

# 1. 扁平没水体の設計用計算プログラム

推進性能部 田 中 拓

## 1. プログラムの目的および概要

高速の海上輸送を目的とした新形式船舶研究の一部として、半潜水船の推進性能の研究がすすめられている。このプログラムは、半潜水船の主船体として想定した扁平没水体の船型（流線）を流線追跡の手法によって求め、Lines および off-set になおして排水量等の計算をおこない、諸力計算の入力データを作るもので、流線追跡の条件としては、水面を固定壁近似、非揚力体としており、今後自由表面をもつものに拡張するよう計画されている。本プログラムは半潜水船主船体設計に関連した具体的な目的をもって作成したものであるが、水面を含む扁平没水体の性質を知る上には一般的なプログラムとして使用できる。

プログラムは次の4つの要素で構成されている（図-1 参照）

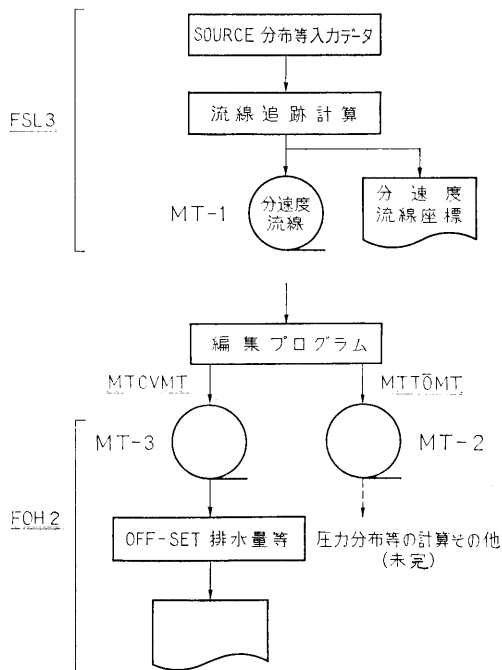


図-1 プログラムの構成

### (1) プログラム名, FSL3

与えられた Source 分布と没水深度による流線を求めて、X, Y, Z 方向の各速度成分を計算し、流線の座標を計算する。計算結果は、次の計算入力となるよう磁気テープ (MT-1) に記録されるほか、作表することもできる。

### (2) プログラム名, MTCVMT

排水量等計算のプログラム FOH2 の入力磁気テープ (MT-3) を MT-1 から編集するプログラム。

### (3) プログラム名, FOH2

MT-3 を入力データとして、FSL3 で得られた流線から20本を指定して（計算機の容量による）、off-set および排水量等を計算する。

### (4) プログラム名, MTTOMT

MT-1 では各流線ごとに流線の起点から Runge-Kutta の分割点における速度成分、座標点が記録されている。諸力等の計算では各 section ごとにまとまっている方が扱いやすいので、MT-1 を編集して MT-2 とし、以後の科学計算の入力とする。

## 2. プログラムの内容

### 2.1 製作者等

昭和48年3月

推進性能部 田中 拓

日本ビジネスオートメーション 白木 孝宏 他

### 2.2 計算の基礎となる理論の概要

本プログラムで使用している座標軸および扁平没水体の幾何学的な関連を 図-2 に示す。

船体は前後および左右に対称と考え、source 分布面を水面と幅方向が平行で長さ方向に二次の camber をもった矩形板（長さ ±1, 幅 ±b）とする。

$$m(x', y', z') = \sum_{j=0}^3 \sum_{i=1}^3 a_{ij} x^i y^j \dots \dots (1)$$

$$|x'| \leq 1, |y'| \leq b, z' = z'_0 - c(1 - x'^2)$$

このような source 分布を、速度  $U = -1$  の一様流中においた時に生ずる流線は、適当な流線の出発点を与

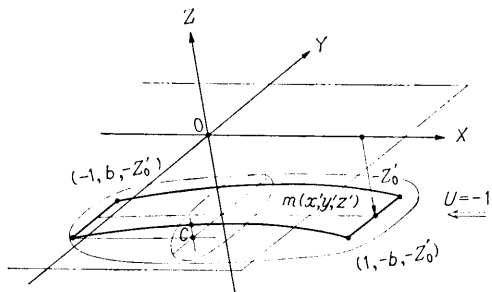


図-2 扁平没水体と座標

えて、Runge-Kutta 法を用いて次の流線方程式を解けばよい。

$$\frac{dx}{-1+u} = \frac{dy}{v} = \frac{dz}{w} \quad \dots\dots (2)$$

ただし、水面を固定壁近似とすれば、分速度は次式で示される。

$$u = \frac{1}{4\pi} \int_{-1}^1 \int_0^b m(x', y', z') (x-x') \sum_{n=1}^4 \frac{1}{r_n^3} dy' dx'$$

$$v = \frac{1}{4\pi} \int_{-1}^1 \int_0^b m(x', y', z') \left[ (y-y') \left( \frac{1}{r_1^3} + \frac{1}{r_3^3} \right) + (y+y') \left( \frac{1}{r_2^3} + \frac{1}{r_4^3} \right) \right] dy' dx'$$

$$w = \frac{1}{4\pi} \int_{-1}^1 \int_0^b m(x', y', z') \left[ (z-z') \left( \frac{1}{r_1^3} + \frac{1}{r_3^3} \right) + (z+z') \left( \frac{1}{r_2^3} + \frac{1}{r_4^3} \right) \right] dy' dx'$$

$$r_1^2 = (x-x')^2 + \left\{ \frac{(y-y')^2}{(y+y')^2} \right\} + (z-z')^2$$

$$r_2^2 = (x-x')^2 + \left\{ \frac{(y-y')^2}{(y+y')^2} \right\} + (z+z')^2 \dots (3)$$

ただし、 $z' = z_0 - c(1-x'^2)$

(3)式の計算は、 $y'$  の積分だけ解析的に行ない、 $x'$  の積分は Simpson の数値積分によった。

流線の出発点  $p_n(x_0, y_0, z_0)$  は、没水深度が充分に大きい場合は非揚力体であるから、 $z_0 = z'_0$  として、 $|y_0| \leq b$  で適当な  $x_0$  から出発すればよい。水面に近づくと流線は対称でなくなるので、stagnation point の近傍を通る上下一対の流線を探す必要がある。このため任意の  $p_n(x_0, y_0, z_0)$  を与え、 $p_n(x_0, y_0, z_0 - \epsilon)$  の流線と  $x=1.0$  における  $w$  の符号を比較して、異符号なら目的とする流線と考えている。 $\epsilon$  としては、小さくとり過ぎると船体の外形の精度は上がるが、時間がかかるので常用  $\epsilon = 0.0025$  としている(全長=2.0)。

分速度 ( $u, v, w$ ) および流線の座標  $p_n(x, y, z)$  が計算されると、MT-1 と LP に記録される。流線の

( 2 )

計算は、前後対称の場合は midship までで充分であるが、将来自由表面条件のもとで計算することを予想して船尾までの計算が選択できるようになっている。計算分割点は常用のものを midship までで 45 点としている。

FOH2 における計算内容は次のとおりである。

- (1) 流線テーブルから off-set を求め作表する。
- (2)  $L, B, D$  を求める。
- (3) 各 station (10点) の sectional area を求め、

MT-1

第1レコード

第2レコード

XMONA	ILINE	IHH	IALL	NREC	II	NI	NE	LMAX	y(1,1)
-------	-------	-----	------	------	----	----	----	------	--------

Z(1,1)	U(1,1)	V(1,1)	W(1,1)	y(2,1)	Z(2,1)	U(2,1)	W(1,1)	y(1,2)
--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

Z(1,2)	U(1,2)	V(1,2)	W(1,2)	U(1, LMAX)	W(1, LMAX)
--------	--------	--------	--------	------------	------------

MT-2

第1レコード

第2レコード

XMONA	ILINE	IHH	IALL	y(1,1)	Z(1,1)	U(1,1)	V(1,1)	W(1,1)	y(1,2)
-------	-------	-----	------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

Z(1,2)	U(1,2)	V(1,2)	W(1,2)	y(1,3)	Z(1,3)	V(1, ILINE)	W(1, ILINE)
--------	--------	--------	--------	--------	--------	-------------	-------------

第3レコード

y(2,1)	以下 第2レコードと同じ	W(1, ILINE)
--------	--------------	-------------

MT-3

第1レコード

第2レコード

XMONA	ILINE	IHH	IALL	y(1,1)	Z(1,1)	y(1,2)	Z(1,2)	y(1,3)	Z(1,3)
-------	-------	-----	------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

第3レコード

y(IHH,1)	Z(IHH,2)	y(IHH,N)	Z(IHH,N)	y(1,NN)	Z(1,NN)
----------	----------	----------	----------	---------	---------

以下 第2レコードと同じ	y(IHH, ILINE)	Z(IHH, ILINE)
--------------	---------------	---------------

- XMONA ; モデル名 (A8)
- ILINE ; 流線本数 (I5)
- IHH ; midship までの計算分割点数 (I5)  
(プログラム内蔵のもの45点)
- IALL ; 流線末端までの計算分割点数 (I5)  
(プログラム内蔵のもの99点)
- NREC ; 第2レコード以下のレコード数 (I5)
- II ; MT に書込まれた計算分割点数 (I5)
- NI ; 各レコードにおける最初の流線番号 (I5)
- NE ; 各レコードにおける最後の流線番号 (I5)
- LMAX ; LMAX=NE-NI+1
- N, NN ;  $N = \frac{1}{2}(ILINE)$ ,  $NN = N+1$

$y(i, j)$  ; 流線座標,  $i$  は計算分割点 (Runge-Kutta 法),  $j$  は流線番号 (E15.8)

$z(i, j)$  ; Kutta 法,  $j$  は流線番号 (E15.8)

$u(i, j), v(i, j), w(i, j)$ ; 分速度 (E15.8)

図-3 MT format

排水容積を算出する。

- (4) 各 station (10点) の girth length を求め、浸水表面積を算出する。
- (5)  $C_B$ ,  $C_M$ ,  $C_P$  を計算する。

流線を計算する本数は任意であるが、FOH2 の計算には計算機容量の都合で流線20本以下に限定されている。この調整は、MT-3 の作成の際に MTCVMT で行なわれる。

磁気テープの format を 図-3 に示す。

- 2.3 プログラム用語および計算機種  
 計算機種 TOSBAC 3400-30 (16 kW)  
 オペレーションシステム TOPS 11 version 3,  
 用語 FORTRAN

### 3. プログラムの検定

#### 3.1 計算精度および誤差

解析的な計算結果との比較を行っていないので完全な計算精度の検定は現状では不明である。しかし、

- (1) 船首側から船尾端に至る流線の追跡を行ない、前後対称性から Runge-Kutta 数値計算法の累積する誤差を調べたところ、流線の座標点は5桁以上、分速度に関しては6桁前後の精度がある。
- (2) 前項で述べた、stagnation point を探す精度上の制限は、船体の外形に対しほぼ一様な誤差

を与える。時間を掛けることにより制度の向上は期待できるが、長さ2mの外形に対し通常の方法では1mm以下の精度をだすことは難しい。

- (3) 従来の同種のプログラムによる計算結果との比較では、実用上問題を生じていない。

#### 3.2 計算所要時間

流線20本で船首から midship までの流線追跡では、約3時間の計算時間を要す。FOH2 および磁気テープ編集プログラムは、オペレートが主要な時間となる。

### 4. プログラムの使用法について

本プログラムは、流線追跡法を主とした扁平没水体の設計システムの基礎をなすもので、扁平没水体に加わる諸力、圧力分布の計算、水面を自由表面条件とした場合等への応用が可能ようになっており、一部を計画している。

### 5. あとがき

本プログラムは、原子力試験研究費、「半潜水船の推進性能の研究 01-4511」の一部として実施されたものである。

また流線が20本まででよい場合は、中間に MT を介さず、FSL3 と FOH2 を一貫させたプログラムも用意されている。

## 2. 変分法による造波抵抗極小の特異点分布の計算プログラム

推進性能部 山口 真 裕

### 1. プログラムの目的および概要

本プログラムは「特異点分布による造波抵抗係数の中間積分表の計算プログラム」によって出力された造波抵抗係数  $C_W$  の中間積分表を使用して、ある条件の下で造波抵抗が極小となるような特異点分布を求めるプログラムの一つであり、船型を平底とするように加えられる Bottom Doublet を付加条件として与えたときの、最適の Side Source を求めるものである。

### 2. プログラムの内容

#### 2.1 プログラムの番号および名称

Calculation of Optimum Source Distribution  
 By Variational Method (Bottom Doublet)

2.2 製 作 者  
 推進性能部 山口 真 裕

2.3 製 作 年 月  
 昭和47年7月

#### 2.4 計算の基礎となる理論の概要

一様流れ  $V$  中の特異点分布による  $C_W$  の中間積分表  $I_{ij}$  が用意されていれば、ある特異点分布——Side Source  $m(\xi)$  と Bottom Doublet  $b(\xi)$  が、

$$m(\xi) = \sum_{i=0}^N a_i \xi^i; \text{ S.S.}, \quad b(\xi) = \sum_{i=0}^M b_i \xi^i; \text{ B.D.}$$

で与えられたとき、 $C_W$  は

$$C_W = \sum_i \sum_j a_i a_j I_{S_i S_j} + 2 \sum_i \sum_j a_i b_j I_{S_i B_j} + \sum_i \sum_j b_i b_j I_{B_i B_j}$$

ここに  $I_{S_i S_j}$ : S.S. と S.S. の  $I_{ij}$   
 $I_{B_i B_j}$ : B.D. と B.D. の  $I_{ij}$   
 $I_{S_i B_j}$ : S.S. と B.D. の  $I_{ij}$

と表わすことができ、 $C_W$  は容易に計算することができる。

そこで、船型の排水容積  $\nabla$  や中央横切面積  $A_M$  などの幾何的条件に相当するものが、Side Source の分布に与えられ、しかも、船型を平底にする Bottom Doublet の分布  $b(\xi)$  が与えられているとき、極小抵抗を与える Side Source 分布は、

$$\frac{\partial F}{\partial a_i} = 0 \quad (i=1, 2, \dots, m)$$

$$\frac{\partial F}{\partial \lambda_k} = 0 \quad (k=1, 2, \dots, l)$$

ここに  $F = C_W + \sum_k \lambda_k g_k$

$$g_k = \sum_i a_i K_{ik} - h_k = 0 \quad (k=1, \dots, l)$$

として得られる連立方程式を解くことによって求められる。

すなわち

$$[A] \cdot X = B$$

ここに

$$[A] = \begin{pmatrix} 2I_{S_1 S_1} & 2I_{S_1 S_2} \cdots K_{11} & K_{12} \cdots \\ 2I_{S_2 S_1} & 2I_{S_2 S_2} \cdots K_{21} & K_{22} \cdots \\ \vdots & \vdots & \dots \dots \dots \\ K_{11} & K_{21} \cdots & 0 \cdots \\ K_{12} & K_{22} \cdots & 0 \cdots \\ \vdots & \vdots & \dots \dots \dots \end{pmatrix}$$

$$X = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} -2 \sum b_j I_{S_1 B_j} \\ -2 \sum b_j I_{S_2 B_j} \\ \vdots \\ h_1 \\ h_2 \\ \vdots \end{pmatrix}$$

$$\therefore X = [A^{-1}] \cdot B = [A^{-1}] \cdot B_1 + [A^{-1}] \cdot B_2$$

ここに

$$B_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ h_1 \\ h_2 \\ \vdots \end{pmatrix}, \quad B_2 = \begin{pmatrix} -2 \sum b_j I_{S_1 B_j} \\ -2 \sum b_j I_{S_2 B_j} \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \end{pmatrix}$$

( 4 )

$[A^{-1}]$ :  $[A]$  の逆行列

よって、極小造波抵抗を与える Side Source 分布は、付帯条件の Bottom Doublet の係数  $b_j$  と束縛条件の  $h_k$  の一次式で表わされ、したがって、造波抵抗はそれらの二次形式で表現される。

2.5 計算の手順

計算の手順は、図-1 フローチャートに示すとおりである。

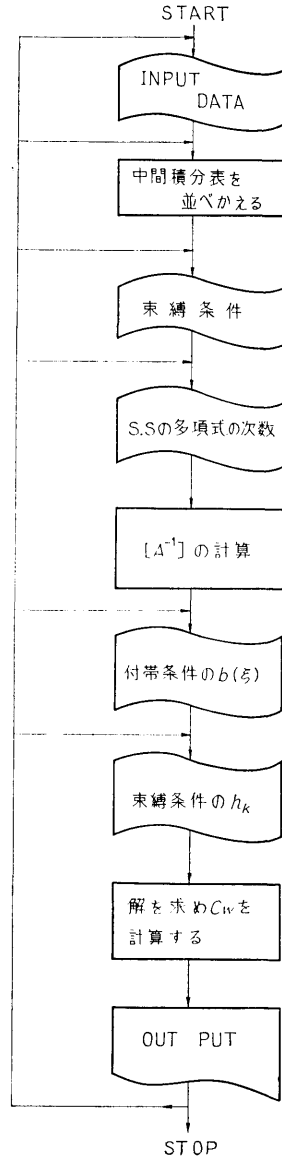


図-1 フローチャート

2.6 プログラム用語および計算機種  
 プログラム用語は FORTRAN IV で、利用機種は、  
 FACOM 270-20 である。

### 2.7 入 力

MAXXF, YYF(I) ……Side Source の分布面  $\eta_S$  の  
 $\xi$  の最高次数およびその係  
 数

TF ……S.S. の分布深さ

XFLL, YFLL ……S.S. の分布面  $\eta_S$  の平行部  
 の端部座標 ( $\xi_0, \eta_0$ )

MAXSXF, MXSZFW ……S.S. の分布  $m(\xi, \zeta)$  の  $\xi$ ,  
 $\zeta$  の最高次数

FSLs ……S.S. の分布の肩部の  $\xi$  座標

MXBDF, YBF(I) ……Bottom Doublet の分布面  
 $\eta_B$  の  $\xi$  の最高次数および  
 その係数

TBF ……B.D. の分布深さ

MAXBXF, MXBYFW B.D. の分布  $b(\xi, \eta)$  の  $\xi$ ,  
 $\eta$  の最高次数

FBS 1, FBS 2 ……B.D. の  $\xi$  の分布範囲

KIND …… $C_W$  の計算方法

=1: 前後対称

=1: 船体前半部のみ

FK …… $K_0 L (=1/F_n^2)$

DE 1, DE 2 …… $C_W$  の中間積分表計算の  $\theta$   
 の領域

TAB(K, K1) …… $C_W$  の中間積分表

AM, BM ……S.S. および B.D. の  $\mu$  修  
 正の値  $\mu_S, \mu_B$

NW 1, NW 2 ……束縛条件の中の水線面およ  
 び排水容積関係の条件

NW 2, NW 4 ……束縛条件の NW 1, NW 2  
 のそれぞれ拡張した条件

AV 1(I), AV 2(I), AV 3(I)

束縛条件 NW 1, NW 2 の  
 $\xi, \zeta$  の次数

AV 4(I), AV 5(I), AV 6(I)

束縛条件 NW 3, NW 4 の

$\xi, \zeta$  の次数

NZW, NX(I), NZ(I) ……求める S.S. の項数と  $\xi, \zeta$   
 の次数

MBXF, MBYW ……付帯条件として与える  
 B.D. の  $\xi, \eta$  の最高次数

FBD(J, I) ……その与える B.D. の係数  $b_i$

D(I) ……束縛条件の値  $h_k$

IGO ……再計算か否か

### 2.8 出 力

入力データと

FRN ……フルード数  $F_n$

T(I, J) ……[A] の係数

D(I) …… $B$  の係数

E(I) …… $X$  の係数

G(I), B(I) …… $\xi$  の座標およびそこでの  
 S.S. の分布  $m(\xi, \zeta)$

CW ……全体の  $C_W$

CWSS, CWSB, CWBB S.S. のみ, S.S. と B.D.,  
 および, B.D. のみの  $C_W$

## 3. プログラムの検定

### 3.1 計算精度および誤差

連立方程式を解くときに倍長計算として計算を行な  
 っているが、 $C_W$  の中間積分表にそれほどの精度がな  
 いので、4~5桁の精度と考えられる。

### 3.2 計算所要時間

10ケースで約5分。

## 4. プログラムの使用法について

### 4.1 オペレート

実行は BATCH 処理による。

### 4.2 プログラムの応用

付帯条件として与える Bottom Doublet の代わり  
 に、バルブを表わす Vertical Line Singularity を入れ  
 て計算することもできる。

### 4.3 他機種への移行

FACOM 270-20 より大型のものであれば、移行可  
 能である。

### 3. 特異点分布による造波抵抗係数の 中間積分表の計算プログラム

推進性能部 山口真裕

#### 1. プログラムの目的および概要

船型を特異点の多項式で表示できるものとして、その特異点多項式の各項による造波抵抗係数  $C_W$  の中間積分表を作成することを目的とする。このプログラムでは前後対称の船型を想定した  $C_W$  計算である。(すなわち、船体中央を原点としたときの Sine 波成分のみを計算する。)この計算結果を使用して、ある与えられた特異点分布に対応する  $C_W$  計算ももちろん可能であるが、「変分法による造波抵抗極小の特異点分布の計算プログラム」の入力データとして使用される。

#### 2. プログラムの内容

##### 2.1 プログラムの番号および名称

Calculation of  $C_W$  Integral Table

##### 2.2 製作者

推進性能部 山口真裕

##### 2.3 製作年月

昭和47年9月

##### 2.4 計算の基礎となる理論の概要

一様流れ  $V$  中におかれた点吹き出し  $m(x_0, y_0, z_0)$  による自由波  $\zeta_f$  は Havelock によれば次式で与えられる。

$$\zeta_f = \frac{mK_0}{\pi V} \int_{-\pi/2}^{\theta-\pi/2} \sec^3\theta \exp(K_0 \sec^2\theta z_0) \times \cos(K_0 \sec^2\theta p) d\theta$$

ここに  $p = (x - x_0) \cos\theta + (y - y_0) \sin\theta$

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \left( \frac{x - x_0}{y - y_0} \right)$$

$$K_0 = g/V^2, \quad z_0 = lz_0$$

$$y - y_0 > 0, \quad l; \text{ 半船長}$$

$$\begin{aligned} \therefore \frac{\zeta_f}{2l} &= \frac{m}{Vl^2} \frac{K_0 l}{2\pi} \int_{-\pi/2}^{\theta-\pi/2} \sec^3\theta \exp(K_0 l \sec^2\theta \zeta_0) \\ &\quad \times \cos(K_0 l \sec^2\theta \omega') d\theta \\ &= \frac{m}{Vl^2} \frac{K_0 l}{2\pi} \int_{-\pi/2}^{\theta-\pi/2} \sec^3\theta \exp(K_0 l \sec^2\theta \zeta_0) \\ &\quad \times \cos(K_0 l \sec^2\theta \omega_0) \cos(K_0 l \sec^2\theta \omega) d\theta \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &+ \frac{m}{Vl^2} \frac{K_0 l}{2\pi} \int_{-\pi/2}^{\theta-\pi/2} \sec^3\theta \exp(K_0 l \sec^2\theta \zeta_0) \\ &\quad \times \sin(K_0 l \sec^2\theta \omega_0) \sin(K_0 l \sec^2\theta \omega) d\theta \end{aligned}$$

ここに  $\omega' = (\xi - \xi_0) \cos\theta + (\eta - \eta_0) \sin\theta$

$$\omega = \xi \cos\theta + \eta \sin\theta$$

$$\omega_0 = \xi_0 \cos\theta + \eta_0 \sin\theta$$

前後対称な船型となるには、 $(-x_0, y_0, z_0)$  に  $-m$  の吸いこみが必要となり、それを加えると、結局、自由波は

$$\begin{aligned} \frac{\zeta_f}{L} &\approx \frac{m}{Vl^2} \frac{K_0 l}{2\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \sec^3\theta \exp(K_0 l \sec^2\theta \zeta_0) \\ &\quad \times 2 \sin(K_0 l \sec^2\theta \xi_0) \sin(K_0 l \sec^2\theta \omega) d\theta \end{aligned}$$

ただし  $y_0 = \eta_0 = 0, L = 2l$

となる。

吹出しが線上あるいは面上に分布しているときは、それぞれその積分を行なえばよい。

さて、後続自由波  $\zeta_f/L$  が

$$\begin{aligned} \frac{\zeta_f}{L} &\approx \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \{S(\theta) \sin(K_0 l \sec^2\theta \omega) \\ &\quad + C(\theta) \cos(K_0 l \sec^2\theta \omega)\} d\theta \end{aligned}$$

と表わされるとき、造波抵抗係数  $C_W$  は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} C_W &= \frac{R_W}{\frac{1}{2}\rho V^2 L^2} \\ &= 2\pi \int_0^{\pi/2} [\{S(\theta)\}^2 + \{C(\theta)\}^2] \cos^3\theta d\theta \\ &= \int_0^{\pi/2} [\{\sqrt{2\pi} S^*(\theta)\}^2 + \{\sqrt{2\pi} C^*(\theta)\}^2] d\theta \end{aligned}$$

ただし、 $S^*(\theta) = S(\theta) \cos^{3/2}\theta$

$$C^*(\theta) = C(\theta) \cos^{3/2}\theta$$

よって、 $\sqrt{2\pi} S^*(\theta)$  あるいは  $\sqrt{2\pi} C^*(\theta)$  を計算すれば  $C_W$  が求まる。

本プログラムでは特異点の多項式の各項による  $\sqrt{2\pi} S^*(\theta)$  を計算し、 $C_W$  の中間積分表を作成している。

##### 2.5 計算の手順

計算の手順は、図-1 フローチャートに示すとおり

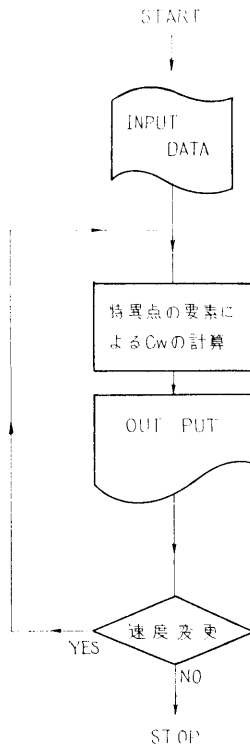


図-1 フローチャート

である。

2.6 プログラム用語および計算機種  
 プログラム用語は FORTRAN IV で、利用機種は、  
 FACOM 270-20 である。

2.7 入 力  
 必要な入力データは次のとおりである。整数は 16、  
 実数 F12.0 とする。

- NGA, CGA(I), TGA(I) 数値積分の個数およびその座標・重率
- KLMAX, FKL(I)..... $K_0L(=1/F_n^2)$  の個数およびその値
- IDEG, DEG(I) .....角度  $\theta$  の個数およびその角度 ( $0^\circ \sim 90^\circ$ )
- MAXXF, YYF(I).....Side Source の分布面  $\eta_S$  の  $\xi$  の最高次数およびその係数
- TF .....S.S. の分布深さ
- XFLL, YFLL .....S.S. の分布面  $\eta_S$  の平行部の端部座標 ( $\xi_0, \eta_0$ )
- MAXSXF, MAXSZF ...S.S. の分布  $m(\xi, \zeta)$  の  $\xi, \zeta$  の最高次数

- FSLs .....S.S. の分布の肩部の  $\xi$  座標
  - IBD, IP, IVLS, IVLD } Bottom Doublet, Point
  - IHLS, IHLD } Singularity, Vertical Line
  - Source & Doublet および Horizontal Line Source & Doublet の有無  
 ( $\leq 0$ : なし,  $=1$ : あり)
  - MXBDXF, YBF(I) .....B.D. の分布面  $\eta_B$  の  $\xi$  の最高次数およびその係数
  - TBF .....B.D. の分布深さ
  - MAXBXF, MAXBYF...B.D. の分布  $b(\xi, \eta)$  の  $\xi, \eta$  の最高次数
  - FBS1, FBS2 .....B.D. の  $\xi$  の分布範囲
  - XPSF, ZPSF } .....P.S. と P.D. の分布座標
  - XPDF, ZPDF } ( $\xi, \zeta$ )
  - MZVLSF, MZVLDF ...V.L.S. と V.L.D. の分布の  $\zeta$  の最高次数
  - XVLSF, ZVLSF1, ZVLSF2  
 V.L.S. の分布座標
  - XVLDF, ZVLDF1, ZVLDF2  
 V.L.D. の分布座標
  - MXHLSF, MXHLDF...H.L.S. と H.L.D. の分布の  $\xi$  の最高次数
  - XHLSF1, XHLSF2, ZHLSF  
 H.L.S. の分布座標
  - XHLDF1, XHLDF2, ZHLDF  
 H.L.D. の分布座標
  - IS1, IS2 .....計算を始める Singularity の種類  
 $=1$ ; S.S.  $=2$ ; B.D.  
 $=3$ ; P.S. と P.D.  
 $=4$ ; V.L.S.  $=5$ ; V.L.D.  
 $=6$ ; H.L.S.  $=7$ ; H.L.D.
  - J1 .....S.S. あるいは B.D. から計算を始めるときの、 $\zeta$  あるいは  $\eta$  の最初の次数
  - I1 .....計算を始める Singularity の最初の  $\xi$  または  $\eta$  の次数。ただし、P.S. は  $=1$  で、P.D. は  $=2$
- 2.7 出 力  
 入力データのすべてと、  
 R(J, I)..... $C_w$  の中間積分表

### 3. プログラムの検定

#### 3.1 計算精度および誤差

計算精度は入力データによって多少変化するが、通常、有効数字で5桁あることを検討してある。

#### 3.2 計算所要時間

Singularity の種類を増すと時間がかかるのは当然であるが、多項式の項数10でおよそ2時間かかる。

### 4. プログラムの使用法について

#### 4.1 オペレート

実行は BATCH 処理による。

#### 4.2 プログラムの応用

SUBROUTINE のプログラムを利用して、与えられた特異点分布による後続自由波の振幅関数および造波抵抗係数  $C_w$  を求めることができる。

#### 4.3 他機種への移行

FACOM 270-20 よりも大型のものであれば、移行可能である。

## 4. 揚力線理論を応用したプロペラ揚力面の逐次近似計算プログラム

推進性能部 小山 鴻 一

### 1. プログラムの目的および概要

与えられた形状のプロペラが与えられた前進係数で作動する時の流体力学的性能を調べるには、プロペラ揚力面の積分方程式を解かねばならないが、そのためには莫大な計算量を必要とする。一方、この問題を揚力線理論によって解くならば少ない計算量で済むが、船用プロペラの場合この理論では精度の高い解が得られない。本プログラムの計算法は、揚力線を解く過程において揚力面補正を施すことによりこの問題を解く。計算の過程は逐次近似計算となり、それを続ければ揚力面理論による解に近づかずである。展開面積比の大きなプロペラの場合には解が収束しないが、その場合でも第1近似値に対してかなり良好な値が得られる。

### 2. プログラムの内容

#### 2.1 プログラムの番号および名称

45-049

An asymptotic approximation of propeller lifting surface by the lifting line theory

#### 2.2 製作者

推進性能部 小山 鴻 一

#### 2.3 製作年月

昭和47年4月

#### 2.4 計算の基礎となる理論の概要

( 8 )

プロペラ揚力面の積分方程式を変形すると

$$\bar{\alpha}_g = \frac{1}{2\pi} \int_{-1}^1 \frac{\gamma/W^*}{\xi - \xi'} d\xi' + \alpha_i + \chi \quad \dots\dots(1)$$

となる。ただし、 $\bar{\alpha}_g$  は翼面の局所的迎角、 $\gamma$  は循環分布密度、 $W^*$  は翼素への流入速度、 $\xi$  は半翼弦長を単位とする翼弦方向の座標、 $\alpha_i$  は揚力線による誘導迎角、 $\chi$  は揚力面補正項である。この式を  $\gamma/W^*$  について解くと、

$$\frac{\gamma}{W^*} = -\frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{1-\xi}{1+\xi}} \int_{-1}^1 \sqrt{\frac{1+\xi'}{1-\xi'}} \frac{\bar{\alpha}_g - \chi}{\xi - \xi'} d\xi' - 2\alpha_i \sqrt{\frac{1-\xi}{1+\xi}} \quad \dots\dots(2)$$

これを翼弦全体に積分すると

$$\frac{\Gamma}{2\pi c^* W^*} + \frac{2}{h} \int_{\mu_b}^{\mu_0} \frac{\Gamma}{W^*} \frac{1}{\sqrt{1+\mu^2}} K(0; \mu, \mu') d\mu' = \frac{1}{\pi} \int_{-1}^1 \sqrt{\frac{1+\xi}{1-\xi}} (\bar{\alpha}_g - \chi) d\xi \quad \dots\dots(3)$$

となる。ただし、 $c^*$  は半翼弦長、 $h$  は hydrodynamic pitch  $\mu$  は半径方向の座標  $\gamma/h$  であり、また、

$$\Gamma = \int_{-1}^1 \gamma c^* d\xi \quad \dots\dots(4)$$

$$\alpha_i = \frac{2}{h} \int_{\mu_b}^{\mu_0} \frac{\Gamma}{W^*} \frac{1}{\sqrt{1+\mu^2}} K(0; \mu, \mu') d\mu' \quad (5)$$

を用いた。 $K(0; \mu, \mu')$  は揚力面積分方程式の核関数である。(3)式で  $\chi=0$  とおくとよく知られた揚力線の積分方程式となる。そこで  $\chi$  は  $\bar{\alpha}_g$  に対する補正として次の様に逐次近似計算をする。初め  $\chi=0$  として



(3)式を解くと  $\Gamma$  が得られる。それを用いると (5)式から  $\alpha_i$  が得られ、従って(2)式から  $\gamma$  が得られる。この  $\gamma$  を用いて  $\chi$  を計算すると高次近似の  $\chi$  が得られるので、前と同様にして高次近似の  $\Gamma$ ,  $\alpha_i$ ,  $\gamma$  が計算される。 $\chi$  は揚力面の積分を必要とするので最も手間のかかる計算である。また、上述の逐次近似計算と同時に hydrodynamic pitch の逐次近似計算をする。

## 2.5 計算の手順

計算の手順は、図-1 フローチャートに示すとおりである。

## 2.6 プログラム用語および計算機種

FORTRAN, FACOM 270-20

## 2.7 入力

必要な入力データは次のとおりである。

IP	(I 2)	半径方向の標点数 ( $\leq 7$ )
JJB	(I 2)	Birnbaum 級数の項数 ( $\leq 4$ )
RO	(F 7.4)	プロペラの半径
RB	(F 7.4)	ボスの半径
BM(M)	(F 9.5)	M番目の翼素のハーフコード
BC(M)	(F 9.5)	M番目の翼素のミッドコード
ZF(M, J)	(F 9.5)	M番目の翼素の平均矢高曲線を4次式で表わした時の係数値
RH	(F 7.4)	ピッチ比
RJ	(F 7.4)	前進係数
LL	(I 2)	翼数
AKAP 1	(F 7.4)	揚力係数勾配の修正係数
AKAP 2	(F 7.4)	" (Prandtl 法の時は1とする)

## 2.8 出力

揚力面補正を施された平均矢高曲線およびその係数、全循環、循環分布密度、Birnbaum 級数の係数、hydrodynamic pitch 等の値を各翼素ごとに出力する。

## 3. プログラムの検定

### 3.1 計算精度および誤差

一般の演算は約7桁、連立方程式を解くときだけ倍長精度とした。逐次近似計算の性質上、収束性の良悪によって第1近似値の精度は多少異なるが、翼素の全循環の値の場合、直接揚力面積分方程式を解いた値に比べて翼根部で10%、他で3%程度の誤差となる。

### 3.2 計算所要時間

標点数を IP=7, JJB=4 として、第1近似の解を得るまで約10分である。

### 3.3 適用範囲、制限事項

展開面積比の小さな(30%以下)プロペラ以外に対しては第1近似より高次近似の計算をしても意味がない。

## 4. プログラムの使用方法について

### 4.1 オペレート

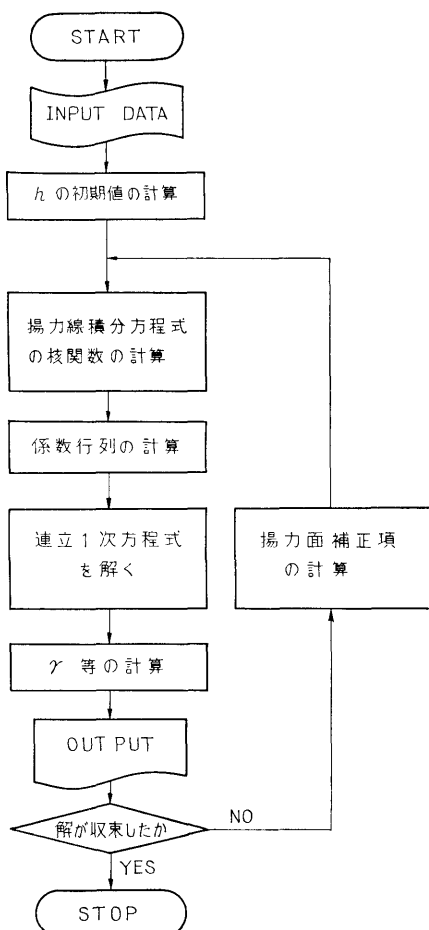
実行は BATCH 処理による。

### 4.2 プログラムの応用

翼素の全循環の値の精度はさほど悪くないから、プロペラのスラスト、トルク等の計算には応用できる。

## 5. あとがき

展開面積比の特に小さなプロペラ以外に対しては、



ステートメント数 約630

図-1 フローチャート

逐次計算の収束性が悪く、局所的な循環分布密度の値特に翼根の値には問題が残されているが、プロペラ全体のスラストやトルクの値を求める場合にはかなり実用性のあるものと考えられる。

## 参 考 文 献

- 1) 花岡達郎, プロペラの基礎理論, 船研報告, 第5巻第6号, (1968)

## 5. 定常プロペラ揚力面の計算プログラム

推進性能部 小 山 鴻 一

### 1. プログラムの目的および概要

与えられた形状のプロペラが与えられた前進係数で作動する時の流体力学的性能を調べるには、プロペラ揚力面の積分方程式を解かねばならない。揚力面積分方程式の数値解法は幾つかあるが、いずれも多量な計算量を必要とする。船用プロペラ翼の平均矢高曲線は比較的単純な形をしているので、それをべき級数で表示することにより四次式位で近似することができる。このことから、揚力面の積分方程式の両辺をべき級数に展開し、その係数関数を等置して連立積分方程式を立てそれを解くことにすると、比較的少ない計算量で解を得ることができる。

### 2. プログラムの内容

#### 2.1 プログラムの番号および名称

47-021

The calculation of propeller lifting surface by Hanaoka's method

#### 2.2 製 作 者

推進性能部 小山鴻一

#### 2.3 製 作 年 月

昭和48年3月

#### 2.4 計算の基礎となる理論の概要

プロペラ揚力面の積分方程式は

$$\bar{\alpha}_g = \int_{-1}^1 d\eta' \int_{-1}^1 \frac{\gamma}{W^*} \bar{\mu} \bar{\tau}' \sqrt{\frac{1+\mu'^2}{1+\mu^2}} K(v; \mu, \mu') d\xi' \quad \dots\dots(1)$$

と表わされる。ただし、 $\bar{\alpha}_g$  は翼面の局所的迎角、 $\gamma$  は循環分布密度、 $W^*$  は翼素への流入速度、 $\xi, \eta$  は各翼弦方向および半径方向の座標、また  $\mu$  も半径方向の座標で  $r/h$  ( $h$ : hydrodynamic pitch) である。 $\bar{\mu}$  は翼根から翼端までの距離を表わす係数であり、 $\bar{\tau}'$  は  $\mu'$  における翼弦長を表わす係数である。また核関数は

(10)

$$\left. \begin{aligned} K(v; \mu, \mu') &= -\frac{\sqrt{1+\mu'^2}}{8\pi\sqrt{1+\mu^2}} \sum_{m=0}^{l-1} \int_{-\infty}^v \left\{ \frac{\mu\mu' + \cos v'_m}{\bar{R}^3} \right. \\ &\quad \left. - \frac{3(\mu v' - \mu' \sin v'_m)(\mu' v' - \mu \sin v'_m)}{\bar{R}^5} \right\} dv' \\ \bar{R} &= \sqrt{v'^2 + \mu^2 + \mu'^2 - 2\mu\mu' \cos v'_m} \\ v &= (\tau - \tau')/2, \quad v'_m = v' - 2m\pi/l \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots(2)$$

で与えられる。ただし、 $\tau, \tau'$  は翼弦方向の螺旋座標で  $\xi, \xi'$  に対応し、 $l$  は翼数である。

まず、未知数である循環分布密度を

$$\frac{\gamma}{W^*} = \sum_{N=0}^{n-1} A^{(N)}(\eta) \lambda_N(\xi) \quad \dots\dots(3)$$

と仮定する。 $\lambda_N(\xi)$  は Birnbaum の級数であり、 $A^{(N)}(\eta)$  が未知数となる。(3)を(1)に代入し、その両辺を  $\xi$  について Taylor 展開し係数関数を等置すると

$$\left( \frac{\partial}{\partial \xi} \right)^M \bar{\alpha}_g \Big|_{\xi=0} = \frac{1}{2\pi} \sum_{N=0}^{n-1} \int_{-1}^1 A^{(N)}(\eta') \sqrt{\frac{1+\mu'^2}{1+\mu^2}} \\ \times K^{(MN)} d\eta' \quad M=0, 1, \dots, n-1 \quad \dots\dots(4)$$

$$K^{(MN)} = 2\pi \bar{\mu} \bar{\tau}' \int_{-1}^1 \lambda_N(\xi') \left( \frac{\partial}{\partial \xi} \right)^M K(v; \mu, \mu') \Big|_{\xi=0} \\ \times d\xi' \quad \dots\dots(5)$$

となる。 $K^{(MN)}$  の特異性に注意して積分すると(4)は連立一次方程式に変換される。それから  $A^{(N)}(\eta')$  を解くと(3)から循環分布密度が得られ、プロペラに働く流力特性が求められる。

#### 2.5 計算の手順

計算の手順は、図-1 フローチャートに示すとおりである。

#### 2.6 プログラム用語および計算機種

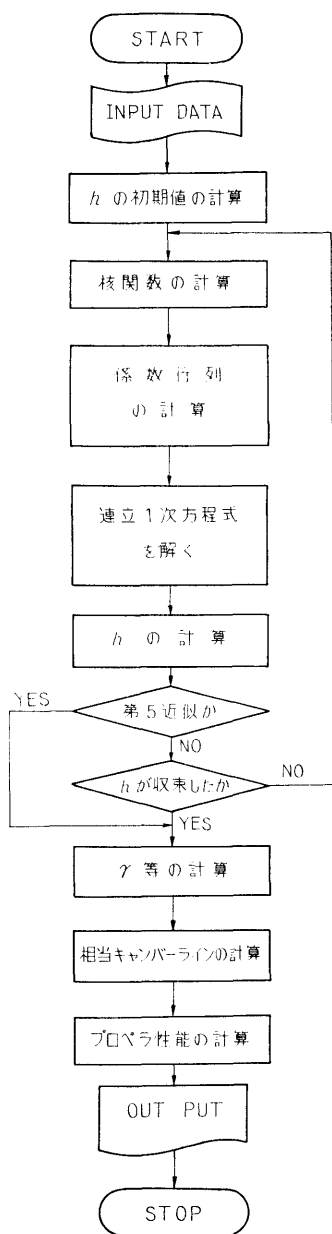
FORTRAN, FACOM 270-20

#### 2.7 入 力

必要な入力データは次のとおりである。

IP (I2) 半径方向の標点数 ( $\leq 7$ )

IJB (I2) Birnbaum 級数の項数 ( $\leq 4$ )



ステートメント数 約560

図-1 フローチャート

- RO (F7.4) プロペラの半径
- RB (F7.4) ポスの半径
- BM(M) (F9.5) M番目の翼素のハーフコード
- BC(M) (F9.5) M番目の翼素のミッドコード
- ZF(M, J) (F9.5) M番目の翼素の平均矢高曲線

を四次式で表わした時の係数値

- RH (F7.4) ピッチ比
- RJ (F7.4) 前進係数
- LL (I2) 翼数
- AKAP1 (F7.4) 揚力係数勾配の修正係数
- AKAP2 (F7.4) " (Prandtl 法の時は1とする)
- CD (F10.4) 断面抵抗係数

### 2.8 出力

Birnbaum 級数の係数, 循環分布密度, 翼素の全循環 hydrodynamic pitch, 相当平均矢高曲線, 推力, トルク, 効率を出力する。

### 3. プログラムの検定

#### 3.1 計算精度および誤差

計算精度は, 半径方向の標点数, 核関数の積分精度, 翼弦方向の積分精度, hydrodynamic pitch の値, 連立一次方程式の計算等に影響されるが, 翼素の全循環の値にして 1%, Birnbaum 級数の係数の値にして 4% 以上の精度を目標とし, 一般の演算は約 7 桁, 連立方程式を解くときだけ倍長精度とした。

#### 3.2 計算所要時間

標点数を IP=7, JJB=4 として, *h* の 1 回の繰り返しに約 10 分かかる。繰り返しの回数はプロペラの作動状態によって異なるが, 設計点においてはほぼ 2 回の繰り返しで充分である。

### 4. プログラムの使用法について

#### 4.1 オペレート

実行は BATCH 処理による。

#### 4.2 プログラムの応用

本プログラムを拡張すると, 非定常プロペラ揚力面の計算も可能となる。

### 5. あとがき

本プログラムの計算実績は必ずしも充分なものとはいえず, またプロペラ揚力面の計算例も未だ数少ないものであるから今後の使用にあたって改良すべき点が見られたなら改良して発展させて行くつもりである。

### 参考文献

- 1) 小山鴻一, 新しい方法によるプロペラ揚力面の数値的解析, 造船学会論文集, 第 132 号, (1972)

## 6. 三次元軸対称物体に働く流体力の計算プログラム

海洋開発工学部 大 川 豊

### 1. プログラムの目的および概要

海洋構造物の基本部材となっている circular dock については、これらの多くが三次元軸対称物体であるため“別所の変分表式”を利用すれば、簡単な形状の物体については数個の特異点を中心線上に置くだけで汎関数としての流体力を求めることができる。

ここでは circular dock および、球形 footing のついた circular dock について、上下揺れの場合の付加質量係数・減衰係数・波強制力およびその位相を求めるプログラムについて述べる。

### 2. プログラムの内容

#### 2.1 プログラムの番号および名称

47-002-1 Hydrodynamical Forces for Heaving Circular Docks

47-002-2 Hydrodynamical Forces for Heaving Circular Docks with Spherical Footing

#### 2.2 製 作 者

海洋開発工学部 大 川 豊

#### 2.3 製 作 年 月

昭和48年3月

#### 2.4 計算の基礎となる理論の概要

別所の変分表式といわれるものは次のような汎関数である。

$$J[\phi] = \int_S \phi \left( \frac{\partial \phi}{\partial \nu} + 2f \right) ds = J_c[\phi] + iJ_s[\phi] \quad \dots\dots(1)$$

ここで  $\phi$  は連続の条件、自由表面条件、無限遠条件、Radiation 条件を満たす速度ポテンシャル、 $s$  は物体表面を表わし、 $f$  は物体表面の境界条件を表わす。

この  $J[\phi]$  を極値とするような停留関数  $\bar{\phi}$  が求まると、

$$J[\phi] = - \int \bar{\phi} \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial \nu} ds \quad \dots\dots(2)$$

となって、これは直接流体力を表わしている。

近似関数  $\phi$  を次のような物体内部に分布させた特

異点による速度ポテンシャルの線型結合で表わす。

$$\phi = \sum_{m=1}^N a_m \phi_m \quad \dots\dots(3)$$

$$\text{但し} \quad a_m = \alpha_m + i\beta_m$$

$$\phi_m = \phi_{m,c} + i\phi_{m,s}$$

ここで  $\phi_m$  は物体表面の境界条件以外の条件を満足する三次元 Green 関数、 $\alpha_m$ 、 $\beta_m$  は求めるべき未定係数である。この  $\phi$  を(1)に代入して

$$\frac{\partial J_c[\phi]}{\partial \alpha_m} = 0, \quad \frac{\partial J_s[\phi]}{\partial \beta_m} = 0 \quad \dots\dots(4)$$

for  $m=1, \dots, N$

とすれば  $2N$  元連立一次方程式に帰着される。

特異点としては source を用いているが、その場合の Green 関数およびその導関数の計算には次の式を用いている。

$$\phi_{m,c} = \frac{1}{R} + \frac{1}{R^*} - \pi K e^{K(z+z_m)} [H_0(KR_\infty) + N(KR_\infty)] - 2K e^{K(z+z_m)} \int_0^{-(z+z_m)} \frac{e^{Kv}}{\sqrt{v^2 + R_\infty^2}} dv \quad (5)$$

$$\phi_{m,s} = -2\pi K e^{K(z+z_m)} J_0(KR_\infty) \quad \dots\dots(6)$$

$$\frac{\partial \phi_{m,c}}{\partial x} = -(x-x_m) \left\{ \frac{1}{R^3} + \frac{1}{R^{*3}} + \frac{\pi K^2}{R_\infty} e^{K(z+z_m)} \times [H_{-1}(KR_\infty) - N_1(KR_\infty)] - 2K e^{K(z+z_m)} \int_0^{-(z+z_m)} \frac{e^{Kv}}{(v^2 + R_\infty^2)^{3/2}} dv \right\} \quad \dots\dots(7)$$

$$\frac{\partial \phi_{m,s}}{\partial x} = \frac{(x-x_m)2\pi K^2}{R_\infty} e^{K(z+z_m)} J_1(KR_\infty) \quad \dots\dots(8)$$

$$\frac{\partial \phi_{m,c}}{\partial z} = -\frac{z-z_m}{R^3} - \frac{z+z_m}{R^{*3}} - \pi K^2 e^{K(z+z_m)} \times [H_0(KR_\infty) + N_0(KR_\infty)] - 2K^2 e^{K(z+z_m)} \int_0^{-(z+z_m)} \frac{e^{Kv}}{\sqrt{v^2 + R_\infty^2}} dv + \frac{2K}{R^*} \quad \dots\dots(9)$$

$$\frac{\partial \phi_{m,s}}{\partial z} = -2\pi K^2 e^{K(z+z_m)} J_0(KR_\infty) \quad \dots\dots(10)$$

#### 2.5 計算の手順

計算の手順を 図-1 フローチャートに示す。

#### 2.6 プログラム用語および計算機種

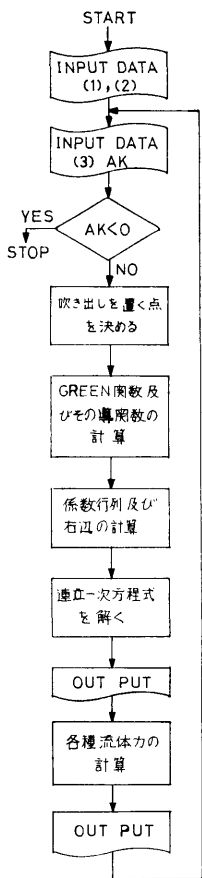


図-1 フローチャート

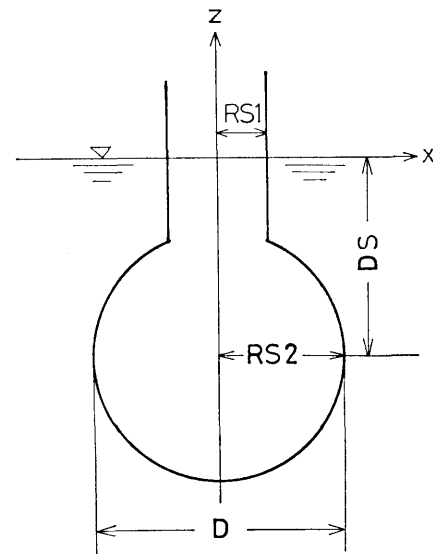
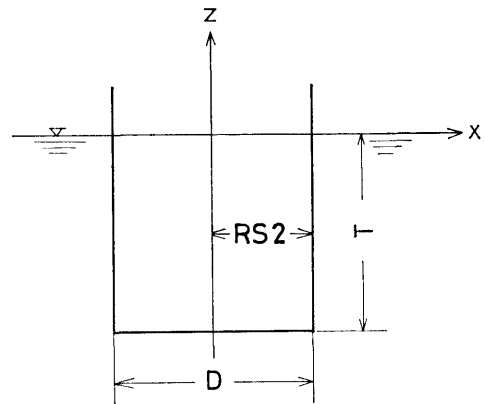


図-2

FORTRAN, FACOM 270-20

2.7 入力

必要な入力データは次のとおりである (図-2 参照)

47-002-1

(1) 物体形状

半径……………RS2 } (2F5.0)  
喫水……………T }

(2) 分割数

吹き出しの数……NN (≤10) } (2I3)  
積分代表点の数…MM (≤60) }

(3) 波数……………AK (F10.0)

波数は必要なだけ入れることができる。計算打ち切りのため最後に負数を入れる。

47-002-2

(1) 物体形状

シリンダー部半径……RS1 }  
フーティング半径……RS2 }  
水面からフーティング中心までの距離…DS } (3F8.0)

(2) 分割数

吹き出しの数……NS (≤10) } (2I3)  
積分代表点の数……NC (≤60) }

(3) 波数……………AK (F10.0)

波数は必要なだけ入れることができる。計算打ち切りのため最後に負数を入れる。

2.8 出力

まず、物体形状を示すパラメータ、吹き出しを置い

た点の座標, 積分代表点の座標が出力される。続いて各波数について, 波数, 連立方程式の係数および右辺の値, 方程式の解が出力され, 最終結果は次のように示される。

EC, ES	波強制力の実部・虚部
EF	波強制力の絶対値
PHE, PHED	波強制力の位相 (rad. および deg.)
AKZ	付加質量係数
ANZ	減衰係数
FZK	Haskind-Newmann の関係から求めた波強制力

### 3. プログラムの検定

#### 3.1 計算精度および誤差

球形 footing のついた場合では  $MM=60$  の場合に吹き出しの数を10個から6個にしても3桁の精度が保たれ,  $MM=30$  の場合は吹き出しの数に関係なく1桁精度が落ちた。

#### 3.2 計算所要時間

吹き出しの数6個, 積分代表点の数60点で1波数に対して約6分である。

#### 3.3 適用範囲, 制限事項

Circular dock では係数行列の性質から若干精度が悪くなり,  $T/D$  の小さいところでは特に顕著であるので改善の必要があり, 検討中である。

### 4. プログラムの使用法について

#### 4.1 オペレート

プログラムの実行は BATCH 処理で PTR より行なう。

#### 4.2 プログラムの応用

自由表面条件を満たす三次元 Point Source による速度ポテンシャル (Green 関数) およびその導関数を求めるサブルーチンは, (5)~(10) 式に現われる特殊関数を求める関数副プログラムとともに1セットになっているので, 一般に利用可能である。

### 5. あとがき

当部では海洋構造物に働く外力に関する研究の一環として Cylinder 型 footing のついた Circular dock の流体力の実験を行なっている。今後この型についても実験結果と比較しうるようなプログラムの開発を進める予定である。また, 同じ手法で水深有限の場合への適用も興味あるものと思われる。

### 参 考 文 献

- 1) Bessho, M; Variational Approach to Steady Ship Wave Problem, 8th Symp. on Naval Hydro. at Pasadena, (1970)
- 2) 佐尾, 前田, 黄; 軸対称柱体の上下揺れについて造船学会論文集, Vol. 130, (1971)

## 7. 平水中で調和振動する二次元柱状体に働く 変動圧力の計算プログラム

運動性能部 菅 信

### 1. プログラムの目的および概要

平水中に浮かぶ二次元物体が調和振動しているときのポテンシャル流場を, 物体表面に連続分布させた吹出しによって表わし, この吹出しの分布を速度ポテンシャルに関する Neumann 問題の解として積分方程式を数値的に解くことによって求め, 次にこの吹出し分布を利用して物体表面上の変動圧力, 附加質量, 減衰力等を数値積分により計算するためのプログラムである。

( 14 )

### 2. プログラムの内容

- 2.1 プログラムの番号および名称  
47-011  
Potential Flow about a Oscillating Cylinder in Still Water
- 2.2 製 作 者  
運動性能部 菅 信
- 2.3 製 作 年 月  
昭和47年 8 月

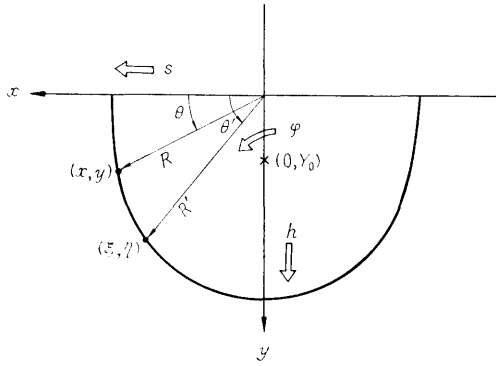


図-1 座標系

2.4 計算の基礎となる理論の概要

吹出しおよび速度ポテンシャルをそれぞれ、 $f e^{i\omega t} = (f_r + i f_i) e^{i\omega t}$ ,  $\Phi e^{i\omega t} = (\Phi_r + i \Phi_i) e^{i\omega t}$  の実数部で表わす。吹出し分布を決める連立積分方程式は次の様に書ける。

$$\left. \begin{aligned} q_r(\theta) + \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} \{q_r(\theta') K_r(\theta, \theta') \\ - q_i(\theta') K_i(\theta, \theta')\} R(\theta') d\theta' = 2V_n(\theta) \\ q_i(\theta) + \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} \{q_r(\theta') K_i(\theta, \theta') \\ + q_i(\theta') K_r(\theta, \theta')\} R(\theta') d\theta' = 0 \end{aligned} \right\} (1)$$

但し  $K_{r,i}(\theta, \theta') = H_{r,i}(\theta, \theta') \pm H_{r,i}(\theta, \pi - \theta')$  であり、複号は上下動のとき正、左右動、横揺のとき負をとる。

ここで

$$\begin{aligned} H_{r,i}(\theta, \pi - \theta') &= l \frac{\partial}{\partial x} G_{r,i}(x, y; \pm \xi, \eta) \\ &+ m \frac{\partial}{\partial y} G_{r,i}(x, y; \pm \xi, \eta) \end{aligned}$$

とおくと

$$\begin{aligned} &\frac{\partial}{\partial x} \{G_r(x, y; \xi, \eta) + i G_i(x, y; \xi, \eta)\} \\ &= \frac{x - \xi}{R_1^2} + \frac{x - \xi}{R_2^2} - 2K e^{-\kappa(y+\eta)} \left\{ \sin K(x - \xi) \right. \\ &\quad \times C_i K |x - \xi| - \operatorname{sgn}(x - \xi) \cos K(x - \xi) \\ &\quad \times S_i K |x - \xi| - \operatorname{sgn}(x - \xi) \frac{\pi}{2} \cos K(x - \xi) \\ &\quad \left. + \int_{-(y+\eta)}^0 e^{-\kappa\mu} \frac{(x - \xi) d\mu}{(x - \xi)^2 + \mu^2} + i\pi \sin K(x - \xi) \right\} \end{aligned} \quad \dots\dots (2)$$

$$\begin{aligned} &\frac{\partial}{\partial y} \{G_r(x, y; \xi, \eta) + i G_i(x, y; \xi, \eta)\} \\ &= \frac{y - \eta}{R_1^2} + \frac{y + \eta}{R_2^2} - 2K e^{-\kappa(y+\eta)} \left\{ \cos K(x - \xi) \right. \\ &\quad \times C_i K |x - \xi| + \sin K |x - \xi| S_i K |x - \xi| \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &-\ln |x - \xi| + \frac{\pi}{2} \sin K |x - \xi| - K \int_{-(y+\eta)}^0 e^{-\kappa\mu} \\ &\quad \times \ln[(x - \xi)^2 + \mu^2]^{1/2} d\mu + i\pi \cos K(x - \xi) \left. \right\} \\ &- K \ln [(x - \xi)^2 + (y + \eta)^2] \quad \dots\dots (3) \end{aligned}$$

であり、また  $R_1 = [(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2]^{1/2}$ ,  $R_2 = [(x - \xi)^2 + (y + \eta)^2]^{1/2}$ ,

$$\begin{aligned} l &= \cos \theta + \sin \theta \cdot R_\theta / R, \quad m = \sin \theta - \cos \theta \cdot R_\theta / R, \\ q_{r,i} &= F \cdot f_{r,i}, \quad F = [1 + (R_\theta / R)^2]^{1/2}, \quad x = R \cos \theta, \\ y &= R \sin \theta, \quad \xi = R' \cos \theta', \quad \eta = R' \sin \theta', \quad R_\theta = dR/d\theta, \\ R' &= R(\theta'), \quad V_n(\theta) = m \text{ (上下動)}, \quad l \text{ (左右動)}, \\ m x - l(y - y_0) &\text{ (横揺, } y_0 \text{ は横揺中心) 等である。} \end{aligned}$$

但し、長さの次元を持つ量は物体の半幅  $B/2 (=R(0))$  で無次元化し、 $f$  (または  $q$ ) と  $\Phi$  はそれぞれ  $\nu \bar{\delta}$ ,  $\nu \bar{\delta} B/2$  ( $\bar{\delta}$  は振動の線変位の振幅) で無次元化してある。なお  $K = \nu^2 B / (2g)$  である。

この積分方程式の核関数には特異性がないので、数値的に解くことは容易である。本プログラムでは、変数  $\theta, \theta'$  を  $0 \sim \pi/2$  で  $M$  等分し、数値積分公式として Simpson の公式を使って  $2(M+1)$  元の連立一次方程式に直して解く方法を使った。

次に変動圧力を  $p e^{i\omega t} = (p_r + i p_i) e^{i\omega t}$  の実数部で表わすと  $p / \rho g \bar{\delta} = K \Phi_i - i(K \Phi_r + \bar{p}_s) = c_p e^{i\omega t}$  である。但し  $\bar{p}_s$  は静水圧の変動の振幅を表わすもので  $\bar{p}_s = 1$  (上下動),  $\bar{p}_s = 0$  (左右動, 横揺) である。

$$\left. \begin{aligned} \Phi_r(\theta) &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi/2} \{q_r(\theta') [G_r(\theta, \theta') \pm G_r(\theta, \pi - \theta')] \\ &\quad - q_i(\theta') [G_i(\theta, \theta') \pm G_i(\theta, \pi - \theta')] \} \\ &\quad \times R(\theta') d\theta' \\ \Phi_i(\theta) &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi/2} \{q_r(\theta') [G_i(\theta, \theta') \pm G_i(\theta, \pi - \theta')] \\ &\quad + q_i(\theta') [G_r(\theta, \theta') \pm G_r(\theta, \pi - \theta')] \} \\ &\quad \times R(\theta') d\theta' \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots (4)$$

但し、複号は上下動のとき正、左右動、横揺のとき負をとるものとし、また、 $G_{r,i}(\theta, \pi - \theta') = G_{r,i}(x, y; -\xi, \eta)$ , および

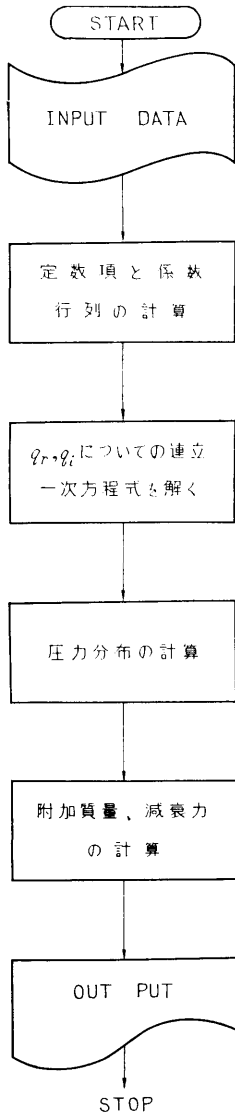
$$\begin{aligned} G_r(\theta, \theta') + i G_i(\theta, \theta') &= \ln R_1 + \ln R_2 + 2e^{-\kappa(y+\eta)} \\ &\times \left\{ \cos K(x - \xi) C_i K |x - \xi| + \sin K |x - \xi| \right. \\ &\quad \times S_i K |x - \xi| - \ln |x - \xi| + \frac{\pi}{2} \sin K |x - \xi| \\ &\quad \left. - K \int_{-(y+\eta)}^0 e^{-\kappa\mu} \ln [(x - \xi)^2 + \mu^2]^{1/2} d\mu \right. \\ &\quad \left. + i\pi \cos K(x - \xi) \right\} \quad \dots\dots (5) \end{aligned}$$

である。ここで (4) の被積分関数は対数特異性を持っているが、それらの数値積分 (Simpson の公式を使用) にあたっては完全に処理してある。

次に附加質量係数  $K_4$  (上下動),  $K_x$  (左右動) および減衰係数  $\bar{A}$  は、それぞれ次式で計算する。

$$K_{4,x} = \frac{1}{c\pi} \int_0^{\pi/2} \phi_r(\theta') V_n(\theta') R(\theta') d\theta'$$

$$\bar{A} = K \left[ 2 \int_0^{\pi/2} \phi_i(\theta') V_n(\theta') R(\theta') d\theta' \right]^{1/2} \quad (6)$$



スタートメント数約 500  
図-2 フローチャート

但し、上下動のとき  $C=C_0$  ( $K \rightarrow \infty$  のときの附加質量係数) 左右動のとき  $C=[R(\pi/2)]^2$  である。

2.5 計算の手順

計算の手順は 図-2 フローチャートに示すとおりである。

2.6 プログラム用語および計算機種

FACOM FORTRAN, FACOM 270-20

2.7 入力

必要な入力データは次のとおりである。

(1) KB より

- M.....分割数 (偶数) I 3
- KIND .....動揺の種類 KIND=1 (上下動),  
2 (左右動), 3 (横揺) I 2

(2) PTR より

① 任意船型の場合

- SHIPNO ...船体番号 I 5
- SSNO .....断面番号 F 6.3
- $R(I)=R$  F 7.4
- $RT(I)=\partial R/\partial \theta$  F 7.4
- $RTT(I)=\partial^2 R/\partial \theta^2$  F 8.4
- 添字 I は  $\theta=(I-1)\pi/M$  の値であることを示し、 $I=1$  から  $M+1$  までの値をこの順に入れる。
- $BK=K=\nu^2 B/(2g)$  F 7.4

② Lewis Form の場合

- $A_1, A_3$ .....Lewis Form の係数 各 F 7.4
- $BK=K=\nu^2 B/(2g)$  F 7.4

2.8 出力

タイトル, 船体番号, 断面番号 (Lewis Form の場合はその形状係数),  $K=\nu^2 B/(2g)$  を印字したあと、各  $\theta$  について

- $FR = f_r$ .....吹出しの cos 成分
- $FI = f_i$ .....吹出しの sin 成分
- $PHR = \phi_r$ .....速度ポテンシャルの cos 成分
- $PHI = \phi_i$ .....速度ポテンシャルの sin 成分
- $CP = C_p$  ...変動圧力係数
- $EPS = \epsilon$  .....変動圧力の運動変位との位相差

を出力し、次に附加質量係数  $K_4$  または  $K_x$ , 減衰係数  $AO$  を出力する。

3. プログラムの検定

3.1 計算精度および誤差

計算精度は、物体の形状および無次元振動率  $K$  の値によって異なる。一般に  $K$  の値が大きくなるほど計算精度が落ちるため分割数  $M$  を増さなくてはなら



ない。また物体形状については、V型船のように水面と直角に交わらない物体では水面附近で計算精度が落ち、船首部のように深さ方向に細長い物体では船底附近で精度が悪くなるため、分割数  $M$  を増す必要がある。しかし通常の船体動揺と考える限りでは、大ざっぱに云って  $M=10\sim 12$  程度を取れば実用的には充分であろう。計算精度の検定の詳細は参考文献 1), 2) を参照されたい。なお、試計算により倍精度にする必要のないことを確認し、計算はすべて単語長 (7~8 桁) で行なっている。

### 3.2 計算所要時間

ある断面形状で、あるひとつの  $K$  の値についての計算所要時間は、 $M=6$  で 17 秒、 $M=12$  で 43 秒、 $M=24$  で 164 秒、 $M=30$  で 255 秒等である。

### 3.3 適用範囲、制限事項

$R(\theta)$ ,  $\partial R(\theta)/\partial\theta$ ,  $\partial^2 R(\theta)/\partial\theta^2$  の  $\theta$  に対する変化が緩かな物体ほど良い結果が得られる。これらの変化の激しいものほど分割数を増さなくてはならない。また、これらの変化が不連続になる物体は、厳密には計算できないが、工学的には、物体の形状を僅かに変えて不連続部をなくすようにまらめてしまえば計算できる。しかしこの場合の計算精度は少し悪くなるようである。また  $R(\theta)$  が  $\theta$  の多価関数になるような物体は、このプログラムでは計算できない。次に、このプログラムは、第 2 種の Fredholm 型積分方程式を解いているため、パラメーター  $K$  が核関数の固有値になるところ (いわゆる irregular frequency のところ) では計算できないこととなる。またその附近では狭い範囲では

あるが計算精度が悪くなる。

## 4. プログラムの使用法について

### 4.1 オペレート

プログラムの実行は、 $\$$  BATCH で PT より行なう。

### 4.2 プログラムの応用

規則波中に固定して置かれた物体まわりの流場を解く、いわゆる Diffraction 問題を扱うプログラムに変更することは容易である。

## 5. あとがき

表題のような二次元波動問題を計算するプログラムはすでにいくつか開発されている。特に流れ関数に関する Dirichlet 問題の解として積分方程式を解いて吹出し分布を求める前田の方法は任意形状の物体についての計算が容易にできる利点がある。ここに新たに開発した方法は、前田の方法より少ない分割数で精度の良い計算結果を得ることができるほか、比較的任意な形状の物体についても計算することができるもので応用価値は高いものと考えられる。

## 参 考 文 献

- 1) 菅 信, 平水中で調和振動する 2 次元柱状体に働く変動圧力の計算, 第 20 回船研研究発表会講演概要, (1972)
- 2) 日本造船研究協会, 第 131 研究部会, 波浪外力に関する水槽試験報告書, 造船研究資料第 176 号, (1973)

## 8. 二次元物体まわりの変動圧計算プログラム

### 運動性能部 渡 辺 巖

### 1. プログラムの目的および概要

波浪中にある二次元物体に働く圧力分布を計算するプログラムである。二次元物体としては通常 Lewis form と呼ばれる円の等角写像で得られる形状を用いる。波浪中で運動する物体まわりのポテンシャルを求める方法としては、数値計算で級数解を求める方法に拠っている。すなわち、物体表面の境界条件以外のラプラスの方程式その他の条件を満たす形のポテンシ

ャルを未知係数を含んだ級数であらわし、これが物体表面の境界条件を最小二乗法的に満足するよう係数を定めるものである。物体の運動は調和振動なら任意であるが振幅および各運動間の位相関係は既知のものとして入力で与える必要がある。

### 2. プログラムの内容

- 2.1 プログラムの番号および名称  
46-039

## Calculation of Pressure Distribution around a Lewis form Cylinder

### 2.2 製 作 者

運動性能部 渡 辺 巖

### 2.3 製 作 年 月

昭和 47 年 12 月

### 2.4 計算の基礎となる理論の概要

物体表面での境界条件は線型な問題であれば、左右対称な条件と反対称な条件に分けて考える事ができる。物体表面条件を流れ関数で表示すれば、

$$\phi = F^H + F^S$$

ただし  $F^H$ : 対称な条件,  $F^S$ : 反対称な条件

ラプラスの方程式その他の条件を満足する速度ポテンシャル, 流れ関数は上と同様に対称成分, 反対称成分に分離できて次のように定義される。

$$\phi = \phi^H + \phi^S$$

$$\psi = \psi^H + \psi^S$$

$$\phi^H = \sum_{i=0}^N A_i^H \phi_i^H(r, \theta, H_0, \sigma, \xi_B)$$

$$\phi^S = \sum_{i=0}^N A_i^S \phi_i^S(r, \theta, H_0, \sigma, \xi_B)$$

( $H_0, \sigma$  は半幅喫水比, 面積比で Lewis form を特徴付ける諸量である。 $\xi_B = \frac{\omega^2 B}{2g}$  で波数の無次元量である。 $r, \theta$  は写像する円の座標である。)

この  $\phi^H$  を物体表面の境界条件式に入れ,  $F^H$  を最小二乗法的に満足するように  $A_i^H$  を定める。反対称な成分に関しても全く同様に  $A_i^S$  を求める事ができる。これら  $A_i^H, A_i^S$  を使えばポテンシャル  $\phi^H, \phi^S$  が定まり, 全体のポテンシャルは  $\phi = \phi^H + \phi^S$  で与えられる。これより動的な変動圧は簡単に求める事ができる。

$$p = -i\omega\rho\phi$$

または Real part, Imaginary Part に分解すれば

$$p_r = +\omega\rho\phi_i$$

$$p_i = -\omega\rho\phi_r$$

となる。これが変動圧力の位相成分を示す。全変動圧はこれに静的な変動圧 (喫水変化分または入射波による成分) を加えたものとなる。

### 2.5 計算の手順

省略

### 2.6 プログラム用語および計算機種

FORTRAN, FACOM 270-20

### 2.7 入 力

- 1) 物体形状, 半幅喫水比 ( $H_0$ ), 面積比 ( $\sigma$ )
- 2) 入射波, 運動状態  
入射波の有無, 入射波または運動の周波数 ( $\xi_B$ ), 運動の振幅, 位相差
- 3) ポテンシャルの項数, 最小二乗法を適用する標点数

### 2.8 出 力

水面下の物体表面を  $15^\circ$  毎に選び, 各点毎の変動圧を  $p_r, p_i$  の形で出力する。ただし, 圧力は入射波振幅, または運動振幅で無次元化した値である。

## 3. プログラムの検定

### 3.1 計算精度および誤差

計算精度は最小二乗法で作られる連立一次方程式の計算精度に依存する。このプログラムでは, この部分のみ倍精度である。

### 3.2 計算所要時間

1つの物体につき近似項数 8 項, 標点 12 点で 15 秒程度である。

## 4. プログラムの使用法について

### 4.1 オペレート

Batch 処理による。

### 4.2 プログラムの応用

ストリップ法の運動計算と組合わせて船体まわりの変動圧計算に適している。

## 5. あとがき

積分方程式の解法と比較して, 計算時間が僅かで精度の良い結果が得られる。

## 参 考 文 献

- 1) 渡辺 巖; 二次元物体まわりの変動圧計算法, 造船学会論文集, 第 133 号, (1973)

## 9. 実船の耐航性実験のデータ解析プログラム

運動性能部 小川陽弘・渡辺 巖・福田由美子

### 1. プログラムの目的および概要

耐航性に関する実船試験では、ピッチ、ロール等の船体運動、船体や積荷に生ずる加速度、舵角等をアナログのデータレコーダに収録して持ち帰るのが普通であり、この記録をAD変換して解析する。本プログラムはこれらのデジタル記録を統計解析するもので、結果はラインプリンターによる表および図、並びにXYプロッタ用の紙テープとして出力される。

### 2. プログラムの内容

#### 2.1 プログラムの番号および名称

SPECm および STATn

m および n はプログラムの改良に応じて変更して行く番号で、現在はそれぞれ SPEC 5, STAT 2 となっている。

#### 2.2 製作者

運動性能部 小川陽弘, 渡辺巖, 福田由美子  
海洋開発工学部 安藤定雄

#### 2.3 製作年月

昭和46年5月

#### 2.4 計算の基礎となる理論の概要

SPECm は前記デジタルデータをスペクトラム解析するもので、基本的には第1集に安藤によって報告されたものと同じである。

STATn は一連のデータから統計的諸量を計算するものである。従ってデータの処理法は算術的演算で処理される部分が大部分であり、改めて述べる必要はないと思われる。ただプログラム中、データが狭帯域と仮定した時の理論値を主に両振幅について計算している。それらを以下に示す。

入力波形が狭帯域だとすれば、両振幅の分布は Rayleigh 分布で表わされる。両振幅の平均を  $H_m$  とすれば

分布密度  $f(H)$  は

$$f(H)dH = \frac{\pi H}{2H_m} \exp\left(-\frac{\pi H^2}{4H_m^2}\right)dH.$$

また累積分布は  $F(0)=1$  とした時、

$$F(H) = \exp\left(-\frac{\pi H^2}{4H_m^2}\right).$$

この分布形状での 1/3 Highest Mean, 1/10 Highest Mean を  $H_{1/3}$ ,  $H_{1/10}$  とすれば

$$H_{1/3} = 1.598H_m$$

$$H_{1/10} = 2.032H_m$$

以上の式にデータから得られた  $H_m$  を与えて計算する。

#### 2.5 計算の手順

大略の計算順序を図-1 (SPEC 5) および 図-2 (STAT 2) に示す。

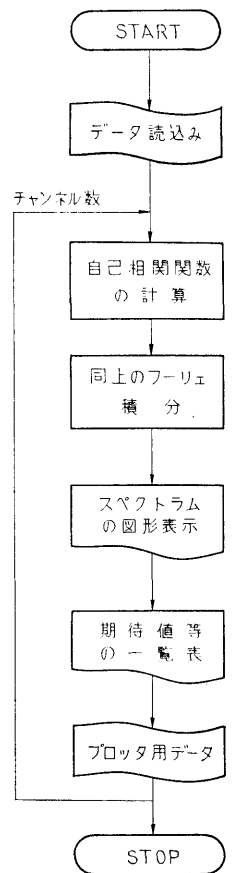


図-1 SPEC 5 の流れ図

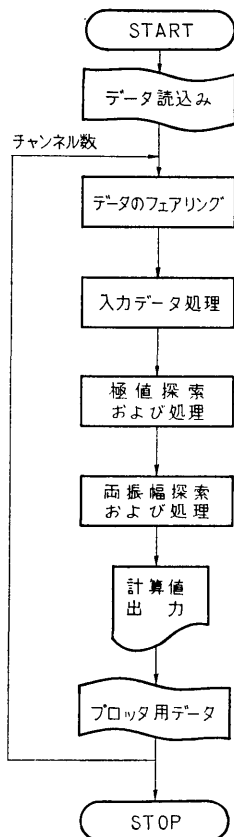


図-2 STAT 2 の流れ図

## 2.6 入 力

入力データは紙テープで与え、SPECm, STATn とともに共通のデータテープを使用する。データの形式は次のとおりである。

- 1) データのチャンネル数
- 2) 試験分類番号, ラグ数, サンプリングタイム
- 3) 各チャンネルの項目名, キャリブレーションコンスタント
- 4) 実験番号
- 5) データ

## 2.7 出 力

### 2.7.1 SPEC 5 の場合

- 1) スペクトラムの概略図 (LP 上)——ラグ数55 まで
- 2) 解析値
  - (a) 振幅解析値——分散, 標準偏差のそれぞれ  $\omega$  の全範囲積分値および有限範囲積分値 (積分周波数範囲はスペクトラムの形および面積

から自動的に決定)

- (b) 平均周波数および周期——スペクトラムのピーク値, 一次モーメントによる値, zero-cross の値, peak-to-peak の値
  - (c) バンド幅パラメータ  $\epsilon$  および  $E_0$
  - (d)  $1/n$  最高平均値—— $\epsilon=0$  および  $\epsilon=\sqrt{2/3}$  に対する最大値, 有義値,  $1/10$  最高平均値
  - (e) 条件——データ数, ラグ数, サンプリングタイム, ウィンドウ ( $W_2$ )
  - (f) 自己相関関数値
- 3) XYプロッタ用紙テープ

プロッタにはスペクトラムとコレログラム, 分散(または標準偏差)の値, 積分周波数範囲, スペクトラムのピーク等が画かれる。スペクトラムの横軸は  $\omega \leq 1.6$  まで, 縦軸のスケールは自動的に決められる。図の大きさは4チャンネルの場合に丁度 A4 の大きさに入るようになっている。この出力例を図-3 に示す。

### 2.7.2 STAT 2 の場合

#### 1) 入力データおよび極値

各々の平均, 最大, 最小, 分散。この他に, 平均周期 (zero cross, peak to peak) を2種類。

#### 2) 両振幅

##### (a) データ解析値

1)と同じものを計算する他に以下の値を求める。最大値から  $1/10$  および  $1/3$  までの平均値, 二乗平均値, ヒストグラム, 累積ヒストグラム。

##### (b) 理論値

2.4 に述べた理論式に(a)で求めた平均値を代入して計算した値。すなわち,  $1/10$  平均値,  $1/3$  平均値, 分布密度, 累積分布等を予測値として計算する。

##### (c) XYプロッター用紙テープ

以上, 2) の(b)迄は LP 上に出力する。両振幅ヒストグラムの解析値, 理論値をXYプロッターで作図するための紙テープを作成する。作図例は図-4 に示すが, 4チャンネルで A4 のサイズに収まるスケールである。

## 3. プログラムの検定

### 3.1 計算精度および誤差

計測値の精度に較べて充分である。

### 3.2 計算所要時間

T. No. 4711-14 DN=960 LN=90 DT=1,000sec

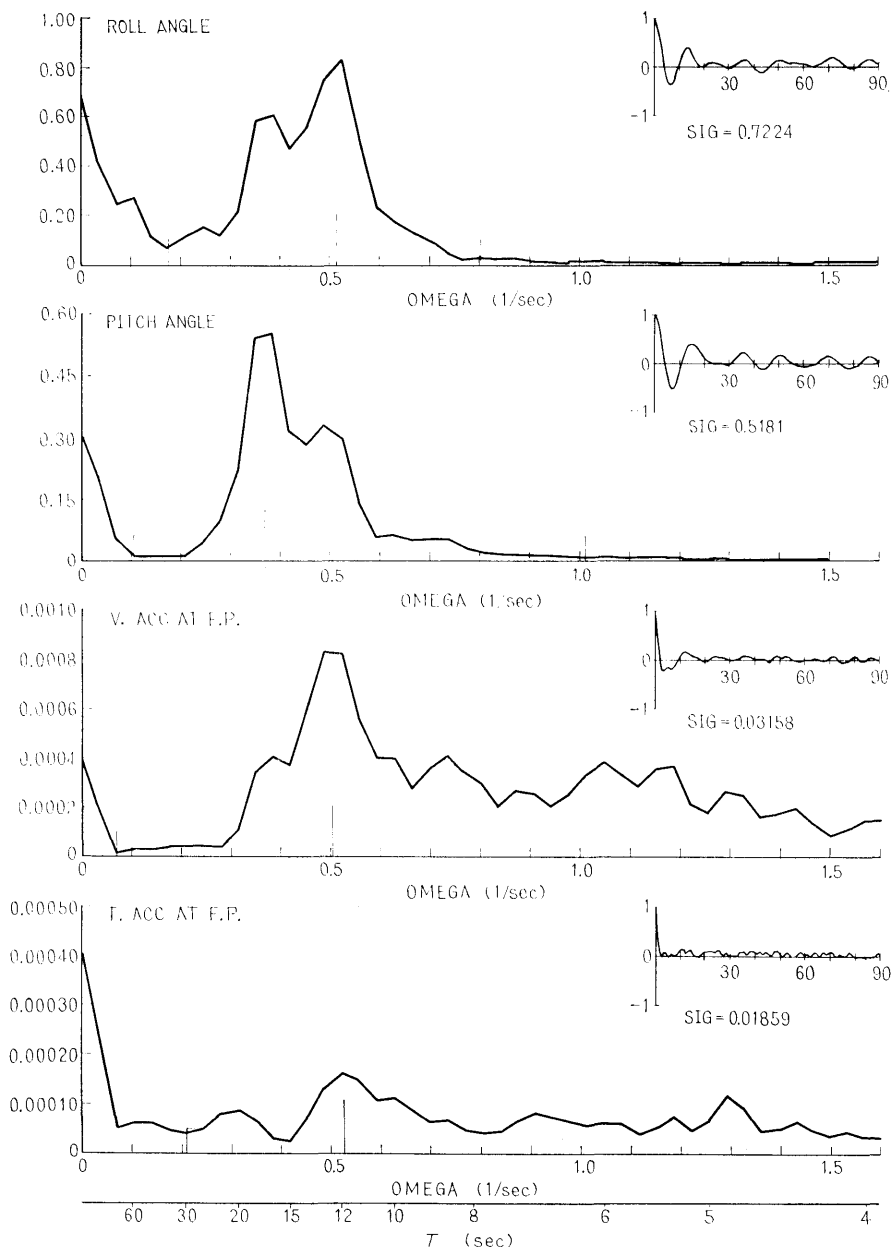


図-3 解析結果のプロッタ作図例 (SPEC 5)

データ数, チャンネル数等によって異なるが, 1000  
データ×6チャンネルの場合, SPEC 5 が約11分,  
STAT 2 が約6分程度である。

### 3.3 適用範囲, 制限事項

チャンネル数 6 以下  
データ数 1000 以下  
ラグ数 90 以下  
ただし, まだ多少拡張の余地はある。

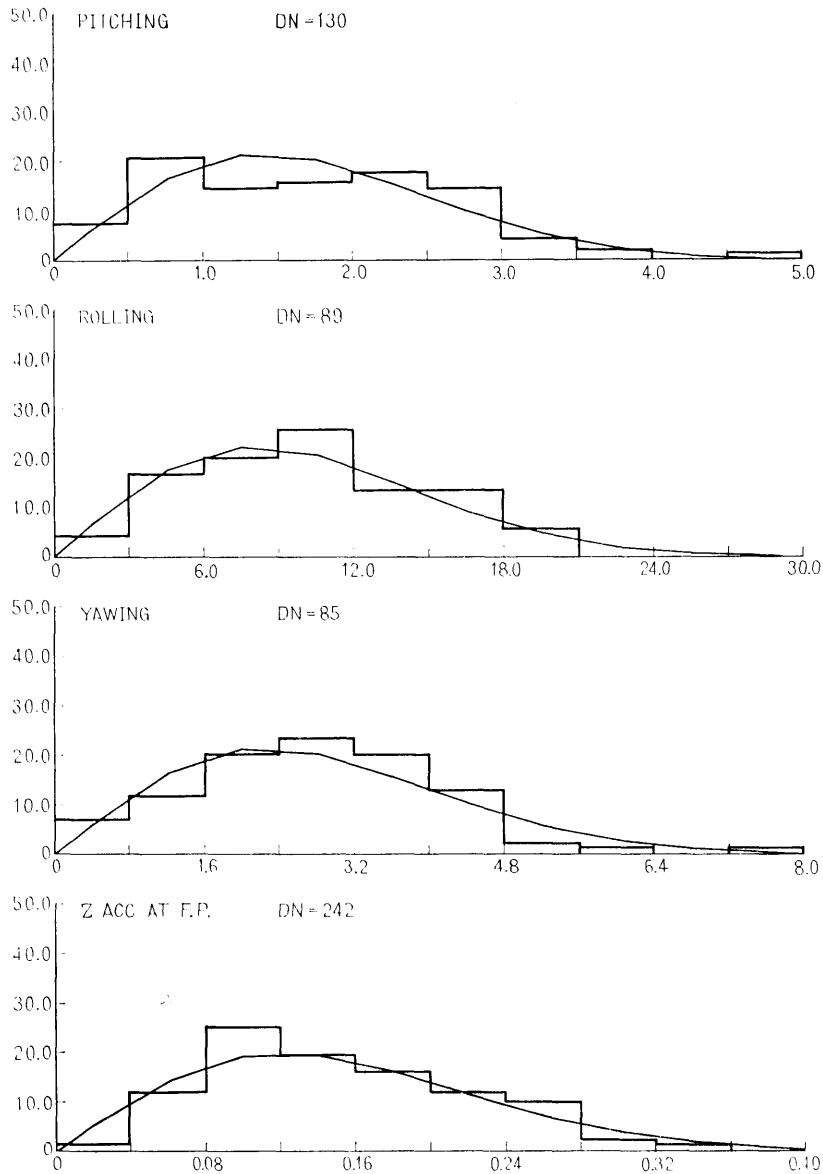


図-4 解析結果の作図例 (STAT 2)

#### 4. プログラムの使用方法について

##### 4.1 オペレート

Instant 処理による。プログラムは AB で MT に入っており、(SPECm) または (STATn) の名前で呼び出す。

( 22 )

##### 4.2 プログラムの応用

一部に手を加えれば、一般のスペクトラム解析、統計解析に転用できる。

##### 4.3 他機種への移行

同級以上の機種ならば可能。

## 5. あとがき

運動性能部で実船の耐航性実験の解析にスペクトラム解析を適用し始めてから約10年になる。本プログラムの完成によって、データ解析はほとんど自動化されることになったが、AD変換、キャリブレーションコンスタントの計算等でまだ多くの人手を要する部分が

残っている。これらの部分を改良したいものである。

## 参考文献

- 1) 安藤定雄; 不規則振動の統計解析用プログラム, 船研報告第7巻第4号(プログラム特集第1集), (1970)

# 10. 有限要素法による座屈解析プログラム

船体構造部 遠藤久芳

## 1. プログラムの目的および概要

板構造の最終強度を検討すると、しばしば、局部的あるいは全体的な座屈が、その崩壊の直接の基因となっている。本プログラムは、骨付き板構造物について有限要素法による二次元解析を行ない、座屈による面外変形モードと固有値(座屈荷重)を求めるものである。なお、本計算の前に「FEM」により面内応力計算を行ない、その結果をMTにとり、データとして用いる。

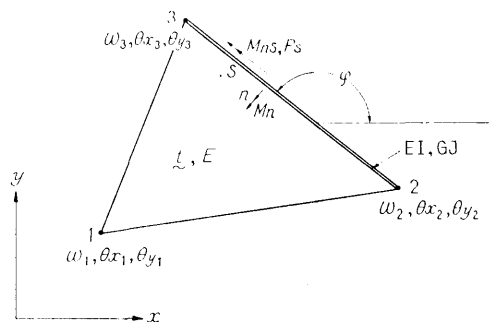


図-1 要素と記号

## 2. プログラムの内容

### 2.1 プログラムの番号および名称

46-042 BUCK

### 2.2 製作者

船体構造部 遠藤久芳

### 2.3 製作年月

昭和47年6月

### 2.4 計算の基礎となる理論の概要

#### 1) 平板の面外変形基礎式

三角形要素の3節点を1, 2, 3とすると

要素の変位ベクトル  $\{\delta^e\}^T \equiv [\delta_1, \delta_2, \delta_3] \dots (1)$

節点変位ベクトル  $\{\delta_i\}^T \equiv [\omega_i, \theta_{xi}, \theta_{yi}]$   
 $\equiv \left[ \omega_i, -\frac{\partial \omega}{\partial y_i}, \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right]$   
 $\dots (2)$

ひずみベクトル  $\{\epsilon\}^T \equiv \left[ -\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2}, -\frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2}, 2 \frac{\partial^2 \omega}{\partial x \partial y} \right]$   
 $\dots (3)$

応力ベクトル  $\{M\}^T \equiv [M_x, M_y, M_{xy}]$   
 $\dots (4)$

傾斜ベクトル  $\{\alpha\}^T \equiv \left[ \frac{\partial \omega}{\partial x}, \frac{\partial \omega}{\partial y} \right] (5)$

応力ひずみ関係式  $\{M\} = [D]\{\epsilon\}$   
 $= \frac{Et^2}{12(1-\nu^2)}$   
 $\times \begin{pmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{pmatrix}$   
 $\times \{\epsilon\} \dots (6)$

三次の変位関数  $[N]$  を導入して次のように定義する。

$\{\omega\} = [N]\{\delta^e\} \dots (7)$

(3), (5), (7) より  $[N]$  を微分することにより  
 $\{\epsilon\} = [C]\{\delta^e\} \dots (8)$

$\{\alpha\} = [G]\{\delta^e\} \dots (9)$

よって要素のひずみエネルギー  $\Delta V_p$  は

$$\Delta V_p = \frac{1}{2} \int \{M\}^T \{\epsilon\} dA$$

$$= \frac{1}{2} \int \{\delta^e\}^T [C]^T [D] [C] \{\delta^e\} dA$$

$$= \frac{1}{2} \{\delta^e\}^T [K_p] \{\delta^e\} \quad \dots\dots (10)$$

また、面内応力マトリックスを

$$[P] = t \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} \\ \tau_{xy} & \sigma_y \end{bmatrix}$$

とすると

要素内で外力のなす仕事  $\Delta W_p$  は

$$\begin{aligned} \Delta W_p &= \frac{1}{2} \int \{\alpha\}^T [P] \{\alpha\} dA \\ &= \frac{1}{2} \int \{\delta^e\}^T [G]^T [P] [G] \{\delta^e\} dA \\ &\equiv \frac{1}{2} \{\delta^e\}^T [K_p^e] \{\delta^e\} \quad \dots\dots (11) \end{aligned}$$

2) 補強材についての基礎式

補強材のひずみベクトル

$$\{\epsilon_s\}^T \equiv \left[ \frac{\partial^2 \omega}{\partial s^2}, \frac{\partial^2 \omega}{\partial n \partial s} \right] \quad \dots\dots (12)$$

$$\text{応力ベクトル} \quad \{M_s\}^T \equiv [M_n, M_{ns}] \quad \dots\dots (13)$$

$$\text{傾斜ベクトル} \quad \{\alpha_s\} = \left[ \frac{\partial \omega}{\partial s} \right] \quad \dots\dots (14)$$

$$\text{応力ひずみ関係式} \quad \{M_s\} = [D_s]^T \{\epsilon_s\} \quad \dots\dots (15)$$

ただし  $[D_s]$  は補強材の剛性マトリックスで

$$[D_s] \equiv \begin{bmatrix} EI & 0 \\ 0 & GJ \end{bmatrix}$$

さらに座標変換マトリックス

$$[T_s] = \begin{bmatrix} -\cos^2 \varphi, & -\sin^2 \varphi, & \sin \varphi \cos \varphi \\ \cos \varphi \sin \varphi, & -\cos \varphi \cdot \sin \varphi, & \frac{1}{2}(\cos^2 \varphi - \sin^2 \varphi) \end{bmatrix}$$

を用いて  $\{\epsilon_s\} = [T_s] \{\epsilon\}$  と表わせる。

以上により補強材のひずみエネルギー  $\Delta U_s$  は

$$\begin{aligned} \Delta U_s &= \frac{1}{2} \int \{M_s\}^T \{\epsilon_s\} dS \\ &= \frac{1}{2} \int \{\delta^e\}^T [C]^T [T_s]^T [D_s] [T_s] [C] \{\delta^e\} dS \\ &\equiv \frac{1}{2} \{\delta^e\}^T [K_s] \{\delta^e\} \quad \dots\dots (16) \end{aligned}$$

さらに  $\{\alpha_s\} = [T_s^a] \{\alpha\} = [\cos \varphi, \sin \varphi] \{\alpha\}$

動力マトリックス  $[P_s] = [P_s^{(0)0}]$  と表わすと補強材において外力のなす仕事  $\Delta W_s$  は

$$\begin{aligned} \Delta W_s &= \frac{1}{2} \int \{\alpha_s\}^T [P_s] \{\alpha_s\} dS \\ &= \frac{1}{2} \int \{\delta^e\}^T [G]^T [T_s^{(0)0}]^T [P_s] [T_s^a] [G] \{\delta^e\} dS \\ &= \frac{1}{2} \{\delta^e\}^T [K_s^a] \{\delta^e\} \quad \dots\dots (17) \end{aligned}$$

3) 座屈解析

系のポテンシャル  $\pi$  は

( 24 )

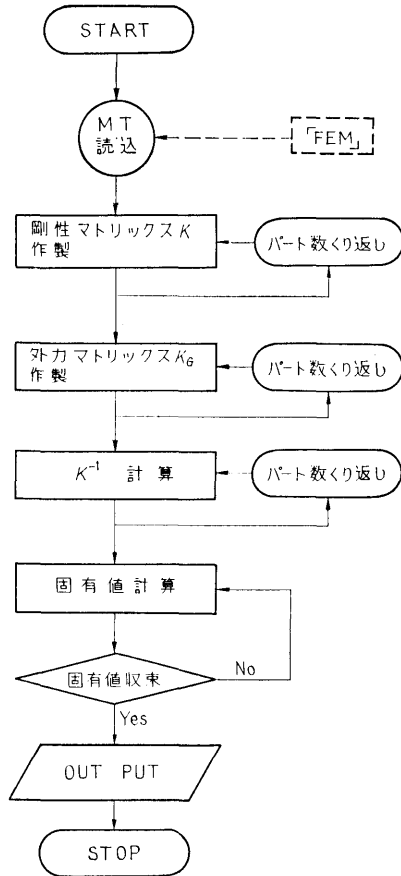


図-2 フローチャート

$$\pi = \sum (\Delta U_p + \Delta U_s) - \lambda \sum (\Delta W_p + \Delta W_s) \quad \dots\dots (18)$$

(18) の変分をとり、 $\{\delta^e\}$  が 0 でない解を持つ条件から

$$[K] \{\delta^e\} = \lambda [K_G] \{\delta^e\} \quad \dots\dots (19)$$

(19) を Stodola の方法により解き固有値  $\lambda$  と固有ベクトル  $\{\delta^e\}$  を得る。

2.5 計算の手順 (図-2 参照)

2.6 プログラム用語および計算機種

FORTRAN IV, FACOM 270-20

2.7 入 力

別プログラム「FEM」により作成されたMTのデータと以下のPTのデータを用いる。

1) NPT, NN1, NN2, NBOUN……「FEM」で扱かう全パート数, 「Buck」で扱かう最初と最後のパート番号, 拘束点数

2) NFI, NB1, NB2, NB3……拘束節点番号と拘束条件 (NB1=0→ $\omega$  拘束, NB2=0→ $\theta_x$  拘束,



NB3=0→ $\theta_y$  拘束)

3) TH, NN……そのパートの板厚, 1パート内部材数

4) XI, XJ, N1, N2, N3……部材曲げ剛性, 捩り剛性, 部材両端および要素の残りの節点の節点番号

3)~4)パート数くり返し

MT データには, 「FEM」で計算された, 要素および部材の応力と, 要素データが入っている。

## 2.8 出力

1) 固有値の計算途中結果とその誤差

2) 収束した固有値と各節点の変位ベクトル  $\{\omega_i, \theta_{xi}, \theta_{yi}\}$

## 3. プログラムの点検

### 3.1 計算精度および誤差

固有値演算上は, くり返し法により誤差 0.3% 以内に行っている。計算結果を簡単な模型につき解析解と比較すると 2~5% 程度座屈荷重が低くなる。複雑な模型では実験値と比較すると, 非常に良く一致するものから 20% 程度座屈荷重が低くなるものまである。

### 3.2 計算所要時間

「FEM」による応力計算に比較すると, 同じ模型につき数倍の時間がかかる。一例としてウィングタンク・ストラット部模型の場合 (6パート, 要素数 175, 節点数 117) で 70 分かかる。

### 3.3 適用範囲, 制限事項

本プログラムでは, 二次元構造物の弾性座屈しか扱えない。また計算機のメモリー上から以下の制限が

ある。

1) パート数 12 以下

2) 1パート内には, 要素数 50 以下, 部材数 30 以下, 節点数 22 以下

3) 荷重条件 1 つだけ

4) 総節点数 258 以下

「FEM」にて本プログラム用のデータ作製する際, 「FEM」の入力データも上記の制限を優先させなければならない。

## 4. プログラムの使用法について

### 4.1 オペレート

まず, 別プログラム「FEM」で作成した MT のデータを用意する。プログラムは, AB で MT に入っているのので, ¥MPXEQ (BUCK) でロードする。

### 4.2 プログラムの応用

材料特性が非線型となる塑性状態をも扱えるように拡張できるが, その場合より高レベルの計算機システムが必要である。

## 5. あとがき

本計算において計算されるのは, 最低次の固有値と固有ベクトルのみである。すなわち, 一番早い荷重段階で生ずる局所的なあるいは全体的な座屈が解析できる。

また対称構造物の一部のみをとり出して, その局所的な座屈解析のみ扱うこともできる。

# 11. 有限要素法による平面応力計算プログラム

船体構造部 遠藤久芳

## 1. プログラムの目的および概要

一般に船体は, 骨付きの板構造物であるといえる。本プログラムは, 骨付き板構造物について, 有限要素法による二次元解析を行ない, 各部の X-Y 方向応力・主応力とその方向・骨部材の軸応力・各節点の変位を求めると共に, BUCK (座屈計算プログラム) のデータを作製することもできるものである。なお, 現在の共用計算機システムにおいてできるだけ多くの節点をとれ, 大型の構造物を精度良く計算できるように工

夫してある。

## 2. プログラムの内容

2.1 プログラムの番号および名称

45-046 FEM

2.2 製作者

船体構造部 遠藤久芳

2.3 製作年月

昭和 46 年 11 月

2.4 計算の基礎となる理論の概要

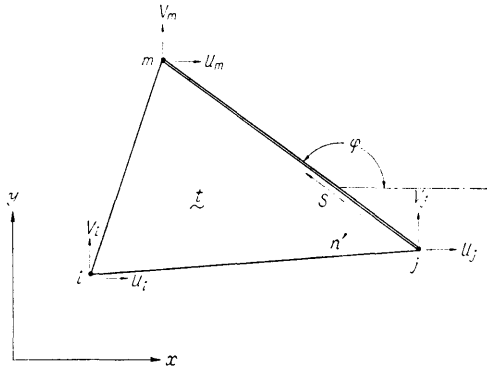


図-1 要素と記号

三角形要素の3節点を  $i, j, m$  とすると、要素内の任意の点の  $x$  方向、 $y$  方向の変位  $u, v$  を次のように表わす。

$$\{f\} = \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} N_i & 0 & N_j & 0 & N_m & 0 \\ 0 & N_i & 0 & N_j & 0 & N_m \end{bmatrix} \{\delta^e\} \quad \dots\dots(1)$$

ただし

$$\{\delta^e\} = \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ u_j \\ v_j \\ u_m \\ v_m \end{Bmatrix}, \quad \begin{aligned} N_i &= (a_i + b_i x + c_i y)/2\Delta \\ N_j &= (a_j + b_j x + c_j y)/2\Delta \\ N_m &= (a_m + b_m x + c_m y)/2\Delta \end{aligned}$$

$$a_i = x_j y_m - x_m y_j$$

$$b_i = y_i - y_m$$

$$c_i = x_m - x_j$$

$$2\Delta = \det \begin{vmatrix} 1 & x_i & y_i \\ 1 & x_j & y_j \\ 1 & x_m & y_m \end{vmatrix}$$

$(x_i, y_i), (x_j, y_j), (x_m, y_m)$ ……各節点の座標

$(u_i, v_i), (u_j, v_j), (u_m, v_m)$ ……各節点の変位

1) 平板の剛性マトリックス,  $K_p$

(1)より要素内のひずみ、応力は、次のように表わせる。

$$\{\epsilon\} = \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \end{Bmatrix} = \frac{1}{2\Delta}$$

$$\times \begin{bmatrix} b_i & 0 & b_j & 0 & b_m & 0 \\ 0 & c_i & 0 & c_j & 0 & c_m \\ c_i & b_i & c_j & b_j & c_m & b_m \end{bmatrix}$$

$$\times \{\delta^e\} = [C]\{\delta^e\} \quad \dots\dots(2)$$

$$\{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & (1-\nu)/2 \end{bmatrix}$$

$$\times \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = [D] \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = [D][B]\{\delta^e\}$$

$$\dots\dots(3)$$

要素のひずみエネルギー  $\Delta U_p$  は

$$\begin{aligned} \Delta U_p &= \frac{1}{2} \int \{\sigma\}^T \{\epsilon\} dA \\ &= \frac{1}{2} \int \{\delta^e\}^T [C]^T [D] [C] \{\delta^e\} dA \\ &= \frac{1}{2} \{\delta^e\}^T [K_p] \{\delta^e\} \quad \dots\dots(4) \end{aligned}$$

2) 節点外力ベクトルを  $\{F^e\}$  とすると、外力のなす仕事  $\Delta W$  は

$$\Delta W = \{F^e\}^T \{\delta^e\} \quad \dots\dots(5)$$

3) 補強材(骨)の剛性マトリックス,  $K_s$

$\{\epsilon_s\}$  補強材のひずみベクトル

$\{\sigma_s\}$  補強材の軸応力ベクトル

$[D_s]$  補強材の剛性 ( $[D_s] = [EA]$ )

$[T_s]$  座標変換マトリックス

とすると

$$\{\sigma_s\} = [D_s]\{\epsilon_s\} \quad \dots\dots(6)$$

(2)より

$$\{\epsilon_s\} = [T_s] \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = [T_s][B]\{\delta\}^e \quad \dots\dots(7)$$

補強材のひずみエネルギー  $\Delta U_s$  は

$$\begin{aligned} \Delta U_s &= \frac{1}{2} \int \{\sigma_s\}^T \{\epsilon_s\} ds \\ &= \frac{1}{2} \int \{\delta^e\}^T [C]^T [T_s]^T [D_s] [T_s] [C] \{\delta^e\} ds \\ &= \frac{1}{2} \{\delta^e\}^T [K_s] \{\delta^e\} \quad \dots\dots(8) \end{aligned}$$

4) 面内応力解析

系のポテンシャル  $\pi$  は

$$\pi = \sum (\Delta U_p + \Delta U_s) - \sum \Delta W \quad \dots\dots(9)$$

(4), (5), (8) と  $\Delta \pi = 0$  より

$$[K]\{\delta\} - \{F\} = 0 \quad \dots\dots(10)$$

ただし

$$[K] = \sum [K_p] + \sum [K_s]$$

$$\{\delta\} = \sum \{\delta^e\}$$

$$\{F\} = \sum \{F^e\}$$

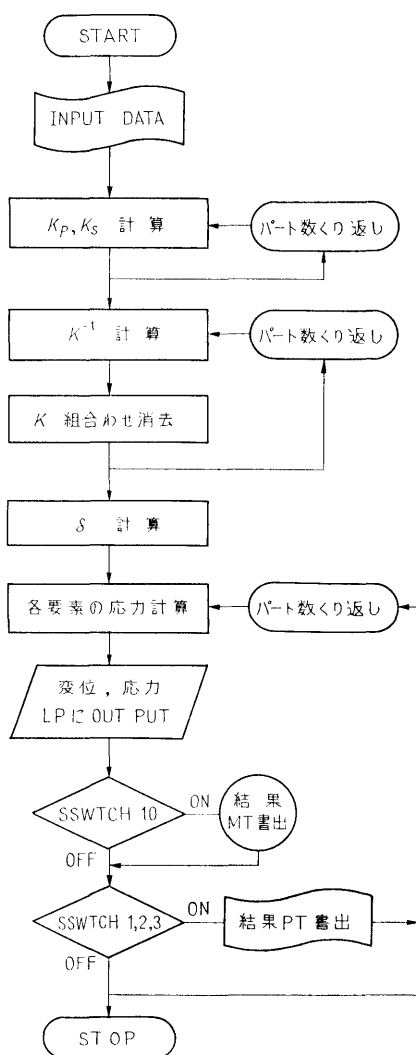


図-2 フローチャート

(10)より節点変位  $\{\delta\}$  が得られ、さらに(3), (6), (7)より各応力が得られる。

2.5 計算の手順 (図-2 参照)

2.6 プログラムの用語および計算機種  
FORTRAN IV, FACOM 270-20

2.7 入 力

- 1) NPART, NBOUN, NLC……全パート数, 拘束点数, 荷重条件数
- 2) NPOIN, NI, NELEM, NNN……1つのパートの全節点数, 内部節点数, 要素数, 部材数
- 3) NOD1, NOD2, NOD3, TH……1つの要素

の節点番号, 板厚

4) NOD1, NOD2, A……1つの部材の両端節点番号, 断面積

2)~4) NPART 回くりかえす。

3) NELEM 個必要

4) NNN 個必要

5) I, X, Y……節点番号とその X, Y 座標

6) NFI, NBX, NBY, BVX, BVY……拘束点の節点番号, 拘束条件 (例 NBX=0, BVX=0.0…X方向を拘束, NBY=0, BVY=1.0…Y方向強制変位 1.0 mm 与える。)

7) I, UX, UY……外荷重を加える節点番号と, X方向, Y方向荷重

2.8 出 力

$u, v$ ……各節点の X 方向と Y 方向の変位

$X_N, Y_N, \sigma_{xy}, \sigma_y, \tau_y, \sigma_1, \sigma_2, \theta$ ……各要素の重心位置座標と X 方向, Y 方向応力, 主応力とその方向

$\sigma_s$ ……各部材の軸応力

また SSWTCH 10 を ON にすれば「BUCK」(座屈計算プログラム)用の入力データが MT に OUTPUT される。

SSWTCH 1, 2, 3 を各々 ON にすることにより, 部材軸応力, 要素主応力, 変位が PTP に OUTPUT される。(別プログラムで XY プロットに図示できる)

### 3. プログラムの検定

#### 3.1 計算精度および誤差

逆行列計算において一部倍語長計算を用いている。自由度数により演算上の精度は異なるが、いっばいに使用しても問題にならない程度の誤差しかない。

#### 3.2 計算所要時間

要素分割数, 自由度数などにより異なるが、一例として鉾石運搬船の中央断面の場合 (9 PART, 要素数 62+65+53+62+50+60+55+47+16, 節点数 36+36+40+40+35+40+38+31+18, 部材数 23+11+21+24+28+20+22+19+11, 荷重条件数 2) で 110 分かかる。荷重条件数はそれほど計算時間に影響しない。

#### 3.3 適用範囲, 制限事項

本プログラムは、二次元構造物しか扱えず、また材料特性は線型でなければならない。計算機のメモリー量から次の制限がある。パート数は15以下、1パート内の節点数 40 以下・部材数は 30 以下、荷重条件は 4 以下。

#### 4. プログラムの使用法について

##### 4.1 オペレート

本プログラムは多数のセグメント、サブルーチンを有し、コンパイルに時間がかかるので MT より、MPXEQ により直接ロードする。所定の SSWTCH を ON にすることによって、各出力データが得られる。

##### 4.2 プログラムの応用

二次元構造物解析用のプログラムであるが、他プログラム (VFRAN) と併用すれば、簡易立体計算が

可能である。またこの計算結果を用いて、有限要素法による座屈計算が可能である。

#### 5. あとがき

本プログラムによれば、それほど細かい要素分割をしなれば、大多数の船体断面の平面応力解析が可能である。補助記憶装置としてドラムと MT 2 台をいっばいに使用している上に多数のセグメントサブプログラムを有しているので計算能率は悪い。この程度の計算は本来もっと大型の計算機システムにおいて効率的に扱われるものである。

## 12. 有限要素法による熱伝導解析プログラム

機関開発部 塚田 悠治・天田 重庚・町田 明正

機関性能部 前橋 正雄・塩出 敬二郎・高井 元弘

### 1. プログラムの目的および概要

形状の複雑な熱機関部品等の熱や強度解析に、有限要素法は有効であると考えられる。本プログラムは、当所共用計算機 FACOM 270-20 の使用を前提に、有限要素法により二次元の熱伝導解析を行なうことを目的とした汎用プログラムである。

### 2. プログラムの内容

#### 2.1 プログラムの番号および名称

45-024, SASKE-H

#### 2.2 製作者

機関開発部 塚田悠治, 天田重庚, 町田明正  
機関性能部 前橋正雄, 塩出敬二郎, 高井元弘

#### 2.3 製作年月

昭和48年5月

#### 2.4 計算の基礎となる理論の概要

二次元熱伝導の基礎方程式は、

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + Q \quad \dots (1)$$

境界条件は、

$$\left. \begin{aligned} T &= T_s && \text{on } \Gamma_T \\ -k \frac{\partial T}{\partial n} &= q_n && \text{on } \Gamma_q \\ h(T_\infty - T) &= k \frac{\partial T}{\partial n} && \text{on } \Gamma_h \end{aligned} \right\} \dots (2)$$

(28)

で与えられる。

ただし、 $\rho$ : 比重量,  $c$ : 比熱,  $k$ : 熱伝導率,  $T$ : 温度,  $t$ : 時間,  $Q$ : 単行面積あたりの熱発生量,  $n$ : 境界の法線方向,  $q_n$ : 単位長さあたりの熱量,  $h$ : 熱伝達率,  $T_\infty$ : 境界  $\Gamma_h$  と接する媒質温度である。

(1)式, (2)式と等価の汎関数は次式で与えられる。

$$\chi = \iint \left\{ \frac{1}{2} k \left[ \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 \right] - QT + \rho c \frac{\partial T}{\partial t} T \right\} \times dx dy + \int_{\Gamma_q} q T ds + \int_{\Gamma_h} \left( \frac{1}{2} h T^2 - h T_\infty T \right) ds \quad \dots (3)$$

次に、 $x-y$  座標系に節点  $1(x_1, y_1)$ ,  $2(x_2, y_2)$ ,  $3(x_3, y_3)$  の3節点からなる三角形要素  $e$  を考え、三角形要素内の温度分布を次式で与える。

$$T = \frac{1}{A} (A_1 T_1 + A_2 T_2 + A_3 T_3) \quad \dots (4)$$

全要素についての汎関数の極値条件より次式を得る。

$$[K]\{T\} + [P]\left\{ \frac{\partial T}{\partial t} \right\} + \{B\} = 0 \quad \dots (5)$$

ただし、 $T_i$ : 節点  $i$  の温度,  $\{T\}$ : 節点温度ベクトル,  $\{B\}$ : 節点に与えられる熱量ベクトル,  $[K]$ : 定常項の係数マトリックス,  $[P]$ : 非定常項の係数マトリックス,  $\{\partial T/\partial t\}$ : 節点の温度勾配ベクトルである。

(5)式を用いて、時間刻み  $\Delta t$  間の温度変化を求め、各時間ごとの解を積み重ねて行き温度変化を求める。このために次のような方式を用いた。

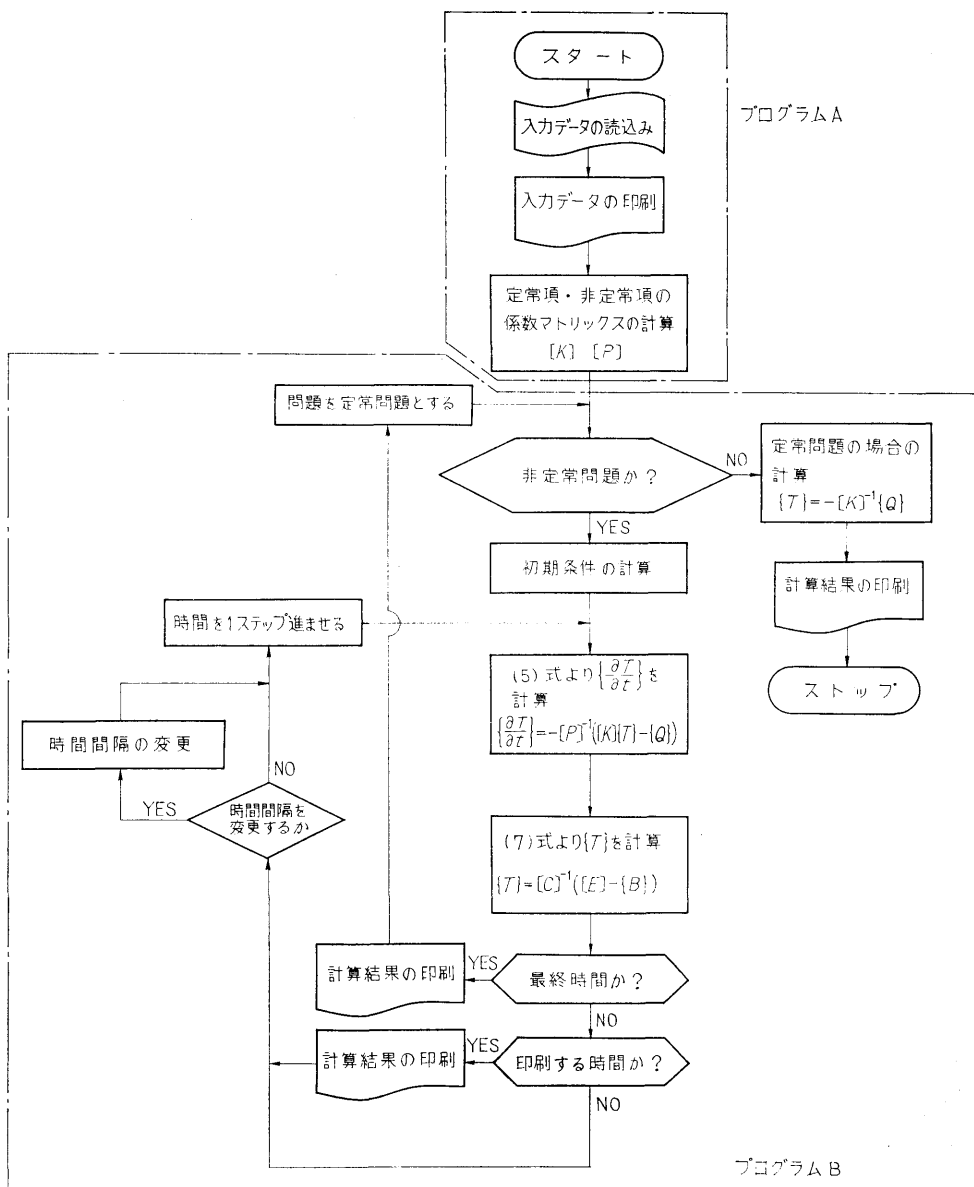


図-1 SASKE-H3 のフローチャート

$$\frac{\{T\}_t - \{T\}_{t-\Delta t}}{\Delta t} = \frac{1}{2} \left( \left\{ \frac{\partial T}{\partial t} \right\}_t + \left\{ \frac{\partial T}{\partial t} \right\}_{t-\Delta t} \right) \quad \dots\dots(6)$$

の関係を用い、(5)式、(6)式より

$$[C]\{T\}_t = [E]_{t-\Delta t} - \{B\}_t \quad \dots\dots(7)$$

を得る。ただし

$$\left. \begin{aligned} [C] &= \left( [K] + \frac{2}{\Delta t}[P] \right) \\ [E]_{t-\Delta t} &= [P] \left( \frac{2}{\Delta t}\{T\}_{t-\Delta t} + \left\{ \frac{\partial T}{\partial t} \right\}_{t-\Delta t} \right) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots(8)$$

計算は、 $t=0$  の温度  $\{T\}_{t=0}$  を初期条件とし、(5)

式より  $\{\partial T/\partial t\}_{t=0}$  を求め、(7) 式より  $\{T\}_{t=dt}$  を求める。以下、くり返して  $t=2dt, 3dt, \dots, ndt$  と求めれば良い。

#### 2.5 計算の手順

プログラムは、A, B 独立した 2 つのプログラムから成る。図-1 へプログラムのフローチャートを示す。

#### 2.6 プログラム用語および計算機種

FORTRAN IV, FACOM 270-20

#### 2.7 入力

節点・要素の総数、各節点の座標、各要素を構成する節点番号の組合せ、材料の熱的特性値、境界条件、時間間隔の大きさ等。

#### 2.8 出力

入力データのすべて、および各節点の温度等。

### 3. プログラムの検定

#### 3.1 計算精度および誤差

計算精度は、計算条件や要素分割法により異なるが、今迄の計算例では、3~10% 程度の誤差であった。

#### 3.2 計算所要時間

節点数によって異なるが、かなり長時間を要する。

一例をあげると、節点数 256 の定常問題で約 40 分同節点数の非定常問題では、時間刻みの 1 ステップごとに約 15 分を要した。

#### 4. プログラムの使用法について

BATCH 処理にて行なう。

#### 5. あとがき

このプログラムは開発段階に応じて、SASKE-H1 より H3 まで製作したが、ここでは主として H3 について述べた。

#### 参 考 文 献

- 1) 塚田他, 有限要素法による熱伝導解析プログラムについて (SASKE-H1), 船研研究発表会講演概要, (1972)
- 2) 塚田他, 有限要素法プログラム SASKE について (熱伝導解析プログラム SASKE-H2), 船研研究発表会講演概要, (1972)
- 3) 高田他, 有限要素法熱伝導解析プログラム SASKE-H1, 船研報告, 第 9 巻第 5 号, (1972)
- 4) O.C. Zienkiewicz, Y.K. Cheung, マトリックス有限要素法, 培風館

## 13. 地面に衝突する周辺乱流ジェットの計算プログラム

機関開発部 村 尾 麟 一

### 1. プログラムの目的および概要

ACV の浮上特性を知るために、周辺ジェットの流体力学に特別の関心が払われている。従来、等角写像を用いた非粘性流れの計算が発表されているが、実験とは良い一致を示していない。実際、ジェットの流れには、粘性に基づく乱流混合がかなりの役割を果していると思われる。一方、平面ジェットの研究はかなり進んでおり、これを修正使用すれば、湾曲ジェットの良い近似が得られると思われる。本プログラムでは、乱流混合を考慮した周辺湾曲ジェットの圧力分布、速度分布等を求める。

### 2. プログラムの内容

#### 2.1 プログラムの番号および名称

( 30 )

#### 47-008 Peripheral Jet Theory

#### 2.2 製作者

東大: 佐々木誠, 機関開発部: 大屋修司

#### 2.3 製作年月

昭和44年1月 (NEAC 2206 用に) 製作, 昭和47年7月 (FACOM 270-20/30 用に) 再編集

#### 2.4 計算の基礎となる理論の概要

図-1 に示すように、周辺湾曲ジェットを便宜的に、3 領域 (初期領域, 主領域, 衝突領域) に分割して、以下の仮定の下に、流速・圧力分布の計算を行なう。

① 流れは非圧縮性である。

② クッション圧力は一様である。

初期領域では、

③ ジェットは、ノズル出口面に直角に出て、ポテンシャルコア中の流れは、自由渦流れの速度分布

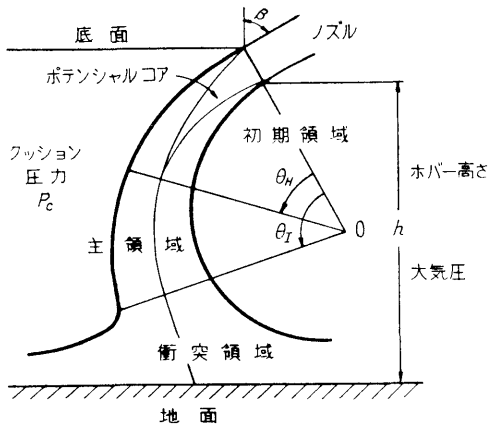


図-1 周辺ジェットモデル

をもつ。

④ ポテンシャルコアの両側では、相似速度分布をもつ乱流境界層が発達する（アブラモビッチの式適用）。

主領域では、

⑤ ポテンシャルコアの終了と同時に、完全に発達した乱流ジェットが始まる。速度最大の位置を結ぶ曲線の曲率は一定で、ポテンシャルコアの終了点を通る。

⑥ 速度分布は平面ジェットの式（アブラモビッチの式）を用いる。

衝突領域では、

⑦ 完全に発達した乱流ジェットが地面と衝突する領域は、地面迄の距離が相当ジェットの幅の 1.65 倍になる所から始まり、衝突後大気およびクッション側の圧力が、各々、大気圧、クッション圧に等しくなるところで終る。

詳細は文献 4) を参照されたい。

### 2.5 計算の手順

計算の手順を、図-2 に示す。

### 2.6 プログラム用語および計算機種

FORTTRAN, FACOM 270-20/30

### 2.7 入力

必要な入力データは次のとおりである。

- BETAD ジェットノズルの角度
- H ホバー高さ
- AK 衝突領域決定パラメータ (1.65)
- PC クッション圧力
- M 制御用数値

### 2.8 出力

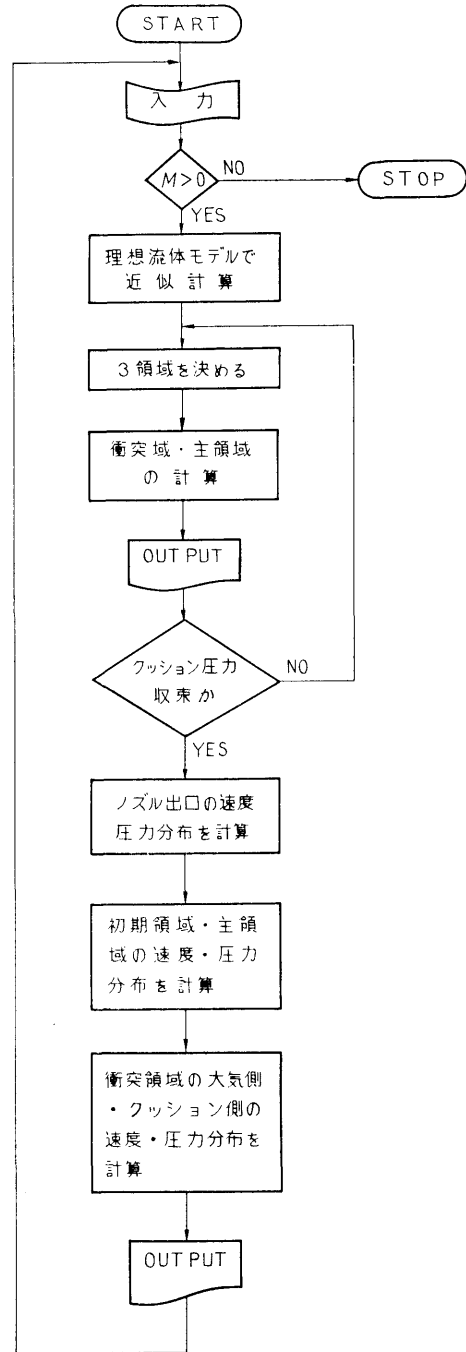


図-2 フローチャート

- ① 入力の全部
- ② クッション圧力収束までの反復計算（回数，クッション圧力，3領域の境界，ジェット幅他）

- ③ 速度・圧力分布 (位置  $\theta$ ,  $r$ , 速度, 圧力, 全圧, 全流量, 運動量, ジェット幅)

### 3. プログラムの検定

#### 3.1 計算精度および誤差

この計算は多くの仮定をおいているので, 実験との比較なしには評価できない。

#### 3.2 計算所要時間

1 データ当たり約5分 (コンパイルも含む)。

### 4. プログラムの使用方法について

#### 4.1 オペレート

プログラムの実行は, ¥BATCH で PT より行なう。

#### 4.2 プログラムの応用

ACV のクッション圧力と流量特性, 変化の大きくない場合の ACV の動特性, 流体素子の特性の計算と設計に応用できる。

### 5. あとがき

実験との比較によれば, ジェットの流出方向がノズ

ル出口において出口面と直角であるという本計算法の仮定が満足される場合に, 通常の ACV の作動範囲 [(地面とノズルとの距離/ノズル幅)=1~10] で計算値は実験結果とかなりよく一致することが確かめられた。

作動範囲を更に拡張するためには乱流混合層の発達における湾曲の影響を考慮する必要がある。またノズル出口におけるジェットの流出方向がノズル面に直角でない一般的な場合については, ジェットノズル上流の流れ場を含む解析が必要であるが今後解明の余地があると思われる。

### 参 考 文 献

- 1) R.A. Sawyer: J. Fluid Mech. 9-4 (1960)
- 2) R.A. Sawyer: J. Fluid Mech. 17-4 (1963)
- 3) G.N. Abramovich: The Theory of Turbulent Jets, MIT Press.
- 4) R. Murao, T. Sato, S. Nakamura: Proc. 19th Japan National Congress for Applied Mechanics (1969)

## 14. 圧縮性流体の管内非定常流の計算プログラム

機関性能部 塚原茂司・塩出敬二郎

### 1. プログラムの目的および概要

ディーゼル機関の吸排気管内の作動ガスの流れは, 吸排気弁などにより周期的に完全に遮断されるために脈動流となる。従来, 吸排気管内の状態量の計算法には, 排気管内の容積を完全に熱力学的に平衡と考えて場所的にある平均的な値を熱力学の関係式から求める方法と, 管内非定常流を図式的に特性曲線法で解く方法とがあった。しかしながら, 前者に関しては, 管内の位置に無関係な平均的なものしか求められず, また後者に関しては, 非定常流の解析に対しては適当な手段かと思われるが, 精度的にまた時間的に不利な点がある。特性曲線法を使用して非定常流を解析することは, 前記したごとく適当な方法と考えられるので, ここでは最近発達している電子計算機による数値解法<sup>1)</sup>を参考にして, 特性曲線法により圧縮性流体の

管内非定常流の計算プログラムを作成したので, 以下これについて述べる。

### 2. プログラムの内容

#### 2.1 プログラムの番号および名称

46-038

Unsteady Flow Analysis by the Characteristic Method.

#### 2.2 製作者

機関性能部 塚原茂司

” 塩出敬二郎

#### 2.3 製作年月

昭和46年

#### 2.4 計算の基礎となる理論の概要

管内の流れは一次元的で, 断熱状態に保たれていると仮定すると, 連続, 運動量の式等基礎式は次のとお



りとなる。

$$\rho \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} = 0 \quad \dots\dots(1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad \dots\dots(2)$$

但し、 $\rho$  は密度、 $p$  は圧力、 $u$  は流速、 $t$  は時間、 $x$  は距離である。(1)、(2)式には従属変数として、 $u, \rho, p$  があり、これを次の関係式により、 $u$  と  $c$  に置き変える。すなわち、

$$c^2 = Kp/\rho \quad \dots\dots(3)$$

$$p\rho^{-K} = \text{const} \quad \dots\dots(4)$$

但し、 $c$  は音速、 $K$  は比熱比である。

従って (1)、(2) 式は次式になる。

$$c \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{2}{K-1} \left( \frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} \right) = 0 \quad \dots\dots(5)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{2c}{K-1} \frac{\partial c}{\partial x} = 0 \quad \dots\dots(6)$$

いま (6) 式に定数  $\lambda$  を乗じて得られる式と (5) 式を線形結合させると次式になる。

$$\left\{ \frac{\partial u}{\partial t} + (u + \lambda c) \frac{\partial u}{\partial x} \right\} + \frac{2}{K-1} \lambda \left\{ \left( \frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\lambda u + c}{\lambda} \right) \times \frac{\partial c}{\partial x} \right\} = 0 \quad \dots\dots(7)$$

$u = u(x, t)$ 、 $c = c(x, t)$  が (5)、(6) 式の解とすると

$$du = \left( \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} \frac{dx}{dt} \right) dt \quad \dots\dots(8)$$

$$dc = \left( \frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial c}{\partial x} \frac{dx}{dt} \right) dt \quad \dots\dots(9)$$

となる。(7)式の左辺第1項を(8)式と、同じく(7)式の左辺第2項と(9)式とをそれぞれ対応させると  $dx/dt$  に関し、次の関係が求まる。

$$dx/dt = u + \lambda c \quad \dots\dots(10)$$

$$dx/dt = (\lambda u + c)/\lambda \quad \dots\dots(11)$$

(10)、(11) 式から  $\lambda$  を求めると

$$\lambda^2 = 1 \text{ あるいは } \lambda = \pm 1 \quad \dots\dots(12)$$

従って、 $dx/dt$  は 2 個の異なる値を持つ。

すなわち、

$$(dx/dt)_1 = u + c \quad \dots\dots(13)$$

$$(dx/dt)_2 = u - c \quad \dots\dots(14)$$

(13)、(14) 式は点  $(x, t)$  における特性方向と呼ばれ、物理的には、流体素子が  $u$  なる速度で移動し、そこで発生したじょう乱の軌跡のその点における傾斜は流れ方向に  $u+c$ 、逆方向に  $u-c$  であることを示している。

(8)、(9) 式を (7) 式に代入する。

$$du + [2\lambda/(K-1)]dc = 0 \quad \dots\dots(15)$$

(15) 式に  $\lambda = \pm 1$  を代入すると次式を得る。

$$du + [2/(K-1)]dc = 0 \quad \dots\dots(16)$$

$$du - [2/(K-1)]dc = 0 \quad \dots\dots(17)$$

(16)、(17) 式はそれぞれ (13)、(14) 式上で成立するから、これら 4 式を用いて点  $(x, t)$  における  $u, c$  を求めることができる。特性曲線法による数値解法は参考文献を参照されたい。

2.5 計算の手順

図-1 にこの計算のフローチャートを示す。サブルーチンは管入口流速あるいは管出口流速を求めるためのもので、そのうち管入口流速を求めるサブルーチンにはロータリバルブの通過面積を求めるサブルーチンが付いている。

2.6 プログラム用語および計算機種

プログラム用語は Fortran IV で、計算機種は FACOM 270-20 である。

2.7 入力

初期流体密度  $\rho_0$ 、断熱指数  $K$ 、時間分割  $\Delta t$ 、距離分割  $\Delta x$ 、全分割数  $N$ 、入口タンク条件  $(P_R, T_R)$ 、

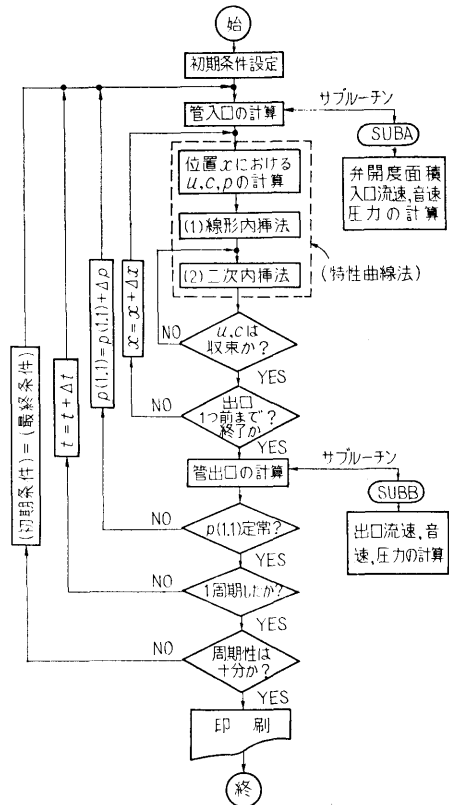


図-1 非定常流計算のフローチャート

大気条件 ( $P_a, T_a$ ), ロータリバルブ回転数  $n_R$ , 管内径  $d_1$ , 出口ノズル径  $d_2$ , ロータリバルブ形状決定のための定数

## 2.8 出力

計算条件 (上記 2.7 のうちロータリバルブ形状決定のための定数を除いて全部), 各回転角 ( $0 \sim 270$  度まで約 2 度おき) に対し, 分割場所ごとのガス流速  $u$ , ガス音速  $c$ , 圧力  $p$

## 3. プログラムの検定

### 3.1 計算精度および誤差

この計算には収束計算がいくつかあり, そのいずれも 0.01 の精度内に入った時に次のステップに移行するようにしてある。

### 3.2 計算所要時間

$\Delta t, \Delta x$  の分割数によって異なる。現在  $\Delta x$  を軸方向

51 に分割してあるが, この場合には最終的に収束するまで (印字時間も含めて) 45~60 分程度

## 4. プログラムの使用法について

### 4.1 オペレート

プログラムの実行は, ¥BATCH で PT より行なう。

### 4.2 プログラムの応用

管内非定常流は油圧工業, トンネル内の列車による空気流れ, 原子炉の事故解析, その他各方面でみられこれらの非定常現象の計算には若干の修正を加えれば応用可能である。

## 参考文献

- 1) Fox, L.: Numerical Sol. of Ordinary and Partial Dif. Eqs., ADIVES International Series in Enging Sciences, Pergamon, Addison-Wesley, London

# 15. 一体型船用炉二次蒸気系における放射性窒素発生量の計算プログラム

原子力船部 山越寿夫・植木紘太郎

## 1. プログラムの目的および概要

一体型船用炉の小形化のための一策として蒸気発生器を炉心に近づけることが考えられる。この場合, 炉心からの高速中性子の影響で蒸気発生器二次水中に放射性窒素が発生する。これは, 二次蒸気系機器が放射性窒素から生ずる  $\gamma$  線の線源となり, 好ましくない事態である。そこで放射性窒素の発生量の低減化をはかった蒸気発生器の設計を検討する必要がある。このような事情から, 与えられた蒸気発生器に対し放射性窒素の発生量を計算するべく, 本計算プログラムを作成した。計算においては, 蒸気発生器の形状, 構造, 材質, 炉心に相対的な蒸気発生器の位置, 蒸気発生器二次水の流速および密度の空間分布, 炉出力の空間分布, 炉心と蒸気発生器との間の物質の種類と物質層の大きさや配置に対する設計条件が考慮の対象となる。

## 2. プログラムの内容

### 2.1 プログラムの番号および名称

ACTIV

( 34 )

### 2.2 製作者

原子力船部 山越寿夫, 植木紘太郎

### 2.3 製作年月

昭和46年12月

### 2.4 計算の基礎となる理論の概要

船研報告第9巻第1号参照

### 2.5 計算の手順

図-1 のフローチャートに計算手順を示す。

### 2.6 プログラム用語および機種

用語 FORTRAN IV

機種 UNIVAC 1108

CDC 6600

NEAC-2200-MODEL 400

### 2.7 入力

NCR (I3) 炉心出力分点数 (半径方向)

NCZ (I3) 炉心出力分点数 (高さ方向)

NN (I3) 炉心, 蒸気発生器間領域数

AVSS( $j$ ),  $j=1 \sim 8$  (8E12.4)

エネルギー別中性子源強度

RWEIT( $j$ ),  $j=1 \sim 20$  (5E12.4)

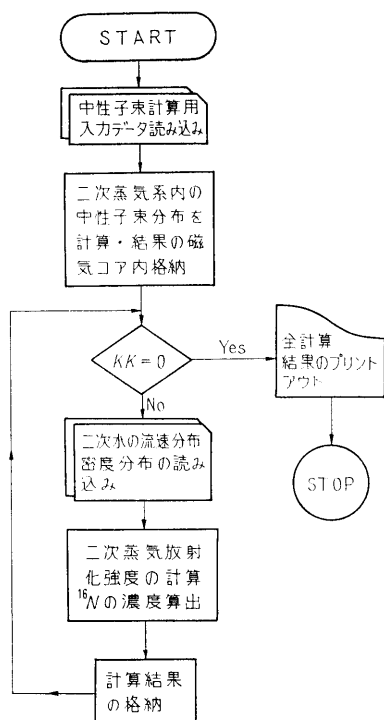


図-1 フローチャート

規格化された半径方向出力分布比  
 HH(1), E12.4  
 炉心高さ (cm 単位)  
 REMVAL( $j, k$ )  $j=1\sim NN, k=1\sim 8$  (5E12.4)  
 各領域の除去断面積  
 SIGACT( $j$ ),  $j=1\sim 8$  (5E12.4)  
 エネルギー別の  $^{16}\text{O}$  放射化断面積  
 RCOMP( $j$ ),  $j=1\sim 5$  (5E12.4)  
 放射化強度計算位置の半径方向座標  
 ZCOMP( $j$ ),  $j=1\sim 60$  (5E12.4)  
 放射化強度計算位置の高さ方向座標  
 VELOCI( $j$ ),  $j=1\sim 60$  (5E12.4)  
 二次水の高さ方向流速分布  
 DENSTY( $j$ ),  $j=1\sim 60$  (5E12.4)  
 二次水の高さ方向密度分布  
 SGLOW(1) (E12.4)  
 蒸気発生器下端位置  
 SGHEI(1) (E12.4)  
 蒸気発生器上端位置  
 KK(I3) 入力データ終了の場合ブランクカー

ド。それ以外は RCOMP の  $j$  の数を用いる。

## 2.8 出力

FLUX( $j, k$ )  $j=1\sim 5, k=1\sim 150$  (0E12.4)

二次水放射化の際の中性子束分布

ACTDIS( $j$ ),  $j=1\sim 5$  (5E12.4)

蒸気発生器上部における  $^{16}\text{N}$  の半径方向濃度分布

ACTIV(1), (E12.4)

二次系出口における  $^{16}\text{N}$  の平均濃度 (個/cm<sup>3</sup>)

## 3. プログラムの検定

### 3.1 計算精度および誤差

炉心内出力分布の分点数のうち、角度方向はガウスの7点法を用いて積分している。9点法を用いても誤差は1%程度である。高さ方向は10等分し、半径方向は5等分をしているがこれら分点数を2倍にすると計算結果に5%程度の誤差を生ずる。

### 3.2 計算所要時間

放射化のための中性子束分布の計算にほとんどの計算時間を費やす。NCR=5, NCZ=10, ZCOMPを3点 ZCOMPを60点とした場合の計算時間は、NEAC-2200—MODEL 400で4時間、UNIVAC-1108またはCDC 6600で約3分かかる。

### 3.3 適用範囲、制限事項

計算時間の点から高速電算機を用いた方が有利である。

## 4. プログラムの使用法について

### 4.1 オペレート

### 4.2 プログラムの応用

二次系機器類への蒸気到達時間と機器類の含水量が与えられれば、二次系機器周辺の $\gamma$ 線線量率分布が推算可能である。また、 $^{16}\text{N}$ の発生量を小さくした一体型炉の蒸気発生器の設計に利用することができる。

### 4.3 他機種への移行

## 5. あとがき

本プログラムに二次系機器周辺の線量率分布計算コードを結合させ、プロッターを用いて機関室内線量率分布を図示する機能を付加する予定である。

## 16. 三次元不規則形状の遮蔽体を透過する $\gamma$ 線の線量率を 計算する (モンテカルロ) プログラム

原子力船部 伊藤 泰 義

### 1. プログラムの目的および概要

不規則な形状をもつ遮蔽体を透過する  $\gamma$  線のエネルギースペクトルを計算するには三次の次元が必要になる。しかし三次元の計算は一般には非常に困難でその方法はほぼモンテカルロ法に限られる。しかもモンテカルロ法でも計算時間は膨大だという難点がある。それで遮蔽体を格子点に分割し、その格子点上のみ  $\gamma$  線が移動するとしてやれば計算時間に大きな節約が得られるがしかし精度は悪くなる。こうした計算時間と精度の兼ねあいで、こうした格子点のモンテカルロ法も実用性が出てくる。このプログラムは Hungerford と Razani の格子点の考え (Lattice Model) を用いて三次元の不規則形状 (例としてダクトの問題) のモンテカルロプログラムを作成して、透過、漏洩  $\gamma$  線のエネルギースペクトルを計算するものである。

### 2. プログラムの内容

#### 2.1 プログラムの番号および名称

TDGRT-1

#### 2.2 製作者

原子力船部 伊藤 泰 義

#### 2.3 製作年月

昭和47年12月

#### 2.4 計算の基礎となる理論の概要

一般に定常のボルツマン輸送方程式は次のように書き表わされる。

$$\begin{aligned} & \Omega \nabla I(\mathbf{r}, \Omega, \lambda) + \mu(\mathbf{r}, \Omega, \lambda) I(\mathbf{r}, \Omega, \lambda) \\ & = \int_0^c d\lambda' \int_0^{4\pi} K(\lambda', \lambda) I(\mathbf{r}', \Omega', \lambda') d\Omega' + S(\mathbf{r}, \Omega, \lambda) \end{aligned}$$

ここで  $I(\mathbf{r}, \Omega, \lambda)$ : 光子の角度エネルギー束

$\mu(\mathbf{r}, \Omega, \lambda)$ : 線吸収係数

$K(\lambda', \lambda)$ : Klein-Nishina の散乱関数

$S(\mathbf{r}, \Omega, \lambda)$ : 純線源

上記の式からある格子点の  $\gamma$  線束  $\phi(\mathbf{r}_{ijk}, \Omega_m, \lambda)$  は

$$\phi(\mathbf{r}_{ijk}, \Omega_m, \lambda) = \sum_{n=0}^{\infty} dm \left\{ \left[ \sum_{m'} \int_{\lambda'} \phi(\mathbf{r}_{ijk} \right. \right.$$

$$\left. \left. - Md_m \Omega_m, \Omega_{m'}, \lambda' \right) \times K(\mathbf{r}_{ijk} - Md_m \Omega_m, \Omega_{m'} \rightarrow \Omega_m, \lambda' \rightarrow \lambda) \times d\lambda' d\Omega_{m'} + S(\mathbf{r}_{ijk} - Md_m \Omega_m, \Omega_m, \lambda) \right\} \exp \left[ - \sum_{q=0}^M \mu(\mathbf{r}_{ijk} - q' d_m \Omega_m, \lambda) d_m \right]$$

上式の  $m$  は  $m=26$  に固定される。これはある格子点での  $\gamma$  線の散乱が  $4\pi$  ステラジアンで26方向のみしか許されない事を意味している。また各格子点間隔は大体物質の線源エネルギーの平均自由行程の  $1/3 \sim 1/6$  がとられる。

#### 2.5 プログラム用語および計算機種

FORTRAN IV 機種 CDC-6600

#### 2.6 入力

(1) PROBLEM NAME	6文字
(2) ジェオメトリの指定	I 10
(3) 領域数	I 10
(4) エネルギー放出の型	I 10
(5) 最大エネルギー	E 12.5
(6) エネルギーグループ群	20E 12.5
(7) エネルギーの割合	20E 12.5
(8) 線源強度	E 12.5
(9) 線源放出比	E 12.5
(10) 1MFP の長さ	F 10.4
(11) 物質の配列	A 6
(12) 元素の数	F 10.3
(13) 測定位置	F 10.3

#### 2.7 出力

各位置でのエネルギースペクトル、線量率等が得られる。

### 3. プログラムの検定

#### 3.1 計算精度および誤差

この理論の仮定からして計算誤差が一番注目される所であるが、対象とする問題によってだいぶ誤差は異なるが、再生係数を求める問題では通常のモンテカルロ計算と比較して5千個で7%ぐらいである。また一回屈曲ダクトの実験ではやはり5千個で30%以内で計算と実験は一致している。

### 3.2 計算所要時間

問題の対象によって時間は異なるが、ダクトの材質を1種類とした時、5千個で約2分ぐらいであった。

### 3.3 適用範囲, 制限事項

理論の仮定上, 対象とするジオメトリーは大きいほど, 精度はよくなるが, すべての場合について計算は行っていないのははっきりとは明言できない。

## 4. プログラムの用法について

### 4.1 オペレート

カードまたは磁気テープからもロードできる。

### 4.2 プログラムの応用

プログラムのオプションとして, ジョメトリーで4種類, エネルギータイプで7種類, 放出方向で5種類等の異なった問題が計算できるようになっている。

## 5. あとがき

理論そのまま, 中性子の透過問題にも応用できるので, 中性子用のプログラムも開発したいと思う。

## 参 考 文 献

- 1) A. Razani & H.E. Hungerford. NSE 46, 1-11, (1971).

# 17. 一回屈曲ダクトの $\gamma$ 線ストリーミング計算プログラム

原子力船部 伊藤泰義

## 1. プログラムの目的および概要

遮蔽体中には大小のダクトが貫通している。これらのダクトからもれでる放射線の量は遮蔽体を透過してくる放射線の量よりも大きい事がある。そのためダクトを遮蔽体中で一回屈曲させて出てくる放射線量を小さくする事が一般に行なわれている。このプログラムは LeDoux-Chilton のアルベド法を用いてこうしたダクトの出口の線量率を計算するものである。

## 2. プログラムの内容

### 2.1 プログラムの番号および名称

DUCT-RD (ダクトの断面が円筒のもの)

DUCT-RT (ダクトの断面が矩形のもの)

### 2.2 製作者

原子力船部 伊藤泰義

### 2.3 製作年月

昭和46年

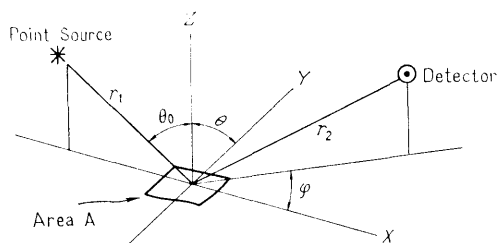
### 2.4 計算の基礎となる理論の概要

線源から出た放射線はある点で散乱して測定器に入るとする。測定点での線量率  $D$  は

$$D = \frac{D_0 \alpha(E_0, \theta_0, \theta, \varphi) A \cos \theta_0}{r_1^2 r_2^2}$$

$D$ : 散乱後の線量率 (R/hr)

$D_0$ : 線源からの単位距離での線量率 (R/hr)



$\alpha(E_0, \theta_0, \theta, \varphi)$ : 微分アルベド

$A$ : 散乱面積 (cm<sup>2</sup>)

$r_1$ : 線源と散乱点との距離 (cm)

$r_2$ : 散乱点と測定点との距離 (cm)

$E_0$ : 入射エネルギー

$\theta_0$ : 入射角,  $\theta$ : 反射角,  $\varphi$ : 方位角

で与えられる。

また

$$\alpha(E_0, \theta_0, \theta, \varphi) = \frac{C(E_0)K(\theta_s)10^{26} + C'(E_0)}{1 + \frac{\cos \theta_0}{\cos \theta}}$$

$$\cos \theta_s = \sin \theta_0 \sin \theta \cos \varphi - \cos \theta_0 \cos \theta$$

$C, C'$  は  $E$  に依存する係数

この式を用いて三回散乱まで計算し, さらにコーナ部分の効果 (Lip effect) も考慮している。

プログラムは4つの部分に分けられている。

(1) 一回散乱のコーナ効果のプログラム

- (2) Lip effect のプログラム
- (3) 多重散乱のコーナ効果のプログラム
- (4) 壁による多重散乱の効果のプログラム

#### 2.5 プログラム用語および計算機種

FORTRAN IV CDC-6600

#### 2.6 入 力

$E0$ : 初期エネルギー  $D0$ : 線源からの単位距離での線量率  $EL1, EL2$ : ダクトの第一脚, 第二脚の長さ  
 矩形ダクトならば  $W_1, W_2, H$  ダクトの縦, 横, 高さ

円筒ダクトならば  $R$ : 内径

以上すべて F8.4 で入力

#### 2.7 出 力

ダクトの出口での線量率およびその線量率に寄与する効果の量と割合が出る。

### 3. プログラムの検定

#### 3.1 計算精度および誤差

微分アルベドの値は大体数パーセントの誤差を含んでいるが, 全体として計算値と実験値を比較すると 30% 以内の誤差で一致している。

#### 3.2 計算所要時間

測定点 1 点に対して大体 0.1 分程度である。

#### 3.3 適用範囲, 制限事項

微分アルベドの数値を出す半経験式の適用範囲がエネルギーで 0.1 MeV から 10.0 MeV までである。

### 4. プログラムの使用法について

#### 4.1 オペレート

#### 4.2 プログラムの応用

#### 4.3 他機種への移行

このプログラムは NEAC-2206 用にかかれたものを CDC-6600 用に変換した。

### 5. あとがき

このプログラムは微分アルベドの項を中性子用であれば中性子のダクトにも応用できる。ただしダクトの材質としてはコンクリートを用いて, かつ一回屈曲ダクトである事が条件になっている。

### 参 考 文 献

- 1) J.M. Chapman: USNCEL-R-264

## 18. 原子炉遮蔽の最適設計計算プログラム

原子力船部 金 井 康 二

### 1. プログラムの目的および概要

近年, 特に条件の厳しい船用炉あるいは宇宙船用原子炉の遮蔽設計において, むだをはぶいた**効率の良い**遮蔽体を考えることが重要な課題となってきた。

このような要求に対して, 一般には多重層で遮蔽体を構成することが有理であることから問題をしばって多重層の各物質・配列順序を固定して, 遮蔽体外周で与えられた設計基準線量を満足し, 遮蔽重量を最小にするような多重層の各厚さを電子計算機により, 手短かに求める計算コードが多数開発されている。<sup>1)</sup>

しかしながら, 最適な遮蔽体を設計する場合には, 厚さのほかに遮蔽形状・遮蔽材の選定, 多重層の層状数・配列順序の決定による影響も考慮しなければならない。また評価の対象となる指標も, 重量のみでなく, 遮蔽体設置に伴うコスト・遮蔽体がしめる空間容積お

び遮蔽体の目的によっては放射線束に関係する量として評価しなければならない。

特に船用炉の場合には, 船種によって上記の各評価量に対するウエイトは異なり, 実際に則した物理的モデルを構成するには各評価量の関数関係を求めて, その関数のもとで最適な遮蔽体を考慮すべきである。

ここに紹介する原子炉遮蔽の最適化計算プログラム SOLA シリーズでは, 従来のプログラムとは異なり上述に指摘した点を考慮して, 幅広い問題に対処できるように物理的モデルを数種類(現況では 3 種類)設定し以下のように SOLA-I, II, …… とした。

#### (1) SOLA-I

遮蔽体全長が変化するものとし, 遮蔽体外周での線量条件を満足しかつ空間容積, 重量, コストの線形結合であらわされた評価値を最小にする各位置での物質を求める。

(2) SOLA-II

遮蔽体全長を固定し、重量、コストおよび遮蔽体外周での放射線束の線形結合であらわされた評価値を最小にする各位置での物質を求める。

(3) SOLA-III

遮蔽体全長を固定し、遮蔽体外周での線量条件を満足しかつ重量およびコストの線形結合であらわされた評価値を最小にする各位置での物質を定める。

SOLA シリーズでは現在、一次元化された平板、円筒および球形状が取扱い可能であり、最適化の手法としては、微分ダイナミック・プログラミング法を適用した。本プログラムは大型電子計算機 IBM 360 モデル 195 および CDC 6600 用に開発されている。

2. プログラムの内容

2.1 プログラムの番号および名称

SOLA-I

SOLA-II

SOLA-III

2.2 製作者

原子力船部 金井 康二

2.3 製作年月

昭和47年

2.4 計算の基礎となる理論の概要

参考文献 2) を参照されたい。

2.5 計算の手順

細部は異なるが簡単なブロックチャートを 図-1 に示す。図-1 中条件の検討は最適解としての条件のほかに SOLA-I および SOLA-III では放射線線量の終端条件の検討も含められている。

2.6 プログラムの用語および計算機種

FORTRAN IV IBM 360-195 CDC 6600

2.7 入力

- (1) PROB 計算のタイトル (72文字)
- (2) DATE 実行年月日 (月, 日, 年の順に各 2桁) 3 I 2
- (3) IGEOM 形状 { 1: 平板 1 2  
2: 円筒  
3: 球
- (4) MEDIUM 取扱う遮蔽材の数 ≤ 10 I 2
- (5) NGPN 中性子グループ数 ≤ 10 I 2
- (6) NGPG ガンマ線グループ数 ≤ 10 I 2
- (7) RIN 遮蔽体内径 (cm) E 14.6
- (8) RFL 遮蔽体外径 (cm) E 14.6

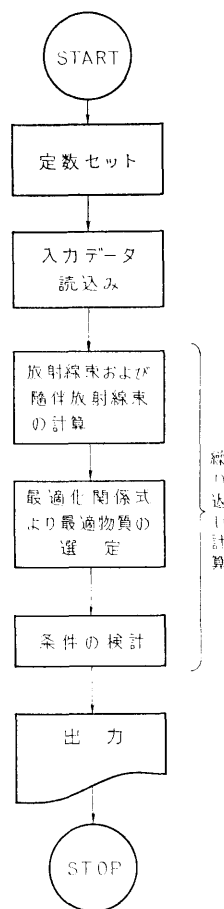


図-1 SOLA シリーズのブロックチャート

- (9) DELTA 空間メッシュ幅 E 14.6
- (10) MESH 微分実行時のメッシュ幅  
但し DELTA/MESH は正整数値 E 14.6
- (11) DOSO 基準線量率 (mr/hr) E 14.6
- (12) JCON 評価関数の係数 E 14.6
- (13) WIDTH } 遮蔽形状の係数 (cm) E 14.6
- (14) HIGHT } E 14.6
- (15) MEDK(1) I=1, MEDIUM  
物質番号 I 2
- (16) RHOK (1, I) 物質密度 (g/cm<sup>3</sup>) E 14.6
- (17) RHOK (2, I) コスト密度 (\$/ton) E 14.6
- (18) CRS 速中性子の除去断面積 (cm<sup>-1</sup>) E 14.6
- (19) DIF 拡散係数
- (20) SIG 実効断面積

(21) BET	スローイングダウン	
(22) CRS	ガンマ線の吸収係数	
(23) SDG	二次ガンマ線の発生量	E 14.6
(24) CONV(K)	中性子およびガンマ線束の線量 変換係数 (mr/hr/MeV)	E 14.6
(25) P11L(K, 1)	放射線束の初期値 (MeV)	E 14.6
(26) NREG	初期遮蔽構成の層状数	I 2
(27) MATK(J)	J 層目の物質番号	I 2
(28) REGK(J)	J 層目の外径 (cm)	E 14.6
(29) NPFIX	固定される層の層状数	I 2
(30) PFIX(L)	固定層の内径 (cm)	E 14.6
(31) TFIX(L)	固定層の厚さ (cm)	E 14.6

## 2.8 出力

最適化する各段階で (繰り返し毎に) 次の 2 通り。

- ① 空間メッシュ幅の整数倍 (MESR) 毎に  
エネルギー別中性子束, ガンマ線束ならびに各線  
量率が得られる。
- ② 評価関数値, 遮蔽重量, 遮蔽コストおよび中性  
子線量, ガンマ線量および全線量, 更に各層の領  
域および対応する物質名 (4 文字) が得られる。

## 3. プログラムの検定

### 3.1 計算精度および誤差

放射線減衰計算における計算精度は設計計算用として良く使用される除去-拡散 (中性子)・ビルドアップ係数を組込んだ点状核 (ガンマ線) 計算コード MAC-RAD と比較して SOLA コードで使用されている微分方程式近似は特にガンマ線量に相異があらわれるが, 計算時間を考慮すれば充分利用できる。

### 3.2 計算所要時間

遮蔽体全長を 100 cm, 空間メッシュ幅 1 cm の鈹-水多重量に対して中性子 7 群, ガンマ線 7 群のケースでは CDC 6600 電子計算機システムによれば約 5 分

で結果が得られた。

### 3.3 適用範囲, 制限事項

放射線遮蔽設計の初期段階, ただし放射線減衰計算を他の精度良い計算コードによって評価すれば詳細設計まで有効である。

## 4. プログラムの使用法について

### 4.1 オペレート

本プログラムはすべて標準的な FORTRAN IV 言語のカードとして保存してあるので, データと共に利用システムのコントロールカードをつけ加えて簡単にランすることができる。

### 4.2 他機種への移行

本プログラムが要求するコアメモリは 50 kW なので, それ以上の規模を有するシステムには簡単に移行できる。なお計算時間を犠牲にすれば補助記憶装置 (例えば磁気ディスク) を使用することによって, 同程度の精度を有し, 30 kW 程度のプログラムに縮小することは可能である。

## 5. あとがき

本 SOLA シリーズは現在 3 種類であるが必要に応じて, 実用に則した幅広い問題が取り扱えるように, 順次追加していく予定である。また放射線減衰の計算をより厳密に計算するため, 輸送コード PALLAS シリーズ (中性子用・ガンマ線用) との結合を図り遮蔽設計への適用範囲を拡大する目的で作業を進めている。

## 参考文献

- 1) 金井康二, 伊藤泰義: 原子炉遮蔽体の最適化問題 その 1 最適化の数学的手法と物理的モデル 船研報告, 第10巻第5号, (1973)
- 2) 本プログラムに使われた理論を船研報告に提出の予定である。

## 19. $^3\text{He}$ 比例計数管応答関数計算プログラム

東海支所 三浦俊正

### 1. プログラムの目的および概要

中性子スペクトル測定用  $^3\text{He}$  比例計数管の応答関

数をモンテカルロ法で計算する。対称とする  $^3\text{He}$  比例計数管は円筒形状のもので, 有効体積外に存在する  $^3\text{He}$  ガスによる効果も含めて計算する。最終的に得ら



れる応答関数は実際の測定で現れる統計的な広がりも考慮したものである。本コードで得られた応答関数は ${}^3\text{He}$  比例計数管で測定した被高分布から中性子スペクトルを求める際使用する。

## 2. プログラムの内容

### 2.1 プログラムの番号および名称

MCR 1

### 2.2 製作者

東海支所 三浦俊正

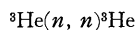
### 2.3 製作月日

昭和46年7月

### 2.4 計算の基礎となる理論と概要

中性子と ${}^3\text{He}$  原子核の反応は次の5種類である。

#### 1) 全てのエネルギーの中性子に対し

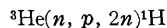


#### 2) 全てのエネルギーの中性子に対し ${}^3\text{He}(n, p){}^3\text{T}$

#### 3) 4.36 MeV 以上の中性子に対し ${}^3\text{He}(n, d){}^2\text{D}$

#### 4) 7.32 MeV 以上の中性子に対し ${}^3\text{He}(n, p, n){}^2\text{D}$

#### 5) 10.3 MeV 以上の中性子に対し



このうち 4), 5) の反応は原子炉からの中性子に対称とする場合無視できるので本コードでは取り扱わない。各反応で生じる荷電粒子の方向分布は 1) の反応では BNL-400 (3rd Edition Vol. I) の微分断面積に基づいて、また 2), 3) の反応では重心系で等方的であるとして決定した。乱数は次式に基づく 05R コード<sup>1)</sup>の乱数発生用サブルーチンを用いて決定した。

$$X_n \equiv \lambda^n \pmod{p}$$

ただし  $\lambda = 5^{15}$ ,  $p = 2^{45}$

各荷電粒子の飛程は次に示す Bethe の式から計算で求めたものを用いた。

$$-\frac{dE}{dX} = \frac{4\pi e^4 z^2 ZN}{mv^2} \left[ \log \left( \frac{2mv^2}{I(1-\beta^2)} \right) - \beta^2 \right]$$

実際の測定においては応答関数は統計的現象による広がりをもつ。この広がりを再現するため最終的に得られる応答関数には  ${}^3\text{He}(n, p)\text{T}$  反応によるピークが  $\Gamma_0(\sqrt{(E_n+Q)/Q})$  なる半値幅を持つガウス分布をする様にスミアを行う。ただし  $\Gamma_0$  は熱中性子による  ${}^3\text{He}(n, p)\text{T}$  反応のピークの半値幅,  $E_n$  は入射中性子エネルギー, そして  $Q$  は  ${}^3\text{He}(n, p)\text{T}$  反応の  $Q$  値 (764 keV) である。

### 2.5 計算の手順

計算の手順は、図-1 のフローチャートに示すとおりである。

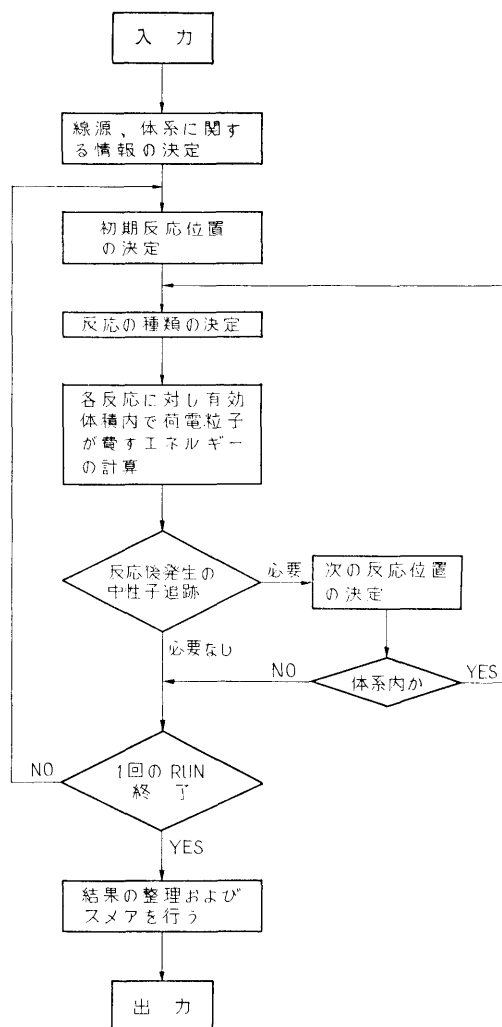


図-1 フローチャート

りである。

### 2.6 プログラム用語および計算機種

用語 FORTRAN IV 機種 FACOM 230-60

### 2.7 入力

- (1) TITLE (20A4)
- (2) ITEST ヒストリーの数 (I 10)
- (3) ESOUR 入射中性子エネルギー (eV)  
UINP, VINP, WINP 入射中性子の方向余弦  
WSTRT 入射中性子のウェイト (5E10.3)
- (4) RANDM3, RANDM2, RANDM1  
初期乱数 (3 I 20)
- (5) GTYPE 中性子の入射方向をきめる

	正または 0 軸に垂直入射
	負 軸に平行入射
RADIUS	計数管の半径
HEIGHT	有効領域の長さ
RADIN	中性子入射領域の半径
PGAS	ガス圧
C1, C2	有効領域外のガス領域の長さ

( I 10, 6E10.3 )

## 2.8 出力

- (1) 各反応の起こった数
- (2) 有効体積から逃れた荷電粒子の数
- (3) 有効体積外で発生して有効体積内に入ってきた荷電粒子の数
- (4) 応答関数

## 3. プログラムの検定

### 3.1 計算精度および誤差

統計的精度はヒストリーの数および入射中性子エネルギーに依存するが、入射中性子は全て反応を起こす様に取り扱っていること、およびスミアを行っているので比較的容易に精度を上げることができる。例えば入射中性子エネルギー 2 MeV, ヒストリーの数 50000 でエネルギーメッシュを 70 とすると、スミアを行う前で統計的精度は最も悪いところで約 3%, スミアを行った後では 1~2% 程度である。実験値との比較では入射中性子エネルギー 2.08 MeV で良い一致が得ら

れた。

### 3.2 計算所要時間

10000 ヒストリーで約 5 分。

## 4. プログラムの使用法について

### 4.1 オペレート

本コードを使用する際は、05R コードの入力データ作成コード XSECT を用いて  $^3\text{He}$  原子核の反応断面積に関するデータを準備する必要がある。磁気テープ 1 本使用。

### 4.2 他機種への移行

本コードは FORTRAN IV で書かれているので他機種への移行は比較的容易であるが、FACOM 230-60 とビット数の異なる機種へ移行する場合乱数発生サブルーチンを書き換える必要がある。

## 5. あとがき

本コードは  $^3\text{He}$  比例計数管用に使われたものであるが本質的な部分は他の中性子検出器、例えば水素比例計数管、 $^3\text{He}$  半導体検出器の応答関数を計算するコードを作成する場合応用できる。

## 参考文献

- 1) Irving, D. C. et al., 05R, A General-Purpose Monte Carlo Neutron Transport Code, Report ORNL-3622, Oak Ridge National Laboratory, February, (1965).

## 20. 放射化法で測定した反応率から中性子スペクトルを求めるプログラム

東海支所 三浦俊正

### 1. プログラムの目的および概要

放射化法で実験的に求めた反応率  $\int_0^\infty \sigma(E)\phi(E)dE$  ( $\sigma(E)$ : 反応断面積,  $\phi(E)$ : 中性子スペクトル) から中性子スペクトルを導出することを目的としており、初期推定スペクトルを繰り返し法によって真のスペクトルに近づける。

### 2. プログラムの内容

#### 2.1 プログラムの番号および名称

( 42 )

SAND-II-S

#### 2.2 製作者

東海支所 三浦俊正

#### 2.3 製作年月

昭和47年3月

#### 2.4 計算の基礎となる理論の概要

繰り返し  $k$  回目における中性子スペクトルを  $\phi^{(k)}(E)$  とし  $i$  番目の検出器の反応率のうち  $j$  番目のエネルギーグループによるものを  $A_j^{(i)}$  とすると

$$A_{ij}^{(k)} = \int_{E_j}^{E_{j+1}} \sigma_i(E) \phi^{(k)}(E) dE \quad \dots\dots(1)$$

各エネルギーグループ内で  $\phi^{(k)}(E)$  が一定とすると  
(1)は

$$A_{ij} = \sigma_{ij} \times \phi_j^{(k)} \quad \dots\dots(2)$$

$$\text{ここで } \sigma_{ij} \equiv \int_{E_j}^{E_{j+1}} \sigma_i(E) dE \left/ \int_{E_j}^{E_{j+1}} dE \right.$$

$$\phi_j^{(k)} \equiv \int_{E_j}^{E_{j+1}} \phi^{(k)}(E) dE$$

次に重み関数を定義する。

$$W_{ij}^{(k)} \equiv \frac{1}{2} (A_{ij}^{(k)} + A_{i,j-1}^{(k)}) / A_i^{(k)} \quad \dots\dots(3)$$

$$\text{ここで } A_i^{(k)} \equiv \sum_{j=1}^m A_{ij}^{(k)}$$

一方測定で得た  $i$  番目の反応率を  $A_i$  とすると  $k$  番目の中性子スペクトルと修正する係数として次のものをとる。

$$c_j^{(k)} = \exp \left[ \frac{\sum_{i=1}^n W_{ij}^{(k)} \ln(A_i / A_i^{(k)})}{\sum_{i=1}^n W_{ij}^{(k)}} \right] \quad \dots\dots(4)$$

(4)式を用いて ( $k+1$ ) 回目のスペクトルは次の様に計算される。

$$\phi_j^{(k+1)} = \phi_j^{(k)} \times c_j^{(k)} \quad \dots\dots(5)$$

したがって最初に  $\{\phi_j^{(0)}\}$  を適当に仮定すれば上記の計算を繰り返すことにより最初のスペクトルを真のスペクトルに近づけることができる。

## 21. 中性子直円筒ダクトストリーミング計算プログラム

東海支所 竹 内 清

### 1. プログラムの目的および概要

直円筒ダクト形状遮蔽体をストリーミングする中性子束を計算するため、定常の中性子輸送方程式を数値積分法で解き、直円筒ダクト内外における中性子束を角度分布、エネルギースペクトル、積分量等の各種の变量で算出する。本プログラムは、二次元円柱形状遮蔽体透過中性子計算プログラム PALLAS-2D-CY をダクト計算用に作り変えたものである。

### 2. プログラムの内容

#### 2.1 プログラムの番号および名称

#### 2.5 計算の手順

2.4 で示したとおりである。

#### 2.6 プログラム用語および計算機種

用語 FORTRAN IV 機種 FACOM 230-60

#### 2.7 入 力

初期スペクトル, 実験で求めた反応率

#### 2.8 出 力

繰り返しごとにスペクトルおよびそのスペクトルを用いて計算した反応率が出力される。

### 3. プログラムの検定

#### 3.1 計算精度および誤差

文献 1) 参照

#### 3.2 計算所要時間

繰り返し回数によるが、繰り返し1回当たり約6秒で20~30回の繰り返しで充分である。

### 4. あとがき

本コードは W.N. McElroy らが開発 SAND-II コード<sup>2)</sup>の理論に基づいて作成したものである。

### 参 考 文 献

- 1) 日本原子力学会炉物理・炉工学分科会予稿集 E31 (1972)
- 2) Nuclear Science and Engineering 27, 533-541 (1967)

### PALLAS-DUCT

#### 2.2 製 作 者

東海支所 竹 内 清

#### 2.3 製 作 年 月

昭和47年4月

#### 2.4 計算の基礎となる理論の概要

参考文献 1) および 2) を参照されたい。

#### 2.5 計算の手順

#### 2.6 入 力

#### 2.7 出 力

以上の 2.5 から 2.7 は参考文献 3) を参照されたい。

### 3. プログラムの検定

#### 3.1 計算精度および誤差

日本原子力研究所の4号炉を使用して、この炉の水中にアクリル製の真円筒中空ダクトを設置して放射化法により、中空ダクト内および周囲の水における中性子反応率をダクト中心軸上および軸に垂直な方向の二次元空間分布として測定した。この測定値を本プログラムの計算精度検証のための標準値とした。この問題により本プログラムの精度を検証した結果、ダクト中心軸上では誤差 30% 以内で計算値は実験値に一致し、またダクト外の水中ではダクト入口から 80 cm の距離でダクト壁から 35 cm 離れた位置で最大の誤差を示し、その最大誤差は 50% であった。

#### 3.2 計算所要時間

4 群, 23×45 空間メッシュ点, 28 角度分点の計算の場合, IBM 360—195 計算機で 1.47 分 (内訳 CPU が 0.468 分, channel 使用時間が 1 分) である。

### 4. 計算機種およびプログラム用語

IBM 360 モデル 195

CDC 6600

FORTRAN IV

計算機のコア容量をおよそ 90K 語必要とし、外部記憶容量 (磁気ディスクあるいは磁気ドラム) を約 900K 語必要とする。

### 5. あとがき

中性子ダクトストリーミング計算プログラムで精度の高い信頼できるプログラムは現在のところ本プログラムのみである。設計計算用のより簡単な方法に基づくプログラムが将来作製されるものと思われるが、その際本プログラムはそれらの設計計算用プログラムの精度検証の標準としても役に立つことが期待される。

### 参考文献

- 1) K. Takeuchi; Numerical Solution to Space-Angle Energy-Dependent Neutron Integral Transport Equation, J. Nucl. Sci. Technol. Vol. 8 [3] (1971)
- 2) 竹内清; 中性子遮蔽解析に用いる輸送方程式の数値解法の研究, 船研報告 第 9 巻 第 6 号 (1972)
- 3) 本プログラムの使用マニュアルを船研報告に提出の予定である。