

機械・構造物の対話形設計解析

Interactive Design and Analysis for Machines and Structures

従来のCAD/CAMは、生産方式が確立された後の省力化、自動化に力点が置かれ、新製品の開発や既製品の改良に対しては必ずしも効果的ではないようである。そこで製品開発の全工程ですべてを一貫して処理でき、可能な限り計算機シミュレーションによって性能、強度、加工性などを吟味できる新しいCAD/CAMシステムを構築することにした。新システムは解析シミュレーションを基幹にし、そのための各種解析プログラムが用意され、データベースやファイルを介してフレキシブルに結合されている。現在までに構造・機構・流体の設計解析システムが実用化され、ポンプ、タービンなどの重電機器、産業機械をはじめ、ロボット、磁気ディスクなどメカトロニクス製品にも適用され大きな効果を挙げている。

中沢 優* Masaru Nakazawa
 菊地勝昭** Katsuaki Kikuchi

1 緒言

従来のいわゆるCAD/CAM(Computer Aided Design/Computer Aided Manufacturing)システムは、自動設計あるいは自動製図とNC(数値制御)データの自動作成が主体のものであり、主として方式が確立された後の省力化、自動化に着目したものであると言えよう。したがって、新製品の開発や従来製品の大幅な改良などに効果的に活用することは困難なものであった。そこで、日立製作所では、新しいCAD/CAMシステムの構築を行なうことにした。すなわち、製品の計画から研究開発、設計、製作などのすべてを一貫して処理できるようにし、可能な限り計算機によるシミュレーションによって、性能、強度あるいは加工性などを吟味し、製品開発の全工程でのバランスのもとで、設計、製作などを合理化できるものを目指した。

本稿ではこのうち、特に従来のCAD/CAMシステムではあまり考慮されていなかった新製品開発などに必要な強度や振動あるいは性能の解析、シミュレーションプログラムについて、これまでに完成し、実用化されているものの幾つかを述べる。

2 開発、設計における解析、シミュレーション

機械や構造物の解析、シミュレーション技術を大別すると、その目的から性能解析と強度信頼性解析とに大別できる。流

れや熱あるいは騒音などの解析は主として機械や装置の性能向上のために、また、応力や振動の解析は製品の信頼性を向上するために行なわれる。一般に、性能を向上させるために、より軽く、より速くといった諸々の要求は、強度信頼性に対して、より厳しい条件を与える。また、逆の場合も同様であり、調和のとれた解析技術が要求される。図1に、これまでに開発した解析プログラム群と、それらがCAD/CAM全体システムの中でどのように使用されるかの概要を示す。製品や装置の開発、設計を進める上では多数の解析プログラムが使用されるが、それぞれのプログラムについて入力や出力を独立に行なうのは、特に幾何形状モデリングや有限要素モデリングでは、膨大なマンパワーを要するばかりでなく、入力データミスなどによる解析結果の信頼性をも損ねる。しかし、解析プログラムは逐次新しいより優れたものを開発し、追加していかなければならないので、解析プログラム群の各プログラムは、固定した結合関係では不都合である。そこで、データベースやファイルを介してフレキシブルに結合されるものとした。

図2は、ポンプを新しく開発設計することを想定して、この中で必要な解析やシミュレーション技術を設計の流れの中で示したものである。製品の種類や仕様、その他によって、検討すべき技術内容には差があるが、この例では一般的な状

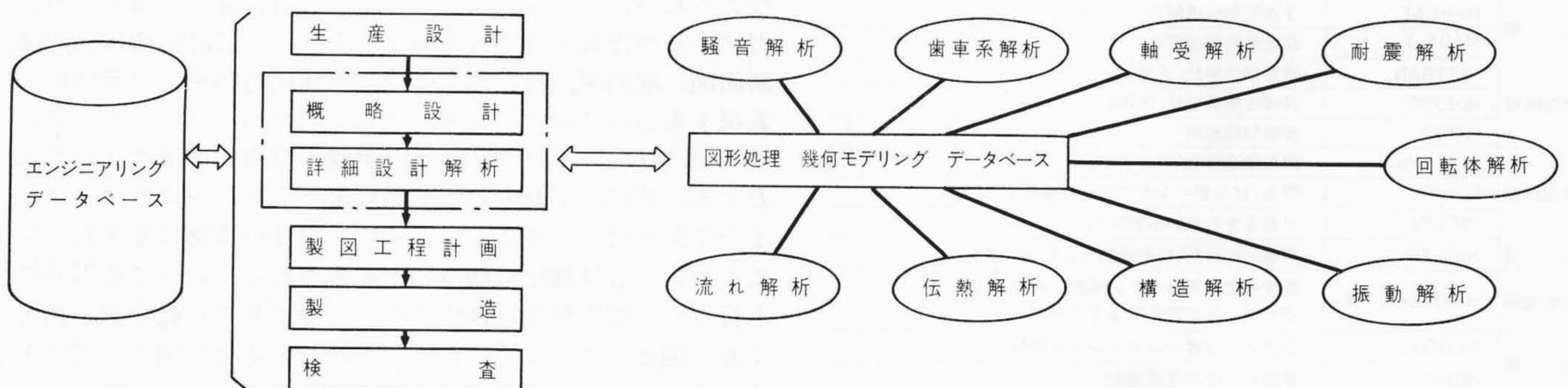


図1 機械系CAD/CAM総合システムと解析シミュレーション 製品の開発、設計を進める上で多数の解析プログラムが必要であるが、データベースやファイルを介してフレキシブルに結合される。

* 日立製作所機械研究所 ** 日立製作所機械研究所 工学博士

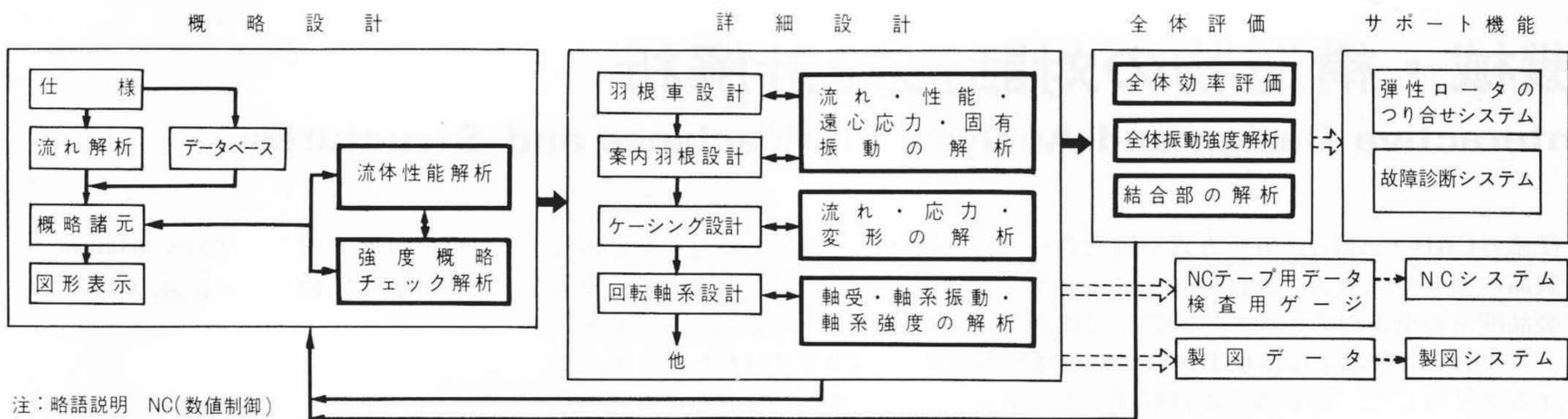


図2 ポンプの開発設計手順と解析シミュレーション ポンプを新設計することを想定した場合、設計の各段階で各種の解析プログラムによるシミュレーションが必要である。

況が想定されている。このような検討を他の製品についても行ない、開発すべき解析シミュレーションプログラムを決定した。

図2の例での解析シミュレーションプログラムの中で、例えば応力や変形あるいは振動解析などの、いわゆる構造強度設計関係のプログラムはポンプ固有でなく、製品や構造物の種類によらない汎用的なものとして行うことができる。すなわち構造設計では、形状や寸法、材質、荷重、境界条件など取り扱う構造物によって異なるだけで、解析処理部分は構造物の種類などにはよらない。これに対して性能設計の場合には、例えば流れ解析を取り上げてみても、現状では汎用的なプログラムだけで処理できないため、それぞれの検討の種類に応じて解析手法やプログラムを使い分けたり、また、過去の実績や試験のデータを用いたりしなければならない。そこで総合システムの開発に当たっては、設計変数を変えながら解析を繰り返して設計を完了するような汎用的なもの、ある程度製品分野あるいは技術分野を限定して使用するものと2種

に分けて開発を進め、それらの組合せで設計が行なえるようにしている。

表1に、図1の解析プログラム群のうちの代表的なものについて示した。それぞれの分野や製品で固有のものは膨大な数になるので割愛した。

3 構造、機械解析シミュレーション

汎用的に用いられるシステムの例として、構造、機構解析プログラムについて説明する。

3.1 対話形構造設計システム“HIDESS”

有限要素法による構造解析の大幅な省力化を図るとともに、この結果やデータベースに蓄積した強度データを用いて、強度評価の高精度化と基準化を行なって、信頼性向上と構造設計の最適化を可能にするために、対話形で構造解析から強度評価までを一貫して行なうことのできるシステムの開発を行なった¹⁾。

本システムは、大別して次の五つのサブシステムから成る。すなわち、(1)プリプロセッサ、(2)構造解析、(3)ポストプロセッサ、(4)強度評価、(5)データベースである。

構造解析については、既開発の汎用プログラム²⁾を組み込み、社内のほとんどの製品に適用できるようにするとともに、羽根車専用プログラム³⁾など使用頻度の高い専用プログラムも幾つか組み込んだ。

プリプロセッサは、図形処理、幾何モデリング、有限要素モデリングを行ない、(2)の構造解析に必要なデータを用意するものである。一般に、解析すべき構造物は設計図面として与えられるので、本システムでは、設計図面の情報だけの入力データの作成ができる方式を考案した。設計図面は三面図、断面図、展開図、投影図などで、立体構造物を2次元図形で表現するものである。まず、これらの図形をコマンド(例えば「円を書け」とパラメータ(半径と原点)を逐次与えて入力する。次に、これらの平面図形をグラフィックディスプレイ上で関連付けすることによって、立体構造物に組み立てる。こうすると計算機中に構造物が記憶される。続いて要素分割を行なう。要素分割には構造物の部分ごとに自動分割を適用する。図3はこのようにして得られた要素分割図の一例である。要素や節点の番号付け、要素データや節点の座標データの作成は、構造物が計算機中に記憶されているので、自動化して行なえる。引き続き、荷重データや境界条件をディスプレイ上の構造物に与えることによって、必要なデータがすべて準備できる。最後に、解析プログラム用ファイルを作成して処理を終わる。なお、以上の処理は構造物の種類や図面の

表1 解析シミュレーションプログラムの例 機械工学のあらゆる分野にわたって、汎用性のある解析シミュレーションプログラムが用意され、機械系CADシステムを構成している。

分野	プログラム名	内容の概略
流	NAVIA 2	2次元層流解析
	TURB 2	2次元乱流解析
	MARK 3D	3次元ポテンシャル流れ解析(静止系)
	POT 3D	3次元ポテンシャル流れ解析(回転系)
伝	HI-HEAT	3次元熱伝導解析
	MARK 3	非定常熱伝導解析
構造解析	HISTRAN	線形構造解析(汎用)
	HI-EPIC	非弾性構造解析(汎用)
	CAPIT	接触問題解析
構造振動	HISTDYN	線形構造振動解析(汎用)
	HIVIPS	同上(ビルディングブロック法による。)
	CNDYN	がたを含む系の振動解析
機	HISLAP	機構系の解析(振動解析も含む。)
回転軸系	HIROTシリーズ	危険速度、不釣りあい振動、バランスング安定性、非定常応答などの解析
耐	SLOSH	容器内の流体のスロッシング解析
	HISAC	建屋と地盤の連成振動
軸	TPDYN	ティルティングパッド軸受の解析(静特性・動特性)
	MLACG	多円弧軸受の解析(静特性・動特性)
	DYNLJB	変動荷重ジャーナル軸受の解析
歯	HISG 4	伝達動力解析
	SBSY	歯形係数計算
騒	HICONT	プラント騒音の解析
	NCONT	音場予測

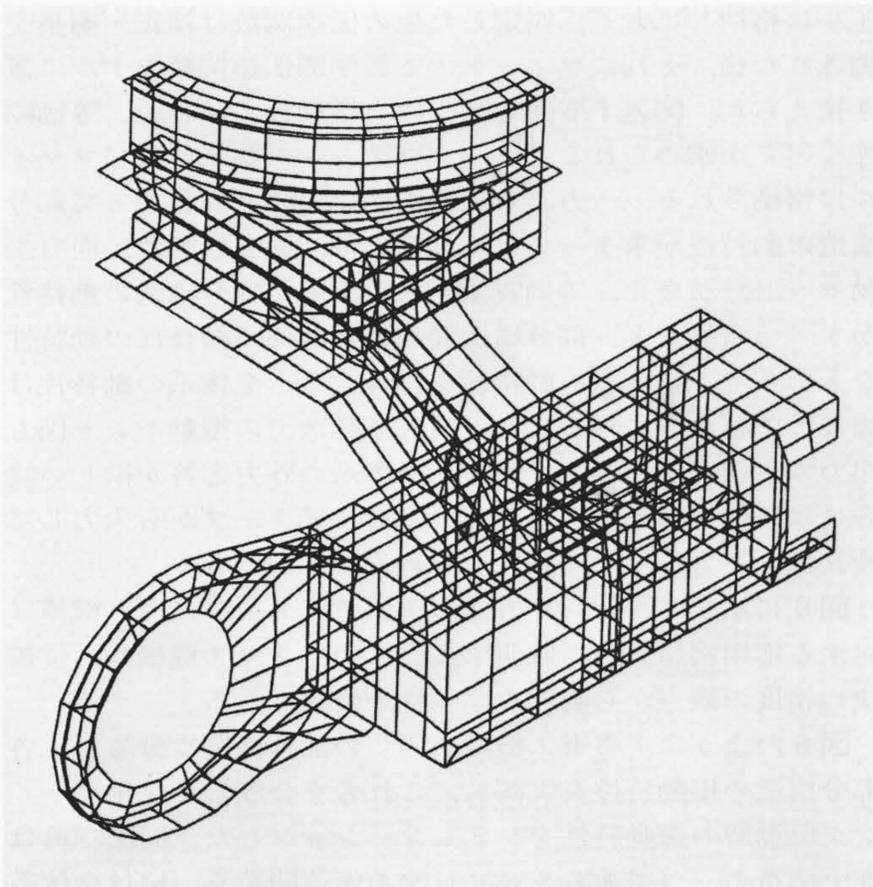


図3 要素分割 平面図形から構築された構造物について、部分ごとに自動分割を適用すると、要素分割図が得られる。

表現方法の違いに対して対応できるように各種のサポート機能をもち、統一的な手順となっている。

ポストプロセッサは構造解析の結果を図示するものである。出力図示機能は、(1)変形量図示、すなわち、変形前後の構造形状の表示、(2)等応力線表示、(3)応力ダイヤグラムの表示、(4)応力や変形などのグラフ表示、(5)過大応力の部分の表示、(6)動的応答の表示、(7)アニメーション表示などであり、構造物の任意の箇所の評価が直ちに行なえる資料の作成ができる。

強度評価では、各種の破壊様式に対する強度解析手法のほか、実製品の強度評価で必要性の大きい、例えばASME(American Society of Mechanical Engineers)などの規格に基づくもの、更に、製品ごとの長い歴史によって固有の評価法をもっているものなど、3種の評価法が任意に選択できるようにしている。これらの強度評価法を設計者が誤りなく選択し、あるいは使用できるように、(1)表示パラメータ選択方式(Tree方

式)、(2)ガイダンス方式の2方法を採用した。なお、破壊様式などを予測できる設計者に対しては、直接データの検索などを行ない、解析結果を利用した強度評価を行なえるようにしている。

データベースに関しては、データベース自体の作成やデータの追加、修正のために必要な編集プログラムと、完成後の使用に必要な制御プログラムとがある。データベースに格納したデータとしては、社内で用いられる主要材料に対する静的特性、疲労の強度特性などで、材料別、熱処理条件別、負荷状態別などに分類、整理し、活用を容易にしている。

3.2 “HIVIPS-M” (Hitachi Vibration Prediction System-Model Synthesis)

本プログラムは、重電機器のように大形で試作できない構造物、試作できても大形あるいは複雑すぎて実験できないものの振動特性を経済的にシミュレーションすることを目的に開発したものである。本プログラムは、有限要素法のモーダル・シンセシス法に基づき作成した⁴⁾。解法としては、従来のように対象とする構造物を全体として一度に計算するのではなく、幾つかの部分構造物に分割し、部分構造物の振動特性を有限要素法により求めた後にそれらを合成して、元の全体構造物の振動特性を計算する組立工法(ビルディングブロック法)を採用している。この方法によって一度部分構造を求めておくと、部分構造変更などのシミュレーションが簡単かつ安価に行なえるようになっている。

図4は水車発電機のランナ部に対する応用例である。水車ランナは同図の(a)に示すように6枚の羽根から成る周期構造物である。このため $\frac{1}{6}$ を一つの部分構造物と考えその振動特性を求め、これを6個用いて全体構造物として特性を求めたものである。同図(b)はその分割状態を表わし、同図(c)は振動モードを示している。

図5は、はり、板構造物で固有振動数を10次まで求めるとした場合の従来手法の有限要素法(全体系を一度に計算する。)によるプログラムと、今回開発したビルディングブロック法によるプログラムとの解析規模、及び計算時間に対する比較である。2,000~3,000元以上の大規模系になると、開発したプログラムのほうが安価に計算できることが分かる。

3.3 振動解析プログラム“HIVIPS-F”

HIVIPS-Fの基本的な考え方は、ミニコンピュータやデスクトップコンピュータを利用して、振動測定から伝達関数の

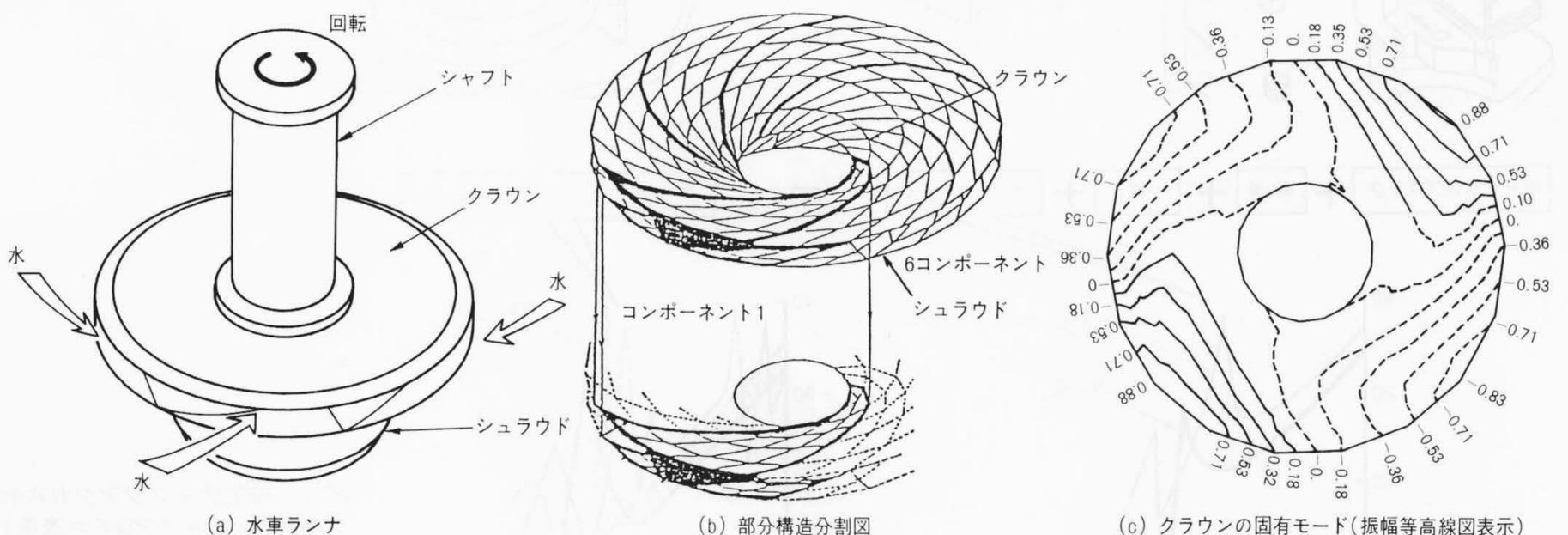


図4 水車ランナの振動解析(HIVIPS-Mの適用) 図中(a)の水車ランナは、6枚の羽根から成る周期構造物であるので、(b)のように $\frac{1}{6}$ の部分構造物を考え、その振動特性を求め、これを6個用いて全体系の特性を(c)のように求めることができる。

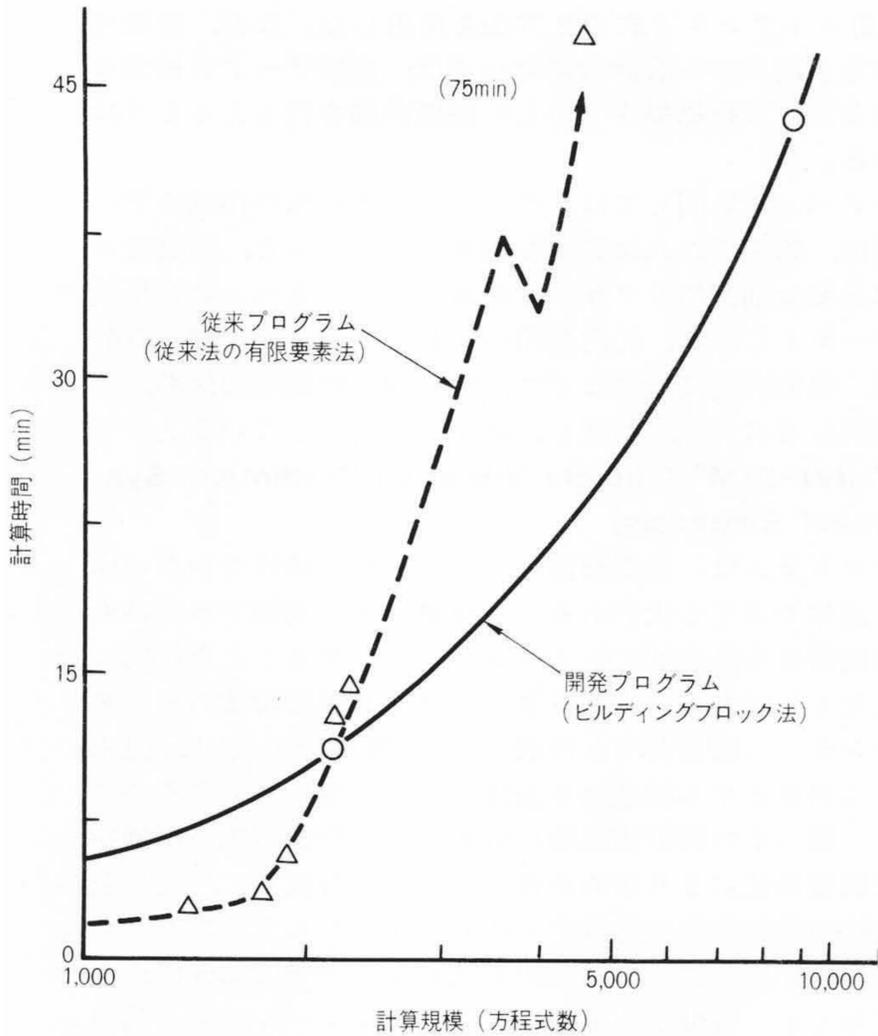


図5 固有振動数の計算時間 今回開発したビルディングブロック法による解析プログラムは、2,000~3,000元以上の大規模系になると、従来法の有限要素法解析プログラムよりも経済的であることが分かる。

表示、全体系の振動合成までを対話形式で一貫処理しようとするものである。手法としては、主に実験データをベースにした機械インピーダンス合成法を用いる。

実測で部分構造の動特性を求める場合、まず、正弦加振又は打撃加振によって部分構造の伝達関数を求め、結果はファ

イルに格納しておく。測定した生の伝達関数は補正・編集を施された後、それにフィットする数学的伝達関数モデルに置き換えられ、関連する諸定数（固有振動数、減衰比、等価剛性など）が求められる。カーブフィットの結果は再びファイルに格納される。一方、有限要素法などの計算によって部分構造の動特性が求まっている場合には、固有振動数、固有振動モード、減衰比、等価質量を入力する。部分構造の動特性がすべて求まると、部分構造間の結合関係や結合部の動特性を入力して、全体系の動特性を計算する。全体系の動特性は周波数応答の形で求まるが、固有振動数での振動モード図も出力することができる。更に、全体系の外力応答が欲しい場合には、外力波形をデータレコーダや紙テープから入力してやれば、外力に対する応答を求めることができる。

図6に示すスウィング方式の磁気ディスクアクセス機構に対する応用例について説明する。このアクセス機構は、位置決め精度の観点から動的な高剛性が要求される。

図6のようにアクセス機構を四つの部分構造に分離し、各部分構造の振動特性を実測し、これらを合成してフォローイング駆動時の振動特性をシミュレーションした。同図の(a)は部分構造の一つであるキャリッジの伝達関数を、(b)は全体系の伝達関数を示す。キャリッジがプロトタイプの場合と改良案の場合とをシミュレーションで比較すると、目標の動剛性を得るには、キャリッジの曲げ剛性の増加が必要であることが明らかになった。この結果をもとに、キャリッジが同図(b)の太線で示すような特性をもつように改良作業を進めることができた。

アクセス機構のように複雑な構造系で高精度化を図る場合各部品品の振動特性をうまく調和させて全体を高剛性化しなければならないが、HIVIPS-Fは有効な手段となる。

3.4 機構系の汎用解析プログラム“HISLAP”

産業用ロボットをはじめ、建設機械、情報端末機器などの機構系の問題に対しては、HISLAP (Hitachi Special Analysis Program) と称する汎用解析プログラムがある。この解

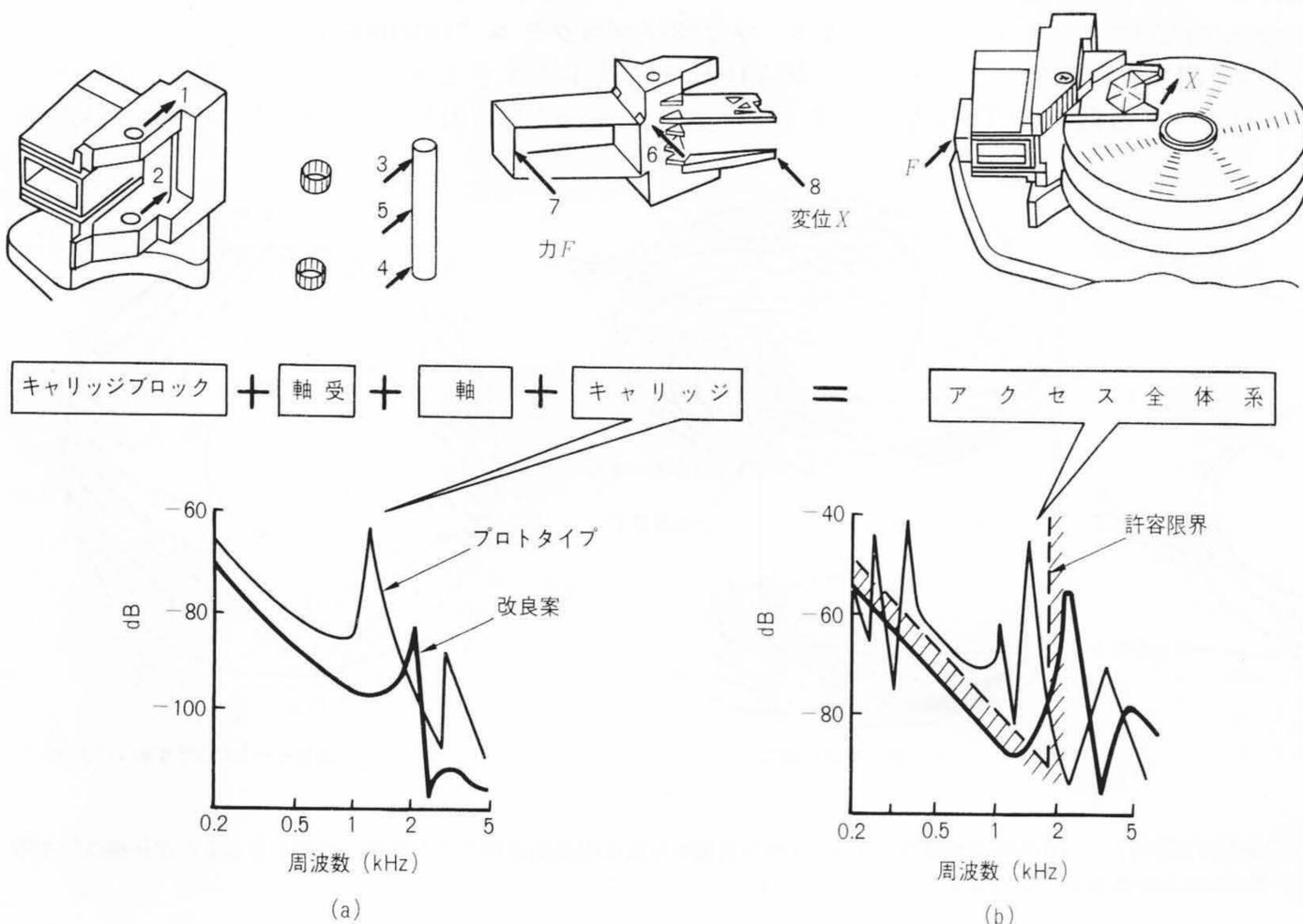


図6 磁気ディスクアクセス系の高精度化(HIVIPS-Fの適用) 部分構造の一つであるキャリッジを改良すると、アクセス全体系の振動を許容限界に収められることが、シミュレーションによって分かる。

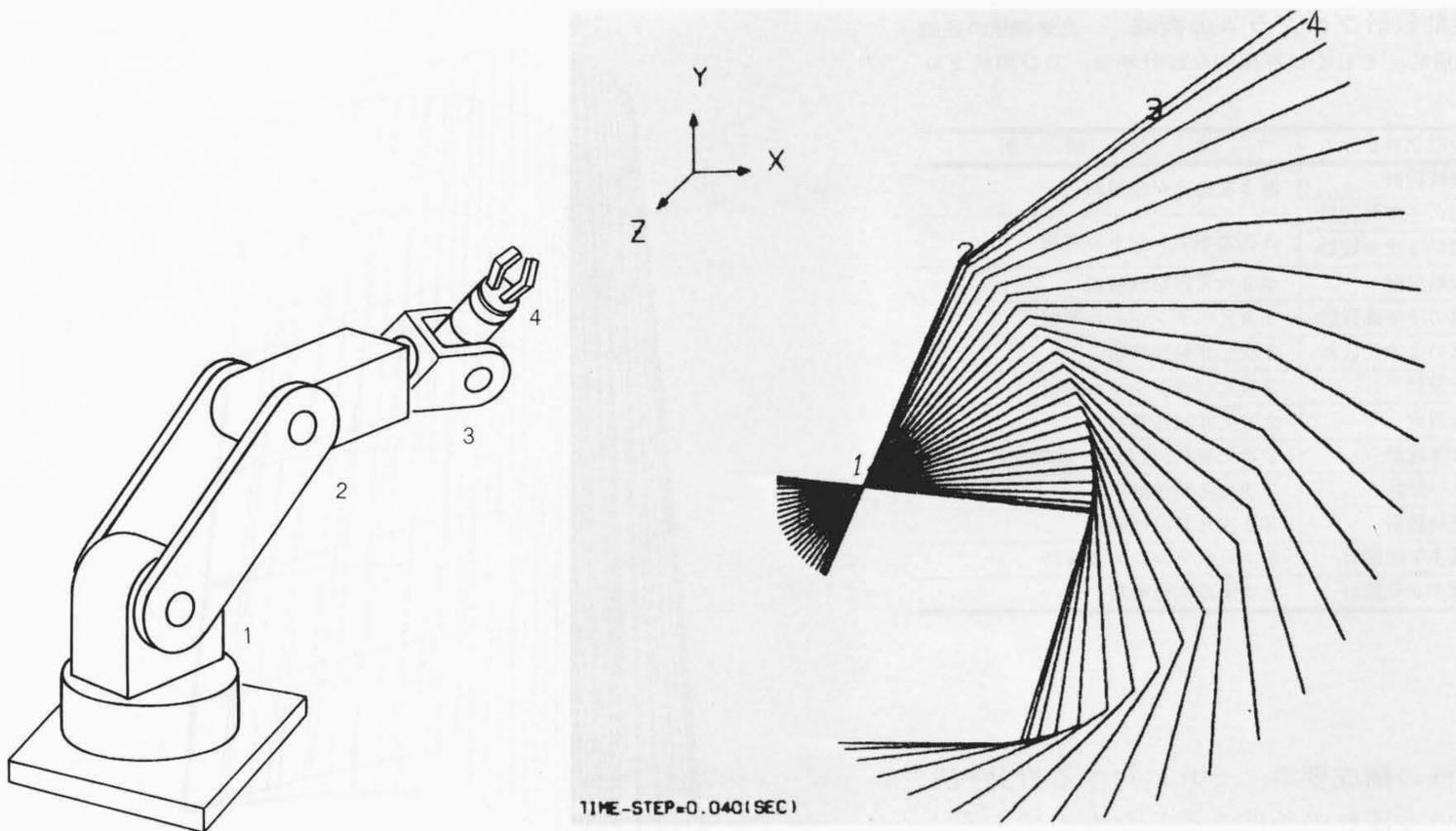


図7 多関節ロボットの動作軌跡 各ジョイントの駆動源が最大角加速度を与えられたときの多関節ロボットモデルの動作軌跡を、HISLAPで解析した結果を示すものである。

析プログラムは、多自由度をもつ2次元、あるいは3次元剛体リンク機構を扱う汎用プログラムであり、以下に述べる機能がある。

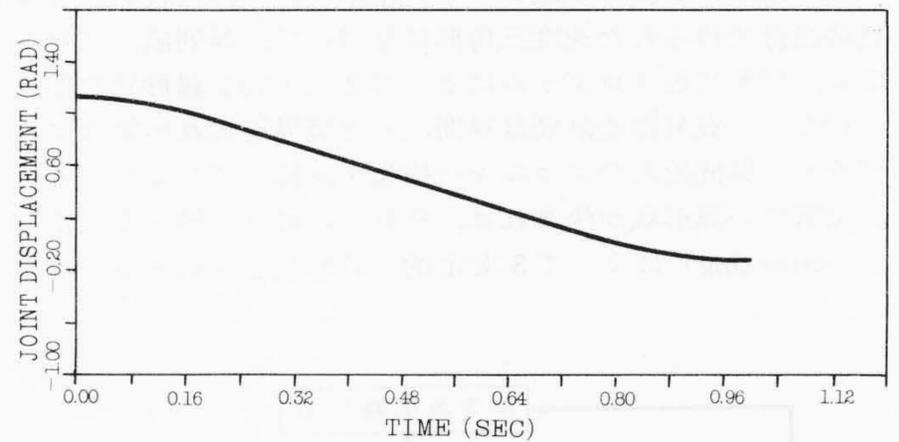
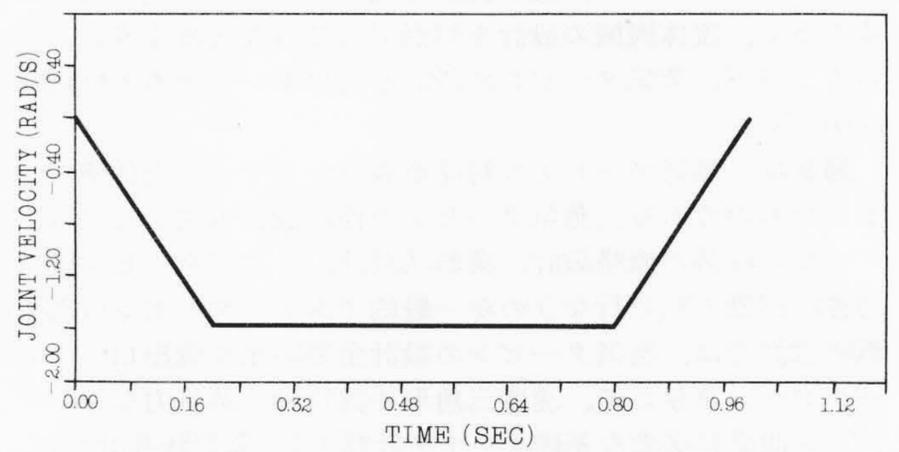
- (1) 取扱い可能な対偶素としては、まわり対偶、進み対偶、ねじ対偶、円筒対偶、球対偶などの対偶素
- (2) 対偶内、あるいはリンク上の点に作用するばねやダッシュポットの扱ひも可能
- (3) 対偶、あるいはリンク上の任意の点に作用する外力、又は強制変位も取扱い可能
- (4) 解析タイプとしては、KinematicとDynamic(過渡応答)
- (5) 出力様式としては、プリンタ出力と図形表示機能

解析手法は、J.J.Uickerによって開発されたMatrix Methodを用いている。本方法の採用によって、リンク機構系の運動、それに重畳される振動及び各対偶素に作用する荷重などの解析を一貫して行なうことができる。また、サーボ系の動特性をサブプログラム内で表現し、本解析法と結合することによって、制御-リンク機構の全体系としての動特性解析も可能となっている。

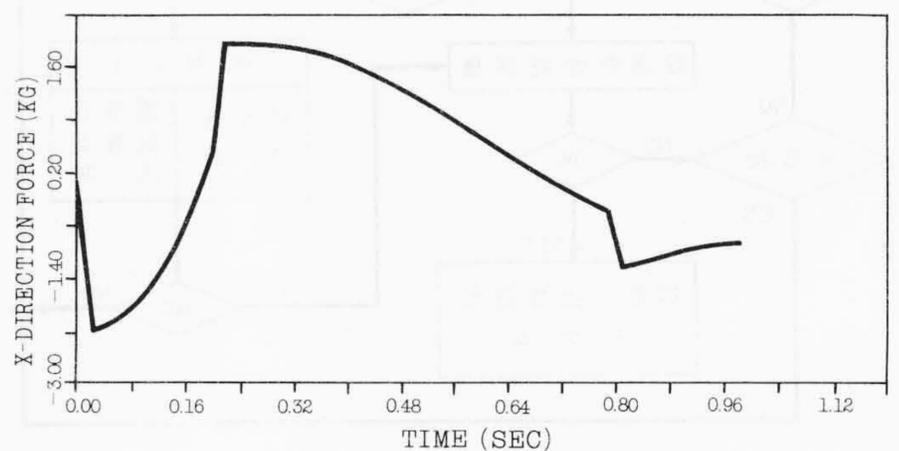
本解析プログラムを一般的な多関節ロボットモデルに適用した例を図7、8に示す。図7は多関節ロボットの動作軌跡の一例であり、図8はそのときの上腕駆動軸の角度、角速度及びその駆動軸のジョイント部に作用する動荷重を示したものである。本解析プログラムの利用により、機構系の動的挙動を予測することができ、また、動的荷重の把握もできるわけで、設計段階で強度、性能などを見積ることが可能である。

4 対話形流体機械設計解析システム

性能解析シミュレーションシステムの代表例について述べる。蒸気タービン、水車、ポンプ、圧縮機などの流体機械の概略設計、詳細設計、そして性能予測という一連の設計手順を、設計プログラム、解析シミュレーションプログラム、データベースを用いて対話形式で行なえるシステムを開発した。流体機械は、機種によって構成要素や設計・解析手法が異なる部分もあるし、共通の部分もある。そこで、本システムでは各要素技術を独立した形、すなわち、モジュール化して、必要なものを組み合わせて各機種の設計を行なえるようにし



(a) ジョイント1の角度、角速度



(b) ジョイント1に作用する動荷重

図8 多関節ロボットの動解析 多関節ロボットモデルが図7に示すような軌跡で動作するとき、ジョイント1の角度、角速度は(a)のようになり、そこにかかる動荷重は(b)のようになることがシミュレーションできる。

表2 対話形流体機械性能設計プログラムの概略 流体機械の各種ごとの構成要素に対し、汎用的、もしくは専用の設計手法、及び解析プログラムが用意されている。

機 種	設計プログラム	流 れ 解 析
遠心ポンプ・斜流ポンプ	概略設計	準3次元非粘性解析
	翼の子午面設計	3次元ポテンシャル解析
	翼の3次元設計	
遠 心 圧 縮 機	概略設計	準3次元非粘性解析
	翼の子午面設計	3次元ポテンシャル解析
	翼の3次元設計	2次元非粘性解析
軸 流 圧 縮 機	段落設計	3次元ポテンシャル解析
	翼選定	2次元非粘性解析
蒸 気 タ ー ビ ン	段落設計	2次元解析(非粘性+境界層計算)
	翼形設計	3次元非粘性解析
水 車	概略設計	準3次元非粘性解析
	翼子午面設計	3次元ポテンシャル解析
	翼3次元設計	2次元非粘性解析

ている。表2は、各機種構成要素とそれに対する設計手法、及び解析の対象としている流れの条件を示したものである。本システムでは、設計プログラム、解析シミュレーションプログラムとして約20種類の計算プログラムを用いており、これらとデータベース、及び図形処理プログラムを組み合わせることで、流体機械の設計を対話形式で行なえるようにしている。以下、蒸気タービンの設計を例に本システムの概要を説明する。

図9は、蒸気タービンの対話形設計システムの全体構成を示したものである。蒸気タービンの性能設計方法としては、タービン段落の概略設計、翼形状設計、そしてタービン段落の性能評価の順で行なうのが一般的である。タービン段落の概略設計では、蒸気タービンの設計主要諸元や翼出口のフローパターンを与えて、速度三角形や翼に働く蒸気力など、タービン設計に必要な基礎データを計算する。翼形状設計では、概略設計で得られた速度三角形に基づいて、翼列設計プログラム、図形処理プログラムによって2次元的な翼形状の作成を行ない、翼列性能評価は翼間流れと境界層流れの解析プログラムで翼間流れのエネルギー損失を計算して行なう。各翼長位置での翼形状が決まれば、それらの形状を積み重ねること(Stacking)によって3次元的な翼形状を作成する。その

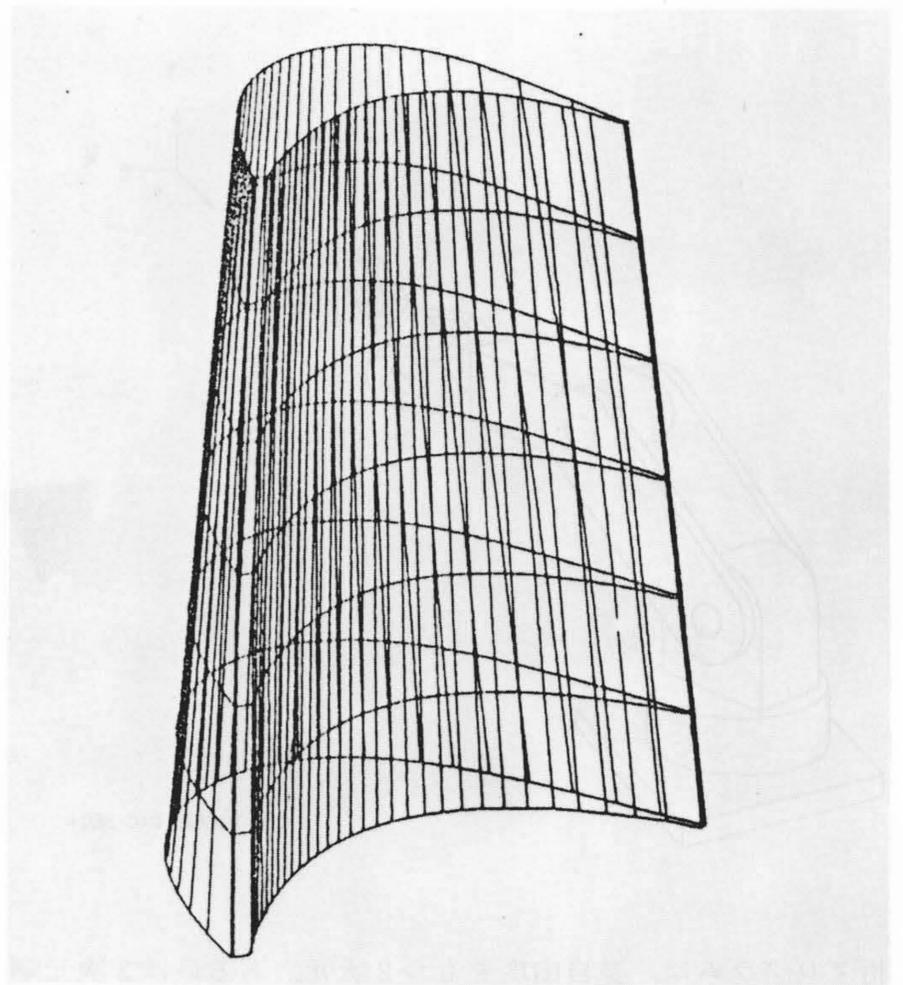


図10 3次元翼形状作成例 翼列設計サブシステムで、各翼長位置断面の翼形状作成後、翼の積み重ね(Stacking)によって3次元の翼形状を設計した例である。

例を図10に示す。なお、新形翼の開発が必要ない場合には、既存翼から速度三角形に合うような翼形状を選択する。こうしてタービン段落で使用する静翼の翼形状が決まれば、最後にタービン段落の性能予測を行ない、設計したタービンの良否を評価しなければならない。ここでは翼形状データのほかにタービン形状、フィン形状などから、タービン効率、反動度、流れの角度などを計算する。ただし、タービン段落内で発生する各種損失の評価には多くの実験式を導入し、性能予測精度の向上を図っている。以上に述べた概略設計、翼列設計、性能評価の各部分は、設計者が使いやすいようにサブシステム化されており、各サブシステム間のデータ転送には、計算結果を保存するデータベースが使われている。

5 結 言

以上、新しく構築しつつあるCAD/CAMシステムのうち、既に完成し実用化が進められている機械・構造物の対話形設計解析の概要について述べた。従来、設計段階では十分な検討ができなかった複雑な機械・構造物の解析シミュレーションが、必要な場合に直ちにできるようになったなど、ほぼ目標を達成する成果が得られた。今後は本システムのいっそうの活用を図るとともに、新解析シミュレーション技術の追加を行ない、更に有用なシステムにしたいと考えている。

参考文献

- 1) 中沢, 外: 対話形構造解析, 強度設計プログラムHIDESSの開発, 日本機械学会講演論文集, No.800-7, 49(昭55)
- 2) 佐川, 外: 応力解析汎用プログラム“HISTRAN”の概要と適用例, 日立評論, 57, 12, 1051~1056(昭50-12)
- 3) 大西: 羽根車応力計算プログラム“STAR”の開発, 日立評論, 56, 1, 5(昭49-1)
- 4) 高橋, 外: モード合成法による構造物の振動解析(第1報, 自由振動解析), 日本機械学会講演論文集, No.810-14 90~92(昭56-10)

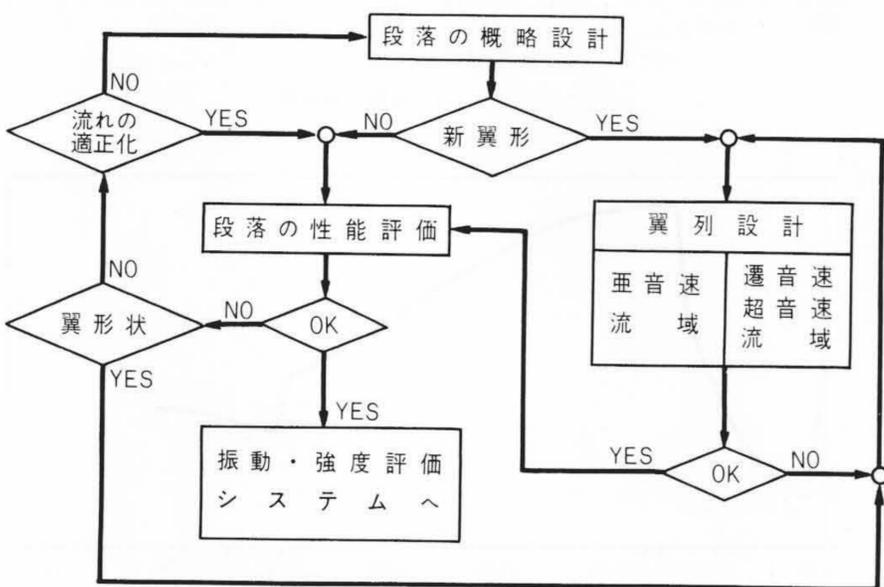


図9 蒸気タービン対話形設計システムの構成図 蒸気タービンの対話形設計では、段落の概略設計、翼列設計、段落の性能評価が各サブシステムによって行なわれ、目的性能を達成するタービンを合理的に構築していきける。