

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型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）

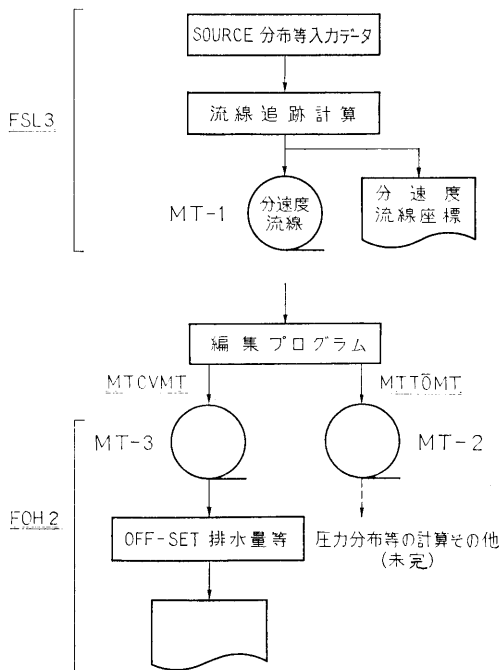


図-1 プログラムの構成

(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, MITOMI

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

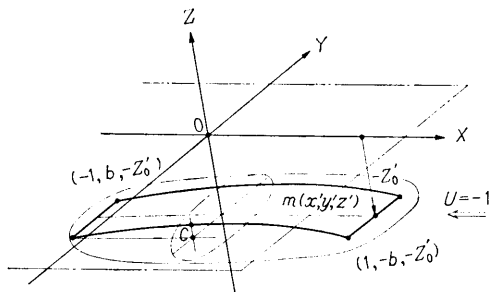


図-2 扁平没水体と座標

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。 ϵ としては、小さくとり過ぎると船体の外形の精度は上るが、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) ;
- 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 ∇ 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

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

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

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

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。

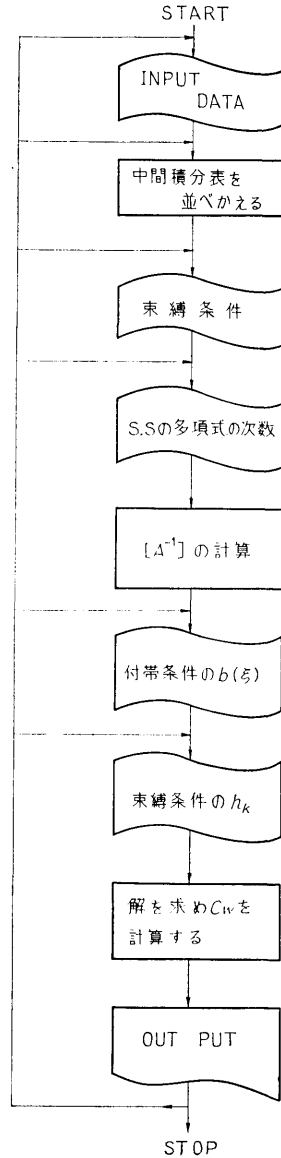


図-1 フローチャート

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 η_S の
 ξ 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 η_S の平行部
 の端部座標 (ξ_0, η_0)

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

FSLs ……S.S. の分布の肩部の ξ 座標

MXBDF, YBF(I) ……Bottom Doublet の分布面
 η_B の ξ 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 ξ ,
 η の最高次数

FBS 1, FBS 2 ……B.D. の ξ 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 …… $K_0L (=1/F_n^2)$

DE1, DE2 …… C_W の中間積分表計算の θ
 の領域

TAB(K, K1) …… C_W の中間積分表

AM, BM ……S.S. および B.D. の μ 修
 正の値 μ_S, μ_B

NW1, NW2 ……束縛条件の中の水線面およ
 び排水容積関係の条件

NW2, NW4 ……束縛条件の NW1, NW2
 のそれぞれ拡張した条件

AV1(I), AV2(I), AV3(I)

束縛条件 NW1, NW2 の
 ξ, ζ の次数

AV4(I), AV5(I), AV6(I)

束縛条件 NW3, NW4 の

ξ, ζ の次数

NZW, NX(I), NZ(I) ……求める S.S. の項数と ξ, ζ
 の次数

MBXF, MBYW ……付帯条件として与える
 B.D. の ξ, η 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) …… ξ 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 ζ_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 ζ_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

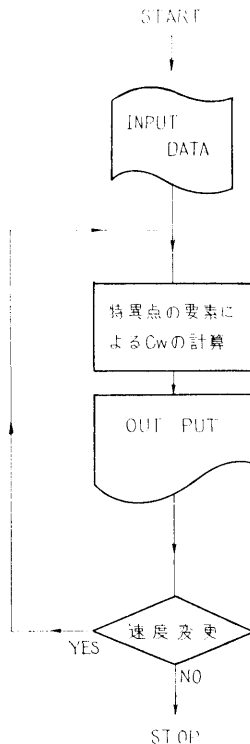


図-1 フローチャート

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 θ の個数およびその角度 ($0^\circ \sim 90^\circ$)
- MAXXF, YYF(I).....Side Source の分布面 η_S の ξ の最高次数およびその係数
- TFS.S. の分布深さ
- XFLL, YFLLS.S. の分布面 η_S の平行部の端部座標 (ξ_0, η_0)
- MAXSXF, MAXSZF ...S.S. の分布 $m(\xi, \zeta)$ の ξ, ζ の最高次数

- FSLsS.S. の分布の肩部の ξ 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
 (≤ 0 : なし, $=1$: あり)
 - MXBDXF, YBF(I)B.D. の分布面 η_B の ξ の最高次数およびその係数
 - TBFB.D. の分布深さ
 - MAXBXF, MAXBYF...B.D. の分布 $b(\xi, \eta)$ の ξ, η の最高次数
 - FBS1, FBS2B.D. の ξ の分布範囲
 - XPSF, ZPSF }P.S. と P.D. の分布座標
 - XPDF, ZPDF } (ξ, ζ)
 - MZVLSF, MZVLDF ...V.L.S. と V.L.D. の分布の ζ 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 ξ 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.
 - J1S.S. あるいは B.D. から計算を始めるときの、 ζ あるいは η の最初の次数
 - I1計算を始める Singularity の最初の ξ または η 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くはずである。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

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

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

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

これを翼弦全体に積分すると

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

となる。ただし、 c^* は半翼弦長、 h は hydrodynamic pitch μ は半径方向の座標 γ/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 χ は $\bar{\alpha}_\theta$ 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 Γ が得られる。それを用いると(5)式から α_i が得られ、従って(2)式から γ が得られる。この γ を用いて χ を計算すると高次近似の χ が得られるので、前と同様にして高次近似の Γ , α_i , γ が計算される。 χ 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 (≤ 7)
JJB	(I 2)	Birnbaum 級数の項数 (≤ 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

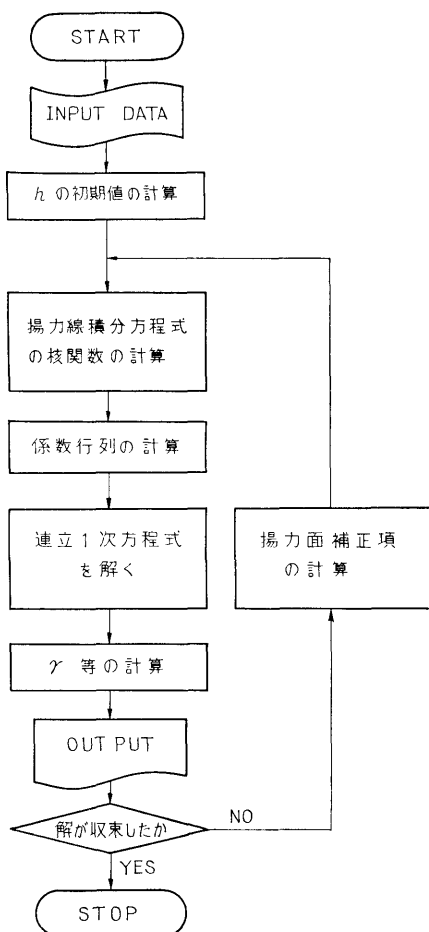
実行は BATCH 処理による。

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って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、 γ は循環分布密度、 W^* は翼素への流入速度、 ξ, η は各翼弦方向および半径方向の座標、また μ 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 μ' における翼弦長を表わす係数である。また核関数は

(10)

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

と与えられる。ただし、 τ, τ' は翼弦方向の螺旋座標で ξ, ξ' 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 ξ 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

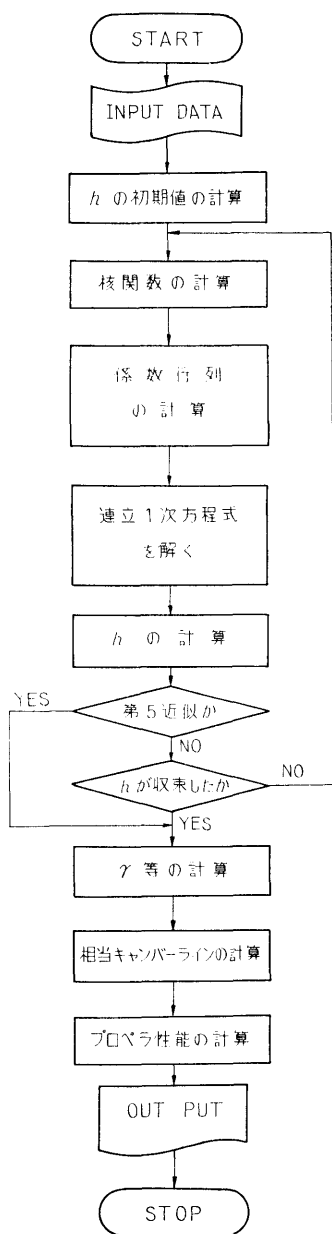
FORTRAN, FACOM 270-20

2.7 入 力

必要な入力データは次のとおりである。

IP (I 2) 半径方向の標点数 (≤ 7)

IJB (I 2) Birnbaum 級数の項数 (≤ 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 ϕ 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 ϕ 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。

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

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

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

ここで ϕ_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、 α_m 、 β_m は求めるべき未定係数である。この ϕ 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

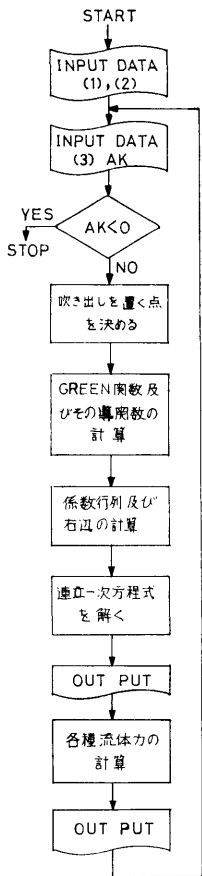


図-1 フローチャート

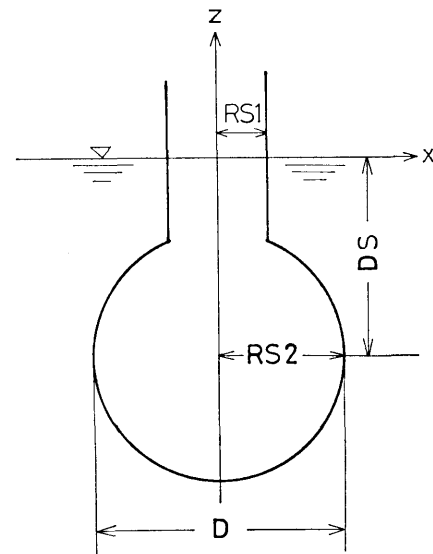
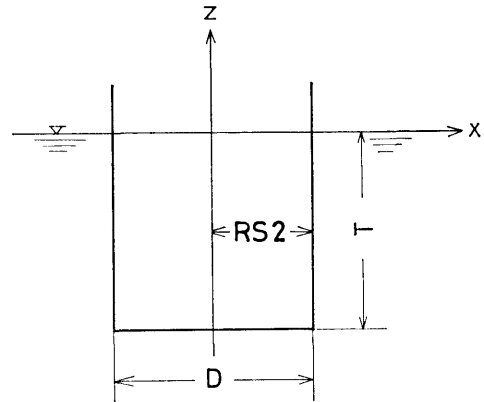


図-2

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

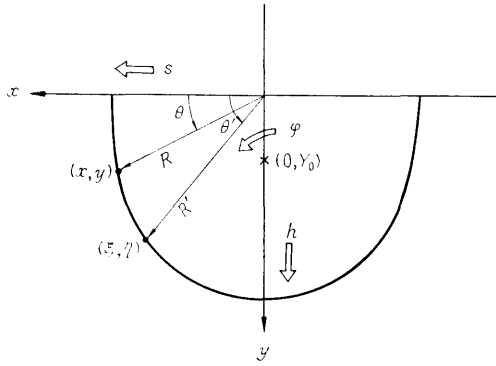


図-1 座標系

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

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

とおくと

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

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

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

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 Φ 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 θ, θ' 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。

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

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

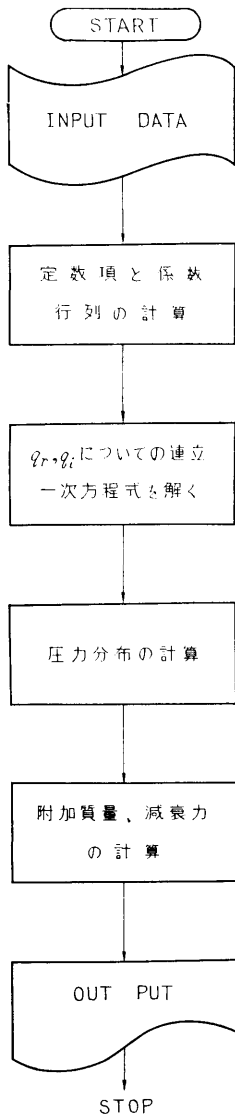
$$\begin{aligned} G_r(\theta, \theta') + i G_i(\theta, \theta') &= \ln R_1 + \ln R_2 + 2e^{-\kappa(y+\eta)} \\ &\quad \times \left\{ \cos K(x - \xi) C_i K |x - \xi| + \sin K |x - \xi| \right. \\ &\quad \times S_i K |x - \xi| - \ln |x - \xi| + \frac{\pi}{2} \sin K |x - \xi| \\ &\quad \left. - K \int_{-(y+\eta)}^0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

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 $\theta=(I-1)\pi/M$ で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

- A₁, A₃.....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 θ 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= ϕ_r速度ポテンシャルの cos 成分
- PHI= ϕ_i速度ポテンシャルの sin 成分
- CP = C_p ...変動圧力係数
- EPS= ϵ 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 θ 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 θ 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, σ 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, θ は写像する円の座標である。)

この ϕ^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 ϕ^H, ϕ^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 (σ)
- 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 (ξ_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° 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。

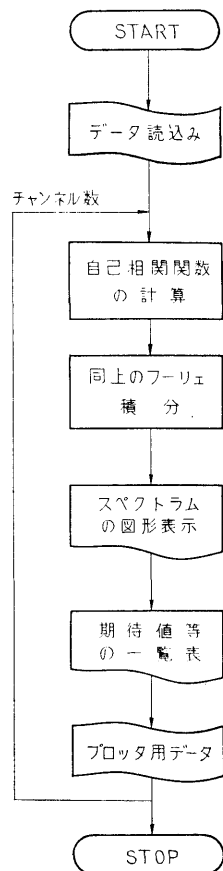


図-1 SPEC 5 の流れ図

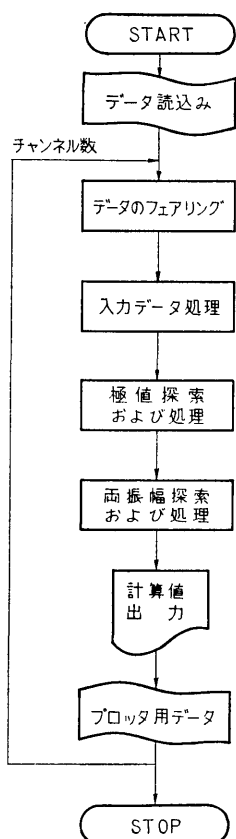


図-2 STAT 2 の流れ図

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 ω 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 ϵ 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 $\omega \div 1.6$ 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

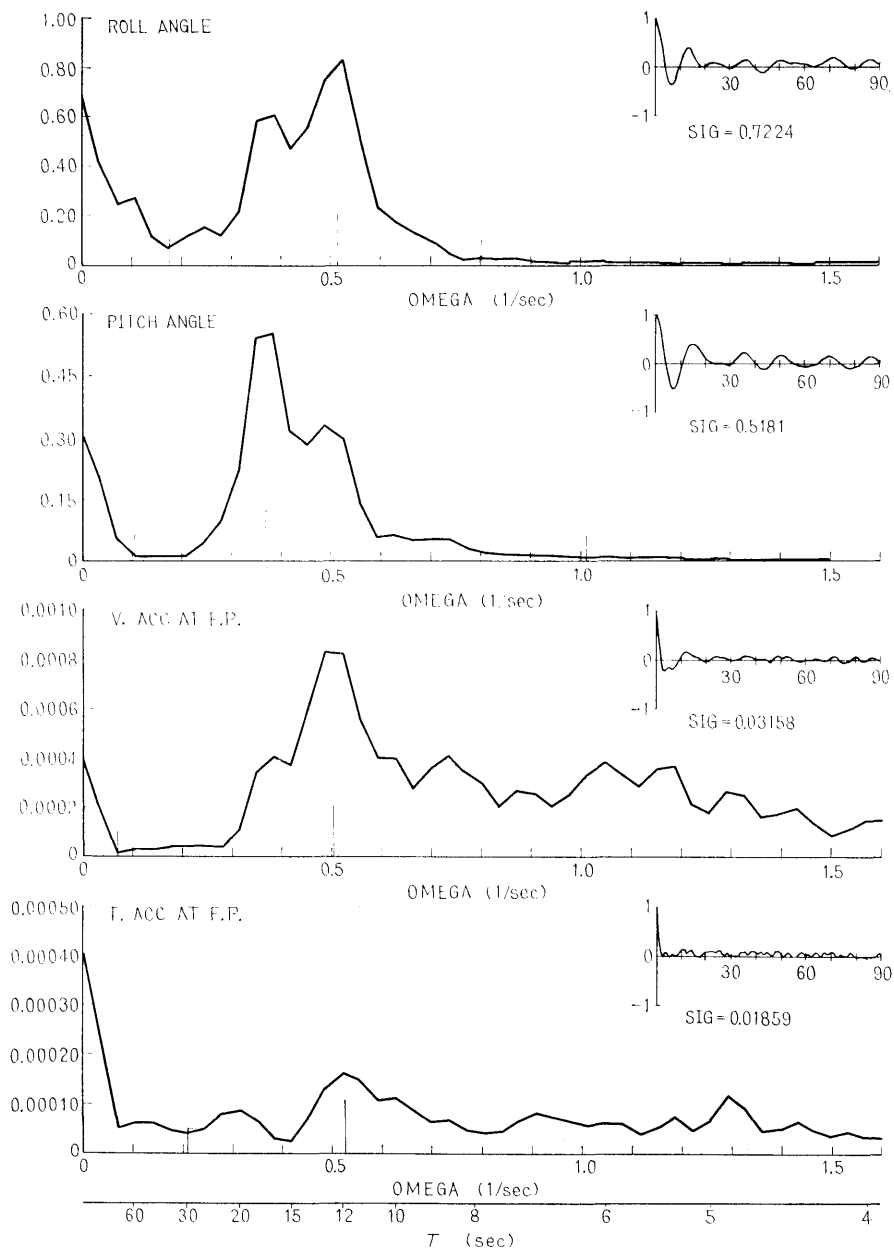


図-3 解析結果のプロッタ作図例 (SPEC 5)

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。

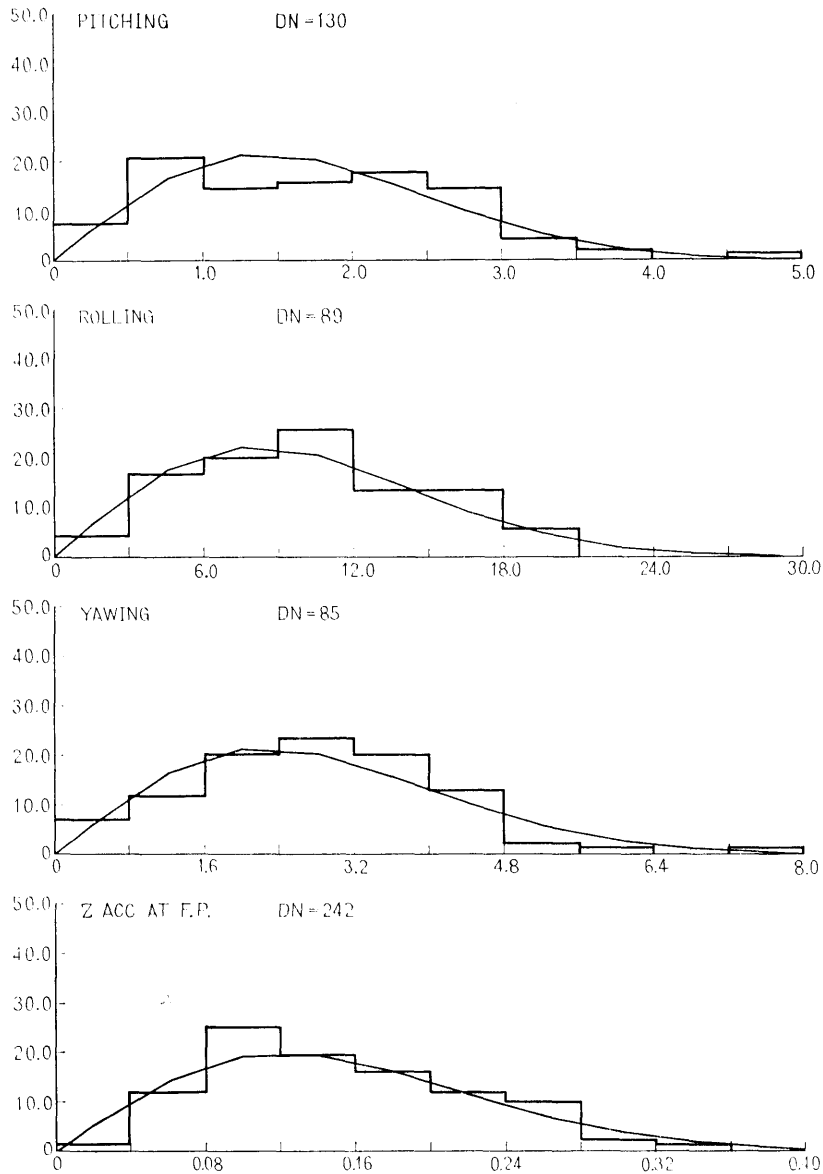


図-4 解析結果の作図例 (STAT 2)

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。

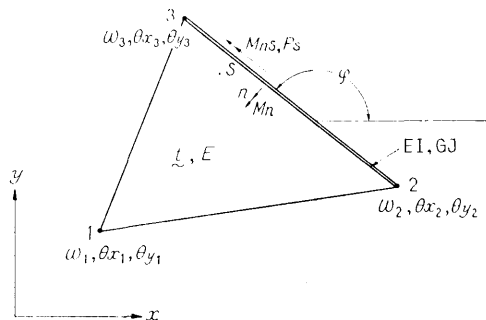


図-1 要素と記号

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

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 $\{\delta_i\}^T \equiv [\omega_i, \theta_{xi}, \theta_{yi}]$
 $\equiv \left[\omega_i, -\frac{\partial \omega}{\partial y_i}, \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right]$
(2)

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

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

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

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 ΔU_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 ΔW_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 π は

(24)

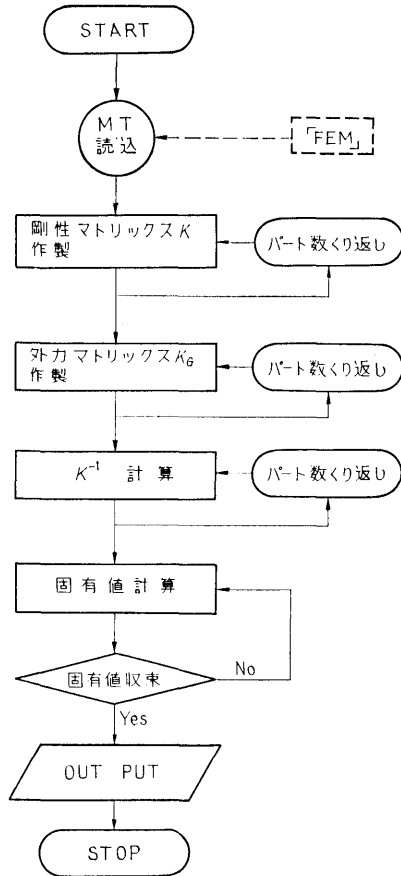


図-2 フローチャート

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

(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 λ 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→ ω 拘束, NB2=0→ θ_x 拘束,

NB3=0→ θ_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」による応力計算と比較すると, 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おうこともできる。

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

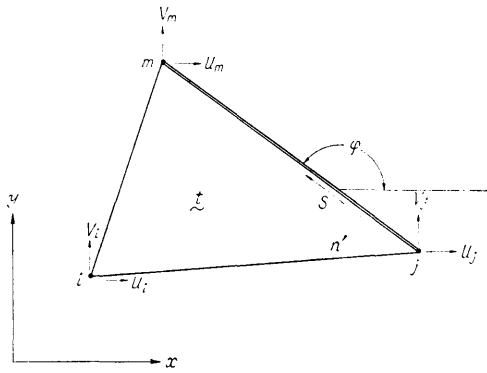


図-1 要素と記号

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 ΔU_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 ΔW 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 ΔU_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 π 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

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

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

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

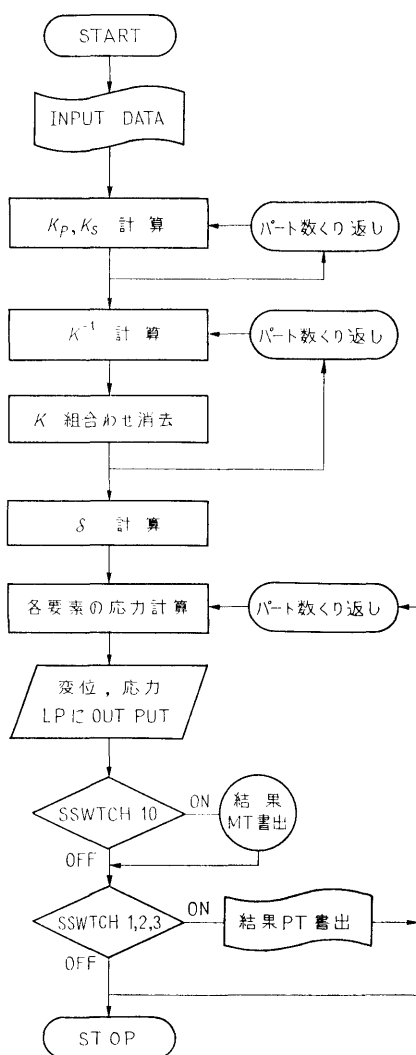


図-2 フローチャート

(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

σ_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 プロッタに図示できる)

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、 ρ : 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_∞ : 境界 Γ_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 Δt 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。

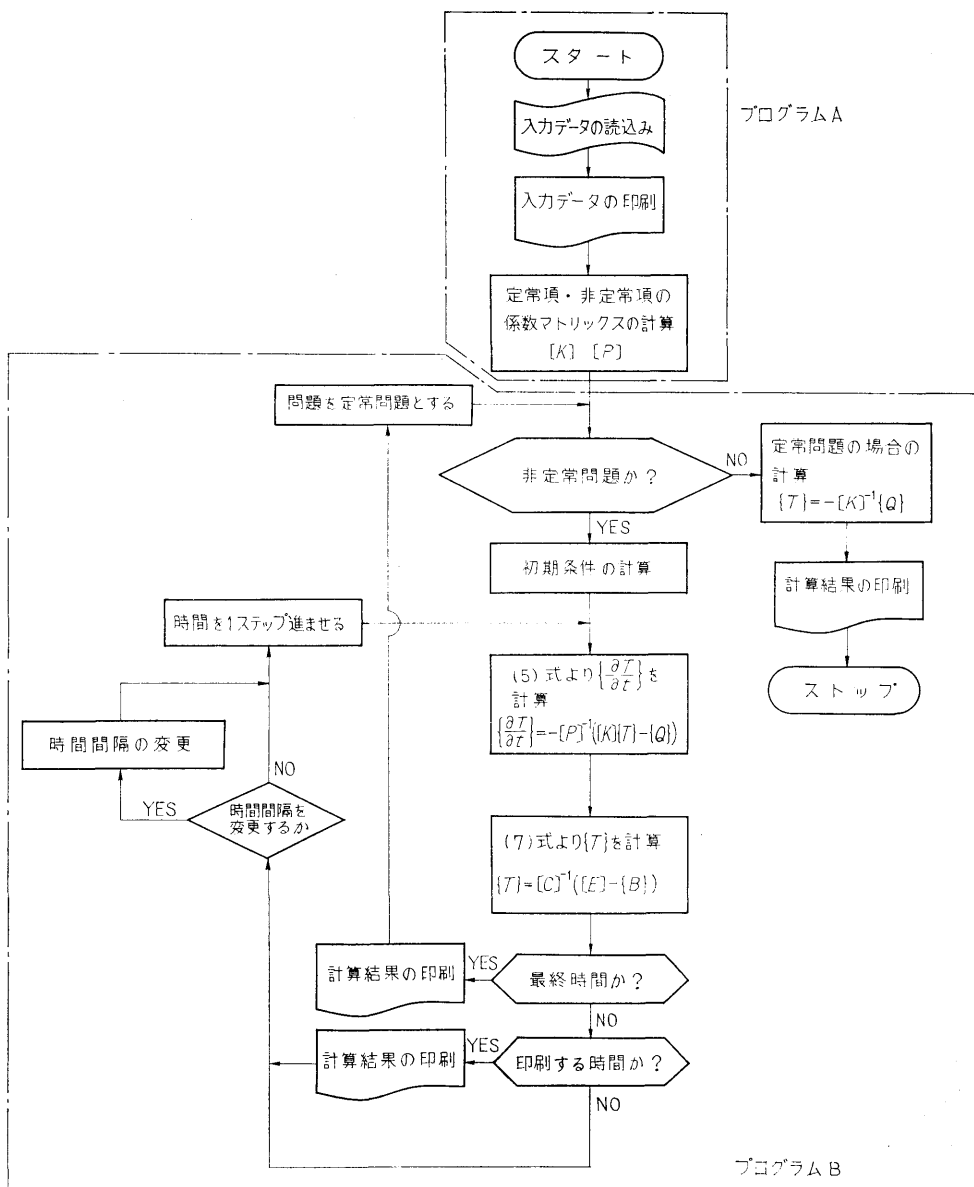


図-1 SASKE-H3 のフローチャート

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

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 of 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