

小林 正
T. Kobayashi

当社は、電力機器の高効率化、大容量化、高信頼性化、環境適合などの技術課題を実現するために、最先端の解析・シミュレーション技術を用いて、設計、製造、運用、保守、すべての段階で積極的に活用している。

電力分野で用いられている種々の解析・シミュレーション技術のうち、ここでは熱・流体解析、電界・磁界解析、振動・騒音・トライボロジー解析、構造・強度解析の4分野について、その動向と現状を述べ、具体的な機器への最新の適用事例について紹介する。

To achieve the required technical levels in the electric power equipment field such as high efficiency, large capacity, high reliability, and environmental adaptation, Toshiba applies state-of-the-art analysis and simulation technologies at all stages including design, manufacture, operation, and maintenance.

Among the various analysis and simulation technologies used for electric power equipment, this paper deals with those in the four categories of thermal and fluid analysis, electric and magnetic field analysis, vibration and noise analysis, and structural strength analysis. The trends and present status of these technologies are described, and the most recent examples of their application to actual devices are introduced.

1 まえがき

近年の数値解析技術と計算機の急速な進歩により、従来は実験で解明していた複雑な物理現象が数値解析で予測可能になりつつある。当社は、電力機器の高効率化、大容量化、高信頼性化、環境適合などの技術課題を実現するために、最先端の解析・シミュレーション技術を用いて、設計、製造、運用、保守、すべての段階で積極的に活用している(図1)。

電力分野で用いられている種々の解析・シミュレーション技術のうち、ここでは熱・流体解析、電界・磁界解析、振動・騒音・トライボロジー解析、構造・強度解析の4分野について、その動向と現状を述べ、具体的な機器への最新の適用事例について紹介する。

2 熱・流体解析技術

ガスタービン、水車、熱交換器などの熱・流体機械の性能を計画どおり発揮させ、さらに高い信頼性を確保するためには、内部の複雑な熱・流動現象を的確に把握または予測することが重要である。そのため機械の設計・開発段階で熱・流体解析が多用されている。

当社は、年代とともに新しい解析手法を開発・導入し、高度化と高精度化に努めてきた。計算機が未発達な60年代は、流れの圧縮性や粘性を無視した解析が行われていた。70年代になると圧縮性を考慮できるようになり、衝撃波を伴う高速気流の解析が行えるようになった。80年代に入る

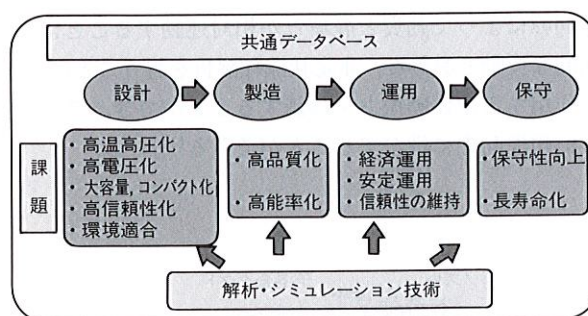


図1. 解析・シミュレーション技術の役割 電力機器の設計、製造、運用、保守、すべての段階で活用されている。

Roles of analysis and simulation technologies

と、スーパーコンピュータを手軽に利用できるようになり、流れの粘性と乱れの効果を考慮した大規模な解析が可能となった。80年代の後半から非定常流れ解析が行えるようになってきている。熱・流体の数値解法としては、時間進行法を用いた差分法が主流となっている。

このような解析技術の進歩により、予測可能な物理量が近年急激に増加してきている。

ターボ機械の性能を向上させるには、高性能翼型の開発が必要である。翼型の性能、すなわち損失を数値解析で予測するには、流れの粘性と乱れの効果を考慮することが重要である。乱流モデルを用いた三次元粘性流れ解析により翼列損失を予測した例を図2に示す。実測値と比較して、翼列損失がほぼ正しく予測されていることがわかる。当社

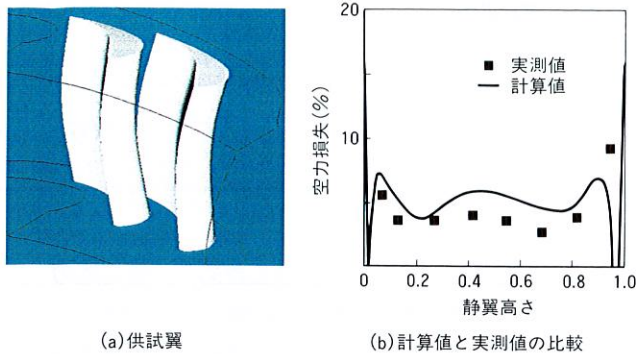


図2. 翼列流れの損失予測 数値解析の進歩により翼列損失の予測が可能となりつつある。

Prediction of cascade flow loss

では、このように実験結果との比較による入念な予測精度の検証を行ったうえで、解析技術を機器の開発に適用している。

ターボ機械の内部流れは、詳細に見ると時間的に変動する非定常流れとなっている。その要因には衝撃波の振動や翼後縁から流出する渦などによる流れ自体の変動と、ロータの回転によって動翼と静翼とが相対運動することによる周期的な変動とがある。非定常流れ解析を行うことにより、翼に作用する流体励振力を評価することができ、ターボ機械の信頼性向上に役立てることができる⁽¹⁾。

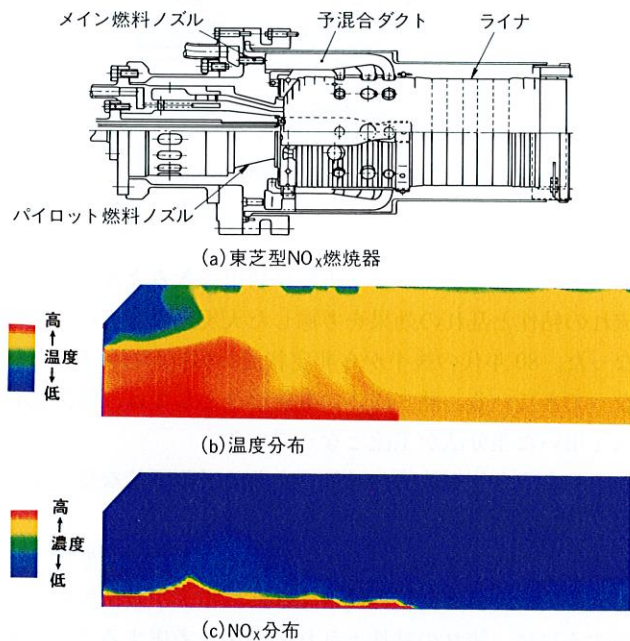


図3. 燃焼器内部流れの解析 高温燃焼域でNO_xが発生するようすが把握されている。

Combustor internal flow analysis

環境適合技術として、近年窒素酸化物(NO_x)を低減するための燃焼技術がますます重要となってきた。従来、燃焼器の開発は実験を主体に進められてきた。ごく近年になり、化学反応を伴う燃焼解析が行えるようになってきた。その結果、数値解析で計測困難な高温場の物理現象を把握し、NO_xの発生量などを予測することが可能になりつつある。燃焼器の内部流れを解析した例を図3に示す。高温燃焼域でNO_xが発生するようすがよくとらえられている。当社は、燃焼解析技術をガスタービン用低NO_x燃焼器の開発に積極的に活用している。

3 電界・磁界解析技術

電界・磁界解析は、発電機、電動機、送変電機器などの電気機械の設計・開発段階で多用されている。機械の基本的な諸特性はこの段階でほとんど決定してしまうため、電界・磁界解析はきわめて重要な基盤技術である。

電界・磁界の数値解析手法としては、解析する対象の領域を分割し偏微分方程式を離散化する“領域分割法”と、境界だけを分割する“境界分割法”が代表的である。

境界分割法は境界だけを分割すればよく、電界解析では特に“表面電荷法”として開発されてきている。当社は、表面電荷量の離散化、電位係数計算や連立方程式の解法などに多くの改良を加え、他社に先駆けて解析の高速化、高精度化に成功した。

一方、領域分割法は多媒質の問題や、磁気飽和、渦電流を含むような多岐にわたる現象を伴う磁界解析に適しており、有限要素法がその主流として定着している。磁界解析に関しては、ベクトル量を扱うことから必然的に解析が大規模になるため、変数の選びかたや計算の効率化など、いまだに多くの研究がなされている。

これらの解析技術は、電気機械や、その他多くの電力機器に適用され、開発促進や信頼性向上に寄与している。

コンバインドサイクル発電プラントの大容量化に伴い、ガスタービンの起動方式が重要な技術課題となってきた。従来はトルクコンバータを用いた起動方式が使用されていたが、容量や設置スペースなどの制約から、近年ではサイリスタ起動方式の開発が進められている。

図4は、サイリスタ起動発電機のロータの三次元渦電流解析における解析モデルを示している。発電機ロータは、くさびが不連続であるうえ、軸剛性をつり合わせるクロススロットなどが設けられているため、複雑な三次元解析となる。起動時の電機子電流に含まれる高調波成分によって、ロータ表面に渦電流が生じ、熱が発生する。したがって、この渦電流を精度良く評価することが発電機の信頼性の観点から重要である。

図5は、くさびに誘起される渦電流の解析値と実験値と

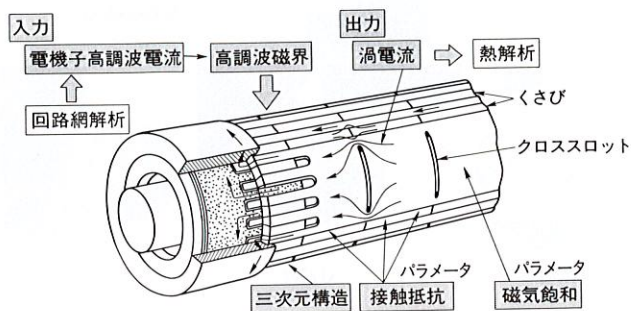


図4. タービン発電機ロータの渦電流解析モデル くさびやクロススロットなどを含む複雑な三次元解析となる。

Rotor eddy current analysis model

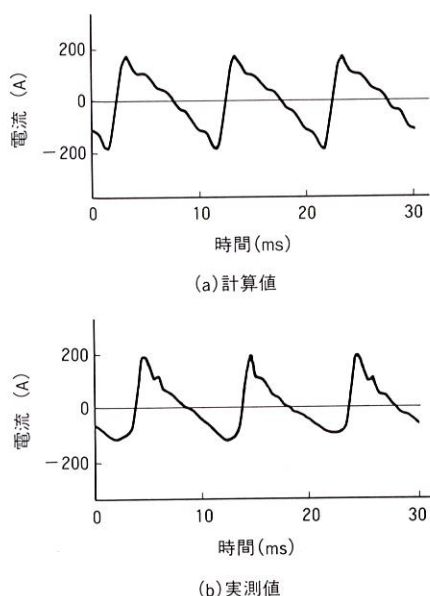


図5. くさび電流の解析値と実測値の比較 電機子の高調波電流により、くさびには鋸歯状波形の渦電流が流れる。

Comparison of measured and calculated wedge current values

の比較を示す。高調波の合成起磁力により、鋸(きよ)歯状の電流を誘起する現象が解析と実験の両者で確認され、また、良く一致していることがわかる。

4 振動・騒音・トライボロジー技術

電力機器の大容量化、高速化に伴い振動や騒音を増加する要因が多くなり、振動、騒音などへの十分な配慮が必要となる。このため、機器の実稼働時の挙動を解析・シミュレーション技術によって予測することが重要である。

60年代から70年代前半にかけて、回転機械が大型化したことにより、危険速度、オイルホイップ、ロータアンバランスなどの振動問題が発生した。そのため当社は、振動解

析、軸受潤滑解析などを精力的に行い、解析プログラムを体系的に整備してきた。その後、コンピュータの大型高速化に伴い、有限要素法による大規模な数値解析が実用化し、複雑な構造物の振動解析、騒音解析、軸受潤滑解析など多方面に利用されるようになってきている。

近年の技術課題として、複数の技術領域にまたがる複合現象の解析があげられる。

蒸気タービンのシール部分に働く流体力が原因となって発生する軸系の自励振動現象をスチームホワールと称している。蒸気の高圧・高温化に伴い、近年その兆候が実機でも経験されるようになってきている。スチームホワールの主因となるシール部の流体力については、これまで盛んに研究されてきたが、いまだ不明な部分も多い。当社は、シール部に発生する励振力を流体解析で求め、実規模の検証試験と併せて定量的な精度向上を図ることにより、軸系の安定判別を行っている。

高落差ポンプ水車の分野では、案内羽根とランナがすれ違うときに発生するケーシング内の水圧脈動が加振源となって、発電所建屋の振動を増加させる問題がある。この現象は複雑な流体力による加振現象であるため、実機で測定した水圧脈動値を用いて振動解析を行うことにより、建屋の防振対策に役だっている。

立軸型水車発電機用スラスト軸受の摩擦力と摩耗量を低減するために、当社は、新素材(四フッ化エチレン)を滑り面に用いた軸受を実用化した。このような新素材軸受を開発するには、滑り面の弾性変形を考慮した流体潤滑解析技術が必要となる。図6は、新素材の弾性変形、軸受台金の熱変形および流体潤滑を連成して解析した例を示している。新素材軸受は、油膜圧力分布が均一化されるため、従来軸受よりも高面圧化が可能となる。

制御技術との連携も最近の技術課題である。磁気軸受に

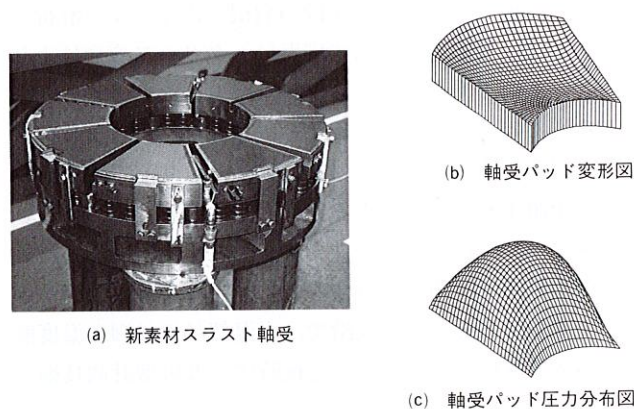


図6. 新素材スラスト軸受の潤滑解析 軸受け潤滑面の変形を考慮して軸受特性を求めている。

Thrust bearing lubrication analysis

代表されるアクティブ制振や、能動消音技術が実用化され始めてきており、今後、電力機器への応用が期待される。

5 構造・強度解析技術

構造・強度解析は、電力機器の信頼性を確保し、さらに構造の合理化や軽量化を図るうえで、欠かすことのできない重要な基盤技術である。当社は、構造・強度の数値解析手法として三次元有限要素法を広範に活用している。

機器の設計・開発段階において、構成部品に作用する応力が材料の許容値内にあることを確認する必要がある。単一の構成部品だけでなく、複数の部品の接触部に生ずる応力や、溶接箇所の残留応力など、詳細な応力解析が近年行えるようになってきている。

当社は、最新技術を結集して、タンデム型1,000 MW級タービン発電機の開発を行った。発電機ロータは、ロータ本体、コイルおよびこれを保持するくさびやエンドリングなど、異種材料から成る複数の部品で構成されている。各部品間の接触部の応力とすべり状態を詳細に解析し⁽²⁾、さらに実機規模の検証試験を実施することにより、発電機ロータの健全性評価を完了した。

電力機器の損傷は、疲労現象に起因するものが数多い。近年は、構成部品の局所的な塑性応力やひずみによるき裂の発生と進展を考慮した疲労や破壊解析が行われており、疲労寿命の予測精度が著しく向上している。

発電プラントの熱効率を向上するため、ガスタービンや蒸気タービンはますます高温化される傾向にある。高温化に伴い、材料のクリープ領域で使用される構成部品も数多い。従来は材料が弾性変形するものとして応力を評価していたが、数値解析技術の進歩により、最近ではクリープ変形による応力緩和を考慮した解析が行えるようになってきている。その結果、実際の物理現象により近い条件下でのクリープ寿命評価が可能となっている。

図7に、蒸気タービン高圧段の羽根とホイールを解析した例を示す。羽根危険断面の応力は、クリープ変形により時間とともに平滑化され、安定した応力に落ち着くことがわかる。このように羽根とホイールの接触応力とクリープ応力を同時に連成解析することにより、クリープ寿命を精度良く予測することができる。

ガスタービンは過酷な条件で運転され、高温部品の材質劣化が比較的短時間に進行するため、余寿命評価技術がきわめて重要である。設計段階で、高温部品の詳細な温度解析と熱応力解析が行われる。定検時に、非破壊計測技術を

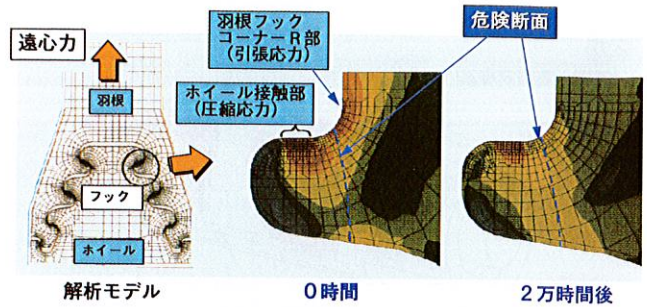


図7. 蒸気タービン羽根とホイールのクリープ応力解析 羽根危険断面のクリープ応力は時間とともに平滑化される。

Creep stress analysis of steam turbine blade and wheel

を用いて、高温部品の金属組織の変化を観察する。当社は、温度と熱応力および金属組織の変化から、高温部品の余寿命を予測する技術を新たに開発した⁽³⁾。金属組織と温度・応力の複合則として余寿命を評価することにより、予測精度は飛躍的に向上し、部品の延命化が可能となった。

6 あとがき

以上述べたように、数値解析で複雑な物理現象の解明と機器の性能予測が可能となり、実験では計測困難なデータを入手できるようになってきている。

解析・シミュレーション技術の適用にあたって、実測結果との比較による予測精度の検証がきわめて重要である。

当社は今後も、実績データを蓄積するとともに、解析・シミュレーション技術をさらに高度化、高精度化し、それを積極的に活用することにより、電力機器のいっそうの高効率化、高信頼性化、環境適合に努めていく所存である。

文献

- (1) T. Tanuma, et al: Unsteady Navier-Stokes Analysis of Transonic Cascade Flow in Turbomachinery, 5th Int. Symp. on Computational Fluid Dynamics, p.217 (1993)
- (2) 永田晃則, 他: フレッチング疲労強度に及ぼす接触材の影響とその寿命評価法, 日本機械学会論文集(A編), 58, 553, p.1561 (1992)
- (3) 吉岡洋明, 他: ガスタービン高温部品の余寿命診断技術, 日本ガスタービン学会, ガスタービンセミナー・第24回, p.29 (1996)



小林 正 Tadashi Kobayashi, D.Eng.

重電技術研究所 コンバインドサイクル機器技術開発部部长, 工博。ガスタービンの研究開発に従事。日本機械学会, 日本ガスタービン学会, ターボ機械協会会員。
Heavy Apparatus Engineering Lab.