

JAERI-M

8 1 0 9

水平環状断熱層内における高温高压ガスの自然対流

(第1報：物性値の温度依存性を考慮した場合の数値計算コード)

1979年2月

小川 益郎・滝塚 貴和・佐野川 好母

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

水平環状断熱層内における高温高圧ガスの自然対流
(第1報: 物性値の温度依存性を考慮した場合の数値計算コード)

日本原子力研究所東海研究所・高温工学室

小川益郎・滝塚貴和・佐野川好母

(1979年1月29日受理)

本報告は、水平環状断熱層内における高温高圧ガスの自然対流の熱流動特性を明らかにするために、行った数値計算に関するものである。物性値の温度による変化を考慮に入れた数値計算の結果が、物性値を一定として取扱った数値計算とどの程度の相異を示すかを調べる。このために作成した計算プログラムについて、その内容と計算結果の一例を示した。

Natural Convection of High-Temperature, High-Pressure Gas
in a Horizontal Annular Layer of Thermal Insulator
(1st. Report : Program for Numerical Calculation with
Temperature-dependent Physical Properties)

Masuro OGAWA, Takakazu TAKIZUKA
and Konomo SANOKAWA

Division of High Temperature Engineering,
Tokai Research Establishment, JAERI

(Received January 29, 1979)

Numerical calculations are described of the natural convection in a horizontal annular layer of thermal insulator. The purpose is to compare the numerical results for variable physical properties with those for constant properties. The numerical procedure and typical results are presented.

Keywords ; Natural Convection, High Temperature, High Pressure, Thermal Insulator, Numerical Calculation, Temperature-dependent Physical Properties, Horizontal Annular Layer.

目 次

1. 序 論	1
2. 理論解析	2
2.1 解析の前提条件	2
2.2 基礎式	3
2.3 無次元化	3
2.4 物性値の温度依存性	4
2.5 境界条件	6
2.6 計算の初期値	6
3. 数値解析	7
3.1 差分近似	7
3.2 数値計算	11
3.3 計算プログラム	13
4. 計算結果	14
参考文献	14

Contents

1.	Introduction	1
2.	Theoretical analysis	2
2.1	Fundamental assumptions	2
2.2	Governing equations	3
2.3	Non-dimensionalization	3
2.4	Temperature dependence of physical properties	4
2.5	Boundary conditions	6
2.6	Initial values for computations	6
3.	Numerical analysis	7
3.1	Finite difference approximations	7
3.2	Numerical procedure	11
3.3	Program for computations	13
4.	Numerical results	14
	Literatures cited	14

記号表

a_1-a_3	； 内在気体の粘性係数の温度係数	
b_1-b_3	； 内在気体の動粘性係数の温度係数	
c_1-c_3	； 内在気体静止時の実効熱伝導率の温度係数	
c_p	； 内在気体の定圧比熱	[J/kg·K]
d_1	； 定数	
Da	； ダルシイ数 ($=K/(r_0-r_i)^2$)	
E_T	； 温度に関する収束判定許容誤差	
E_{ψ}	； 流れ関数に関する収束判定許容誤差	
Gr	； 修正グラスホフ数 ($=(r_0-r_i)^3 g/\nu_0^2$)	
g	； 重力加速度	[m/s ²]
h	； 外管表面熱伝達率	[W/m ² ·K]
i	； 半径方向節点番号	
j	； 周方向節点番号	
K	； 断熱材の透過係数	[m ²]
l_1-l_3	； 風上差分のための係数	
m_1-m_3	； 風上差分のための係数	
n_1-n_3	； 物性値を温度依存させるための係数	
p	； 圧力	[N/m ²]
p_0	； 基準圧力	[atm]
P	； 無次元圧力 ($=(r_0-r_i)^2 p/\rho_0 \nu_0^2$)	
Pr	； プラントル数 ($=c_p \cdot \mu_0/\lambda_0^*$)	
r	； 半径方向距離	[m]
r_i	； 内管半径	[m]
r_0	； 外管内半径	[m]
r_s	； 外管外半径	[m]
Δr	； 断熱層内の半径方向のきざみ	[m]
$\Delta r'$	； 外管内の半径方向のきざみ	[m]
R	； 無次元半径方向距離 ($=r/(r_0-r_i)$), $R_i, R_0, R_s, \Delta R, \Delta R'$ は各々 $r_i, r_0, r_s, \Delta r, \Delta r'$ に対応する。	
Ra	； 修正レーリイ数 ($=Gr \cdot Pr$)	
T	； 温度	[°C]
T_i	； 内管表面温度	[°C]
T_∞	； 雰囲気温度	[°C]
T_0	； 基準温度	[°C]
U	； 無次元半径方向流速成分 ($=\varepsilon(r_0-r_i)\rho_0 c_p u/\lambda_0^*$)	
u	； 半径方向流速成分	[m/s]

V	無次元周方向流速成分 ($= \epsilon (r_0 - r_i) \rho_0 c_p v / \lambda_0^*$)	
v	周方向流速成分	[m/s]
β	内在気体の体膨張係数 ($= (T_0 + 273.15) / (T + 273.15)^2$ あるいは $1 / (T_0 + 273.15)$)	[1/K]
ϵ	断熱材の気孔率	
φ	無次元流れ関数	
λ_{air}	空気の熱伝導率	[W/m·K]
λ_e	実効熱伝導率	[W/m·K]
λ_g	内在気体の熱伝導率	[W/m·K]
λ_i	断熱材の熱伝導率	[W/m·K]
λ_s	外管の熱伝導率	[W/m·K]
λ^*	内在気体静止時の実効熱伝導率	[W/m·K]
μ	内在気体の粘性係数	[kg/m·s]
ρ	内在気体の密度	[kg/m ³]
θ	周方向角度	[rad]
$\Delta\theta$	周方向角度のきざみ幅	[rad]
ν	内在気体の動粘性係数	[m ² /s]
ω_T	温度に関する加速係数	
ω_φ	流れ関数に関する加速係数	

1. 序 論

高温ガス炉の一次系もしくは二次系の配管は、一般に二重管構造となっている。これは、高温高圧の冷却材もしくは還元用気体を維持するためであり、二重管の内管を耐温度用、外管を耐圧力用にして、その間に断熱材を入れて外管の温度負担を和らげようと考えたものである。このような配管を設計する場合、構造的、熱的諸要求が満たされなければならないが、ここでは、熱的諸要求だけを考えてみる。まず、熱損失量になるべく少ないこと、次に外管の温度が規定温度以下であることなどが挙げられる。このような諸量を決める場合に、断熱材の熱伝導率が必要となる。この値は、通常、断熱材に固有な値であり、実験などによって求められる。しかし、上記の場合のように、断熱材中に高圧の気体が内在すると、断熱材中の熱輸送は熱伝導だけによらず、高圧気体の流動による熱伝達にも依存する。従って、熱損失量や外管の温度を見積るために、断熱材の熱伝導率だけでなく、内在気体の物性値や断熱層の形状、大きさが必要となる。さらに、これらの値を知り、断熱層内の熱流動特性が明らかにされなければならない。

このような目的で、水平環状断熱層内の自然対流熱伝達解析が下村⁽¹⁾によって行われた。下村は断熱層内の断熱材繊維、または粒子のまわりの速度分布および温度分布を、繊維または粒子と気体空間とを平均した系に対する圧力損失および温度分布に対する影響として捕える手法を採り、この立場から、断熱層内の流体の運動方程式としてDarcyの法則を適用した。この数値解析の結果、断熱層の平均実効熱伝導率の非対流時（内在気体静止時）の値に対する相対的上昇 $(\lambda_e/\lambda^*)_m$ は、レーリイ数Reとダルシイ数Daの積、 $Ra \cdot Da$ および二重管の外管内径と内管外径の比 r_0/r_i の関数として次式のように表わされた。

$$\left(\frac{\lambda_e}{\lambda^*}\right)_m = 0.168 \left(\frac{r_0}{r_i} - 0.924\right) (Ra \cdot Da)^{1/2} \quad (1-1)$$

ただし、 $1.25 \leq r_0/r_i \leq 3$ 、 $\lambda_e/\lambda^* \geq 1$ である。

この解析では、浮力の項の密度のみが温度によって変化すると仮定したBoussinesq近似を用いており、その他のすべての物性値を一定として取り扱っている。原子炉出口ガス温度が1000℃という高温であり、外管周囲温度（常温）との温度差が大きい場合、物性値の温度による変化は、断熱層内の熱流動特性に影響すると思われる。このような物性値変化の影響は、増岡ら⁽²⁾によって調べられた。増岡らは、垂直断熱層内の自然対流熱伝達において、内在気体の粘性係数と内在気体静止時の実効熱伝導率を温度の関数として与え、内在気体の密度に関しては、それが浮力に関連するときだけ、Boussinesq近似を用いて温度による変化を考慮した。さらに、熱放射による影響を考え、実効熱伝導率に温度の3次の項を加えた。数値計算により、物性値の温度変化は、断熱層内の内在気体の流れには大きく影響するが、熱伝達への影響は小さいと判断された。また、熱放射の影響においても、熱伝達の変化は熱伝導率の変化に比べて1桁オーダーが小さいと報告されている。

本報告では、水平環状断熱層内の自然対流熱伝達において、すべての物性値の温度変化を考慮したが、密度の変化については絶対温度に反比例するものとした。このような数値解析の結果が

従来の結果とどの程度異なっているかを調べるのが目的であるが、ここでは、この解析の手順と結果の一例だけを述べる。

2. 理論解析

水平環状断熱層において、断熱材中の空間を巨視的にとらえ、断熱材と内在気体に対して、連続の式、運動方程式、エネルギー式を考える。

2.1 解析の前提条件

以下に、本解析に設けた仮定を列記する。

- (1) 2次元円柱座標系を用いる。座標系を図2.1に示す。
- (2) 左右対称とし、 $0 \leq \theta \leq \pi$ の範囲だけを取り扱う。
- (3) 定常状態とする。
- (4) 運動方程式において、Darcyの法則を適用し、対流の慣性項と粘性項は考慮しない。
- (5) エネルギー式における熱伝導率 λ^* は、気体静止時の実効熱伝導率を与える。実効熱伝導率とは、断熱材と内在する気体を巨視的に一様と考えて断熱材の熱伝導、気体の熱伝導、気体の流動による熱伝達を含み入れた、熱伝導率と同じ次元を持つ係数である。
- (6) すべての物性値について、温度依存性を考慮する。ただし、比熱は一定とする。圧力による変化は考えない。断熱層内の圧力変化は、圧力の絶対値（高温ガス炉では、約40気圧）と比較すると非常に小さいので、物性値の圧力による変化も小さいと考えられる。
- (7) 内管表面温度 T_i は、周方向に一定とする。外管周囲の雰囲気温度 T_∞ も一定とする。外管表面の熱伝達率は、周方向に分布が与えられているものとする。
- (8) エネルギー式において、粘性による散逸は無視し、輻射の効果は考慮しない。

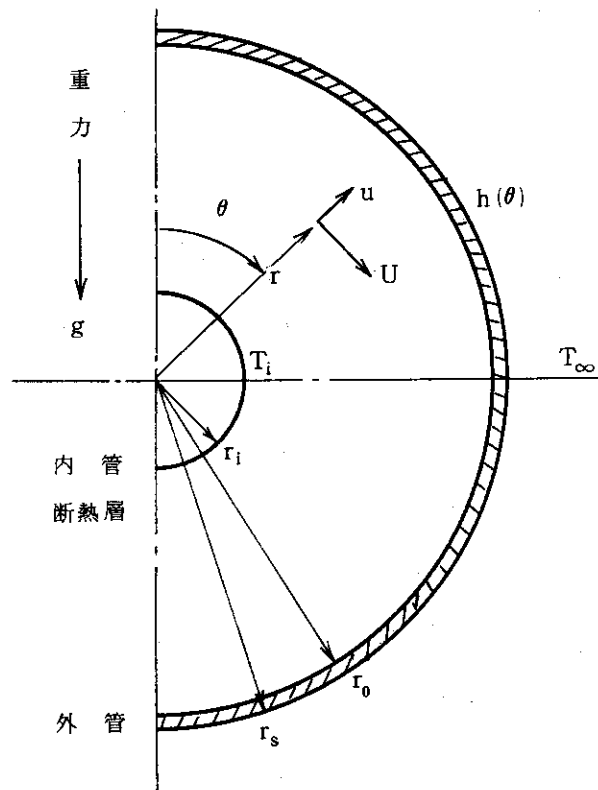


図2.1 座標系

従来の結果とどの程度異なっているかを調べるのが目的であるが、ここでは、この解析の手順と結果の一例だけを述べる。

2. 理論解析

水平環状断熱層において、断熱材中の空間を巨視的にとらえ、断熱材と内在気体に対して、連続の式、運動方程式、エネルギー式を考える。

2.1 解析の前提条件

以下に、本解析に設けた仮定を列記する。

- (1) 2次元円柱座標系を用いる。座標系を図2.1に示す。
- (2) 左右対称とし、 $0 \leq \theta \leq \pi$ の範囲だけを取り扱う。
- (3) 定常状態とする。
- (4) 運動方程式において、Darcyの法則を適用し、対流の慣性項と粘性項は考慮しない。
- (5) エネルギー式における熱伝導率 λ^* は、気体静止時の実効熱伝導率を与える。実効熱伝導率とは、断熱材と内在する気体を巨視的に一様と考えて断熱材の熱伝導、気体の熱伝導、気体の流動による熱伝達を含み入れた、熱伝導率と同じ次元を持つ係数である。
- (6) すべての物性値について、温度依存性を考慮する。ただし、比熱は一定とする。圧力による変化は考えない。断熱層内の圧力変化は、圧力の絶対値（高温ガス炉では、約40気圧）と比較すると非常に小さいので、物性値の圧力による変化も小さいと考えられる。
- (7) 内管表面温度 T_i は、周方向に一定とする。外管周囲の雰囲気温度 T_∞ も一定とする。外管表面の熱伝達率は、周方向に分布が与えられているものとする。
- (8) エネルギー式において、粘性による散逸は無視し、輻射の効果は考慮しない。

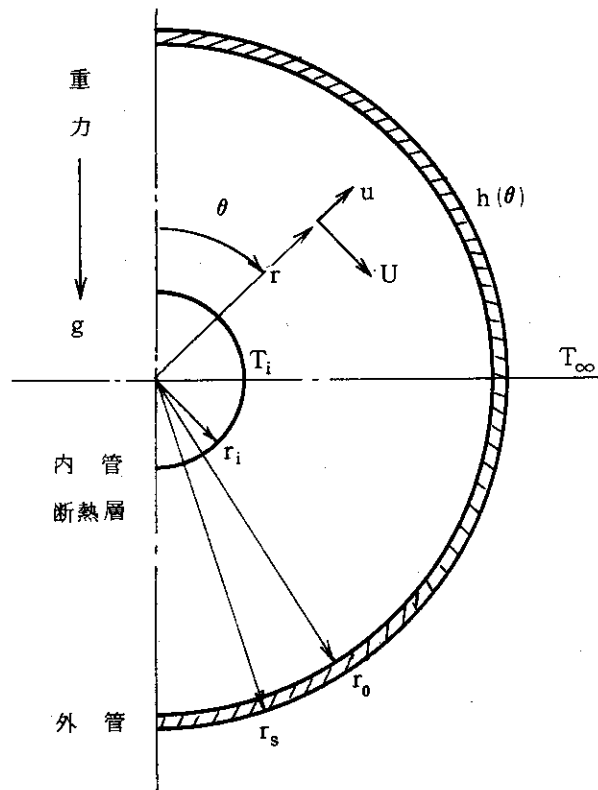


図2.1 座標系

2.2 基礎式

2.1 に記した仮定から，連続の式は，

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial r} + \frac{(\rho u)}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho v)}{\partial \theta} = 0 \quad (2-1)$$

運動方程式は， r 方向， θ 方向に対して，各々

$$\frac{\partial p}{\partial r} + \rho g \cos \theta + \frac{\varepsilon}{K} \nu(\rho u) = 0 \quad (2-2)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} - \rho g \sin \theta + \frac{\varepsilon}{K} \nu(\rho v) = 0 \quad (2-3)$$

となり，エネルギー式は，次のようになる。

$$\begin{aligned} \varepsilon c_p \left[(\rho u) \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r} (\rho v) \frac{\partial T}{\partial \theta} \right] \\ = \lambda^* \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} \right) + \frac{\partial \lambda^*}{\partial r} \left[\left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (2-4)$$

2.3 無次元化

半径方向距離 r ，半径方向速度 u ，周方向速度 v ，圧力 p の各変数を次式に従って無次元化すると。

$$R = \frac{r}{r_0 - r_i} \quad (2-5)$$

$$U = \varepsilon (r_0 - r_i) \frac{\rho_0 c_p}{\lambda_0^*} u \quad (2-6)$$

$$V = \varepsilon (r_0 - r_i) \frac{\rho_0 c_p}{\lambda_0^*} v \quad (2-7)$$

$$P = \frac{(r_0 - r_i)^2}{\rho_0 \nu_0^2} p \quad (2-8)$$

特性無次元数を次のように定義する。

$$Gr = \frac{(r_0 - r_i)^3 g}{\nu_0} \quad (2-9)$$

$$Pr = \frac{c_p \mu_0}{\lambda_0^*} \quad (2-10)$$

$$Da = \frac{K}{(r_0 - r_i)^2} \quad (2-11)$$

$$Ra = Gr \cdot Pr \quad (2-12)$$

これらの無次元量を用いると，式(2-1)～(2-4)は各々

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial R} + \frac{(\rho U)}{R} + \frac{1}{R} \frac{\partial(\rho V)}{\partial \theta} \quad (2-13)$$

$$\frac{\partial P}{\partial R} + Gr \frac{\rho}{\rho_0} \cos \theta + \frac{1}{Da Pr} \frac{\nu}{\nu_0} \left(\frac{\rho}{\rho_0} U \right) = 0 \quad (2-14)$$

$$\frac{1}{R} \frac{\partial P}{\partial \theta} - Gr \frac{\rho}{\rho_0} \sin \theta + \frac{1}{Da Pr} \frac{\nu}{\nu_0} \left(\frac{\rho}{\rho_0} V \right) = 0 \quad (2-15)$$

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\rho}{\rho_0} U \right) \frac{\partial T}{\partial R} + \frac{1}{R} \left(\frac{\rho}{\rho_0} V \right) \frac{\partial T}{\partial \theta} \\ &= \frac{\lambda^*}{\lambda_0^*} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial T}{\partial R} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} \right) + \frac{\partial \left(\frac{\lambda^*}{\lambda_0^*} \right)}{\partial T} \left[\left(\frac{\partial T}{\partial R} \right)^2 + \left(\frac{1}{R} \frac{\partial T}{\partial \theta} \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (2-16)$$

式(2-13)によって表わされる無次元化された連続の方程式は、次のような流れ関数 Ψ を導入すると満足される。

$$\frac{\rho}{\rho_0} U = \frac{1}{R} \frac{\partial \Psi}{\partial \theta} \quad (2-17)$$

$$\frac{\rho}{\rho_0} V = - \frac{\partial \Psi}{\partial R} \quad (2-18)$$

この流れ関数 Ψ を用い式(2-14)と式(2-15)から無次元圧力 P を消去すると、

$$\begin{aligned} Ra Da \left[- \frac{\partial \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)}{\partial R} \sin \theta + \frac{1}{R} \frac{\partial \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)}{\partial \theta} \cos \theta \right] &+ \left[\frac{\partial \left(\frac{\nu}{\nu_0} \right)}{\partial R} \frac{\partial \Psi}{\partial R} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial \left(\frac{\nu}{\nu_0} \right)}{\partial \theta} \frac{\partial \Psi}{\partial \theta} \right] \\ &+ \left(\frac{\nu}{\nu_0} \right) \left(\frac{\partial^2 \Psi}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \Psi}{\partial R} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial \theta^2} \right) = 0 \end{aligned} \quad (2-19)$$

となり、流れ関数 Ψ に関する無次元運動方程式が得られる。さらに式(2-16)のエネルギー式も、流れ関数 Ψ を用いて、

$$\begin{aligned} & \frac{1}{R} \left(\frac{\partial \Psi}{\partial \theta} \frac{\partial T}{\partial R} - \frac{\partial \Psi}{\partial R} \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) \\ &= \frac{\lambda^*}{\lambda_0^*} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial T}{\partial R} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} \right) + \frac{\partial \left(\frac{\lambda^*}{\lambda_0^*} \right)}{\partial T} \left[\left(\frac{\partial T}{\partial R} \right)^2 + \left(\frac{1}{R} \frac{\partial T}{\partial \theta} \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (2-20)$$

となる。なお、ここでは温度 T 〔℃〕は無次元化されていない。

2.4 物性値の温度依存性

粘性係数 μ 、動粘性係数 ν 、実効熱伝導率 λ^* の各物性値は、温度の2次の項までで、次のように近似する。

$$\mu = a_1 T^2 + a_2 T + a_3 \quad (2-21)$$

$$\nu = b_1 T^2 + b_2 T + b_3 \quad (2-22)$$

$$\lambda^* = c_1 T^2 + c_2 T + c_3 \quad (2-23)$$

基準温度 T_0 における各物性値を μ_0 , ν_0 , λ_0^* と表わすと, 基準温度 T_0 を用いて (2-21) - (2-23) 式は, 次のように書き換えることができる。

$$\mu = \mu_0 + n_1 \{ a_1 (T^2 - T_0^2) + a_2 (T - T_0) \} \quad (2-24)$$

$$\nu = \nu_0 + n_2 \{ b_1 (T^2 - T_0^2) + b_2 (T - T_0) \} \quad (2-25)$$

$$\lambda^* = \lambda_0^* + n_3 \{ c_1 (T^2 - T_0^2) + c_2 (T - T_0) \} \quad (2-26)$$

ここで物性値を一定として扱うときには, $n_1 = n_2 = n_3 = 0$ とし, 物性値の温度変化を考慮するときには, $n_1 = n_2 = n_3 = 1$ とする。密度は理想気体を仮定し, 基準圧力 p_0 で

$$\rho = \frac{d_1 \cdot p_0}{T + 273.15} \quad (2-27)$$

とする。

本報告の以下の計算では, 断熱材としてカオウール, 内在気体として, 圧力 40 気圧のヘリウムガス, 外管周囲の雰囲気として, 圧力 1 気圧の静止空気を (従って, 外管表面熱伝達率に円管外自然対流熱伝達率を与えた。) 対象とした。外管は, s.s. 304 を対象とし, 熱伝導率 λ_s は一定値 ($\lambda_s = 18 \text{ W/m} \cdot \text{K}$) とした。上記の場合, 式 (2-21) - (2-27) 中の各定数は, 以下の通りである。これらの値は, $0^\circ\text{C} - 1500^\circ\text{C}$ の範囲でかなり良い近似を与える。

$$a_1 = -4.78405 \times 10^{-12}, a_2 = 3.88679 \times 10^{-8}, a_3 = 1.90504 \times 10^{-5}$$

$$c_1 = -4.01631 \times 10^{-8}, c_2 = 3.18947 \times 10^{-4}, c_3 = 1.50586 \times 10^{-1}$$

$$d_1 = 48.777$$

b_1, b_2, b_3 は, $\nu = \mu / \rho$ より最小 2 乗法で決めた。 $p_0 = 40$ 気圧の場合, b_1, b_2, b_3 は

$$b_1 = 1.37345 \times 10^{-11}, b_2 = 184103 \times 10^{-8}, b_3 = 2.33235 \times 10^{-6}$$

であった。なお, 気体静止時の実効熱伝導率 λ^* は, 断熱材自身の熱伝導率 λ_i と内在気体の熱伝導率 λ_g を用いて,

$$\lambda^* = \varepsilon \lambda_g + (1 - \varepsilon) \lambda_i \quad (2-28)$$

で表わせるものとした。カオウールとヘリウムガスの場合は $\lambda_i \approx 2 \lambda_g$ であるが, カオウールの気孔率 ε が 0.92 と大きいので, $\lambda^* \approx \lambda_g$ として λ^* を決めた。また, 実効熱伝導率には熱放射の効果を検討に入れていない。(参考文献(3))

以上の諸量を用いて式 (2-19) と式 (2-20) を書き換えると,

$$\begin{aligned} -Ra \text{ Da } \beta \left(\frac{\partial T}{\partial R} \sin \theta + \frac{1}{R} \frac{\partial T}{\partial \theta} \cos \theta \right) + \frac{n_2}{\nu_0} (2b_1 T + b_2) \left(\frac{\partial T}{\partial R} \frac{\partial \psi}{\partial R} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial T}{\partial \theta} \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \right) \\ + \left\{ 1 + \frac{n_2}{\nu_0} [b_1 (T^2 - T_0^2) + b_2 (T - T_0)] \right\} \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \psi}{\partial R} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \theta^2} \right) = 0 \quad (2-29) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{R} \left(\frac{\partial \psi}{\partial \theta} \frac{\partial T}{\partial R} - \frac{\partial \psi}{\partial R} \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) \\ = \left[1 + \frac{n_3}{\lambda_0^*} \{ c_1 (T^2 - T_0^2) + c_2 (T - T_0) \} \right] \left(\frac{\partial^2 T}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial T}{\partial R} + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} \right) \\ + \frac{n_3}{\lambda_0^*} (2c_1 T + c_2) \left[\left(\frac{\partial T}{\partial R} \right)^2 + \left(\frac{1}{R} \frac{\partial T}{\partial \theta} \right)^2 \right] \quad (2-30) \end{aligned}$$

となる。ただし, ここで $\beta = (T_0 + 273.15) / (T + 273.15)^2$ である。式 (2-29) と式 (2-30) が

ここで解こうとする無次元方程式である。これらの式と境界条件でのパラメータは、

- (1) 内管表面温度 T_i
- (2) 内管表面温度 T_i と雰囲気温度 T_∞ との差 ($T_i - T_\infty$)
- (3) 基準圧力 p_0
- (4) 内外管の半径比 r_0/r_i
- (5) 外管外半径 r_s
- (6) ダルシイ数 Da
- (7) 外管表面熱伝達率 h
- (8) 外管熱伝導率 λ_s
- (9) 気体静止時の実効熱伝導率 λ^*

であり、(1)~(9)の諸量が決まれば、与えられた境界条件のもとで式(2-29)、(2-30)を解くことができる。式(2-29)、(2-30)を見ればわかるように、主なパラメータは、レーレイ数とダルシイ数の積 ($Ra Da$)、内外径比 r_0/r_i 、内管表面温度 T_i 、雰囲気温度との差 ($T_i - T_\infty$) である。

2.5 境界条件

温度に関する境界条件は、

- (i) 内管表面： $r=r_i$ で、すべての θ に対して、 $T=T_i$ (一定値)。
- (ii) 外管内面： $r=r_0$ で、すべての θ に対して、 $-\lambda^* \partial T / \partial r = -\lambda_s \partial T / \partial r$ 。
- (iii) 外管外面： $r=r_s$ で、すべての θ に対して、 $-\lambda_s \partial T / \partial r = h(T - T_\infty)$ 。
- (iv) $\theta=0$ と π で、すべての r に対して、 $\partial T / \partial \theta = 0$ 。

であり、流れに関する境界条件は、

- (i) 内管表面と外管内面： $r=r_i$ と r_0 で、すべての θ に対して、 $u=0$ 。
- (ii) $\theta=0$ と π で、すべての r に対して、 $v=0$ 。

である。これらの境界条件を式(2-5)~(2-8)に従って無次元化すると、温度に関しては

- (i) $R=R_i$ で、すべての θ に対して、 $T=T_i$ 。
- (ii) $R=R_0$ で、すべての θ に対して、 $-\lambda^* \partial T / \partial R = -\lambda_s \partial T / \partial R$ 。
- (iii) $R=R_s$ で、すべての θ に対して、 $-\partial T / \partial R = h(r_0 - r_i)(T - T_\infty) / \lambda_s$ 。
- (iv) $\theta=0$ と π で、すべての r に対して、 $\partial T / \partial \theta = 0$ 。

となり、流れに関しては、

- (i) $R=R_i$ と R_0 で、すべての θ に対して、 $\Psi=0$ 。
- (ii) $\theta=0$ と π で、すべての R に対して、 $\Psi=0$ 。

となる。

2.6 計算の初期値

数値計算における初期値として、次のような近似解を与える。半径方向だけの熱伝導を考える

と、エネルギー式は、

$$\frac{d^2 T}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} = 0 \quad (2-31)$$

となり、前述の温度に関する境界条件(i)と(iii)を用い、

$$T = T_i + \frac{h(T_\infty - T_i)}{h \ln \frac{r_0}{r_i} + \frac{\lambda_0^*}{r_0}} \ln \frac{r}{r_i} \quad (2-32)$$

を得る。式(2-5)によって無次元化すると式(2-32)は、

$$T = T_i + \frac{h(T_\infty - T_i)}{h \ln \frac{r_0}{r_i} + \frac{\lambda_0^*}{r_0}} \ln \frac{(r_0 - r_i)}{r_i} R \quad (2-33)$$

となる。外管表面熱伝達率 h は、 θ の関数であるから、 T は、 θ と R の関数である。 $\theta = 0 \sim \theta$ について、 $R = R_i$ から $R = R_0$ までの温度分布を式(2-33)で求め、外管内の温度は $R = R_i$ の温度に等しいとする。温度に関する近似解は以上のように決め、流れ関数は、すべての R と θ に対して、零とする。この近似解は、 $Ra Da = 0$ の場合にはかなり良い一致を与えると考えられるが、 $Ra Da$ の値が大きくなるに従い、近似の程度は悪化する。そこで、ある $Ra Da$ の値で計算しようとするとき、その $Ra Da$ の値より小さな $Ra Da$ の値で得られた数値計算の解を初期値として用いることにした。

まず、比較的小さな $Ra Da$ の値 ($Ra Da = 1$) に対しては、式(2-33)によって得られた温度分布と零の流れ関数を初期値とし、数値計算の結果得られた温度分布と流れ関数分布を、次のステップの $Ra Da$ の値に対する数値計算の初期値として用いるわけである。しかしながら、実際には $Ra Da$ の値がかなり大きい場合は別として、式(2-33)で得られる温度分布と零の流れ関数とを初期値として与えても計算時間は長くはなるが、許容できる範囲内に収まる。

3. 数 値 解 析

水平の環状断熱層内の流れ関数に関する式(2-29)と温度に関する式(2-30)を2.5の境界条件のもとで数値的に解くことを試みる。数値計算法としては、S. Ö. R. 法(外挿Liebmann法)と呼ばれる数値解法を用いた。

3.1 差分近似

数値計算を行うために、まず式(2-29)と式(2-30)を差分化する。式(2-29)では中心差分近似とし、式(2-30)では対流項 ($\partial \psi / \partial \theta \cdot \partial T / \partial R - \partial \psi / \partial R \cdot \partial T / \partial \theta$) 以外は中心差分近似、対流項は風上差分近似とした。(参考文献(1)を参照)

$$-Ra Da \frac{T_0 + 273.15}{(T_{i,j} + 273.15)^2} \left[\frac{T_{i+1,j} - T_{i-1,j}}{2 \Delta R} \sin \theta_j + \frac{1}{R_i} \frac{T_{i,j+1} - T_{i,j-1}}{2 \Delta \theta} \cos \theta_j \right]$$

と、エネルギー式は、

$$\frac{d^2 T}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} = 0 \quad (2-31)$$

となり、前述の温度に関する境界条件(i)と(iii)を用い、

$$T = T_i + \frac{h(T_\infty - T_i)}{h \ln \frac{r_0}{r_i} + \frac{\lambda_0^*}{r_0}} \ln \frac{r}{r_i} \quad (2-32)$$

を得る。式(2-5)によって無次元化すると式(2-32)は、

$$T = T_i + \frac{h(T_\infty - T_i)}{h \ln \frac{r_0}{r_i} + \frac{\lambda_0^*}{r_0}} \ln \frac{(r_0 - r_i)}{r_i} R \quad (2-33)$$

となる。外管表面熱伝達率 h は、 θ の関数であるから、 T は、 θ と R の関数である。 $\theta = 0 \sim \theta$ について、 $R = R_i$ から $R = R_0$ までの温度分布を式(2-33)で求め、外管内の温度は $R = R_i$ の温度に等しいとする。温度に関する近似解は以上のように決め、流れ関数は、すべての R と θ に対して、零とする。この近似解は、 $Ra Da = 0$ の場合にはかなり良い一致を与えると考えられるが、 $Ra Da$ の値が大きくなるに従い、近似の程度は悪化する。そこで、ある $Ra Da$ の値で計算しようとするとき、その $Ra Da$ の値より小さな $Ra Da$ の値で得られた数値計算の解を初期値として用いることにした。

まず、比較的小さな $Ra Da$ の値 ($Ra Da = 1$) に対しては、式(2-33)によって得られた温度分布と零の流れ関数を初期値とし、数値計算の結果得られた温度分布と流れ関数分布を、次のステップの $Ra Da$ の値に対する数値計算の初期値として用いるわけである。しかしながら、実際には $Ra Da$ の値がかなり大きい場合は別として、式(2-33)で得られる温度分布と零の流れ関数とを初期値として与えても計算時間は長くはなるが、許容できる範囲内に収まる。

3. 数 値 解 析

水平の環状断熱層内の流れ関数に関する式(2-29)と温度に関する式(2-30)を2.5の境界条件のもとで数値的に解くことを試みる。数値計算法としては、S. Ö. R. 法(外挿Liebmann法)と呼ばれる数値解法を用いた。

3.1 差分近似

数値計算を行うために、まず式(2-29)と式(2-30)を差分化する。式(2-29)では中心差分近似とし、式(2-30)では対流項 ($\partial \psi / \partial \theta \cdot \partial T / \partial R - \partial \psi / \partial R \cdot \partial T / \partial \theta$) 以外は中心差分近似、対流項は風上差分近似とした。(参考文献(1)を参照)

$$-Ra Da \frac{T_0 + 273.15}{(T_{i,j} + 273.15)^2} \left[\frac{T_{i+1,j} - T_{i-1,j}}{2 \Delta R} \sin \theta_j + \frac{1}{R_i} \frac{T_{i,j+1} - T_{i,j-1}}{2 \Delta \theta} \cos \theta_j \right]$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{n_2}{\nu_0} (2b_1 T_{i,j} + b_2) \left[\frac{T_{i+1,j} - T_{i-1,j}}{2\Delta R} \cdot \frac{\psi_{i+1,j} - \psi_{i-1,j}}{2\Delta R} + \frac{1}{R_i^2} \frac{T_{i,j+1} - T_{i,j-1}}{2\Delta\theta} \times \right. \\
& \left. \frac{\psi_{i,j+1} - \psi_{i,j-1}}{2\Delta\theta} \right] + \left\{ 1 + \frac{n_2}{\nu_0} [b_1 (T_{i,j}^2 - T_0^2) + b_2 (T_{i,j} - T_0)] \right\} \times \\
& \left[\frac{\psi_{i+1,j} - 2\psi_{i,j} + \psi_{i-1,j}}{\Delta R^2} + \frac{1}{R_i} \frac{\psi_{i+1,j} - \psi_{i-1,j}}{2\Delta R} \right. \\
& \left. + \frac{1}{R_i^2} \frac{\psi_{i,j+1} - 2\psi_{i,j} + \psi_{i,j-1}}{\Delta\theta^2} \right] = 0 \quad (3-1)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \frac{1}{R_i} \left(\frac{\psi_{i,j+1} - \psi_{i,j-1}}{2\Delta\theta} \cdot \frac{m_1 T_{i+1,j} + m_2 T_{i,j} + m_3 T_{i-1,j}}{\Delta R} - \frac{\psi_{i+1,j} - \psi_{i-1,j}}{2\Delta R} \times \right. \\
& \left. \frac{l_1 T_{i,j+1} + l_2 T_{i,j} + l_3 T_{i,j-1}}{\Delta\theta} \right) \\
& = \left[1 + \frac{n_3}{\lambda_0^*} \{ c_1 (T_{i,j}^2 - T_0^2) + c_2 (T_{i,j} - T_0) \} \right] \left(\frac{T_{i+1,j} - 2T_{i,j} + T_{i-1,j}}{\Delta R^2} \right. \\
& \left. + \frac{1}{R_i} \frac{T_{i+1,j} - T_{i-1,j}}{2\Delta R} + \frac{1}{R_i^2} \frac{T_{i,j+1} - 2T_{i,j} + T_{i,j-1}}{\Delta\theta^2} \right) \\
& + \frac{n_3}{\lambda_0^*} (2c_1 T_{i,j} + c_2) \left[\left(\frac{T_{i+1,j} - T_{i-1,j}}{2\Delta R} \right)^2 + \left(\frac{1}{R_i} \frac{T_{i,j+1} - T_{i,j-1}}{2\Delta\theta} \right)^2 \right] \quad (3-2)
\end{aligned}$$

式(3-1), (3-2)を各々, $\psi_{i,j}$, $T_{i,j}$ について整理し, S. Ö. R. 型に書くと, $\psi_{i,j}$ については,

$$\psi_{i,j} = (1 - \omega_\psi) \psi_{i,j} + \frac{B + C \cdot D - A}{C \cdot E} \cdot \omega_\psi \quad (3-3)$$

となる。ここで

$$\begin{aligned}
A = Ra Da \frac{T_0 + 273.15}{(T_{i,j} + 273.15)^2} & \left[2R_i^2 \Delta R \cdot \Delta\theta^2 (T_{i+1,j} - T_{i-1,j}) \sin \theta_j \right. \\
& \left. + 2R_i \Delta R^2 \Delta\theta (T_{i,j+1} - T_{i,j-1}) \cos \theta_j \right]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
B = \frac{n_2}{\nu_0} (2b_1 T_{i,j} + b_2) & \left[R_i^2 \Delta\theta^2 (T_{i+1,j} - T_{i-1,j}) (\psi_{i+1,j} - \psi_{i-1,j}) \right. \\
& \left. + \Delta R^2 (T_{i,j+1} - T_{i,j-1}) (\psi_{i,j+1} - \psi_{i,j-1}) \right]
\end{aligned}$$

$$C = 1.0 + \frac{n_2}{\nu_0} [b_1 (T_{i,j}^2 - T_0^2) + b_2 (T_{i,j} - T_0)]$$

$$D = 4R_i^2 \Delta\theta^2 (\psi_{i+1,j} + \psi_{i-1,j}) + 2R_i \Delta R \Delta\theta^2 (\psi_{i+1,j} - \psi_{i-1,j}) + 4\Delta R^2 (\psi_{i,j+1} + \psi_{i,j-1})$$

$$E = 8(R_i^2 \Delta\theta^2 + \Delta R^2)$$

である。また, $T_{i,j}$ については,

$$T_{i,j} = (1 - \omega_T) T_{i,j} + \frac{C \cdot D + F \cdot G - A}{B + C \cdot E} \cdot \omega_T \quad (3-4)$$

となる。ここで

$$A = 2R_i \Delta R \Delta \theta [(\psi_{i,j+1} - \psi_{i,j-1})(m_1 \cdot T_{i+1,j} + m_3 T_{i-1,j}) - (\psi_{i+1,j} - \psi_{i-1,j})(l_1 \cdot T_{i,j+1} + l_3 T_{i,j-1})]$$

$$B = 2R_i \Delta R \Delta \theta [(\psi_{i,j+1} - \psi_{i,j-1})m_2 - (\psi_{i+1,j} - \psi_{i-1,j})l_2]$$

$$C = 1 + \frac{n_3}{\lambda_0^*} [c_1(T_{i,j}^2 - T_0^2) + c_2(T_{i,j} - T_0)]$$

$$D = 4R_i^2 \Delta \theta^2 (T_{i+1,j} + T_{i-1,j}) + 2R_i \Delta R \Delta \theta^2 (T_{i+1,j} - T_{i-1,j}) + 4\Delta R^2 (T_{i,j+1} + T_{i,j-1})$$

$$E = 8(R_i^2 \Delta \theta^2 + \Delta R^2)$$

$$F = \frac{n_3}{\lambda_0^*} (2c_1 \cdot T_{i,j} + c_2)$$

$$G = R_i^2 \Delta \theta^2 (T_{i+1,j} - T_{i-1,j})^2 + (T_{i,j+1} - T_{i,j-1})^2 \Delta R^2$$

である。上記の式中で、 m_1 、 m_3 、 l_1 、 l_3 は風上差分に関する係数である。 $u > 0$ ($\psi_{i,j+1} - \psi_{i,j-1} > 0$) のとき、 $l_1 = 0$ 、 $l_2 = 1$ 、 $l_3 = -1$ となり、 $u < 0$ のとき、 $l_1 = 1$ 、 $l_2 = -1$ 、 $l_3 = 0$ となる。また $v > 0$ ($\psi_{i+1,j} - \psi_{i-1,j} < 0$) のとき、 $m_1 = 0$ 、 $m_2 = 1$ 、 $m_3 = -1$ となり、 $v < 0$ のとき、 $m_1 = 1$ 、 $m_2 = -1$ 、 $m_3 = 0$ となる。計算機を用いるときの計算時間節約のため、 m_1 、 m_3 、 l_1 、 l_3 をプログラムでは条件ジャンプを用いることを避け、次のように与えた。

$$\left. \begin{aligned} m_1 &= 0.5 \{ 1.0 - \text{SIGN}(1.0, \Delta \psi') \} \\ m_2 &= \text{SIGN}(1.0, \Delta \psi') \\ m_3 &= -0.5 \{ 1.0 + \text{SIGN}(1.0, \Delta \psi') \} \end{aligned} \right\} \quad (3-5)$$

$$\left. \begin{aligned} l_1 &= 0.5 \{ 1.0 - \text{SIGN}(1.0, \Delta \psi) \} \\ l_2 &= \text{SIGN}(1.0, \Delta \psi) \\ l_3 &= -0.5 \{ 1.0 + \text{SIGN}(1.0, \Delta \psi) \} \end{aligned} \right\} \quad (3-6)$$

ただし、ここで $\Delta \psi$ 、 $\Delta \psi'$ は各々、 $\Delta \psi = \psi_{i,j+1} - \psi_{i,j-1}$ 、 $\Delta \psi' = -(\psi_{i+1,j} - \psi_{i-1,j})$ である。また、「SIGN(x, y)」は計算機の組み込み関数であり、y の符号を x に付けるものである。

次に、境界条件の差分化を行う。図 3-1a、3-1b に、外管内面と外管外面の格子形状と 1 つの格子点に対する検査面を示す。

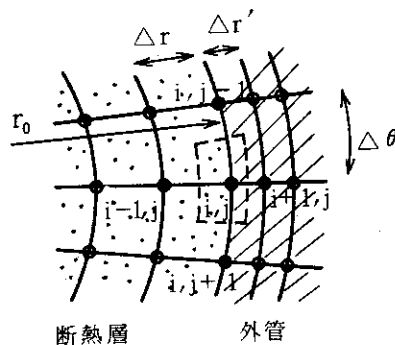


図 3-1a

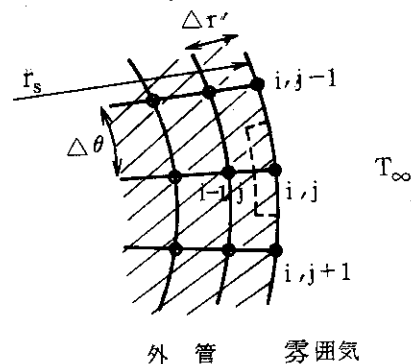


図 3-1b

外管内面における熱バランスの式は次のようになる。

$$\begin{aligned}
& \frac{(r_0 - \frac{\Delta r}{2}) \Delta \theta}{\Delta r} \lambda_{i-\frac{1}{2}, j}^* (T_{i,j} - T_{i-1,j}) \\
& + \frac{(r_0 + \frac{\Delta r'}{2}) \Delta \theta}{\Delta r'} \lambda_s (T_{i,j} - T_{i+1,j}) + \frac{\Delta r}{r_0 \Delta \theta} \{ \lambda_{i,j-\frac{1}{2}}^* (T_{i,j} - T_{i,j-1}) \\
& + \lambda_{i,j+\frac{1}{2}}^* (T_{i,j} - T_{i,j+1}) \} + \frac{\Delta r'}{r_0 \Delta \theta} \lambda_s (-T_{i,j+1} + 2T_{i,j} - T_{i,j-1}) \\
& = \varepsilon (r_0 - \frac{\Delta r}{2}) \Delta \theta \cdot \rho_{i-\frac{1}{2}, j} \cdot c_p \cdot u_{i-\frac{1}{2}, j} \cdot T_{i-\frac{1}{2}, j} - \varepsilon \frac{\Delta r}{2} \cdot c_p \\
& \quad \times (\rho_{i,j+\frac{1}{2}} \cdot v_{i,j+\frac{1}{2}} \cdot T_{i,j+\frac{1}{2}} - \rho_{i,j-\frac{1}{2}} \cdot v_{i,j-\frac{1}{2}} \cdot T_{i,j-\frac{1}{2}}) \quad (3-7)
\end{aligned}$$

上式を式(2-5)-(2-8)に従って無次元化し, $T_{i,j}$ で整理し, S.O.R. 型にすると

$$T_{i,j} = (1 - \omega_T) T_{i,j} + \frac{I}{H} \omega_T \quad (3-8)$$

となり, ここで

$$\begin{aligned}
A &= R_i (R_i - 0.5 \Delta R) \Delta R' \Delta \theta^2 \cdot \lambda_{i-\frac{1}{2}, j}^* \\
B &= R_i (R_i + 0.5 \Delta R') \Delta R \cdot \Delta \theta^2 \cdot \lambda_s \\
C_1 &= 0.5 \Delta R^2 \cdot \Delta R' \cdot \lambda_{i,j-\frac{1}{2}}^* \\
C_2 &= 0.5 \Delta R^2 \cdot \Delta R' \cdot \lambda_{i,j+\frac{1}{2}}^* \\
D &= 0.5 \Delta R \Delta R'^2 \lambda_s \\
E &= 0.5 R_i (R_i - 0.5 \Delta R) \Delta R \cdot \Delta R' \Delta \theta \lambda_0^* (\psi_{i-\frac{1}{2}, j+1} - \psi_{i-\frac{1}{2}, j-1}) / (R_i + R_{i-1}) \\
F &= 0.25 R_i \Delta R \Delta R' \Delta \theta \lambda_0^* (\psi_{i,j+\frac{1}{2}} - \psi_{i-1,j+\frac{1}{2}}) \\
G &= 0.25 R_i \Delta R \Delta R' \Delta \theta \lambda_0^* (\psi_{i,j-\frac{1}{2}} - \psi_{i-1,j-\frac{1}{2}}) \\
H &= A + B + C_1 + C_2 + 2D - E - F + G \\
I &= (A + E) T_{i-1,j} + B T_{i+1,j} + (C_1 + D - G) T_{i,j-1} + (C_2 + D + F) T_{i,j+1}
\end{aligned}$$

である。格子点 $(i \pm \frac{1}{2})$ 番目の値は, i 番目と $(i \pm 1)$ 番目の値の算術平均をとり, $(j \pm \frac{1}{2})$ 番目に対しても同様にとる。

外管内部では, 熱伝導方程式によって次のように記述できる。

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} = 0 \quad (3-9)$$

上式を同様にして差分化すると,

$$\begin{aligned}
T_{i,j} &= (1 - \omega_T) T_{i,j} + \frac{2R_i^2 \Delta \theta^2 (T_{i+1,j} + T_{i-1,j}) + R_i \Delta R' \Delta \theta^2}{4(R_i^2 \Delta \theta^2 + \Delta R'^2)} \\
& \quad \times (T_{i+1,j} - T_{i-1,j}) + 2 \Delta R'^2 (T_{i,j+1} + T_{i,j-1}) \cdot \omega_T \quad (3-10)
\end{aligned}$$

となる。

外管外面の熱バランスを考えると,

$$\lambda_s \frac{(r_s - \frac{\Delta r'}{2}) \Delta \theta}{\Delta r'} (T_{i,j} - T_{i-1,j}) + h_j \cdot r_s \Delta \theta (T_{i,j} - T_\infty) + \frac{\Delta r'}{r_s \Delta \theta} \lambda_s (-T_{i,j+1} + 2T_{i,j} - T_{i,j-1}) = 0 \quad (3-11)$$

となり、同様に差分化すると

$$T_{i,j} = (1 - \omega_T) T_{i,j} + \frac{E}{D} \omega_T \quad (3-12)$$

となる。ここで

$$A = 2 R_i (R_i - 0.5 \Delta R') \Delta \theta^2$$

$$B = 2 h_j (r_0 - r_i) R_i^2 \cdot \Delta R' \Delta \theta^2 / \lambda_s$$

$$C = \Delta R'^2$$

$$D = A + B + 2C$$

$$E = A T_{i-1,j} + B T_\infty + C (T_{i,j+1} + T_{i,j-1})$$

である。

3.2 数値計算

3.1で求めた差分式を数値的に解くわけであるが、数値計算の手順を以下に示す。

- (1) 入力データを読み込む。
- (2) 入力データを印字する。
- (3) 動粘性係数の温度係数を決める。
- (4) 基準温度での各物性値を計算する。
- (5) 格子の大きさを決める。
- (6) 外管表面の熱伝達率分布を与える。
- (7) 流れ関数と温度の初期値を与える。
- (8) 流れ関数と温度の収束計算を行う。収束するまで次に示す(i)-(ii)を繰り返す。
 - (i) 温度と流れ関数を計算する。
 - (ii) 温度と流れ関数の誤差を評価する。
- (9) 損失熱量、熱流束分布、流速分布などを計算する。
- (10) 計算結果を印字する。

上記の(8)の収束計算について詳述する。初期値から、第1回目の流れ関数 $(\psi_{i,j})_1$ と温度 $(T_{i,j})_1$ を求める。この $(\psi_{i,j})_1$ と $(T_{i,j})_1$ を使って $(\psi_{i,j})_2$ 、 $(T_{i,j})_2$ を求め、以下同様に繰返し計算する。n回計算を行った後、(3-13)式によって示される収束条件を満足すれば、 $(\psi_{i,j})_n$ 、 $(T_{i,j})_n$ を解とする。

$$\frac{\sum_{i,j} |(\theta_{i,j})_n| - \sum_{i,j} |(\theta_{i,j})_{n-1}|}{\sum_{i,j} |(\theta_{i,j})_n|} \leq E_T \quad (3-13)$$

$$\frac{\sum_{i,j} |(\psi_{i,j})_n| - \sum_{i,j} |(\psi_{i,j})_{n-1}|}{\sum_{i,j} |(\psi_{i,j})_n|} \leq E_\psi$$

ここで、 E_T と E_ψ は収束判定許容誤差であり、本計算では、予備計算の結果から、 $E_T = E_\psi = 1 \times 10^{-5}$ とした。

流れ関数 ψ と温度 T の計算方法について述べる。図3-2は格子形状と節点番号を示した図である。この図に示されるように、断熱層内の半径方向の格子間隔は一定値

$4R$ であり、外管内部の半径方向の格子間隔も一定値 $4R'$ である。周方向の格子間隔は一定値 4θ である。半径方向の節点番号 i は、内管表面で $i=1$ であり、外管内面が $i=\bar{N}ODE\ 1$ であり、外管外面が $i=\bar{N}ODE\ 2$ となっている。周方向の節点番号 j は、1から $\bar{N}ODE\ F$ までであるが、 $\theta=0$ は、 $j=2$ 、 $\theta=\pi$ は、 $j=\bar{N}ODE\ F-1$ に対応する。節点 (i, j) の流れ関数 $\psi_{i,j}$ と温度 $T_{i,j}$ の計算において、 $j=2$ と $j=\bar{N}ODE\ F-1$ の $\psi_{i,j}$ は零、 $i=1$ と $i=\bar{N}ODE\ 1$ の $\psi_{i,j}$ は零、 $i=1$ の $T_{i,j}$ は一定値である。

まず、 $i=2$ に対して、 $j=2$ から $(\bar{N}ODE\ F-1)$ までを1つの節点に対して $T_{i,j}$ を計

算し、同じ節点の $\psi_{i,j}$ を計算するという手順をくり返す。これらの計算において、節点 $(i, j+1)$ ($i+1, j$)における T と ψ は、1回前に計算した値を用い、節点 $(i, j-1)$ 、 $(i-1, j)$ では、新しく計算した値を用いる。また、境界 ($\theta=0$ と π)における計算を一般的にするため、2.5で記した温度に関する境界条件(i)と流れ関数に関する境界条件(ii)を満足するように $T_{i,1}$ と $T_{i,\bar{N}ODE\ F}$ を

$$T_{i,1} = T_{i,3}, \quad T_{i,\bar{N}ODE\ F} = T_{i,\bar{N}ODE\ F-2}$$

とし、 $\psi_{i,1}$ と $\psi_{i,\bar{N}ODE\ F}$ を

$$\psi_{i,1} = -\psi_{i,3}, \quad \psi_{i,\bar{N}ODE\ F} = \psi_{i,\bar{N}ODE\ F-2}$$

とした。このようにして、 $i=3, 4, \dots, \bar{N}ODE\ 1$ までを同様に順次計算し、 $i=(\bar{N}ODE\ 1+1)$ から $\bar{N}ODE\ 2$ までは、 T だけの計算を行う。以後は、これらの繰り返しになる。

本計算での格子点数は、 45×39 ($\bar{N}ODE\ 1=41$, $\bar{N}ODE\ 2=45$, $\bar{N}ODE\ F=39$)で、加速係数は $\omega_T = \omega_\psi = 1.85$ とした。計算は、FACOM 230-75を用いて行ったが、計算時間はメッシュ数、加速係数、 $(Ra\ Da)$ の値に大きく依存する。加速係数に関して、計算時間を最短にする最適値があるが、この値は $(Ra\ Da)$ の値によって異なり、 $(Ra\ Da)$ が大きい程、小さくなる。計算時間は長くても数分であるため、この加速係数の最適値を見出すための試行計算を行うよりは、

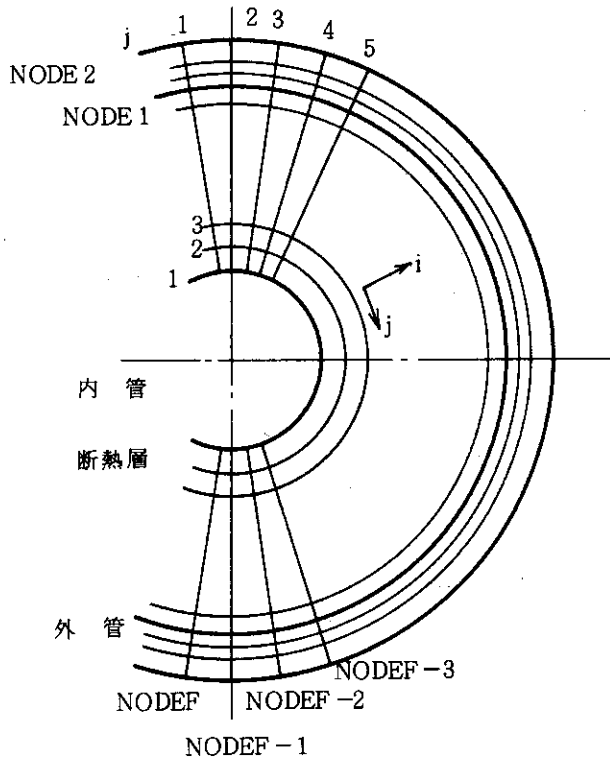


図3-2 格子形状と節点番号

適当な加速係数を用いて計算を行うほうが实际的と思われる。(Ra Da)の値が大きいとき(Ra Da > 200)には、加速係数が大き過ぎるとオーバーフローを起こす。

3.3 計算プログラム

ここで用いた計算プログラムについて述べる。表3-1に、このプログラムの入力データを示す。表3-2に計算プログラムを示す。図3-3は、プログラムのフローチャートである。入力データは、表3-1に示したものを1組とし、何組でも一度に計算できる。入力NINITによって、初期値として、熱伝導計算結果を用いるか、既に計算されてファイルに読み込んである温度と流れ関数を用いるかを選択できる。物性値の温度依存は、入力NPROPによって制御する。この値を1にすると物性値は温度に依存する。この値を2にすると式(2-19)の第3項の中の動粘性係数 ν が、 μ/ρ_0 となり密度一定の条件となる。3にすると、式(2-29)の第1項の中の β が、Boussinesq近似に従って $\beta=1/(T_0+273.15)$ となり、運動方程式における浮力の項の密度を温度の1次関数としたことになる。0にすれば、すべての物性値は基準温度 T_0 での値をとる。周方向の節点数NODEFにおいて、NODEF=2に対応する点が $\theta=0$ であり、NODEF=(NODEF-1)に対応する点が $\theta=\pi$ である。NODEF=1とNODEFは計算手順の簡略化のために設けた仮空点である。外管表面の熱伝達率は、XNUOによって与える。熱伝達率 h_j は、熱伝達率に分布がない場合(NDIST=0とする)、 $h_j=XNUO \cdot \frac{\lambda_{air}}{2R_s}$ より求め、分布がある場合(NDIST=1とし、与える周方向の熱伝達率の点数をNFとする。ただし $NF < NODEF$ である。) $h_j=XNUO \cdot \frac{\lambda_{air}}{2R_s} \cdot F(J)$ によって求める。 $F(NF)$ は、熱伝達率分布の形を与える入力データであり、 $0 \leq F(NF) \leq 1$ である。このデータカードは、NDIST=0のときは省略する。XNUO=0と与えると、 $(Gr \cdot Pr) \leq 10^8$ のときは、 $XNUO=0.53 (Gr \cdot Pr)^{0.25}$ 、 $(Gr \cdot Pr) > 10^8$ のときは $XNUO=0.1 (Gr \cdot Pr)^{0.25}$ によって自動的に計算される。ACCEST, ACCESSは、加速係数であり、 ω_T, ω_ψ に相当する。NFILE=1とすると、温度と流れ関数の最終計算結果をファイルに書き込む。初期値をファイルから呼び出す場合には、コントロールカードとして、「\$DISKT0 F 22, J 0000, □□□□□□□□」が必要であり、ファイルに書き込むには、「\$DISKTN F 33, J 0000, □□□□□□□□」が必要である。0000は職員番号で、□□□□□□□□は、呼び出し、または書き込みファイル名である。なお、このコントロールカードは、原研の大型計算機センターだけに有効である。

出力は、入力データ、動粘性係数の温度係数、基準温度における各物性値、外管表面熱伝達率分布、流れ関数分布、温度分布、熱流束分布、 $\theta=\pi/2$ の流速分布の順にラインプリンターに印字される。

4. 計 算 結 果

基準圧力 $p_0 = 40$ 気圧, 内管表面温度 $T_i = 1000^\circ\text{C}$, 基準温度 $T_0 = 500^\circ\text{C}$, 雰囲気温度 $T_\infty = 20^\circ\text{C}$, 内管半径 $r_i = 0.1\text{m}$, 外管内半径 $r_0 = 0.3\text{m}$, 外管外半径 $r_s = 0.31\text{m}$, 外管熱伝導率 $\lambda_s = 18\text{W/m}\cdot\text{K}$, 加速係数 $\omega_T = \omega_\psi = 1.85$, 収束判定許容誤差 $E_T = E_\psi = 1.0 \times 10^{-5}$, 半径方向節点数 45 (外管内面まで 41), 周方向節点数 39 で行った計算結果を示す。

$Ra Da = 1$ で, 物性値が一定の場合に, 図 4-1 に示すような外管表面熱伝達率分布を持つときの外管表面の周方向温度分布を図 4-2 に示す。

$Ra Da = 100$, 外管表面熱伝達率が一定で $Nu = 35.73$ ($h = 2.5\text{W/m}^2\cdot\text{K}$) の場合において, 物性値を一定としたとき, 物性値の温度依存性を考えたときの, 流れ関数の分布を図 4-3, $\theta = \pi/2$ の周方向速度分布を図 4-4, 外管表面の周方向温度分布を図 4-5 に示す。

図 4-3 に示した無次元の流れ関数の等高線図を見ると, 物性値の温度変化を考慮した場合, 断熱層内の気体の流れに対する抵抗が, 断熱層上部 ($\theta = 0 \sim \pi/4$) で増加している。また, 図 4-5 に示されているように, 外管表面の最高温度は, 約 30°C 程低くなっており, 表面温度が均一化している傾向が見られる。

以上の計算は, 単なる一例を示したものに過ぎない。

計算結果の詳細に関しては, 次報で述べる予定である。

参 考 文 献

- (1) 下村寛昭, JAERI-M 7566
- (2) 増岡隆士, 下村寛昭, 岡本芳三, 1978 年機械学会年会予稿集
- (3) 小川益郎ほか, 日本原子力学会秋の分科会予稿集, E-53 (1977)

4. 計 算 結 果

基準圧力 $p_0 = 40$ 気圧, 内管表面温度 $T_i = 1000^\circ\text{C}$, 基準温度 $T_0 = 500^\circ\text{C}$, 雰囲気温度 $T_\infty = 20^\circ\text{C}$, 内管半径 $r_i = 0.1\text{m}$, 外管内半径 $r_0 = 0.3\text{m}$, 外管外半径 $r_s = 0.31\text{m}$, 外管熱伝導率 $\lambda_s = 18\text{ W/m}\cdot\text{K}$, 加速係数 $\omega_T = \omega_p = 1.85$, 収束判定許容誤差 $E_T = E_p = 1.0 \times 10^{-5}$, 半径方向節点数 45 (外管内面まで 41), 周方向節点数 39 で行った計算結果を示す。

$Ra Da = 1$ で, 物性値が一定の場合に, 図 4-1 に示すような外管表面熱伝達率分布を持つときの外管表面の周方向温度分布を図 4-2 に示す。

$Ra Da = 100$, 外管表面熱伝達率が一定で $Nu = 35.73$ ($h = 2.5\text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) の場合において, 物性値を一定としたとき, 物性値の温度依存性を考えたときの, 流れ関数の分布を図 4-3, $\theta = \pi/2$ の周方向速度分布を図 4-4, 外管表面の周方向温度分布を図 4-5 に示す。

図 4-3 に示した無次元の流れ関数の等高線図を見ると, 物性値の温度変化を考慮した場合, 断熱層内の気体の流れに対する抵抗が, 断熱層上部 ($\theta = 0 \sim \pi/4$) で増加している。また, 図 4-5 に示されているように, 外管表面の最高温度は, 約 30°C 程低くなっており, 表面温度が均一化している傾向が見られる。

以上の計算は, 単なる一例を示したものに過ぎない。

計算結果の詳細に関しては, 次報で述べる予定である。

参 考 文 献

- (1) 下村寛昭, JAERI-M 7566
- (2) 増岡隆士, 下村寛昭, 岡本芳三, 1978 年機械学会年会予稿集
- (3) 小川益郎ほか, 日本原子力学会秋の分科会予稿集, E-53 (1977)

表 3-1 計算プログラムの入力データ

カード	記 号	フォーマット	カラム	説 明 [単位]
1 枚目	COMENT (20)	20A 4	1-80	注釈
2 枚目	COMENT (20)	20A 4	1-80	注釈
3 枚目	NPROP	I 5	1- 5	= 0 なら 物性値一定 = 1 なら 物性値変化 = 2 なら 流れの抵抗の項の密度一定 = 3 なら 浮力の項の密度だけ Boussinesq 近似 = 0 なら 初期解を熱伝導計算で与える。 = 1 なら 初期値をファイルから呼び出す。 (この時、コントロールカードが必要)
	NINIT	I 5	6-10	
4 枚目	NODE 1	I 10	1-10	外管内壁までの半径方向の節点数 (NODE 1=1 が $r=r_i$ に, NODE 1=NODE 1 が $r=r_o$ に 対応する。)
	NODE 2	I 10	11-20	外管外壁までの半径方向の節点数 ($r=r_s$ に対する) NODE 2 > NODE 1
	NODEF	I 10	21-30	円周方向の節点数 > 4
5 枚目	RI	F10.3	2-10	内管半径: r_i [m]
	RO	F10.3	11-20	外管内半径: r_o [m]
	RS	F10.3	21-30	外管外半径: r_s [m]
6 枚目	P0	F10.3	1-10	断熱層内圧力: p_0 [atm]
	TI	F10.3	11-20	内管表面温度: T_i [°C]
	TR	F10.3	21-30	外管雰囲気温度: T_∞ [°C]
	T0	F10.3	31-40	物性値参照温度: T_0 [°C]
	RADA	F10.3	41-50	(レーリイ数) × (ダルシイ数)
7 枚目	A1	E12.5	1-12	粘性係数 μ の温度係数
	A2	E12.5	13-24	$\mu = A1 \cdot T^2 + A2T + A3$
	A3	E12.5	25-36	μ : [kg/m·s] T : [°C]
	C1	E12.5	37-48	気体静止時の実効熱伝導率 λ^* の温度係数
	C2	E12.5	49-60	$\lambda^* = C1 \cdot T^2 + C2 \cdot T + C3$
	C3	E12.5	61-72	λ^* : [W/m·K]
8 枚目	RAMDAS	E12.5	1-12	外管の熱伝導率 λ_s [W/mK]
9 枚目	NDIST	I 5	1- 5	= 0 なら 外管表面一様熱伝達率 = 1 なら 外管表面熱伝達率分布有り
	NF	I 5	6-10	NDIST=1 の場合に有効であり、周方向の熱伝達率の 与えようとする点数 (NF < NODEF)
	XNU0	E10.3	11-20	外管表面のヌッセルト数。XNU0=0 とすると、外管表面 熱伝達率として内管外表面の自然対流熱伝達率が与えら れる。詳しくは本文参照
	NWRIT1	I 5	21-25	= 0 なら 熱伝達率を印字しない。 = 1 なら 熱伝達率を印字する。
(9+1) 枚目	F (NF)	F 8.5	1- 8	熱伝達率に分布の形を与える。
⋮	⋮	⋮	9-16	(NDIST=1 の時だけ、NF で与えられた点数の F を与 える。0 ≤ F ≤ 1 であり、分布がない場合このカードは 省略する。)
(9+n) 枚目	⋮	⋮	17-24	⋮
	⋮	⋮	⋮	⋮
(10+n) 枚目	ACCEST	F10.3	1-10	温度の加速係数: ω_T
	ACCEST	F10.3	11-20	流れ関数の加速係数: ω_ψ
	ERRT	E10.3	21-30	温度の収束判定許容誤差
	ERRS	E10.3	31-40	流れ関数の収束判定許容誤差
	ITER0	I 5	41-45	繰返し計算打ち切り回数
(11+n) 枚目	NFINAL	I 5	1- 5	= 0 なら 最終結果だけ印字 = 1 なら 繰返し回数 NTIME 毎に結果を印字
	NTIME	I 5	6-10	結果を印字する繰返し回数の間隔 (NFINAL=1 の時だけ参照される)
	NFILE	I 5	11-15	= 1 なら 温度と流れ関数の最終計算結果をファイルに 書き込む。

表3-2 計算プログラム

```

*****
*****
****      NATURAL CONVECTION IN POROUS MEDIA OF HORIZONTAL      ***
****      ANNULAR PIPE WITH TEMPERATURE DEPENDENCE PROPERTIES. ***
****                                                    ***
****                        ( 1978,10. )***
****                                                    ***
*****
*****

```

```

T      ; TEMPERATURE.
STR    ; STREAM FUNCTION.
U      ; RADIAL VELOCITY.
V      ; CIRCUMFERENTIAL VELOCITY.
R      ; RADIAL DISTANCE.
FAI    ; CIRCUMFERENTIAL DEGREE.
NODE1  ; NUMBER OF INNER RADIAL NODES.
NODE2  ; NUMBER OF OUTER RADIAL NODES.
NODEF  ; NUMBER OF CIRCUMFERENTIAL NODES.
RADA   ; =(RAYLEIGH NUMBER)*(DALCY NUMBER)

```

```

***** ( MAIN PROGRAM. ) *****

```

```

T(NODE2,NODEF), STR(NODE2,NODEF), R(NODE2), FAI(NODEF)
@DIST5(NODEF), @DIST1(NODEF), U(NODE1), V(NODE1), PF(NODEF)
F(NODEF), AH(NODEF)

```

```

1  DIMENSION T(95,93), STR(95,93), R(95), FAI(93), @DIST5(93),
    @DIST1(93), U(95), V(95), PF(93), F(93), AH(93)

```

```

DIMENSION COMENT(40), PR(15)
DOUBLE PRECISION TEMP(20), VISK(20), COP(5)
DOUBLE PRECISION ETO, ESO, ET, ES, ERROROT, ERRORS, ERRT, ERRS

```

```

--- ( READ INPUT ) ---

```

```

5000 CONTINUE
READ (5,501,END=6000) (COMENT(I),I=1,20)
READ (5,502) (COMENT(I),I=21,40)
READ (5,503) NPROP, NINIT
READ (5,504) NODE1, NODE2, NODEF
READ (5,505) RI, RO, RS
READ (5,506) PO, TI, TR, TO, RADA
READ (5,507) A1, A2, A3, C1, C2, C3
READ (5,508) RAMDAS
READ (5,509) NDIST, NF, XNUO, NWRT1
IF (NDIST.EQ.0) GO TO 101
IO=(NF-1)/10
DO 100 I=1,1+IO
JI=(I-1)*10
READ (5,510) (F(J),J=JI+1,JI+10)
100 CONTINUE

```

```

21      101 CONTINUE
22      READ (5,511) ACCEST, ACCESS, ERRRT, ERRS, ITERO
23      READ (5,512) NFINAL, NTIME, NFILE
      C
      C      --- ( PRINT INPUT-DATA. ) ---
      C
24      WRITE (6,600)
25      WRITE (6,601) (COMENT(I), I=1, 20)
26      WRITE (6,614)
27      WRITE (6,602) (COMENT(I), I=21, 40)
28      WRITE (6,614)
29      WRITE (6,603) NPROP, NINIT
30      WRITE (6,614)
31      WRITE (6,604) NODE1, NODE2, NODEF
32      WRITE (6,614)
33      WRITE (6,605) RI, RO, RS
34      WRITE (6,614)
35      WRITE (6,606) PO, TI, TR, TO, RADA
36      WRITE (6,614)
37      WRITE (6,607) A1, A2, A3, C1, C2, C3
38      WRITE (6,614)
39      WRITE (6,608) RAMDAS
40      WRITE (6,614)
41      WRITE (6,609) NDIST, NF, XNUO, NWRIT1
42      WRITE (6,614)
43      IF (NDIST.EQ.0) GO TO 102
44      DO 103 I=1, 1*10
45      JI=(I-1)*10
46      WRITE (6,610) (F(J), J=JI+1, JI+10)
47      WRITE (6,614)
48      103 CONTINUE
49      102 CONTINUE
50      WRITE (6,611) ACCEST, ACCESS, ERRRT, ERRS, ITERO
51      WRITE (6,614)
52      WRITE (6,612) NFINAL, NTIME, NFILE
53      WRITE (6,614)
54      WRITE (6,613)
      C
      C      --- ( KINEMATIC VISCOSITY ) ---
      C
55      TEMP(1)=0.0
56      DO 200 I=1, 16
57      VISK(I)=(A1*TEMP(I)*TEMP(I)+A2*TEMP(I)+A3)*(TEMP(I)+273.15)
      1 / (48.777*PO)
58      TEMP(I+1)=TEMP(I)+100.0
59      200 CONTINUE
60      CALL LSTSQD ( TEMP, VISK, 16, 3, COF, ILL1)
61      B1=COF(3)
62      B2=COF(2)
63      B3=COF(1)
64      IF (ILL1.NE.0) WRITE (6,620) ILL1
      C
      C      --- ( STANDARD PROPERTIES. ) ---
      C
      C      ANU      ; VISCOSITY                      (KG/M*S)
      C      AMU      ; KINEMATIC VISCOSITY            (M*M/S)
      C      RAMDA    ; THERMAL CONDUCTIVITY OF POROUS MEDIA (J/M*S*C)

```

```

      C      RHO      : DENSITY                                (KG/M**3)
      C
65      ANUO  =A1*T0*T0 +A2*T0 +A3
66      AMUO  =B1*T0*T0 +B2*T0 +B3
67      RAMDAO=C1*T0*T0 +C2*T0 +C3
68      RHOO  =48.777*P0/(T0+273.15)

      C
      C
      C      --- ( KINEMATIC VISCOSITY=ANU/RHOO ) ---
      C
69      IF (NPROP.NE.2) GO TO 210
70      B1=A1/RHOO
71      B2=A2/RHOO
72      B3=A3/RHOO
73      210 CONTINUE
74      WRITE (6,621) B1,B2,B3
75      WRITE (6,622) P0,T0,ANUO,AMUO,RAMDAO,RHOO

      C
      C      --- ( SET OF PROPERTIES DEPENDENCE ) ---
      C
76      PD1=PD2=PD3=PD4=PD5=0.0
77      IF (NPROP.EQ.0) GO TO 300
78      PD1=PD2=PD3=PD4=PD5=1.0
79      300 CONTINUE

      C
      C      --- ( DECISION OF MESH ) ---
      C
80      DR    =1.0/FLOAT(NODE1-1)
81      DRD   =(RS-RO)/(RO-R1)/FLOAT(NODE2-NODE1)
82      PAI   =3.1415926
83      DFAI  =PAI/FLOAT(NODEF-3)

      C
84      DO 700 I=1,NODE1
85      R(I)=R1/(RO-R1)+DR*FLOAT(I-1)
86      700 CONTINUE
87      DO 701 I=NODE1+1,NODE2
88      R(I)=R(I-1)+DRD
89      701 CONTINUE
90      FAI(1)=-DFAI
91      DO 702 I=1,NODEF-1
92      FAI(I+1)=FAI(I)+DFAI
93      702 CONTINUE

      C
      C      --- ( HEAT TRANSFER COEFFICIENT. ) ---
      C
94      IF (XNUO.NE.0.0) GO TO 750
95      GRPR=1.23E+11/(273.15+T0)*RS*RS*RS*(T0-TR)
96      XNUO=0.53*GRPR**0.25
97      IF (GRPR.GT.1.0E+08) XNUO=0.1*GRPR**0.25
98      750 CONTINUE
99      RAMAIR=7.286E-5*(T0+TR)*0.5+2.444E-2
100     AHU=RAMAIR*XNUO/RS*0.5
101     NHTCD=NODEF-2
102     IF (NDIST.EQ.1) GO TO 710
103     DO 711 J=1,NODEF-2
104     F(J)=1.0
105     711 CONTINUE

```

```

106      710 CONTINUE
107      CALL HTCD ( AH, NHTCD, NDIST, AH0, F, NF, NWRIT1, AHM)
      C
      C      ---( INITIAL TEMPERATURE AND STREAM FUNCTION. )---
      C
      C      *( READ FROM FILE )*
      C
      C      *** TEMPERATURE ***
      C
108      IF (NINIT.EQ.0) GO TO 400
      C      READ FILE.
109      DO 410 I=1,NODE2
110      READ (22) (T(I,J),J=1,NODEF)
111      410 CONTINUE
      C
      C      *** STREAM FUNCTION ***
      C
112      DO 420 I=1,NODE1
113      READ (22) (STR(I,J),J=1,NODEF)
114      420 CONTINUE
115      GO TO 430
      C
      C      *( CALCULATION OF INITIAL TEMPERATURE )*
      C
      C      *** TEMPERATURE ***
      C
116      400 CONTINUE
117      DO 440 I=1,NODE1
118      RII=R(I)*(RO-RI)
119      DO 441 J=2,NODEF-1
120      L=J-1
121      T(I,J)=T1+AH(L)*(TR-T1)/(AH(L)*ALOG(RO/RI)+RAMDA0/RO)
122      1      *ALOG(RII /RI)
123      441 CONTINUE
124      440 CONTINUE
      C
125      DO 442 I=NODE1+1,NODE2
126      DO 443 J=2,NODEF-1
127      T(I,J)=T(NODE1,J)
128      443 CONTINUE
129      442 CONTINUE
      C
130      DO 444 I=1,NODE2
131      T(I,1) =T(I,3)
132      T(I,NODEF)=T(I,NODEF-2)
133      444 CONTINUE
      C
      C      *** STREAM FUNCTION ***
      C
134      DO 445 I=1,NODE1
135      DO 446 J=1,NODEF
136      STR(I,J)=0.0
137      446 CONTINUE
138      445 CONTINUE
139      430 CONTINUE
      C
      C      ---( SUM OF PRE-T AND PRE-STR )---

```

```

C
139      ETO=ES0=0.0
140      DO 720 I=1,NODE2
141      DO 721 J=1,NODEF
142      ETO=ETO+ABS(T(I,J))
143      721 CONTINUE
144      720 CONTINUE
145      DO 722 I=1,NODE1
146      DO 723 J=2,NODEF-1
147      ES0=ES0+ABS(STR(I,J))
148      723 CONTINUE
149      722 CONTINUE

C
C
C      --- ( CALCULATION OF TEMPRATURE AND STREAM FUNCTION. ) ---
C
150      ITER=1
C
C      * ( BEGINNING OF ITERATION ) *
C
151      2000 CONTINUE
C
152      ET=ES=0.0
C
C      *** IN THE INSULATOR.  TEMPERATURE ***
C
153      DO 800 I=2,NODE1-1
154      DO 801 J=2,NODEF-1
C
155      DSTRI=STR(I,J+1)-STR(I,J-1)
156      DSTRJ=STR(I-1,J)-STR(I+1,J)
157      UNITU=SIGN(1.0,DSTRJ)
158      UNITV=SIGN(1.0,DSTRI)
159      U1=0.5*(1.0-UNITU)
160      U2=UNITU
161      U3=-0.5*(1.0+UNITU)
C
162      V1=0.5*(1.0-UNITV)
163      V2=UNITV
164      V3=-0.5*(1.0+UNITV)
165      AX=2.0*R(I)*DR*DFAI*
1      ( (STR(I,J+1)-STR(I,J-1)) * (U1*T(I+1,J)+U3*T(I-1,J))
2      -(STR(I+1,J)-STR(I-1,J)) * (V1*T(I,J+1)+V3*T(I,J-1)) )
166      BX=2.0*R(I)*DR*DFAI*
1      ( (STR(I,J+1)-STR(I,J-1))*U2-(STR(I+1,J)-STR(I-1,J))*V2 )
167      CX=1.0+PD3*(C1*(T(I,J)*T(I,J)-T0*T0)+C2*(T(I,J)-T0))/RAMDAO
168      DX=4.0*R(I)*R(I)*DFAI*DFAI*(T(I+1,J)+T(I-1,J))
1      +2.0*R(I)*DR*DFAI*DFAI*(T(I+1,J)-T(I-1,J))
2      +4.0*DR*DR*(T(I,J+1)+T(I,J-1))
169      EX=2.0*( 4.0*R(I)*R(I)*DFAI*DFAI+4.0*DR*DR )
170      FX=PD3*(2.0*C1*T(I,J)+C2)/RAMDAO
171      GX=R(I)*R(I)*DFAI*DFAI*(T(I+1,J)-T(I-1,J))*(T(I+1,J)-T(I-1,J))
1      +DR*DR*(T(I,J+1)-T(I,J-1))*(T(I,J+1)-T(I,J-1))
C
172      T(I,J)=(1.0-ACCEST)*T(I,J) + ACCEST*(CX*DX+FX*GX-AX)/(BX+CX*EX)
173      ET=ET+ABS(T(I,J))
C

```

```

C      *** STREAM FUNCTION ***
C
174      BETA=(T0+273.15)/((T(I,J)+273.15)*(T(I,J)+273.15))
175      IF (NPROP.EQ.3) BETA=1.0/(T0+273.15)
176      AX=RADA*BETA*2.0*R(I)*DR*DFAI*
1       (R(I)*DFAI*(T(I+1,J)-T(I-1,J))*SIN(FAI(J))
2       +DR*(T(I,J+1)-T(I,J-1))*COS(FAI(J)) )
177      BX=PD2/AMU0*(2.0*B1*T(I,J)+B2)*
1       (R(I)*R(I)*DFAI*DFAI*(T(I+1,J)-T(I-1,J))*(STR(I+1,J)-STR(I-1,J)
2       )+DR*DR*(T(I,J+1)-T(I,J-1))*(STR(I,J+1)-STR(I,J-1)) )
178      CX=1.0+PD2/AMU0*( B1*(T(I,J)*T(I,J)-T0*T0)+B2*(T(I,J)-T0) )
179      DX=4.0*R(I)*R(I)*DFAI*DFAI*(STR(I+1,J)+STR(I-1,J))
1       +2.0*R(I)*DR*DFAI*DFAI*(STR(I+1,J)-STR(I-1,J))
2       +4.0*DR*DR*( STR(I,J+1)+STR(I,J-1) )
180      EX=8.0*(R(I)*R(I)*DFAI*DFAI+DR*DR)
C
181      STR(I,J)=(1.0-ACCESS)*STR(I,J)+ ACCESS*(BX+CX*DX-AX)/(CX*EX)
182      ES=ES+ABS(STR(I,J))
C
183      801 CONTINUE
C
184      T(I,1)=T(I,3)
185      T(I,NODEF)=T(I,NODEF-2)
186      STR(I,2)=STR(I,NODEF-1)=0.0
187      STR(I,1)=-STR(I,3)
188      STR(I,NODEF)=-STR(I,NODEF-2)
C
189      800 CONTINUE
C
C      *** AT THE INNER SURFACE OF OUTER PIPE ***
C
190      I=NODE1
191      AX0=R(I)*(R(I)-0.5*DR)*DRD*DFAI*DFAI
192      BX =R(I)*(R(I)+0.5*DRD)*DR*DFAI*DFAI*RAMDAS
193      CX0=0.5*DR*DR*DRD
194      DX =0.5*DR*DRD*DRD*RAMDAS
195      EX0=0.5*R(I)*(R(I)-0.5*DR)*DR*DRD*DFAI*RAMDAO/(R(I)+R(I-1))
196      FX0=0.25*R(I)*DR*DRD*DFAI*RAMDAO
197      DO 802 J=2,NODEF-1
198      EX=EX0*(STR(I,J+1)+STR(I-1,J+1)-STR(I,J-1)-STR(I-1,J-1))*0.5
199      FX=FX0*(STR(I,J)+STR(I,J+1)-STR(I-1,J)-STR(I-1,J+1))*0.5
200      GX=FX0*(STR(I,J)+STR(I,J-1)-STR(I-1,J)-STR(I-1,J-1))*0.5
201      RAMJ2 =RAMDAO+0.5*PD3*(C1*(T(I,J)*T(I,J)+T(I-1,J)*T(I-1,J)
1       -2.0*T0*T0)+C2*(T(I,J)+T(I-1,J)-2.0*T0) )
202      RAMJ2M=RAMDAO+0.5*PD3*(C1*(T(I,J)*T(I,J)+T(I,J-1)*T(I,J-1)
1       -2.0*T0*T0)+C2*(T(I,J)+T(I,J-1)-2.0*T0) )
203      RAMJ2P=RAMDAO+0.5*PD3*(C1*(T(I,J)*T(I,J)+T(I,J+1)*T(I,J+1)
1       -2.0*T0*T0)+C2*(T(I,J)+T(I,J+1)-2.0*T0) )
204      AX=AX0*RAMJ2
205      CX1=CX0*RAMJ2M
206      CX2=CX0*RAMJ2P
207      FX1=AX+BX+CX1+CX2+2.0*DX-EX-FX+GX
208      FX2=(AX+EX)*T(I-1,J)+BX*T(I+1,J)+(CX1+DX-GX)*T(I,J-1)+(CX2+DX+FX)
1       *T(I,J+1)
C
209      T(I,J)=(1.0-ACCEST)*T(I,J) + ACCEST*FX2/FX1
210      ET=ET+ABS(T(I,J))

```

```

211      802 CONTINUE
212      T(I,1)=T(I,3)
213      T(I,NODEF)=T(I,NODEF-2)
      C
      C      *** IN OUTER PIPE ***
      C
214      DO 803 I=NODE1+1,NODE2-1
215      DO 804 J=2,NODEF-1
216      T(I,J)=(1.0-ACCEST)*T(I,J)
          1      +( 2.0*R(I)*R(I)*DFAI*DFAI*(T(I+1,J)+T(I-1,J))
          2      +R(I)*DRD*DFAI*DFAI*(T(I+1,J)-T(I-1,J))
          3      +2.0*DRD*DRD*(T(I,J+1)+T(I,J-1)) )
          4      /(R(I)*R(I)*DFAI*DFAI+DRD*DRD) *0.25 *ACCEST
      C
217      ET=ET+ABS(T(I,J))
218      804 CONTINUE
219      T(I,1)=T(I,3)
220      T(I,NODEF)=T(I,NODEF-2)
221      803 CONTINUE
      C
      C      *** AT THE OUTER SURFACE OF OUTER PIPE ***
      C
222      I=NODE2
223      RAMS=1.0/RAMDAS
224      DO 805 J=2,NODEF-1
225      L=J-1
226      AX=2.0*R(I)*(R(I)-DRD*0.5)*DFAI*DFAI
227      BX=2.0*R(I)*R(I)*DRD*DFAI*DFAI*AH(L) - *(RO-RI)*RAMS
228      CX=DRD*DRD
229      DX=AX+BX+2.0*CX
230      EX=CX*(T(I,J+1)+T(I,J-1))+AX*T(I-1,J) + BX*TR
      C
231      T(I,J)=(1.0-ACCEST)*T(I,J) + ACCEST*EX/DX
      C
232      ET=ET+ABS(T(I,J))
233      805 CONTINUE
234      T(I,1)=T(I,3)
235      T(I,NODEF)=T(I,NODEF-2)
      C
      C      --- ( ERROR. ) ---
      C
236      ERRORT=(ET-ET0)/ET
237      ERRORS=(ES-ES0)/ES
238      ERROR=DABS(ERRORT)
239      ERRORS=DABS(ERRORS)
      C
      C      --- ( PRINT OUTPUT-DATA. ) ---
      C
240      NPRINT=MOD(ITER,NTIME)
241      IF ( ERROR.LT.ERRT.AND.ERRORS.LT.ERRS) GO TO 1000
242      IF (NFINAL.EQ.0) GO TO 2100
243      IF (NPRINT.EQ.0) GO TO 1000
244      2100 CONTINUE
245      IF(ITER.EQ.ITER0) GO TO 1000
      C
246      ET0=ET
247      ES0=ES

```

```

248      ITER=ITER+1
249      GO TO 2000
C
250      1000 CONTINUE
C
C      *** WRITE STREAM FUNCTION ***
C
251      NDR=(NODE1-1)/10
252      PDR=1.0/FLOAT(NODE1-1)
253      PR(1)=0.0
254      PR(11)=1.0
255      IEND=NDR*9+1
256      DO 740 I=1,9
257      PR(I+1)=PR(I)+PDR*FLOAT(NDR)
258      740 CONTINUE
C
259      NDF=(NODEF-4)/36+1
260      PDF=180.0/FLOAT(NODEF-3)
261      PF(1)=-PDF
262      DO 743 J=1,NODEF-2
263      PF(J+1)=PF(J)+PDF
264      743 CONTINUE
C
265      WRITE (6,630)
266      WRITE (6,631) ITER, ERRORS
267      WRITE (6,632) (PR(I),I=1,11)
268      DO 741 J=2,NODEF-2,NDF
269      WRITE (6,633) PF(J), (STR(I,J),I=1,IEND,NDR),STR(NODE1,J)
270      741 CONTINUE
271      J=NODEF-1
272      WRITE (6,633) PF(J), (STR(I,J),I=1,IEND,NDR),STR(NODE1,J)
C
C      *** WRITE TEMPERATURE ***
C
273      WRITE (6,634)
274      WRITE (6,635) ITER, ERRORT
275      WRITE (6,636) (PR(I),I=1,11)
276      DO 742 J=2,NODEF-2,NDF
277      WRITE (6,637) PF(J), (T(I,J),I=1,IEND,NDR),T(NODE1,J),T(NODE2,J)
278      742 CONTINUE
279      J=NODEF-1
280      WRITE (6,637) PF(J), (T(I,J),I=1,IEND,NDR),T(NODE1,J),T(NODE2,J)
C
281      IF (ERRORT.LT.ERRT.AND.ERRORS.LT.ERRS) GO TO 3000
282      IF (ITER.EQ.ITER0) GO TO 3000
283      ETO=ET
284      ESU=ES
285      ITER=ITER+1
286      GO TO 2000
C
287      3000 CONTINUE
288      IF (ERRORT.LT.ERRT.AND.ERRORS.LT.ERRS) GO TO 760
289      GO TO 4000
C
290      760 CONTINUE
C
C      *** WRITE CONDITIONS ***

```

```

C
291      WRITE (6,638)
292      WRITE (6,639) NPROP,NODE1,RI,PO,RAMDAS,ERRT
293      WRITE (6,640) NINIT,NODE2,RO,TI,XNUO,ERRS
294      WRITE (6,641) NDIST,NODEF,RS,TR,ACCEST
295      WRITE (6,642) NFILE,      RADA,T0,ACCESS
296      WRITE (6,643) (COMENT(I),I=1,20)
297      WRITE (6,644) (COMENT(I),I=21,40)

C
C      -----( ESTIMATE OF HEAT LOSS )-----
C
C      QLOSS      ; TOTAL HEAT LOSS FROM OUTER SURFACE OF OUTER TUBE.
C      QTOTS      ; =QLOSS
C      QTOTI      ; TOTAL HEAT LOSS FROM OUTER SURFACE OF INNER TUBE.
C      QDISTS(J)  ; HEAT FLUX OF OUTER SURFACE OF OUTER TUBE.
C      QDISTI(J)  ; HEAT FLUX OF OUTER SURFACE OF INNER TUBE.
C      AKEF       ; OVERALL HEAT TRANSFER COEFFICIENT.
C      RAMEFF     ; EFFECTIVE CONDUCTIVITY.
C      RAMDAM     ; MEAN CONDUCTIVITY.
C      TLE        ; RAMEFF=C1*TLE**2+C2*TLE+C3
C      TLM        ; RAMDAM=C1*TLM**2+C2*TLM+C3
C      TWM        ; MEAN TEMPERATURE OF OUTER SURFACE OF OUTER TUBE.
C
298      QLOSS=0.0
299      L=1
300      J=2
301      QLOSS=QLOSS+RS*DFAI*AH(L)*(T(NODE2,J)-TR)
302      DO 900 J=3,NODEF-2
303      L=J-1
304      QLOSS=QLOSS+RS*DFAI*AH(L)*(T(NODE2,J)-TR)*2.0
305      900 CONTINUE
306      J=NODEF-1
307      L=J-1
308      QLOSS=QLOSS+RS*DFAI*AH(L)*(T(NODE2,J)-TR)

C
C      *** EFFECTIVE HEAT CONDUCTIVITY ***
C
309      AKEF=QLOSS/(TI-TR)*0.15915494/RS

C
310      SS =2.0*PAI*RS
311      SO =2.0*PAI*RO
312      SI =2.0*PAI*RI
313      SIM=(SO-SI)/ALOG(SO/SI)
314      SOM=(SS-SO)/ALOG(SS/SO)
315      RAMEFF=(RO-RI)*SS/SIM/(1.0/AKEF-1.0/AHM-(RS-RO)*SS/(RAMDAS*SOM))

C
C      *** HEAT FLUX DISTRIBUTION OF OUTER TUBE ***
C
316      DO 901 J=2,NODEF-1
317      L=J-1
318      QDISTS(J)=AH(L)*(T(NODE2,J)-TR)
319      901 CONTINUE
320      QTOTS=QLOSS

C
321      RAMDAM=0.0
322      DO 902 I=1,NODE1
323      DO 903 J=2,NODEF-1

```

```

324      RAMDAM=RAMDAM+C1*T(1,J)*T(1,J)+C2*T(1,J)+C3
325      903 CONTINUE
326      902 CONTINUE
327      ANUM=NODE1*(NODEF-2)
328      RAMDAM=RAMDAM/ANUM
329      IF (NPROP.EQ.0) RAMDAM=RAMDAO
C
330      ANURAM=RAMEFF/RAMDAO
C
C      *** HEAT FLUX DISTRIBUTION OF INNER TUBE ***
C
331      I=1
332      QTOTI=0.0
333      DO 904 J=2,NODEF-1
334      QDISTI(J)=(RAMDAO+0.5*PD3*(C1*(T(1,J)*T(1,J)+T(2,J)*T(2,J)
1          -2.0*TU*TU)+C2*(T(1,J)+T(2,J)-2.0*TU)))*(T(1,J)-T(2,J))
2          /(RO-RI)/DR
3          +RAMDAO*(STR(2,J+1)-STR(2,J-1))*(T(1,J)+T(2,J))*0.25/
4          ((RO-RI)*(R(1)+R(2))*DFAI)
335      QTOTI=QTOTI+RI*DFAI*QDISTI(J)*2.0
336      904 CONTINUE
337      QTOTI=QTOTI-RI*DFAI*(QDISTI(2)+QDISTI(NODEF-1))
C
C      *** REFERENCE TEMPERATURE ***
C
338      TLM=C2*C2-4.0*C1*(C3-RAMDAM)
339      TLM=ABS(TLM)
340      TLM=(-C2+SQR(TLM))*0.5/C1
341      TLE=C2*C2-4.0*C1*(C3-RAMEFF)
342      TLE=ABS(TLE)
343      TLE=(-C2+SQR(TLE))*0.5/C1
C
C      *** AVERAGE TEMPERATURE OF OUTER WALL ***
C
344      I=NODE2
345      TWM=0.0
346      DO 911 J=2,NODEF-1
347      TWM=TWM+T(1,J)
348      911 CONTINUE
349      TWM=TWM/FLOAT(NODEF-2)
C
C      --- ( DISTRIBUTION OF VELOCITY AT 90 DEG. ) ---
C
350      J=(1+NODEF)/2
351      I=1
352      RARHO=(PD4*(T(1,J)-TU)+T0+273.15)/(T0+273.15)
353      U(1)=RARHO*(STR(1,J+1)-STR(1,J-1))/(R(1)*2.0*DFAI)
354      V(1)=-RARHO*(STR(2,J)-STR(1,J))/DR
C
355      DO 910 I=2,NODE1-1
356      RARHO=(PD4*(T(1,J)-TU)+T0+273.15)/(T0+273.15)
357      U(I)=RARHO*(STR(1,J+1)-STR(1,J-1))/(R(1)*2.0*DFAI)
358      V(I)=-RARHO*(STR(1+1,J)-STR(1-1,J))/DR*0.5
359      910 CONTINUE
C
360      J=NODE1
361      RARHO=(PD4*(T(1,J)-TU)+T0+273.15)/(T0+273.15)

```

```

362      U(I)=RARHO*(STR(I,J+1)-STR(I,J-1))/(R(I)*2.0*DFAI)
363      V(I)=-RARHO*(STR(I,J)-STR(I-1,J))/DR
      C
364      DIMVEL=RAMDAO/((RO-RI)*RHO0*5.18E+03)
      C
      C      --- ( PRINT ) ---
      C
365      WRITE (6,650)
366      WRITE (6,643) (COMENT(I),I=1, 20)
367      WRITE (6,644) (COMENT(I),I=21,40)
368      WRITE (6,651) QLOSS, RS, TI, TWM
369      WRITE (6,652) AKEF, RO, TR
370      WRITE (6,653) RAMEFF,RJ, TO, TLE
371      WRITE (6,654) RAMDAM, RAMDAO, PO, TLM
372      WRITE (6,655) ANURAM, RADA
373      NO=1
374      NDJ=(NODEF-4)/30+1
375      DO 905 J=2, NODEF-1, NDJ
376      WRITE (6,656) NO, QDISTS(J), QDISTI(J)
377      NO=NO+NDJ
378      905 CONTINUE
379      WRITE (6,657) QTOTS, QTOTI
380      WRITE (6,658)
381      WRITE (6,659)
382      WRITE (6,660) (U(I), I=1, NODE1)
383      WRITE (6,661)
384      WRITE (6,660) (V(I), I=1, NODE1)
385      WRITE (6,662) DIMVEL
386      WRITE (6,663)
      C
      C      ----- ( WRITE TO FILE ) -----
      C
387      IF (NFILE.EQ.0) GO TO 4000
388      DO 762 I=1, NODE2
389      WRITE (33) (I(I,J), J=1, NODEF)
390      762 CONTINUE
391      DO 763 I=1, NODE1
392      WRITE (33) (STR(I,J), J=1, NODEF)
393      763 CONTINUE
      C
394      4000 CONTINUE
      C
      C      --- ( FORMAT. ) ---
      C
395      501 FORMAT (20A4)
396      502 FORMAT (20A4)
397      503 FORMAT (2I5)
398      504 FORMAT (3I10)
399      505 FORMAT (3F10.3)
400      506 FORMAT (4F10.3, E10.3)
401      507 FORMAT (6E12.5)
402      508 FORMAT ( E12.5)
403      509 FORMAT (2I5, E10.3, I5)
404      510 FORMAT (10F8.5)
405      511 FORMAT (2F10.3, 2E10.3, I5)
406      512 FORMAT (3I5)
      C

```

```

407 600 FORMAT (1H0, '//, '-----( INPUT DATA ),', 100(' '),',', 1X,
      1 59X, '1', 9X, '2', 9X, '3', 9X, '4', 9X, '5', 9X, '6', 9X, '7', 9X, '8',
      2 /, 1X, 50X, '1...5...0...5...0...5...0...5...0...',
      3 '...5...0...5...0...5...0...5...0')
408 601 FORMAT (1H0, '1ST. COMENT', 38X, 20A4, /, 8X, '20A4' )
409 602 FORMAT (1H, '2ND. COMENT', 38X, 20A4, /, 8X, '20A4' )
410 603 FORMAT (1H, '3RD. NPROP NINIT', 32X, 2I5, /, 8X, '15 15' )
411 604 FORMAT (1H, '4TH. NODE1 NODE2 NODEF', 25X, 3I10, /, 8X,
      1 '110 110 110' )
412 605 FORMAT (1H, '5TH. RI RO RS ', 25X, 3F10.3, /, 6X,
      1 'F10.3 F10.3 F10.3' )
413 606 FORMAT (1H, '6TH. PO TI TR TO RADA ', 9X, 4F10.3,
      1 1PE10.3, /, 6X, 1X, 4('F10.3 '), 'E10.3' )
414 607 FORMAT (1H, '7TH. A1 A2 A3 C1 C2 C3 ', 2X,
      1 1P6E12.5, /, 6X, 6('E12.5' ) )
415 608 FORMAT (1H, '8TH. RAMDAS ', 37X, 1PE12.5, /, 8X, 'E12.5' )
416 609 FORMAT (1H, '9TH. NDIST NF XNUO NWRIT1', 17X, 2I5, 1PE10.3,
      1 0P15, /, 8X, '15 15 E10.3 15' )
417 610 FORMAT (1H, 6X, 'F(NF) ', 37X, 10F8.5, /, 8X, 'F8.5' )
418 611 FORMAT (1H, '10TH. ACCEST ACCESS ERRT ERRS ITERO ',
      1 9X, 2F10.3, 1P2E10.3,
      2 0P15, /, 6X, 2('F10.3 '), 2('E10.3 '), '15')
419 612 FORMAT (1H, '11TH. NFINAL NTIME NF1E1', 25X, 3I5, /, 8X, 3('15' ))
420 613 FORMAT (1H0,
      1 59X, '1', 9X, '2', 9X, '3', 9X, '4', 9X, '5', 9X, '6', 9X, '7', 9X, '8',
      2 /, 1X, 50X, '1...5...0...5...0...5...0...5...0...',
      3 '...5...0...5...0...5...0...5...0')
421 614 FORMAT (1H+, 49X, ' ', /, 50X, ' ')
422 620 FORMAT (1H0, '//, ' --- ERROR IN SUB. LSTSQD ILL1=', 16, ' ---' )
423 621 FORMAT (1H0, '///, 5X, '----( TEMPERATURE COEFFICIENT OF KINEMATIC VISC
      10SITY )-----', /, 8X, 'B1=', 1PE12.5, 3X, 'B2=', 1PE12.5, 3X, 'B3=', 1PE12.5)
424 622 FORMAT (1H0, '//, 5X, '----( PROPERTIES AT ', F5.1, ' (ATM), ',
      1 F5.1, ' (C) )-----', /, 10X, 'VISCOSITY', 27X, '=', 1PE12.5,
      2 ' (KG/M*S)', /, 10X, 'KINEMATIC VISCOSITY', 17X, '=', 1PE12.5,
      3 ' (M*M/S)', /, 10X, 'THERMAL CONDUCTIVITY OF POROUS MEDIA=',
      4 E12.5, ' (J/M*S*C)', /, 10X, 'DENSITY', 29X, '=',
      5 E12.5, ' (KG/M**3)' )
425 630 FORMAT (1H1, '///, 10('*'), '( STREAM FUNCTION
      1 ),', 80('*') )
426 631 FORMAT (1H0, 3X, 'ITERATION TIMES =', 15, ', ', 10X, 'ERROR=', 1PE12.5,
      1 //, 14X, '1', 10X, '2', 10X, '3', 10X, '4', 10X, '5', 10X, '6',
      2 10X, '7', 10X, '8', 10X, '9', 9X, '10', 9X, '11' )
427 632 FORMAT (1H, 9X, 11(1PE10.3, 1X), /)
428 633 FORMAT (1H, F6.1, 3X, 11(1PE10.3, 1X) )
C
429 634 FORMAT (1H1, '///, 10('*'), '( TEMPERATURE )',
      1 86('*') )
430 635 FORMAT (1H0, 3X, 'ITERATION TIMES =', 15, ', ', 10X, 'ERROR=', 1PE12.5,
      1 //, 13X, '1', 8X, '2', 8X, '3', 8X, '4', 8X, '5', 8X, '6',
      2 8X, '7', 8X, '8', 8X, '9', 8X, '10', 7X, '11' )
431 636 FORMAT (1H, 10X, 11(F7.4, 2X), ' WALL', /)
432 637 FORMAT (1H, F6.1, 3X, 11(F8.2, 1X), 1X, F8.2)
433 638 FORMAT (1H0, '///, 5X, '----( CONVERSION )-----')
434 639 FORMAT (1H0, 7X, 'NPROP=', 11, 4X, 'NODE1=', 13, 4X, 'RI =', 1PE11.4, 4X,
      1 'PU=', 0PF7.2, 4X, 'RAMDAS=', 1PE11.4, 4X, 'ERRT=', E10.3)
435 640 FORMAT (1H, 7X, 'NINIT=', 11, 4X, 'NODE2=', 13, 4X, 'RO =', 1PE11.4, 4X,
      1 'TI=', 0PF7.2, 4X, 'XNUO =', 1PE11.4, 4X, 'ERRS=', E10.3)

```

```

436 641 FORMAT (1H,7X,'NDIST=',11.4X,'NODEF=',13.4X,'RS =',1PE11.4,4X,
1. 'TR=',0PF7.2,4X,'ACCEST=',F7.4)
437 642 FORMAT (1H,7X,'NFILE=',11.4X,' ',7X,'RADA=',1PE11.4,4X,
1. 'TU=',0PF7.2,4X,'ACCESS=',F7.4)
438 643 FORMAT (1H0.6X,'COMMENT : ',20A4)
439 644 FORMAT (1H,16X,20A4)
440 650 FORMAT (1H1,///,15('*'),' ( PROPERTIES OF HEAT TRANSFER ',
1. 'IN POROUS MEDIA )',60('*'))
441 651 FORMAT (1H0.5X,'QLOSS =',1PE12.5,' (J/S)',11X,'( RS=',
1. 0PF7.4,' (M) TR=',F8.3,' (C) )',
2. ' T.WALL-MEAN =',F8.2)
442 652 FORMAT (1H,5X,'K-EFF. =',1PE12.5,' (J/M**2*S*C)',4X,'( RO=',
1. 0PF7.4,' (M) TR=',F8.3,' (C) )')
443 653 FORMAT (1H,5X,'LAMDA-EFF.=',1PE12.5,' (J/M*S*C)',7X,'( RI=',
1. 0PF7.4,' (M) TU=',F8.3,' (C) )',
2. ' T(LAMDA-EFF.)=',F8.2)
444 654 FORMAT (1H,5X,'LAMDA-MEAN=',1PE12.5,' (J/M*S*C)',7X,
1. '( LAMDAO=',E11.4,' PO=',0PF8.4,' (KG/CM**2) )',
2. ' T(LAMDA-MEAN)=',F8.2)
445 655 FORMAT (1H,5X,'NU. NO. =',1PE12.5,18X,' ( RA*DA =',E11.4,28X,
1. ')',/,1X,5X,'NO.',4X,'HEAT FLUX (SURFACE)',3X,
2. 'HEAT FLUX (INNER)',/,1X,16X,'(W/M*M)',15X,'(W/M*M)')
446 656 FORMAT (1H,5X,I2.5X,1PE12.5,10X,E12.5)
447 657 FORMAT (1H0.3X,'TOTAL',4X,1PE12.5,' (J/S) ',E12.5,' (J/S) ')
448 658 FORMAT (1H0,/,15('*'),' ( DISTRIBUTION OF VELOCITY AT 90 DEG. )',
1. 70('*'))
449 659 FORMAT (1H0.5X,'--- DIMENSIONLESS VELOCITY U ---')
450 660 FORMAT (1H,(5X,10(1PE10.3,1X)))
451 661 FORMAT (1H0.5X,'--- DIMENSIONLESS VELOCITY V ---')
452 662 FORMAT (1H0.10X,'LAMDAO/((RO-RI)*RHOO*CP)=',1PE11.4)
453 663 FORMAT (1H1)
C
454 GO TO 5000
455 6000 CONTINUE
C
456 STOP
457 END

```

```

C
1  SUBROUTINE HTCD ( AH,J,NDIST,AH0,F,JF,NWRITE,AHM)
C
C ***** ( HEAT TRANSFER COEFFICIENT AT OUTER SURFACE OF
C           CIRCULAR PIPE. ) *****
C
C      AH(J)  ; HEAT TRANSFER COEFFICIENT.
C      J      ; MESH NUMBER OF CIRCUMFERENTIAL DIRECTION.-2
C      NDIST  ; IF NDIST=0 , AH(J)=AH0.
C              IF NDIST=1 , AH(J) IS CALCULATED BY ONE DISTRIBUTION
C                  CURBE.
C      AH0    ; AH(J)=AH0*F(J) , IF NDIST=0 , F(J)=1
C              IF NDIST=1 , F(J) IS THE FUNCTION OF
C                  J.
C      F(JF)  ; F(JF) IS THE FUNCTION OF JF AND DETERMINES DISTRIBU-
C              TION OF AH(J)
C      JF     ; NUMBER OF F , JF.LE.J
C      NWRITE ; IF NWRITE=0 , NOTHING IS PRINTED.
C              IF NWRITE=1 , AH(J) IS PRINTED.
C
2  DIMENSION AH(93), F(93), FAID(93)
C
C      CONSTANT HEAT TRANSFER COEFFICIENT.
C
3      IF (JF.EQ.0) JF=J
4      DFAID=180.0/(J-1)
5      DFAID=180.0/(JF-1)
6      NDI=(J-2)/36+1
7      NDIF=(JF-2)/36+1
8      ILLO=0
C
9      FAID(1)=0.0
10     DO 11 I=1,JF-1
11     FAID(I+1)=FAID(I)+DFAID
12     11 CONTINUE
C
13     IF (NDIST.EQ.1) GO TO 100
14     DO 10 I=1,J
15     AH(I)=AH0
16     10 CONTINUE
17     AHM=AH0
18     GO TO 110
C
C      DISTRIBUTION OF HEAT TRANSFER COEFFICIENT.
C
19     100 CONTINUE
C
20     FAI=0.0
21     TOTAH=0.0
22     DO 12 I=1,J
C
23     IF (FAI.LT.FAID(1).OR.FAI.GT.FAID(JF) ) GO TO 40
24     DO 41 L=1,JF
25     II=L-1
26     IF (FAI.LE.FAID(L) ) GO TO 42
27     41 CONTINUE
28     42 CONTINUE

```

```

29      IF (FAI.EQ.FAID(1) ) GO TO 45
30      IF (FAI.EQ.FAID(JF) ) GO TO 43
31      P=(FAI-FAID(1))*(F(1)+1)-F(1))/(FAID(1)+1)-FAID(1))+F(1)
32      ILL=0
33      GO TO 44
34      43 CONTINUE
35      P=F(JF)
36      ILL=0
37      GO TO 44
38      45 CONTINUE
39      P=F(1)
40      ILL=0
41      GO TO 44
42      40 CONTINUE
43      P=1.0
44      ILL=1
45      44 CONTINUE

C
46      AH(1)=P*AH0
47      TOTAH=TOTAH+AH(1)
48      IF (ILL.NE.0) ILLO=ILLO+1
49      FAI=FAI+DFAI
50      12 CONTINUE
51      AHM=TOTAH/FLOAT(J)

C
52      110 CONTINUE

C
C      PRINT OF HEAT TRANSFER COEFFICIENT.
C

53      IF (NWRITE.EQ.0) GO TO 300
54      WRITE (6,601)
55      WRITE (6,602) AH0
56      WRITE (6,603)
57      FAI=0.0

C
58      DO 30 I=1,JF,NDIF
59      II=(I-1)/NDIF+1
60      II=1+NDI*(II-1)
61      WRITE (6,604) I,FAID(I),F(I),II,FAI,AH(II)
62      FAI =FAI +DFAI*FLOAT(NDI)
63      30 CONTINUE
64      IF (JF.EQ.J) GO TO 310

C
65      DO 31 I=JF+1,J,NDI
66      WRITE (6,605) I,FAI,AH(I)
67      FAI =FAI +DFAI*FLOAT(NDI)
68      31 CONTINUE
69      310 CONTINUE
70      WRITE (6,606) AHM,ILLO

C
71      601 FORMAT (1H1,////,
1          '----- ( DISTRIBUTION OF HEAT TRANSFER COEFFICIENT ) ---
1          '-----')
72      602 FORMAT (1H0,/,/, '          CONSTANT HEAT TRANSFER COEFFICIENT =',
1          1PE12.5, ' J/M**M*S*C')
73      603 FORMAT (1H0, '          NO      DEG      F',13X,'NO      DEG      H (J/M**M*S*
1          1C)')

```

```
74      604 FORMAT (1H ,4X,13,2X,F6.2,2X,1PE12.5,5X,0P13,2X,F6.2,2X,1PE12.5)
75      605 FORMAT (1H ,34X,13,2X,F6.2,2X,1PE12.5)
76      606 FORMAT (1H0,/,5X,'MEAN HEAT TRANSFER COEFFICIENT =',1PE12.5,
      1      ' J/M**M*S*C',5X,'(ERROR TIMES=' 12,' )' )
      C
77      300 CONTINUE
      C
78      RETURN
79      END
```

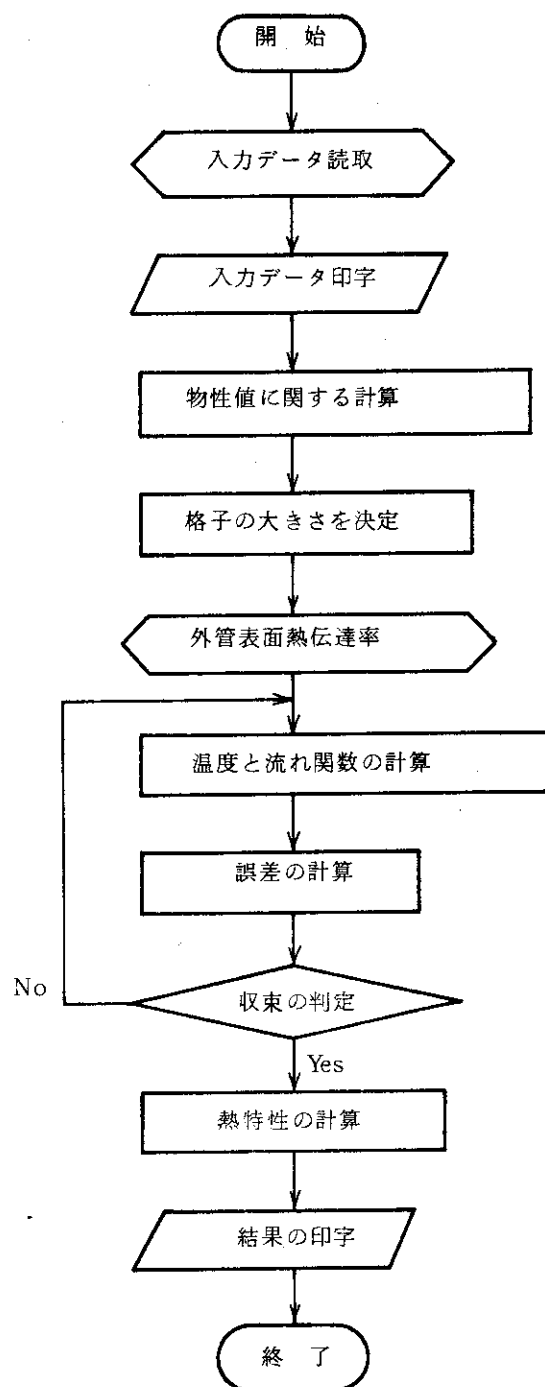


図 3-3 プログラムのフローチャート

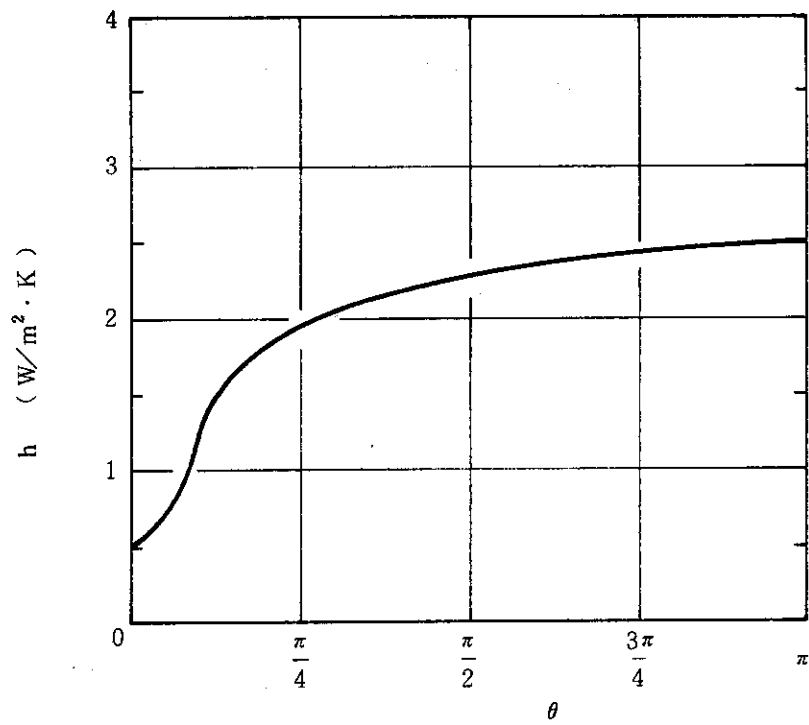


図 4.1 外管表面の周方向熱伝達率分布

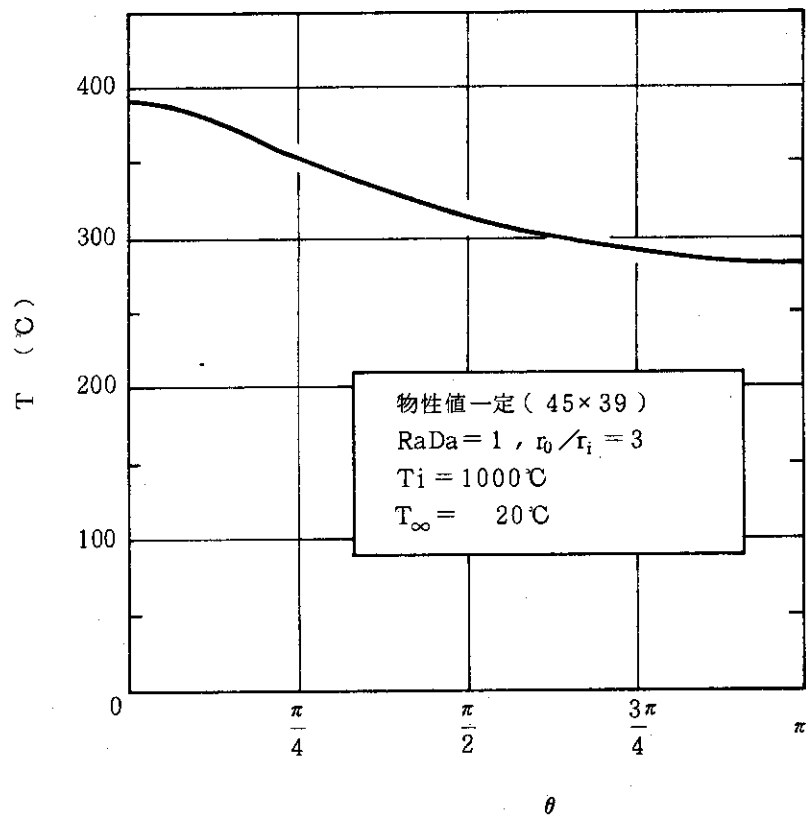


図 4.2 外管表面の周方向温度分布

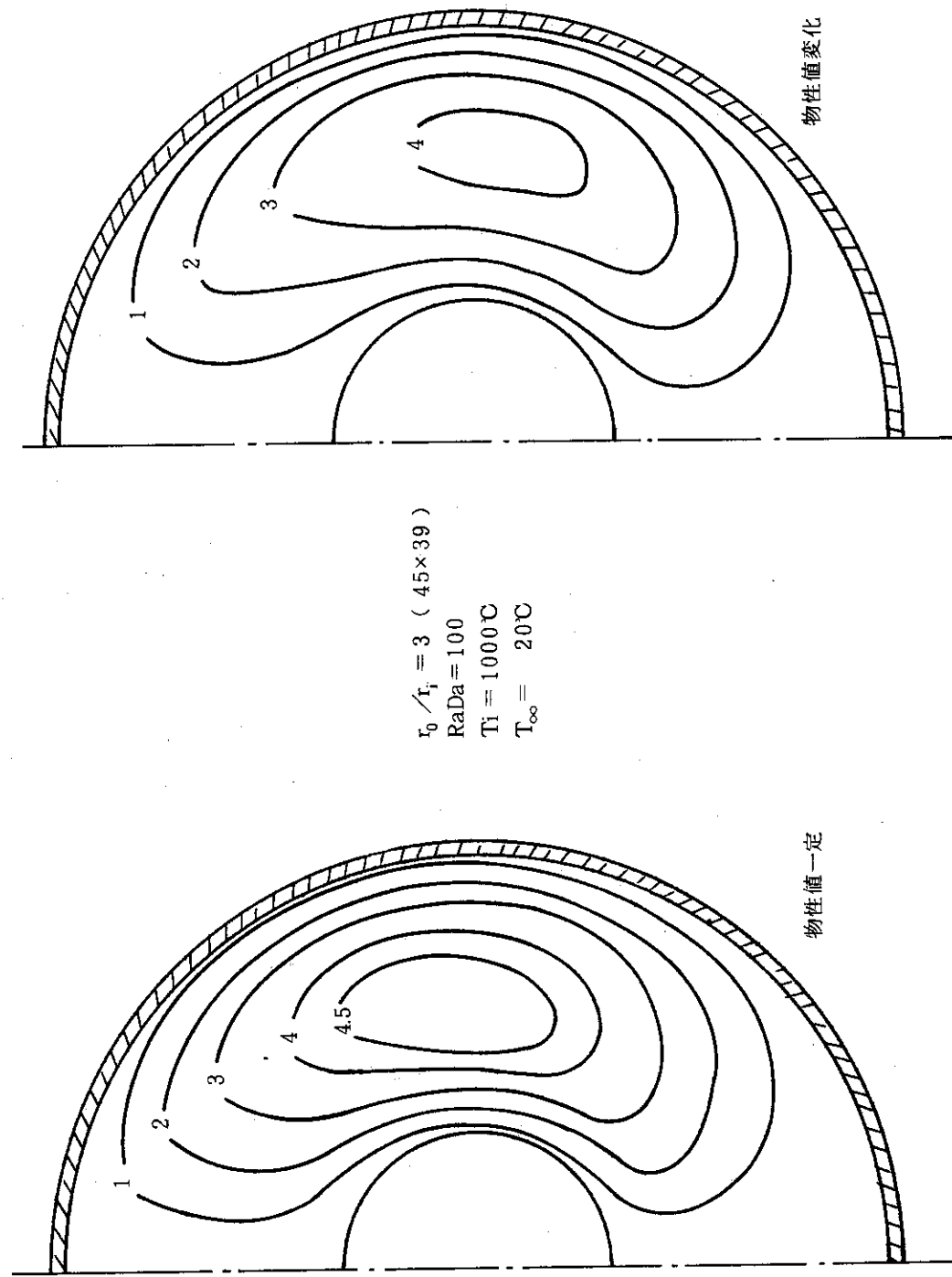


図 4.3 無次元流れ関数の物性値変化の影響

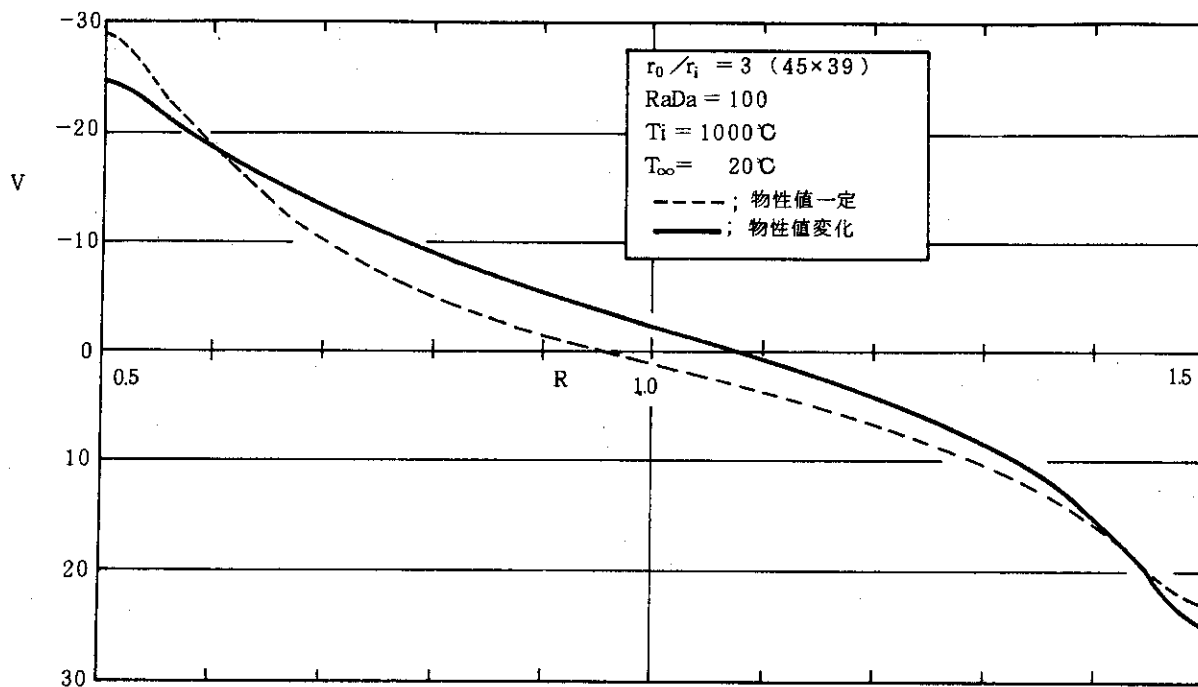


図 4.4 $\theta = \pi/2$ における無次元周方向流速 V の半径方向分布；物性値の影響

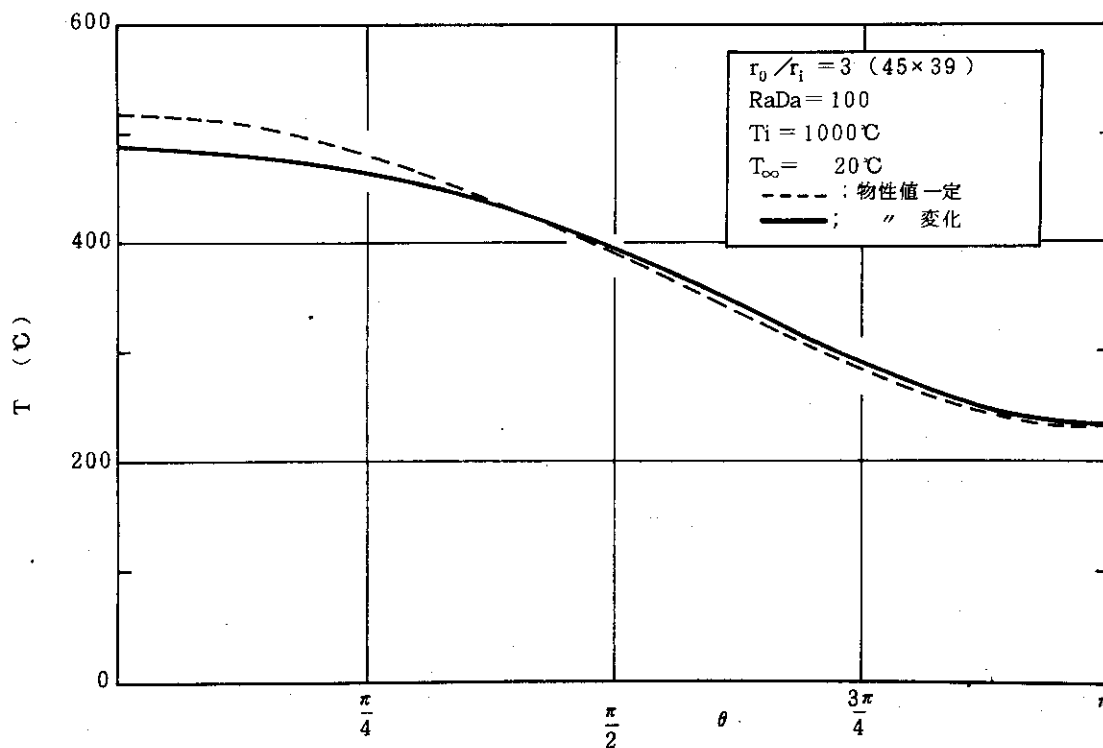


図 4.5 外管表面の周方向温度分布；物性値の影響