

27. 中実回転円板の動的応力解析プログラム

機関開発部 天田重庚

1. プログラムの目的および概要

蒸気、およびガスタービンなどのディスクが、急激な回転変動を行う場合に内部に生ずる動的応力を解析する。

2. プログラムの内容

2.1 プログラムの名称

Dynamic Stress Analysis of a Rotating Disc

2.2 製作者

機関開発部 天田重庚

2.3 製作年月

昭和56年3月

2.4 計算の概要

計算は二種類のルーチンより構成される。第1は、次式を満足するような固有値 λ_n を計算する。

$$\lambda_n J_0(\lambda_n) + 2\nu J_1(\lambda_n) - \lambda_n J_2(\lambda_n) = 0 \quad (1)$$

ただし、 ν はポアソン比、 $J_i(i=0, 1, 2)$ は i 次のベッセル関数である。

第2は、(1)式で求めた λ_n を用いて回転円板内に生ずる半径方向変位 \bar{u} 、半径方向と周方向応力 $\bar{\sigma}_r$ 、 $\bar{\sigma}_\theta$ を計算する。

$$\begin{aligned} \bar{u}(\bar{r}, \bar{t}) &= 4(1+\nu) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_1(\lambda_n \bar{r})}{\Phi(\lambda_n, \nu)} \\ &\times \int_0^{\bar{t}} \bar{\Omega}(\bar{t}-\xi) \sin \lambda_n \xi d\xi \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_r(\bar{r}, \bar{t}) &= \frac{2}{1-\nu} \sum_{n=1}^{\infty} \\ &\frac{\lambda_n J_0(\lambda_n \bar{r}) + (2\nu/\bar{r}) J_1(\lambda_n \bar{r}) - \lambda_n J_2(\lambda_n \bar{r})}{\Phi(\lambda_n, \nu)} \\ &\times \int_0^{\bar{t}} \bar{\Omega}(\bar{t}-\xi) \sin \lambda_n \xi d\xi \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_\theta(\bar{r}, \bar{t}) &= \frac{2}{1-\nu} \sum_{n=1}^{\infty} \\ &\frac{\nu \lambda_n J_0(\lambda_n \bar{r}) + (2\nu/\bar{r}) J_1(\lambda_n \bar{r}) - \nu \lambda_n J_2(\lambda_n \bar{r})}{\Phi(\lambda_n, \nu)} \\ &\times \int_0^{\bar{t}} \bar{\Omega}(\bar{t}-\xi) \sin \lambda_n \xi d\xi \end{aligned} \quad (4)$$

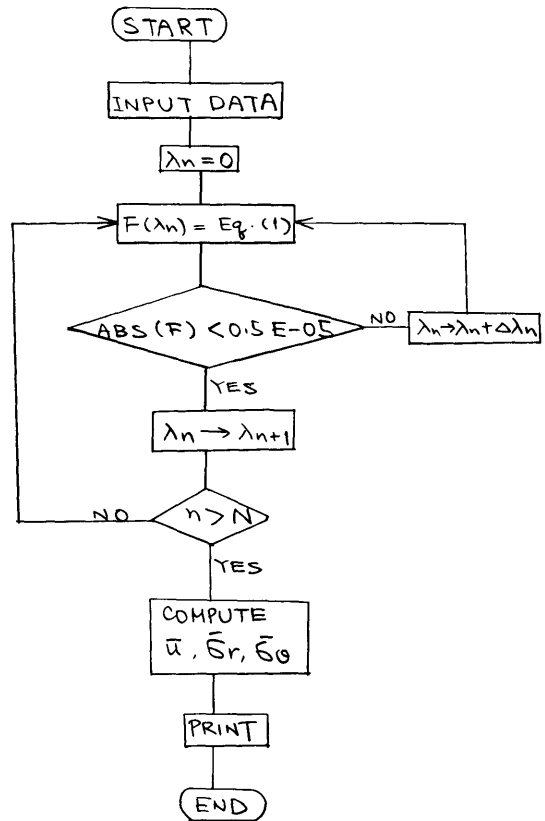
円板の変動回転過程として次の形を採用する。

$$\bar{\Omega}_1(\bar{t}) = \bar{\omega}^2(\bar{t}) = \begin{cases} (\bar{\omega}_0 \bar{t} / \bar{T}_c)^2 & : 0 \leq \bar{t} \leq \bar{T}_c \\ \bar{\omega}_0^2 & : \bar{t} > \bar{T}_c \end{cases} \quad (5)$$

ただし、 $\bar{\omega}_0$ 、 \bar{T}_c は定数とする。

2.5 計算の手順

図-1にフローチャートを示す。主な部分は(1)式の固有値 λ_n を求める手順にあり、ここでは“はさみうち法”を採用した。



2.6 計算機種および制限事項

プログラムの大きさ：340 K B

4. あとがき

円板内に生ずる動的応力は、(5)式の \bar{T}_c に著しく依存することが判明した。他の変動回転過程についても

本プログラムを適用し、動的応力について検討したい。

参 考 文 献

天田, “中実回転円板の動的応力解析”, 日本機械学会論文集, 第49巻, 第448号, A編 (昭和58年12月), 1540—1547

28. 変動回転を受けるはりの過渡振動解析プログラム

機関開発部 天 田 重 庚

1. プログラムの目的および概要

蒸気, あるいはガスタービンのブレードの固有振動についての研究は, 種々のモデルを用いて行われてきた。しかし, タービンの起動や停止時, ブレードの折損事故などによって回転が急変する場合, ブレードの振動挙動は定常振動と著しく異なることが推察される。これを解明するため, はりモデルを用い, 角速度

$$\Omega(t) = \Omega_0 [1 - \exp(-ct)] \quad (1)$$

Ω_0, c : 定数

にて回転変動する場合のブレードの過渡振動を解析するのが本プログラムである。

2. プログラムの内容

2.1 プログラムの名称

Transient Vibrations of Beams Subjected to Variable Rotations

2.2 製作者

機関開発部 天田重庚

2.3 製作年月

昭和58年8月

2.4 計算の概要

タービン・ブレードを均質, 等方性の一様断面のはりに置き換える。Euler-Bernoulli 仮定に従うとし, はりの軸方向の最小振動数がはりの回転速度の10倍以上になることなどを用いると, たわみの運動方程式は次のようになる。

$$EI \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} - \varphi A \Omega^2 \frac{\partial w}{\partial x} \\ \left(\frac{L^2 - x^2}{2} \frac{\partial w}{\partial x} \right)$$

(256)

$$= \varphi A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - \varphi A x \frac{d\Omega}{dt} \quad (2)$$

ただし, $E I$ は曲げ剛性, ρA は単位長さあたりの質量, L ははりの長さである。(2)式をはりの長さ方向と時間軸に沿って離散化し, その一般点を (i, j) とすれば,

$$w(i, j+1) = -w(i, j-1) - C_5 - [C_1 w(i+2, j) \\ - C_2 w(i+1, j) + C_3 w(i, j) - C_4 w(i-1, j) \\ + C_1 w(i-2, j)] \quad (3)$$

にて与えられる。係数 $C_1 \sim C_5$ は, はりの機関の性質, 形状, 回転数などの関数である。

2.5 計算の手順

初期条件

$$w = \partial w / \partial t = 0 \quad \text{at } t=0 \quad (4)$$

を出発値とし, 境界条件

$$w = \frac{\partial w}{\partial x} = 0 \quad \text{at } x=0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} = 0 \quad \text{at } x=L \quad (6)$$

を用いて, (3)式により時間を刻み巾ごとに進めて計算を行う。計算の終了は, (2)式の右辺の第2項, $d\Omega/dt$ がゼロに近くなった時点を基準とする。

2.6 計算機種および制限事項

プログラムの大きさ：200 K B

3. プログラムの応用

本計算では(1)式で与えられた変動回転過程を用いたが, 他の変動回転過程の場合に対してわずかな変更で本プログラムを適用可能である。

4. あとがき

本計算では、最も簡単な Euler-Bernoulli 仮定を用いたが、Timoshenko はりにについても解析を試む予定である。

参考文献

- (1) 天田, “変分法による変動回転するはりの運動方程式の導入”, 第33回応用力学連合講演会抄録集 (昭和58年12月), 95~96
- (2) 天田, “変動するはりの過渡振動”, 第26回構造強度に関する講演会 (昭和59年7月)

29. 境界要素法による熱伝導解析プログラム

機関開発部 町田明正

1. プログラムの目的および概要

本プログラムは境界要素法 (直接法) による2次元熱伝導解析プログラムである。計算は定常熱伝導解析と2種類の定式化により非定常熱伝導解析を行う各々独立した3本のプログラムから成る。

2. プログラムの内容

2.1 プログラムの名称

境界要素法による2次元熱伝導解析プログラム
BEMSTDH, BEMUSH1, BEMUSH2

2.2 製作者

機関開発部 町田明正

2.3 製作年月日

昭和58年1月

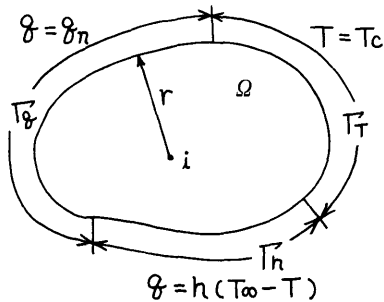


図-1 境界条件

2.4 計算の概要

境界要素法の手順¹⁾に従えば、図-1に示すような境界条件を持つ熱伝導問題に対して、領域Ωの任意点*i*に関する基礎式は基本解*w*を用いて次のように表わ

せる。(内部発熱*Q*を考慮しない場合)

定常熱伝導問題 (BEMSTDH)

$$C_i k T_i - \int_r T \cdot k \frac{\partial w}{\partial n} d\Gamma + \int_{r_h+r_q} q \cdot w d\Gamma + \int_{r_h} h(T_\infty - T) \cdot w d\Gamma = 0 \tag{1}$$

$$w = \frac{1}{2\pi} \ln\left(\frac{1}{r}\right) \tag{2}$$

非定常熱伝導問題 1 (BEMUSH1)

$$C_i k T_i + \frac{\rho c}{\Delta t} \int_\Omega T_0 \cdot w d\Omega - \int_r T \cdot k \frac{\partial w}{\partial n} d\Gamma + \int_{r_h+r_q} q \cdot w d\Gamma + \int_{r_h} h(T_\infty - T) \cdot w d\Gamma = 0 \tag{3}$$

$$w = \frac{1}{2\pi} K_0 \sqrt{\frac{\rho c}{k \cdot \Delta t}} \cdot (r) \tag{4}$$

非定常熱伝導問題 2 (BEMUSH2)

$$\rho c C_i T_i + \rho c \int_\Omega T \cdot w d\Omega \Big|_{t=0} - \int_0^{\Delta t} \int_r T \cdot k \frac{\partial w}{\partial n} d\Gamma dt + \int_0^{\Delta t} \int_{r_h+r_q} q \cdot w d\Gamma dt - \int_0^{\Delta t} \int_{r_h} h(T_\infty - T) \cdot w d\Gamma dt \tag{5}$$

$$w = \frac{1}{4k\pi t} \exp\left(-\frac{r^2}{4Kt}\right) \tag{6}$$

ただし、*C_i*は積分値、*K₀*は0次の第2種変形 Bessel 関数、*K* = *k* / *ρc*, *n*は境界法線方向である。

計算は境界を有限要素法と同様な手法²⁾により離散化し、各節点の位置を任意点として、(1), (3), (5)式の積分を実行、各節点の状態量 (温度*T*, 熱量*q*, 熱伝達率*h*)を変数とする連立方程式を組み立てる。

境界要素は2節点一次要素を、線積分は Gauss の4点積分公式を、領域積分は三角形要素3点積分公式を、連立方程式の解法は Gauss の消去法を用いた。

非定常計算での時間増分 Δt と境界条件は変化しないものとした。(5)式の積分は微小時間々隔 ($0 \sim \Delta t$) において、温度 T 、熱量 q 、熱伝達率 h が時間的に変化しないものとして計算を行った。

2.5 計算の手順

計算の手順の概略を図-2に示す。

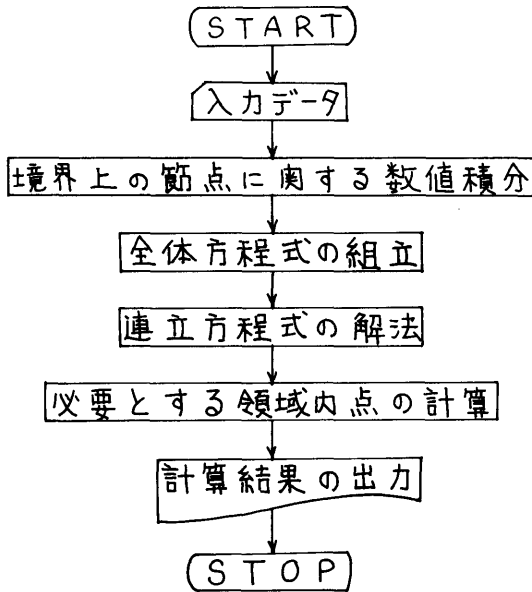


図-2 フローチャート

2.6 計算機種および制限事項

使用計算機は FACOM-M 180 II AD である。

使用メモリー数は定常熱伝導解析プログラム (BEMSTDH) で約120KB (境界上の節点数 ≤ 100)、非定常熱伝導解析プログラム (BEMUSH1, BEMUSH2) で約140KB (境界上の節点数 ≤ 100) である。ただし、取り扱える境界上の節点数の拡張は簡単に行うことができる。

3. あとがき・その他

定常計算では境界上の節点のみを取り扱えば良く、有限要素法に比べて、入力データ数を大幅に減らすことができる。³⁾また、領域内の温度は必要とする位置の値のみ計算すれば良い。

非定常計算では領域積分が含まれるため、領域積分に必要な要素分割とその節点での温度を計算する必要から、入力データ数、計算時間は大きなもの³⁾となり注意が必要である。

参考文献

- 1) C. A. Brebbia & S. Walker, 境界要素法の基礎と応用, 培風館, 1981. 6
- 2) Larry. J. Segerlind, 応用有限要素解析, 丸善, 1978. 1
- 3) 町田・塚田, 境界要素法による熱伝導解析 第41回船研究発表会講演集, 1983. 5

30. ホログラフィ干渉法によるブンゼンバーナ火炎の温度計算プログラム

機関性能部 佐藤 誠四郎

1. プログラムの目的および概要

光に対する気体の屈折率が密度の関数であることを利用して、従来から光干渉法を用いた気体の密度、温度、圧力などの測定が行われている。光干渉法を火炎温度測定に適用する場合、火炎内部では一般にガス組成変化を伴うので、温度を求めるには何らかの方法でガス組成を知る必要がある。

本プログラムは、大気中のブンゼンバーナ火炎の温

度を求めるため、ホログラフィ干渉法を用いてまずガス組成を空気と仮定して計算した火炎温度を基に、温度場と濃度場の相似性の仮定から火炎のガス組成分布を近似的に求め、これを用いてガス組成を考慮した火炎温度を計算する。

2. プログラムの内容

2.1 プログラムの名称

ガス組成を考慮したブンゼンバーナ火炎の温度計算

2.2 製作者

機関性能部 佐藤誠四郎

2.3 製作年月日

昭和57年10月

2.4 計算の概要

ホログラフィ干渉法により火炎温度を測定するため、つぎの仮定をする。

- 1) 火炎の温度分布は軸対称とする。
- 2) 火炎では温度場と濃度場の相似性が成立つ。¹⁾

透過光を用いる干渉法では、温度分布が軸対称と仮定できる場合、光路差の関係を極座標で表わすと通称 Abel 型の積分方程式が導かれる。Abel 型積分方程式はこれまで多くの解法が提案されており、本プログラムでは最も簡単なタマネギの皮モデルと呼ばれる方法²⁾を用いた。求まった屈折率から火炎のガス組成を空気として火炎温度 T_a を計算する。

つぎに得られた火炎温度 T_a を基にして、温度場と濃度場の相似性の仮定を用い火炎のガス組成分布を求める。ただしバーナの燃料はプロパンガスなどの飽和炭化水素とする。

バーナ火炎の全領域を温度と濃度の1つの関係式で表わすのは現象的に無理があるので、図-1に示すように火炎の領域を未燃領域(領域Ⅰ)、反応領域(領域Ⅱ)、希釈領域(領域Ⅲ)の3つに分ける。燃焼反応では安定成分のみ考え、反応速度は無限大、各ガスの拡散速度は等しいと仮定する。対象成分は例えばプロパンガス燃焼の場合、 C_3H_8 、 H_2 、 CO 、 CO_2 、 H_2O 、 N_2 、 O_2 の7種類である。

最後に求まったガス組成分布を用いて T_a からガス組成を考慮した火炎温度 T_g を計算する。

計算に用いる入力干渉縞次数、軸中心からの縞の座標、火炎直接写真などから求めた各領域の境界座標、燃料の種類、当量比などである。

以上の計算の詳細は先に報告している^{1),3)}

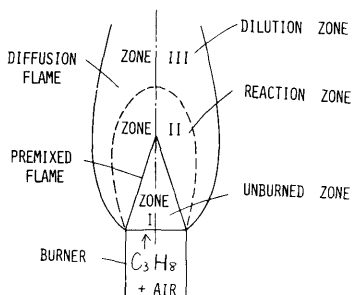


図-1 バーナ火炎モデル

2.5 計算の手順

計算の概略を図-2に示す。

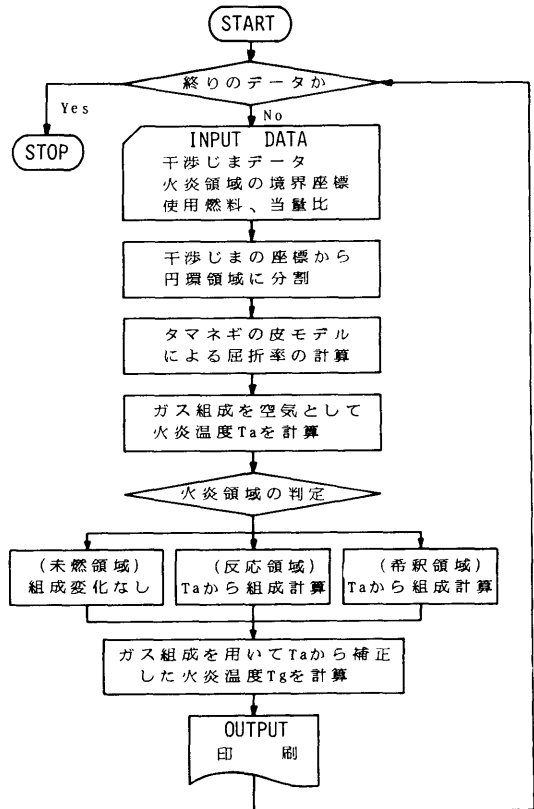


図-2 フローチャート

2.6 計算機種および制限事項

計算センター FACOM M-180 II AD 用

所要メモリ-256 K B 以下

3. プログラムの応用

本プログラムは軸対称火炎の場合、通常の干渉法のほか、高精度干渉測定が得られるマルチパス干渉法¹⁾の場合にも適用できる。

また本プログラムによるブンゼンバーナ火炎の温度計算結果は、別に火炎のガス組成をガスクロマトグラフによる実測値を用いた場合と比べ、1~2%以内の相違で良く一致することが確かめられている。³⁾

4. あとがき

本プログラムでは、タマネギの皮モデルによる円環

領域の分割数とその位置は、干渉縞の数と位置に合わせているため、縞が少ない場合や縞間隔が広い部分では計算点が少なく、また計算値のばらつきが大きい場合もあるので計算精度が不十分と思われる。今後例えば等間隔に円環領域を分割するなど計算方法の改良が必要である。

参 考 文 献

- 1) 佐藤ほか2, 第35回船舶技研研究発表会講演集, (1980), 144.
- 2) 日本機械学会, 技術資料, 燃焼に伴う環境汚染物質の生成機構と抑制法, (昭55), 207.
- 3) 佐藤ほか2, 日本機械学会関西支部, 第58期定時総会講演会講演論文集, 834-8, (昭58-3), 1.
- 4) 佐藤ほか2, 第16回燃焼シンポジウム前刷集, (昭53-12), 232.

31. 燃焼ガスの平衡組成計算プログラム

機関性能部 山 岸 進

1. プログラムの目的及び概要

炭化水素燃焼ガスの平衡組成を、与えられた平衡温度のもとで計算するプログラムである。公表されている大規模なプログラムはサブルーチンとして取り込むことが困難であり、¹⁾²⁾又簡易形のものに限られ目的に合わせているため適用範囲が狭い欠点がある。³⁾実際の燃焼計算においては、何らかの形で温度が与えられて、そのガス組成だけを知りたい場合が屢々ある。これだけに限ると適用範囲の広いプログラムでもかなり小形化でき、サブルーチン化しておくとお変便利である。本プログラムは予め平衡温度を与えて熱力学的性質を求めておいて平衡組成を計算するものである。組成計算部は Huff 等の手法¹⁾を基にしており、解離式、質量保存則、分圧の式から成る非線形連立方程式を Newton-Raphson 法で解いて、燃料種、空燃比、温度について幅広い条件に対処し易くしている。また、成分の熱力学的性質は JANAF のデータを基に計算するようにした。⁴⁾

2. プログラムの内容

2.1 プログラムの名称

炭化水素燃焼ガスの平衡組成計算

2.2 製作者

機関性能部 山岸 進

2.3 製作年月日

昭和51年8月, 昭和58年8月 FACOM 用に改良

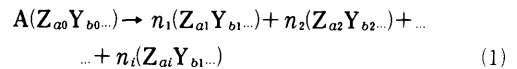
2.4 計算の概要

燃焼ガスの平衡組成を、解離式、質量保存則、分圧

の式を連立させて、Newton-Raphson 法で解いて求める。

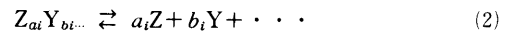
計算に際して使用する主な仮定は次の様である。(1)断熱過程, (2)理想気体, (3)定圧燃焼, (4)固体の折出が無い。

今、対象とする反応式を次の様に表わす。



A は反応式の数, Y, Z, … は元素名, n はモル数, 添字 a, b, … は成分中の原子数, 添字 0 は反応前を示し, 1, 2, … i は成分を示す。

〔解離式〕 i 成分 (Z_{ai}Y_{bi}…) が全てガス状原子に解離するとして次の式で表わす。



反応が一定容積で行われ、理想気体とすれば p = n が成り立ち、分圧をモル分率で置き換える事ができる。

平衡状態では(2)式の平衡定数を K_iとして次の質量作用則が成り立つ。

$$K_i = \frac{p_i}{p_z^{a_i} \cdot p_y^{b_i} \cdot \dots} \quad (3)$$

ここで、p_i は i 成分の分圧を表わす。

一方、熱力学の関係から平衡定数は反応前後の自由エネルギー変化 (ΔF) を用いて次式で表わすことができる。

$$\ln K_i = (-\Delta F/RT)_i \quad (4)$$

$$\Delta F = \Delta H_f - T \Delta S_f \quad (5)$$

ここで、R は気体定数、T は絶対温度、H_f は生成

エンタルピー, S_f は生成エントロピー, Δ は反応前後の差を示す。定圧燃焼を考えている場合, ΔF は Gibb の自由エネルギーになる。 K_i は理想気体で温度のみの関数となり, JANAF のデータ集では $\log K_i$ の形で与えられているが, 直接値の求まらないものは, (4), (5)式から計算する。

〔質量保存則〕各成分を構成している元素の原子数の総和は反応の前後で変化しないから次式が成り立つ。

$$a_0 = \frac{1}{A} \sum_i a_i n_i \quad (6)$$

〔分圧の式〕理想気体の状態方程式が成り立ち, Dalton の分圧則が満足される。本計算の場合分圧 P_i はモル分率 n_i で置き換えることができる。

$$P = \sum_i p_i (= \sum_i n_i) \quad (7)$$

(3), (6), (7) の非線形連立方程式を Newton-Raphson 法で解く。

これは, 関数 F の $X_0 + \Delta X$ における値を Taylor 展開の一次式で近似し, 関数値との差 $\Delta F = F(X_0) + F'(X_0) \cdot \Delta X - F(X_0 + \Delta X)$ を計算し, $\Delta F = 0$ を満足するように $X = X_0 + \Delta X$ を定める方法である。

まず, 推定値を与えて得られる(3)式の K_i と, 温度を与えて(4), (5)式から求まる K_i との比を求める式を作る。

収束を早めるため(3)式対数のとって微分すると, 対数で表わした増分について一次式が得られる。この式は解離式の数だけあり(8)式の様になる。

$$\left. \begin{aligned} x_1 - a_1 x_2 - b_1 x_3 - \dots &= -\delta_1 \\ x_2 - a_2 x_2 - b_2 x_3 - \dots &= -\delta_2 \\ &\vdots \\ x_i - a_i x_2 - b_i x_3 - \dots &= -\delta_i \end{aligned} \right\} (8)$$

但し, $x_i = \Delta \log x_i = \Delta \log p_i$

$$\delta_i = \log K_i - (\log p_i - a_i \log p_2 - b_i \log p_3 - \dots)$$

質量保存則(6)式において推定値から得られる $\frac{1}{A} \sum_i a_i n_i$ が与えられた a_0 に等くなったとき正解が得られたことになり, 前と同様に線形化した(9)式が得られる, 式の数に元素の数だけである。

$$\left. \begin{aligned} \sum_i a_i n_i x_i - A a x_\lambda &= \delta_a \\ \sum_i b_i n_i x_i - A b x_\lambda &= \delta_b \\ &\vdots \end{aligned} \right\} (9)$$

但し $x_\lambda = \Delta \log A$

$$\delta_a = A a \log(a_0/a)$$

$$\delta_b = A b \log(b_0/b)$$

分圧の式についても同様に

$$\sum_i p_i x_i = \delta_p \quad (10)$$

但し $\delta_p = P \log P_0/P$

(8)–(10)の連立方程式を解いて, k 番目の変化分 (x) k が求まると $k+1$ 番目の推定値として次の値を用いて新たな推定値とする。

$$\left. \begin{aligned} \log(n_i)_{k+1} &= \log(n_i)_k + \lambda \cdot x_i \\ \log(A)_{k+1} &= \log(A)_k + \lambda \cdot x_\lambda \end{aligned} \right\} (11)$$

求める解は(12)式で表わす誤差の総和が与えられた ϵ_0 以下になったときの n_i, A である。

$$\epsilon = \sum_i \delta_i + \log \left| \frac{a_0}{a} \right| + \dots + \log \left| \frac{P_0}{P} \right| \quad (12)$$

計算の途中で対数の真数が負にならないように λ に条件を付けて増加分が 2.0 を越えないようにしている。

$$\lambda = \min(1.0, 2.0/\max |x_i|) \quad (13)$$

2.5 計算の手順

図-1 のフローチャートに従う。

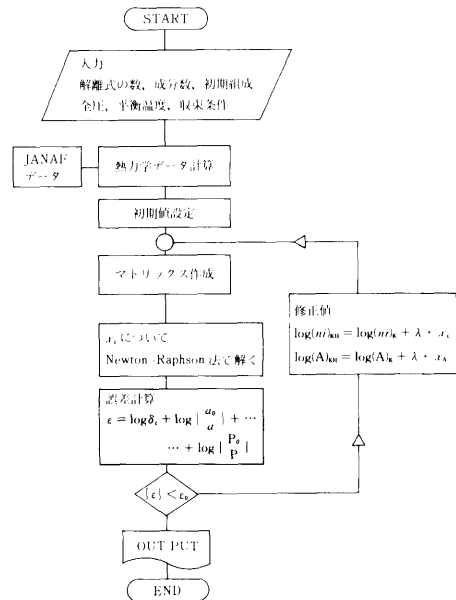


図-1 計算のフローチャート

2.6 計算機種および制限事項

このプログラムは初め TOSBAC 5600用に作り、後 FACOM 180 II用に改めたもので、標準組み込み関数 (ABS, ALOG10, AMAX1, AMIN1, EXP 等) を使用している。

現在、解のマトリックスとして C_2H_2 - 空気用が組み込まれており、12成分 (H_2 , O_2 , N_2 , OH, H_2O , CO, CO_2 , NO, H, O, N, Cgas) の組成が $5000^\circ K \sim 450^\circ K$ の範囲で計算できる。その際の使用メモリーは 64 bit 浮動小数点形 (AUTODBL) で約 128K (LOAD MODULE) であり、CPU は約 0.23 sec ($3500^\circ K$) である。

マトリックスの繰返し計算を行うため、解の精度は計算機の機能に大きく依存することとなる。

例えば、本プログラムを 1 語長 128 bit の実数形で計算すると微量成分を含んだ 18 成分の計算でも収束について問題はない、64 bit 形だと初期値と温度条件に注意しなければならない、32 bit 形だと微量成分についてはかなりの制約を受けることになる。

3. プログラムの応用

本プログラムは温度が与えられた場合の平衡組成を計算してモル分率を求めるものであるが、未燃物のエ

ンタルピーが与えられた場合の燃焼ガスの平衡温度、あるいは等エントロピー変化過程の平衡温度を求めるためにそれ等の式と本プログラムを連立させて解くように改めることは容易である。

4. あとがき

平衡計算における難しい点の一つは、条件によって飛び抜けて微量な値しか持たない成分を含む時の計算精度と計算時間に関するものである。計算機によって、目的に応じた成分の選択と計算方法に工夫が必要となる。

参考文献

1. V. N. Huff, S. Gorden and V. E. Morrel, NACA Report 1037 (1951)
2. S. Gorden and B. J. McBride, NASA SP-273 (1971)
3. A. G. Gaydon and H. G. Wolfhard, "Flames, Their Structure and Temperature", Chapman and Hall (1970)
4. Anon, "JANAF Thermochemical Data", Dow Chemical Co., Midland, Michigan (1967)
5. 山岸, 船研報告 Vol. 14, No 2 (1977)

32. 一体型炉蒸気発生器静特性解析プログラム

原子力船部 松 岡 猛

1. プログラムの目的および概要

船舶技術研究所に設置されている一体型船用炉模擬装置の内装貫流型蒸気発生器の静特性実験及び一般的な一体型炉蒸気発生器の静特性の解析を目的としている。

模擬炉心の一次側温度及び、蒸気発生器二次側の入口流量、入口圧力、入口温度を入力データとして与え、管内流体の伝熱および流動状態を一次元モデルにより計算する。解析結果と実験データとの比較により、計算に使用した各実験式等の評価を行う事もできる。

2. プログラムの内容

2.1 プログラムの名称

(262)

一体型炉蒸気発生器静特性解析プログラム
ASCOTS

A program for an Analysis of Static Characteristics of Once-Through type Stream Generator for Integral Type Reactor

2.2 製作者

原子力船部 松 岡 猛

2.3 製作年月日

昭和54年5月

2.4 計算の概要

蒸気発生器二次側の流れを一次元モデルとして取り扱い、伝熱管の各位置においては熱力学的平衡状態を仮定している。蒸気発生器伝熱管を多数の小区間に分割し、各小区間において定常状態の式を解き、その区

間における諸量を決定する。隣接する小区間についての解析を蒸気発生器入口部より始めて、順次進めて行き、出口部までのすべての位置における諸量を決定する。

液单相流の状態で行った流体は、加熱が進むに従い流動様式が変化していく。この流動様式の遷移の判定も本プログラム内で実施する。

解析の結果得られる諸量は、圧力、流体温度、管内壁温度、管外壁温度、熱流束、乾き度、ボイド率、体積中心流動時間、質量中心流動時間、液相部流体速度、気相部流体速度である。

2.5 計算の手順

計算の概略の流れを図-1に示す。各サブプログラムの概要を表-1に示す。

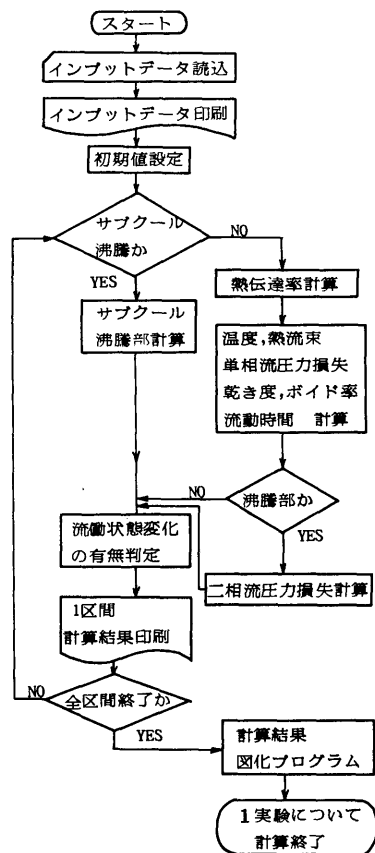


図-1 フローチャート

表-1 サブルーチンの説明

サブルーチン名	概要
BAROC	Baroczyの方法により二相流摩擦圧力損失係数を計算する。
CHISHO	Chisholmの方法により二相流摩擦圧力損失係数を計算する。
FLOWTI	流動時間を計算する。
FRICL	摩擦圧力損失係数を計算する。
HEATTC	熱伝達率を計算する。
HLXC	コイル管部液单相流熱伝達率の計算。
HLXS	直管部液单相流熱伝達率の計算。
HSXC	コイル管部蒸気单相流熱伝達率の計算。
HSXS	直管部蒸気单相流熱伝達率の計算。
KOZEKI	小関の実験の拡張式により二相流摩擦圧力損失係数を計算する。
MQVF	乾き度, ボイド率を計算する。
MN	Martinelli-Nelsonの方法による二相流摩擦圧力損失係数の計算。
NBPOSI	サブクール沸騰開始位置計算。
PDSPH	单相流圧力損失の計算。
PDTPH	二相流圧力損失の計算。
PRL	液体状態におけるプラントル数を計算する。
PRS	気体状態におけるプラントル数を計算する。
REARRA	隣接した次の小区間へ諸計算結果を受け渡す。
REL	液体状態におけるレイノルズ数を計算する。
RES	気体状態におけるレイノルズ数を計算する。

SIGM	表面張力の計算。
SLIPRA	スリップ比, 流体速度を計算する
STPLÖT	計算結果図化プログラム。
SUBCOB	サブクール沸騰領域における諸量を計算する。
TBUK	一小区間下流位置における流体温度を計算する。
TCAL	管壁温度・熱流束を計算する。
TCON	伝熱管の熱伝導率を計算する。
THOM	Thom の方法により二相流摩擦圧力損失倍数を計算する。
TRQ2T3	気泡離脱開始位置における諸量を計算する。
TRPOSQ	流動様式が変化する位置における諸量を計算する。
UKIN	熱通過率を計算する。

2.6 計算機種および制限事項

本プログラムは、本来 TOSBAC-5600 用に作られたものであるが、現在、FACOM 180 II AD においての使用が可能となっている。本プログラムの実行にあたっては、蒸気表サブルーチンを必要とする。(SLOO STEAM FORT 77) 使用コアメモリーは 220 K bites である。

3. プログラムの応用

一般の一体型炉蒸気発生器あるいは、外部条件の定まっている管内流の静特性の解析に使用できる。

4. あとがき

この静特性の解析結果は、不安定流動特性の解析の際の入力データとして使用する事も目的としている。今後、この静特性解析プログラムに対応する不安定流動特性解析プログラムの開発も行いたい。

33. 一体型船用炉自然循環実験解析プログラム

原子力船部 松岡 猛

1. プログラムの目的および概要

船舶技術研究所に設置されている崩壊熱除去特性実験装置の自然循環実験の解析を目的としている。

自然循環実験実施の際に得られる、熱電対出力電圧、流量計出力電圧、等、生の実験データを入力として用い、実験時の体系内温度分布、熱伝達率、熱バランス、等の計算を行う。

2. プログラムの内容

2.1 プログラムの名称

一体型船用炉自然循環実験解析プログラム NCE

2.2 製作者

原子力船部 松岡 猛

2.3 製作年月日

昭和56年8月

2.4 計算の概要

崩壊熱除去特性実験装置の形状データ、及び、各種測定データから物理的な値への変換式は事前にプログラム内部に与えておく。

ヒータ印加電圧、電流、二次側流量計出力電圧、熱電対出力電圧を入力データとして用い、ヒータ出力、二次側流量、流速、体系内温度分布、熱流束、一次側の流体流量、熱通過率、熱交換部熱伝達率、ヒータ・ピン部熱伝達率、を計算する。

合わせて、2、3の理論式による熱伝達率も計算し実験結果との比較を行う。

2.5 計算の手順

計算の概略の流れ図を図-1に示す。各サブプログラムの概要を表-1に示す。

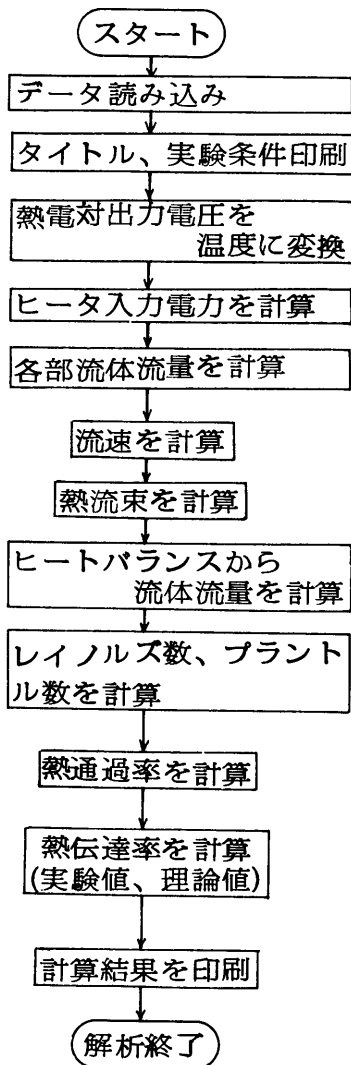


図-1 フローチャート

サブルーチン名	概 要
FLOW	流量計出力電圧値から各部における流量を計算する。
HEATP	ヒーター入力電力値を計算する。
HEATF	熱流量を計算する。更に熱バランスから、各部における流量を計算する。
HTC	局所の熱伝達率を計算する。 合わせて、McAdams の式、Fishenden の式による値も求める。
OHTC	SG 部出入口部温度差から熱通過率を求める。
PRINT	計算結果出力
REPR	レイノルズ数、プラントル数の計算を行う。
VELOC	各部における流速を計算する。

表-1 サブルーチンの説明

2.6 計算機種および制限事項

本プログラムは、FACOM-180 II AD 用に作られたものであり、蒸気表サブルーチン (SLOO. STEAM. FORT 77) を使用している。使用コアメモリは、188 K bites である。

3. プログラムの応用

本プログラムは、崩壊熱除去特性実験装置用に開発したものであるが、同様な体系の他の装置についての解析にも適用する事ができる。

4. あとがき

現在、入力データ・ファイルの作成は手作業によって行っているが、将来、フロッピー・ディスク等の利用により、収録した実験データをそのまま解析できるようにしたい。

34. フォールト・ツリー解析における不確実さ 解析プログラム“SAMPLE”

原子力船部 松 岡 猛

1. プログラムの目的および概要

フォールト・ツリー解析において、頂上事象の発生確率に対する不確実さ解析を行なう。不確実さ解析とは、故障率データに付随する不確実さの頂上事象発生確率への伝播・波及を調べる解析を意味している。

解析には、モンテ・カルロ法を用いている。本プログラムは、ラスムッセン報告(WA SH-1400)の中で開発、使用されたものであり、それを船舶技術研究所の計算センターで使用可能となる様、一部修正の上導入したものである。

2. プログラムの内容

2.1 プログラムの名称

不確実さ解析プログラム SAMPLE

2.2 導入者

原子力船部 松 岡 猛

2.3 導入年月日

昭和56年1月

2.4 計算の概要

フォールト・ツリーの頂上事象を表わす構造関数を、関数副プログラムの形で与える。次に構造関数を構成する基本事象の発生確率及びその分布形を与える。故障確率の分布形は、正規分布、対数正規分布、対数一様分布のうちいずれかを選択できる。一種の分布を選択した後は、構成基本事象すべてについて同一の分布形を仮定しなくてはならない。次に、その分布形に従って一様乱数により故障確率を各基本事象に対しランダムに割り当て、頂上事象の値を計算する。この操作を多数回繰り返す事により、頂上事象の発生確率の分布が得られる。この分布から、頂上事象発生確率の中央値、平均値、90%信頼性や、標準偏差を計算する。

2.5 計算の手順

計算の概略の流れ図を図-1に示す。各サブプログ

ラムの概要を表-1に示す。

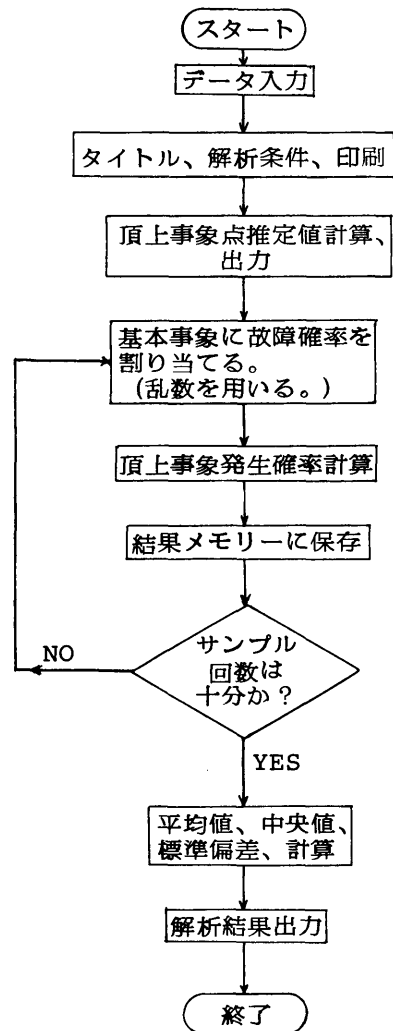


図-1 フローチャート

サブルーチン名	概 要
OUTPUT	頂上事象の確率分布の中央値, 平均値, 標準偏差を計算し, 解析結果を出力する。
GAUSS	中央値, 分散を入力とし, この分布形に従う正規分布の中の任意の一つの値を乱数を用いて選び出す
UNIFO	中央値, 区間幅を入力とし, この分布形に従う一様分布の中の任意の一つの値を乱数を用いて選び出す。
SAMPLE	関数副プログラム。頂上事象をあらゆる構造関数がフォートラン形式で書かれている。

表-1 サブルーチンの説明

2.6 計算機種及び制限事項

本プログラムは、本来 IBM 360/370用に使われていたが、FACOM 180 II AD 用に整備し、使用が可能となっている。乱数発生のため、科学用サブルーチンライブラリ中の RANU 2 サブルーチンを使用して

35. キャスク周辺線量率分布計算コードシステム

原子力船部 山 越 寿 夫

1. プログラムの目的および概要

使用済核燃料輸送容器（以下、キャスクと称す）の中性子、一次、二次ガンマ線に対する遮蔽性能特性関数および反射流特性関数を用い、使用済核燃料の線源データ並びに燃料収納状態に対する入力データから、精度良く、且つ簡便に中性子、一次、二次ガンマ線の線量率空間分布を計算するプログラムである。

計算プログラムは、キャスク表面の各種放射線々量率を計算する部分と、それをもとに、幾何学的データ、例えば、キャスクの形状、観測点のキャスクに相対的

いる。使用コア・メモリーは144 K bitesである。解析可能な最大基本事象数は100である。

3. プログラムの応用

システムの信頼性解析を行う場合必要となる、不確かさ解析に広く適用できる。その場合、フォールト・ツリー解析の方法だけでなく、例えば GO の方法²の様な構造関数が得られる解析方法であれば、すべて適用可能である。

4. あとがき

現在、入力データの一部である構造関数は、関数副プログラム中にフォートラン文で書き込み、与える方法となっている。しかし、大規模なフォールト・ツリーを解析する場合には、この構造関数は複雑膨大なものになってしまう。それ故、この構造関数のフォートランを自動的に作成するプログラムを開発する必要がある。また解析結果は、現在テーブルの形式で出力されるが、これを更に図化するプログラムを開発していきたい。

参 考 文 献

- (1) An assessment of accident risks in U.S. Commercial Nuclear Power Plants, WASH-1400/NUREG-75/014 (1975)
- (2) W.Y. Gateley; An Introduction to GO, Kaman Sciences Corp. K75-94U (R). (August, 1975)

な位置、キャスクどうしの相対的位置関係等を入力データとして空間線量率分布を計算する部分とから成る。

各計算部分に採用された計算手法の妥当性、モデルの妥当性は、既に検証されており、各種キャスクの代表的な型に対する特性関数の値は内蔵されている。

計算結果はグラフィック、ディスプレイおよび表として出力される。

2. プログラムの内容

2.1 プログラムの名称

プログラムは、いくつかの種類の計算から成り、上記の如き目的を持ったコードシステムを形成しているので、キャスク周辺線量率分布計算コードシステムと名付けることとする。

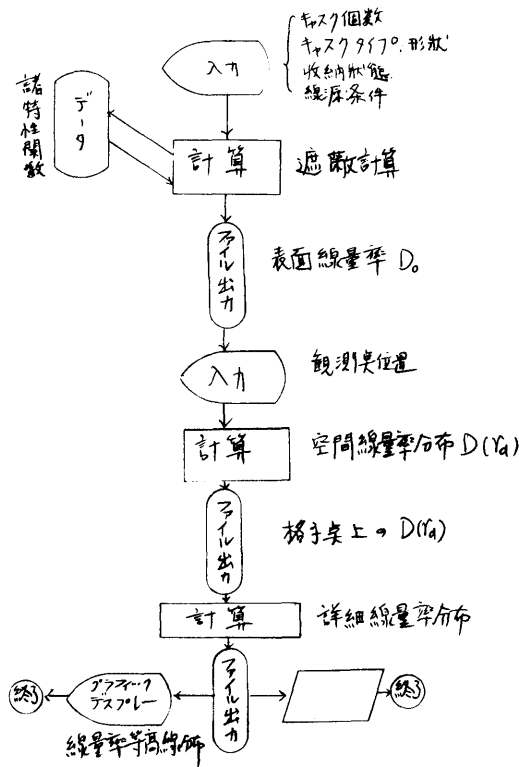
2.2 部名および製作者名

原子力船部 山越寿夫

2.3 製作年月

プログラムの大筋は昭和56年4月から58年4月の間に作成された。一部プログラムの追加が59年2月に行なわれている。

2.4 計算の概要



2.4.1 キャスク表面線量率の計算

キャスク表面の線量率Dを、以下の行列計算により求める。

$$D = (J_i^{eff}) * B \tag{1}$$

$$B \equiv \begin{pmatrix} T_n C_n + T_{n\gamma} C_\gamma \\ T_\gamma C_\gamma \end{pmatrix} \tag{2}$$

$$J_i^{eff} = J_i^0 + (R_{couple}) * J_i^0 \tag{3}$$

$$R_{couple} \approx \sum_{n=1}^6 (R_n R_w)^n \tag{4}$$

ここで、(2)式の $T_n, C_n, T_{n\gamma}, C_\gamma, T_\gamma, C_\gamma$ が、中性子、一次ガンマ線、二次ガンマ線の遮蔽性能特性関数であり、既知量である。 R_n, R_w はキャスク壁から内筒部への反射流特性関数および、内筒部からキャスク壁への反射流特性関数である。 J_i^0 は、裸の内筒部から外部へ漏れる中性子および一次ガンマ線の流れであり、使用済核燃料の線源条件および内筒部への収納状態に依存する量である。

2.4.2 キャスク周辺線量率分布の計算

キャスク表面中央部から容器表面に垂直に進んだ径方向の線量率分布 $D_R(r_d)$ (r_d はキャスク中心軸からの垂直に測った観測点の位置)は以下の式で計算する。

$$D_R(r_d) = \frac{2D_0 J}{\pi} \sin^{-1} \left(\frac{r_s}{r_d} \right) \tag{5}$$

ただし、 r_s は容器表面の半径であり、 J は、楕円積分を用いて表わされる。容器高さH、半径 r_s 、観測点位置 r_d の関数である。 D_0 はキャスク表面の線量率である。

(5)式は、単一容器の中央高さに於ける、径方向線量率分布を与えるが、高さ方向分布に対しては、仮想高さ H_L と H_S を持つ、ふたつの仮想キャスクに対する線量率分布 $D_L(r_d), D_S(r_d)$ を用いて、下記の式から計算する。

$$D_H(r_d) = \frac{1}{2} (D_L(r_d) + D_S(r_d)) \tag{6}$$

(6)式は観測点の位置の高さ方向成分がキャスク高さ以上あり、底面が楕円状に見える場合は、その寄与を加算するのが本来であるが、プログラム機能としては、まだ備わっていない。

2体以上のキャスクが隣接している場合、キャスクに囲まれた領域の線量率分布は、(5)式、(6)式を用いた、各キャスク周辺線量率分布を重ね合わせて計算する。

2.4.3 グラフ表示

容器周辺の線量率分布として、各空間格子点に於ける線量値を求め、内種法により詳しい分布を推定する。推定した線量率分布に対し、線量率分布の等高線分布をグラフィックディスプレイで出力すると共に、数値データを紙に出力する。

2.5 計算の手順

2.6 計算機種および制限事項

キャスク表面線量率および格子点上の線量率空間分布の計算に対しては、計算のステップ数、および記憶

容量はあまり大きくは無いので、マイクロコンピュータでも処理可能であるが、グラフィックディスプレイによる線量率分布の等高線マップを作成する部分に大きな計算ステップ数と記憶容量が要求される。

船研の計算機で線量率の等高線マップを作成する為には、512KB (Dクラス)が必要である。2体のキャスクの高さ中心を通る面上で等高線マップを描かせる為には、計算全体として約3分程度のCPU時間がかかる。

36. 一次元放射線輸送計算プログラム PALLAS-PL, SP-Br

東海支所 竹内 清

1. プログラムの目的および概要

定常のボルツマン輸送方程式を一次元平板形状および球形状に対して数値解法により解き、中性子およびガンマ線の遮蔽計算を行う。ガンマ線の輸送計算では二次的に発生する制動放射線も含めて輸送計算できるように発展させた。

2. プログラムの内容

2.1 プログラムの名称

一次元放射線輸送計算プログラム PALLAS-PL, SP-Br

2.2 製作者

東海支所 竹内 清

2.3 製作年月

昭和57年3月

2.4 計算の概要

基本的には二次元放射線輸送計算プログラムにおける2.4に同じである。新たに発展させた計算理論は高エネルギーガンマ線の物質透過中に発生する制動放射線も輸送計算できるようにした点である。そのために一次ガンマ線の輸送計算終了後媒質中のガンマ線束から電子対生成反応、コンプトン散乱および光電効果により発生する電子の線源を計算できるようにした。この電子線源をもとにして連続減速モデルで電子のエネルギースペクトルを各空間メッシュ点で計算できるよ

3. プログラムの応用

使用済核燃料を収納したキャスクの輸送指数評価、多種、多数のキャスクを積載した船内の線量率空間分布の評価に応用することをねらいとして作成された。

4. あとがき

キャスクの細げき部等からの放射線ストリーミング効果、および底部からの放射線の空間線量率分布への寄与を考慮したプログラムの一部追加が今後に残されている。

うにした。次に求められた電子のエネルギースペクトルにもとづいて制動放射線の線源を計算できるようにした。この制動放射線の線源を再びガンマ線輸送計算ルーチンへ入力して制動放射線の輸送計算ができるようにした。

2.5 計算の手順

入力データをコード使用法にもとづいて作成し、また数多くの外部記憶装置を使用するのでこれをコード使用法にもとづいて準備する。本プログラムはおよそ37個のサブルーチンから出来上っているのでフローチャートは省略する。

2.6 計算機種および制限事項

FACOM M-200用に作られており、コア容量が2048KB確保でランを行う。

3. あとがき

一次ガンマ線原から電子の発生および電子のエネルギースペクトルから制動放射で発生する制動放射線源計算プログラムは日本原子力研究所原子炉工学部遮蔽研究室の田中俊一氏が作成したものである。

参考文献

- 1) K. Takeuchi and S. Tanaka, PALLAS-PL, SP-Br : A Code for Direct Integration of Transport Equation in One-Dimensional Plane and Spherical Geometries, JAERI-M 9695 (1981)

37. 二次元放射線輸送計算プログラム PALLAS-2DCY-FC

東海支所 竹内 清

1. プログラムの目的および概要

定常のボルツマン輸送方程式を二次元 (r, z) 形状に対して数値解法により解き、中性子およびガンマ線の遮蔽計算を行う。放射線の物質中および空気中における挙動を忠実に記述するにはボルツマン輸送方程式を解けばよい。そのために、放射線をエネルギー E 、進行方向 Ω 、空間の位置 (r, z) の変数で表わし、さらに進行方向角度を極角 θ と方位角 ϕ で表わすと放射線の挙動は (r, z, θ, ϕ, E) の関数により記述できる。計算機で解くためには $(r_m, z_m, \theta_m, \phi_m, E_m)$ のようにメッシュ点表示する。数値解法は直接積分法にもとづく。なお、計算精度向上のために線源からの非散乱線は解析解を用いることがオプションによって出来る。この解析解は線源表面から点減衰核積分法にもとづいている。計算結果として、各エネルギー一点で各空間メッシュ点での放射線束が、また各空間メッシュ点で線量率および積分放射線束が求められる。

2. プログラムの内容

2.1 プログラムの名称

二次元放射線輸送計算プログラム PALLAS-2DCY-FC

2.2 製作者

東海支所 竹内 清

2.3 製作年月

昭和54年1月製作, 昭和57年4月改良

2.4 計算の概要

定常のボルツマン輸送方程式

$$\begin{aligned} & \bar{\Omega} \nabla \Phi + \bar{\Sigma}_t(\bar{r}, E) \Phi(\bar{r}, \bar{\Omega}, E) \\ &= \iint dE' d\bar{\Omega}' \Phi(\bar{r}, \bar{\Omega}', E') \bar{\Sigma}_s(\bar{r}, E' \rightarrow E, \bar{\Omega}' \cdot \bar{\Omega}) \\ &+ S(\bar{r}, \bar{\Omega}, E) \end{aligned} \quad (1)$$

を放射線の進行方向にその飛程に沿って積分すると、

$$\begin{aligned} \Phi(\bar{r}, \bar{\Omega}, E) &= \Phi(\bar{r}', \bar{\Omega}, E) \exp(-\bar{\Sigma}_t R) \\ &+ \int_0^R Q(\bar{r}', \bar{\Omega}, E) \exp(-\bar{\Sigma}_t R') dR', \end{aligned} \quad (2)$$

ここで $R = |\bar{r} - \bar{r}'|$, $R' = |\bar{r} - \bar{r}''|$, $\bar{r}'' = R' \bar{\Omega}$,
 $\bar{\Sigma}_t \equiv \bar{\Sigma}_t(\bar{r}', E) = \text{const.}$ であり, Q は

$$\begin{aligned} Q(\bar{r}, \bar{\Omega}, E) &= \\ & \iint \bar{\Sigma}_s(\bar{r}, E' \rightarrow E, \bar{\Omega}' \cdot \bar{\Omega}) \Phi(\bar{r}, \bar{\Omega}', E') d\bar{\Omega}' dE' \\ &+ S(\bar{r}, \bar{\Omega}, E) \end{aligned} \quad (3)$$

である。また, $\bar{\Sigma}_s$ は中性子の散乱の場合, 弾性散乱と非弾性散乱に分けて計算を行い, ガンマ線の場合はクライナー-仁科の式にもとづいて計算を行う。上記の積分は紙数の関係で省き参考文献を参照すると, 数値積分の最終式は

$$\begin{aligned} Q(\bar{r}, \bar{\Omega}_{pq}, E) &= \\ &= W_n w_n \bar{\Sigma}_s(\bar{r}, E_m) f^m(E_m) I(\bar{r}, \bar{\Omega}_{ns}, E_m) \\ &+ S(\bar{r}, \bar{\Omega}_{pq}, E) \end{aligned} \quad (4)$$

のような形に表わせる。ここで, $I(\bar{r}, \bar{\Omega}, E) = E \Phi(\bar{r}, \bar{\Omega}, E)$ である。

(3)式の積分が(4)式のように計算されると, (2)式の空間による積分は $Q(\bar{r})$ が空間メッシュ間で線型関数か指数関数で近似できるような変化をすると仮定すれば次のように計算できる。

$$\begin{aligned} & \int_0^R Q \exp(-\bar{\Sigma}_t R') dR' \\ &= \frac{1}{\bar{\Sigma}_t^2 R} [Q(\bar{\Sigma}_t) \bar{\Sigma}_t R + \exp(-\bar{\Sigma}_t R) - 1] \\ &+ Q(\bar{r}_{i-1}) \{1 - (1 + \bar{\Sigma}_t R) \exp(-\bar{\Sigma}_t R)\} \end{aligned} \quad (5)$$

線型関数近似

$$= \frac{|Q(\bar{r}_{i-1}) \exp(-\bar{\Sigma}_t R) - Q(\bar{r}_i) R|}{\ln \frac{Q(\bar{r}_{i-1})}{Q(\bar{r}_i)} - \bar{\Sigma}_t R} \quad (6)$$

指数関数近似

したがって, 最終式は

$$\begin{aligned} & I(\bar{r}_i, \bar{\Omega}_{pq}, E_j) \\ &= I(\bar{r}_{i-1}, \bar{\Omega}, E_j) \exp\{-\bar{\Sigma}_t(\bar{r}_i, E_j) R_i\} \\ &+ F |Q(\bar{r}_{i-1}), Q(\bar{r}_i), (\bar{r}_i, E_j), R_i| \end{aligned} \quad (7)$$

であり,

$$R_i = |\bar{r}_i - \bar{r}_{i-1}|,$$

$F(\quad) =$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{(5)式, } Q(\bar{r}_i) = 0 \text{ あるいは } Q(\bar{r}_i) \neq 0 \text{ の時} \\ \quad \frac{1}{2} \leq Q(\bar{r}_{i-1}) / Q(\bar{r}_i) \leq 2 \\ \text{(6)式, 上記以外} \end{array} \right.$$

2.5 計算の手順

入力データをコード使用法にもとづいて作り、また数多くの外部記憶装置を使用するのでこれをコード使用法にもとづいて準備する。フローチャートは複雑なので通常はブラック・ボックスにて使用する。

2.6 計算機種および制限事項

FACOM M-200用で作られており、コア容量が2048KB確保でランを行う。

3. あ と が き

非散乱線束の解析計算は原子力船部金井康二主任研究官の作成したものである。本計算コードは現在可変ディメンジョン化作業が終了し、これからチェックランを行うところである。チェックしてエラーがないことを確かめた後に新たにコード使用法を書く予定である。

参 考 文 献

- 1) K. Takeuchi, PALLAS-ZDCY-FC, A Calculational Method and Radiation Transport Code in Two-Dimensional (R, Z) Geometry, Papers ship Research Institute No. 57 (1979)

38. 屈曲ダクト問題に対する2次元PALLASコードによる接続計算用補充プログラム

原子力船部 金 井 康 二

1. プログラムの目的および概要

原子力船などの原子炉では遮蔽体を貫通する多くの貫通孔(ダクト)がある。この貫通孔を通して漏洩する放射線を精度よく評価するのは遮蔽設計上また安全性の面から重要であり、難しい問題の一つである。

この種の問題に対する解析手法としては、複雑形状が取り扱えるモンテカルロ法があり数多くの適用例が報告されている。一方、最近では3次元の矩形あるいは円柱形状が取り扱えるディスクリット・オーディネイト(Discrete Ordinates)輸送計算コードが開発された。Discrete Ordinatesコードでは各メッシュ点での放射線束分布が得られるため、単なる貫通孔のストリーミング評価だけでなく周辺構造物の放射線損傷・放射線発熱あるいは放射化などの安全対策を同時に評価する場合にはモンテカルロ法よりDiscrete Ordinates法の方がより優れていると思われる。

ところでモンテカルロコードやDiscrete Ordinatesコードによってダクト問題を線源を含めた全体系に対して解析することは現代の超大型計算機をもってしても、精度の良い結果を得るには長時間を必要とする。

特にDiscrete Ordinates法では次元数の増加にともなって、計算時間がべき乗の割合で急増するので計算精度を損なわない範囲内で体系のモデル化を行ない分割計算により、本来の複雑形状の問題を2次元以下の取り扱いによって計算時間の短縮をはかることは重要である。本プログラムは3次元複雑形状の屈曲ダクト問題を、1脚ごとの2次元モデルの体系に分割し、各計算を2次元用のDiscrete OrdinatesコードPALLAS-2DCY-FCで行うために必要な接続計算用に準備したものである。

2. プログラムの内容

2.1 プログラムの名称

PALTRAN —— 屈曲ダクト問題に対する2次元PALLASコードによる接続計算補充プログラム

2.2 製作者

原子力船部 金井康二

2.3 製作年月

昭和55年9月

2.4 計算の概要

2脚以上の屈曲ダクト問題を1脚ごとの分割・接続

計算によって解析する際、その解析手法は2脚の屈曲ダクト問題について確立していれば、順次その手法のくり返しによって任意の脚数の屈曲ダクト問題が取り扱える。そこでここでは2脚の屈曲ダクト問題に対する解析手法を論ずる。

図-1のような第1脚目と第2脚目のダクト中心軸が角度 $(0 < \varphi < \pi)$ で屈曲している場合、接続計算の解析手法は以下ようになる。

- (1) 接続面Rと第2脚目のストリーミング効果を考慮して第1脚目の形状モデルを、ダクト中心軸に関して円周方向に対称な (r, z) 形状で作成し、2次元 (r, z) 座標の PALLAS コードにより第1脚目の角度束を計算する。
- (2) 求められた各メッシュ点での角度束のうち、接続面で同心円上に対応する角度束を編集する。
- (3) 編集された角度束を第2脚目の座標系に対応するように角度変換する。この際、3次元直交座標であらわされる任意の点P (x, y, z) の方向ベクトル $\bar{\Omega}$ は図-2のように3次元直交座標系 $(\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z)$ と円柱座標系との関係式として下式が成り立つ。

$$\left. \begin{aligned} \Omega_x &= \sqrt{1-\omega^2} \cos(\phi \pm \varphi) \\ \Omega_y &= \sqrt{1-\omega^2} \sin(\phi \pm \varphi) \\ \Omega_z &= \omega \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(1)$$

$$\left. \begin{aligned} \omega &= \Omega_z \\ \varphi &= \pm(\tan^{-1}(\Omega_y/\Omega_x) - \phi) \end{aligned} \right\} \dots\dots(2)$$

ここで ω は円柱座標系で極角 θ の余弦、また φ は方位角をあらわし2次元 PALLAS コードに角度分点として内蔵されている。

第1脚および第2脚目の直交座標系を、それぞれ (x, y, z) および (ξ, η, ζ) とし z 軸と ζ 軸とのなす屈曲角を φ としたとき角度変換は、

$$\begin{bmatrix} \xi \\ \eta \\ \zeta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & -\sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (3)$$

となる。

- (4) 第1脚目および第2脚目の両座標系に対し、接続面で放射線のカレントが保存されるように第2脚目の座標系に対応した角度束を補正する。
- (5) 求められた接続面での角度束を円板境界線源として2次元 PALLAS コードを利用して第2脚目の計算を行う。

以上のうち(2)から(4)に対応する計算が現在 PAL-TRAN と名づけコード化されているものである。

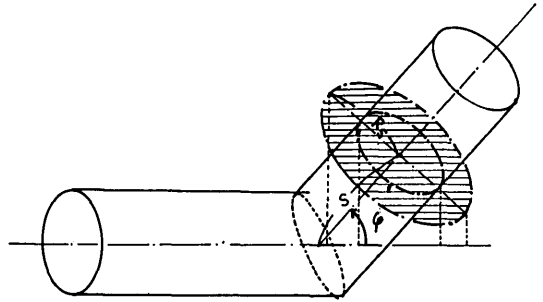


図-1 屈曲角 φ の円柱ダクト

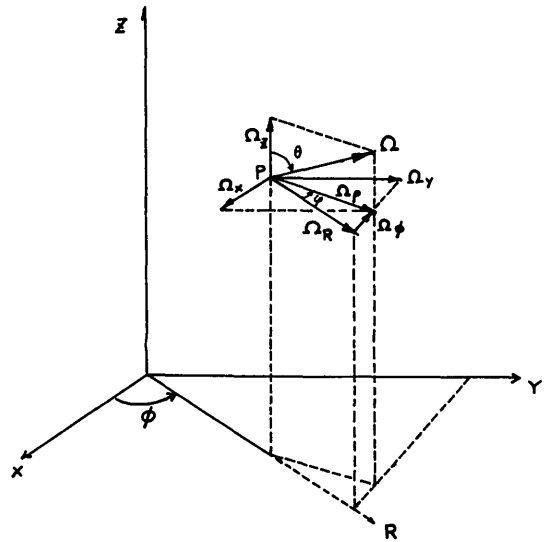


図-2 直交座標と円筒座標であらわした方向ベクトル Ω の要素

2.5 計算の手順

計算の手順は図-3のフローチャートに示す通りである。

2.6 計算機種および制限事項

このプログラムは当所中央電子計算機 FACOM M-180 II AD 用に製作したものである。実計算をする場合、本プログラムと2次元 PALLAS コード (PALLAS-2DCY-FC) が必要であり、PALLAS 計算を含めて本プログラムの使用メモリー数は約 2,048K バイトである。

3. プログラムの応用

本プログラムは2次元 (R, Z) 用 PALLAS コードを対象に作成されているが、他の Discrete Ordinates Sn コード (例えば DOT 3.5) などが取り扱えるように手直しすることは容易である。また将来への応用として円柱座標 ↔ 矩形座標の相互変換による接続計算が考えられる。

4. あとがき

本接続計算手法の精度を評価するため、B. Chinaglia らによって ETNA で行われた2回屈曲円筒ダクトストリーミング実験の解析をこころみたところ、精度は体系モデルと接続面の位置に依存するものの、実測値の再現性は良好であった。今後屈曲ダクトのストリーミング問題の解析を数多くこなすことによって精度を検討すると共にこの種の問題に対しての遮蔽解析手法を確立したいと思っている。

参考文献

- 1) 金井ら, 屈曲ダクト問題の2次元 PALLAS コードによる接続計算法, 第37回船研研究発表会講演集, (1981)
- 2) 金井・竹内, 2次元 PALLAS コードを利用した屈曲ダクト問題の接続計算法, 原子力学会年会, D 52 (1981)
- 3) K. Takeuchi, PALLAS-2DCY-FC A Computational Method and Radiation Transport Code in Two-Dimensional (R, Z) Geometry, Paper Ship Res. Inst. N 67 (1979)

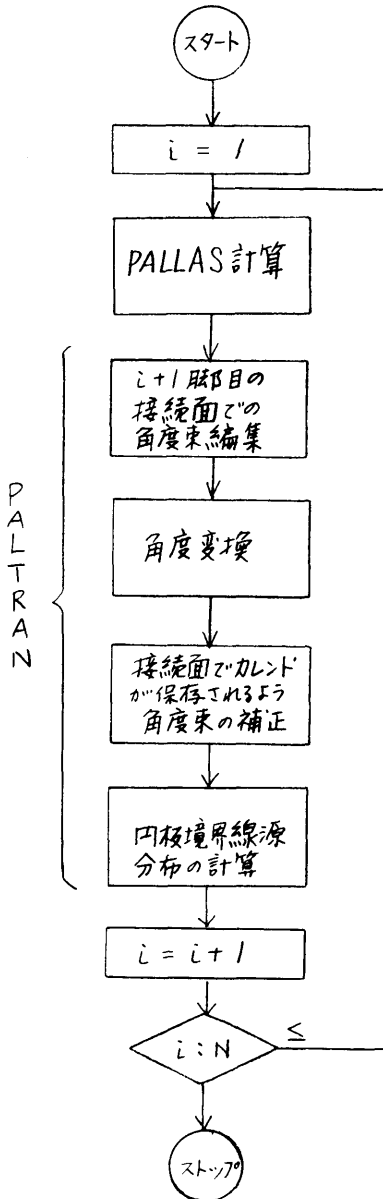


図-3 フローチャート