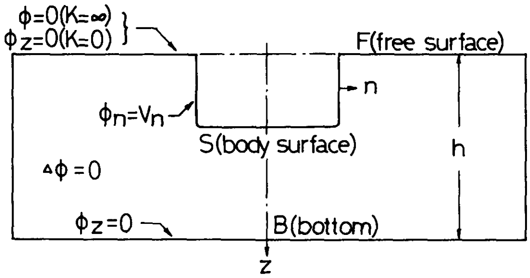
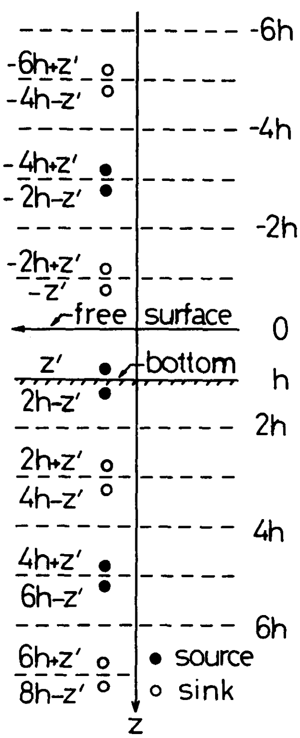
必ず小さく見積ってしまうことになるので，$1/r$の項だけについては，重心と端点の中心をとりその点からの影響の平均をとるというようにしている。

楕円体専用のプログラムでは，楕円体を解析的に表わし ds および法線の方向余弦を解析的に求めている。

積分方程式の数値解が求まったあと，6自由度の運動について連成項を含めた附加質量（附加慣性モーメントを含む）を計算する。



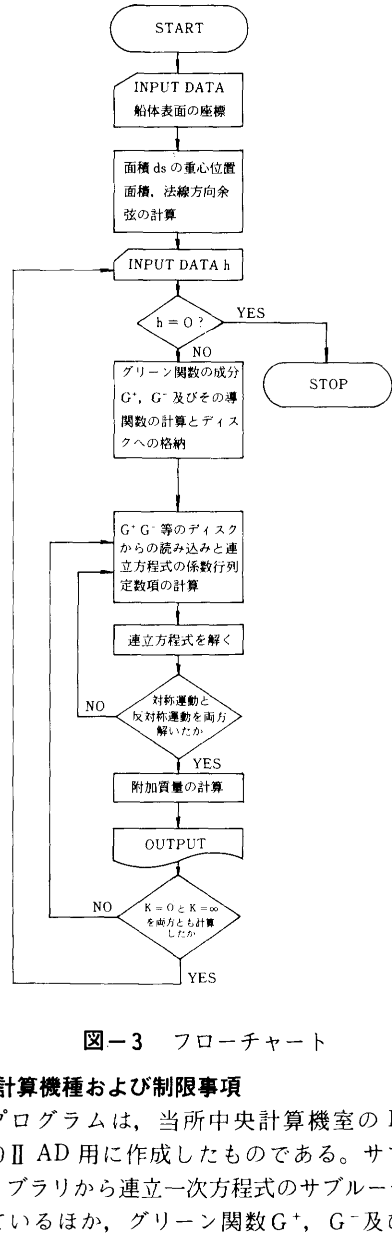
図－1　座標系と境界条件



図－2　鏡像列

2.5 計算の手順

計算の手順は図－3のフローチャートに示す通りである。



図－3　フローチャート

2.6 計算機種および制限事項

本プログラムは，当所中央計算機室の FACOM M-180 II AD 用に作成したものである。サブルーチンライブラリから連立一次方程式のサブルーチンを使用しているほか，グリーン関数G^+，G^-及びそれらの微分値等を周波数0と∞の2つの場合で，2回同じ計算をしなくていいように，一時格納のための外部記憶装置（ディスクのテンポラリーファイル）を使用し

ているので，この点に注意することによって他機種への移行ができる。

使用メモリ数は，左右対称の物体のみ考えており，物体表面の右半分の分割数が12×24＝288の場合で469ＫＢ，18×36＝648の場合で1864ＫＢである。

外部記憶装置のメモリは，分割数288の場合で約６ＭＢ，分割数648の場合約30ＭＢである。

3．プログラムの応用

船体表面を表わす座標を船体の片側半分について入力することにより，実用船型の附加質量が水深無限大の場合を含めて浅水の場合について計算できることになった。入力データは，線図の Body Plan をみながら girth の分割された要素が大体同じ程度の長さになるようにオフセットから，きりのよい water line または buttock line を選んで作成しているが，この部分をもう少し自動化することによって，一層使い易いものにできるであろう。

楕円体の場合には，実用船型用のプログラムを使うより，楕円体専用のプログラムを使った方が良い精度が得られている。なお，水深無限大の場合の楕円体の附加質量の解析解を計算するプログラムも，本プログラムに関連して作成してあるので利用できる。

4．あ　と　が　き

本プログラムの完成により，楕円体の軸長比を変えた計算を系統的に行ない，船のＬ/Ｂ，Ｂ/ｄが浅水時附加質量に及ぼす影響や，周波数０と∞のときの違い，また運動のモードによってこれらがどう変るかなどの点を明らかにすることができた。[1]

更に実用船型についても，入力データの作成に１隻につき１～２日程度の労力を必要とするが，計算ができることとなり，利用価値は高いものと考えている。

なお，本プログラムの開発途上において，周波数０の場合についての誤った計算法と計算結果を公表[2]してしまったが，正しい結果を参考文献[1]に報告してあることを付記する。

参　考　文　献

１）菅信，原口富博，３次元物体の附加質量に及ぼす浅水影響――Ｋ＝０とＫ＝∞の場合――，船研報告第21巻第３号，1984．５

２）菅信，原口富博，３次元物体の附加質量に及ぼす浅水影響，第42回船研究発表会講演集，1983．12

15．境界要素法による楔の着水衝撃水圧の計算プログラム

共通工学部　谷　澤　克　治

1．プログラムの目的および概要

一定速度で楔が静止水面に落下する場合の楔表面の衝撃水圧の分布を計算するプログラムである。無重力を仮定し，着水衝撃現象の相似解を求めることによりスプラッシュ形状を含めた計算ができる。

2．プログラムの内容

2.1　プログラムの名称

楔の着水衝撃水圧の計算プログラム

2.2　製作者

共通工学部　谷澤克治

2.3　製作年月

昭和58年９月

2.4　計算の概要

問題の対称性より右半分について計算を行う。座標系を図１のようにとり落下速度をV_0，楔の頂角をθ，楔先端が着水した瞬間を時刻Ｔ＝０とし，Ｔ＝ｔの時の楔の没入深さを $\varepsilon = V_0 t$，速度ポテンシャルを$\Phi(x, y; t)$，水面形状を$F(x, y; t) = 0$とする。ここで代表距離にε，代表速度にV_0を用いて図２のように問題を無次元化すると定常問題として扱うことができる。

すなわち

$$\xi = x/\varepsilon = x/V_0 t \tag{1}$$

$$\eta = y/\varepsilon = y/V_0 t \tag{2}$$

$$\phi(\xi, \eta) = \Phi/V_0^2 t \tag{3}$$

$$f(\xi, \eta) = F/V_0 t \tag{4}$$

ここにξ，ηは無次元化座標でϕ，fは無次元化され

た速度ポテンシャルと水面形状で共に変数に時間を含まない。この座標系での境界条件について述べる。最初に自由表面の Kinematic Conditon は一般に

$$\frac{\mathrm{D}F}{\mathrm{D}t}=\frac{\partial \mathrm{F}}{\partial t}+\frac{\partial \Phi}{\partial x}\frac{\partial \mathrm{F}}{\partial x}+\frac{\partial \Phi}{\partial y}\frac{\partial F}{\partial y}=0 \tag{10}$$

と書ける。これを(1)式から(4)式を考慮し，ξ，η，ϕ，fで書き直すと

$$\frac{\partial f}{\partial \xi}\left(\frac{\partial \phi}{\partial \xi}-\xi\right)+\frac{\partial f}{\partial \eta}\left(\frac{\partial \phi}{\partial \eta}-\eta\right)=0 \tag{11}$$

さらに，自由表面の外向き法線方向を $\vec{n}$（n_ξ，n_η），接線方向を $\vec{s}$（$-n_\eta$，n_ξ）とすると(11)式は

$$\frac{\partial \phi}{\partial n}=\xi n_\xi+\eta n_\eta \tag{12}$$

と表わせる。また(11)式は $\partial f/\partial \xi$ $\partial f/\partial \eta$ が不定となるスプラッシュ頂点でも成り立たねばならないので，頂点の座標を ξ_0，η_0とすると

$$\left.\begin{aligned}\left.\frac{\partial \phi}{\partial \xi}\right|_{\xi=\xi_0}&=\xi_0\\ \left.\frac{\partial \phi}{\partial \eta}\right|_{\eta=\eta_0}&=\eta_0\end{aligned}\right\} \tag{13}$$

となる。次に Dynamic Condition は有次元座標では，

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t}+\frac{1}{2}\left\{\left(\frac{\partial \Phi}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial \Phi}{\partial y}\right)^2\right\}=0 \tag{14}$$

と書けるが，これも同様に書き直すと

$$\phi-\frac{\partial \phi}{\partial \xi}\xi-\frac{\partial \phi}{\partial \eta}\eta+\frac{1}{2}\left\{\left(\frac{\partial \phi}{\partial \xi}\right)^2+\left(\frac{\partial \phi}{\partial \eta}\right)^2\right\}=0 \tag{15}$$

となり，法線方向と接線方向で書くと

$$\frac{\partial \phi}{\partial s}=\sqrt{\xi^2+\eta^2-2\phi}-\xi n_\eta+\eta n_\xi \tag{16}$$

となる。また(13)式を(15)式へ代入してスプラッシュ頂点でポテンシャル値 ϕ_0 を規定する条件

$$\phi_0=\frac{\xi^2{}_0+\eta^2{}_0}{2} \tag{17}$$

を得る。次に楔面の境界条件を同様に無次元化して

$$\frac{\partial \phi}{\partial n}=-\sin\theta \tag{18}$$

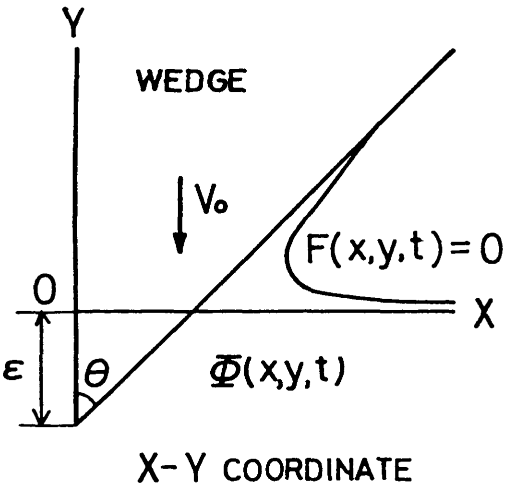
対称軸である η 軸上の境界条件は

$$\frac{\partial \phi}{\partial n}=0 \tag{19}$$

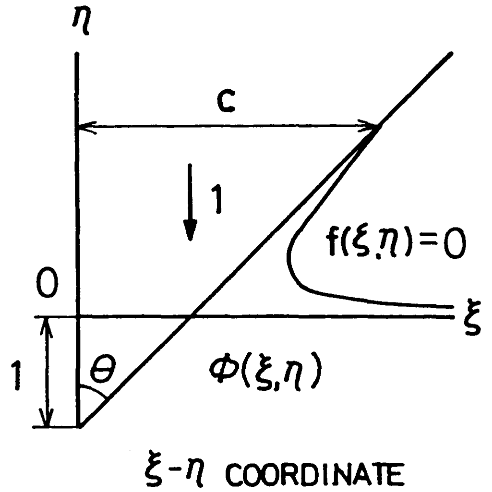
最後に圧力も無次元化した座標系では(15)式と同様に

$$\frac{\mathrm{P}}{\rho \mathrm{V}_0{}^2}=-\phi+\frac{\partial \phi}{\partial \xi}\xi+\frac{\partial \phi}{\partial \eta}\eta-\frac{1}{2}\left\{\left(\frac{\partial \phi}{\partial \xi}\right)^2+\left(\frac{\partial \phi}{\partial \eta}\right)^2\right\} \tag{20}$$

と書ける。一般に自由表面上では表面形状と流束，又はポテンシャル値が未知数であるが，(12)式を用いると表面形状から直接流束を計算することができ，求めた流束を用いて境界値問題を解けばポテンシャル値も求まるので，この問題の実際の未知数は表面形状だけであり，正しい形状を求めれば問題は解けたことになる。



図－1　有次元座標系



図－2　無次元化座標系

2.5 計算の手順

以上に求めた式を用いて図－3に示すような手順で計算を行う。

1) まず未知である自由表面形状を適当に与える。ただし連続の条件より図－4に示すように楔の排水面積Ｓと自由表面の盛り上り面積Ｓ′が等しくなるように与える必要がある。

2) 次に(12)式を用いて自由表面の流束を計算する。

3) そして(18)式(19)式より楔面と対称軸上の流束を求める。

4) 楔より十分離れた所に検査面をもうけ，ここでは流束は十分小さいので零とする。

5) 以上により境界条件がすべて流束で与えられ，図―5のようなノイマン問題が得られた。ここで発散定理より

$$\int_{\Gamma} \frac{\partial \phi}{\partial n} d\Gamma = 0 \quad \Gamma：全境界$$

を満足していなければならないが，1)で述べた条件 Ｓ＝Ｓ′を満足する自由表面形状を与えれば発散定理を満足することは容易に分かるであろう。

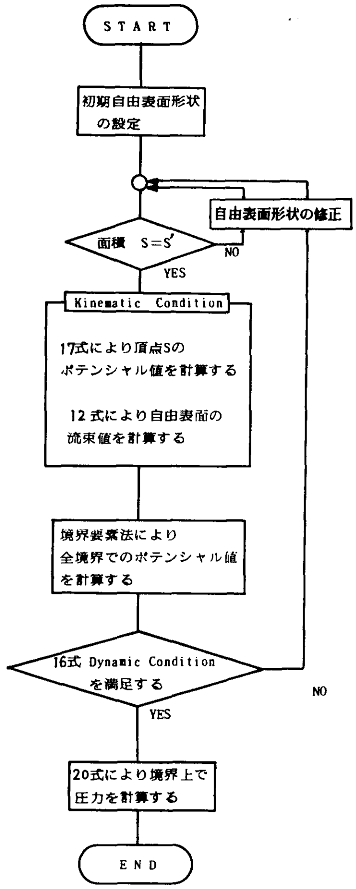
6) このノイマン問題を境界要素法を用いて解く。この時(17)式で定めたスプラッシュ頂点のポテンシャル値を規準にして境界上のポテンシャル値を定める。

7) 以上のようにして求めた解はまだ Dynamic Condition (16)式を満足していないから，満足するまで自由表面形状を逐次近似的に修正しながら以上の手順を繰り返す。

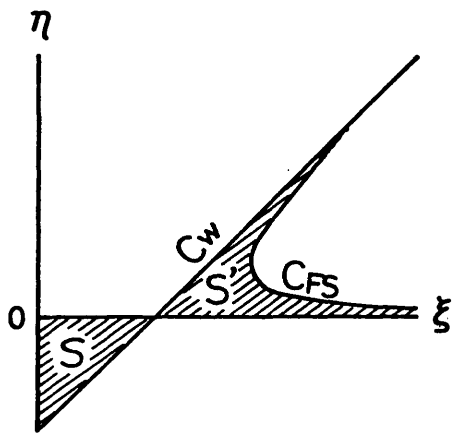
8) 最後に十分な精度で満足すれば，その時の自由表面形状を正解として(20)式を用いて楔面の圧力分布を計算する。

2.6 計算機種および制限事項

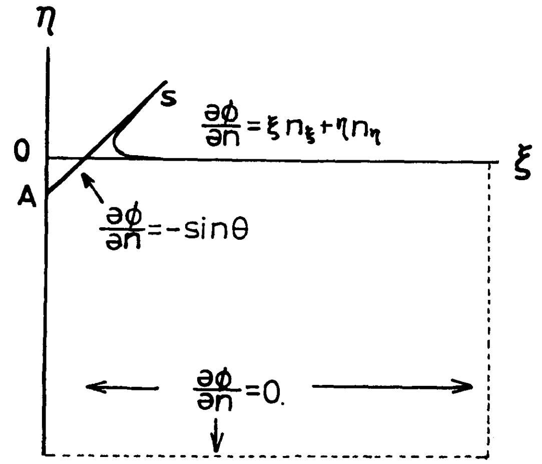
このプログラムは計算センターの FACOM M 180 Ⅱ AD 用に FORTRAN 77レベルで製作したものであるが，システムに組み込まれているサブルーチンなどは，何も使用していないので他機種への移行に困難はないと思われる。ただ計算の精度を上げるため倍精度で計算する事が望ましい。使用メモリーは約500ＫＢである。



図－3 フローチャート



図－4 楔没入量と自由表面盛り上り量との釣り合い



図－5　境界条件

3．プログラムの応用

このプログラムでノイマン問題を解くのに用いた境界要素法サブルーチン(線形要素分割)はスプラッシュ頂点などの流束不連続点も扱えるように改良したものであり非常に汎用性があるプログラムである。流体力学以外の分野においても混合境界値問題の解を得る一手段として広く応用が可能である。

4．あ と が き

楔の着水衝撃水圧の計算はWagnerを始め多くの研究者によって行われたが，そのほとんどが自由表面の盛り上りなど非線形性の弱い部分は考慮しているものの，スプラッシュ部など非線形性の強い部分は無視している。筆者が今回開発したプログラムはスプラッシュ形状まで含めて計算を行うので，衝撃水圧が発生するスプラッシュ根本部の様子をより正しく推定できる。

参 考 文 献

谷澤克治，境界要素法によるくさびの着水衝撃現象の計算，第42回船舶技術研究所研究発表会講演集，1983．12

16．2次元水中翼の特性計算プログラム

運動性能部　不　破　　健

1．プログラムの目的および概要

水中翼の特性は，水中翼船の開発期に広く研究され，特に高速領域においては詳細に調べられている。また，水中翼は水中翼船以外にも一般船舶のコントロール・サーフェイスとしての広い用途をもつが，低速領域における特性はあまり調べられていない。本プログラムは，一定の深度と姿勢を保持して前進する2次元水中翼の低速領域における，非滑走，非キャビテーション状態の特性を計算するためのものである。特異点分布法に基づくため，任意形状に対して適用可能であり，また多くのパラメータの組合せが考えられるので，圧力分布の作画プログラムを付加して検討の便宜を計った。

2．プログラムの内容

2.1　プログラムの名称

G－S－F法による2次元水中翼の特性計算プログラム。

Calculation Program for Characteristics of Hydrofoil Section by means of Giesing, Smith and Fuwa Method.

2.2　製作者

運動性能部　不破　健

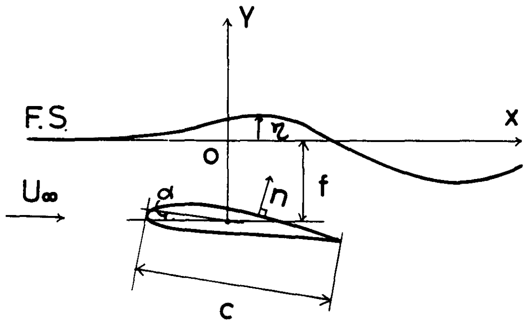
2.3　製作年月

昭和52年6月

2.4　計算の概要

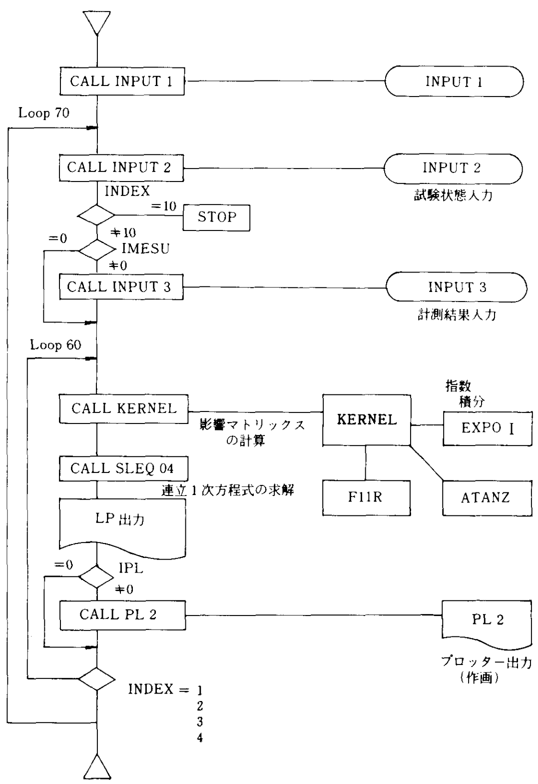
水面下の一定深度を一定の迎角で定速前進する水中翼の断面形状を折線近似して多角形で表わす。多角形の各辺上に特異点を分布させ，これにより流場を表現する。各辺の中点を代表点にとり，そこで物体表面上の境界条件を満たすこととし，翼後縁におけるKuttaの流出条件を付加すれば，特異点分布と翼のまわりの循環を未知数とする積分方程式は，連立1次方程式に

なる。この方程式を解けば，流場は一意に定まり，圧力分布をはじめとする諸特性が計算される。ただし，特異点としては渦度を用い，各辺上の区間において線形分布するものとしている。詳細については参考文献を参照されたい。



図－1　座標系および記号説明図

G-S-F 法による水中翼特性の計算プログラム流れ図



図－2　計算の流れ図

2.5　計算の手順

計算の手順を図－2の流れ図で示す。ここで入力は形状に関するものと，作動状態に対応するものとに大別される。また，種々の計算条件を示す変数も入力される。変数等の説明を表－1に示す。

表－1　入力形式と説明

《INPUT1》……翼形状入力

```
READ (3I5) KUTTA, NKTA
READ (3I5) ISK, IPRINT, IPL
READ (A40) NAME
READ (I5)  NOF
ISK=0のとき
READ (3F10.0) (XOF(I), YU(I), YL(I), I
=1, NOF)
```

- KUTTA = 0 ……Kuttaの条件をつける
  - = 1 ……ポテンシャル流（循環のない場合）
- NKTA ……Kuttaの条件を課する分割点の番号
- ISK = 0 ……任意形状物体（カード入力）
  - = 1 ……円柱
  - = 5 ……NACA4412翼型 ｝組み込み入力
  - = 6 ……NACA0012翼型 ｝
- IPRINT = 0 ……形状出力なし
  - ≠ 0 ……形状を LP に出力する
- IPL = 0 ……プロッター出力なし
  - ≠ 0 ……すべての結果をプロッター用 MT に出力する
- NAME ……翼型の名称等
- NOF ……オフセット入力の弦長方向の分割数
  - （NNT = 2 ＊NOF…分割点数
  - NNT − 1 …面素数）
- XOF ……オフセット入力　弦長方向の座標
- YU …… 〃 　翼上面の座標
- YL …… 〃 　翼下面の座標

《INPUT2》……試験状態入力

```
READ (4I5) INDEX, IPRINT, IMESU,
           IFLP
READ (6F10.0) FN, FF, AALF, CORD,
              ALF2, CORD2
```

- INDEX ＝1……自由表面をもつ水中翼
  ＝2……無限流体中の翼型
  ＝3……水面が鏡像面の場合
  ＝4……1～3のすべてを実行
  ＝10……終りのマーク（STOP）
- IPRINT＝0……航走状態での代表点出力なし
  ≒0…… 〃 出力あり
- IMESU ＝0……実験値入力 なし
  ≒0…… 〃（INPUT3） あり
- IFLP ＝0……フラップなし
  ≒0……フラップつき
- FN ……フルード数
- FF ……没水度 f/c c:chord length
  ただし，フラップ付のときは f′/c
- AALF ……迎角（deg）
- CORD ……翼弦長
- ALF2 ……フラップ迎角（deg）
- CORD2 ……フラップ取付部までの弦長

《INPUT3》……計測データ入力

ただし上下11点既存の模型用であり，別の実験では改造する必要がある。

```
READ (2I5) IEXPP, JEXPP
READ (8F10.0) (PUP(I), I=1, 11)
READ (8F10.0) (PLW(I), I=1, 11)
```

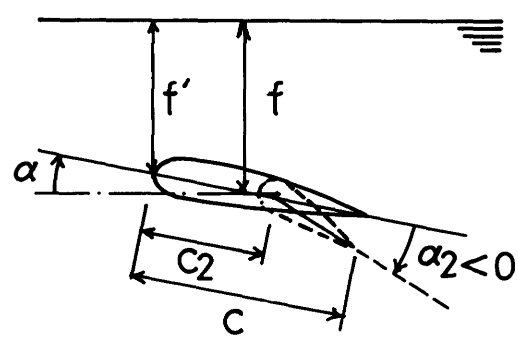
- IEXPP ……実験点を示すパラメータ（Fnに対応）
- JEXPP …… 〃（f/c 〃 ）
- PUP ……翼上面のCp値
- PLW ……翼下面 〃

2.6 計算機種および制限事項

このプログラムはTOSBAC-5600用に作製され，FACOM M 180-Ⅱ AD用に変換されたものである。使用メモリー数は256ＫＢ，出力は変数を指定することによりＬＰ，グラフィックおよびプロッターを選ぶことができる。

3．プログラムの応用

水中翼以外にも任意形状の没水体の特性が容易に計算できるよう，Kuttaの条件を課さないポテンシャル流と，循環流との選択，および，自由表面条件，鏡像（固体壁）条件と無限没水条件の選択を可能にしている。翼形状についても，任意物体がオフセット・データで入力される他にも，試計算時に用いられた形状である，円柱，NACA 4412，NACA 0012の翼型が変数により指定できる。指数積分，波動関数の計算，あるいは，作画サブプログラムは単独にも有用であろう。



図－3　フラップ翼の記号説明図

4．あ と が き

任意形状および水面状態など作動条件も任意に選べるので応用範囲は広く，フラップ翼の計算例もある。ただし，これは一体翼としたものであり，多重連結流場への拡張へは改造が必要である。前記の試計算では解析解等との比較を行っている。また，翼型については圧力分布計測の水槽試験結果と比較しているが，非キャビテーション，非滑走で，線形化された自由表面条件が成り立つ範囲で良好な一致度が得られている。

参 考 文 献

1）不破健，石坂純：平水中を直進する2次元水中翼の特性について，関西造船協会誌，第178号，昭和55年9月。

17. 強潮流域における船の転覆に関する操縦運動の計算プログラム

運動性能部　小　川　陽　弘

1. プログラムの目的及び概要

来島海峡において強潮流時に航行中の船舶が転覆する事故が連続して起ったので，その原因を究明するために，操縦運動の計算プログラムを応用・拡張して解析を行った。

流れの境界を含む水域をモデル化して平面的な shear flow と考え，その境界を横切って進む船の，横揺を含む操縦運動を計算し，転覆する可能性があるか否か，あるとすればどの様な条件のときか，主要な原因は何か等を調べたものである。

2. プログラムの内容

2.1 プログラムの名称

強潮流中の転覆運動計算

Rolling-Capsizing Motion in Shear Flow

2.2 製作者

運動性能部　小川陽弘

2.3 製作年月

昭和51年3月

2.4 計算の概要

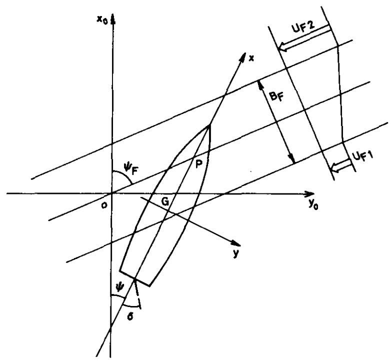
通常の操縦運動を表す3自由度の運動方程式を，まず一様な流れの中の対地運動として表し，次に適当な仮定のもとに，これを図—1の様な流速分布を持つ流れの中の式に変換する。これに横揺を表す第4の式を加えて，4自由度の運動方程式とする。

外力としては，運動によって船体に働く流体力の他に，風による力，shear flow の水位差，荷崩れによる力等も計算に入れている。

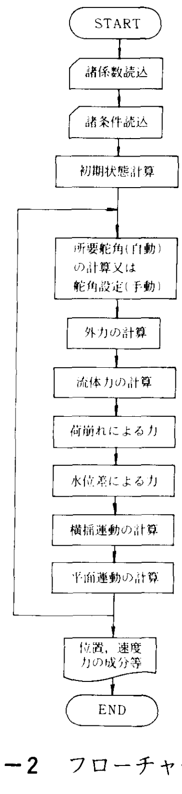
船の運動は上記の式を積分することによって得られる。積分は Euler 法により行い，時間間隔は実船に対して0.1秒とした。

2.5 計算の手順

概略の流れ図を図－2に示す。



図－1　流速分布



図－2　フローチャート

2.6 計算機種及び制限事項

このプログラムは計算センターの前計算機 TOS-BAC 5600/120用に開発したものであるが，後に現在の FACOM M-180Ⅱ AD 用に変換した。FORTRAN で約1,700ステップ，使用メモリーは約90ＫＢである。

3．プログラムの応用

諸係数・諸条件等はカードにより入力する。多数のサブプログラムが他の操縦性関係計算プログラムと共用になっているので，使用に当っては注意を要する。

4．あ と が き

本プログラムは文献[1]の解析のために開発したものである。プログラムの主要部は同[2]に示したものを基本としている。

参 考 文 献

1）小川陽弘：強潮流域における船の転覆について ── Shear Flow 中の船体運動の計算による解析 ──，日本航海学会論文集，第57号，1977年８月。

2）小川陽弘：風と流れの中の船の操縦運動の計算プログラム，船研報告，第７巻４号（プログラム特集第１集），1970年７月。

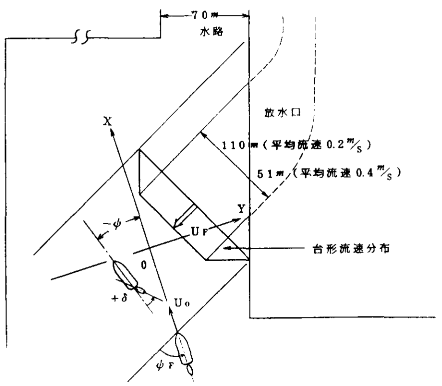
18. 流速変動水域における船の操縦運動の計算プログラム

運動性能部　小　川　陽　弘

1．プログラムの目的及び概要

港湾に隣接して建設される予定の発電所からの排水口が，小型船舶の航路を横切るような形で大量の排水を放出するため，これら船舶の操船に影響を与えることが予想されるので，その影響を調べ，対策を講じるための計算プログラムである。

放出流のある海域を図－１のようにモデル化して局部的な shear flow のある水面と考え，それを横切って進む船の操縦運動を，操舵しない場合と適当な手動操舵をした場合とについて計算し，操船に及ぼす排水流の影響を調べる。



図－１　流速分布モデル

2．プログラムの内容

2.1 プログラムの名称

流速変動水域における操縦運動計算
Manoeuvrability in Shear Flow

2.2 製作者

運動性能部　小川陽弘

2.3 製作年月

昭和55年２月

2.4 計算の概要

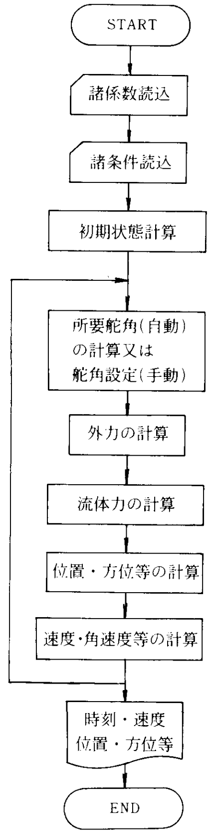
操縦の運動方程式を船の対地運動として表し，流速の場所的変化に対応する流体力は，一様流中で得られた流体力の船長方向の分布関数を仮定して求める。

手動操舵のパターンは，仮に設定したオートパイロットによる計算を行い，その時の舵角と操舵量を近似的に満足し，かつ簡単なパターンになるように設定する。

計算は時間間隔0.1秒の Euler 法による。

2.5 計算の手順

概略の流れ図を図－２に示す。



図ー2 フローチャート

2.6 計算機種及び制限事項

このプログラムは前中央計算機 TOSBAC 5600/120 用に開発したものであるが，後に現在の FACOM M-180 II AD 用に変換した。FORTRAN で約1,400 ステップ，使用メモリーは約90K B である。

3．プログラムの応用

諸係数・諸条件等はカードにより入力する。

手動操舵パターンの決定には，先ず自動操舵による計算を行い，その時の舵角のタイムヒストリーを描き，それを近似するパターンを決める。この操作は種々の条件を考慮しながら手操作で行わなければならない。この操舵パターンもカードにより入力する。

4．あ と が き

このプログラムは文献[1]の解析のために開発したものである。プログラムの主要部は同[2]に示したものを基本とし，本誌別項の，強潮流域における転覆に関する計算プログラムを応用したものであるが，数学モデルについては大幅な改良が加えられている。

参 考 文 献

1）小川陽弘：流速変動水域における小型船舶の操船性の予測について，第36回船研研究発表会講演集，1980年12月。

2）小川陽弘：風と流れの中の船の操縦運動の計算プログラム，船研報告，第7巻4号（プログラム特集第1集），1970年7月。

19. 筏の太陽追尾シミュレーションプログラム

共通工学部　浜 島 金 司
海洋開発工学部　山 川 賢 次

1．プログラムの目的および概要

太陽エネルギー利用の一つとして洋上に筏を浮べて太陽光を集光する方式において，筏が太陽を追尾して回転するとき太陽の方位と集光鏡の方位にずれ（偏差角）が生ずる。従って，筏の姿勢制御のために追尾トルクを制御する必要がある。本プログラムは，姿勢制御の時間々隔を任意に設定し太陽を追尾したとき，そのずれが集光上許容誤差範囲に納まるかどうか検討するために開発したものである。

2．プログラムの内容

2.1 プログラムの名称

筏の太陽追尾シミュレーションプログラム

2.2 製作者

共通工学部　浜島金司

海洋開発工学部　山川賢次

2.3　製作年月

昭和57年8月

2.4　計算の概要

静水中で太陽を追尾回転する筏の運動方程式は，次のような二階の非線形微分方程式となる。

$$I\ddot{A}+K\dot{A}|\dot{A}|=M(t) \qquad (1)$$

ここに，Iは筏の鉛直軸まわりの慣性モーメント，Kは抗力係数，M(t)は筏を回転させるトルク，Aは筏の方位角である。

太陽追尾シミュレーションは，現時刻T_iにおける筏の角度$\dot{A}_i$とトルクM_iを検出し，時間ΔT後に筏の方位を太陽の方位に修正できるようにトルクM(t)を決め，(1)式を時系列で解くという方法で行った。

(1)はトルクMを一定とすると解析的に解けるのでこの解から方位修正に必要なトルクM_{i+1}が求まる。時刻T_iから$T_{i+1}=T_i+\Delta T$までのトルクM(t)は，1次遅れの形

$$M(t)=M_i+(M_i+(M_i+1-M_i)(1-e^{-\frac{t}{\tau}}) \qquad (2)$$

とおいて，(1)式を数値計算で解いた。

変動外力として変動風を考慮する場合も同様に取扱うことができる。(1)式の右辺に風力モーメントM_wの項を加えて次のようになる。

$$I\ddot{A}+K\dot{A}|\dot{A}|=M+M_w \qquad (3)$$

方位修正に必要なトルクM_{i+1}の計算には，M_wの定常分のみを加え，M(t)は変動分も含めて求めた。

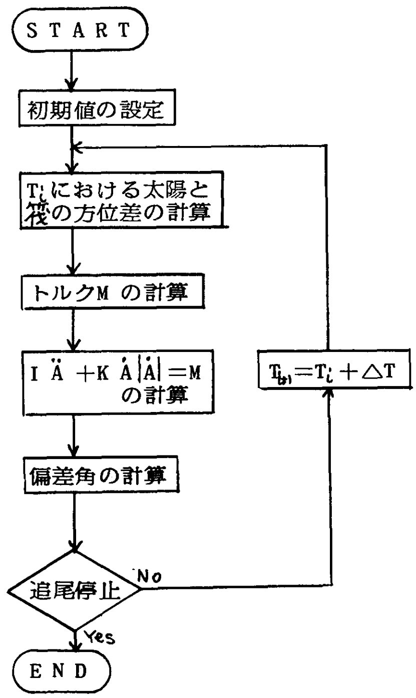
方位修正に必要なトルクM_{i+1}の数値計算はマラー法，運動方程式の数値計算はハミング法を用いた。いずれも，当所中央計算機の科学計算用サブルーチンライブラリーを利用した。

2.5　計算の手順

計算の概略の流れを図－1に示す。

2.6　計算機種および制限事項

本プログラムは計算センターのFACOM 180 II AD用に作成した。使用言語はFORTRAN 77である。



図－1　計算フローチャート

3．プログラムの応用

速度の2乗に比例する減衰項と変動外力のある場合のシステム制御計算に利用可能。

4．あとがき・その他

詳細は参考文献を参考のこと。

参　考　文　献

1）山川賢次，浜島金司，渡辺健次，菅信：太陽光利用洋上水素製造輸送計画の調査研究（第3報：筏の位置と方向の保持），船舶技術研究所報告　第20巻第2号（1983）

20．無限行無限列円柱群のポテンシャル流場の計算プログラム

運動性能部　菅　　　信

1．プログラムの目的および概要

巨大な海洋構造物の支持浮体として使用される多行多列円柱群の流体力学的な問題を扱うため，等間隔で

置かれた無限行無限列の２次元柱体群のまわりのポテンシャル流場を計算するプログラムである。

2．プログラムの内容

2.1 プログラムの名称

無限行無限列円柱群のポテンシャル流場の計算プログラム

Added Mass of Infinite Cylinder Array（2 D）

2.2 製作者

運動性能部　菅　信

2.3 製作年月日

昭和56年６月

2.4 計算の概要

図－1のように，縦方向（流れに平行な方向）の間隔b，横方向（流れに直角な方向）の間隔hで並んだ無限個の柱体群のまわりの流場の境界条件は柱体を１つだけ取り出して図－2のように表わせる。これを $x=-b/2\sim b/2$，$y=-h/2\sim h/2$ の範囲で解くわけであるが，流場の対称性，反対称性を考慮すると図－3のような1/4の範囲を考えればよいことになる。解法は，この種の問題に常用される積分方程式法であり，使用するグリーン関数 G は

$$G_p(x,y;x',y')=\frac{1}{2}\log\left\{\cosh 2\frac{\pi}{b}(y-y')-\cos 2\frac{\pi}{b}(x-x')\right\}-\frac{1}{2}\log\left\{\cosh 2\frac{\pi}{b}(y-y')-\cos 2\frac{\pi}{b}(x+x')\right\} \quad (1)$$

とおいたとき次式で表わされるものである。

$$G(x,y;x',y')=G_p(x,y;x'y')+G_p(x,y;x',-y) \quad (2)$$

これを使うと積分方程式は，図－3のSとBの上で解けば良いこととなり，次のように表わされる。

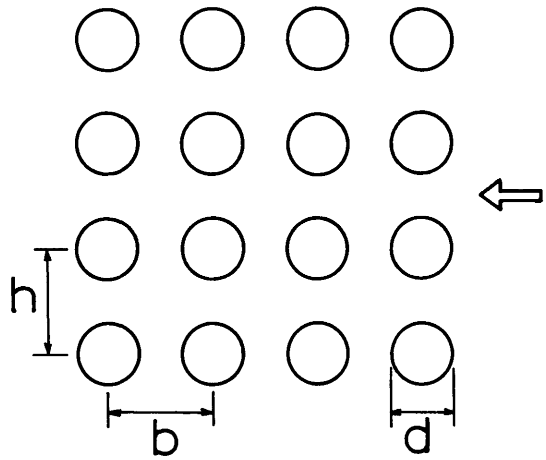
$$\phi(x,y)+\frac{1}{\pi}\int_{S\cup B}G_n\phi ds=\frac{1}{\pi}\int_S G\phi_n ds \quad (3)$$

これを数値的に解いたあと附加質量を計算する。

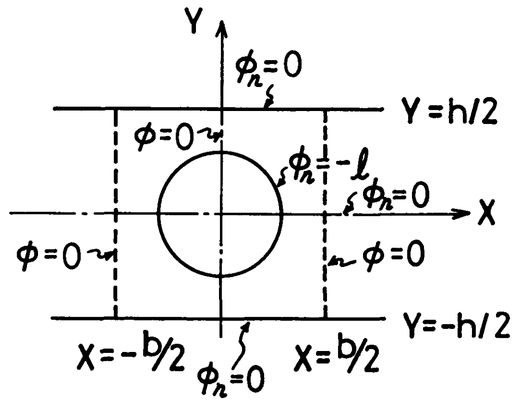
なお，(2)のかわりに

$$G'(x,y;x',y')=G_p(x,y;x'y')+G_p(x,y;x',-y) \quad (4)$$

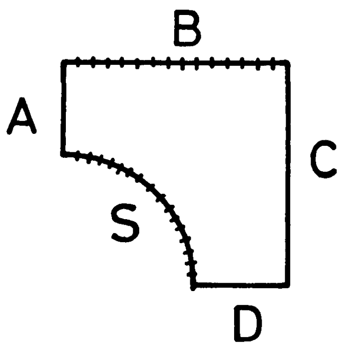
を使えば，積分方程式を解く範囲が図－3のSとDに移るので，未知数を減らせた筈であるが，プログラムを作成してしまった後で気がついたためそのようには直していない。



図－1　円柱群



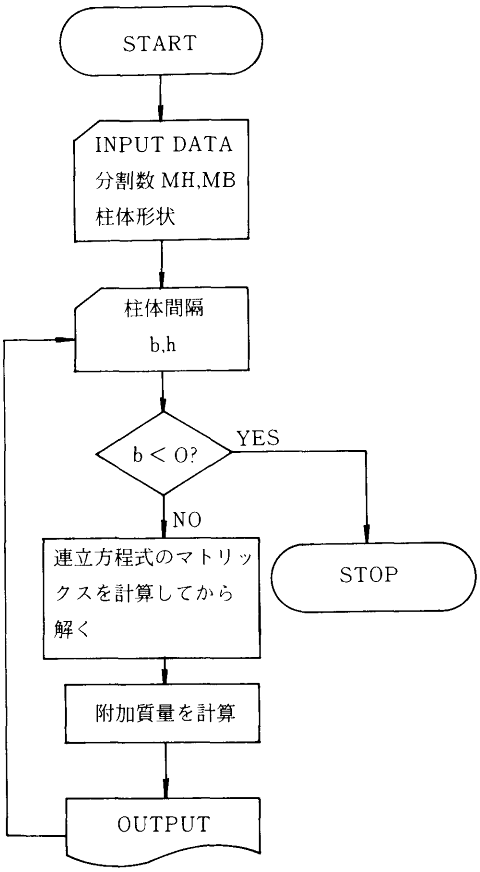
図－2　境界条件



図－3　積分領域

2.5 計算の手順

計算の手順は図－4のフローチャートに示す通りである。



図－4 フローチャート

2.6 計算機種および制限事項

本プログラムは，当所中央計算機室の FACOM M-180 II AD 用に作成したものであるが，サブルーチンライブラリから連立一次方程式を解くサブルーチンを使っているだけで，かつ外部記憶装置を使用していないため他機種への移行に問題はない。

使用メモリは，境界の分割数を400まで許すと約730ＫＢであるが，これほどの分割数をとる必要がないのが普通でありもっと使用メモリは少なくできる。

3．プログラムの応用

海洋構造物に使用される柱体としては円柱が多いが本プログラムで扱える柱体の断面形状としては，x軸とy軸に関して対称なものなら任意の形状でよい。

柱体が流れに平行に一列に並んだ場合については，本プログラムで$h=\infty$とすればよいので，Ｂ上の分割数ＭＢに０を与えることによって計算できるようになっている。また流れに直角に並んだ場合については，本プログラムでは計算できず，筆者が先に作成した別のプログラム[2]を利用することになる。

4．あとがき

本プログラムによる円柱群についての計算の結果[1] $h \geqq b$ 即ち横方向の円柱間隔hが縦方向の間隔bと同程度以上ならば，横列干渉（流れと直角に並んだ円柱列による干渉）はほとんど無視してよいことが明らかになり，これまで粘性流体の実験で知られていた事実が，ポテンシャル流についても成りたつことなどが判った。

実際の海洋構造物等では，円柱群は有限個であり先頭円柱など端部影響も扱えるような計算法を開発する必要があると考えている。

参考文献

1）遠藤久芳，菅信，大松重雄，山川賢次，菅進，渡辺健次，太陽光利用洋上水素製造・輸送計画の調査研究（第１報：筏の構造と流力特性），船研報告，第19巻，第４号，1982．7

2）菅信，水路内の２次元柱状体のまわりの流れの計算プログラム，船研報告，第８巻第６号，1971．11

21. ポテンシャル接続法による２次元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

２次元柱状体に働く動揺流体力および波強制力に関する計算法はすでに多くの手法が開発されている。本計算プログラムは有限水深における矩形断面という限定された条件はあるが，その特徴を利用して比較的短時間で精度のよい解が得られる。プログラムは没水矩形断面浮体に対する radiation 問題，diffraction 問題を解くものおよび矩形断面浮体に対する radiation-diffraction 問題を解くものがあり，それぞれ付加質量係数，減衰係数，波強制力および反射波，透過波係数などが計算できる。

２．プログラムの内容

2.1　プログラムの名称

(1)　有限水深における没水矩形断面に働く流体力計算プログラム（SUBREC）

(2)　有限水深における没水矩形断面に働く波強制力計算プログラム（SUBKAK）

(3)　有限水深における矩形断面浮体に働く流体力および波強制力計算プログラム（BARGES）

2.2　製作者

海洋開発工学部　大川　豊

2.3　製作年月

昭和54年７月，昭和56年４月改訂

2.4　計算の概要

図―１に示す様に，x の正方向から入射波があり，没水矩形浮体が平衡位置のまわりに微小運動を行うものとし，流体をⅠ～Ⅳの領域に分ける。（矩形断面浮体の場合はⅡの領域がなくなる。）各領域において，自由表面条件，水底条件および没水体の表面における運動学的境界条件を満たすラプラス方程式の一般解である速度ポテンシャルを求めると次の様に表わせる。

領域Ⅰ

$$\phi_1(x,z)=\{Ae^{ik(x-l)}+Be^{ik(x-l)}\}\frac{\cosh k(z+h)}{\cos kh}$$

$$+\sum_{m=1}^{\infty}C_m e^{-k_m(x-l)}\frac{\cos k_m(z+h)}{\cos k_m h} \tag{1}$$

領域Ⅱ

$$\phi_2(x,z)=\left(D\frac{\cos k'x}{\cos k'l}+E\frac{\sin k'x}{\sin k'l}\right)$$

$$\times\frac{\cosh k'(z+q_1h)}{\cosh k'q_1h}$$

$$+\sum_{n=1}^{\infty}\left(F_n\frac{\cosh k'_nx}{\cosh k'_nl}+Gn\frac{\sinh k'_nx}{\sinh k'_nl}\right)$$

$$\times\frac{\cos k'_n(z+q_1h)}{\cos k'_nq_1h}$$

$$+2i\frac{h}{l}\sum_{S=0}^{\infty}\frac{(-1)^s}{(\mu_sh)^2}\cdot\frac{\gamma\sin h\mu_sz+\mu_sh\cosh\mu_sz}{\gamma\cosh q_1\mu_sh-\mu_sh\sinh q_1\mu_sh}$$

$$\times\left\{\eta\omega h\cos\mu_sx+\left(\frac{h}{l}\right)^2\varphi\omega l^2\frac{\sin\mu_sx}{\mu_sh}\right\} \tag{2}$$

領域Ⅲ

$$\phi_3(x,z)=\sum_{r=0}^{\infty}\left(H_r\frac{\cosh Rx}{\cosh Rl}\right.$$

$$\left.+I_r\frac{\sinh Rx}{\sinh Rl}\right)\cos R(z+q_zh)$$

$$+2i\frac{h}{l}\sum_{S=D}^{\infty}\frac{(-1)^s}{(\mu_sh)^2}\cdot\frac{\cosh\mu_s(z+h)}{\sinh(1-q_2)\mu_sh}$$

$$\times\left\{\eta\omega h\cos\mu_sx+\left(\frac{h}{l}\right)^2\varphi\omega l^2\right\}\frac{\sin\mu_sx}{\mu_sh} \tag{3}$$

$$\phi_4(x,z)=Je^{ik(x+l)}\frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh}$$

領域Ⅳ

$$\phi_4(x,z)=Je^{ik(x+l)}\frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh}$$

$$+\sum_{m=1}^{\infty}L_me^{k_m(x+l)}\frac{\cos k_m(z+h)}{\cos k_mh} \tag{4}$$

ここで ω は円周波数であり，速度ポテンシャルは $\Phi(x,z;t)=\phi(x,z)e^{i\omega t}$ の形であるとする。Aは入射波の速度ポテンシャルを表わす定数で，振幅を ζ_a，重力加速度を g とすると

$$A=i\zeta_a g e^{ikl}/\omega \tag{5}$$

である。B，Jはそれぞれ反射波，透過波を表わし，C_m，L_m，D，E，F_n，G_n，H_r，I_r とともに未定係数である。k と k_m は次式により決まる固有値である。

$$\frac{\omega^2 h}{g}=kh\tanh kh=-k_m h\tan k_m h(m=1,2,\cdots) \tag{6}$$

同様に k' と $k'n$ は次式により決まる固有値である。

$$\begin{aligned}\frac{\omega^2 q_1 h}{g}&=k'q_1 h\tanh k'q_1 h\\&=-k'_n q_1 h\tan k'_n q_1 h(n=1,2,\cdots)\end{aligned} \tag{7}$$

また，$\gamma=\omega^2 h/g$，$\mu_s=(2s+1)\pi/2l$（sは整数）。$R=r\pi/(1-q^2)h$（rは整数），η，φ はそれぞれ上下揺れ，横揺れの複素振幅を表わす。

領域Ⅰ～Ⅳにおける速度ポテンシャルが仮想境界面 $x=\pm l$ において流体領域では連続であること，Ⅰ，Ⅳにおける物体側面では運動学的境界条件を満たすこと，即ち

$x=l$ で

$$\left.\begin{aligned}\frac{\partial\phi_1}{\partial x}=\frac{\partial\phi^2}{\partial x}&\quad(0>z>-q_1 h)\\=i\omega\{\xi-\varphi(z-\bar{z}_0)\}&\quad(-q_1 h>z>-q_2 h)\\=\frac{\partial\phi_3}{\partial x}&\quad(-q_2 h>z>-h)\\=\phi_1=\phi_2&\quad(0>z>-q_1 h)\\=\phi_3&\quad(-q_2 h>z>-h)\end{aligned}\right\} \tag{8}$$

$x=-l$ で

$$\left.\begin{aligned}\frac{\partial\phi_4}{\partial x}=\frac{\partial\phi_2}{\partial x}&\quad(0>z>-q_1 h)\\=i\omega\{\xi-\varphi(z-\bar{z}_0)\}&\quad(-q_1 h>z>-q_2 h)\\=\frac{\partial\phi_3}{\partial x}&\quad(-q_2 h>z>-h)\\\phi_4=\phi_2&\quad(0>z>-q_1 h)\\=\phi_3&\quad(-q_2 h>z>-h)\end{aligned}\right\} \tag{9}$$

なる条件と，関数系 $\{\cosh k(z+h),\cos k_m(z+h)\}$，$\{\cosh k'(z+q_1 h),\cos k_m(z+q_1 h)\}$，$\{\cos R(z+q_2 h)\}$ の直交性を利用して，未定係数に関する連立方程式が導びかれる。ここで $\bar{Z}_0$ は物体静止位置での重心点の z 座標，ξ は左右揺れ複素振幅である。

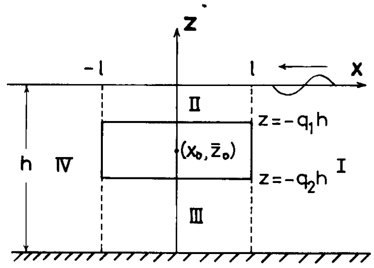
連立方程式を解けば未定係数が定まり，(1)～(4)式によって各領域の速度ポテンシャルが求まるので

$$P=-\rho\frac{\partial\Phi}{\partial t} \tag{10}$$

より圧力が与えられるから，これを物体まわりに積分すれば流体力又は波強制力が求まる。ρ は流体密度である。

連立方程式の係数行列は，流場が対称の場合と反対称の場合があるので2回連立方程式を解くことになる。

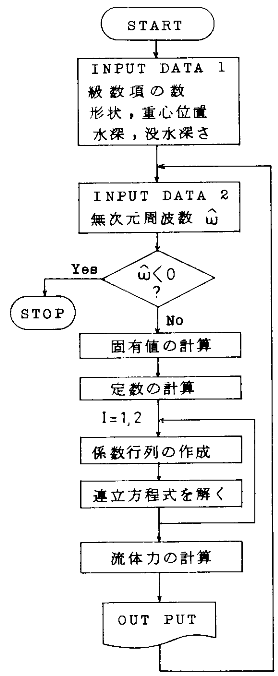
計算の精度は速度ポテンシャルの級数を何項とるかで決ってくるが，20項を標準としている。



図－1　座標系

2.5 計算の手順

計算の手順を図―2のフローチャートに示す。



図－2　フローチャート

2.6 計算機種および制限事項

本プログラムはTOSBAC-5600で作成し，ほとんど変更なくFACOM-M 180ⅡAD でも動いている。他機種への移行も容易と思われる。リージョンサイズは256ＫＢである。

3．プログラムの応用

海洋構造物のロワーハルや箱型船に働く流体力および波強制力の計算に利用できる。また，空気式波エネルギー変換装置の効率の計算法の一つである等価浮体法における等価浮体の流体力係数の計算にも利用された。

本プログラムは radiation と diffraction とに分けて作成してあるが，分けないで運動を直接解くこともできる。BARGES については若干の手直しでそれが可能である。

4．あ と が き

没水矩形断面の場合は文献2)に示されている様に没水深さが浅い場合には本計算プログラムによる結果は実験値と合わなくなるので注意が必要である。これは線型ポテンシャル理論の限界である。

垂直円柱，コラム付フーティングなどの３次元軸対称物体に対しても本法と同様な手法で計算でき，特異点分布法や有限要素法よりも計算時間が短いので，今後プログラムを作成する予定である。

参 考 文 献

1) 井島武士他：有限水深の波による矩形断面物体の運動と波の変形，土木学会論文報告集，第202号，1972。

2) 大川豊：箱型没水体に動く流体力について，船舶技術研究所報告，第17巻第２号，1980。

22. 浮遊式海洋構造物の運動計算プログラム

海洋開発工学部　加 藤 俊 司

1．プログラムの目的及び概要

本プログラムは，波浪中における海洋構造物の６自由度運動応答及び波浪荷重を計算するものである。計算手法は Hooft[1] の方法と基本的には同じである。つまり，浮遊式海洋構造物を基本的な部材要素に分割し，それぞれに働く流体力及び波浪外力を別個に求めそれを代数加算して全体に働く流体力及び波浪外力とするということである。全体に働く流体力及び波浪外力が求まれば，６自由度の連成運動方程式を解くことによって波浪中の運動応答を計算することができる。

2．プログラムの内容

2.1 プログラムの名称

浮遊式海洋構造物の波浪中運動計算プログラム

2.2 製作者

海洋開発工学部　加藤　俊司

2.3 製作月日

昭和58年４月製作。昭和59年４月，ブレーシングを考慮でき，粘性減衰力も考慮できるように拡張。

2.4 計算の概要

2.4.1 基本仮定

(1) 波浪外力および運動は調和振動とする。

(2) 波は微小振幅波であり，またその応答の運動も微小振幅である。

(3) 構造物の部材断面寸法は，波長に比べて小さくその部材間の干渉は無視できる。

(4) 非線形減衰係数で運動と波粒子との相対速度の二乗の項を考慮する場合は等価線形化できる。

2.4.2 ６自由度６連成運動方程式

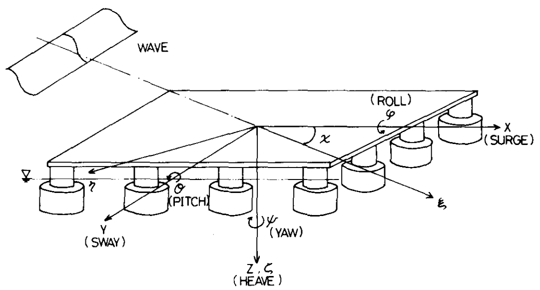
一般に，浮遊式海洋構造物の運動方程式は，次式のように６自由度６連成運動方程式として表わされる。

$$\sum_{i=1}^{6}\{(M_{ji}+m_{ji})\ddot{X}_i+N^{(1)}_{ji}\dot{X}_i+N^{(2)}_{ji}(\dot{X}_i-\dot{U}_i)\,|\dot{X}_i-\dot{U}_i| +(K^{(1)}_{ji}+K^{(2)}_{ji})X_i\}=F_j \qquad (j=1,\cdots,6) \tag{1}$$

ここで添字の１～６は，１：Surge，２：Sway，３：heave，４：roll，５：pitch，６：yaw のモードを表わし，

m_{ji}：付加質量または，付加慣性モーメント
M_{ji}：質量または慣性モーメント
$N_{ji}^{(1)}$：線形減衰係数
$N_{ji}^{(2)}$：粘性減衰係数
$K_{ji}^{(1)}$：静的復原力係数
$K_{ji}^{(2)}$：係留復原力係数
F_j：波浪外力
X_i：直線または回転運動変位
$\dot{U}_i$：平均波粒子速度

である。なお，座標系は，図－1のように定める。図中の原点は構造物の重心にとる。



図－1　座標系

2.4.3　流体力係数

構造物を構成する要素を，ロワーハルとポンツーン，カラム，ブレーシング，及びフーティング付コラムの4種に分類し，それらに対して異なる方法で流体力を計算しておき，それらを代数加算することによって全体構造物の付加質量，線形減衰係数を求める。使用者はそのつど以下に述べるような構成要素の扱い方を考慮して各部材を分類する必要がある。

(1)　ロワーハルとポンツーン

ロワーハル及びポンツーンは一般に排水容積の最も大きい柱体であるから，構造物の運動への寄与も最も大きいと考えられる。また、これらの断面形状も多種多様であるので，まず，大きく，没水体と浮体に分類し，それをストリップ法が適用できる場合とできない場合に区別し，ストリップ法が適用できる場合は2次元領域分割法[2)]によって求めた流体力を使用し，ストリップ法が適用できない場合は，それ自体を単独要素と考え，3次元特異点分布法[3)]によって求めた流体力を使用する。

ストリップ法が適用できるかできないかの基準は，文献〔4〕を参照し，L/B（長さ・幅比）が5以上の場合はストリップ法が適用できるとし，L/Bが5未満の場合はストリップ法が適用できないとした。

(2)　カラム

カラムは一般に，水面を切る円柱体と考える。流体力は，3次元特異点分布法，または領域分割法[5)]やF.E.M[5)]によって求めた結果を使用する。

(3)　ブレーシング

ブレーシングは一般に比較的小容積の円柱体と考えられ，運動に及ぼす影響は小さいので，流体力としては，モリソン式のC_M係数から求められる付加質量係数のみを考慮する。従って周波数依存は考えない。

(4)　フーティング付コラム

フーティング付コラムは二つの円柱が同軸で組み合わされた形状で近似する。流体力は，領域分割法または，F.E.Mによって求めた結果を使用する。

(1)，(2)，(4)形状の流体力の作用点は，もし連成流体力係数が求められれば，それから逆算するが，もし求められない場合は浮心の位置とする。

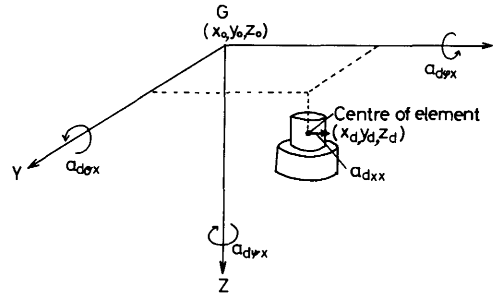
構造物の総付加質量及び線形減衰係数を計算するには次のようにして行う。ただし，要素間の相互干渉はないものとする。

a)　(1)，(2)，(4)の構造要素の場合

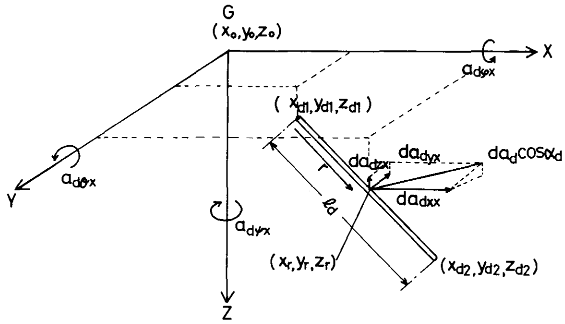
これらの要素に対しては，流体力は，図－2に示す物体要素の中心（x_d，y_d，z_d）に集中して作用すると考える。今，x，y，z方向の流体力係数をa_{dxx}，a_{dyy}，a_{dzz}とし，要素がx方向に振動している場合を考えるとx方向に振動したことによって生ずる（x_0，y_0，z_0）まわりの連成流体力係数は次のように求められる。

$$
\begin{aligned}
a_{d\varphi x} &= 0 \\
a_{d\theta x} &= a_{dxx}(z_d - z_0) \\
a_{d\psi x} &= -a_{dxx}(y_d - y_0) \\
a_{dyx} &= a_{dzx} = 0
\end{aligned}
\qquad (2)
$$

同様にして，y，z，θ，φ，ψ方向に振動したことによって生ずる（x_0，y_0，z_0）まわりの連成流体力係数が求められる。



図－2　構成要素に働く流体力



$a_d = \rho O_d C_m$

図－3　ブレーシングに働く流体力

b)　(3)の構造要素の場合

ブレーシングの管軸に垂直な方向に対する流体力係数を a_d とすれば，図－3のようにブレーシングが置かれた場合に，x 方向にこのブレーシングが運動したことによって生ずる（x_0, y_0, z_0）まわりの連成流体力係数は次のように表わされる。

$$
\begin{aligned}
a_{dxx} &= a_d \cos^2 \alpha_d \\
a_{dyx} &= -\sin\beta_d \sin\alpha_d\, a_d \\
a_{dzx} &= -\sin\gamma_d \sin\beta_d\, a_d \qquad (3) \\
a_{d\varphi x} &= -(y_{d1}-y_0)\sin\gamma_d \sin\alpha_d a_d + (z_{d1}-z_0) \\
&\quad \sin\alpha_d \sin\beta_d\, a_d \\
a_{d\theta x} &= -(z_{d1}-z_0)\cos^2\alpha_d a_d + (x_{d1}-x_0)\sin\alpha_d \\
&\quad \sin\gamma_d\, a_d + s_d \sin\gamma_d \\
a_{d\psi x} &= -(x_{d1}-x_0)\sin\beta_d \sin\alpha_d a_d - (y_{d1}-y_0) \\
&\quad \cos^2\alpha_d a_d - s_d \sin\beta_d
\end{aligned}
$$

ここで
$$
\begin{aligned}
&\sin\alpha_d = (x_{d2}-x_{d1})/l_d \quad -90^\circ < \alpha_d < 90^\circ \\
&\sin\beta_d = (y_{d2}-y_{d1})/l_d \quad -90^\circ < \beta_d < 90^\circ \qquad (4) \\
&\sin\gamma_d = (z_{d2}-z_{d1})l_d \quad -90^\circ < \gamma_d < 90^\circ \\
&s_d = \int_0^{ld} r\,da_d\ , \quad a_d = \int_0^{ld} da_d
\end{aligned}
$$

同様にして，y, z, θ, φ, ψ 方向に運動したことによって生ずる（x_0, y_0, z_0）まわりの連成流体力係数が求められる。

a)，b）の要素における流体力係数を各モードごとに代数加算することによって全体構造物の総付加質量及び総線形減衰係数が求められる。

2.4.4　粘性減衰力

すべてのモードに対して構造物の運動速度と波粒子速度の差即ち，相対速度の2乗に比例する非線形減衰係数は，等価線形化できるものとして(1)式の左辺第三項を次のように置き換える。

$$
N^{(2)}_{ji}(\dot{X}_i - \dot{U})\,|\dot{X}_i - \dot{U}_i| \fallingdotseq \frac{8}{3\pi} N^{(2)}_{ji}\, V_i(\dot{X}_i - \dot{U}_i) \qquad (5)
$$

ここで，V_i は相対速度振幅である。

(1)，(2)，(4)の要素の場合は各構成要素の x, y, z 方向の抗力係数より，x, y, z 方向の粘性減衰係数及び連成粘性減衰係数を2.4.3節と同様にして求める。(3)の要素の場合は，管軸に対して垂直な方向の抗力係数より2.4.3節のb）と同様にして連成粘性減衰係数等を求める。

各要素ごとに求められた粘性減衰係数を各モードごとに代数加算することによって全体構造物の粘性減衰係数 $N^{(2)}_{ji}$ を求める。

2.4.5　復原力

流体から受ける復原力係数 $K^{(1)}_{ji}$ については各構成要素の縦軸と水線面とのなす角 γ_{dz} 水線面積 O_{dz}，水線面積の面積中心の位置（x_{dz}, y_{dz}, z_{dz}）から次のように計算される。

$$
K^{(1)}_{33} = \sum_d \frac{\rho g 0_{dz}}{\sin\gamma_{dz}} \quad K^{(1)}_{44} = \sum_d \frac{\rho g 0_{dz}}{\sin\gamma_{dz}}(y_{dz}-y_0)^2
$$

$$
K^{(1)}_{34} = \sum_d \frac{\rho g 0_{dz}}{\sin\gamma_{dz}}(g_{dz}-y_0) \quad K^{(1)}_{55} = \sum_d \frac{\rho g 0_{dz}}{\sin\gamma_{dz}}(x_{dz}-x_0)^2 \qquad (6)
$$

$$K_{35}^{1} = \sum_{d} \frac{\rho g 0_{dz}}{\sin \gamma_{dz}}(x_{dz} - x_0)$$

$$K_{45}^{1} = -\sum_{d} \frac{\rho g O_{dz}}{\sin \gamma_{dz}}(y_{dz} - y_0)(x_{dz} - x_0)$$

また，K_{ji}^{2}については，係留ラインを水平及び垂直方向の線形ばねに置き換え，係留点にこれらのばねによる復原力が生ずるものとして2.4.3節のa）と同じ方法で求める。

2.4.6 波浪外力

波の伝播方向は図－1に示すように，浮体の x 軸に対して角度 $\varkappa$ をなす ξ 方向である。構造物全体に働く波浪外力は次のようにして求める。

a) (2), (4)の要素の場合

この場合は，波の入射角 x に対して無関係であるから一方向についての波強制力を領域分割法あるいはF．E．Mによって求めておくと，任意の入射角に対しての波強制力及び波強制モーメントは次のようにして求められる。

$$
\begin{aligned}
F_{dx} &= F_{\xi 0} \cos \varkappa \sin(\omega t - k\xi - \varepsilon_\xi) \\
F_{dy} &= F_{\xi 0} \sin \varkappa \sin(\omega t - k\xi - \varepsilon_\xi) \qquad (7) \\
F_{dz} &= F_{\zeta 0} \sin(\omega t - k\xi - \varepsilon_\zeta)
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
&\text{Roll moment}: K_d = F_{dz}(y_d - y_0) - F_{dy}(z_d - z_0) \\
&\text{pitch moment}: M_d = F_{dx}(z_d - z_0) - F_{dz}(x_d - x_0) \qquad (8) \\
&\text{yaw moment}: N_d = F_{dy}(x_d - x_0) - F_{dx}(y_d - y_0)
\end{aligned}
$$

b) (1)の要素の場合

この場合は，波の入射角に対して波強制力が変化するため，入射角に対する波強制力を3次元特異点分布法によって求め，その値を用いる。

c) (3)の要素の場合

直径が波長に比べて小さいとし，一方長さは波長に対して無視できないものとすると，ブレーシングに働く波強制力は（付加質量＋排水量/g）と加速度の積によって求められる。従って例えば，ξ 方向の力 X_g は ξ，ζ 方向の水粒子の加速度成分が求められれば，次のようにして求められる。

$$X_g = X_{g\xi} + X_{g\zeta} \qquad (9)$$

ここで，
$$X_{g\xi} = \cos^2 \alpha_g (a_d + \rho O_d) \int_0^{l_d} \ddot{\xi}\, dr \qquad (10)$$

$$X_{g\zeta} = -\sin \alpha_g \sin \gamma_g (a_d + \rho O_d) \int_0^{l_d} \ddot{\zeta}\, dr$$

$$
\begin{aligned}
\xi_i &= x_{di} \cos \varkappa + y_{di} \sin \varkappa \\
\eta_i &= -x_{di} \sin \varkappa + y_{di} \cos \varkappa \\
\zeta_i &= z_{di} \qquad (11)
\end{aligned}
$$

$$\sin \alpha_g = \frac{\xi_2 - \xi_1}{l_d} \quad -90^\circ < \alpha_g < 90^\circ$$

$$\sin \beta_g = \frac{\eta_2 - \eta_1}{l_d} \quad -90^\circ < \beta_g < 90^\circ$$

$$\sin \gamma_g = \frac{\zeta_2 - \zeta_1}{l_d} \quad -90^\circ < \gamma_g < 90^\circ$$

同様にして，Y_g，Z_g が求められ，X_g，Y_g，Z_g から x，y，z 方向の波強制力が次のようにして求められる。

$$
\begin{aligned}
F_{dx} &= X_g \cos \varkappa - Y_g \sin \varkappa \\
F_{dy} &= X_g \sin \varkappa + Y_g \cos \varkappa \qquad (12) \\
F_{dz} &= Z_g
\end{aligned}
$$

(12), (8)式を用いることによって，(x_0, y_0, z_0) まわりのモーメントに換算することができる。

a), b), c）の要素に働く波強制力及び波強制モーメントを代数加算することによって構造物全体に働く波強制力及び波強制モーメントを求めることができる。

2.4.7 質量及び慣性モーメント

各構成要素の排水量を加算することによって全体構造物の総排水量を求め，それを重力加速度で割ることによって質量とする。また，慣性モーメントは，各構成要素の排水量に，要素の重心位置と構造物全体の重心の位置との距離の自乗をかけ，それを要素数だけ加算することによって求める。なお，この値は,実験から求めた値を使用することも可能である。

2.5 計算手順

(1)式の運動方程式の解法は次のようにして行なう。

i）粘性減衰力がないとして(1)式の線形運動方程式を解く。

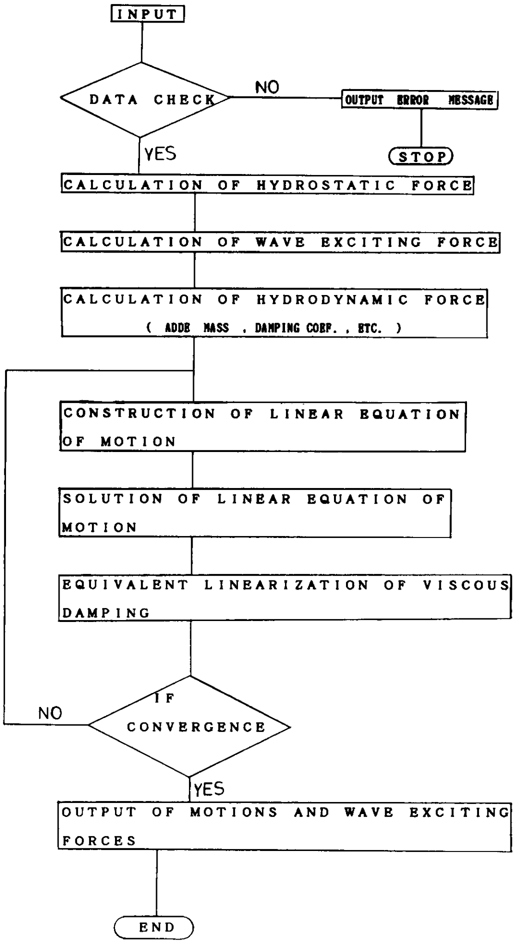
ii）求められた運動速度 $\dot{X}_i$ と波のオービタルモーションによる速度 $|\dot{U}_i$ との相対速度振幅 V_i を計算する。

iii）粘性減衰力を考慮して(1)の非線形運動方程式を解く。

iv）V_i がある値に収束するまで ii)，iii）をイテレーションし，最終結果を求める。

なお，文中の $\dot{U}_i$ は浅水域における規則波の速度ポテンシャルと各構成要素の浮心の位置とから求めるものである。

i）～iv）までの計算フローチャートを図－4に示す。



図－4 計算フローチャート

2.6 計算機種および制限事項

本プログラムは科学計算用ライブラリーを一切使用していないため，どのような機種にもかけられる。使用に必要なメモリー数は512ＫＢで，入力の制限事項は以下の通りである。

(1) 波周波数の数　　40以下
(2) 波との出合角との数　　10以下
(3) 構成要素の数　　300以下

なお，出力はL．Pのみである。

3．プログラムの応用

本プログラムを統計処理のプログラムと組み合わせれば，構造物の運動の短期及び長期予測が可能となる。また，構造解析プログラムと組み合わせれば，各部のたわみ，曲げモーメント等を計算することができる。

4．あ　と　が　き

今後は，係留ラインの非線形特性，要素間の相互干渉，波高減衰効果，さらには波漂流力特性を考慮できるようにする予定である。

参　考　文　献

1）J. P. Hooft：A mathematical method of determining Hydrodynamically induced Forces on a semisubmersihle, SNAME, Vol 79（1971）
2）大川豊：矩形断面を有する二次元柱状体に働く流体力の計算，船舶技術研究所報告，第15巻第１号（1978）
3）大川豊：コラム付没水体に働く波強制力について，第40回船舶技術研究所講演集（1982）
4）第179回研究部会：箱型海洋構造物の運動特性及び係留システムに関する研究，日本造船研究協会研究資料第346号（1982）
5）安藤定雄，影本浩，加藤俊司：要素浮体群に働く波強制力について，第42回船舶技術研究所講演集（1984）

23.　３次元特異点分布法による動揺流体力計算プログラム

海洋開発工学部　大　川　　豊

1．プログラムの目的および概要

半潜水型海洋構造物に働く動揺流体力や波強制力は簡便な方法として Hooft 法によって推定されているが，厳密な３次元流体力を求めるためにはポテンシャル理論に基き，任意な形状に適用できる３次元特異点分布法が最も一般的な方法と考えられる。またL/Bが１に近い箱型浮体にはストリップ法が適用しにく

く，3次元流体力の推定が必要である。そこで，Faltinsen ら[1]の示した方法に基づき，有限水深に対する Green 関数を用いた積分方程式を解く，3次元特異点分布法による流体力の計算プログラムを作成した。

対象とした形状は，箱型浮体，下面カットアップ付きポンツーン，箱型没水体（ロワーハル），コラム付き（2本又は3本）ロワーハルなどであり，それぞれ動揺流体力，波強制力が求められる。

2．プログラムの内容

2.1 プログラムの名称

3次示特異点分布法による流体力計算プログラム（SUBCOL）

2.2 製作者

海洋開発工学部　大川　豊

2.3 製作年月

昭和57年10月

2.4 計算の概要

図―1に示す座標系を用いて全速度ポテンシャルを次の様に表わす。

$$\phi=\phi_0 e^{-i\omega t}+\phi_7 e^{-i\omega t}+\sum_{i=1}^{6}\phi_i\dot{\eta}_i \tag{1}$$

$\phi_0 e^{-i\omega t}$ は入射波の速度ポテンシャルで次式で表わされる。

$$\phi_0 e^{-i\omega t}=\frac{g\zeta_a}{\omega}\frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh}\times e^{i(kx\cos\beta+ky\sin\beta-\omega t)} \tag{2}$$

ここで g は重力加速度，ζ_a は入射波振幅，k は

$$\frac{\omega^2 h}{g}=kh\tanh kh \tag{3}$$

を満たす。

$\phi_7 e^{-i\omega t}$ は diffraction ポテンシャル，$\phi_j(j=1,6)$ は j モードの運動による速度ポテンシャルである。

これらの速度ポテンシャルは，ラプラス方程式，水底条件，自由表面条件を満たし，更に $\phi_j\dot{\eta}$（$j=1$，6）と $\phi_7 e^{-i\omega t}$ は radiation 条件を満たす。この様な速度ポテンシャルを求める積分方程式は有限水深に対するグリーン関数を用いて次の様に表わすことができる。

$$-2\pi Q_j(x,y,z)+\iint_S Q_j(\xi,\eta,\zeta)\frac{\partial}{\partial n}G(x,y,z;\xi,\eta,\zeta)ds$$

$$=\begin{cases} n_j(j=1,6) \\ -\dfrac{\partial\phi_0}{\partial n} \quad (j=7)\end{cases} \tag{4}$$

S は物体表面を表わし，（ξ，η，ζ）は S の座標，Q_j（ξ，η，ζ）は S 点の吹出し密度を表わす。また n_j は物体表面上の外向き法線を $\mathbf{n}$ としたとき

$$\left.\begin{aligned}\mathbf{n}&=(n_1,n_2,n_3)\\ \mathbf{r}\times\mathbf{n}&=(n_4,n_5,n_6)\end{aligned}\right\} \tag{5}$$

である。

グリーン関数 G（x，y，z；ξ，η，ζ）は kr_1 によって次の2つの表現を用いる。

$kr_1 \geqq 0.1$ のとき

$$G(x,y,z;\xi,\eta,\zeta)=\frac{2\pi(v^2-k^2)}{k^2h-v^2h+v}\cosh k(z+h)\cosh k(\zeta+h)\{Y_0(kr_1)-iJ_0(kr_1)\}$$
$$+4\sum_{k=1}^{\infty}\frac{\mu_k^2+v^2}{\mu_k^2h+v^2h-v}\cdot\cos\{\mu_k(z+h)\}\cos\{\mu_k(\zeta+h)\}\cdot K_0(ykr_1) \tag{5}$$

$kr_1<0.1$ のとき

$$G(x,y,z;\xi,\eta,\zeta)=\frac{1}{R}+\frac{1}{R^1}+2PV\times\int_0^{\infty}\frac{(\mu+v)e^{-\mu h}\cosh\mu(\zeta+h)\cosh\mu(z+h)J_0(\mu r_1)}{\mu\sinh\mu h-v\cosh\mu h}d\mu$$
$$+i\frac{2\pi(k^2-v^2)\cosh(\zeta+h)\cosh k(z+h)}{k^2h-v^2h+v}J_0(kr_1) \tag{6}$$

ここで，$v=\omega^2/g$，μ_k は次の方程式を満たす固有値である。

$$\mu_k\tan\mu_k h+v=0 \tag{7}$$

また，$r_1=\sqrt{(x-\xi)^2+(y-\eta)^2}$

$$R=\sqrt{(x-\xi)^2+(y-\eta)^2+(z-\zeta)^2} \tag{8}$$

$$R^1=\sqrt{(x-\xi)^2+(y-\eta)^2+(z+2h-\zeta)^2}$$

J_0 は0次の第1種ベッセル関数

Y_0 は0次の第2種ベッセル関数

K_0 は0次の第2種変形ベッセル関数である。

浮体の表面を四辺形要素に分割し，各要素上では吹出しが一定であるとして(4)式を離散化すると Q_j に関する連立方程式が導かれるので，これを解けば速度ポテンシャルが決定される。この解を用いて j モードの運動に対する k モードの付加質量，減衰係数は次式で求められる。

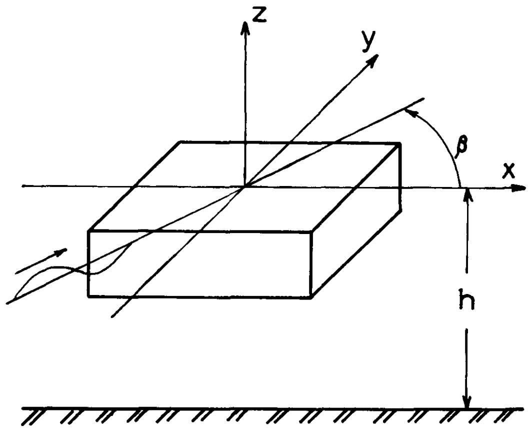
$$\left.\begin{aligned}A_{kj}&=-\rho Re\{\textstyle\iint_S\phi_j n_k ds\}\\ B_{kj}&=-\rho\omega Im\{\textstyle\iint_S\phi_j n_k ds\}\end{aligned}\right\} \tag{9}$$

また，波強制力は次式より求まる。

$$Fj = i\omega\rho\iint_S(\phi_0+\phi_7)n_j\,ds \tag{10}$$

ここで ρ は流体の密度である。

本プログラムは x 軸および y 軸に対して対称な浮体を扱う様になっているので，運動モードによって4種類の係数行列ができるため，4回連立方程式を解くことを繰り返す。また，$j=7$ では入射角度 β は右辺だけに関係するので，7種類までの β に対して一度に解けるようにしてある。



図－1　座標系

2.5 計算の手順

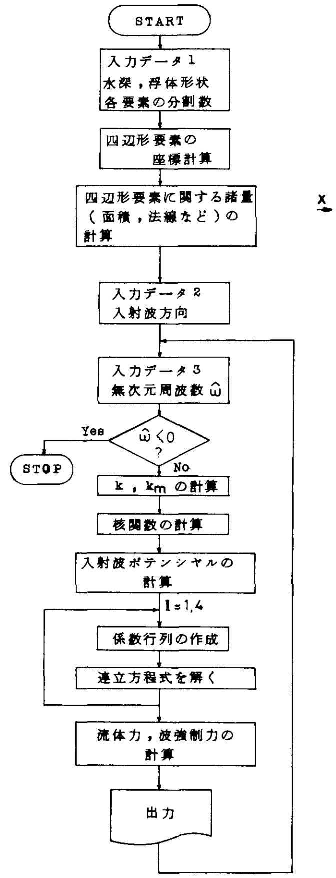
フローチャートを図－2に示す。

2.6 計算機種および制限事項

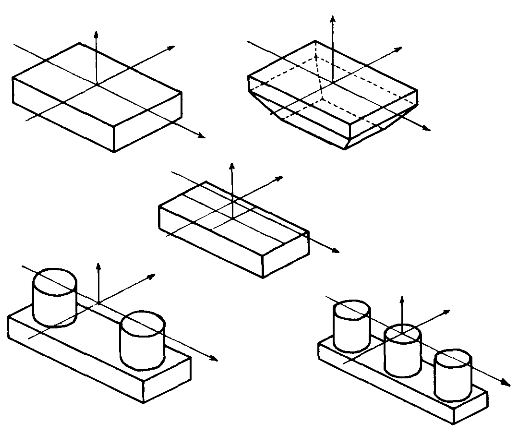
本プログラムは FACOM-M 180 II AD で作成した。ベッセル関数のみ FACOM のライブラリーを用いているが，他は特殊な命令，関数等は使用していないので他機種への移行は容易と思われる。リージョンサイズは100要素の場合1108K B，150要素の場合2014 K Bである。

3．プログラムの応用

現在は図－3に示す様な5種類の形状に対して計算可能である。他の形状に対しては，四辺形要素の座標を計算するサブルーチン CORDS，座標番号と要素番号を対応づけるサブルーチン SEARCH を作成すれば，形状パラメータ，分割数などの COMMON 文を多少変えるだけで計算できる。箱型浮体に関しては更に運動，浮体周辺の波高分布の計算も可能である。



図－2　計算のフローチャート



図－3　計算可能な浮体形状

4. あとがき

本計算法はグリーン関数の計算に時間がかかるため一般には実行しにくい面があるので，当研究所の様な機関で計算を行う事には大きな意義があると考えている。また，最近グリーン関数を速く計算するアルゴリズムが考案されたという情報もあるので今後改良していきたい。

多様な物体形状に適用できるようにするために要素分割や座標計算のプログラムをモジュール化する必要があり，現在検討中である。

参考文献

1) O. M. Faltinsen et. al. ; Motions of Large Structures in Waves at Zero Froude Number, International Symposium on the Dynamics of Marine Vehicles and Structures in Waves (1974)

24. ランプドマス法による係留ラインの2次元動的解析プログラム

海洋開発工学部　加藤　俊　司

1. プログラムの目的及び概要

本プログラムは，係留ラインに働く動的張力の時系列をランプドマス法を用いて計算するプログラムである。ランプドマス法とは，係留ラインを有限個の質点に置き換え，各質点の運動方程式と質点間の拘束条件とから，各質点の運動変位及び質点間に働く張力を求める方法である。以下にその概要を述べる。

2. プログラムの内容

2.1 プログラムの名称

ランプドマス法による係留ラインの2次元動的解析プログラム

2.2 製作者

海洋開発工学部　加藤　俊司

2.3 製作月日

昭和57年4月製作。

2.4 計算の概要

2.4.1 係留ラインの運動方程式

係留ラインをN等分の要素に分割し，各要素jの質量Mj及び各要素に作用する力を一点に集中して考える。また，各質点間は重さのない直線ばねで結ばれているものとして各質点の運動と各質点間の張力を計算する。この時，各質点間の自重Wjは両端を除く（N−1）個の分割点に集中するので，全体の係留ラインの重量を合わせる為にj＝2及びj＝Nの点の重量を1.5Wjに修正する。図−1において，質点jに水平及び垂直に作用する力F_{xj}，F_{zj}が働く時の質点jの運動方程式は質点jの質量をM_j，法線方向，接線方向の付加質量をそれぞれA_{nj}，A_{tj}とすると次式で与えられる。

$$[M_j+A_{nj}\sin^2\overline{\gamma}_j+A_{tj}\cos^2\overline{\gamma}_j]\ddot{x}_j+[A_{tj}-A_{nj}]\ddot{z}_j\sin\overline{\gamma}_j\cos\overline{\gamma}_j=F_{xj} \tag{1}$$

$$[M_j+A_{nj}\cos^2\overline{\gamma}_j+A_{tj}\sin^2\overline{\gamma}_j]\ddot{z}_j+[A_{tj}-A_{nj}]\ddot{x}_j\sin\overline{\gamma}_j\cos\overline{\gamma}_j=F_{zj} \tag{2}$$

また，

$$F_{xj}=T_j\cos\gamma_j-T_{j-1}\cos\gamma_{j-1}-f_{dxj} \tag{3}$$

$$F_{zj}=T_j\sin\gamma_j-T_{j-1}\sin\gamma_{j-1}-f_{dzj}-\delta_j \tag{4}$$

(3)，(4)式中のf_{dxj}及びf_{dzj}は係留ラインの受ける抗力のx及びz方向成分であり，近似的に次式で与えられているとする。

$$f_{dxj}=-\frac{\rho}{2}D_c\bar{l}[C_{dn}\sin\overline{\gamma}_j|U_{nj}|U_{nj}-C_{dt}\cos\overline{\gamma}_j|U_{tj}|U_{tj}] \tag{5}$$

$$f_{dzj}=-\frac{\rho}{2}D_c\bar{l}[C_{dn}\cos\overline{\gamma}_j|U_{nj}|U_{nj}+C_{dt}\sin\overline{\gamma}_j|U_{tj}|U_{tj}] \tag{6}$$

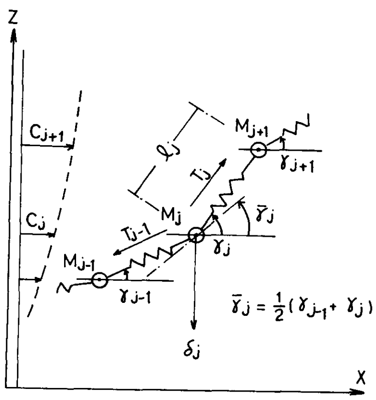
また，

$$U_{nj}=-(\dot{x}_j-C_j)\sin\overline{\gamma}_j+\dot{z}_j\cos\overline{\gamma}_j \tag{7}$$

$$U_{tj}=-(\dot{x}_j-C_j)\cos\bar{\gamma}_j+\dot{z}_j\sin\bar{\gamma}_j \qquad (8)$$

ここで，δ_j は質点 j の水中重量，D_c は係留ラインの等価円断面直径，ρ は流体密度，C_{dn}，C_{dt} はそれぞれ法線方向及び接線方向の抗力係数，C_j は潮流速度，$\bar{l}$ は要素長さである。又，一方，各質点間には次式で示す様な拘束条件式が存在する。

$$(x_j-x_{j-1})^2+(z_j-z_{j-1})^2=\bar{l}^2 \qquad (j=2,3,\cdots,N+1) \qquad (9)$$



図－1　ランプドマスに作用する力

2.4.2　運動方程式の解法

本プログラムでは，次式で示すような差分方程式と(1)及び(2)式を組み合わせて係留ラインの x 方向，z 方向の運動方程式を(12)式に示す張力 T_j の関数の形に直すことによって解いていく。

$$\ddot{x}_j^{n+1}=(x_j^{n+1}-2x_j^n+x_j^{n-1})/\Delta t^2 \qquad (10)$$

$$\dot{x}_j^{n+1}=(x_j^{n+1}-x_j^{n-1})/2\Delta t \qquad (11)$$

$$\begin{bmatrix} x_j^{n+1}-2x_j^n+x_j^{n-1} \\ z_j^{n+1}-2z_j^n+z_j^{n-1} \end{bmatrix} =\begin{bmatrix} R_j & -P_j \\ S_j & -Q_j \end{bmatrix}\begin{bmatrix} T_j \\ T_{j-1} \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} U_j^n \\ W_j^n \end{bmatrix} \qquad (12)$$

ここで，Δt は時間刻み幅，肩字は時刻 $t=n\Delta t$ を表わす。また，

$$\begin{bmatrix} R_j & -P_j \\ S_j & -Q_j \end{bmatrix} =\begin{bmatrix} I_1 & I_2 \\ I_2 & I_3 \end{bmatrix}^{-1}\begin{bmatrix} \cos\gamma_j & -\cos\gamma_{j-1} \\ \sin\gamma_j & -\sin\gamma_{j-1} \end{bmatrix}\Delta t^2 \qquad (13)$$

$$\begin{bmatrix} U_j^n \\ W_j^n \end{bmatrix} =\begin{bmatrix} I_1 & I_2 \\ I_2 & I_3 \end{bmatrix}^{-1}\begin{bmatrix} -f_{dxj} \\ -f_{dxj} & -\delta_j \end{bmatrix}\Delta t^2 \qquad (14)$$

であり，

ここで $I_1=[M_j+A_{nj}\sin^2\bar{\gamma}_j+A_{tj}\cos^2\bar{\gamma}_j]$，

$I_2=[A_{tj}-A_{nj}]\sin\bar{\gamma}_j\cos\bar{\gamma}_j$，

$I_3=[M_j+A_{nj}\cos^2\bar{\gamma}_j+A_{tj}\sin^2\bar{\gamma}_j]$ である。

今，次式で表わされる関数 ψ_j^{n+1} を考える。

$$\psi_j^{n+1}=(x_j^{n+1}-x_{j-1}^{n+1})^2+(z_{j-1}^{n+1}-z_j^{n+1})^2-\bar{l}^2 \equiv \psi_j^{n+1}(T_{j-2}^{n+1},T_{j-1}^{n+1},T_j^{n+1}) \qquad (15)$$

また，張力 T_j^{n+1} を次式の様に考えて(15)式を Taylor 展開し，T_j^{n+1} が $\tilde{T}_j^{n+1}$ に十分近い値として高次の項を省略すると ΔT_j^{n+1} を求める式が(17)式の様に与えられる。

$$T_j^{n+1}=\tilde{T}_j^{n+1}+\Delta T_j^{n+1} \qquad (16)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta T_1^{n+1} \\ \vdots \\ \Delta T_N^{n+1} \end{bmatrix} =\begin{bmatrix} -\tilde{F}_2^{n+1} & \tilde{G}_2^{n+1} & & 0 \\ \tilde{E}_3^{n+1} & -\tilde{F}_3^{n+1} & \tilde{G}_3^{n+1} & \\ & \ddots & \ddots & \ddots \\ 0 & & \tilde{E}_{N+1}^{n+1} & -\tilde{F}_{N+1}^{n+1} \end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix} -\tilde{\psi}_2^{n+1} \\ \vdots \\ -\tilde{\psi}_{N+1}^{n+1} \end{bmatrix} \qquad (17)$$

ここで，

$$\tilde{E}_j^{n+1}=\tilde{P}_j^{n+1}\tilde{X}_j^{n+1}+\tilde{Q}_j^{n+1}\tilde{Z}_j^{n+1}$$

$$\tilde{F}_j^{n+1}=(\tilde{P}_j^{n+1}+\tilde{R}_{j-1}^{n+1})\tilde{X}_j^{n+1}+(\tilde{Q}_j^{n+1}+\tilde{S}_{j-1}^{n+1})\tilde{Z}_j^{n+1}$$

$$\tilde{G}_j^{n+1}=\tilde{R}_j^{n+1}\tilde{X}_j^{n+1}+\tilde{S}_j^{n+1}\tilde{Z}_j^{n+1} \qquad (18)$$

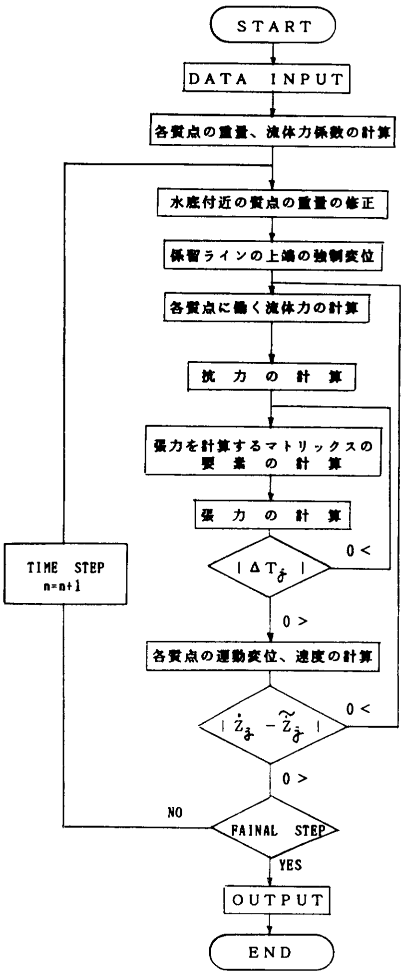
$$\Psi_j^{n+1}=-\frac{1}{2}\{\tilde{X}_j^2+\tilde{Z}_j^2-\bar{l}^2\}$$

$$\tilde{X}_j^{n+1}=\tilde{x}_j^{n+1}-\tilde{x}_{j-1}^{n+1},\quad \tilde{Z}_j^{n+1}=\tilde{z}_j^{n+1}-\tilde{z}_{j-1}^{n+1}$$

2.5　計算手順

計算手順としては，まず係留ラインの初期状態を予め求めておき，この値と係留ライン上端での強制変位を用いて，次の時間ステップにおける張力 T_j^{n+1} を(16)，(17)式を繰り返し計算することによって求める。また，この際，質点の位置（x_j^{n+1}，z_j^{n+1}）も同時に得られる。計算が終了すると次の時間ステップに移り同様の計算

を逐次行なって行く。以上の計算フローチャートを図－2に示す。



図－2 計算フローチャート

2.6 計算機種及び制限事項

1) 計算機種

FORTRAN 77, FACOMM−180 II AD

2) 制限事項

本プログラムは，二次元係留ラインのみしか扱えない。使用に必要なメモリー数は512ＫＢで，入力制限事項は次の通りである。

係留ライン分割数	35以下
計算するデーター総数	9000以下

逆行列を求めるために，FACOM M-180 II AD 科学計算ライブラリー（ＳＳＬ）の中のMINV 2 Ｓを使用している。また，係留ラインの初期状態は予め計算しておく必要があり，この初期状態の質点の位置及び張力等をデーターセットに収納しておく必要がある。さらに，係留ラインの上端の x 方向あるいは z 方向の強制変位も，計算を実行する前にデーターセットに格納しておく必要がある。

3．プログラムの応用

計算するデーター数の上限を9000に取ってあるため，直接不規則変位を入力することによって不規則的に変動する動的張力の時系列を計算することができる。また，このようにして求められた不規則データーをデーターセットに格納しておけばスペクトル解析及び統計解析が可能である。

4．あ　と　が　き

本プログラムは２次元係留ラインのみしか取り扱えないが，容易に３次元係留ラインの場合に拡張可能である。

参　考　文　献

1）中嶋俊夫，元良誠三，藤野正隆：特殊係留ラインの動的特性について，第５回海洋工学シンポジウム，1981。

25. 待ち時間最短化による作業計画作成プログラム

艤装部　金　湖　富士夫

1．プログラムの目的および概要

組立て作業をはじめ何らかの作業を行う場合，可能な限り短い時間で終了することが重要な課題になる。

作業の所要時間を短縮する合理的な作業計画を作成する手法として，PERT（Program Evaluation and Review Technique），RAMPS（Resource Allocation and Multi-Project Scheduling）等があるが，これらは得られた作業計画が最適なものであって，最短時間で作業を終了するものであるとの保証を提供しない。このプログラムは，限られた人数または機械を有効に用い，最短時間で作業を完了させる（すなわち人および機械の待ち時間を最短化する）作業計画を作成するものであり，基礎となる理論により，このプログラムによって得られた作業計画は所要時間を最短にするものであることが保証される。

2．プログラムの内容

2.1 プログラムの名称

待ち時間最短化による作業計画作成プログラム

Program for Sheduling Activities by Minimizing Waiting Time

2.2 製作者

艤装部　金湖　富士夫

2.3 製作年月

昭和57年10月

2.4 計算の概要

作業を行う人（または機械）の能力はすべて同等とし，ある要素を m 人で行って終了するまでに要した時間を t とすると，$m\times t$ をもってその要素の要素量と定義する。各要素には携わる人数が増加しても所要時間が短くならない上限の人数が存在し，それを限界人数と呼ぶ。さらに要素間には前後関係が存在し，各要素は他の幾つかの要素が終了しないと開始できない。それを定量的に表現するため，各要素を点で，前後関係を有向線分で表わした図（作業グラフと呼ぶ）を用いることにする。また計算機プログラムに識別させるために，要素 i の次に行える要素を j とすると，i 行 j 列を 1，それ以外を 0 とした行列（結合行列と呼ぶ）を用いる（図－1 参照）。このとき，要素番号の最初と最後はそれぞれ開始，終了を示す要素量 0 のダミーの要素とする。

作業を N 人で行い時間 T で終了したとすると，その履行状況は図－2 にて表わすことができる。各要素の要素量を w_i 待ち時間の生じている時間を t_i，その時間に作業に携わっている人数を N_i とすれば，

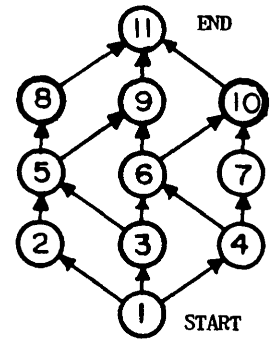
$$N(T-\sum_{i=1}^{n} ti)+\sum_{i=1}^{n} N_i t_i=\sum_{i=1}^{n} w_i$$

$$\therefore\ T=\frac{\sum_{i=1}^{n} w_i}{N}+\sum_{i=1}^{n}\frac{N-N_i}{N}t_i \qquad (1)$$

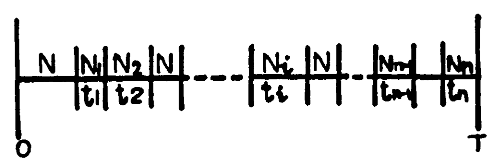
(1)式より，作業に携わっていない人数が多ければ多いほど，また待ちを生じている時間が長ければ長いほど所要時間 T は長くなることがわかる。(1)式の右辺第 2 項をその作業の待ち時間と定義する。また(1)式より所要時間の下限は，$\sum_{i=1}^{n} w_i/N$ である。すなわち

$$T\geqq\frac{\sum_{i=1}^{n} w_i}{N}$$

```
   12345678901
   -----------
 1:01110000000
 2:00001000000
 3:00001100000
 4:00000110000
 5:00000001100
 6:00000000110
 7:00000000010
 8:00000000001
 9:00000000001
10:00000000001
11:00000000000
```



図－1　作業グラフと結合行列



ti：Ni人（<N）で行なっている時間

図－2　作業履行状況

2.4.1 並行作業要素における解

図―3 のような作業グラフで表わされる作業を並行作業要素より成る作業と呼ぶ。この場合，最短所要時間 T_{min} は，各要素の要素量を w_i，限界人数を m_i とすると，

$$T_{min}\geqq\max_{j=1\cdots n}\left(\frac{\sum_{i=1}^{n} w_i}{N},\ \frac{w_j}{m_j}\right)$$

しかしながら次の定理が成立する。

(1) $\sum_{i=1}^{n} w_i/N\geqq\max_{i=1\cdots n}\frac{w_i}{m_i}$ のとき

$$T\,\mathrm{min}=\frac{\sum_{i=1}^{n} w_i}{N}$$

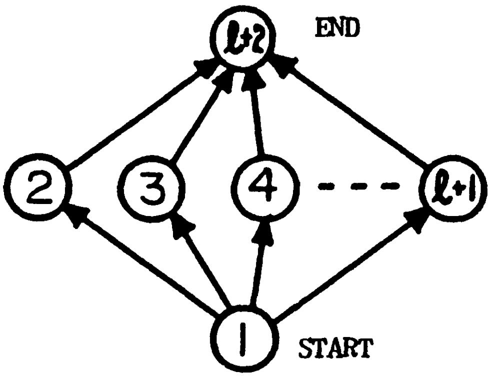
(2) $\sum_{i=1}^{n} w_i/N<\max_{i=1\cdots n}\dfrac{w_i}{m_i}$ のとき

$$T\,\mathrm{min}=\max_{i=1\cdots n}\frac{w_i}{m_i}$$

(1)の場合，ある時点での人数配分をベクトル $\mathbf{m}_i^t=(a_1,\cdots,a_n)$，$\{a_i=0_{or}\,m_{i\ or}\,N-\sum m_j(>0\ \mathrm{and}\ <m_i)\}$ で表わせば以下の連立方程式の解 t_i ($i=1\sim n$) を非負にする人数配分ベクトル $\mathbf{m}_i$ を構成することができ，同時に最短時間で作業を完了させる方法がわかったことになる。

$$t_1\mathbf{m}_1+\cdots t_i\mathbf{m}_i+\cdots+t_n\mathbf{m}_n=\mathbf{w}$$

ただし，$\mathbf{w}^t=(w_1,\ \cdots,\ w_n)$



図－3　並行作業要素より成る作業

2.4.2 一般的な作業における解

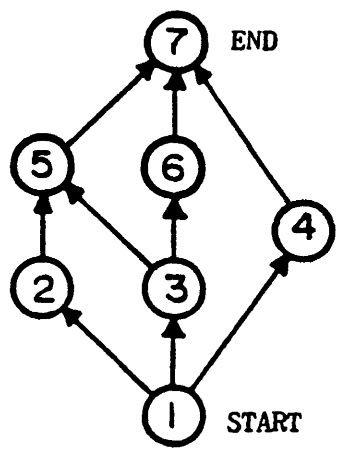
要素間には一般に前後関係が存在し，すべての要素は同時には行い得ない。このような一般的な作業の最短時間完了法は，同時に行い得る要素の最適な組み合わせとそれらの組み合わせに共通する要素の最適な要素量配分をもたらすものである。この場合の解法は参考文献を参照されたい。ここでは，基礎概念として重要な2つの概念の説明を行う。

(1) 極大集合

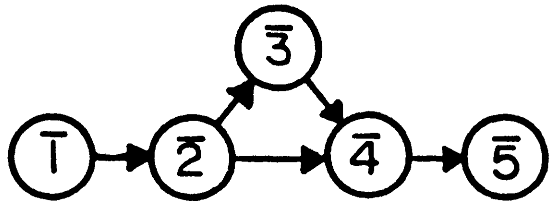
同時に行える作業要素よりなる集合で，あと1つの要素を加えるとそれらすべては同時には行えなくなるものをいう。図－4の例では｛2，3，4｝，｛4，5，6｝は極大集合であるが，｛2，3｝，｛5，6｝はそうではない。他に｛1｝，｛2，4，6｝，｛7｝が極大集合である。(定義から明らかなように，初めと終わりを表わすダミー要素はそれだけで極大集合を構成する。)

(2) ライン

極大集合の前後関係を有向線分で表わし，各極大集合を点で表わした図（ライングラフという。図－5参照）をつくり，それをもとに｛START｝から｛END｝までたどる際にできる極大集合の列をラインという。図－3の例ではラインは2つあり，それぞれ，($\bar{1}\cdot\bar{2}\cdot\bar{3}\cdot\bar{4}\cdot\bar{5}$)，($\bar{1}\cdot\bar{2}\cdot\bar{4}\cdot\bar{5}$) である。ただし，$\bar{1}$ ｛START｝，$\bar{2}$ ｛2，3，4｝，$\bar{3}$ ｛2，4，6｝，$\bar{4}$ ｛4，5，6｝，$\bar{5}$ ｛END｝である。



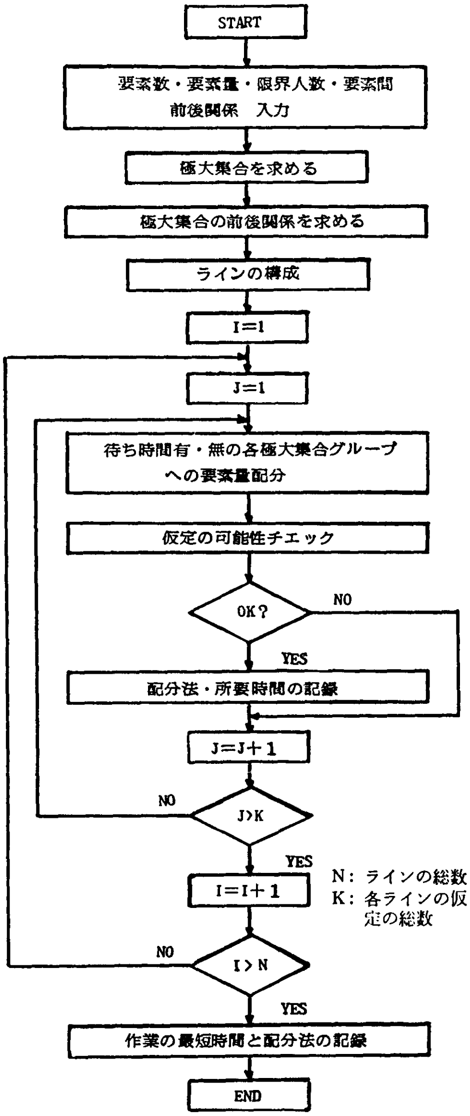
図－4　一般的な作業例



図－5　ライングラフ例

2.5 計算の手順

計算の手順は図－6のフローチャートに示す通りである。



図－6　フローチャート

2.6 計算機種および制限事項

このプログラムは計算センターのM-180Ⅱ ADで作成したものである。言語はFORTRAN-77であり，必要なサブルーチンはすべて1つのメンバー中に組み込んでおり，また外部関数を使用することはないので，このプログラムはどの機種のものへでも移行可能と思われる。

使用メモリー数は約650ＫＢ，計算時間は図－1の例題で約9分である。

3．プログラムの応用

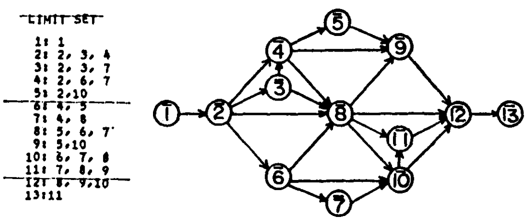
図－1の例題を解いた結果を以下に示す。表－1はこの例題の要素の限界人数，要素量を示し，図－7はそれらの要素より構成された，極大集合とライングラフである。図－8は最短の方法である。図－9は直観によってすぐに出てくる配分方法であるが，特に要素5の各極大集合への要素量配分に注目すると，最短のものは，たいへん巧妙な方法であることがわかる。

なお，この手法を救命艇降下作業へ応用した例が参考文献に出ているので参照されたい。

No.	要素量 (w_i)	限界人数 (m_i)	w_i/m_i
2	5.0	2	2.5
3	7.0	3	2.33
4	2.0	3	0.68
5	8.0	2	4.0
6	2.0	4	0.5
7	5.0	2	2.5
8	5.0	3	1.67
9	5.0	4	1.25
10	3.0	3	1.0

作数人数　N＝5

表－1　例題作業要素パラメータ



図－7　例題極大集合，ライングラフ

```
      LINE:  1-  2-  6-  8-  9- 12- 13
W.LIMSET:  8
N.LIMSET:  2,  6,  9, 12
TOTAL TIME=   8.50000
      ETIME:<  2>=  2.500,<  6>=  0.500,<  8>=  2.500,
            <  9>=  1.000,< 12>=  2.000
ALLOCATED VOLUME
EL/LM    2          6          8          9          12
    2   5.0000     0.0        0.0        0.0        0.0
    3   7.0000     0.0        0.0        0.0        0.0
    4   0.5000     1.5000     0.0        0.0        0.0
    5   0.0        1.0000     5.0000     2.0000     0.0
    6   0.0        0.0        2.0000     0.0        0.0
    7   0.0        0.0        5.0000     0.0        0.0
    8   0.0        0.0        0.0        0.0        5.0000
    9   0.0        0.0        0.0        0.0        5.0000
   10   0.0        0.0        0.0        3.0000     0.0
```

図－8　最短解要素量配分

```
    LINE:  1-  2-  8- 12- 13
W.LIMSET:  8
N.LIMSET:  2, 12
TOTAL TIME=   9.40000
    ETIME:<  2>=  2.800,<  8>=  4.000,< 12>=  2.600
ALLOCATED VOLUME
EL/LM      2           8          12
    2   5.0000      0.0        0.0
    3   7.0000      0.0        0.0
    4   2.0000      0.0        0.0
    5   0.0         8.0000     0.0
    6   0.0         2.0000     0.0
    7   0.0         5.0000     0.0
    8   0.0         0.0        5.0000
    9   0.0         0.0        5.0000
   10   0.0         0.0        3.0000
```

図－9　要素量配分の一方法

4．あ　と　が　き

このプログラムにより，多数の作業要素が組み合わさって構成される作業を，個々の要素はその限界人数を越えない限り携わる人数が増加すればそれに反比例して所要時間が短くなるとの仮定のもとに，最短時間で完了する作業計画を作成することができる。この仮定は多くの作業において妥当と思われるので，このプログラムは広範な作業に応用可能と思われる。

参　考　文　献

1）金湖富士夫，待ち時間最短化による作業計画の一手法―理論の展開と救命艇降下作業への適用―，船研報告，第20巻第6号（1983. 11）

26. タービン内再熱水素燃焼ガスタービンのサイクル計算プログラム

機関開発部　平　岡　克　英

1．プログラムの目的および概要

水素を燃料とし、タービン内で再熱することが可能となれば、構造を比較的簡単にして再熱ガスタービンの熱効率・比出力の向上が望める。このガスタービンの熱力学的性能を計算するプログラムである。通常のガスタービンの機器要素である圧縮機、燃焼器、タービンの他に、多段タービン内再熱、再生器、排熱回収蒸気発生器，圧縮機出口における蒸気注入を考慮したサイクルの熱効率・比出力を計算する（図－1）。さらにタービン翼・タービンケーシングの冷却に蒸気を使用した時の熱力学的性能も計算する。計算において，空気は，理想ガス N_2，O_2 の混合ガスとし，燃焼ガスはさらに，未燃水素 H_2，燃焼生成物の水蒸気 H_2O，冷却に使用した蒸気の混合ガスとしている。

2．プログラムの内容

2.1　プログラムの名称

タービン内再燃水素燃焼ガスタービンのサイクル計算プログラム

2.2　製作者

機関開発部　平岡克英

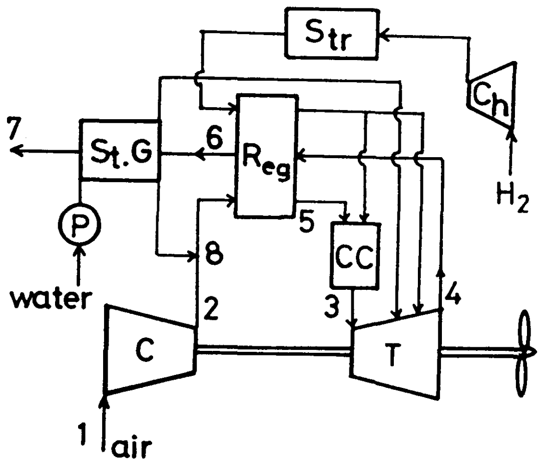


図1－1　サイクルの概要

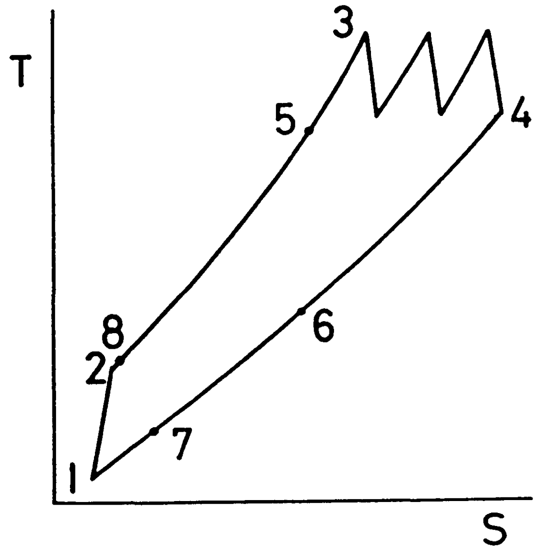


図1—2　サイクルのTS線図

2.3　製作年月

昭和59年3月

2.4　計算の概要

計算に使用する主なパラメーターは、タービン入口温度，圧力比，再熱回数，圧縮機効率，タービン効率，再生器温度効率，燃焼効率，燃焼器・再生器・蒸気発生器の圧力損失，過熱蒸気温度，ピンチポイント温度差等である。全てのパラメータに標準の値を設定している。計算に必要な入力は，変化させるパラメータの名前，その数値と個数である。パラメータの標準値を変更する場合は，変更するパラメータの番号と数値を入力する。出力は，熱効率，比出力の他，各状態における温度，圧力，ガス成分割合等を出力する。

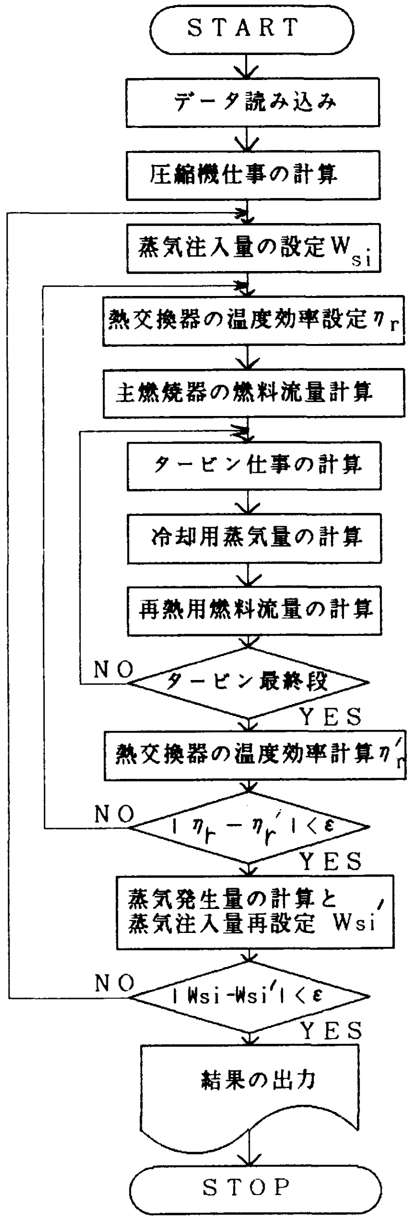
再生器の温度効率は，出口側の温度効率を計算に使用している。翼やケーシングの冷却に使用する蒸気の量は，翼を一種の熱交換器と見なし，温度効率を与えて計算する。蒸気とガスの混合による圧力損失は考慮していない。

2.5　計算の手順

図－2に概略を示す。

2.6　計算機種および制限事項

FACOM M-180ⅡADを使用した。使用メモリーは，約19ＫＢである。ただし，蒸気表サブルーチンを使用するので，約30ＫＢ程度になる。



図－2　計算フローチャート

3. あ　と　が　き

このプログラムでは，燃料として水素を考えたが今後は灯油，重油を燃料とするガスタービンのサイクル計算ができるように改良していく予定である。