各部温度上昇 (制御温度 100°C, 計算チャージ表面温度制御)

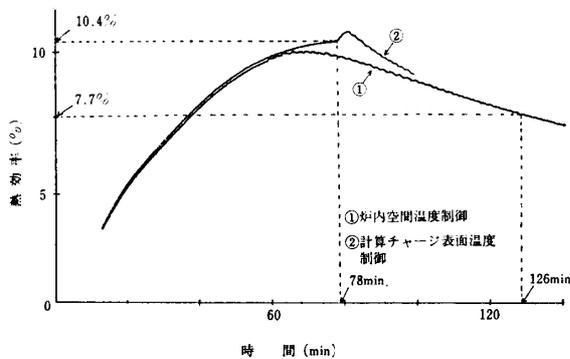


図11 炉の熱効率の比較

の起電力と R_1 , R_2 の電圧は供給電圧オンで加熱開始後すべて15秒間隔でマイコンに取り込む (これら起電力, 電圧のマイコン取り込みに要する時間は小さく無視できる)。したがって, チャージ加熱過程のデジタルシミュレーション (時間ステップ1.5秒毎に計算を10回繰り返す) における計算機出力は15秒毎に行ない, 計算時間と測定時間を同一にする。計算チャージ表面温度が加熱温度に達すると, 表面と中央部の温度がほとんど一致する 通常の場合は, Case 1 のように電圧をオフにして加熱を終了する。Case 2 は, チャージ表面温度が加熱温度に到達しても中央部温度がそれより低い特別な場合で, 電圧をオフ後, 実測炉内空間温度を制御量にとり, オン・オフ制御を続行する (シミュレーションにおける制御量もこの空間温度となる)。モニタ監視によって計算チャージ中央部温度が表面温度に一致したと判断された時, 誘導電圧調整器出力電圧を0にし, 計算機の“stop”キーを押して加熱を終了する。

3.2 実験結果及び検討

2.3節の実験と同一の炉系諸条件下, 既掲図5の温度制御システムを用いて実験し, 得られた結果を図示したのが図10, 11である。図10は炉内各部の温度上昇であり, ④のシミュレーションによるチャージ表面温度上昇は中央部温度上昇とほとんど一致する。図11は, 本実験と2.3節の実験(通常の炉内空間温度制御)による炉の熱効率 [= (ある加熱時間に対するチャージ流入熱量)/(ある加熱時間に対する発熱体加熱電力量)] を示す。ここで, 炉の熱効率を求める際必要なチャージ流入熱量は, 各時間におけるチャージの平均温度は中央部温度に等しい (これはシミュレーション結果から推定される) という仮定のもとに, 実測チャージ中央部温度により算定した。

図10, 11と既掲図4から次のことが分かる。

(1)マイコンによる温度制御の場合, チャージ加熱は, チャージ表面のシミュレーション温度が600°Cになる時間78分のところで終了するが (図9の case 1 の場合), 図10では, 参考のため, 時間78分以後, 図9の case 2 の加熱温度を示している。時間78分のときチャージのシミュレーション温度と実測温度との差異は2°Cと非常に小さい。78分以後の実測炉内空間温度制御過程において, 制御量のサンプリング周期を, 全測定及びシミュレーション結果のディスクへの記録における記憶容量の制約上, 15秒と大きくとったため実測チャージ温度は600°Cより低い595°Cで一定となる (シミュレーションチャージ温度は601°Cで, 制御温度と1°Cの違いは, 空間温度の実測値とシミュレーション値との差違からくる)。しかし, サンプリング周期をデジタルシミュレーションにおける時間刻みと同程度の2~3秒にとればチャージ温度は600°C一定となる。

(2)通常の炉内空間温度制御の場合, 600°Cにチャージを加熱する時間は126分であり (図7参照), この熱効率は7.7%である (図11参照)。一方マイコンによる温度制御の場合, チャージ加熱は前記のように78分で, 熱効率は図11から10.4%となることが分かる。したがって, 新制御方式は, 通常の制御方式に比べ, 本実験例の場合, 加熱時間が48分短縮し, 熱効率は2.7%向上する。

4. あとがき

本文では, 発熱体が炉内壁に埋め込まれたピンで支持され, 炉内空間に一様に分布・配置されている炉 (均熱炉等) を時間的に実時間と同時進行のデジタルシミュレーションによるチャージ表面平均温度を制

御量にとり、温度制御する方式を提案した。勿論、マイコンを導入せず、チャージ表面の何箇所かの温度を何台かの放射高温計で測定し、それらの平均温度を制御量にとり、オン・オフ制御してもよい（しかし、温度測定の際、炉壁に相当数ののぞき穴をあける必要がある、これらからの損失熱量を生じることと、発熱体が邪魔になり、所定の箇所が測定できないこともあり、また、高価な放射高温計を何台も必要とするといった問題もある）。新制御方式に導入したマイコンは、温度制御に用いるだけでなく、炉を操業する前に、予め、この加熱過程をシミュレーションし、加熱電力の決定や、加熱時間の算定などに用いる。勿論、他にも流用はできる。また実験によって、従来の炉内空間温度制御方式に比べ、本方式によれば加熱時間の大幅な短縮と熱効率が大幅に向上することを定量的に示した。

チャージ表面温度が制御温度に到達したとき、中央部温度がそれより低い場合のチャージ加熱過程について本文では実験を行なわなかった。その理由は、この様に制御開始時にチャージ表面と中央部に温度差が生じるのは、チャージ一辺が20~25cm以上と炉の内容積に対し比較的大きい特別な場合であることと、チャージ重量が重く実験者(本学卒研究生等)が実験室で取扱うには落下事故などの危険が伴なうことである。そこで、参考としてこの様な特別な新制御方式による加熱過程のデジタルシミュレーションを、チャージ一辺が20cmと25cmの場合に關し(他の炉系諸条件は本文2.3節における実験と同一)行なった結果、チャージ表面が制御温度600°Cに到達したとき、いずれの場合も中央部温度はそれより15°C程低く、制御開始以後約15分で中央部温度は表面温度に等しくなり、600°Cになった。チャージ表面が600°Cに達するときの加熱時間と熱効率は、前者の場合、155分、39%、後者の場合、235分、51%であった。いずれの場合もチャージ表面が加熱温度に達した後、中央部がその温度に達する遅れ時間は上記加熱時間に比し非常に小さいことが分かる(チャージ全体が加熱温度に達するときの熱効率はいずれの場合も上記熱効率とほとんど一致する)。したがって、チャージ表面が加熱温度に達したとき、中央部温度がそれより低いチャージ加熱過程の場合も、本制御方式によれば、加熱時間の短縮と熱効率の向上が得られることが推定し得る。また炉諸条件は同一で、加熱するチャージも大きさだけが異なり同一のとき、チャージの大きさが大きい方が熱効率は大きくなることも分かる。

終りに、この研究の当初有力な示唆と助言をいただいた大同特殊鋼(株)の加熱炉設計部の方々、ならびに本研究に関する実験と計算に協力していただいた本学卒研究生諸氏に謝意を表します。

参考文献

- 1) 南里他：間接式電気抵抗炉におけるチャージ加熱過程の解析，電気学会論文誌，A，98，8，431/438（1978）
- 2) 南里：間接式電気抵抗炉によるチャージ加熱過程の解析方法，日本シミュレーション学会論文誌，1，3（1981）
- 3) Mcadams: Heat Transmission, McGraw-Hill, 72
- 4) Tslaf: Combined properties of conductors, Elsevier Co., 570
- 5) 南里他：電気炉設計法，森北出版，149
W. Tripp, et al: Radiation Shape Factors for Plane Surfaces and Spheres, Circles or Cylinders, Kansas State University Bulletin, 46, 1/46（1962）
- 6) 小野他：コンピュータ図学，コロナ社，121

附録 1

本文図2において、求める形態係数を F_{ij} ($i, j = w, h, c, t$) とする。ここで、 w : 炉内壁、 h : 発熱体、 c : チャージ、 t : 保護管 であり、 F_{ij} は i 部の j 部に対する形態係数とする。求める形態係数の個数は全部で16個であるが、 $F_{cc} = F_{tt} = 0$ であるから F_{hh} , F_{cw} , F_{ch} , F_{th} の4個の形態係数が求まれば、その他は、以下の総和の定理と相反の定理

$$F_{ii} + F_{iw} + F_{ih} + F_{ic} + F_{it} = 1, \quad (i = w, h, c, t)$$

$$A_i F_{ij} = A_j F_{ji}, \quad (i, j = w, h, c, t) \quad (\text{附1})$$

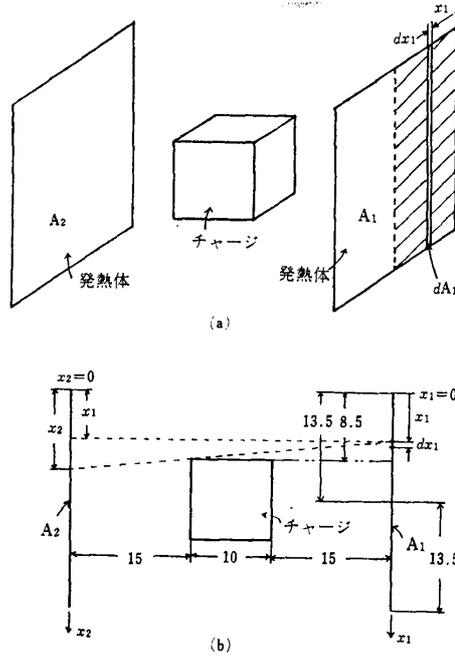
を用いて定まる(ここで、 A_i, A_j は i, j 部の面積)。

ここでは、 F_{hh} , F_{cw} , F_{ch} を求める際、保護管を考慮に入れると計算が極めて面倒になることと、これを無視して計算してもこの影響は非常に小さいものと考えられるので、保護管は無視して計算する。ただし、チャージに関する総和の定理から $F_{ct} = 0$ となり、相反の定理から F_{tc} を求めるとこれも0となってしまふ。実際には、 F_{tc} は非常に小さいが、0ではなく、勿論 F_{ic} も0でなく、こちらの方はある程度の値をもつ。そこで、前記4個の形態係数以外に F_{tc} も計算によって求めることにし、 F_{ct} は相反の定理から求める。

チャージが炉内空間中央部に位置しているため、 F_{hh} の算定が一番面倒であるから、 F_{hh} の算定法と算定結果を示し、他の4個に関しては同様に言えよるので、紙面の都合上省略する。

F_{hh} の算定法

本文図2のモデルにおいて、発熱体の自己形態係数



附図1 形態係数 F_1 の計算モデル

(F_{hh}) を求める場合、発熱体は6個の面積の等しい正方形に分かれているが、その中の1個に着目し考えればよく、これを A_1 面とする。 A_1 面の片面は炉内壁だけを見、一方の面は他の発熱体面を見ているので、 A_1 面の片面の面積を A_1 とする。 A_1 面から見える他の発熱体面は、平行に位置した向い側の1面、及び直交して隣接する4面である。 A_1 面と平行な面を A_2 直交する面の中の1面を A_3 とする。 A_1 面の片面と A_2 及び A_3 面との形態係数をそれぞれ F_{12} , F_{13} とすれば、次式により F_{hh} が求められる。

$$F_{hh} = 6(A_1 F_{12} + 4A_1 F_{13}) / A_h, \quad (A_h = 12A_1; \text{発熱体全表面積}, A_1 = 27^2 [\text{cm}^2]) \quad (附2)$$

したがって、次に F_{12} を計算する。

F_{12} を求める場合、附図1から分かるように A_1 の半分(図の斜線部)について考えればよい。附図1(b)において、微小面 dA_1 から A_2 面を見ると、 x_2 の位置までは、チャージに妨げられずに上から下まで見えるが、それ以降は、チャージがあるため複雑な形に見える。よってまず、 A_1 の斜線部と A_2 のチャージに妨げられずに上から下まで全て見える部分(以後これを簡単に A_2' と称す)との形態係数を求める。この形態係数を F_1 とすれば

$$F_1 = \int_0^{13.5} f_1 dx_1 + \int_0^{8.5} f_2 dx_1 - \int_{8.5}^{13.5} f_3 dx_1,$$

$$f_1 = \frac{1}{\pi} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{40}{27}\right)^2} \tan^{-1} \left(\frac{x_1}{\sqrt{40^2 + 27^2}} \right) - \frac{40}{27} \tan^{-1} \left(\frac{x_1}{40} \right) + \frac{x_1}{\sqrt{40^2 + 27^2}} \right]$$

$$\times \tan^{-1} \left(\frac{27}{\sqrt{40^2 + x_1^2}} \right),$$

$$f_2 = \frac{1}{\pi} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{40}{27}\right)^2} \tan^{-1} \left\{ \frac{8(8.5 - x_1)}{5\sqrt{40^2 + 27^2}} \right\} - \frac{40}{27} \tan^{-1} \left\{ \frac{8(8.5 - x_1)}{200} \right\} + \frac{8(8.5 - x_1)}{5\sqrt{40^2 + \left\{ \frac{8(8.5 - x_1)}{5} \right\}^2}} \right]$$

$$\times \tan^{-1} \left\{ \frac{27}{\sqrt{40^2 + \left\{ \frac{8(8.5 - x_1)}{5} \right\}^2}} \right\},$$

$$f_3 = \frac{1}{\pi} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{40}{27}\right)^2} \tan^{-1} \left\{ \frac{8(x_1 - 8.5)}{3\sqrt{40^2 + 27^2}} \right\} - \frac{40}{27} \tan^{-1} \left\{ \frac{8(x_1 - 8.5)}{120} \right\} + \frac{8(x_1 - 8.5)}{3\sqrt{40^2 + \left\{ \frac{8(x_1 - 8.5)}{3} \right\}^2}} \right]$$

$$\times \tan^{-1} \left\{ \frac{27}{\sqrt{40^2 + \left\{ \frac{8(x_1 - 8.5)}{3} \right\}^2}} \right\} \quad (附3)$$

となる。

次に、 A_1 の斜線部と A_2 の A_2' を除いた残りの部分(以後これを簡単に A_2'' と称す)との形態係数(F_2)を求める。附図2(a)に示すように A_1 の $\frac{1}{4}$ の面を12の部分に分割する。これは、 A_2'' の見え方は、 A_1 の各位置によって異なるが、各分割部分においては、 A_2'' の見え方に関し、共通の関係が成立するために行なった。ここでは、 A_1 の(ホ)の部分と A_2'' との形態係数 $F(\text{ホ})$ の算出手順を示し、他の部分との形態係数については、同様に行なえばよいので、結果のみを示す。

附図2(b)において、領域(ホ)の内の任意の点 E_1 から見たときのチャージの頂点 B, C, D, F, G, H の A_2 平面 ($x_2 z_2$ 平面) への投影点をそれぞれ B', C', D', F', G', H' とすれば (A, E 点は見えない)、チャージの投影図は付図2(c)のようになる。

したがって、領域(ホ)と A_2'' の(a), (b), (c)部(附図2(c)参照)とのそれぞれの形態係数を求め、加え合わせれば(ホ)部と A_2'' 部との形態係数が求まり、次式のようになる。

$$F_{(\text{ホ})} = \frac{1}{\pi} \left[\int_0^{8.5} dx_1 \int_{13.6}^{18.5} dz_1 \int_{a_0}^{27} dx_2 \int_{a_1}^{27} f(x_1, x_2, z_1, z_2) dz_2 + \int_0^{8.5} dx_1 \int_{13.6}^{18.5} dz_1 \int_{a_0}^{a_2} dx_2 \int_{a_3}^{a_4} f(x_1, x_2, z_1, z_2) dz_2 \right]$$

$$dz_2 + \int_0^{8.5} dx_1 \int_{13.6}^{18.5} dz_1 \int_{a_0}^{a_5} dx_2 \int_0^{a_6} f(x_1, x_2, z_1, z_2) dz_2 \quad (\text{附 4})$$

ここで

$$a_0 = (68 - 3x_1)/5, \quad a_1 = (148 - 5z_1)/3, \quad a_2 = (68 - 5x_1)/3, \\ a_3 = (148 - 3z_1)/5, \quad a_4 = (296 - 16z_1) \{x_2 - (68 - 3x_1)/5\} / (136 - 16x_1) + (148 - 3z_1)/5, \\ a_5 = (68 - 3x_1)/5 - \{(68 - 3z_1)/5\} \{(136 - 16x_1) / (136 - 16z_1)\}, \\ a_6 = (136 - 16z_1) \{x_2 - (68 - 3x_1) / 5\} / (136 - 16x_1) + (68 - 2z_1) / 15, \\ f(x_1, x_2, z_1, z_2) = 40^2 / \{40^2 + (x_2 - x_1)^2 + (z_2 - z_1)^2\}$$

(附 5)

また、(イ), ..., (ヲ) 部と A_2'' 部との形態係数をそれぞれ $F_{(イ)}, \dots, F_{(ヲ)}$ とすれば、次式のようになる。

$$F_{(イ)} = \frac{1}{\pi} \left[\int_0^{13/3} dx_1 \int_{68/3}^{27} dz_1 \int_{a_0}^{27} dx_2 \int_{a_3}^{27} f(x_1, x_2, z_1, z_2) dz_2 \right] \quad (\text{附 6})$$

$$F_{(ロ)} = \frac{1}{\pi} \left[\int_0^{13/3} dx_1 \int_{18.5}^{68/3} dz_1 \int_{a_0}^{27} dx_2 \int_{a_3}^{27} f(x_1, x_2, z_1, z_2) dz_2 \right. \\ \left. + \int_{18.5}^{13/3} dx_1 \int_0^{68/3} dz_1 \int_{a_0}^{a_5} dx_2 \int_0^{a_6} f(x_1, x_2, z_1, z_2) dz_2 \right] \quad (\text{附 7})$$

$$F_{(ハ)} = \frac{1}{\pi} \left[\int_{13/3}^{8.5} dx_1 \int_{68/3}^{27} dz_1 \int_{a_0}^{27} dx_2 \int_{a_3}^{27} f(x_1, x_2, z_1, z_2) dz_2 \right. \\ \left. + \int_{13/3}^{8.5} dx_1 \int_{68/3}^{27} dz_1 \int_{a_3}^{a_8} dx_2 \int_{a_7}^{a_8} f(x_1, x_2, z_1, z_2) dz_2 \right] \quad (\text{附 8})$$

ここで

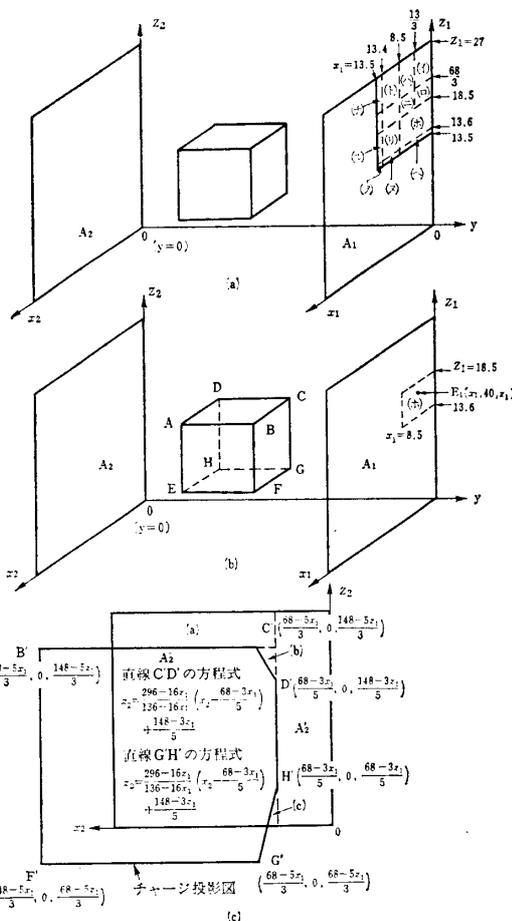
$$a_7 = (296 - 16z_1) (3x_1 - 13) / \{5(296 - 16x_1)\} + (148 - 3z_1) / 5, \\ a_8 = (296 - 16z_1) \{x_2 - (148 - 3x_1) / 5\} / (296 - 16x_1) + (148 - 3z_1) / 5 \quad (\text{附 9})$$

$$F_{(ニ)} = \frac{1}{\pi} \left[\int_{13/3}^{8.5} dx_1 \int_{18.5}^{68/3} dz_1 \int_{a_0}^{27} dx_2 \int_{a_3}^{27} f(x_1, x_2, z_1, z_2) dz_2 \right. \\ \left. + \int_{13/3}^{8.5} dx_1 \int_{18.5}^{68/3} dz_1 \int_{a_0}^{a_5} dx_2 \int_0^{a_6} f(x_1, x_2, z_1, z_2) dz_2 \right. \\ \left. + \int_{13/3}^{8.5} dx_1 \int_{18.5}^{68/3} dz_1 \int_{a_9}^{27} dx_2 \int_{a_7}^{a_8} f(x_1, x_2, z_1, z_2) dz_2 \right] \quad (\text{附 10})$$

ここで

$$a_9 = (148 - 3x_1) / 5 \quad (\text{附 11})$$

$$F_{(ホ)} = \frac{1}{\pi} \left[\int_0^{8.5} dx_1 \int_{13.5}^{13.6} dz_1 \int_{a_0}^{27} dx_2 \int_{a_1}^{27} f(x_1, x_2, z_1, z_2) dz_2 \right]$$



附図 2 形態係数 F_2 の計算モデル

$$+ \int_0^{8.5} dx_1 \int_{13.5}^{13.6} dz_1 \int_{a_0}^{27} dx_2 \int_{a_0}^{a_{10}} f(x_1, x_2, z_1, z_2) dz_2 \\ + \int_0^{8.5} dx_1 \int_{13.5}^{13.6} dz_1 \int_{a_0}^{a_2} dx_2 \int_{a_3}^{a_4} f(x_1, x_2, z_1, z_2) dz_2 \\ + \int_0^{8.5} dx_1 \int_{13.5}^{13.6} dz_1 \int_{a_0}^{a_2} dx_2 \int_{a_{10}}^{a_6} f(x_1, x_2, z_1, z_2) dz_2 \quad (\text{附 12})$$

ここで

$$a_{10} = (68 - 5z_1) / 3 \quad (\text{附 13})$$

$$F_{(ト)} = \frac{1}{\pi} \left[\int_{8.5}^{13.4} dx_1 \int_{18.5}^{27} dz_1 \int_{a_2}^{27} dx_2 \int_{a_3}^{27} f(x_1, x_2, z_1, z_2) dz_2 \right. \\ \left. + \int_{8.5}^{13.4} dx_1 \int_{18.5}^{27} dz_1 \int_{a_2}^{a_0} dx_2 \int_{a_1}^{a_4} f(x_1, x_2, z_1, z_2) dz_2 \right. \\ \left. + \int_{8.5}^{13.4} dx_1 \int_{18.5}^{27} dz_1 \int_{a_9}^{27} dx_2 \int_{a_7}^{a_8} f(x_1, x_2, z_1, z_2) dz_2 \right] \quad (\text{附 14})$$

$$F_{(チ)} = \frac{1}{\pi} \left[\int_{13.4}^{13.5} dx_1 \int_{8.5}^{27} dz_1 \int_{a_2}^{27} dx_2 \int_{a_3}^{27} f(x_1, x_2, z_1, z_2) dz_2 \right]$$

$$\begin{aligned}
& z_2) dz_2 \\
& + \int_{13.4}^{13.5} dx_1 \int_{8.5}^{27} dz_1 \int_{a_2}^{a_0} dx_2 \int_{a_1}^{a_4} f(x_1, x_2, z_1, z_2) dz_2 \\
& + \int_{13.4}^{13.5} dx_1 \int_{8.5}^{27} dz_1 \int_{a_9}^{a_{11}} dx_2 \int_{a_1}^{a_8} f(x_1, x_2, z_1, z_2) dz_2 \\
& + \int_{13.4}^{13.5} dx_1 \int_{8.5}^{27} dz_1 \int_{a_{11}}^{27} dx_2 \int_0^{a_3} f(x_1, x_2, z_1, z_2) dz_2 \quad] \\
& \hspace{15em} \text{(附15)}
\end{aligned}$$

ここで

$$a_{11} = (148 - 5x_1) / 3 \quad \text{(附16)}$$

$$\begin{aligned}
F_{(y)} = \frac{1}{\pi} \left[\int_{8.5}^{13.4} dx_1 \int_{13.6}^{18.5} dz_1 \int_{a_2}^{27} dx_2 \int_{a_1}^{27} f(x_1, x_2, z_1, \right. \\
\left. z_2) dz_2 \right] \quad \text{(附17)}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
F_{(x)} = \frac{1}{\pi} \left[\int_{8.5}^{13.4} dx_1 \int_{13.5}^{13.6} dz_1 \int_{a_2}^{27} dx_2 \int_{a_1}^{27} f(x_1, x_2, z_1, \right. \\
\left. z_2) dz_2 \right. \\
\left. + \int_{8.5}^{13.4} dx_1 \int_{13.5}^{13.6} dz_1 \int_{a_2}^{27} dx_2 \int_0^{a_{10}} f(x_1, x_2, z_1, z_2) dz_2 \right] \\
\hspace{15em} \text{(附18)}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
F_{(z)} = \frac{1}{\pi} \left[\int_{13.4}^{13.5} dx_1 \int_{13.6}^{18.5} dz_1 \int_{a_2}^{27} dx_2 \int_{a_1}^{27} f(x_1, x_2, z_1, \right. \\
\left. z_2) dz_2 \right. \\
\left. + \int_{13.4}^{13.5} dx_1 \int_{13.6}^{18.5} dz_1 \int_{a_{11}}^{27} dx_2 \int_0^{a_1} f(x_1, x_2, z_1, z_2) dz_2 \right] \\
\hspace{15em} \text{(附19)}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
F_{(v)} = \frac{1}{\pi} \left[\int_{13.4}^{13.5} dx_1 \int_{13.5}^{13.6} dz_1 \int_{a_2}^{27} dx_2 \int_{a_1}^{27} f(x_1, x_2, z_1, \right. \\
\left. z_2) dz_2 \right. \\
\left. + \int_{13.4}^{13.5} dx_1 \int_{13.5}^{13.6} dz_1 \int_{a_2}^{27} dx_2 \int_0^{a_{10}} f(x_1, x_2, z_1, z_2) dz_2 \right] \\
\hspace{15em} \text{(附20)}
\end{aligned}$$

したがって

$$\begin{aligned}
F_2 = 4(A_{(i)}F_{(i)} + A_{(e)}F_{(e)} + A_{(s)}F_{(s)} + A_{(z)}F_{(z)} \\
+ A_{(*)}F_{(*)} + A_{(\sim)}F_{(\sim)} + A_{(\dagger)}F_{(\dagger)} + A_{(\#)}F_{(\#)} \\
+ A_{(\vee)}F_{(\vee)} + A_{(x)}F_{(x)} + A_{(\nu)}F_{(\nu)} + A_{(\gamma)}F_{(\gamma)}) / A_1 \\
\hspace{15em} \text{(附21)}
\end{aligned}$$

ただし、 $A_{(i)}$, \dots , $A_{(\gamma)}$ は、それぞれ(i), \dots , (γ)部の面積で、これらの総和は $A_1/4$ となる。

A_1 面の片面と A_2 面との形態係数 F_{12} は

$$F_{12} = F_1 + F_2 \quad \text{(附22)}$$

となる。

A_1 面の片面と A_3 面との形態係数 F_{13} は、 F_{12} の算出と同様にして求められるが、この計算と結果は紙面の都合上省略する。尚、本形態係数の計算において、参考にした文献を、参考文献5, 6に示す。

最後に、参考のため各形態係数の計算値を以下に与える。

$$\begin{aligned}
F_{ww} = 0.333622, \quad F_{wh} = 0.640541, \quad F_{wc} = 0.025293 \\
F_{wt} = 0.543111 \times 10^{-3}, \quad F_{hw} = 0.702926, \\
F_{hh} = 0.255244, \quad F_{hc} = 0.040784, \\
F_{ht} = 0.104478 \times 10^{-2}, \quad F_{cw} = 0.404665, \\
F_{ch} = 0.594608, \quad F_{cc} = 0, \quad F_{ct} = 0.726917 \times 10^{-3} \\
F_{tw} = 0.352532, \quad F_{th} = 0.617976, \quad F_{tc} = 0.029491, \\
F_{tt} = 0 \\
\hspace{15em} \text{(附23)}
\end{aligned}$$