

## プログラム開発に使用された電子計算機の概要

菅 井 和 夫

現在、船舶技術研究所において共通言語を使用しプログラム開発に利用されている電子計算機組織は次の3組織である。

- (1) 共用電子計算機組織 FACOM 270-20
- (2) 原子力船の安全対策研究用電子計算機組織 NEAC-2206
- (3) 三鷹第二船舶試験水槽データ処理用電子計算機組織 TOSBAC-3300

本号に集録された電子計算機プログラムは、すべて上記の3組織によって開発されたものである。これらのプログラムを一般の利用に供する場合の一助として、ここでは上記各組織の概要について説明することにする。

共用電子計算機組織は、船舶技術研究所の各部の研究員が共通してその科学演算およびデータ処理に利用するために設置されたものである。FACOM 270-20

を主体とし、これに FACOM 230-10 およびその周辺機器を有機的に配置している。導入が昭和 43 年と比較的新しく、コアメモリ 16 kW という小型機ながら、演算速度が速く周辺機器も最低限ながら一応完備しているので、プログラム開発にはきわめて便利で活発に利用されている。機器構成は表-1 に示すごとくである。ここで一語長は 17 ビット、サイクルタイムは  $2\mu\text{s}$  である。使用される共通言語は FACOM FORTRAN で、これは JIS FORTRAN 5000 のレベルを超えている。

原子力船の安全対策研究用電子計算機組織は、昭和 36年に導入されたもので、船舶技術研究所では最も歴史が古く、周辺機器や外部メモリーなども豊富である。しかしながら、現在ではやや旧式化している。機器構成は表-2 に示すごとくである。ここで一語長は符号 +12 桁、アクセスタイムは  $5\mu\text{s}$  である。使用される

表-1 共用電子計算機機器構成表

機 器 名	型 名	台 数	備 考
FACOM 270-20			
中央処理装置	F 7200 A	1	ドラム 131 kW
記憶装置	F 7220 A	4	4 kW
浮動小数点演算機構	F 7211 A	1	
データチャンネル装置	F 7232 B <sub>1</sub>	1	MTC×1
磁気テープ装置	F 603 B	1	42 KC
紙テープ読取装置	F 749 A	1	400/200 字/秒
紙テープせん孔装置	F 767 A	1	100 字/秒
ラインプリンタ装置	F 643 C	1	240 行/分 50 種 136 桁
ファコムライタ	F 801 A	1	15 字/秒
FACOM 230-10			
中央処理装置	F 2100 A	1	4KB ドラム 65 KB
記憶装置	F 2120 A	1	4 KB
紙テープ読取装置	F 749 A	1	400/200 字/秒
ファコムライタ	F 801 A	1	15 字/秒
データライタ	F 516 A	1	
自動電圧調整装置	F 964 B	2	1φ 1 KVA

表-2 原子力船の安全対策研究用電子計算機機器構成表

機 器 名	型 名	台 数	備 考
中央処理装置	NEAC-2206	1	コア 10kW
外部磁気ドラム装置	522	1	10kW
磁気テープ制御装置	6403A	1	1チャンネル/台 max 10台接続
磁気テープ装置	543B	5	45000桁/秒
入出力制御装置	6601	1	
高速制表装置	402-1	1	350行/分 48文字 120桁
テープさん孔タイプライタ	304	3	500字/秒
光電式テープ読取機	104	2	100/200字/秒
高速テープさん孔機	381	1	50字/秒

表-3 三鷹第二船舶試験水槽データ処理用電子計算機機器構成表

機 器 名	型 名	台 数	備 考
本 体	TOSBAC-3300 (DK-1856 B)		コア 8kW 命令数 60 Cycle time 10 $\mu$ s 1W=24+1 (P)
磁気ドラム装置	DP-1044 B		14kW
紙テープさん孔器	東芝 4B-16		100字/秒
万能入出力装置	Friden: model SPD FS-9790 C		読: 571字/秒, 印字 588字/分 さん孔 1000字/分
紙テープ読取器			200/400字/分
磁気テープ装置	DP-1195 A		1インチ 14トラック
X-Y プロッタ	DP-1196 A		5プロット/秒 X, Yとも 1024 pos. 0.2mm/Pulse

共通言語は 06 NARC で、これは JIS FORTRAN 5000 のレベルを超えている。またチエンオペレーションができるのが特徴となっている。

三鷹第二船舶試験水槽データ処理用電子計算機組織は、試験水槽の曳船台車よりデータ伝送を受け、これをオンライン処理するために設置されたものである。

しかし、上記の業務に使用する時間以外は、一般の科学演算にも使用できる。昭和 41 年に導入されたもので、小型で演算速度もおそいため、プログラム開発の主役ではない。機器構成を表-3 に示す。ここで一語長は 24 ビット+1 パリティで、サイクルタイムは 10 $\mu$ s である。使用される共通言語は ALPS で、これは ALGOL 60 を基礎として作られたものである。

上述のごとく、船舶技術研究所においてプログラム開発に使用されている電子計算機組織は、いずれもコアメモリの少ない小型機に属するものである。したがって、本号に特集されたプログラムが一般に利用される場合を考えると、少なくとも上述の計算機よりは

上級機が使用されることになろう。そこで、こうした上級機に移行することを前提として、プログラム利用上の一般的注意を述べてみたいと思う。使用言語は、FACOM 270-20 ならびに NEAC 2206 の場合には JIS FORTRAN 規格であるため、ほとんど変更なくそのままプログラムをかけることができる。また、組まれたプログラムが小型機を対象としているから、大型機に移行しても容量的にあふれる心配は全くない。むしろ、大型機では、それなりに計算規模を大型化することが考えられるから、演算能率の面で大型機に向けたプログラムに若干手直しをすることが望ましい場合が生じるであろう。

本特集号のプログラム開発に利用された計算機は、S1~8 が FACOM 270-20, S9~S10 が TOSBAC-3300, N1~18 が NEAC-2206 である。

なお、本号に特集された電子計算機プログラムの個々についての詳細は、船舶技術研究所調査室まで照会されたい。

## S-1 プロペラ揚力面理論に関する計算プログラム

運動性能部 菅 井 和 夫

### 1. プログラムの目的および概要

近年、電子計算機を利用した船用プロペラの揚力面理論の計算が盛んに行なわれるようになってきた。しかしながら、そのほとんどがあらかじめ翼面上の揚力分布が設計状態に対し与えられた場合、キャンバーやピッチの分布をどう決めたらよいかを求めるいわゆる最適プロペラの設計に対象が置かれており、逆にプロペラの幾何学的形状が与えられた場合、ある作動状態に対し翼面上の揚力分布を求めるという問題は、積分方程式を解かねばならないという難しさもあって、ほとんど手がつけられていないのが現状である。本プログラムは、プロペラの幾何学的形状をすべて与えると、いろいろの作動状態に対し、積分方程式を解くことにより推力常数、トルク常数、効率等はもとより翼面上の揚力分布、圧力分布等の流力的諸量をすべて面として求めるものである。これにより、プロペラの幾何学的形状とキャビテーションも含めた流力的諸性能との間の関係が適確に求められるようになり、プロペラの設計に資するところが多いと考えられる。

### 2. プログラムの内容

#### 2.1 プログラムの番号、名称

44-051

An Application of Collocation Method to Propeller Lifting Surface Theory

#### 2.2 製作者

運動性能部 菅井和夫

#### 2.3 製作年月

昭和 44 年 11 月

#### 2.4 計算の基礎となる理論の概要

プロペラ揚力面理論の積分方程式は次のように表わされる<sup>1)</sup>。

$$u(\zeta, \xi) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{\xi_B}^1 \int_{-1}^1 \bar{\theta}(\xi') g(\zeta', \xi') K(\theta_0; \mu, \mu') d\zeta' d\xi' \quad \dots(1)$$

ここで

$$K(\theta_0; \mu, \mu') = \sum_{M=0}^{N-1} \int_{\theta_0}^{\infty} \{ \mu\mu' + \cos(\theta'' + 2\pi M/N) \} / R^3 - 3\{ \mu\theta'' - \mu' \sin(\theta'' + 2\pi M/N) \} \{ \mu'\theta''$$

$$- \mu \sin(\theta'' + 2\pi M/N) \} / R^3 d\theta'' \quad \dots(2)$$

$$R = \sqrt{\theta''^2 + \mu^2 + \mu'^2 - 2\mu\mu' \cos(\theta'' + 2\pi M/N)} \quad \dots(3)$$

記号はすべて無次元量を用いており、 $u$  は翼面に対し法線方向の速度、 $\bar{\theta}$  は翼の半幅、 $g$  は循環分布、 $K$  は核関数をあらわす。また、 $\zeta'$ 、 $\xi'$  はそれぞれ翼弦方向および半径方向の座標、 $\theta_0$  は標点間の距離の角度表示、 $N$  は翼数、 $\mu$  はピッチで無次元化した半径方向の座標である。

(1)の積分方程式を解くことにより、循環分布が求められ、これからプロペラの流力的諸性能が求められる。積分方程式の解き方としては、まず循環分布の形を Birnbaum の級数で表わすことにし、標点をコロケーション法にしたがってとり代数方程式の形に変換して数値的に解いた。

本プログラムの特徴とするところは次のごとくである。

- (1) コロケーション法にしたがって標点をきめた。
- (2) 対数特異点を完全に処理した。
- (3) 定ピッチ非線型境界条件を採用した。
- (4) 翼の厚みを考慮に入れた。
- (5) 粘性流体としての影響を実験値から適当に取り入れた。

#### 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ごとくである。

#### 2.6 入 力

必要な入力データは次のごとくである。整数は I 3, 実数は F 8.5 とする。

- (1) 分割数
  - N……半径方向分割数
  - MM……翼弦方向分割数
- (2) プロペラの幾何学的形状と作動状態
  - NP……翼 数
  - BR……ボス比
  - PR……ピッチ比

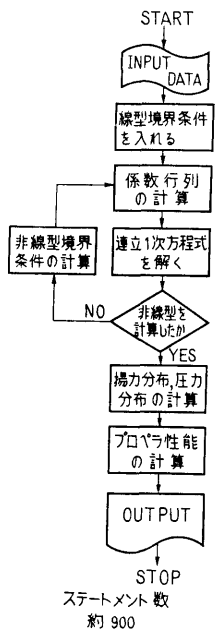


図-1 フローチャート

- BT.....後縁のオージネイト
- (3) 2次元翼の実験値より  
I 番目の翼断面位置で  
CK(I).....循環減少係数  
CDV(I).....抵抗係数
- 2.7 出力
- (1) 各翼断面位置につき  
G.....半径方向無次元循環分布  
CL.....断面揚力係数  
HC.....空力中心  
AL.....迎角  
A(I).....Birnbaum 級数の第 I 項
- (2) 各断面形につき  
CD.....循環密度分布  
CC.....相当キャンパー  
PU.....ハックの圧力  
PL.....フェースの圧力
- (3) プロペラの性能  
KT.....推力常数

- KR.....レーキ角
- AJ.....前進常数
- I 番目の翼断面位置で  
BC(I).....ハーフォード  
BM(I).....ミッドコード  
PRD(I).....ピッチ比分布
- 翼断面形について  
BL.....前縁のオージネイト  
SFU(I,R).....バックのオージネイト  
SFL(I,R).....フェースのオージネイト

- KQ.....トルク常数
- ET.....効率

3. プログラムの検定

3.1 計算誤差, 精度

計算精度は, 最終結果が有効数字 4 桁まで得られることを目標とした。このため, 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 演算時間

分割数を  $N=11$ ,  $MM=7$  とした場合, 実行を ¥MPXEQ として約 100 分である。

3.3 適用範囲, 制限事項

分割数は, ある程度以下だと正確な答が得られない。少なくとも  $N=9$ ,  $MM=5$  以上は必要である。適用範囲は, 最適作動状態を中心とし前進常数で ±20% の範囲である。この範囲では実験点に対し ±3% 以内の相違しか生じない。

4. プログラムの使用について

4.1 オペレート

プログラムの実行は, ¥ BATCH で PT よりでも, また ¥ MPXEQ\_MTO (44051 PROP. GL) で MT よりでも実行できる。

4.2 プログラムの応用

サブルーチンの中に倍長精度, ドラム使用で 100 元まで解ける連立一次方程式の解法 (ガウス-ヨルダン法) が含まれており汎用できる。

4.3 他機種への移行

コア 32kW 以上の計算機を使用するときは, DRUM DIMENSION をコア上の DIMENSION に変えると演算は非常に速くなる。

5. あとがき

プロペラ揚力面理論の積分方程式を解くことにより, プロペラの幾何学的形状および作動状態と流力的諸性能との関係を求めた最初のプログラムである。プロペラの実設計にかなり役立てることができるであろう。

参考文献

- 1) 菅井和夫「プロペラ揚力面理論の新展開」(第 1 報) 造船協会論文集第 119 号 (1966)。

## S-2 定常造波理論に基づく波動関数の数値計算プログラム

運動性能部 安藤定雄

### 1. プログラムの目的および概要

本プログラムは波動関数の数値表を作成するものである。したがって、どのプログラムも数値積分が主体となっている。

しかし、数値表は1回作成して、MTに格納してしまえば、あとは利用する場合に、内挿によって必要な値を得ればよいのである。

では、波動関数を用いて、計算できるものは、船側流速、船側波形、復原力と強制力などが求められるのである。一方、この関数が計算可能になったということは、現在ほとんど計算されていない、非定常造波理論に基づく3次元流場の波動関数が可能になり、3次元理論での船体運動などの計算が簡単化されるものである。したがって、今後の発展には最も重要な基礎プログラムである。

### 2. プログラムの内容

#### 2.1 プログラムの番号および名称

Uniform Theory Wave Function

[W<sub>11</sub>(P, Q), W<sub>3</sub>(P, Q), W<sub>4</sub>(P, Q)]

#### 2.2 製作者

運動性能部 安藤定雄

#### 2.3 製作年月

昭和44年12月

#### 2.4 計算の基礎となる理論の概要

船長および喫水が  $L$ ,  $T$  である船が  $x$  軸の負の方向に一定速度  $V$  で直進している場合の理想流場について考えるときの Michell 型の速度ポテンシャル<sup>1)</sup>に、船体はその中心線面に吹出し分布を持って、その分布が  $x$  軸方向に閉じたものと考えるなどを導入すると、 $x$ ,  $z$  軸方向の流速  $\Phi_x$ ,  $\Phi_z$  は

$$\begin{aligned}\Phi_x &= \lambda \kappa^3 \int_{-1}^1 d\xi' \int_{-1}^0 M(\xi', \zeta') d\zeta' [W_1(p, q) \\ &\quad + W_2(p, q) + W_3(p, q) + W_4(p, q)] \\ \Phi_z &= \lambda \kappa^3 \int_{-1}^1 d\xi' \int_{-1}^0 \sigma(\xi', \zeta') d\zeta' [W_{1z}(p, q) \\ &\quad + W_{2z}(p, q) - W_3(p, q) - W_4(p, q)]\end{aligned}$$

のように表わされる。

ここで、 $W_1(p, q)$ ,  $W_2(p, q)$ ,  $W_3(p, q)$ ,  $W_4(p,$

$q)$ ,  $W_{1z}(p, q)$ ,  $W_{2z}(p, q)$  を波動関数と呼び、その関数は次のように表示される。

$$W_1(p, q) = \frac{1}{\pi^2} \int_0^\infty d\mu \int_0^\infty \frac{\mu^2 \cos(q\chi + 2\varepsilon) \cos p\mu}{\sqrt{\mu^2 + \chi^2}} d\chi$$

$$W_2(p, q) = \frac{1}{\pi^2} \int_0^\infty d\mu \int_0^\infty \frac{\mu^2 \cos q\chi \cos p\mu}{\sqrt{\mu^2 + \chi^2}} d\chi$$

$$W_3(p, q) = \frac{2}{\pi} \int_0^1 \frac{\mu^3 \cos p\mu e^{q\mu^2}}{\sqrt{1-\mu^2}} d\mu$$

$$W_4(p, q) = \frac{2}{\pi} \int_1^\infty \frac{\mu^3 \sin p\mu e^{q\mu^2}}{\sqrt{\mu^2-1}} d\mu$$

$$W_{1z}(p, q) = \frac{1}{\pi^2} \int_0^\infty d\mu \int_0^\infty \frac{\chi \sin(q\chi + 2\varepsilon) \cos p\mu}{\sqrt{\mu^2 + \chi^2}} d\chi$$

$$W_{2z}(p, q) = \frac{1}{\pi^2} \int_0^\infty d\mu \int_0^\infty \frac{\chi \sin q\chi \cos p\mu}{\sqrt{\mu^2 + \chi^2}} d\chi$$

上記の関数はそのままで数値積分は不可能であるので、変形して、総ての  $p$  と  $q$  について計算できるプログラムである。

#### 2.5 計算の手順

すべてのプログラムは、GAUSS の 10 点法の係数の SUBROUTINE に行き、次に分割数を自動的に決めて、波動関数の倍長演算で積分を行なうものである。

#### 2.6 入力

各プログラムとも入力データは不必要である。

#### 2.7 出力

$p$  と  $q$  と波動関数名を  $LP$  に出力し、次に、計算された波動関数を一点の  $p$  について  $q$  が 11 点につき  $LP$  と  $MT$  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

各プログラムとも自動的に有効数字が 5 桁以上あるようになっている。

#### 3.2 計算所要時間

1 点の  $p$  で、 $q$  が 11 点計算するに 3 秒から 20 分の間である。

#### 3.3 適用範囲と制限事項

$W_4(p, q)$  は  $q$  が  $-0.05$  以上なればよい。 $W_4(p, q)$  と  $W_{1z}(p, q)$  とは  $q$  が零の場合は別の計算である。

本プログラムでは  $p$  が 0~10.0 までを 0.1 間隔について、 $q$  が 0~-0.5 までを 0.05 間隔について、計算することができる。

また、このプログラムに付加すれば、非定常の波動関数に適用できる。

#### 4. プログラムの使用法と応用

##### 4.1 プログラムのオペレート

実行は BATCH 処理による。SUBROUTINE は MT に RB で入っているものを使用する。

##### 4.2 応用

MT に RB で格納してある SUBROUTINE

44-CONST GAUSS の係数 (10 点法) と  $\pi$

44-NEUMAN Neumann 関数の  $Y_0(z)$ ,  $Y_1(z)$  を計算する

44-STRUVE Struve's 関数の  $H_0(z)$ ,  $H_1(z)$  を計算する

があり、これらは一般に利用可能なプログラムである。

##### 4.3 他機種への移行

上記プログラムは総てコア上で演算されているので、使用可能なコアが 8kW 以上ある計算機なれば移行は可能である。

#### 参考文献

- 1) 花岡達郎 “定常造波抵抗理論の基礎問題”，第 90 号，造船協会論文集。

### S-3 細長体理論による船体まわりの流れの計算プログラム

運動性能部 菅 信

#### 1. プログラムの目的および概要

任意の 3 次元物体のまわりの非揚力ポテンシャル流を数値的に解くには、1000 元程度の連立 1 次方程式を解ける大型の計算機が必要である。あるいはこの連立方程式は係数行列の対角元が大きいので行列をいくつかに分けて部分的に解く方法を使えるとしてもやはり数 100 元までは解けなくてはならず当所の計算機の能力を超える。そこで船体が細長い物体であることを考慮し、いわゆる細長体理論を使うと 3 次元の問題を 2 次元の平面問題として扱えばよいことになり、問題はきわめて簡単になる。連立方程式も 20 元程度が解ければよいので、中小型計算機で十分まに合う。ここに述べるプログラムは、この細長体理論により、直進、斜航を含めた定常旋回中の船体表面上の速度分布を求めるものである。ただし造波現象は考えない。

#### 2. プログラムの内容

##### 2.1 プログラムの番号、名称

44-041

Potential Flow about a Ship Hull (Arbitrary Sectional Shape)

##### 2.2 製作者

運動性能部 菅 信

##### 2.3 製作年月

昭和 44 年 9 月

##### 2.4 計算の基礎となる理論の概要

細長体理論では、船体表面上の吹出し分布  $q$  を求める積分方程式は次のように表わされる。

$$p(x, \theta) = -2\bar{V}_{ON}(x, \theta) + \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi p(x, \theta') \cdot K_0(x; \theta, \theta') d\theta' \quad \dots\dots(1)$$

ここで

$$K_0(x; \theta, \theta') = 2R^* \{ \{ R^* \cos(\theta - \theta') - R + R^* R_\theta \cdot \sin(\theta - \theta') / R \} / R_M + \{ R^* \cos(\theta + \theta') - R + R^* R_\theta \sin(\theta + \theta') / R \} / R_p \} \quad \dots\dots(2)$$

$$R_M = R^2 + R^{*2} - 2RR^* \cos(\theta - \theta'), \quad R_p = R^2 + R^{*2} - 2RR^* \cos(\theta + \theta') \quad \dots\dots(3)$$

$$\bar{V}_{ON}(x, \theta) = V_{ON} F = V_0 \{ -R_x \cos \alpha + R_x R \Omega \cos \theta + (\cos \theta + R_\theta \sin \theta / R) \times (\sin \alpha + \Omega x) \} \quad \dots\dots(4)$$

$$F = \sqrt{1 + R_x^2 + (R_\theta / R)^2} \quad \dots\dots(5)$$

$$p(x, \theta) = F \cdot q(x, \theta) \quad \dots\dots(6)$$

であり、 $V_{ON}$  は一般流の法線速度成分である。

次に攪乱流の各速度成分は船体表面上で次のように表わされる。

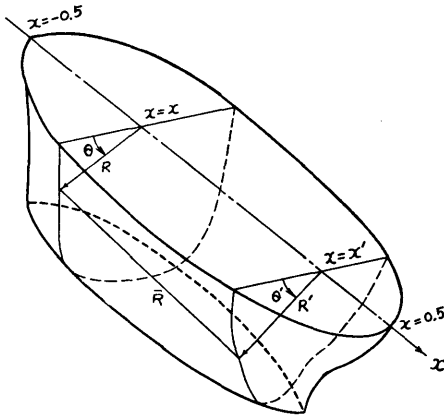


図-2 座標系

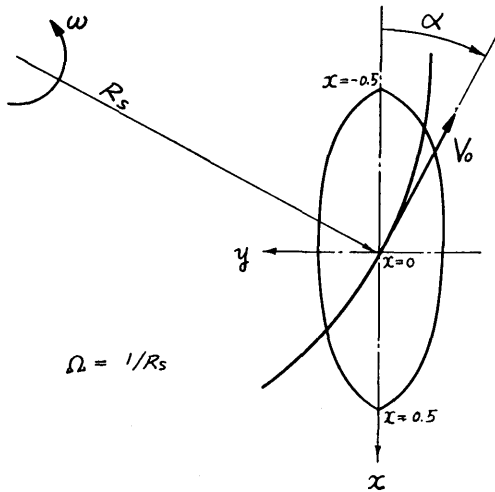


図-3 定常旋回

$$v_x = -\frac{\dot{p}}{2} \cdot \frac{R_x}{F^2} - \frac{1}{\pi} \cdot \frac{x}{x^2 - 0.25} \int_0^\pi p^* R^* d\theta' + \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi p^* R^* R_x^* K_3 d\theta' + \frac{1}{2\pi} \{2 - \ln(1 - 4x^2)\} \int_0^\pi (p^* R^*)_x d\theta' + \frac{1}{4\pi} \int_0^\pi (p^* R^*)_x K_5 d\theta' \quad \dots(7)$$

$$v_r = \frac{\dot{p}}{2} \cdot \frac{1}{F^2} + \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi p^* R^* K_7 d\theta' \quad \dots(8)$$

$$v_\theta = -\frac{\dot{p}}{2} \cdot \frac{R_\theta}{R} \cdot \frac{1}{F^2} - \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi p^* R^* K_8 d\theta' \quad \dots(9)$$

ここで  $p^* = p(x, \theta')$ ,  $R^* = R(x, \theta')$  等である。  
また

$$K_3 = \{R^* - R \cos(\theta - \theta')\} / R_M + \{R^* - R \cos(\theta + \theta')\} / R_p \quad \dots(10)$$

$$K_5 = \ln(R_M \cdot R_p) \quad \dots(11)$$

$$K_7 = \{R - R^* \cos(\theta - \theta')\} / R_M + \{R - R^* \cos(\theta + \theta')\} / R_p \quad \dots(12)$$

$$K_8 = \sin(\theta - \theta') / R_M + \sin(\theta + \theta') / R_p \quad \dots(13)$$

である。(7)の  $p_x^*$  は次の積分方程式を解いて求める。

$$p_x(x, \theta) = -2\bar{V}_{ONx}(x, \theta) + \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi p(x, \theta') \cdot K_{0x}(x; \theta, \theta') d\theta' + \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi p_x(x, \theta') \cdot K_0(x; \theta, \theta') d\theta' \quad \dots(14)$$

積分方程式(1)および(14)は、核関数に特異性がないのでそのまま  $M+1$  元の代数方程式に直して解く。数値積分公式としては梯形則を使った。また特異積分については Cauchy の主値または Hadamard の主値を取ればよいことは明らかなのでプログラム上もそのように処理してある。

### 2.5 計算の手順

計算の手順は、図-4 フローチャートに示すごとくである。

### 2.6 入力

必要な入力データは次のごとくである。

(1) 旋回角速度, 偏角……Key

Board より

OM =  $\Omega$  …無次元旋回角速度

F 6.3

AL =  $\alpha$  …偏角 (度)

F 7.2

(2) 分割数, 断面の位置……PTR

より

考えている船体横断面で

M …  $\theta$  が 0 から 180° までの円

周方向の分割数 I 3

X … その断面の x 座標

F 7.4

(3) 船体表面の幾何学的形状および勾配…PTR より

より

考えている船体横断面で

R(I) = R I = 1 から M+1 まで F 8.5

RX(I) =  $\partial R / \partial x$  " F 6.3

RXX(I) =  $\partial^2 R / \partial x^2$  " F 6.2

RT(I) =  $\partial R / \partial \theta$  " F 8.5

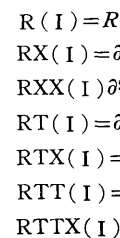
RTX(I) =  $\partial^2 R / \partial \theta \partial x$  " F 6.3

RTT(I) =  $\partial^2 R / \partial \theta^2$  " F 6.3

RTTX(I) =  $\partial^3 R / \partial \theta^2 \partial x$  " F 6.2

添字 I は  $\theta = (I-1)\pi/M$  の値であることを示

図-4 フローチャート



ステートメント数 約 250

す。

### 2.7 出力

考えている横断面位置の各  $\theta = (I-1)\pi/M$  で

VX…軸方向速度成分  $(V_x + v_x)/V_0$

VR…半径方向速度成分  $(V_r + v_r)/V_0$

VT…円周方向速度成分  $(V_\theta + v_\theta)/V_0$

$V = \sqrt{(V_x + v_x)^2 + (V_r + v_r)^2 + (V_\theta + v_\theta)^2}/V_0$

VON…一般流法線速度成分  $V_{ON}/V_0$

SVN…攪乱流法線速度成分  $v_n/V_0$

Q…吹出しの強さ  $q/V_0$

ここで  $V_x, V_r, V_\theta$  は一般流の各速度成分で次のように表わされる。

$$\left. \begin{aligned} V_x &= V_0 \cdot (\cos \alpha - \Omega R \cos \theta) \\ V_r &= V_0 \cdot (\sin \alpha + \Omega x) \cos \theta \\ V_\theta &= -V_0 \cdot (\sin \alpha + \Omega x) \sin \theta \end{aligned} \right\} \dots\dots(15)$$

### 3. プログラムの検定

#### 3.1 計算誤差, 精度

計算精度は, 入力データがせいぜい3桁しかないので,  $v_x, v_r, v_\theta, q$  がそれぞれ有効数字3桁まで得られることを目標とした。演算は連立方程式を含めすべて単語長(約7桁)で行なった。

#### 3.2 演算時間

分割数  $M=18$  とした場合, ひとつの断面位置について約2分。あるひとつの運動状態で船体表面全体を計算するのは, 20の断面位置で計算するとして約40分かかる。直進の場合は約20分でできる。

#### 3.3 適用範囲, 制限事項

分割数はある程度細かくなくてはならないが, あまり細かくしても入力データをつくる労力が大変なだけでむしろ精度が落ちる危険もあり,  $M=18$  ぐらいが適当と思われる。

3次元計算との差は, 軸長比が実際の船と同程度の楕円体の場合, 局所的な圧力で最大数%しか違わないのに, 実際の普通船型の場合にはこれが数10%にもなることがある。これは主に  $v_x$  によるのであって  $v_r, v_\theta$  の方はあまり問題はない。また圧力の方も船体表面全体の平均値は3次元計算とあまり変わらないから船体沈下等の計算には十分使える。比較的単純な形の3次元的数式船型の場合には, 実際の船型よりはずっとよい結果が得られるはずである。

### 4. プログラムの使用について

#### 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

浅水影響, 側壁影響を計算できるプログラムに発展させることは近い将来に可能である。そのときに船体沈下, トリム等を計算するプログラムを同時に組み込みたい。

### 5. あとがき

当所の計算機能力の制限から, 船体まわりの流れを計算するのに細長体理論を用いたプログラムをつくったが, 実際の船型については3次元計算との一致は十分満足すべきものとはいえず, 局所的な圧力の計算にはさらに工夫を要する。一方, 流れの方向をみたり, 船体沈下を計算したりするには十分実用性がある。

### 参考文献

菅 信「船体まわりの流れの計算」(その2, 任意断面形)第14回船研研究発表会講演概要, 1969. 11.

## S-4 ストリップ法による規則波中の船の縦運動計算プログラム

運動性能部 安 藤 定 雄  
推進性能部 小 山 鴻 一

### 1. プログラムの目的および概要

最近, 電子計算機の発達にともない船体運動の計算が盛んに行なわれるようになってきた。それらは2次元物体に働く流体力から船体運動を計算する。一般に

いわれるストリップ法に基づくものである。この理論によって計算された結果と水槽試験結果が非常によく一致することが得られているので<sup>1),2)</sup>, 最近では, ストリップ法で縦運動の推定を行なうし, 実験をある程



度省略できるので、船の運動を求める重要な一つの手法として普通よく用いられている。そこで、FACOM 230-10 で計算していたプログラムを FACOM 270-20 用に改良したプログラムである。

2. プログラムの内容

2.1 プログラムの番号, 名称

44-060

Ship Motion In Regular Wave By Strip Method  
(pitch, heave, relative bow motion)

2.2 製作者

運動性能部 安藤定雄

推進性能部 小山鴻一

2.3 製作年月

昭和 44 年 12 月

2.4 計算の基礎となる理論の概要

船をいくつかの Strip に分けて、その水面下の図形を等角写像で単位円に写像する場合の写像関数の二つの係数  $a_1, a_3$  を求める。(Lewis form)

そして、Laplace の方程式を満足し、自由表面条件を満足させ、速度ポテンシャルとこれに共軛な流れ関数から付加質量および減衰係数を求める。

そこで、固定座標系に関する船体の縦運動方程式は次のように表わされる。

$$\left. \begin{aligned} (m+a)\ddot{z} + b\dot{z} + cz - d\ddot{\theta} - e\dot{\theta} - g\theta \\ = F_c \cos \omega_e t - F_s \sin \omega_e t \\ (J_0 + A)\ddot{\theta} + B\dot{\theta} + C\theta - D\ddot{z} - E\dot{z} - Gz \\ = M_s \sin \omega_e t - M_c \cos \omega_e t \end{aligned} \right\} \dots\dots(1)$$

(1)の連立方程式の各係数は船の主要目と各 Strip の付加質量および減衰係数を船の艀から艫まで積分して求める。そして、連立方程式を解けば縦揺と上下揺と位相が得られる。それから相対水位、縦揺と上下揺の周期も得られる。

本プログラムの特徴としては次のとおりである。

- 1) 船のオフセットを入れると船体運動まで計算される。
- 2) 波との出会う角度は  $0^\circ \sim 180^\circ$  までを  $30^\circ$  間隔で計算し、速度は  $F_n = 0 \sim 0.3$  まで  $0.1$  間隔を自動的に計算する。
- 3) 付加質量と減衰係数はMTに入っているの、あとは必要な箇所における値を内外挿で求めるから、演算速度が非常に速くなっている。

2.5 計算の手順

計算の手順は、図-5 のフローチャートに示すごとくである。

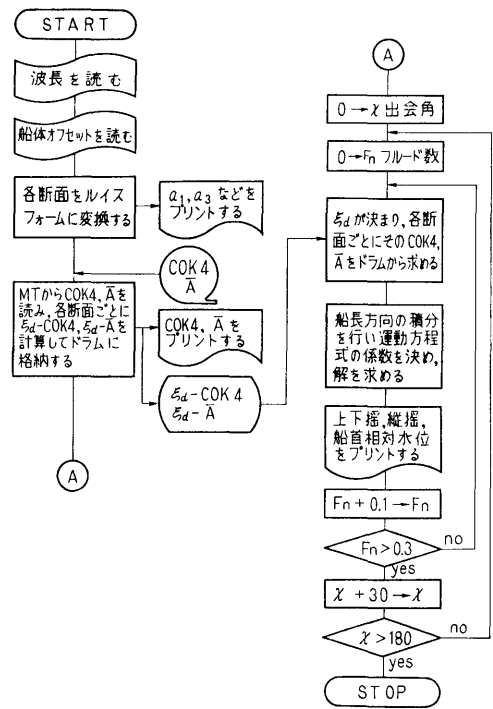


図-5 フローチャート

2.6 入 力

必要な入力データは次のごとくである。

- NW (I 4) ……波の種類の数
  - RBL (F5.2) …… $\sqrt{L/\lambda}$  船長—波長比
  - NOS (I 4) ……船の番号
  - SL (E14.7) ……船の垂線間長
  - SWL (E14.7) ……船の喫水線の全長
  - TMO (E14.7) ……喫 水
  - BMO (E14.7) ……船 幅
  - SKI (E13.6) ……環動半径
  - DSR (E13.6) ……A. P 以後の分割した長さ
  - DSH (E13.6) ……Base Line 部の Keel 幅
  - DHH (E13.6) ……raise of flower
  - TN (F6.3) ……各断面の喫水
  - BI (F6.3) ……各断面の各喫水での船幅
  - NS (I 2) ……各断面の番号
  - NCO (I 2) ……各断面の条件
- (-1 は Base Line まで喫水がない場合、1 は Keel 幅が DSH を小さい場合、その他は 0)

2.7 出 力

入力データの総てと、

ALF (F10.3)……船幅一喫水比  
 BET (F8.3)……断面積係数  
 AS (F10.3)……断面積  
 AA (F10.3)……Lewis form 変換の  $a_1$   
 BB (F9.3)……… ”  $a_3$   
 CB (F7.4)………  $C_b$   
 CP (F7.4)………  $C_p$   
 DIS (F10.3)…… $\Delta$   
 CW (F7.4)………  $C_w$   
 XLB (F13.4)………  $l_{cb}$   
 Y (F13.4)………各断面の付加質量と減衰係数

船体運動については、

CWI………波との出会角  
 FN ……速 度  
 WLB ……波 長  
 FAIO ……pitch の無次元値  
 BETA …… ” の波との位相差  
 TETAO ……heave の無次元値  
 ALPHA …… ” の波との位相差  
 TEFA ……pitch と heave との位相差  
 ZRO ……Relative bow motion の無次元値  
 GAM ……Relative bow motion の波との位相差  
 VB ……pitching の固有周期  
 VA ……heaving の ”

### 3. プログラムの検定

#### 3.1 計算精度

計算精度は、最終結果が有効数字で 3~4 桁以上あることを倍長演算や他機種との比較で検討してある。

#### 3.2 演算時間

SUBROUTINE LEWIS が 35 秒であり、SUBROUTINE INTOA が 3 分である。したがって、初期の演算に 3 分 35 秒を必要とし、以後は方向、速度と波長が決まった、1 点につき約 4 秒であるので 1 隻について考えれば方向を 7 種類、速度を 4 種類で波長を 15 点とした場合はコンパイル時間を除外すれば、総計演算時間は、10 分 35 秒である。

#### 3.3 適用範囲、制限事項

計算は方向を  $0^\circ \sim 180^\circ$  まで  $30^\circ$  間隔であり、速度は  $F_n$  で  $0 \sim 0.3$  までを  $0.1$  間隔であり、波長は最大 20 点までとなっているので、これ以外で計算したい場合はメインを簡単に改良すればよい。また、船の各位置での相対水位、上下加速度、Bending モーメントもこれにほんの少しの SUBROUTINE を増加すれば得ることも可能になる。

### 4. プログラムの使用法と応用

#### 4.1 オペレート

実行は BATCH 処理による。

#### 4.2 応 用

このプログラムと類似な方法によって、船体の横運動計算のプログラムを作ることができる。

#### 4.3 他機種への移行

本プログラムはメインと小さな SUBROUTINE 3 つが COMMON であり、他の主要な SUBROUTINE は SEGMENT で、普通ドラム上にあり、他に DRUM DIMENSION も使用しているので、大型計算機には少々の修正で可能であるが、小型には一度に計算できるプログラムには、不可能である。

### 5. あとがき

本プログラムを用いて、当部で行なった波浪中の試験船については皆計算することにした。また、今後、実験を行なう前に計算をすることにする。

一方、横運動の計算用プログラムも作成する予定であり、2次元理論で終わらずに3次元理論についても考えている。

### 参考文献

- 1) Y. Yamanouchi and S. Ando; "Experiments on a Series 60,  $C_b=0.70$  ship Model in Oblique Regular Waves", No. 26, Papers of Ship Reserch Institute.
- 2) Y. Yamanouchi and S. Ando; Comparison of Computer program results for ship behaviour in Oblique Regular waves", No. 26, Papers of Ship Reserch Institute.
- 3) 福田淳一: "規則波中の船の縦曲げモーメント" 第 110 号, 第 111 号, 造船協会論文集.

## S-5 不規則振動の統計解析用プログラム

運動性能部 安藤定雄

### 1. プログラムの目的および概要

時間とともに、そのとる値が変動していく現象の研究は、電気通信工学で入出力としての電圧とか電流の取り扱いに、経済学では経済量の変動に、あるいは船舶とか飛行機とか自動車の振動の問題に、その他非常に多くの部門において必要である。この問題の数学的取り扱いについては、数多くの文献があるので、ここでは省略しプログラム自体について述べる。

プログラムは自己相関および相互相関の場合の応答とその評価等が得られるものである。また、実験から解析まで、ON-LINE で解析可能になっている。

### 2. プログラムの内容

#### 2.1 プログラムの番号および名称

44-018-1

Auto Spectrum

44-053

Auto Spectrum (作図用)

44-018-2

Cross Correlogram

44-018-3

The Response Function of A System  
Having Multiple Input

#### 2.2 製作者

運動性能部 安藤定雄

#### 2.3 製作年月

昭和 44 年 10 月

#### 2.4 計算の基礎となる理論と概要

ここで、基礎となる理論を述べることは省略する。そこで、多入力の場合についての実際の計算順を赤池氏<sup>1)</sup>の方法にしたがって述べる。

データは  $\{x_0(n\Delta t), x_1(n\Delta t), \dots, x_k(n\Delta t); n=1, 2, \dots, M\}$  で与えられている。

#### 1) コレログラム $C_{jl}(m)$

$(m=0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm h; j, l=0, 1, 2, \dots, k)$

$$C_{jl}(m) = \frac{1}{M} \sum_{n=1}^{M-m} x_j(m+n) \tilde{x}_l(n) \quad (h > m > 0)$$

$$= \frac{1}{M} \sum_{n=1}^M \tilde{x}_j(m+n) \tilde{x}_l(n) \quad (-h < m < 0)$$

ここで、 $\tilde{x}_j(n) = x_j(n\Delta t) - \bar{x}_j$

$$\bar{x}_j = \frac{1}{M} \sum_{n=1}^M x_j(n\Delta t)$$

である。

2)  $C_{jl}(m)$  のスペクトラム  $\bar{p}_{jl}(r)$   
 $(r=0, 1, 2, \dots, h)$

$$\bar{p}_{jl}(r) = \sum_{m=-h}^h \exp\left(-i2\pi \frac{r}{2h} m\right) C_{jl}(m)$$

3)  $\bar{p}_{jl}(r)$  のスムーズド スペクトラム  $\hat{p}_{jl}(r)$

$$\hat{p}_{jl}(r) = \sum_{n=-a}^a a_n \bar{p}_{jl}(r-n)$$

ここで、 $a_n$  は適当なウエイト関数である。

4)  $\hat{p}_{jl}(r)$  で次のマトリックスを作る

$$\begin{pmatrix} \hat{p}_{11}(r), \hat{p}_{12}(r), \dots, \hat{p}_{1k}(r), \hat{p}_{10}(r) & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \hat{p}_{21}(r), \hat{p}_{22}(r), \dots, \hat{p}_{2k}(r), \hat{p}_{20}(r) & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{p}_{k1}(r), \hat{p}_{k2}(r), \dots, \hat{p}_{kk}(r), \hat{p}_{k0}(r) & 0 & 0 & \dots & 1 \\ \hat{p}_{01}(r), \hat{p}_{02}(r), \dots, \hat{p}_{0k}(r), \hat{p}_{00}(r) & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

ここで、 $\hat{p}_{jl}(r)$  と  $\hat{p}_{lj}(r)$  は Complex Conjugate である。

このマトリックスを逆行列の解法に従って計算し、

$$\begin{pmatrix} 1, 0, \dots, 0, \alpha_1, \gamma_{11}, \gamma_{12}, \dots, \gamma_{1k} \\ 0, 1, \dots, 0, \alpha_2, \gamma_{21}, \gamma_{22}, \dots, \gamma_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0, 0, \dots, 1, \alpha_k, \gamma_{k1}, \gamma_{k2}, \dots, \gamma_{kk} \\ 0, 0, \dots, 0, \varepsilon, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k \end{pmatrix}$$

とする。

#### 5) Gain

$$A_j \left( \frac{r}{2h\Delta t} \right) = \hat{A}_j(r) = -\beta_j = \bar{\alpha}_j$$

Multiple Coherence

$$\hat{\gamma}_{0^2, 12 \dots k}(r) = 1 - \frac{|\varepsilon|}{\hat{p}_{00}(r)}$$

Partial Coherence

$$\hat{r}_{0j}^2, 12 \dots j \dots k(r) = \frac{|\alpha_j|^2}{|\epsilon \hat{r}_{jj} + |\alpha_j|^2}$$

Relative Error

$$R_j, \delta(r) = \left( \frac{1}{N-k} \frac{\epsilon \hat{r}_{jj}}{|\alpha_j|^2} F(2, 2(N-k), \delta) \right)^{1/2}$$

以上を計算する。

本プログラムの特長

1) 当部の A-D 変換器より ON-LINE で、計測されたデータが計算機のドラムに転送することが可能である。したがって、必要な入力データ（計測項目、サンプル時間々隔、キリプレーション定数など）を A-D 変換器の最後の部分に入れて置くと、自動的に計算される。

2) 各プログラムの最大解析容量

44-018-1 と 44-053

チャンネル数	8 項目
データ数	1,000 個 (各項目)
ラグ数	120 個

44-018-2

チャンネル数	8 項目
データ数	1,000 個 (各項目)
ラグ数	100 個
シフト数	±10 個

このプログラムでは、任意のチャンネル間の相互相関を計算できるように、毎回キーからチャンネルを指定する。これを何回でも可能になっている。

44-018-3

チャンネル数	6 項目
データ数	1,000 個 (各項目)
ラグ数	100 個

2.5 計算の手順

入力は決まっているが、出力はセンススイッチで如何にも変化する。また、初期値も毎回入れる必要なし、また、A-D 変換器と ON-LINE の場合のプログラムもあれば、OFF-LINE のもあるので、フローチャートは省略する。

2.6 入力 (OFF-LINE の場合)

チャンネル数	ICH	I 4
模型番号	IMNO	I 4
ラグ数	LAG	I 4
サンプル時間間隔	DELT	F 5.3
項目名	AITEM, BITEM	

A8 (16 字まで)

キャリプレーション定数

	ACAL	E 11.4
テスト番号	ITEST	I 4
データ	IX	I 4

以上は共通である。

IN PUT	チャンネル数	ICHA	I 1
OUT PUT	"	ICHB	I 1

以上は相互相関の場合に必要なである。

OUT PUT	チャンネル数	IOUT	I 4
---------	--------	------	-----

これは、多入力の場合に必要なである。

## 2.7 出 力

入力データのすべてを出力するほか、データ数、コログラム、スペクトラム、分散、スペクトラムの面積積分と分散の比、位相と 2.4 で述べたものすべてが、ラインプリンターに出力させることもできる。

## 3. プログラムの検定

### 3.1 計算誤差, 精度

計算精度は、最終結果では伊藤忠の CDC と比較した範囲では 4~5 桁であったが、すべてを 16 桁で計算したものは 3~4 桁であったことから、精度は有効数字 3 桁以上であるといえる。計算はシングルである。

### 3.2 演算時間

オートスペクトラムの場合には 15 秒から 1 分の間であり、作図は一つのスペクトラムにつき 30 秒である。一例を図-6 に示す。2 入力の場合は 20 秒から 1 分で 1 つの相互相関が得られる。多入力では 2 分から 10 分である。これらはコンパイル時間を含まない。

### 3.3 適用範囲, 制限事項

このプログラムを使用すれば、不規則的に変動している現象の応答などは如何なる場合でも得られるが、統計解析を行なった場合の意義については、利用者の方の思慮によるものである。

プログラムの解析可能な容量はで述べてあるとおりである。

## 4. プログラムの使用について

### 4.1 オペレート

実行は BATCH 処理による。

### 4.2 応 用

多入力までの解析を行なえば、統計論的には完了したと思われるが、超大型の計算機があれば、高次スペクトラム、ベクトルのスペクトラムや条件つきスペクトラムに進展することは可能である。

### 4.3 他機種への移行



相当詳しいデータが入手できるようになってきている。本報告ではこれらのデータを活用して、船の操縦運動、針路安定性等の計算を行なったもののうち、一様な風と流れの中で直進状態から操舵した後の船体運動を計算するプログラムを示し、他の応用プログラムについても解説する。

2. プログラムの内容

2.1 プログラムの番号, 名称

44-007-4

Steered Motion in Wind and Flow

2.2 製作者

運動性能部 小川陽弘

2.3 製作年月

昭和 44 年 7 月

2.4 計算の基礎となる理論の概要

固定座標系に関する船体運動方程式は次の(1)式のように表わされる<sup>1)</sup>。

$$\left. \begin{aligned} (m+m_x)\dot{u}_x &= E_H + E_W + E_T(1-t) \\ &+ [(m+m_y)v_y \\ &- (m+m_x)U_F \sin \\ &(\Psi_F - \phi)]r \\ (m+m_y)\dot{u}_y - F\dot{r} &= F_H + F_W \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} -[(m+m_x)v_x \\ - (m+m_y)U_F \cos \\ (\Psi_F - \phi)]r \\ (I_z + I_{zx})\dot{r} - G\dot{u}_y &= G_H + G_W \\ -G\dot{u}_y U_F \cos(\Psi_F - \phi)r \end{aligned} \right\} \dots\dots(1)$$

ただし座標系および記号は図-7, 表-4 に示すものである。

船体運動は(1)式から加速度および角加速度を求め、これを順次数値積分することにより速度および角速度、位置および方位角、偏角および転心等を計算して得られる。

船体に働らく流体力のうち、船体抵抗成分  $E_H$  はフルード数の関数として、風の力とモーメント  $E_W$ ,  $F_W$ ,  $G_W$  は風向角の関数として数値で与えて内挿により求め、他は微係数を用いて数式的に計算する。

これらに関しては 1) に詳細に記述されている。

数値積分の方法としては、船の操縦運動のように加速度が小さい場合には逐次積分法で十分であり、計算機の容量、計算速度等を考慮すれば、むしろこの方がルンゲ・クッタ等の方法によるよりもすぐれていることが知られている<sup>2),3)</sup>。

2.5 計算の手順

表-4 記号

$O-X, Y$	Coordinate system fixed in space
$X_O, Y_O$	Position of C. G. of ship referred to $O-X, Y$
$o_o-x, y$	Coordinate system fixed in ship, origin at C. G.
$U_F, \Psi_F$	Absolute speed and direction of uniform flow
$U_B, \Psi_B$	Absolute speed and direction of uniform wind
$U, \beta$	Apparent speed and drift angle of ship
$u_x, u_y$	$x$ -and $y$ -components of $U$ ( $=U \cos \beta, -U \sin \beta$ )
$r$	Turning rate of ship ( $=\dot{\phi}$ )
$\phi$	Heading angle
$V, \beta_V$	Relative ship speed and drift angle to water
$v_x, v_y$	$x$ -and $y$ -components of $V$ ( $=V \cos \beta_V, -V \sin \beta_V$ )
$W, \beta_W$	Relative ship speed and angle to air
$\Psi$	Course angle ( $=\phi - \beta$ )
$\sigma$	Rudder angle
$m, I_z$	Ship's mass and mass moment of inertia
$m_x, m_y, I_{zx}$	Added mass components and added moment of inertia
$E, F, G$	$x$ -and $y$ -components of force and moment on ship
$E_H, F_H, G_H$	Hydrodynamic forces and moment below waterline
$E_W, F_W, G_W$	Aerodynamic forces and moment above waterline
$E_T, t$	Propeller thrust and thrust deduction coefficient
$p$	Distance of pivoting point before C. G.

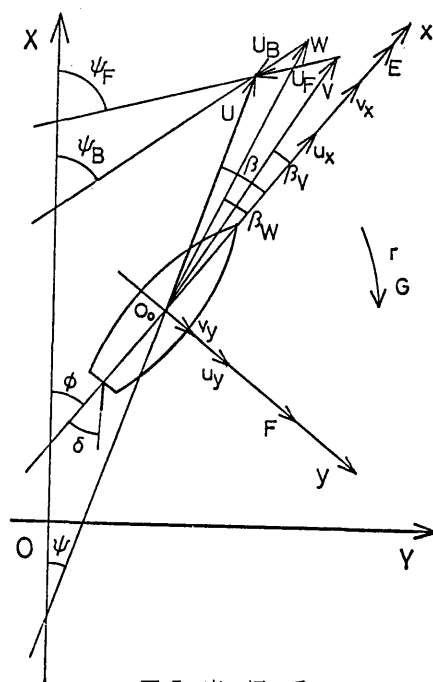


図-7 座 標 系

計算の手順の概略を図-8 の流れ図に示す。多くのサブプログラムは他の同種のプログラムと共用する目的で作ってあるので、一見無用と思われるような部分もある。データの配列についても同様である。

## 2.6 入 力

入力データは紙テープおよびキーボードから与えられる。紙テープには次のデータを与える。

- 1) 風の力の成分およびモーメント(無次元値)。ただし風の力を考慮しない時は0とすることもできる。
- 2) 水の力の  $y$  成分およびモーメントの微係数(無次元値)。舵角, 横速度成分, 回頭角速度の3次までの組合わせの関数として定めたもの。
- 3) 付加質量係数, 付加環動半径, 船の長さ, 船体の環動半径, 排水量等。
- 4) 船体抵抗係数。
- 5) 初速等。
- 6) 操舵速度, 最大舵角。
- 7) 位置, 方位等の計算終了条件, 限界舵角および偏角, 計算時間間隔, 出力時間間隔等。
- 8) 標示用文字。

キー入力には流速, 流向, 風速, 風向の初期値を与える。

## 2.7 出 力

出力はラインプリンターに打出される。実船の運動について指定時間々隔ごとの時刻(分), 舵角(度), 見かけの偏角(度), 対水偏角(度), 回頭角速度(無次元), 見かけの転心(無次元), 速度(初速に対する比), 時刻(秒), 縦距(船長比), 横距(船長比), 船首方位角(度)が印刷され, 最後に計算終了条件を打出して1状態を終る。終了条件とはあらかじめ与えた位置, 方位, 時間等を過ぎたとき, あるいは速度が抵抗曲線の範囲から外れた場合, 偏角が極端に大きくなってしまう場合等を文字によって標示するものである。

## 3. プログラムの検定

### 3.1 計算精度

このプログラムの場合, 誤差の大半は計算時間々隔に依存する。運動が非定常な範囲ではこれは短かいほど良いが, 巨大船で1秒位にとれば十分である。定常状態に入ると(一様に流される場合も含めて)5秒でも実用上差は出ない。入力データの精度を考慮すれば, これ以上計算精度を上げて意味がないと思われる。なお計算はすべて単語長で行なっている。

### 3.2 演算時間

入力条件, 終了条件によって全く異なるが, 1状態につき最大3分程度である。

### 3.3 制限事項

計算は無次元値を入力として, 実船の実時間で行なっているから, 船の種類によってはプログラムを一部変更する必要がある。また風や流れの条件についてもプログラムで変更する必要がある部分もある。

## 4. プログラムの使用について

### 4.1 オペレート

実行は BATCH 処理による。サブルーチンは MT に RB で入っているものを使用する。

### 4.2 応 用

このプログラムと類似の方法で, 船の操縦運動に関する他のプログラムを作ることができる。現在までに次の3種が一応完成している。サブルーチンはいずれも共通のものを多く使用するので, 同一MTを用いている。

- (a) 44-007-1 初期外乱を受けた船の運動
- (b) 44-007-2 風と流れの中で直進可能な速度範囲およびその最低速度における針路安定性
- (c) 44-007-3 Z操舵による風と流れの中の操縦性指数の計算

(a), (c)の中には, 運動の各要素をLPで図化して直視できるようにするためのサブルーチンも使用して

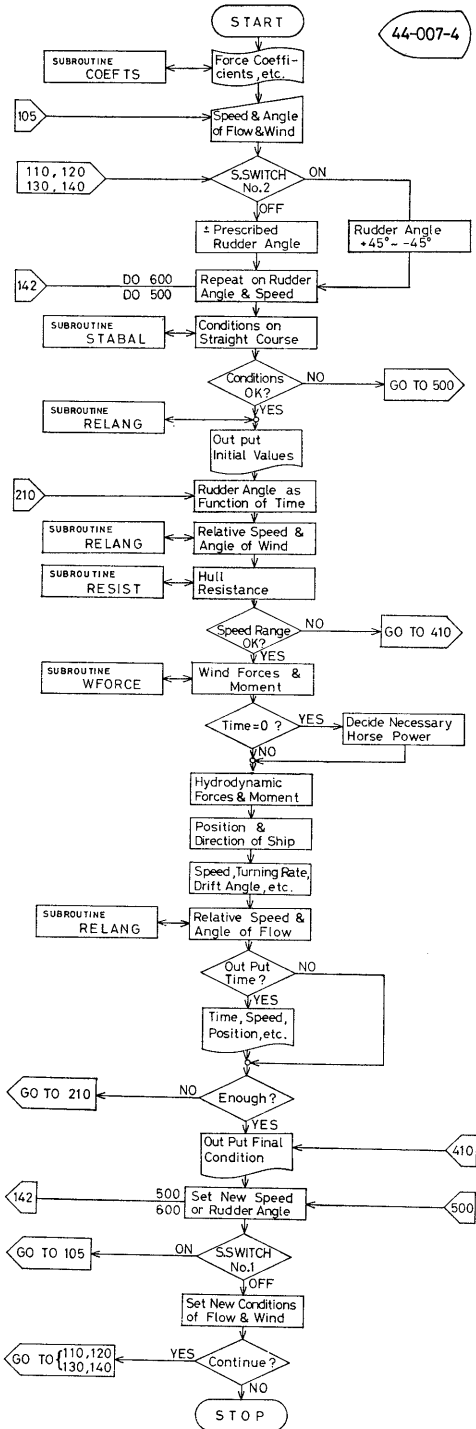


図-8 (a) メインプログラムのフローチャート

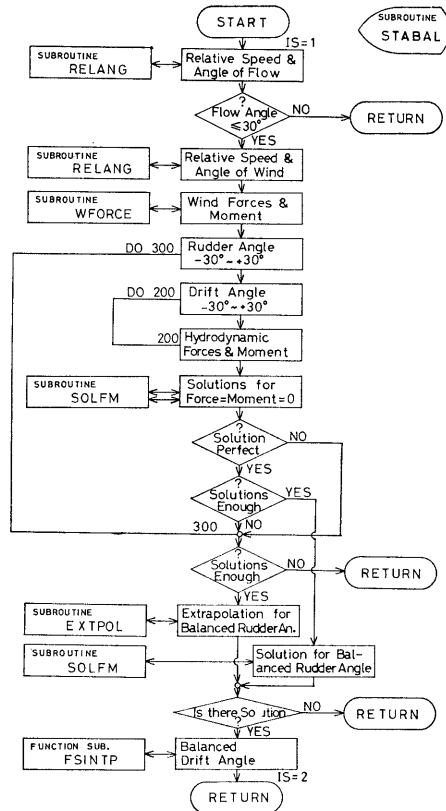


図-8 (b) サブプログラムのフローチャート

り、これはXYプロッターほどの精度を要求しない場合には、そのまま結果のグラフとして用いることもできるので、一般に利用可能である。Z操舵の例を図-9に示す。

### 4.3 他機種への移行

上記各プログラムとも、現在コア 16kW をフルに使用しているので (ドラムには多少余裕があるが)、さらに進んだ計算を行なうためにはコア容量を増大させることが望ましい。

## 5. 結 言

操舵にともなう船の運動をある程度正確に Simulate できることがわかった。現在はまだプログラム開発を始めて間もないので不備な点も多く、しばしば書き直しながら使っているような実状である。

さらに多くのデータが得られれば、細かい点の計算法を改良して精度を向上させることもできるし、外力についても風や流れの他に波の力、曳船による力、オートパイロットの動作などを計算に入れることも可能である。これらについては電子計算機による数値計算



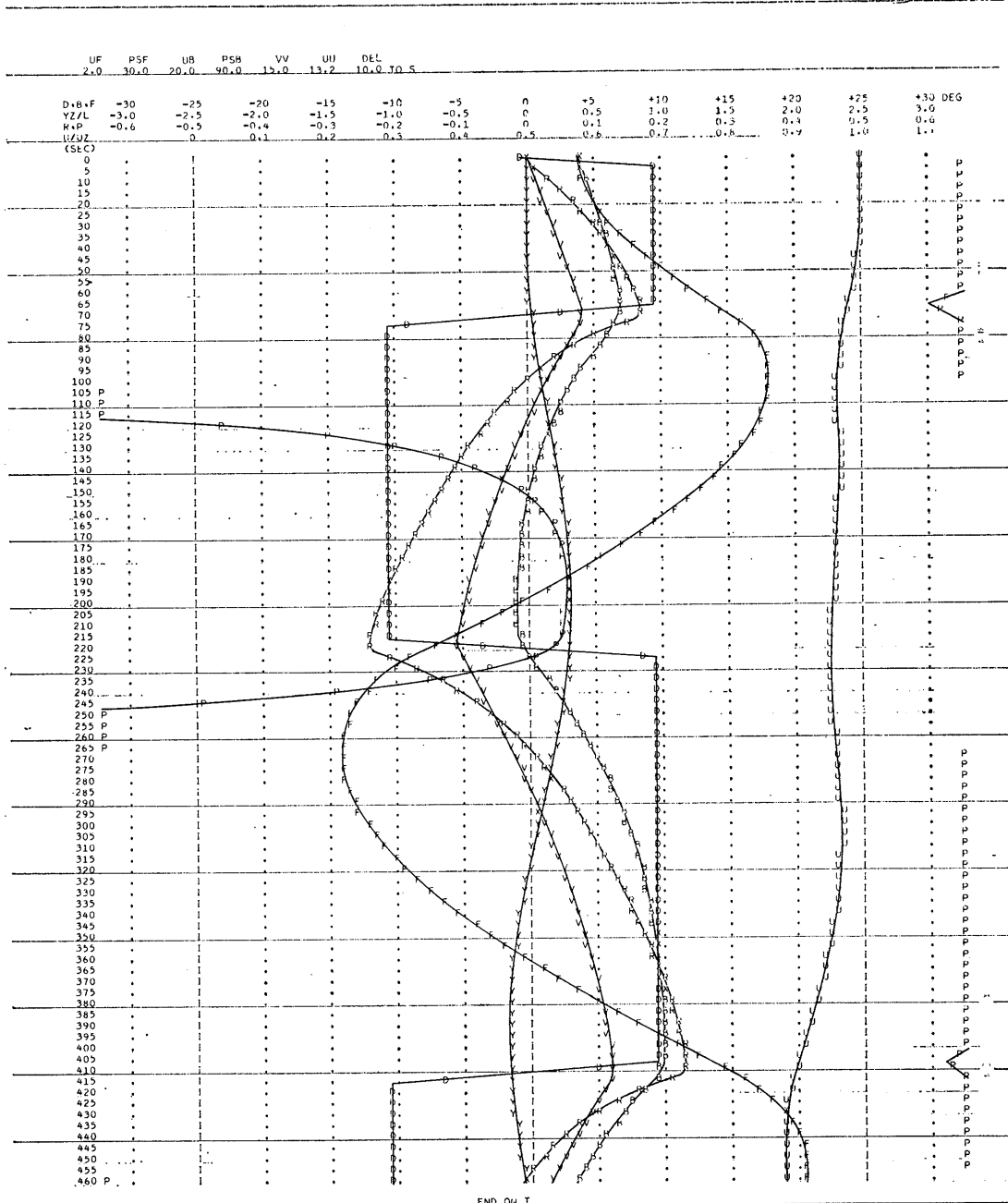


図-9 Z 操舵の計算例

法の利点を活かしてさらに多くのプログラムを作る予定である。

参考文献

1) 小川陽弘：外力を受ける船の操縦運動の計算(その1)，日本造船学会論文集，第126号，

1969.

2) J. Strom-Tejsen: A Digital Computer Technique for Prediction of Standard Maneuvers of Surface Ships, DTMB Report 2130, 1965.  
 3) Hsao-Hsin Chen: Some Aspects of Ship Manueverability, JSR, Vol. 13, No. 2, 1969.

S-7 軸力をうける梁の塑性モーメントに関する計算プログラム

船体構造部 有田喜久雄

1. プログラムの目的および概要

船の甲板や船底の構造要素である縦通部材は，船体縦曲げによる軸力と同時に甲板荷重あるいは水圧等による横荷重をうける。このような板つき防撓材の塑性強度を求めるには，軸力と塑性モーメントの関係を計算する必要がある。

軸力—塑性モーメントの相関曲線については，板付き形鋼を含めた各種の形鋼について図表であらわされたものがある<sup>1)</sup>。しかし，高張力鋼を使用した場合の混用梁あるいは組立て桁については実際に計算する必要があるので，任意のI形梁の相関曲線を求める電子計算機用プログラムを作成した。

2. プログラムの内容

2.1 プログラムの番号，名称

44-008

Calculation of Plastic Moment

2.2 製作者

船体構造部 有田喜久雄

2.3 製作年月

昭和44年3月

2.4 計算の基礎となる理論の概要

最も簡単な例として，図-10に示すような対称混用梁については，全断面積を  $A$ ，ウェブの面積を  $A_3$  と

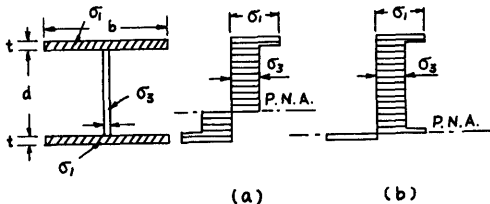


図-10 対称混用梁の応力分布

し，全断面が降伏するときの軸力を  $N_p$  とすると，軸力  $N$  があるときの梁の断面の図心まわりの塑性モーメント  $M$  と軸力がない場合の塑性モーメント  $M_p$  との比  $M/M_p$  は次式により求められる。

(a)  $0 \leq \frac{N}{N_p} \leq \frac{A_3}{A'}$  の場合

$$\frac{M}{M_p} = 1 - \frac{\sigma_3 A'^2}{4\omega M_p} \left( \frac{N}{N_p} \right)^2 \quad \dots\dots(1)$$

(b)  $\frac{A_3}{A'} \leq \frac{N}{N_p} \leq 1$  の場合

$$\frac{M}{M_p} = \frac{\sigma_3}{4b\eta M_p} \left[ 2d(b\eta - \omega)A' \left( 1 - \frac{N}{N_p} \right) + A'^2 \left\{ 1 - \left( \frac{N}{N_p} \right)^2 \right\} \right] \quad \dots\dots(2)$$

となる。

ここで， $\sigma_1$ 、 $\sigma_3$  はそれぞれフランジおよびウェブ部材の降伏応力で

$$\eta = \sigma_1 / \sigma_3$$

$$A' = 2bt\eta + A_3$$

$$M_p = \sigma_3 \left\{ bt(d+t)\eta + \frac{1}{4}\omega d^2 \right\}$$

任意のI形梁については，断面の図心の位置が動くことを考慮して(1)，(2)式を拡張することにより求められる。

2.5 計算の手順

図-11のフローチャートに計算の手順を示す。ステップメントの数は約80である。

2.6 入力

すべて実数形式としF7.1とする。

図-12において

B1, B2……フランジの幅 (mm)

W ……ウェブの幅 (mm)

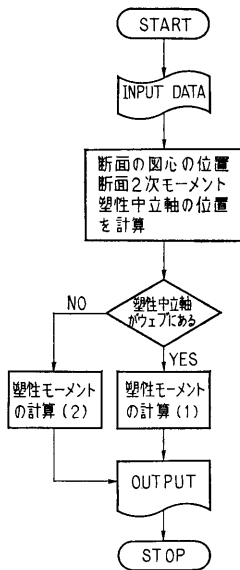


図-11 フローチャート

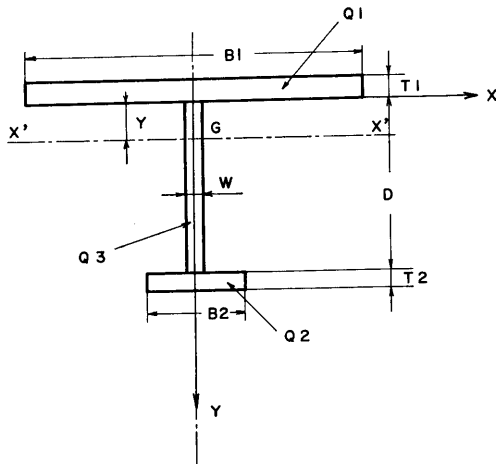


図-12 I形梁の断面図

T1, T2……フランジの板厚 (mm)

D ……ウェブの深さ (mm)

Q1, Q2, Q3……降伏応力 (kg/mm<sup>2</sup>)

2.7 出力

Y……断面の図心の位置 (mm)

IX……X' 軸のまわりの断面2次モーメント (mm<sup>4</sup>)

IY……Y 軸のまわりの断面2次モーメント (mm<sup>4</sup>)

M……塑性モーメント (kg・mm)

M/M<sub>p</sub>……軸力がある場合の塑性モーメントと軸力がない場合の塑性モーメントとの比

PNA……塑性中立軸の位置 (mm)

### 3. プログラムの検定

#### 3.1 計算誤差, 精度

計算精度は, IX, IY, M および M/M<sub>p</sub> については有効数字4桁, Y および PNA については小数点以下2位までとする。

#### 3.2 演算時間

計算時間は秒以下の order なので, LINE PRINTER の速さで済む。

#### 3.3 適用範囲, 制限事項

本プログラムは I 形梁について適用される。I 形梁以外の梁に使用すると, IY は不正確となる。

### 4. プログラムの使用について

#### 4.1 オペレート

プログラムの実行は ¥ BATCH で PT よりできる。

#### 4.2 プログラムの応用

I 形梁の塑性モーメントだけでなく, 断面2次モーメント等の断面の性質を計算できるプログラムが含まれている。

### 5. あとがき

本プログラムによって, 断面の図心の位置, 断面2次モーメントの値および塑性中立軸の位置もあわせて求められるので, 設計の基礎資料を得るのに役立つと思われる。

### 参考文献

- 1) 日本溶接協会塑性設計研究委員会, 軸力小委員会編: 塑性設計資料集 (その1) 「形鋼および板付形鋼の塑性断面係数」(1962).

## S-8 荷役フックの強度計算プログラム

艦装部 翁長一彦・福井正洋

### 1. プログラムの目的および概要

艦装品に限らず荷重を受ける鋼構造部材に対して合理的な安全使用荷重を定めることは、一般に困難な問題である。荷役フックのように曲りの大きい金具の場合には、局部的に塑性域が生じても、部材全体として、何ら使用上支障はないので、弾性理論に基づく材料力学的計算による最大応力を許容応力以内におさえるという通常の方法で部材の寸法を定めると、その強度は過大となる。また一方、これら艦装金具に対する諸規則は Proof test を要求しているものが多く、試験荷重の下で、大きな永久変形、亀裂、破壊等の異常のないことを条件としている。このように部材に異常を生ぜしめる荷重を基準として安全係数を定めることは実際的にはあるが、この基準となる荷重を決定するには弾性的強度計算では不可能であり、一般には実験を行なうか、弾塑性的検討を行なわねばならない。

荷役フックの強度に対する弾塑性理論からの検討の例は 1, 2 あるが、断面形状の種々の変化を考えると、実用上不十分であると思われる。本プログラムは梁の断面形状を 3 つの連続する 2 次曲線に近似することに始まり、弾性域、片側塑性域、両側塑性域の 3 段階に渡って、荷重、断面各部の応力、歪、中性軸の位置、塑性域の範囲等を算出するものである。

この計算は部材の合理的な安全使用荷重の決定に対して重要な指針を与えるものと思われる。

### 2. プログラムの内容

#### 2.1 プログラムの番号、名称

44-024

荷役フックの強度計算について

#### 2.2 製作者

艦装部 福井正洋

#### 2.3 製作年月

昭和 44 年 3 月

#### 2.4 計算の基礎となる理論の概要

計算は完全弾性範囲内にある状態、内側に塑性域が生じた状態、さらに外側にも塑性域が生じた状態の 3 段階に分けて行なった。

両側に塑性域が生じた状態では、釣合いの方程式は

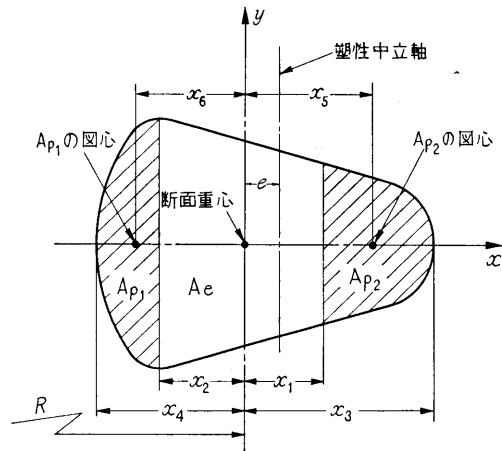


図-13 フック断面

少々の変形の後

$$\left. \begin{aligned} & \int_{Ae} (x-e)(x+r)/(R+x) dA \\ & + \{ Ap_1(x_6-r) \\ & + Ap_2(x_5+r) \} \\ & \times (x_2+e)/(R-x_2) = 0 \\ & e = (2x_1x_2+x_2R-x_1R) / \\ & (x_2-x_1-2R) \end{aligned} \right\}$$

となる。

ここで  $x_2$  を定めると、 $Ap_1$ ,  $x_6$  が決まり、 $Ap_2$ ,  $x_5$ ,  $Ae$  が  $x_1$  の関数となるので、上 2 式を  $e$  と  $x_1$  について“はさみうち法”を使って解いた。求められた  $e$  および  $x_1$  により荷重、断面各部の応力、歪等が算出される。

#### 2.5 計算の手順

計算の手順は、図-14 フローチャートに示すごとくである。

#### 2.6 入力

主に必要な入力データは次のごとくである。整数は I 2, 実数は F 8.3 とする。

##### (1) フックの幾何学的形状

XX (I), YY (I)……断面形状を表す座標

TH……………断面の傾斜

R……………曲率半径

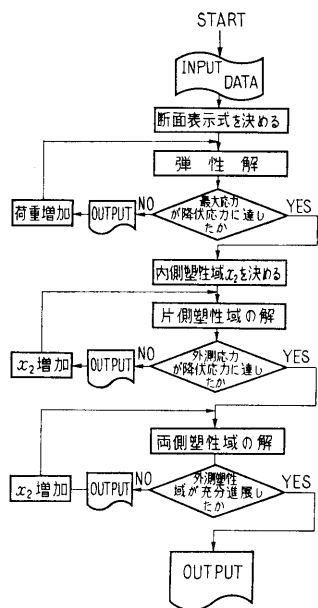


図-14 フローチャート

- RR .....断面図心と荷重方向との垂直距離
- (2) 材料の機械的性質
  - CY .....降伏応力
  - Y .....ヤング係数
- (3) その他
  - H .....積分のきざみ
  - HO .....“はさみうち法”のきざみ
  - XO .....“はさみうち法”における初期値
  - DE .....“はさみうち法”の精度
  - X2L ..... $X_2$ の増加打ち切り指令数
- 2.7 出力
  - EX .....断面各部の歪
  - CX .....断面各部の応力
  - P .....荷重

- E .....図心と中性軸との距離
- A .....断面の面積
- XG .....断面の図心位置
- $A_{p1}, x_6$  .....内側塑性域の面積とその図心
- $A_{p2}, x_5$  .....外側塑性域の面積とその図心
- $A_e$  .....弾性域の面積

3. プログラムの検定

3.1 計算誤差, 精度

計算精度は, 最終結果が有効数字3桁まで得られることを目標とした。

3.2 演算時間

$H=0.01$  とし “はさみうち法” に対して適切な初期値を入れた場合, 実行を ¥ BATCH として, 1断面に対して約15分である。

3.3 適用範囲, 制限事項

積分のきざみは  $H=0.01$  を要する。また “はさみうち法” に使用する  $e$  と  $x_1$  の初期値をできるだけ正確に予測しておくことが必要である。

4.1 プログラムの応用

他のサブルーチンを引数とする “はさみうち法” のサブルーチンが含まれており汎用できる。

4.2 他機種への移行

5. あとがき

本プログラムを使用して荷重とフック断面の最大歪との関係を調べることにより, 適切な安全使用荷重の推定ができる。これはフックに限らず曲り梁とみなされるような種々の断面形状を持つ部材についても応用でき, それらの合理的な安全使用荷重ならびに安全率の決定に役立つものと思われる。

参考文献

荷役フックの疲れ強さについて, 金山正博: 日立造船技報 44年1月。

S-9 Newman-Sharma 法による造波抵抗計算プログラム

推進性能部 足 達 宏 之

1. プログラムの目的および概要

船の造る波から直接造波抵抗を計算しようとする方

法がいくつか考えられている。Newman-Sharma 法は, 船の進行方向に平行な線上での波形記録を Fou-

rier 変換し, Energy Spectrum を求めるという法により, 船の造波抵抗を求めるものである。本プログラムは試験水槽で, 船型試験を行なう際に波形を計測し, Newman-Sharma 法により造波抵抗を求め, 船型試験解析に役立たせる目的で作られた。なお, 本プログラムは TOSBAC 3300 を使用した波形解析システムの一部をなすもので, 波形の記録, サンプリング, 平滑化, また他機種の計算機用入出力としてのデータを求める等の一連のプログラムの内の一部である。

## 2. プログラムの内容

### 2.1 プログラムの名称

Fourier Transform of Wave Pattern and Calculation of P-Q Functions (FWPQ)

### 2.2 製作者

推進性能部 足達宏之

### 2.3 製作年月

昭和 43 年 6 月

### 2.4 計算の基礎となる理論の概要

造波抵抗理論によると, 一定速度で進む波源の造波特性を表わす  $P$ - $Q$  関数と, 進行軸より一定な距離  $Y$  だけ離れた線上の波の Fourier 変換との間には次のような関係があることが Newman によって示されている。

$$P(\theta) + iQ(\theta) \cong -c \sin \theta \cdot \cos \theta \cdot e^{ik_0 Y \sec^2 \theta \cdot \sin \theta} \int_{-\infty}^{\infty} \zeta(X, Y) e^{ik_0 X \sec \theta} dX \quad \dots\dots(1)$$

ここで  $k_0 = \frac{g}{c^2}$ ,  $c$  は波源の速度,  $g$  は重力加速度,  $\theta$  は素成波の角度,  $\zeta(X, Y)$  は波高を表わす。

造波抵抗  $R$  は  $P$ - $Q$  を使って次のように表わすことができる。

$$R = \frac{16\rho k_0^2}{\pi} \int_0^{\pi/2} \sec^3 \theta [P^2(\theta) + Q^2(\theta)] d\theta \quad \dots\dots(2)$$

$$= \frac{\rho g k_0}{\pi} \int_0^{\pi/2} \sin^2 \theta \cdot \sec \theta \left| \int_{-\infty}^{\infty} \zeta(X, Y) e^{ik_0 X \sec \theta} dX \right|^2 d\theta \quad \dots\dots(3)$$

(3)式を計算すれば良いのであるが, 計測される波は有限なので波高  $\zeta(X, Y)$  を次のように分けて考える。船の前方では波高はゼロ, 船の後方では波の漸近的な性質を利用する。

$$\zeta(X, Y) = \begin{cases} 0 & X \leq N \\ = \zeta(X, Y) \text{ measured} & N \leq X \leq M \\ = \frac{\zeta_0 \cos(k_0 X - \epsilon)}{\sqrt{k_0 X}} & M \leq X \end{cases} \quad \dots\dots(4)$$

(4)式の  $\zeta_0, \epsilon$  は実験データから求める。(4)式の  $\zeta$  を使うと(3)式が計算される。

### 2.5 計算の手順

省略

### 2.6 入力データ

$MNO$	$I$	模型船番号
$TNO$	$I$	実験番号
$QLL$		船の長さ
$VM$		船の速度
$Y$		計測位置
$DX$		データのサンプリング間隔
$NF$	$N \leq X \leq 0$	$I$ $X=0$ を中心としたデータ
$NA$	$0 \leq X \leq M$	$I$ 数 ( $X=0$ は船体のどこに定めても良い)
$F(I)$	$I=1 \sim NF+NA$	波形データ
$DT1, DT2$		$\theta$ について計算間隔
$HXM, EPS$		打ち切り点定数 ((4)式の, $\zeta_0, \epsilon$ )

$I$  と書いてあるデータは整数型データ, 他は全て実数型のデータである。

### 2.7 出力

素成波の角度  $\theta$  について  $0^\circ$  から  $80^\circ$  まで, 計測波形の Fourier spectrum,  $P$ - $Q$  関数, 振幅関数を出力する, 造波抵抗  $R$  は振幅関数の積分として出力される。

## 3. プログラムの検定

### 3.1 計算精度および誤差

計算精度は入力波形記録, 定数  $\zeta_0, \epsilon$  の計測精度によるが, 演算は約 10 桁精度で行なっている。抵抗の値について, 他で求めたものとの比較では 3 桁位の精度は十分あると考えられる。

### 3.2 計算所要時間

波形記録データ数 400 で約 100 分位である。

## 4. プログラムの使用法と応用

### 4.1 プログラムのオペレート

推進部 TOSBAC-3300 ALPS のオペレートに従って行なう。

### 4.2 プログラムの応用 (メインの発展, サブルーチンの応用)

水面および水中を一定速度で航走する物体の作る波の Fourier Spectrum の計算であるから, 船の波に限らず, 他の物にも応用できる。

サブルーチンに有限フーリエ変換の計算法 (Filon

の方法) とフレネル積分を含んでいる。

4.3 他機種への移行

Facom 270-30 用プログラム, CDC-3600 用プログラムがある。CDC 用プログラムでは(3)式をさらに変形した

$$R = -\frac{\rho g k_0}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \zeta(X, Y) \int_{-\infty}^{\infty} \zeta(\xi, Y) K(K_0 X - K_0 \xi) d\xi dX$$

$$K(Z) = \int_0^{\pi/2} \sin^2 \theta \cdot \sec \theta \cdot \cos(Z \sec \theta) d\theta$$

の形でも造波抵抗  $R$  を計算できるようにしてある。

波形データは TOSBAC 用のデータから直接 FACOM 用のデータに変換できるようになっている。

5. あとがき

抵抗分離計測の一手段として、船型試験解析に十分役立つものと考えられる。

参考文献

- 1) J. N. Newman "The Determination of Wave Resistance from Wave Measurements along a Parallel Cut", International Seminar on Theoretical Wave Resistance Ann Arbor (1963).

S-10 任意翼型の圧力分布の計算プログラム

推進性能部 荒井 能

1. プログラムの目的および概要

与えられた任意翼型が2次元流中にあるとき、その迎角を与えて翼表面上の任意の点の圧力分布と、翼に働く揚力を守屋教授の第1近似式により計算する。なお、このプログラムは推進性能部 TOSBAC-3300 用 ALPS (ALGOL 60 相当) で書いてある。

2. プログラムの内容

2.1 プログラムの名称

任意翼型の圧力分布の計算プログラム

2.2 製作者

推進性能部 荒井 能

2.3 製作年月

昭和 43 年 4 月

2.4 計算の基礎となる理論の概要

守屋富次郎著 空気力学序論<sup>1)</sup> p. 109, 第2章, 翼型理論 §22, 翼型の特性, (22・28) 式および (22・29) 式によって翼表面の圧力分布を計算する。

$$\frac{p-p_0}{\frac{1}{2}\rho V^2} = 1 - \left[ \sin \alpha \left\{ -\frac{1}{2} - \sum_1^k n B_n + \frac{1}{2} \cos \theta - \sum_1^k n A_n \sin n\theta + \sum_1^k n B_n \cos n\theta \right\} + \cos \alpha \left\{ \sum_1^k n A_n - \frac{1}{2} \sin \theta - \sum_1^k n A_n \cos n\theta - \sum_1^k n B_n \sin n\theta \right\} \right]^2$$

$$\div \left[ \frac{1}{4} \sin^2 \theta + \left\{ -\sum_1^k n A_n \sin n\theta \right. \right.$$

$$\left. + \sum_1^k n B_n \cos n\theta \right\}^2 \Big]$$

また揚力は同著 p. 104, (22・5) 式で計算する。

$$C_L = 4\pi \left\{ \sin \alpha \left( \frac{1}{2} + \sum_1^k n B_n \right) - \cos \alpha \sum_1^k n A_n \right\}$$

ここに

$\alpha$  ……迎角

$A_n, B_n$  ……翼型によって定まるフーリエ係数

$\theta$  ……翼表面に与えられた点によって定まる

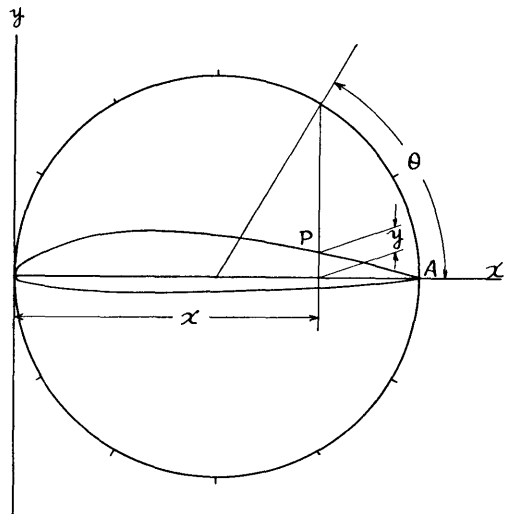


図-15 入力の方法

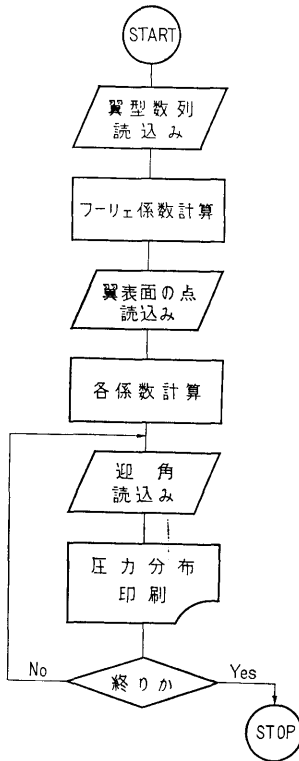


図-16 フローチャート  
角

$k$  ……守屋教授の式では $\infty$ であるがこのプログラムでは翼型の分割数の1/4にとっている。

2.5 計算の手順

図-15 に示すように、翼型の最長点を結ぶ直線の長さを1.0としこの弦を  $x$  軸にとる。この弦を直径とする円周を4の倍数等分し、点  $A$  から始めて反時計方向に、円周上の等分点より  $x$  軸に下した垂線と翼型との交点の  $y$  座標の数列を作る。 $A$  から始めてひとまわりして再び  $A$  にもどるまで続け、この数列をフーリエ係数に変換すると前述の  $A_n, B_n$  を得る。また翼表面の任意の点  $P$  は、図-15 の円を  $y$  軸に接するようにとり、このときの  $x$  座標を与えると前述の  $\theta$  を計算する。迎角の種類は任意の個数計算する。なお、計算のフローチャートを図-16 に示す。

2.6 入力

最初に翼型の分割数を整数で示し、続いて前項の数列を実数で示す。なお数列は必ず図-15 の始点  $A$  の値 (=0.0) を両端に含み、その数は4の倍数+1個でなければならない。つぎに計算する翼表面の点の

```
alpha= .1999999998x 1 degree
xn      (p/q)b      (p/q)f
1      -.9871691229x 0      -.9871690099x 0
2      -.6498561306x 0      -.5407832853x 0
3      -.5857372992x 0      -.3762875138x 0
4      -.5388253478x 0      -.2578889065x 0
5      -.4670978207x 0      -.2171734960x 0
6      -.4812887667x 0      -.1831813282x 0
7      -.4999731299x 0      -.1888487546x 0
8      -.4895201055x 0      -.1910177456x 0
9      -.4759452583x 0      -.1685870254x 0
10     -.4653745571x 0      -.1506746660x 0
11     -.4193887040x 0      -.1376998218x 0
12     -.3159342187x 0      -.1174729076x 0
13     -.1535523839x 0      -.1111945608x 0
14     .8825276745x -3      .135510612x 0
15     .7354150724x -1      .1297371651x 0
16     .9999948772x 0      .9999948727x 0

c1= .6037881304x 0
```

図-17 出力の一例

個数を整数で示し、点の  $x$  座標を実数で示す。つぎに計算する迎角の種類を整数で示し、ついでそれぞれの迎角の度数を示す。以上の入力の FORMAT は ALPS の標準型式である。

2.7 出力

図-17 の例に示す FORMAT で出力する。ここに記号を以下に示す。

- alpha……迎角
- xn……翼表面の点を入力した順の番号
- (p/q)b……back 面の圧力 (無次元値)
- (p/q)f……face 面の圧力 (無次元値)
- c1……揚力 (無次元値)

なお、出力数値の FORMAT は ALPS の標準型式である。

3. プログラムの検定

3.1 計算精度および誤差

実数の演算はすべて2進33桁+指数2進12桁(約10進10桁)の浮動小数点で行なっている。また風洞による翼型の圧力分布の計測値と本プログラムによる計算値はかなりよく一致した(文献2)参照。

3.2 計算所要時間

compile : 3'30''  
object run : 3'30''(翼型数列97点表面圧力16点)  
out put : 2'30''(同上の条件で1つの揚力につき)

3.3 適用範囲, 制限事項

翼の分割数は400分割まで、翼表面の点の数は100点までであれば現在のプログラム処理できる。迎角の種類はほとんど任意である。翼の分割数が1,500点、翼表面の点が375点程度まではプログラムを改定すれば可能である。しかし式の性質上これ以上に拡張しても無意味と考えられる。

4. プログラムの使用法と応用



## 4.1 プログラムのオペレーション

TOSBAC 3300 ALPS I, Is または II でプログラムテープを コンパイル I, Phase L: に AS テープと外部プログラム foco を入力し, ついでデータテープを入力すれば flexowriter に出力する。

## 4.2 プログラムの応用

このプログラムは外部プログラムとしてアセンブラ語で書かれたフーリエ変換サブルーチン foco を使用している。このサブルーチンは  $4n+1$  個のデータよ

り  $n$  次までのフーリエ級数を計算するもので, 他にも応用できる。

## 参考文献

- 1) 守屋富次郎: 空気力学序論, 初版, 培風館, 1659, pp. 95~111.
- 2) 伊藤達郎他: MAUプロペラ翼断面の圧力測定, 第14回船舶技術研究所研究発表会講演概要, 1969.

## E-1 差分法による回転円板の熱弾塑性応力解析プログラム

機関開発部第2部 天 田 重 庚

## 1. プログラムの目的および概要

高出力化の著しいガスタービンではそれともなつて回転数の増大, ガス入口温度の上昇が見られる。ガスタービンの重要な構成要素であるディスクでは大きな遠心力と熱負荷を受けることになり, この結果材料の弾性限を越えた応力状態になることが考えられる。塑性域では材料の応力-ひずみ曲線が非線形となり, 系を支配する方程式が非線形となって解析的に解くことが困難であり, そのため次の方法がとられる。

- 1) 実際の材料の応力-ひずみ曲線を用いて数値計算により弾性領域と塑性領域の境界で応力成分が等しいという条件で解く方法。
- 2) 非線形な応力-ひずみ曲線を近似式, すなわち, Ramberg-Osgood [1] 則,  $n$  乗則 ( $\sigma=f(\epsilon^n)$ ) を用いて数値計算による方法。
- 3) 上記の近似式を用いて Perturbation Method による方法。
- 4) 材料を完全塑性体として迂り線場を解く方法。

回転円板の熱弾塑性応力解析には若干の理論的研究<sup>2,3)</sup>があるが, 複雑さと得られる精度の点で問題があり, 温度分布が応力ひずみ成分に与える影響もあまり明瞭でない。このため白鳥によって導入された等温問題における方法<sup>4)</sup>を温度場に適用できるように変形し, 上記の方法 1) に基づく手順を確立する。

## 2. プログラムの内容

## 2.1 プログラムの番号, 名称

44-003

Elasto-Plastic Stress Analysis of Rotating Disc

## 2.2 製作者

機関開発部第2部 天田重庚

## 2.3 製作年月

昭和44年5月

## 2.4 プログラムの大きさ

構成…メインプログラム+6×サブプログラム  
ステートメント数…528

## 2.5 計算の基礎となる理論の概要

降伏条件として Von Mises の条件, 塑性域では Deformation Theory が使用できると仮定して, 外径  $b$ , 内径  $a$  なる円板を考える。加えられる温度分布は

$$T = T_0 \frac{\ln(r/a)}{\ln(b/a)} \quad \dots(1)$$

円板が  $\omega$  なる角速度で回転している場合, 弾塑性境界が  $C$  なる位置に発生したとすると次の式が得られる<sup>5)</sup>。

i) 弾性式 ( $c \leq r \leq b$ )

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{3+\nu}{8} \rho \omega^2 (b^2 - r^2) + B \left( \frac{1}{r^2} - \frac{1}{b^2} \right) \\ &\quad + E\alpha \left[ \frac{1}{b^2} \int_a^b (rT) dr - \frac{1}{r^2} \int_a^r (rT) dr \right] \\ \sigma_\theta &= \frac{\rho \omega^2}{8} \left[ (3+\nu)b^2 - (1+3\nu)r^2 \right] \\ &\quad - B \left( \frac{1}{r^2} + \frac{1}{b^2} \right) \\ &\quad + E\alpha \left[ \frac{1}{r^2} \int_a^r (rT) dr \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{b^2} \int_a^b (rT) dr \right] - E\alpha T \end{aligned} \right\} \dots(2)$$

ただし  $B$  は境界条件より求まる定数である。

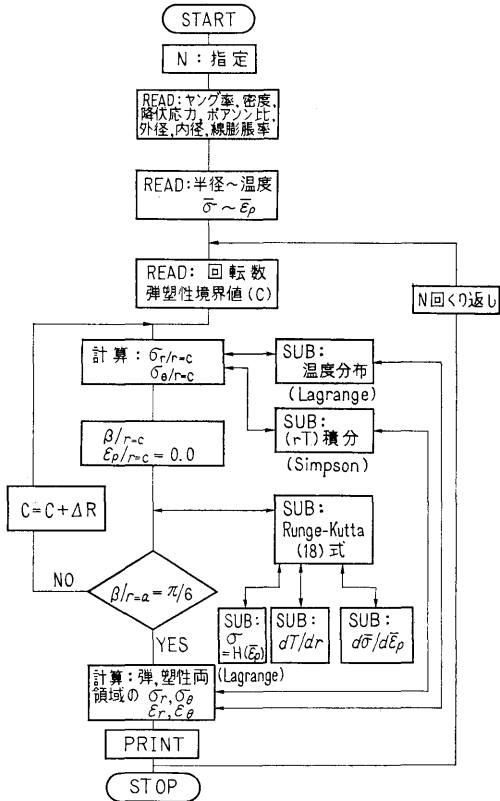


図-18 フローチャート

ii) 塑性域 ( $c \geq r \geq a$ )

$$\frac{d\beta}{dr} = \frac{F_1}{F_3}, \quad \frac{d\bar{\epsilon}_p}{dr} = \frac{F_2}{F_3} \quad \dots\dots(3)$$

$\bar{\epsilon}_p$ ,  $\beta$  と応力成分との関係は

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= H(\bar{\epsilon}_p) \left( \sin \beta - \frac{1}{\sqrt{3}} \cos \beta \right) \\ \sigma_\theta &= H(\bar{\epsilon}_p) \left( \sin \beta + \frac{1}{\sqrt{3}} \cos \beta \right) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots(4)$$

境界条件

$$\left. \begin{aligned} \beta &= \pi/6 \quad (r=a) \\ \sigma_r |_{\text{弾性}} &= \sigma_r |_{\text{塑性}} \quad \sigma_\theta |_{\text{弾性}} = \sigma_\theta |_{\text{塑性}} \quad (r=c) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots(5)$$

2.6 計算手順

計算手順のフローチャートを図-18 に示す。入力データを読み込みの後、弾塑性境界値,  $c$  を仮定して  $c$  上の応力成分を弾性式で求める。ディスクを同心の環に分割し (本計算では 40 等分) て(3)式を差分形に変換してルンゲクッタ法を用いる。 $c$  上で求めた  $\sigma_r$ ,  $\sigma_\theta$  より  $\beta$  を求め、これと  $\bar{\epsilon}_p=0$  を初期値として  $c$  から内部境界に向かって計算を行ない、 $r=a$  上で  $\beta=\pi/6$  になるまで反復計算がなされる。

2.7 入力

必要な入力データは次のごとくである。

- A~TA .....半径のきざみ~温度: 温度分布
- ST~EP .....応力~ひずみの値: 塑性域の応力—ひずみ曲線
- V.....ポアソン比
- E.....ヤング率
- ROW .....材料の密度
- RO .....円板の外径
- RI .....円板の内径
- SY .....降伏応力
- W .....円板の角速度
- COF..... $c$  の値を変える収束係数
- TOLL.....収束条件:  $\pi/6 - \beta \leq TOLL$

2.8 出力

分割した各半径上での

- T.....温度
- SIGMAR ...半径方向応力
- SIGMAT ...周方向応力
- SIGPT .....主応力
- EPRR.....半径方向ひずみ
- EPRT.....周方向ひずみ
- PEP .....主ひずみ

2.9 本プログラムの特徴

- i) 任意の温度分布が与えられるように 4 次の Lagrange 補間公式を用いて温度分布を近似している。
- ii) 異なる応力—ひずみ曲線についても計算できるようにまたこれも 4 次の Lagrange 補間公式にて近似している。
- iii) 等温問題に適用可能。
- iv) 収束係数を可変にして真の値との差に比例するように定めた。

3. プログラムの検定

3.1 精度

$\beta$  の値で小数点以下 5 桁まで正しく得られるようにした。

3.2 演算時間

半径の分割数は弾性域 20, 塑性域 20, 計 40 で、1 サイクルの計算時間は約 85 秒である。収束までのくり返し数は  $c$  の初期仮定値により異なるが約 10~20 回であり、またコンパイルの時間は約 8 分を要した。

4. プログラムの使用について

## 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

サブプログラムとして4次の Lagrange の補間公式による関数近似, 積分範囲の大きさによってきざみ数を変えられるシンプソン積分, Runge-Kutta 法による微分方程式の数値解法が含まれている。

## 5. あとがき

温度分布が応力, ひずみ成分に与える影響, 温度分布の増加に対する塑性域の成長の割合, 周方向応力の塑性域における弾性分布と異なる分布が得られた。

## 6. 記号

$T$ : 温度,  $T_0$ : 外周温度,  $r$ : 半径,  $a$ : 内径,  $b$ : 外径,  $c$ : 弾塑性境界値,  $\rho$ : 材料の密度,  $\omega$ : 角速度,  $\nu$ : ポアソン比,  $E$ : ヤング率,  $\alpha$ : 線膨張係数,  $\sigma_r$ : 半径方向応力,  $\sigma_\theta$ : 周方向応力,  $\bar{\epsilon}_p$ : 相当塑性ひずみ,

$\beta$ :  $\sigma_r$  と  $\sigma_\theta$  より得られる値,  $F_i$ :  $\bar{\epsilon}_p$ ,  $\beta$  と材料の機械的性質の関数,  $H$ : 材料の塑性域における応力-ひずみ曲線を示す関数。

## 参考文献

- 1) Walter Ramberg et al. [Description of Stress-Strain by Three Parameters] NACA T. N. NO-902 (1943).
- 2) A. Mendelson et al. [Practical Solution of Plastic Deformation Problems in Elastic-Plastic Range] NASA T. R. R-28 (1959).
- 3) S. Manson et al. [Determination of Stresses in Gas-Turbine Discs subjected to Plastic Flow and Creep] NACA TR-906 (1948).
- 4) 白鳥「回転円板の塑性計算とその応用」日本機械学会誌, Vol. 65, No. 519 (1962).
- 5) 天田「回転円板の弾塑性熱応力」第19回応用力学連合講演会論文抄録集 (1969).

## E-2 円筒の非定常温度分布および熱応力の計算プログラム

機関開発部第2部 塚田 悠 治

## 1. プログラムの目的および概要

光弾性法による熱応力の測定の精度を確かめるための基本的な実験として, 中空円筒の熱応力の測定を行ない, 理論値との比較を行なった。このプログラムは比較のための理論値を計算するために作られた単能プログラムであり, 主要諸元は実験条件に合わせて与え, 変更することはできない。

## 2. プログラムの内容

## 2.1 プログラムの番号, 名称

44-028

ENTŌ NETSUŌRYOKU

## 2.2 製作者

機関開発部第2部 塚田悠治

## 2.3 製作年月

昭和44年7月

## 2.4 計算の基礎となる理論の概要

円筒の軸対称温度分布は次式で与えられる。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad \dots\dots(1)$$

境界条件は周囲流体温度または供給熱量の条件によりそれぞれ次式で与えられる。

$$k \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right)_i = h (T_f - T_i) \quad \dots\dots(2)$$

$$k \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right)_i = q_i \quad \dots\dots(3)$$

応力成分は次式により, 求められる。

$$\sigma_r = \frac{\alpha E}{1-\nu} \frac{1}{r^2} \left( \frac{r^2 - r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \int_{r_1}^{r_2} T \cdot r \cdot dr - \int_{r_1}^r T \cdot r \cdot dr \right) \quad \dots\dots(4)$$

$$\sigma_\theta = \frac{\alpha E}{1-\nu} \frac{1}{r^2} \left( \frac{r_2 + r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \int_{r_1}^{r_2} T \cdot r \cdot dr + \int_{r_1}^r T \cdot r \cdot dr - T \cdot r^2 \right) \quad \dots\dots(5)$$

ただし,  $T$ : 温度,  $a$ : 温度伝導率,  $k$ : 熱伝導率,  $h$ : 熱伝達率,  $q$ : 熱量,  $r$ : 中心からの距離,  $\alpha$ : 熱膨張係数,  $E$ : 縦弾性係数,  $\nu$ : ポアソン比,  $\sigma$ : 応力,  $t$ : 時間

添字, 1: 内周, 2: 外周,  $r$ : 半径方向,  $\theta$ : 接線方向,  $f$ : 周囲流体

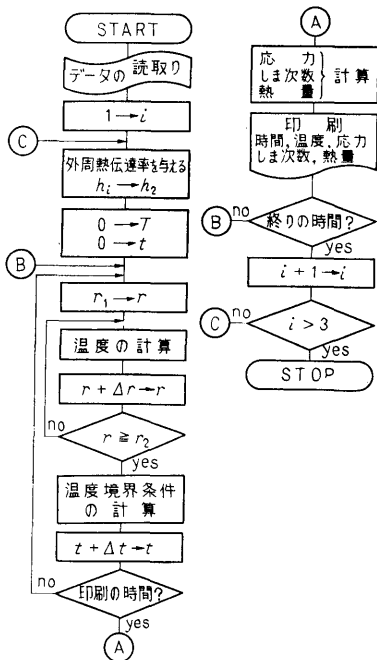


図-19 フローチャート

温度分布は、(1)の偏微分方程式を差分方程式に変換して解いた。分割数は 20 とし、境界条件は、実験条件により、(2)または(3)を選んだ。応力分布は、(4)、(5)を数値積分することにより求めた。

また、次式により、光弾性しま次数を求めた。

$$N = \frac{b}{f} (\sigma_r - \sigma_\theta) \quad \dots\dots(6)$$

### E-3 曲円管内熱伝達実験データ整理用プログラム

機関開発部第2部 塚原茂司

#### 1. プログラムの目的および概要

このプログラムは曲円管内熱伝達の実験値から各部の熱伝達率を計算し、また各パラメータを算出して整理するのに用いられる。このプログラムの適用条件は内半径  $r_1$ 、外半径  $r_2$  をもつ曲率半径  $R$  のテストセクションで、流体への熱流束はテストセクションの電気抵抗を利用した電氣的直接発熱方式で与えられている。測定される量（計算機入力）は電圧  $V$ 、電流  $I$ 、

$b$ ; モデルの厚さ,  $1/f$ ; 光弾性感度

#### 2.5 計算の手順

図-16 のフローチャートに示す。

#### 2.6 入力

入力データは、すべて  $E10 \cdot 3$  で与え、単位は kg, mm, sec, °C, kcal を用いる。

$E$ ; 縦弾性係数,  $AT$ ; モデル厚さ×光弾性感度,  $B$ ; 熱膨張係数,  $AK$ ; 熱伝導率,  $A$ ; 温度伝導率,  $TH$ ; 周囲流体温度,  $H1$ ; 内周の熱伝達率,  $H2(I)$ ; 外周の熱伝達率 (3種類), なお円筒の外径  $r_2=40$ mm, 内径  $r_1=20$  mm など、実験中で固定した条件はプログラム内で与えてある。

#### 2.7 出力

時間 1 min おきに、温度、応力成分、しま次数および外周より与えられる熱量を印刷する。

#### 3. プログラムの検定

実験の性格上、計算値に要求される精度は低いので、計算精度の検討は行なっていない。演算時間は 10 分以内である。

#### 4. あとがき

中空円板の非定常熱応力の厳密解はすでに求められているが、このプログラムにより、実験条件に合わせた任意の境界条件を簡単に与えて、計算することができ、所期の目的を達することができた。なおプログラム作製につき当部高田部長に御指導頂いたことを付記し、謝意を表する次第です。

Data of Boiling Heat Transfer with No. X  
Type Curved Pipes.

2.2 製作者

機関開発部第2部 塚原茂司

2.3 製作年月

昭和44年8月

2.4 計算の基礎式

データ整理に使用した計算の基礎式は次の諸式であるが、モデルはすべて仮定をおいて一次の問題として取り扱っている<sup>1)</sup>。

1) 熱流束  $q''_\phi$  ( $\phi$  は管断面の円周方向の位置をあらわすもので  $0^\circ$ =内まわり側,  $90^\circ$ =上側,  $180^\circ$ =外まわり側,  $270^\circ$ =下側である。)

$$q''_\phi = \frac{q''_s}{(1-b \cos \phi)^2} \quad \dots\dots(1)$$

$$q''_s = \frac{0.215}{\pi r_1 (l + \pi R)} \cdot V \cdot I \quad \dots\dots(2)$$

ただし  $b = (r_1 + r_2) / 2R$ ,  $l$  = 曲管両端の直管部長さ

2) 管内壁温度  $T_{1\phi}$  管内壁温度は次の1次元微分方程式を解いて得られる。

$$\frac{d^2 T}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} + \frac{q'''_\phi}{\lambda} = 0 \quad \dots\dots(3)$$

境界条件は  $r=r_2$  で  $T=T_{2\phi}$

$$r=r_2 \text{ で } dT/dr = 0$$

この境界条件を用いて(3)式を解くと次式が得られる。

$$T_{1\phi} = T_{2\phi} - \Delta T = T_{2\phi} - F(r) \frac{q''_\phi}{\lambda_T} \quad \dots\dots(4)$$

$$F(r) = \frac{r_1}{1 - \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2} \left[ l_n \left( \frac{r_2}{r_1} \right) - \frac{1 - \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2}{2} \right] \quad \dots\dots(5)$$

$$\lambda_T = 0.01105 T + 13.115^2 \quad \dots\dots(6)$$

3) 流体温度  $T_{Bx}$ , 加熱開始位置から距離  $x$  の位置の流体温度  $T_{Bx}$  は

$$T_{Bx} = T_{in} + 0.01433 \frac{V \cdot I \cdot x}{G \cdot l} \quad \dots\dots(7)$$

ただし  $l$  は試験部発熱長さ

4) 流体飽和温度  $T_{satx}$

$$T_{satx} = f(p_x) \quad \dots\dots(8)$$

$f(p_x)$  は  $p-T_{sat}$  曲線に適した式を作り, 入口圧力  $p_{in}$  と流速  $v$  の関数として求められるようにプログラムに入っている。

5) 各部の熱伝達率  $h_{\phi x}$

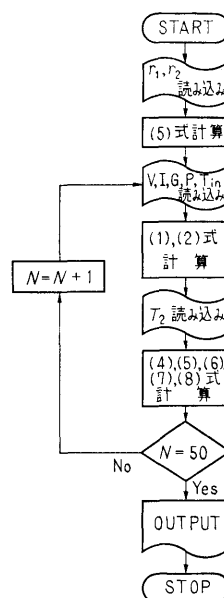


図-20 フローチャート

$$h_{\phi x} = \frac{q''_\phi}{(T_{1\phi} - T_{Bx})} \quad \dots\dots(9)$$

2.5 計算の手順

計算の手順は図-20 フローチャートに示すとおりである。

2.6 入力

必要な入力データは次のとおり

- $RI$  .....管内半径 (mm)
- $RO$  .....管外半径 (mm)
- $VX$  .....電圧 (volts)
- $A$  .....電流 (amps)
- $G$  .....流量 (km/min)
- $P$  .....入口圧力 (kg/cm<sup>2</sup> abs)
- $TIN$  .....入口温度 (°C)
- $T2$  .....管外壁温度 (°C)

(F7.3)  
(F7.2)

$T2$  は管外壁4個所の測定値を  $\phi=90, 180, 270, 0$  および  $x=1, 2, \dots\dots$  (管軸方向測定位置) の順に入れた。

2.7 出力

- $TT2$  .....管外壁温度 (°C)
- $DELTW$  .....(4)式の  $\Delta T$  (deg)
- $TWI$  .....管内壁温度 (°C)
- $TB$  .....流体温度 (°C)
- $DELTTB$  .....=  $TWI - TB$  (deg)
- $TSAT$  .....流体飽和温度 (°C)
- $DELTSU$  .....=  $TSAT - TB$  (deg)