

水車の設計面における電子計算機の応用

Application of Digital Computers for the Design of the Water Turbines

横井 信安*
Nobuyasu Yokoi

山口 幸男*
Yukio Yamaguchi

楠本 韶**
Syô Kusumoto

要 旨

水車およびポンプ水車の設計における電子計算機の応用について概要を述べる。計算をテーマごとに、性能計算、見積などのサーベイ計算、強度計算、自動製図に分け、それぞれ具体例をあげて説明した。

1. 緒 言

近年の水力発電機器は、ポンプ水車を中心に大容量化、高落差化の傾向にあり、高度の技術を要するに至っている。また水力開発の経済性を高めるため機器の性能向上が必要である。このため技術開発の速度を高めて、性能、信頼性を向上するとともに、設計の能率を高めて設計期間を短縮することが重要である。このような問題を解決する有力な手段として、電子計算機の利用がある。電子計算機は水車の設計の各方面に広く使われ、多くの効果をあげているが適用分野別に類別すれば次のようになる。

- (1) 性能計算 性能の向上
- (2) 見積りなどのサーベイ計算 設計能率の向上
- (3) 強度計算 信頼性の向上、コスト低減
- (4) 自動製図 設計能率の向上

以下、上記項目につき現状と計画の概要につき述べることとする。

2. 性能計算

性能計算の例として、水車およびポンプの性能計算と過渡現象計算について述べる。

2.1 水車およびポンプの性能計算

模型水車およびポンプ水車の実験データは、すべて磁気ディスク装置に記憶させてあり、必要に応じて計算に利用される。実験データは次の6種に類別されている。

(1) 水車性能

単位落差あたり回転速度 N_1 をベースに、案内羽根開度ごとに単位落差あたり流量 Q_1 、効率 η をとる。

(2) ポンプ性能

Q_1 をベースに案内羽根開度ごとに（回転速度 1,000 rpm 換算の）揚程 H' 、 η をとる。

(3) 水車のキャビテーション性能

Q_1 をベースに N_1 ごとに σ_T をとる。

(4) ポンプのキャビテーション性能

Q_1 をベースに σ_P をとる。

(5) ポンプ水車の完全特性

Q_1 をベースに、案内羽根開度ごとに Q_1 、単位落差あたりトルク T_1 をとる。

(6) 水車の無拘束速度

案内羽根開度をベースに単位落差あたり無拘束速度 N_{1R} をとる。

模型性能には模型水車あるいはポンプ水車の番号、ケーシング、スティリング、案内羽根、ランナ、ドラフトチューブの主要諸元、

* 日立製作所日立工場

** 日立製作所日立研究所

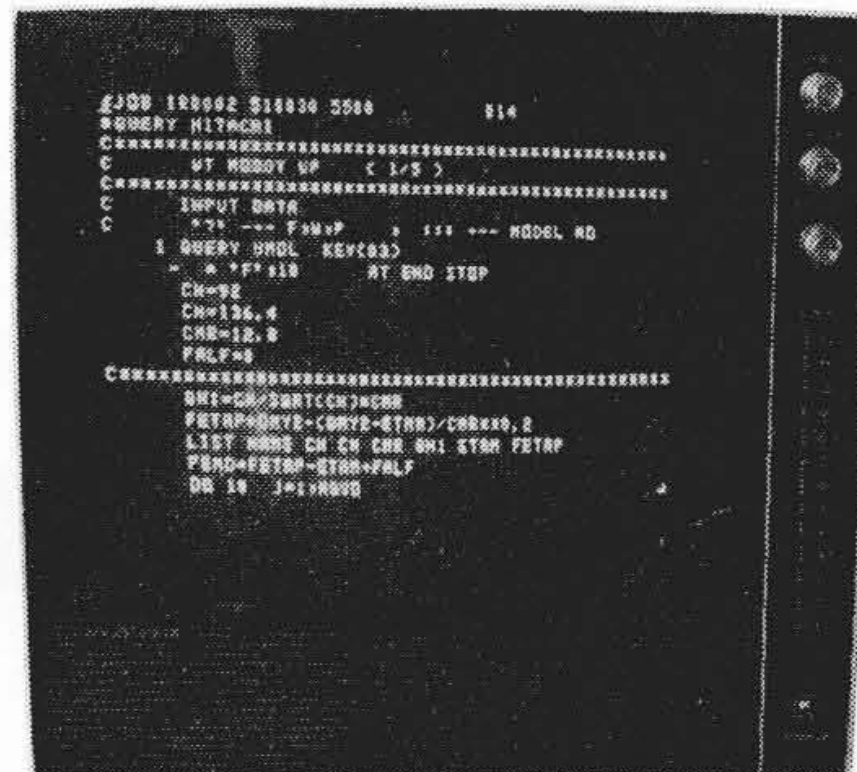


図1 モデル水車性能を実機換算する
オンラインタスクの例

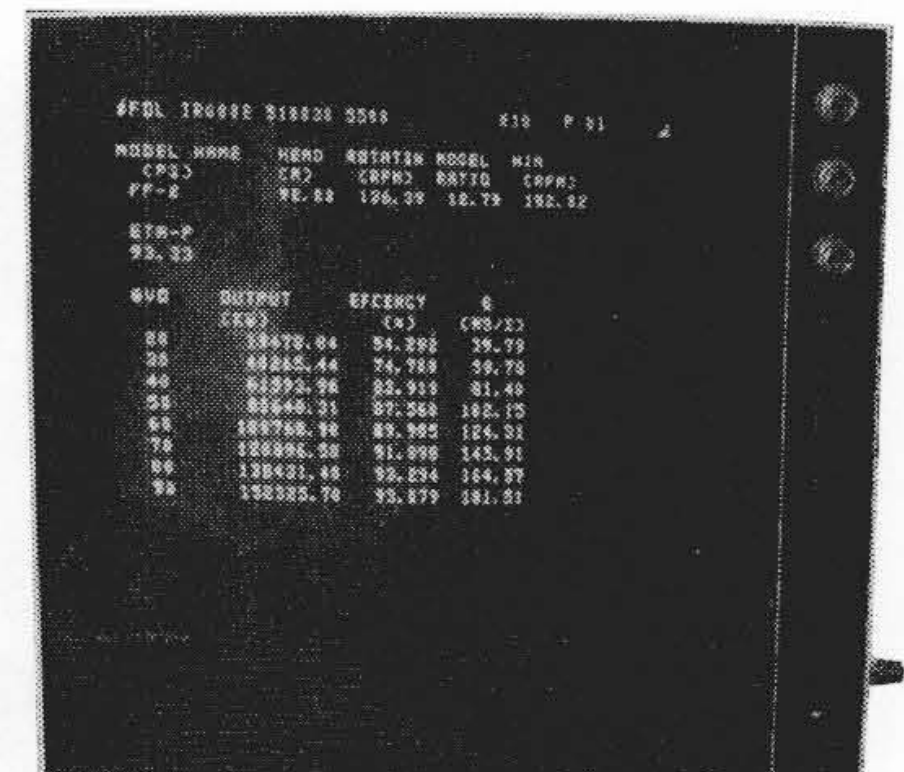


図2 モデル水車性能を実機換算した
オンライン計算結果の例

設計点に関するデータも同時に記憶されており、次のような用途に利用される。

- (1) ランナの新規設計における参考用
- (2) 見積時における水車性能、ポンプ性能の実機換算
- (3) 水圧上昇、回転数上昇に関する過渡現象計算
- (4) 軸系の危険速度の計算

磁気ディスク装置に記憶されたデータを利用する場合、次に述べるような2種類の利用方法がある。

- (1) オンライン・ディスプレイによる利用
- (2) オフライン・プログラムによる利用

第一の方法は、設計室におかれたキャラクタディスプレイ装置によって、ディスク上のデータを読みだして必要な計算を遂行するものである。これには、日立製作所で開発された、オンライン情報検索システムが使われる。この場合ディスプレイ装置を使用して、プログラミングしてもよいし、あらかじめプログラミングしたものをタスクとして登録しておき、タスクを呼び出して計算させることもできる。いずれの場合でも、模型と実機間の性能換算あるいは寸法変換などの比較的簡単な計算に限られるが、オンラインで迅速に結果が得られるので設計効率の向上の面からみて非常に有効である。図1はタスクとして登録されたプログラムの一例を示したもので、模型の効率、流量、出力を実機に換算するものである。図2はディスプレイ装置上に表示された計算結果の一例である。

第二の方法は、複雑な計算に用いられる一般的な方法であって、後に述べるように水車およびポンプの過渡現象計算や見積計算などに使用されている。

上記のように模型試験結果は、水車およびポンプ水車に関する最も基本的なデータであり、これを各種の計算のためのデータバンクとして利用している点に特徴がある。

2.2 過渡現象計算

水車運転時の負荷しゃ断およびポンプ運転時の電源喪失あるいはこれに伴う案内羽根の急閉鎖などの場合の水圧、回転数変化を計算するには特性曲線法が使われる。すなわち水圧変動に関する特性曲

線の基礎式は以下に示す2組の方程式によって構成される。

$$\left. \begin{aligned} dt - \frac{dx}{v+a} &= 0 \\ dv + \frac{g}{a} dh + \frac{f}{2D} v |v| dt &= 0 \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} dt - \frac{dx}{v-a} &= 0 \\ dv - \frac{g}{a} dh + \frac{f}{2D} v |v| dt &= 0 \end{aligned} \right\}$$

ここに、 dt : 時間 刻 み

dx : 管路に沿う長さの刻み

v : 管路に沿う長さの刻み点における速度

h : 管路に沿う長さの刻み点における水頭

g : 動力の加速度

a : 圧力波の伝播(でんぱ)速度

f : 管路の単位長さあたりの損失係数

D : 管 径

この式では管路の損失が自然な形で取り入られている。特性曲線法では t と x は独立ではなく、二つの互いに交わる特性曲線を与えるものでなくてはならない。この交点における v, h の値は、 t の1ステップ前における、 v, h の値がわかっているならば、上記の2組の方程式より連立させて求めることができる。管路の両端を除いて、内点については上式のみで決定できる。両端の点においてはいずれか一つの特性曲線しか存在しないので、別の条件すなわち境界条件が必要になる。境界条件としてはいろいろ考えられるが次のようなパターンに分けて考えることができる。

- (1) 流量が管の接続部で等しいとおけるとき
- (2) 水頭が管の接続部で等しいとおけるとき
- (3) 流量も水頭も管の接続部で等しくないとき

管の接続部で面積変化をするときとか、水車またはポンプが管路中にあるときは、(1)のパターンであり、取水口、放水口、分岐管などは(2)のパターンに属し、管路中で水柱分離が発生するときは(3)のパターンとみなすことができる。

特性曲線法の便利な点は、サブルーチン化しやすいことにある。水圧変動の計算はどの方法によってもむずかしいものではないが、計画される管路系のトポロジーがまちまちで厳密にはそのつどプログラムを作成しなくてはならない。そこで汎用的なプログラムの必要が生ずるわけであるが、特性曲線法では、管自体のサブプログラムと、いろいろな境界条件に応じたサブプログラムを幾つか準備しておき、管路系のトポロジーに応じてこれらのサブプログラムを連結してやればよい。したがって汎用的なプログラムの作成が容易になる。

このほか性能計算に関連するものとしては、水車あるいはポンプ運転中の水圧そのほかの振動の実測データのスペクトル分析、相関関係の把握(はあく)、調速機を中心とする制御系の解析が行なわれている。

またランナ内および案内羽根回りの流れ解析への電子計算機の利用の検討も進めており、模型試験を主体とする研究とあいまって、水車あるいはポンプ水車の性能改善面への効果が期待されている。

3. 見 積 計 算

見積計算は一般の設計計算と異なり、顧客指定の仕様がさまざまであること、計算の対象が多いこと、迅速に計算を行なわなければならないことなどの特徴がある。それゆえ、精密な解析を行なうというより、水車の性能、諸元に関するサーベイ計算を行なう必要があり、しかも与えられた仕様を満足する範囲で最適な見積をすることが要求される。このために、見積計算システムでは、顧客指定の入

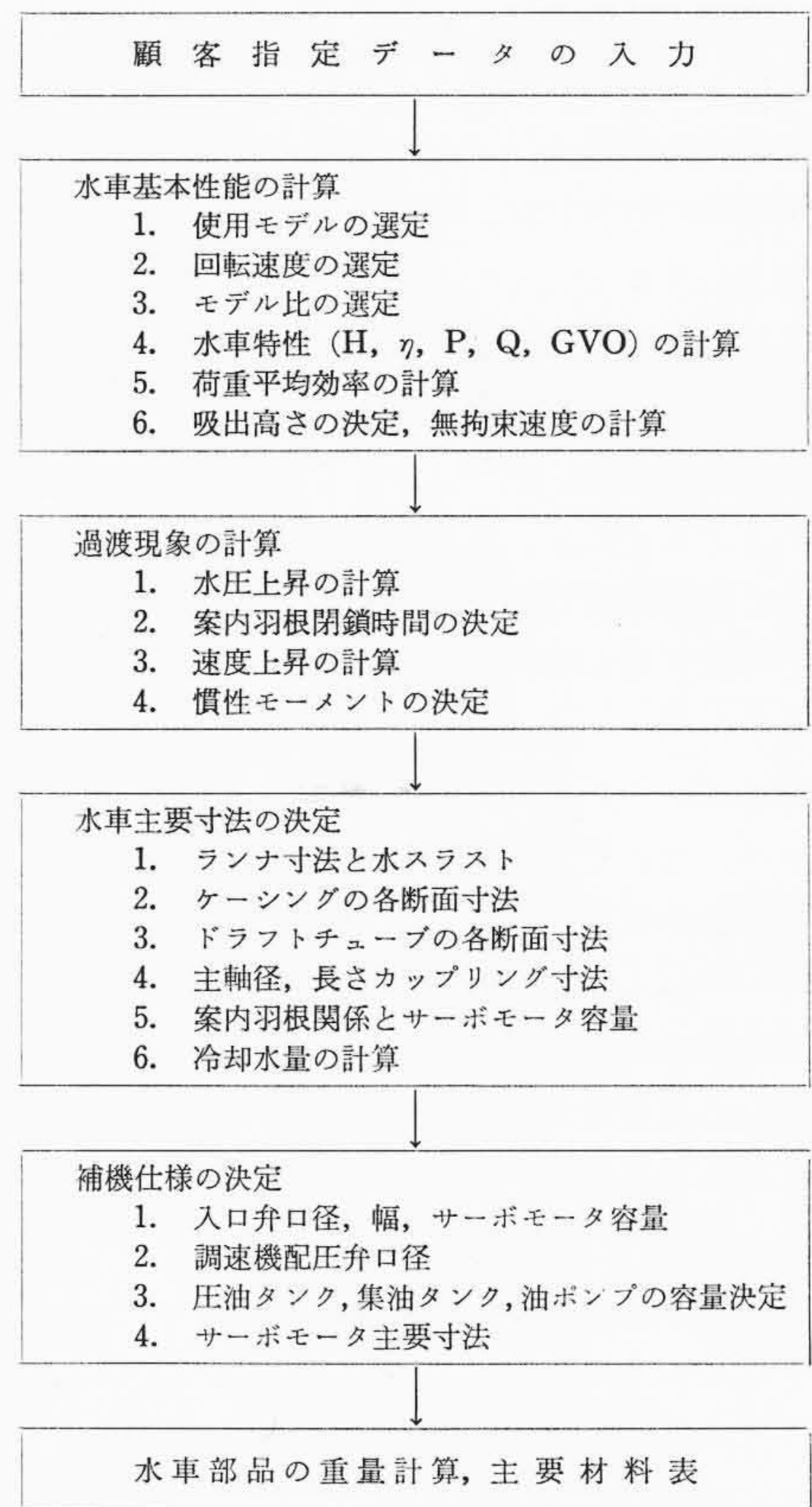


図3 フランシス水車見積のゼネラルフローチャート

力より必要な見積データがすべて求まるようになっている。図3はフランシス水車の見積計算システムのゼネラルフローチャートである。システムは5個のサブシステムより構成されている。これらのサブシステムはメインプログラムにより一貫して計算することもできるし、また個々のサブシステム単独に計算することも可能である。

第一のサブシステムでは入力データを読んで、模型試験データ(データバンクになっている)を参照しながら基本的な水車性能を計算する。ここではまず N_s 、出力そのほかをもとに、どの模型水車が適当であるかを選定することから始まる。模型水車には数種類を選定し、以下の計算は選定された模型水車全部について行なわれ、最終的にどの模型水車を使用するかは見積担当者が決定する。次に選ばれた模型水車について幾つかの回転速度を採用し、また必要な性能を確保するための模型尺度比を幾つか選定して以下の計算をする。このように選定された模型水車、回転速度、模型尺度比などの組合せにより十数種の見積計算が行なわれるわけであり、最終見積案は見積担当者が判断して採用を決定する。このように数多くの計算を短期間に行なうことは手計算ではむずかしく電子計算機を使用する必要がある。

2.に述べたように、模型水車効率に関するデータバンクは N_1 ベースになっており、使用する模型水車、回転速度、模型尺度比が定まれば、データを検索することが可能となり、模型性能を実機に換算するのは容易である。換算式はムーディの諸公式、アカレット公式など、仕様書の指定によって選択される。荷重平均効率が指定されると、最高の荷重平均効率を与えるように模型水車、回転速度が決定される。水車効率のほかに性能の評価基準として吸出高さがある。発電所の建設条件より吸出高さをじゅうぶんとれない場合があり、キャビテーション性能の面からも水車性能の判別が行なわれる。

第二のサブシステムでは、顧客指定の水圧および速度上昇値を満足するように、案内羽根の閉鎖時間および閉鎖方法が定まる。手順は原則的に、まず水圧上昇値を許容値内に収めるように案内羽根閉

鎖時間および閉鎖方法を定め、次にこの条件と、速度上昇値の許容値とより発電機に要求される慣性モーメントを定める。水圧変動の計算には、速度変動の影響も含まれるから、この計算は相互に関連して行なわれる。水圧上昇の計算は2.に述べた弾性理論あるいは剛性理論で行なわれる。

第三のサブシステムでは、水車各部の主要寸法と、付随的な性能計算を行なう。ランナの諸元をもとに、案内羽根、スティリング、ケーシングと逐次主要寸法を計算していくが、この場合、上カバー、下カバーなど寸法的に関連する部品からの制約条件もチェックしながら、最小寸法となるように決定する。ケーシングの渦部寸法は、面積カーブを使って自動的に計算される。主軸の長さは、発電機軸とのカップリングレベルより算出される。このようにして、水車の主要寸法が決定されたのち、ランナに作用する水スラストが計算される。後に述べる回転部重量をこれに加えれば、スラスト軸受の設計に必要な推力スラストになる。また案内羽根に作用する水圧トルクと案内羽根操作関係とよりサーボモータの容量を定める。サーボモータ容量の決定にはモデルの操作力の実測結果が参照される。

第四のステップでは、入口弁、調速機、圧油装置、サーボモータなどの主要寸法および圧油装置の容量計算が行なわれる。たとえば圧油装置の場合、顧客指定の入口弁およびサーボモータの動作回数より、必要な圧油タンクの容量を定め、ポンプの容量、集油タンクの容量を計算する。この場合、発電所建屋の制限も考慮して、各タンクの寸法が決定される。

第五のステップでは、以上のステップで計算された主要寸法、形状をもとに主要部品ごとの重量を計算する。また、これから材質別の重量表が得られる。

以上の見積システムは、オフラインで計算されるが、水車の性能計算では、別にオンラインで細部を検討したい場合があり、2.で述べたキャラクタディスプレイを利用することもある。

水車の予想性能などの作図には、プロッタを使用している。図4は見積システムで計算された水車性能曲線をプロッタで描いたものであり、図5はポンプの性能曲線をプロッタで描いたものである。

見積システムは、顧客の購入仕様書よりの確な入力データを作成し、見積方針を所定の様式に従って入力すれば、人手を介さずに必要なデータは計算から得られるようになっている。しかし練達した設計者の経験、技術のすべてをプログラム中に織り込むことは不可能であるし、顧客に指定されるすべての方式を予想してプログラムを作成することも困難である。結局、見積システムで得られるものは、見積担当者のための参考データであり、見積担当者には結果を評価し、適当な修正を行なうという重要な仕事が残される。しかし見積システムの採用は、見積担当者が比較的簡単な計算の繰返しといった仕事から解放され、より創造的な仕事に時間を振り向けることが可能となること、手計算に伴う見積計算の誤りの排除、見積の迅速化など大きな効果が期待される。

4. 強度計算

近年の水車は大形化しつつあり、設計、製作の面で開発しなけれ

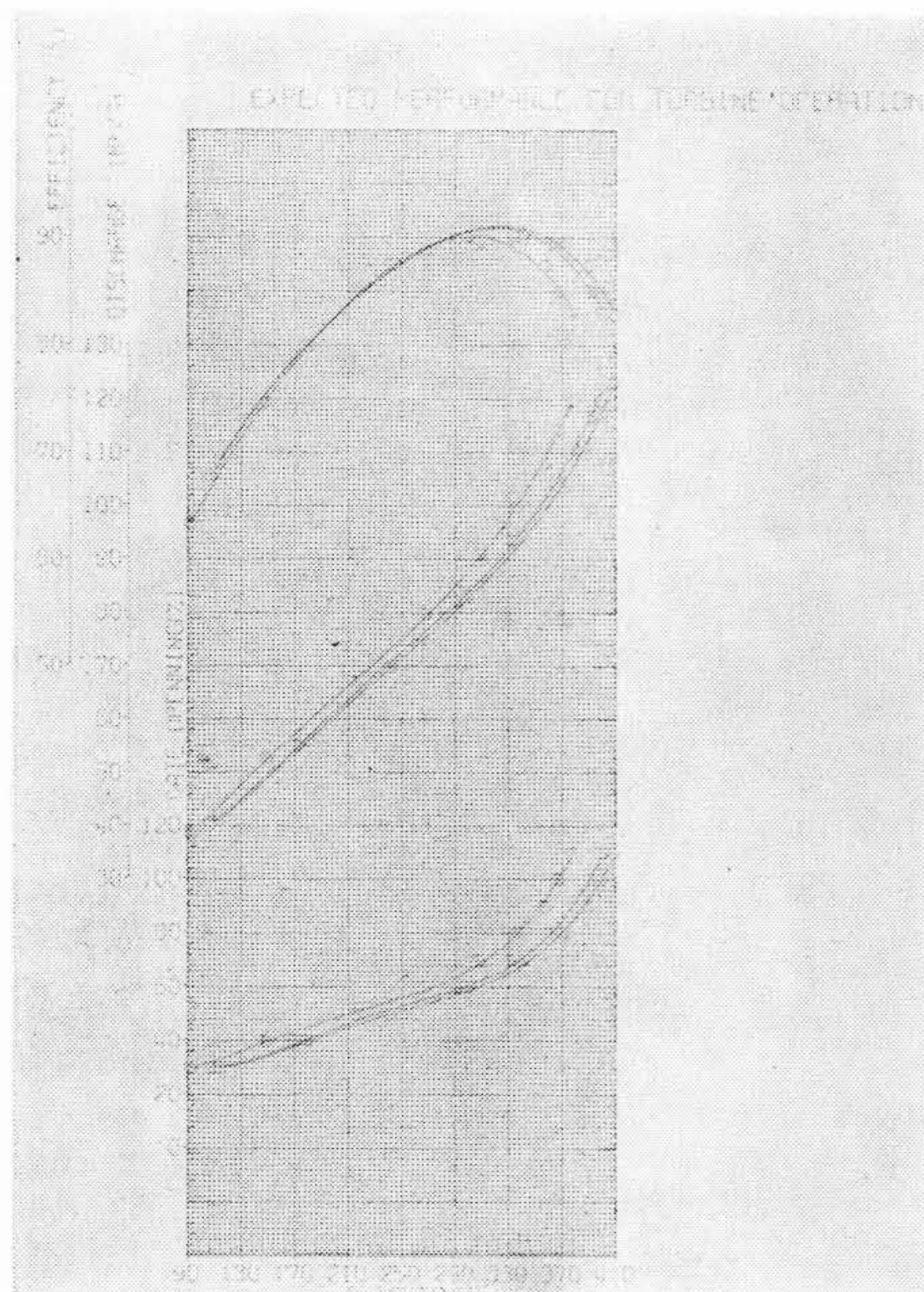


図4 プロッタでグラフ化した水車性能曲線の例

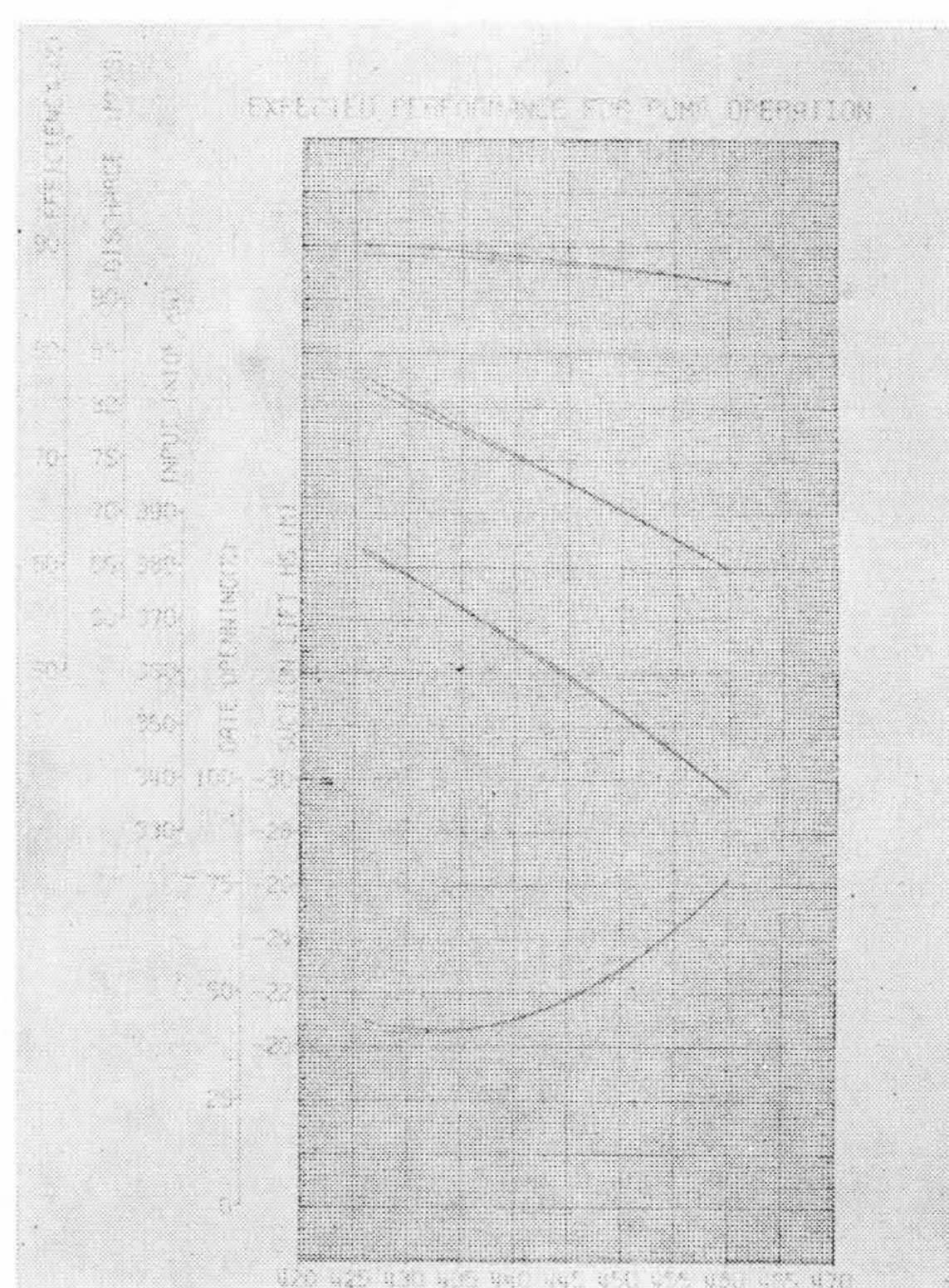


図5 プロッタでグラフ化したポンプ性能曲線の例

ばならない技術が多い。なかでも強度計算は、製品の信頼性の向上コストの低減の面で非常に大きな役割を果たしている。しかし水車の部品は一般に複雑な構造をしており、詳細な強度計算を困難なものにしている。そして年ごとに新しいより精度の高い解析法が開発され、実験値と比較され、実用化されていくのが現状である。

以下、代表的な水車の大形部品について現行行なわれている応力解析の方法について概略を述べる。

4.1 ランナの応力解析

ランナはクラウン、シュラウドリング(以下シュラウドという)とベーンとより構成される。クラウン、シュラウドに対しては軸対称構造として有限要素法による解析を行なっている。クラウンとシュラウドにはベーンが接続されるので荷重は非軸対称として取り扱われている。このため外力および変位はフーリエ級数で表わされるとする。要素としては三角形断面のリングを考える。ここではベーンの計算とクラウンおよびシュラウドリングとの接続について簡単に述べる。

N_s が大きく羽根の短いランナのベーンは、近似的には三次元的な曲り梁(はり)として計算し、実験結果と比較的よく合致する。この場合、シュラウドもベーンと接続された一体の曲り梁とみなす。その基礎方程式は

$$\left. \begin{aligned} \frac{du}{ds} &= \beta - K_y w + K_z v \\ \frac{dv}{ds} &= -\alpha - K_z u + K_x w \\ \frac{dw}{ds} &= -K_x v + K_y u \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\alpha}{ds} &= \frac{M_x}{D_x} - K_y \gamma + K_z \beta \\ \frac{d\beta}{ds} &= \frac{M_y}{D_y} - K_z \alpha + K_x \gamma \\ \frac{d\gamma}{ds} &= \frac{M_z}{D_z} - K_x \beta + K_y \alpha \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{dQ_x}{ds} &= -K_y Q_z + K_z Q_y - F_x \\ \frac{dQ_y}{ds} &= -K_z Q_x + K_x Q_z - F_y \\ \frac{dQ_z}{ds} &= -K_x Q_y + K_y Q_x - F_z \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{dM_x}{ds} &= -K_y M_x + K_z M_y + Q_y - R_x \\ \frac{dM_y}{ds} &= -K_z M_x + K_x M_z - Q_x - R_y \\ \frac{dM_z}{ds} &= -K_x M_y + K_y M_x - R_z \end{aligned} \right\}$$

ここに、 s : 空間梁の軸(図心を通る)に沿って任意の点から測った距離

u, v, w : 主軸座標(x, y, z)に関する変位成分

α, β, γ : 主軸座標に関する回転角成分

Q_x, Q_y, Q_z : 主軸座標に関する内力成分

M_x, M_y, M_z : 主軸座標に関する内モーメント成分

F_x, F_y, F_z : 主軸座標に関する単位長さあたりの外力成分

R_x, R_y, R_z : 主軸座標に関する単位長さあたりの外モーメント成分

D_x, D_y, D_z : D_x, D_y は曲げ剛性, D_z はねじり剛性

$$K_x = \frac{\sin \varphi}{\rho}, \quad K_y = \frac{\cos \varphi}{\rho}, \quad K_z = \frac{1}{\tau} + \frac{d\varphi}{ds}$$

φ : 幾何座標と主軸座標のなす角度

$1/\rho$: 曲率

$1/\tau$: ねじり率

ここに幾何座標は梁の軸において、 x, y, z 軸が主法線方向, 陪(ばい)法線方向, 接線方向を向く直角座標であり, 主軸方向は、 x, y 軸が梁の断面の慣性主軸, z 軸は接線方向を向く直角座標である。第1, 第2の方程式群は棒の変形の適合条件から得られる CLEBCH の式であり, 第3, 第4の方程式群は, 力とモーメントに関するつりあい方程式である。

数値計算は, 上記12個の未知数についての線形結合, すなわち遷移行列法で解かれる。12個の方程式の解は

$$\{Y_{(s)}\} = [A_{(s)}]\{Y_{(0)}\} + \{Y_{(s)}^*\}$$

$$\{Y_{(s)}\} = [u, v, w, \alpha, \beta, \gamma, Q_x, Q_y, Q_z, M_x, M_y, M_z]^T$$

と表わされることが知られている。 $\{Y_{(s)}\}$ は状態量ベクトルで上式は同次方程式の一般解と, 非同次方程式の特解 $\{Y_{(s)}^*\}$ の和で解が表わされることを示している。行列 $[A_{(s)}]$ の成分は次のようにして決定される。第1列の成分は, $\{Y_{(s)}\}$ の初期値を

$$\{Y_{(0)}\} = [1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]^T$$

とおき, 外力 F, R をゼロとして12個の方程式を Runge-Kutta-Gill の方法で数値積分する。このときの解が, 第1列の成分を与えることは重畳原理より明らかである。同様にほかの列の成分も決定される。ベクトル $\{Y_{(s)}^*\}$ の成分はすべての初期値をゼロとして, 外力を与えて12個の方程式を数値積分して得られる。このようにして一般解は12個の初期値 $\{Y_{(0)}\}$ を未知数とする線形方程式として表わされる。積分はベーンの始端より終端まで, シュラウドについては二つのベーンにはさまれた長さについて行なえばよい。ベーンとシュラウドの接続部では, 内力の平衡条件と変位が等しい条件, クラウンとベーンとの接続部ではクラウンを剛体とし, ベーンはこれに固定されているという条件によって未知数の初期値を決定することができる。

このようにして求めたベーンとシュラウドの接合部の剛性は, シュラウドの応力を有限要素法で詳しく計算するために利用される。

クラウンとベーンの接続は, ベーンの軸線がクラウンと交わる点の変位を連続させ, ベーンの角変化に対応する成分を接合部の数点における相対変位におきかえることによってなされる。

比速度 N_s の低い, 羽根の長いポンプ水車のランナに梁の理論を適用することには限界がある。したがってベーンを殻(かく)として有限要素法で解析することが必要である。この場合変位法が一般に使われているが, 曲げに関して幾つかの困難な点を含んでいる。そ

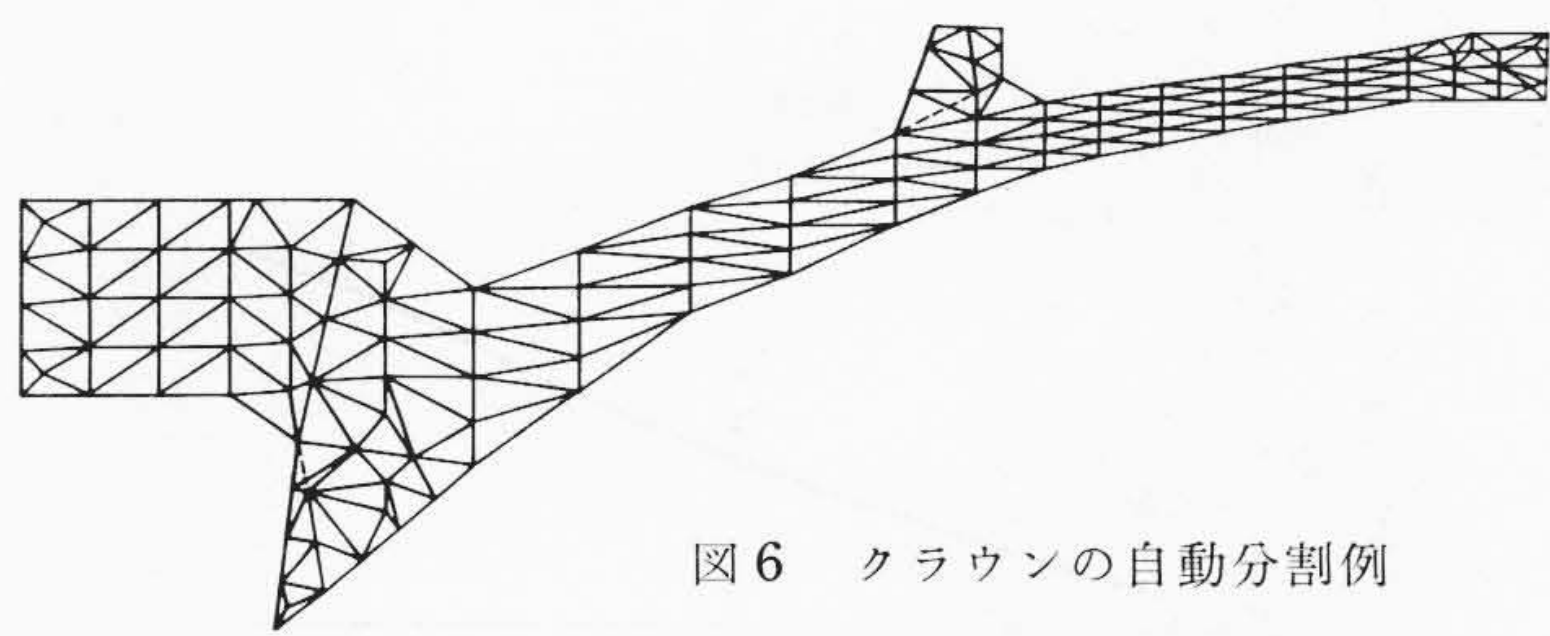


図6 クラウンの自動分割例

こでその問題を解決するために, HERRMANN が混合法による計算式を導いた。これは, HELLINGER-REISSNER の原理を表わす汎関数 Π_R についての変分方程式

$$\delta \Pi_R = 0$$

を計算するときに, たとえば平板の三角形要素については, たわみを x, y の一次関数

$$w = c_1 + c_2 x + c_3 y$$

とおき, 要素内のモーメントは一定であるとして

$$M_x = c_4, \quad M_y = c_5, \quad M_{xy} = c_6$$

とおき, これらを $\delta \Pi_R = 0$ に代入して剛性方程式を導くのである。この結果, 剛性方程式は変位とモーメントに関するものとなり, 行列の階数が低下すること, 内部モーメントの連続性が保たれるなどの大きな効果がある。

ランナのように複雑な形状をしているものを有限要素法で解析する場合, 入力データの作成に多大の労力を要する。このため, クラウン, ベーン, シュラウドについて簡単な入力で, 解析に必要なデータを作り出す自動分割プログラムを利用している。図6はクラウンの自動分割プログラムによる分割例である。

4.2 上カバー

上カバーは平板構造が主で, 有限要素法によって計算されるが, ここでは, ひずみエネルギーによる解析法を紹介する。一般に上カバーは上板, 下板および放射状のリブによって構成されるが, 各部材の膜力, 曲げ, せん断および圧力によるひずみエネルギーおよび外力のポテンシャルエネルギーをそれぞれ U_M, U_B, U_S, V とすれば全体のポテンシャルエネルギー Π は次式で表わされる。

$$\Pi = 2U_M + 2U_B + U_S + V$$

しかるにつりあい条件においては, 最小ポテンシャルエネルギーの原理によれば, Π の変分がゼロになることが必要である。

$$\delta \Pi = 2\delta U_M + 2\delta U_B + \delta U_S + \delta V = 0$$

この式より二つの Euler の方程式

$$u'' + \frac{u'}{r} - \frac{u}{r^2} - \frac{K}{r} \left(\frac{2u}{h} + \beta \right) = 0$$

$$\beta'' + \frac{\beta'}{r} - \frac{\beta}{r^2} - \frac{L}{r} \left(\frac{2u}{h} + \beta \right) = \frac{Q}{2D}$$

ここに, u : 部材の半径 r 方向の変位

$\beta = -w'$: 部材の垂直方向変位 w の r に関する微係数

$$(Qr)' = -qr$$

Q : 作用する圧力

K, L, D : 部材の材質, 形状, 寸法, 縦弾性係数, 横弾性係数によって定まる常数

h : リブの高さ

が得られる。これに種々の境界条件を与えて数値計算をするのである。数値計算は SEPETOSKI の方法によって行なわれた。

図7は試験用に作成した上カバーモデルのリブのせん断応力の計算値と実測値を比較したもので良い一致がみられる。この計算によってリブの効果的な設計と構造の改善が行なえるようになった。

4.3 ケーシング・スティリング

ケーシングの胴板部分は, 軸対称殻として Reissner の方法で基礎

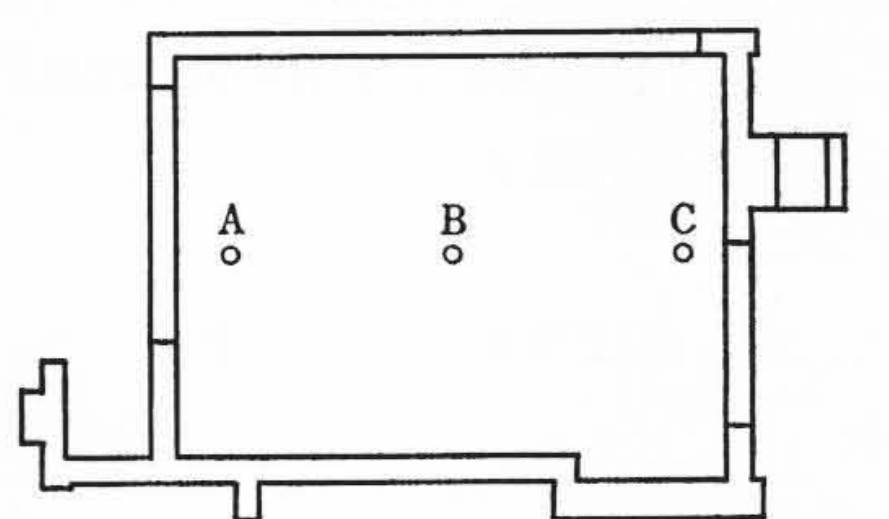
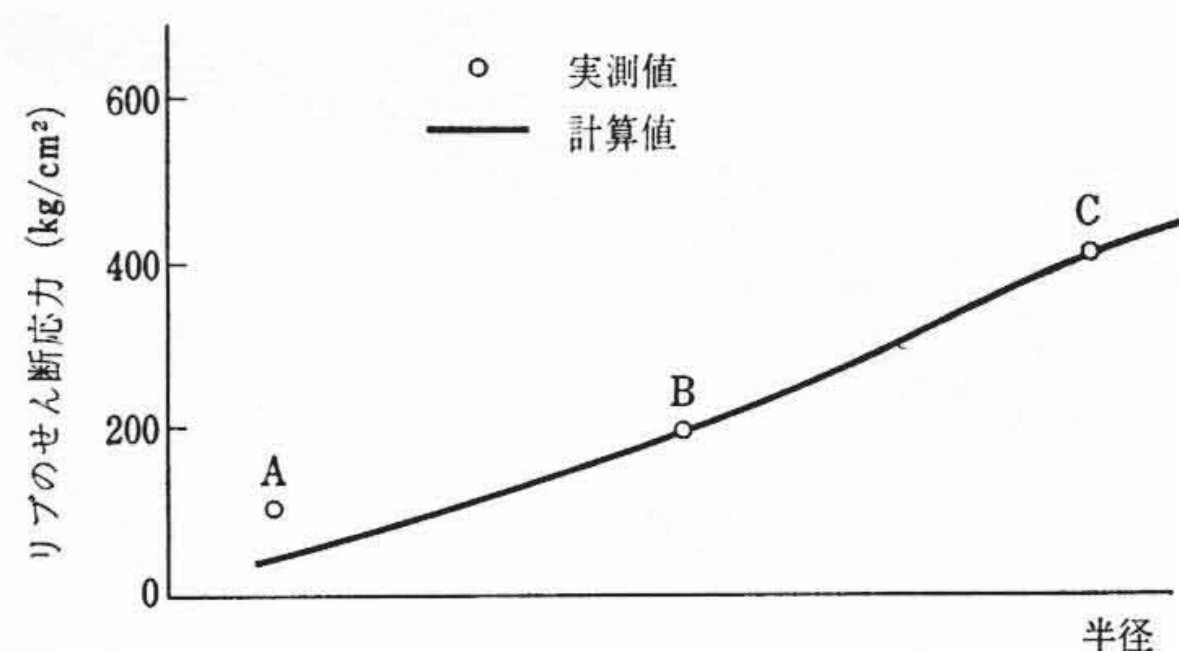


図7 応力測定用モデル上カバーの
リブのせん断応力分布

式が作られる。二つの基礎方程式は

$$\begin{aligned} \beta'' + \frac{(rD)'}{rD} \beta' - \left\{ \left(\frac{r'}{r} \right)^2 - \nu \frac{(r'D)'}{rD} \right\} \beta + \frac{1}{rD} (z' - e'r') rH \\ = \frac{1}{rD} (r' + e'z') r_1 V_1 + \frac{1}{rD} (r' + e'z') A \\ (rH)'' + \frac{(r/c)'}{r/c} (rH)' - \left\{ \left(\frac{r'}{r} \right)^2 + \nu \frac{(r'/c)'}{r/c} \right\} rH - \frac{z'}{r/c} \beta \\ = \left\{ \frac{r'z'}{r^2} + \frac{(z'/c)'}{r/c} \right\} r_1 V_1 + \left\{ \frac{r'z'}{r^2} + \nu \frac{(z'/c)'}{r/c} \right\} A - \\ - \nu \frac{z'}{r} (rP_V) - \left\{ \frac{(r/c)'}{r/c} + \nu \frac{r'}{r} \right\} rP_H - (rP_H)' \end{aligned}$$

ここに、 β : 殻中央面上の法線と、回転軸(z)とのなす角の変化量

D : 曲げ剛性

H : 単位長さあたりの r 方向内力

V : 単位長さあたりの z 軸方向内力

e : 殻厚の半分 $\frac{h}{2}$

$C = Eh$

P_H : 圧力 P の z 方向成分

P_r : 圧力 P の r 方向成分

$$A = \frac{r^2 - r_1^2}{2} P$$

()': 座標 r, z を与えるパラメータ(殻のある点からの長さ)による微分係数

である。スティリングとケーシング胴板の接合部のトランジションプレート内では、こう配の影響を考慮し、内力によって生ずる曲げモーメントを考慮してある。この2組の方程式から β, H が定まれば各内力、曲げモーメントはよく知られた関係によって直ちに導くことができる。

スティリングは、リブによって補強された剛性の高い構造であるので、荷重が作用して変形後も、変形前と同じ断面形状を有すると考えられ、計算にはリング理論を用いている。スティペーンはスティリングとの接続部付近を除いて梁として取り扱っている。

数値計算は、ケーシングの殻部分に関してはSEPETOSKIの方法で行なわれ、スティリングとの接続部において、膜力、曲げモーメントが伝達されるとしてそれを境界条件として解かれる。

図8は実験用モデルケーシングの胴板の外面上における子午線方向応力の実測値と計算値の比較を示したものである。

ケーシングの胴板、トランジションプレート、スティリングとの

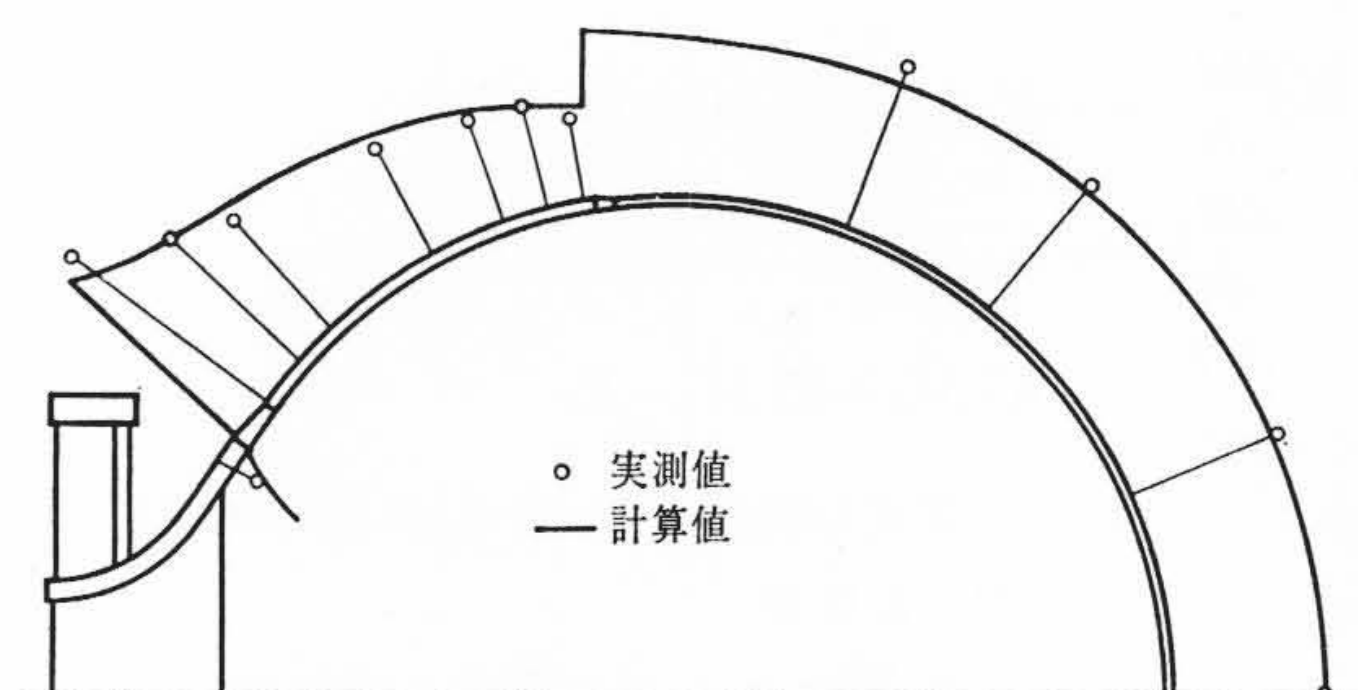


図8 応力測定用モデルケーシングの胴板の外面上における
子午線方向応力分布

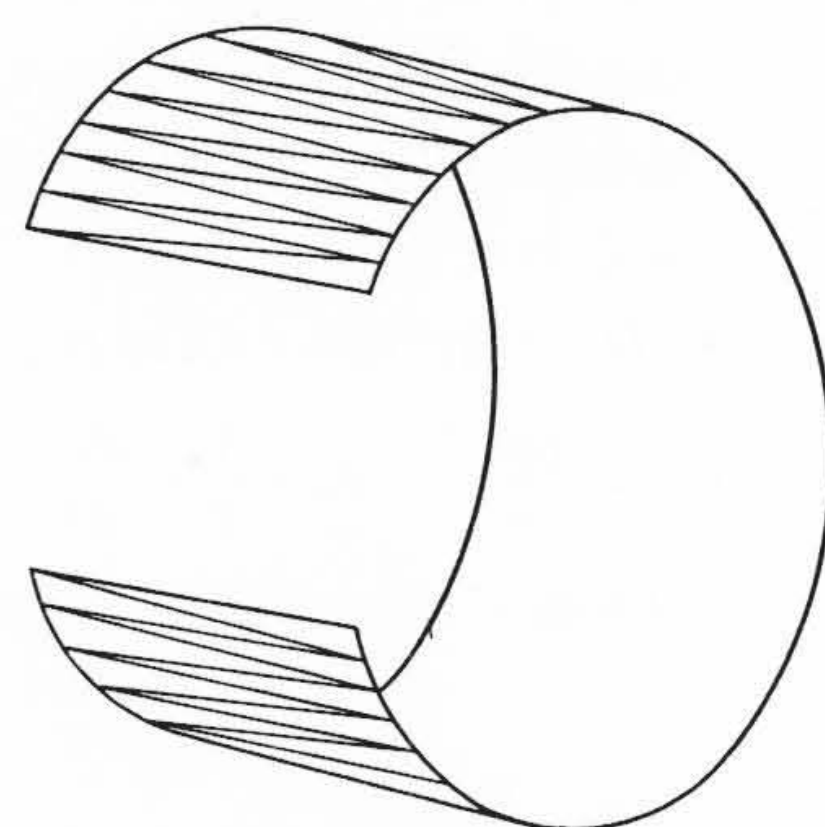


図9 ケーシングの一断面の
両側周上に細分点を設け
平面展開用三角形をつくる

接続部における応力集中を正確に分析するには有限要素法による解析が必要である。この部分は変位法を使ってさらに詳細に計算される。これには、簡単な諸元の入力で計算できるように自動分割プログラムが使われる。

そのほか、主軸、案内羽根、入口弁のボディ、バルブなどの主要部品についても、形状、機能に応じ殻理論、リング理論、有限要素法などで強度計算を行なっている。

5. 自動製図

設計の能率を高めるために、NC製図機やプロッタの利用が盛んに行なわれるようになった。自動製図のためのプログラミングは時間のかかるものであるが、繰り返し使われる部品、複雑な曲面の設計には効果が大きい。最近作成された自動製図の例を簡単に紹介する。

5.1 ケーシング胴板の展開

溶接ケーシング胴板の展開は、三つのステップで行なわれる。第一のステップでは、ケーシングの各断面における渦寸法を決定する。これには各断面の面積カーブが使用され、必要な面積を与えるように断面形状が決定される。

第二のステップは強度計算を行ない、胴板の板厚を決定する。強度上、板厚を変える必要がある場合には、板の接合部位置が決定される。

第三のステップでは、上記により決定した断面形状、板厚、板の接合部位置のデータから展開を行なう。まず断面の両側周上を細分して、相対する点を交互に結んで図9に示すように三角形を作る。この三角形の頂点の空間的座標は断面形状より容易に計算できる。次に、これを平面に展開した場合も、一つ一つの三角形は非常に小さいものであるから、なんの変形を受けずに相似に展開されることができる。個々の三角形を平面上で順次接続すれば、求める展開形状が得られる。

空間的な座標は板厚の中心で決定しているが、ケーシング胴板は厚いため、開先形状による補正を正確に行なう必要がある。図10は

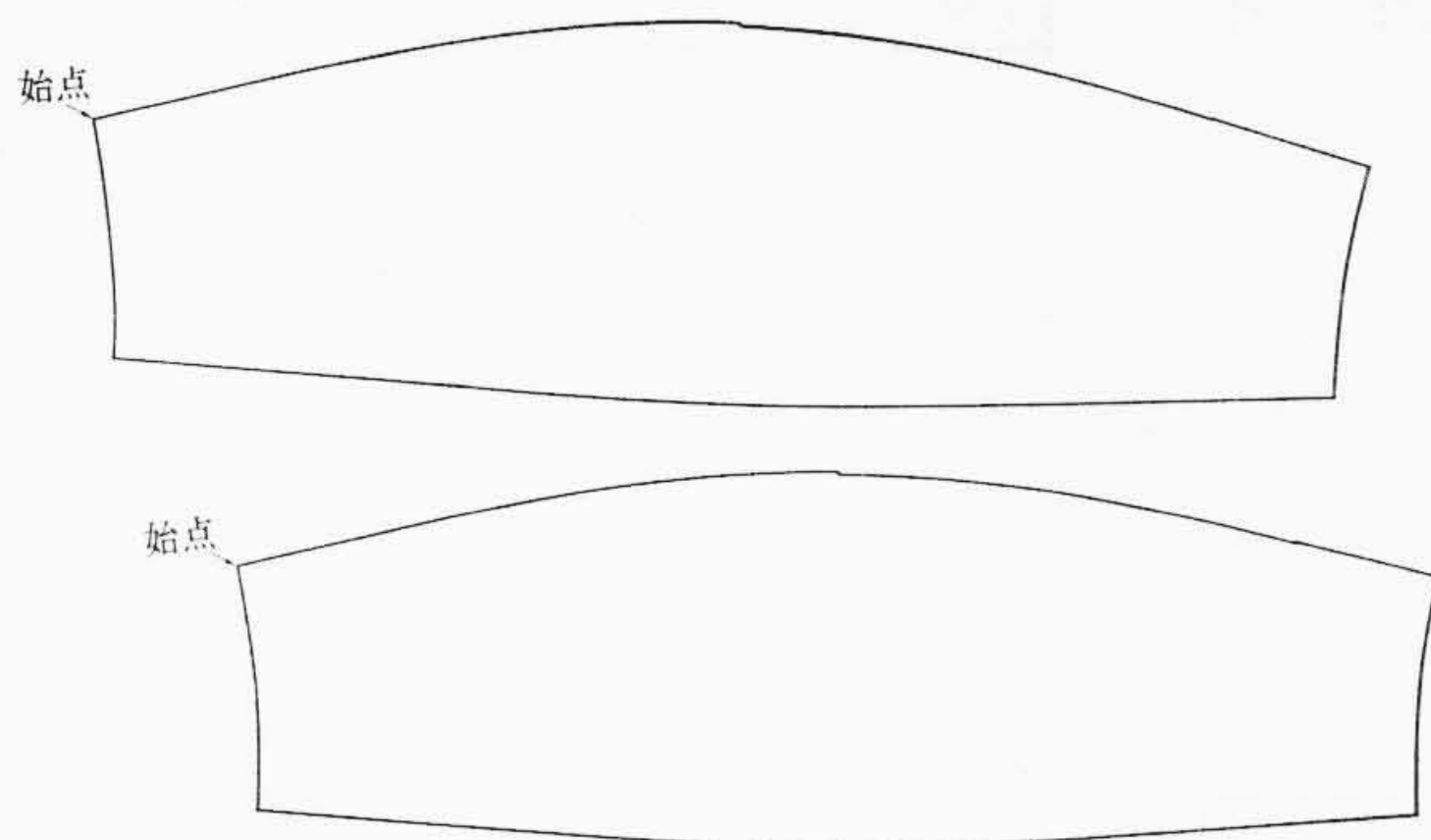


図10 ケーシング胴板のNC自動切断用展開図

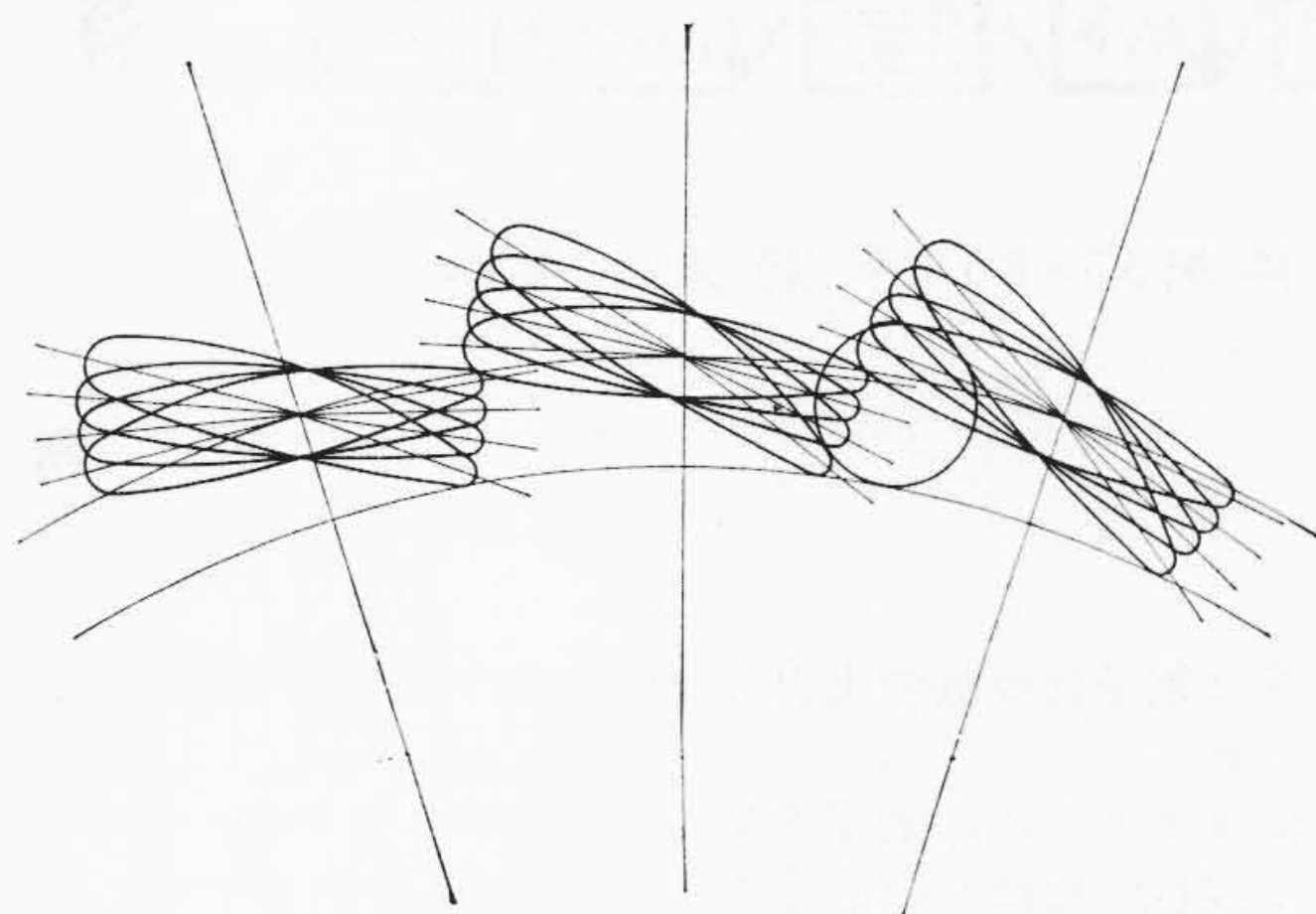


図11 自動製図機で自動製図された案内羽根開度関係図

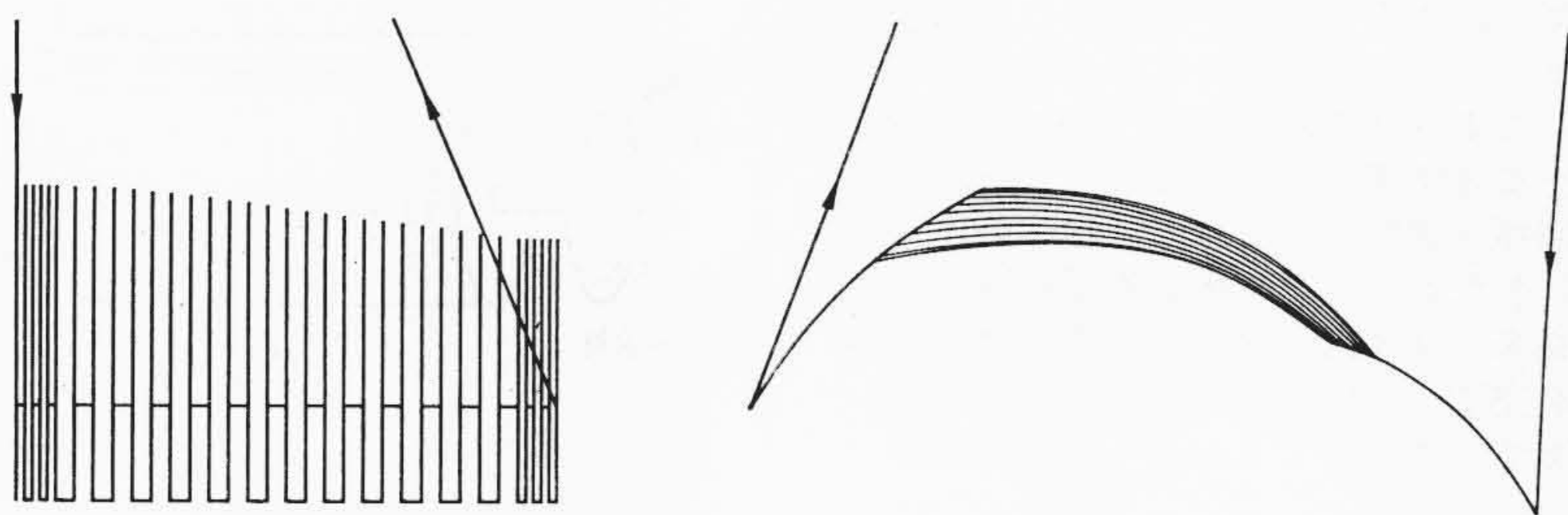


図12 斜流水車の高能率運転立体カムの曲面切削用カッターパス

このようにして得られたケーシングの展開図であり、製図とともにNC自動切断用テープが作成される。

このような板取りの検討は、現在、グラフィックディスプレイ装置を利用して行なうよう準備が進められており、ネスティング、ストレッキングが容易に行なえるようになる。

5.2 案内羽根関係図

案内羽根関係図は、与えられた案内羽根のパターンをもとに、ランナに対する必要流入角度と、クリアランスが得られるように、案内羽根のピッチ円径、案内羽根の大きさが定められる。案内羽根形状は無次元化したものであるが、ピッチ円上で前後の羽根と適当な位置で接するようにすれば案内羽根の寸法が確定する。この大きさのとき、指定された角度を与える開度におけるクリアランスをチェックして、その過不足に応じてピッチ円径を縮小あるいは増大させる。このピッチ円径の変化は案内羽根の大きさを変更させることになるので、収れん計算をさせて決定する。またこの段階において強度の検討がなされる。

案内羽根の過開時、ランナベーンと接触することのないように、上記収れん計算中でたえずチェックをしている。こうして、ピッチ円径、寸法が決まるとクリアランスを数等分して、各クリアランスに応じた羽根開度を計算し、案内羽根レバー、リンク、ゲイトリングの機構を考慮して、最終的にサーボモータストロークと案内羽根開度の関係を求める。

図11はこのようにして決定した案内羽根開度の関係図である。なお、案内羽根形状はHAPTでコーディングするが、クリアランス確保のため、形状パターンを変える必要があれば、与えられた範囲でパターンを自動的に変更する。

5.3 斜流水車用立体カム

落差の変動する斜流水車では、各落差で最高の効率を与えるように、案内羽根開度とランナベーン角度とを関連づけなければならない。この関係を与えるものが連動カムであり、落差と案内羽根開度に対して必要なランナベーン角度を与えるような曲面をなしてい

る。立体カムの曲面は、設計、製作に多くの時間をかけているので、これを自動製図で処理する効果は大きい。

入力としては、案内羽根開度とカムのストロークの関係曲線、落差とカムの回転角度との関係、各落差における案内羽根—ブレード関係のデータを与える。機械加工は3軸フライスのボールエンドカッターによるので、カッターの半径も必要である。計算は入力データより曲面創成、フェアリングを行ない、NC製図機で曲面を製図するとともに、機械加工用のNCテープを作成する。したがって製図は単にチェックのためで、製作上は不要である。

図12はこのようにしてNC製図機によって作成された立体カムの曲面であり、これをカッターのパスで示したものである。

自動製図は、繰り返し使われる水車および補機の製作図についても行なわれており、最終的には計画図は設計者が作成し、大部分の小物部品の製作図、部分組立図が自動製図機によって作成されるようになると思われる。この場合、部品あるいは構造に対する標準化がなされていなければならないことは言うまでもない。

6. 結 言

電子計算機の利用上、今後検討を要する問題を要約すれば次のようになる。

まず性能計算では流れ計算によって、性能をよりいっそう向上させる検討を進め、計算と実験をじゅうぶんに行なって流れを解明することが必要である。強度計算については、構造物全体として最良の設計となるように、CADの手法を使って計画および計算を進める必要がある。

また別の応用としては、設計データ、旧図面などに関する情報検索のオンライン化がある。日常この種のファイル参照に費やしている時間は無視できないからである。そのほか設計の管理、たとえば原価管理、日程管理などについても検討が進められている。

以上のように、性能、信頼性を向上させ、設計の能率を高めるためには、電子計算機の利用をもっともっと高めねばならない。