# 火力機器の最近の解析技術

酒井　吉弘(さかい　よしひろ)　　岸　　郁朗(きし　いくお)

## 1　まえがき

火力発電所を構成する蒸気タービン，発電機などの機器には，高い信頼性と性能が要求される。また，蒸気条件の高温・高圧化，DSS（Daily Start-up and Shutdown）運用化，定期検査インタバルの長期化など，使用条件が厳しくなる一方で，設備費低減，短納期化，メンテナンスフリー化など，ユーザーサイドからの合理化要求も強く，設計，製作，据付けの各段階で，きわめて高いレベルでの品質管理が必要になってきている。

火力機器の設計，製作には，従来からCAE（Computer Aided Engineering）やCAM（Computer Aided Manufacturing）の手法が用いられてきたが，近年，コンピュータのダウンサイジング化と高機能化が急速に進み，これまで高価なスーパーコンピュータを用いなければできなかったような解析が，ワークステーションやパーソナルコンピュータ（パソコン）を用いて，手軽にかつ安価にできるようになった結果，解析技術の応用範囲が広がり，また高度化している。

最近の解析ソフトウェアの特徴は，マンマシンインタフェースが大幅に改善されたことで，グラフィックターミナルを用いて入力データの作成や解析結果のビジュアル化が容易にできるようになった。

本稿では，火力機器，特に蒸気タービンの設計，製作に用いられている解析技術について，最近のトピックスを中心に紹介する。

## 2　三次元CAEシステムの開発

従来，火力機器の設計は二次元CAD（Computer Aided Design）によって行っていたが，最近は三次元CADへの移行が急速に進んでいる。

二次元CADは，本来三次元である機器を正面図，平面図，側面図などの投影図で表す昔からの製図法を踏襲したものであり，設計者にはなじみやすい反面，図面は単なる平面的な「絵」であるに過ぎない。有限要素法（FEM）計算を行う場合にも三次元モデルを新たに作る必要があった。

これに対して，三次元CADは，機器の立体形状そのものを情報として入力するので，実際の機器があたかもコンピュータ内の仮想空間に実在するかのように扱うことが可能になる。したがって，部品を種々の角度から見たときの

図1　三次元CADで設計したタービン内部ケーシング

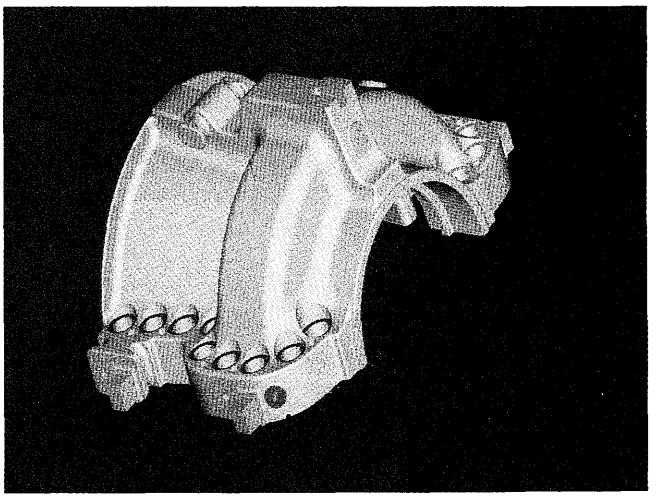
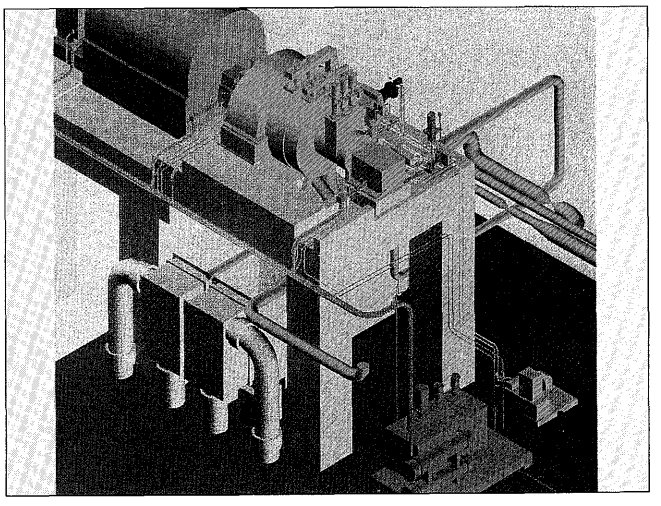
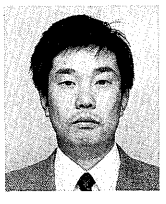


図2　三次元CADによるタービン・発電機ユニットの設計例



**酒井　吉弘**

蒸気タービンの設計・開発に従事。現在，エネルギー製作所火力部主席。



**岸　　郁朗**

回転機械の振動解析に従事。現在，生産・システム企画室生産技術研究所第一開発部主査。

形状チェック，部品同士の組合せや干渉のチェックを簡単に行うことができる。また，個々に設計した部品を組み合わせて機器全体の設計を行うことも容易である。さらにプラントにおける機器の配置や機器同士を結ぶ配管の設計などに適用することにより，プラント全体のビジュアルな計画が可能になる。**図1**は三次元CADによって設計した蒸気タービンの内部ケーシングの例，また**図2**は発電所における蒸気タービン・発電機ユニットまわりの配管および機器配置を三次元CADによって設計した例である。

三次元CADを適用することによって得られるもう一つの利点は，FEM計算や三次元流れ計算ソフトウェアなどとのデータのやりとりが容易になるため，強度や性能を考慮した部品形状の最適化を高度なレベルで行うことができることである。さらに，鋳造シミュレーションやNCデータの生成など，製造・検査のプロセスへとつなげることも比較的容易である（**図3**）。

このような三次元CADを中心とした三次元CAEシステムは，大きな発展性をもっており，今後の設計・製作手法を革新する可能性を秘めている。

## 3 シミュレーション技術の開発

コンピュータのダウンサイジング化と高機能化に伴い，従来は必ずしも容易でなかった膨大なシミュレーション計算が，比較的手軽に行えるようになった。そのなかの幾つかの例を紹介する。

### 3.1 振動シミュレーション

蒸気タービンの設計においては，運転中の振動挙動の予測が重要な意味をもっている。振動予測の手段としては，FEM計算に代表される数値解析手法と加振試験などの実験的手法があるが，富士電機は，両者の長所を組み合わせて機器の振動特性をシミュレーションできる解析ツールを開発した。

このツールは実機またはモデルによる加振試験の結果を解析して，振動特性を定量的に評価する実験モード解析のために開発されたものであるが，加振試験を行う代わりにFEM計算の結果を数値モデルとして与え，振動特性をシミュレーションすることも可能である。**図4**に解析システムの概要を示す。

解析結果はアニメーションとしてグラフィックターミナルに表示されるので，設計者は機器の振動特性を直感的に

図3　三次元CAEシステムの概念

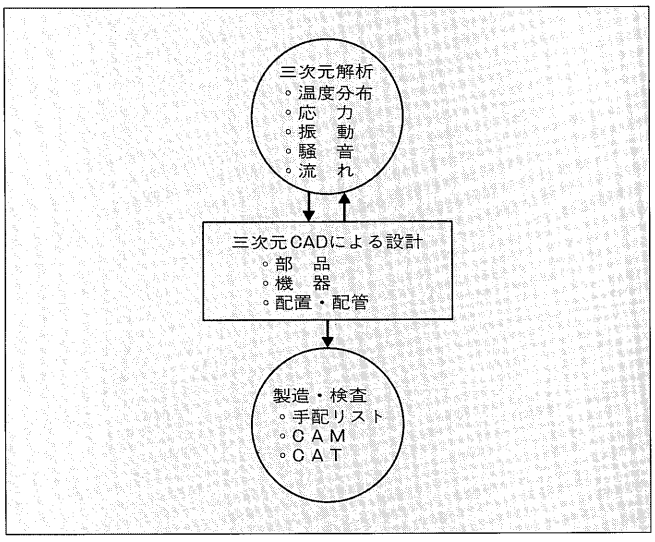



図4　振動シミュレーション解析システムの概要

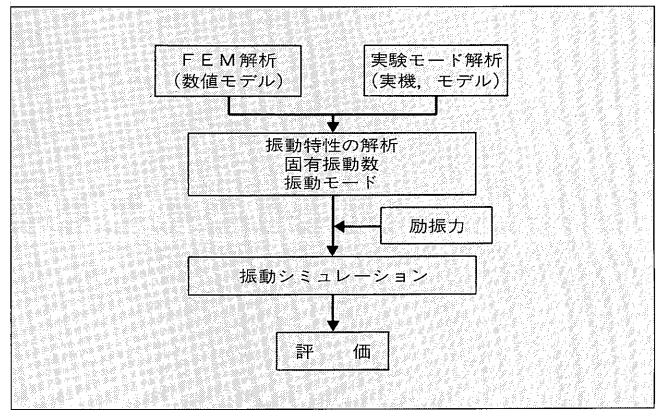



図5　蒸気タービンケーシングの振動シミュレーション

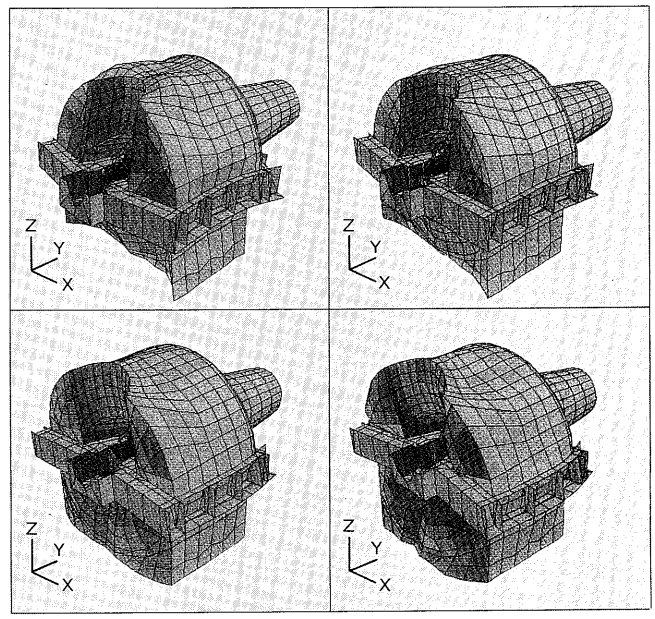
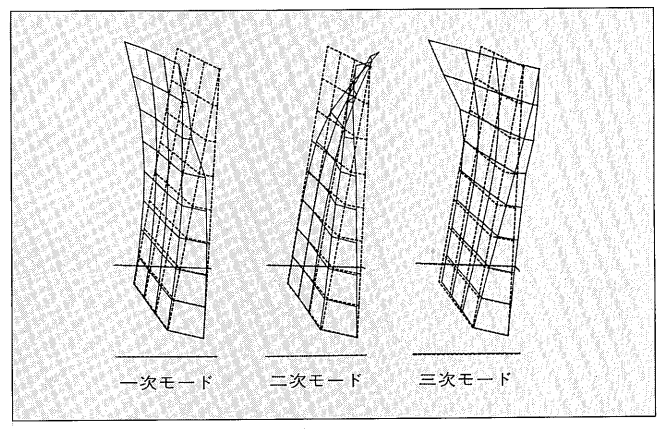



図6　タービンブレードの実験モード解析例



把握し，機器が設計上の要求性能を満たしているかどうかを容易に判断することができる。また，構造変更や据付け条件の変更などの影響を簡単にシミュレーションできるので，最適な構造を短時間のうちに決定することが可能になる。**図5**は，蒸気タービンケーシングの振動をFEMで解析した結果に基づき，振動シミュレーションシステムを用いて振動特性をアニメーションで表現した例である。

また**図6**は，タービンブレード（実翼）の振動特性を加振試験によって求め，その結果をアニメーション化したものである。本解析の場合，測定メッシュはかなり粗くとったが，振動モードはよくとらえられている。

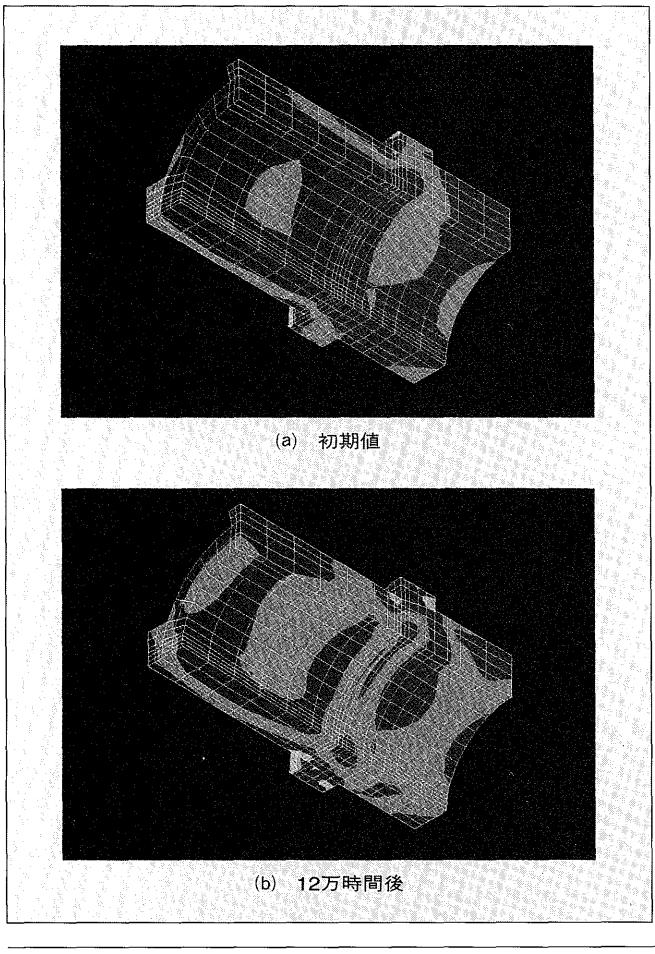
### 3.2 クリープ解析

蒸気タービンの高・中圧部など，運転中に高温にさらされる部品は，運転時間の経過とともにクリープ変形を生じる。その結果，部品の形状が変化するだけでなく，応力分布も変化する。したがって，長時間運転後の機器の信頼性を確保するためには，部品のクリープ変形を考慮した応力解析が必要となる。

**図7**は，蒸気タービンの高圧静翼ホルダのクリープ変形に伴う応力分布の変化を解析した例である。この解析では，まず定常状態における熱伝導解析を行って温度分布を求め，温度差と蒸気の圧力差に起因する定常応力の解析を行った。さらにこの状態を保持して12万時間（約14年）経過したときの解析を，材料のクリープ特性を考慮して行った。その結果，最大応力が初期の値の約60％に緩和され，また応力分布も変化していることが確認された。

クリープ解析は，特に長時間運転後の部材の変形を予測し，設計形状に反映するうえで有効である。

図7　高圧タービン静翼ホルダのクリープ応力解析例




### 3.3 運転シミュレーション

富士電機は，さまざまな運転条件における蒸気タービンの挙動をシミュレーションできるソフトウェアを開発した。[1] **図8**に運転シミュレーションソフトウェアのシステム概要を示す。このソフトウェアを用いれば，さまざまな運転条件における蒸気タービンの軸振動，伸び・伸び差，回転部と静止部のすきまの変化などを予測し，信頼性を検証することができる。**図9**は軸振動シミュレーション結果の例，また**図10**は運転中の半径すきまシミュレーション結果の例を示している。

蒸気タービンの運転中の挙動を予測するためには，タービン内の蒸気の膨張，温度分布，軸振動解析などの膨大な計算ソフトウェアが必要であるが，これらのソフトウェアがすべて1台のワークステーションに収まっている。

### 3.4 騒音解析

火力発電所の機器設計においては，環境に対する配慮から，騒音の予測も重要である。騒音の予測は従来からFEMなどの解析ソフトウェアやモデル実験などによって行っているが，最近，パソコンを用いて，三次元の音響解析を容易に行うことができるソフトウェアが開発され，発電所の騒音解析に活用されている。**図11**は，このソフトウェアを用いて発電所の三次元騒音分布をシミュレーションした例である。

図8　タービン運転シミュレーションシステムの概要

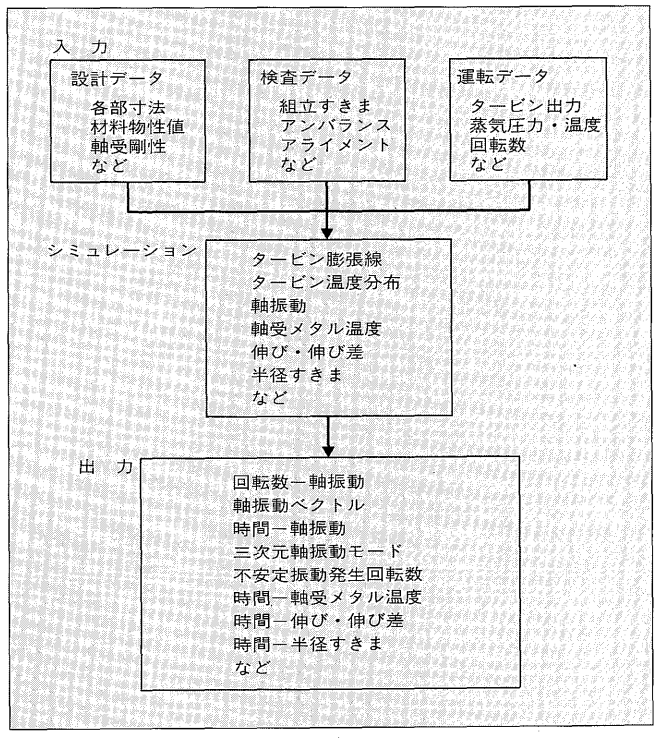


図9　タービン軸振動シミュレーション結果の例

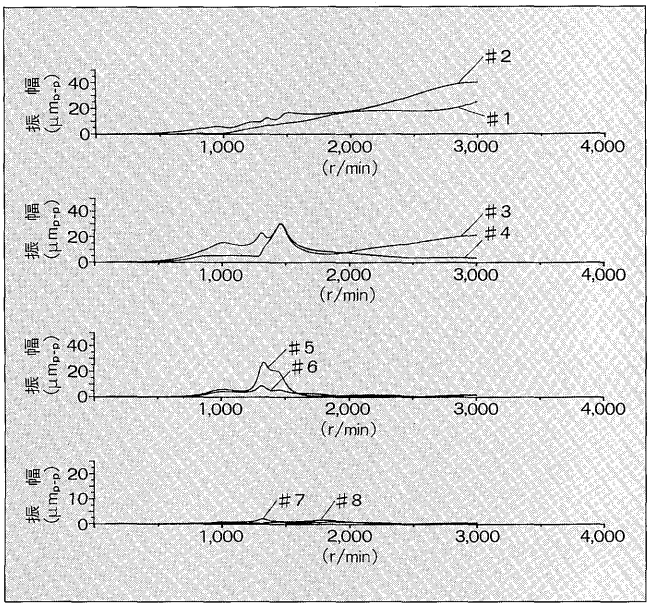
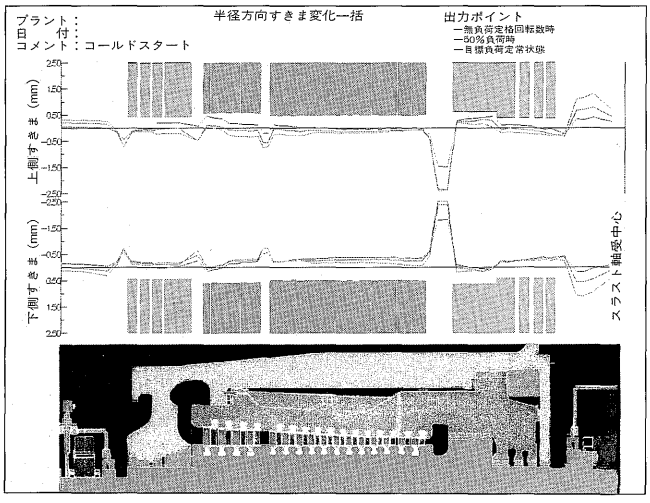


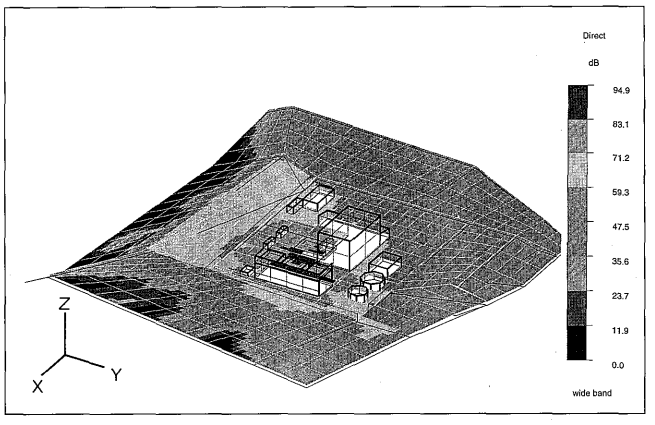

図10　運転中のタービン半径すきまシミュレーション結果の例




### 3.5　流れのシミュレーション

蒸気タービン内部の蒸気の流れは，圧縮性および粘性を伴った三次元流れであり，ナビエ・ストークス方程式に支配される。また低圧部においては，水滴の発生と分離を伴う湿り蒸気として流動し，翼列内を通過する蒸気は超音速流となる。このような複雑な三次元流れの解析を精度よく行うことは従来きわめて困難であったが，近年 CFD

図11　火力発電所の騒音分布シミュレーション例




(Computational Fluid Dynamics) の進歩により，圧縮性を伴う高マッハ数の三次元粘性流解析を精度よくシミュレーションすることが可能になった。また湿り蒸気のような二相流の解析も実用段階に入っている。蒸気タービンの流れ解析については，本特集号の別稿「蒸気タービン設計への流れ解析技術の適用」で詳細に述べるので，ここでは割愛する。

## 4　あとがき

火力発電用機器に対する解析技術の適用例について概要を述べた。

コンピュータの進化と表裏一体をなす解析技術の進歩はめざましく，従来不可欠であったモデル試験や実機試験に代わってシミュレーションによる数値実験が主流となる日もそう遠くはないように思われる。

蒸気タービンが発明されてからすでに100年以上経過し，機械としては高度に完成されたものとなっているが，火力機器をさらに信頼性および性能が高く，使いやすいものに改良していくことは，メーカーとしての永遠の使命である。富士電機はユーザー各位のご指導を得て，今後とも優れた火力機器を世の中に送り出していくために鋭意努力していく所存である。

**参考文献**

(1)　山本隆夫ほか：タービン運転信頼性予測システムの開発，富士時報，Vol.66，No.4，p.241-244 (1993)

＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。