

振動騒音問題は、電動機やタービン発電機などの回転機器、送風機などの流体機器、エレベーターや列車などの交通機器の開発段階で特に重要な課題である。このような機器の開発に、設計段階からシミュレーション技術を用い、性能改善に役立てられることが多くなってきた。当社においても、①電磁加振力から構造系の振動応答、周囲音場までを統合して評価する電動機のCAE (Computer Aided Engineering) 解析、②タービンや発電機軸系の振動解析、③エアコン送風機の低騒音設計、④アクティブ騒音制御、⑤音響伝播(ば)シミュレーションソフトウェアなどの振動騒音シミュレーション技術を開発し、より信頼性の高い製品の開発に役だてている。

The control of vibration and noise is one of the most important problems in the development of mechanical systems such as rotary machines, fluid machines, and transportation machines. Simulation software is being increasingly used to solve this problem, and has become a powerful design tool. Toshiba has also developed simulation techniques to realize high-quality, reliable products that run more quietly and vibrate less.

This paper focuses on the technical trends in this field and presents some examples of practical applications. These include the control of electromagnetic noise in electric motors, control of vibration in steam turbine rotor shafts, control of electric fan noise in air conditioners, active noise control of vibrating plates, and simulation of acoustic propagation caused by leakage inside a steam generator.

1 まえがき

振動騒音問題は、機械の動的な特性によるものであるため、製品設計の段階では顕在化せず、試作や製品化の段階で機械を動かして初めて問題になることも多い。特に、最近では多くの機器で小型・薄肉・軽量化が進み、またインバータによる高速回転化が図られているので、従来では問題にならなかった機器でも振動騒音問題が発生することがある。しかし、試作の繰返しを少なくし、製品開発サイクルの短縮を旨とするためにも、設計段階で振動騒音の性能を予測して不具合を未然に防止することが求められている。

このような要求を満たすものとして、振動騒音のシミュレーション技術が威力を発揮してきている。そして単に低振動、低騒音設計のためだけでなく、振動騒音の新しい分野であるアクティブ制御装置の開発や、音響を利用した計測装置の開発にも、シミュレーション技術は欠かすことのできないツールとなっている。

ここでは、上述のような技術動向の下、当社の振動騒音シミュレーション技術の開発と応用の具体例を紹介する。

2 回転機の振動、騒音シミュレーション

2.1 電動機電磁騒音のCAE⁽¹⁾

電動機では、近年の小型・軽量化に伴って構造全体の剛

性が低下し、電磁騒音が発生しやすくなっている。特に、インバータ運転時は回転周波数範囲が広く、構造系の固有振動数を必ず通過することから共振現象が生じ、電磁騒音が大きく発生する場合がある。そこで、CAEを用いて電動機の振動発生源の加振力から騒音の放射までを総合的に解析する技術を確立した。

このCAE解析では、図1に示すような磁束解析により、モータとステータ間に作用する電磁力高調波分布を求める。これを基に、運転中の温度上昇やフレーム圧入による変形、接触剛性の影響も計算モデルに組み込んで構造系の振動解析を有限要素法で行い、運転中の振動応答解析から三次元空間に放射される騒音分布を計算する。

図2に振動解析結果の例を、図3に電動機周囲の騒音分布の計算結果を示す。このような解析の結果から、電磁力モードと構造系の固有振動モードとの共振を回避した構造などを採用することにより、共振の大きなピークをなくすことができ、従来機に比べて5 dBの騒音低減を実現している。

2.2 大型回転機器の軸振動シミュレーション⁽²⁾

蒸気タービン、ガスタービンなどの回転機械には、種々の軸振動が生ずる。このような軸振動現象の解析には、従来から有限要素法や伝達マトリックス法による振動解析プログラムが用いられてきた。ところが、従来の解析手法では軸受アライメント(軸受の直線性)が変化したときの影響

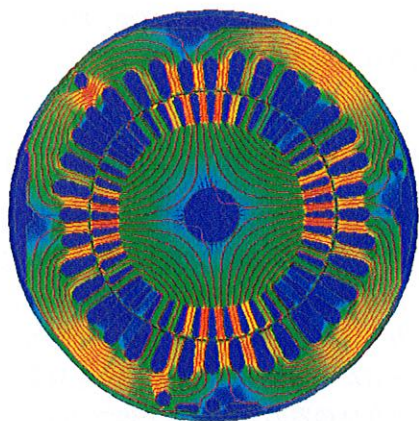


図1. 固定子と回転子の磁束の流れと分布 有限要素法により電磁騒音の原因となる固定子と回転子間の電磁加振力の強度分布を解析した図で、赤くなるほど磁束の強さを表している。

Distribution of magnetic flux in cross section of rotor and stator

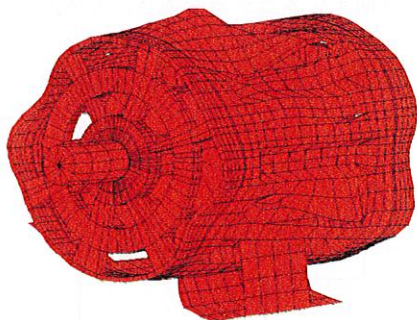


図2. フレームの振動変形モード 電磁力により加振されたフレームや固定子を振動解析することで、変形のパターンをみることができる。

Vibration mode of motor frame

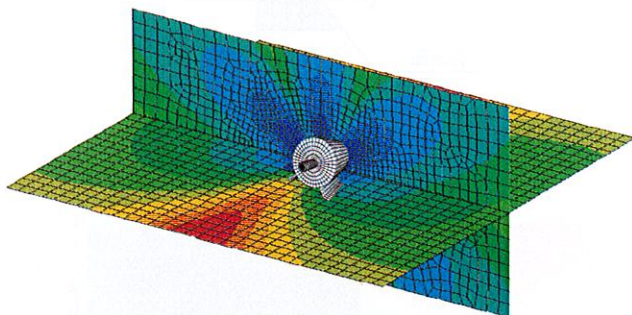


図3. 電動機周囲の騒音分布 振動解析データを基に、境界要素法により電動機の騒音分布が精度よく予測できることを確認した。

Noise distribution around electric motor

まで評価できるものはあまりなかった。しかし、実際の大

型蒸気タービン・発電機では、起動前と運転中の温度差が大きくなる高圧タービン部や、運転状態で真空荷重を受ける低圧タービン部などのように、運転状態に入って軸受アライメントが変化することが一般的である。したがって、その影響を定性的、定量的に把握することは、振動の増大を防ぎ回転機械を安定的に運転するうえで、重要な技術となる。

そこで、アライメントの変化に対する振動解析機能も組み込んだ軸系の振動特性の解析プログラムを開発した。解析方法としては、アライメント変化による軸受荷重の変化を、繰返し計算により軸受油膜力とつり合わせて軸受動特性を求め、ロータや軸受台の振動特性に加えることで、全体軸系の危険速度やつり合い応答などを計算している。

このソフトウェアは、データ入力・解析・出力が一連にできるパッケージプログラムとしてパソコン上に構築されており、出力結果は図4のような振動アニメーション表示などが用意されている。ミスアライメント量が増加したときなどの解析結果は、図5に示す大型蒸気タービン軸系を模擬した軸振動試験装置で検証しており、実験結果と一致する結果を得ている。

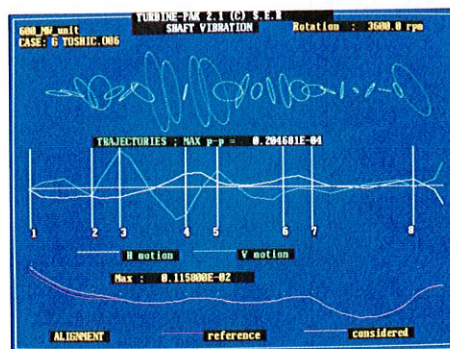


図4. 回転機振動特性解析結果の表示例 データ入力、解析、結果出力を一つのパソコンで行うことができる。

Output display of calculation results for rotor shaft vibration

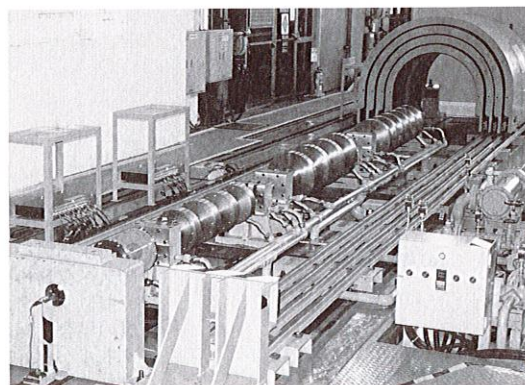


図5. 大型回転機試験設備 3ロータ6軸受で構成されており、種々の振動問題に応じた試験が可能である。

Test rig for rotating machinery

3 送風機の低騒音設計⁽³⁾

エアコンの送風機は、居住環境の快適性を保つためにもっとも静粛性が求められるものの一つである。エアコン室内機の送風機には、図6に示すように横流ファンが用いられているが、ファンの羽根が等ピッチの場合は翼ピッチ音が大きく、聴感上も問題となる。このため、従来は乱数を用いたランダムピッチが採用され、ピークのスペクトルを分散することが行われていた。しかし、分散が十分でない場合は音の濁りとして聞こえるなどの問題があり、最適なピッチ配列の決めかたが課題となっていた。そこで翼のピッチをホワイトノイズに近い擬似ランダム系列で設計して、できるだけ顕著なピークが出ないようにすることを検討した。

図7は等ピッチの場合と擬似ランダム系列翼の場合の翼ピッチ音のスペクトル解析シミュレーション結果である。元の際だったピークのスペクトルが良好に分散されることがわかる。このようなシミュレーションに基づいて設計さ

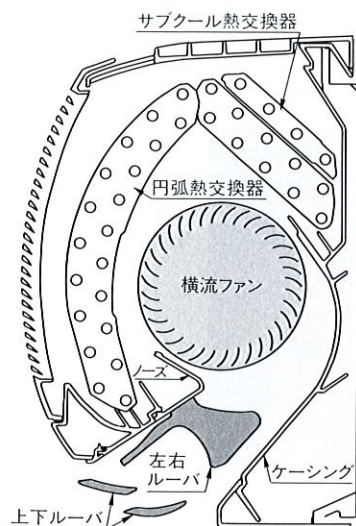
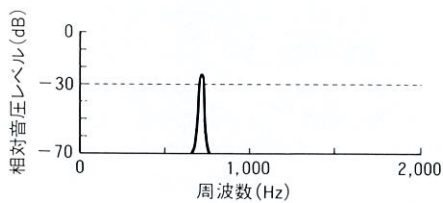
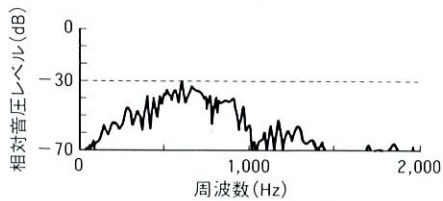


図6. エアコン室内機の断面 横流ファンに翼ピッチ音が発生しない擬似ランダム系列翼を採用している。
Cross-sectional view of indoor air-conditioner unit



(a) 等ピッチ



(b) 擬似ランダム系列翼

図7. ランダムピッチによる翼ピッチ音のスペクトルの分散 擬似ランダム系列翼の場合は元のスペクトルが良好に分散されている。

Calculation results for suppression effect of blade passing tone

れた翼型のファンは、聴感上も良好で、現行のエアコン送風機に採用されている。

4 アクティブ騒音制御とシミュレーション

騒音の分野では、元の騒音に別の音を加えて打ち消す、いわゆるアクティブ騒音制御が盛んに研究されている。当社でもアクティブ騒音制御冷蔵庫の製品化以来、この分野の研究に注力してきた。従来のアクティブ騒音制御では、ダクトなどを音が伝播する一次元伝播音を対象としたものが多いが、現在は機器の外側周囲全体での消音や敷地境界にある塀を透過する音の低減などを目的とした、三次元空間での制御が開発課題となってきた。

三次元空間でのアクティブ騒音制御では、局所的な空間だけでなく機器周囲全体で消音する必要がある。そこで、三次元での制御アルゴリズムの性能を評価するため、種々のモデルでアクティブ制御の音場解析シミュレーションを行っている。図8は200 Hzで振動している壁面からの放射音を、その壁面上にスピーカを置き、発生源で逆相の音を出して消音するように制御したときの計算モデル、また、図9はその壁面から前方1 mまでの水平面内で計算した制

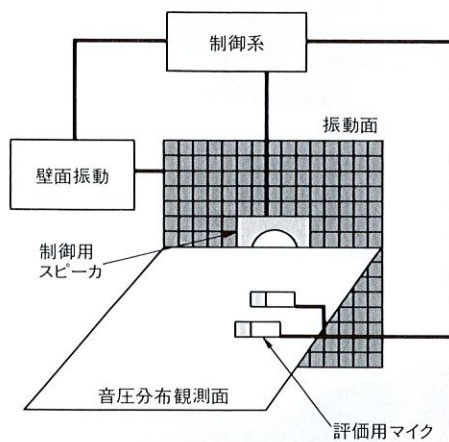


図8. 振動放射音のアクティブ騒音制御計算モデル 振動板と制御用スピーカとが逆相の音を出すように制御する。
Calculation model for active noise control of vibration plate

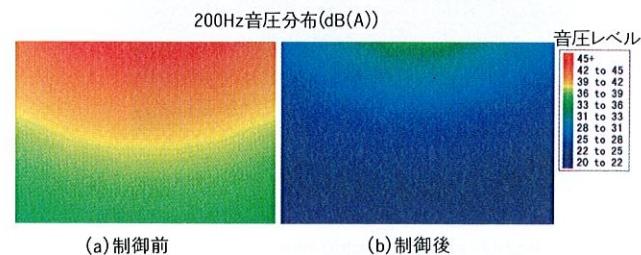


図9. アクティブ騒音制御による音場の計算結果 制御時には周囲全体で消音できており、振動面から1 m離れたところでは15 dB低下している。

Comparison of acoustic field around plate with and without control

御 ON/OFF 時の音圧分布である。図9から、制御時には壁面周囲全体で消音できていることがわかる。このような解析を通じ、現在、三次元空間での騒音制御技術の開発をさらに進めている。

5 音響伝播シミュレーション⁽⁴⁾

三次元空間に広がる音の伝播を、音の回折や散乱、反射などの現象も含めて精度よく計算するには、一般に境界要素法が用いられる。しかし、従来の境界要素法は正弦的な振動をする音波を計算の前提としており、時々刻々ランダムに変化する音や衝撃音など、非定常な現象のシミュレーションを行うことができないという問題があった。そこで、

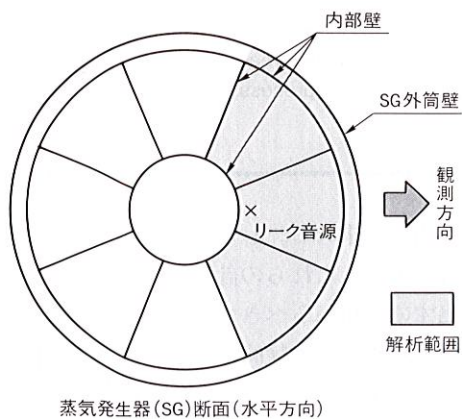


図10. 蒸気発生管での漏えいの計算モデル 漏えい音波は内部隔壁や配管で反射されながら外壁に到達する。

Calculation model for acoustic propagation inside steam generator

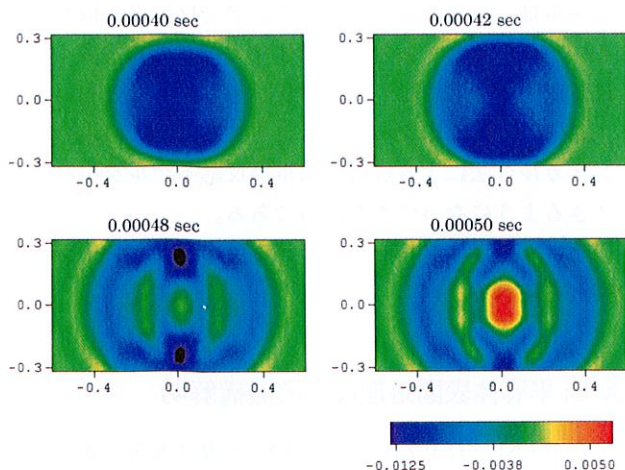


図11. 音波で加振される最外壁の振動分布の変化 壁面の振動パターンの時間的変化を示す。音波が壁面に到達して振動が伝わっているようすがよくわかる。

Time history of shroud vibration pattern forced by acoustic waves

時系列解析を組み込んで非定常現象も扱えるようにくふうした境界要素法の計算コード“SOSUM”を開発した。SOSUMは、一般の音響解析のほかにも音響信号計測による漏えい検出システムの開発などにも役だてられている。

図10はSOSUMを蒸気発生器伝熱管破損時の漏えい圧力波伝播シミュレーションに用いたときの計算モデルで、図11は蒸気発生器内部の漏えい音源から出た音波が最外壁に到達した後の壁面振動を計算したものである。ここでは、SOSUMによる音響伝播解析と、音により加振される壁面振動を連成させて解いている。このような計算シミュレーションは、検出器の配置や信号処理系の検討に大いに役だっている。

6 あとがき

振動騒音の低減は、機械の信頼性と品質を左右する重要な要素であり、また環境保護の立場からもその重要性がますます高まっている。一方、製品開発の効率化を図るうえでは、製品設計段階から十分に振動騒音の評価を行い、得られた結果を設計に反映していく必要がある。このような点からも、シミュレーション技術の役割が重要になってきている。当社では、振動騒音に関するシミュレーション技術をいっそう発展させ、より信頼性の高い製品の開発に役だてていく所存である。

文献

- 野田伸一, 他: 小型電動機の電磁騒音の研究, 日本機械学会論文集, 61, 591 (1995)
- 平野俊夫, 他: マルチスパンロータの軸受アライメントが振動に与える影響, 日本機械学会 D&D'96 (1996)
- 林 卓郎, 他: 周波数変調による横流ファンの低騒音設計, 日本機械学会論文集, 62, 601 (1996)
- 青木俊夫, 他: FBR・SG伝熱管漏洩検出系の開発(4), 日本原子力学会講演論文集 (1996)



林 卓郎 Takuro Hayashi, D.Eng

研究開発センター 機械エネルギー研究所主任研究員, 工博。
機器の振動騒音解析の研究開発に従事。
Energy & Mechanical Research Labs.



野田 伸一 Shinichi Noda

重電技術研究所 産業電機技術開発部主務。
電気機械の構造解析の研究開発に従事。
Heavy Apparatus Engineering Lab.



平野 俊夫 Toshio Hirano

重電技術研究所 回転機器技術開発部。
タービンの開発・研究に従事。日本機械学会会員。
Heavy Apparatus Engineering Lab.