

# 製品開発を支える振動・音響解析技術

柳舘直成\* 江崎雄也\*  
 和田拓真\*  
 八重樫直樹\*

Vibration and Acoustic Analysis Technologies to Support Product Development

Naomichi Yanagidate, Takuma Wada, Naoki Yaegashi, Yuya Ezaki

## 要旨

技術開発によって製品性能は年々向上し、モータなどの動力機器の高出力化によって、振動源の力(加振力)が増加する傾向にある。また、小型化及び軽量化が求められている。加振力が増加すること、軽量化することで、製品の振動や騒音の発生リスクが増加する。そこで、振動解析や音響解析などの数値解析を実施して、製品の振動や騒音を予測し、振動や騒音低減の対策を講じている。また、試作品に対して振動測定、音響測定を実施することで、課題を抽出し、対策箇所を特定している。これらの取組みによって、効率的で効果的な設計を実施している。

三菱電機での製品開発への振動・音響解析技術の最新の

代表的適用事例として、次の三つが挙げられる。

### (1) 振動解析技術

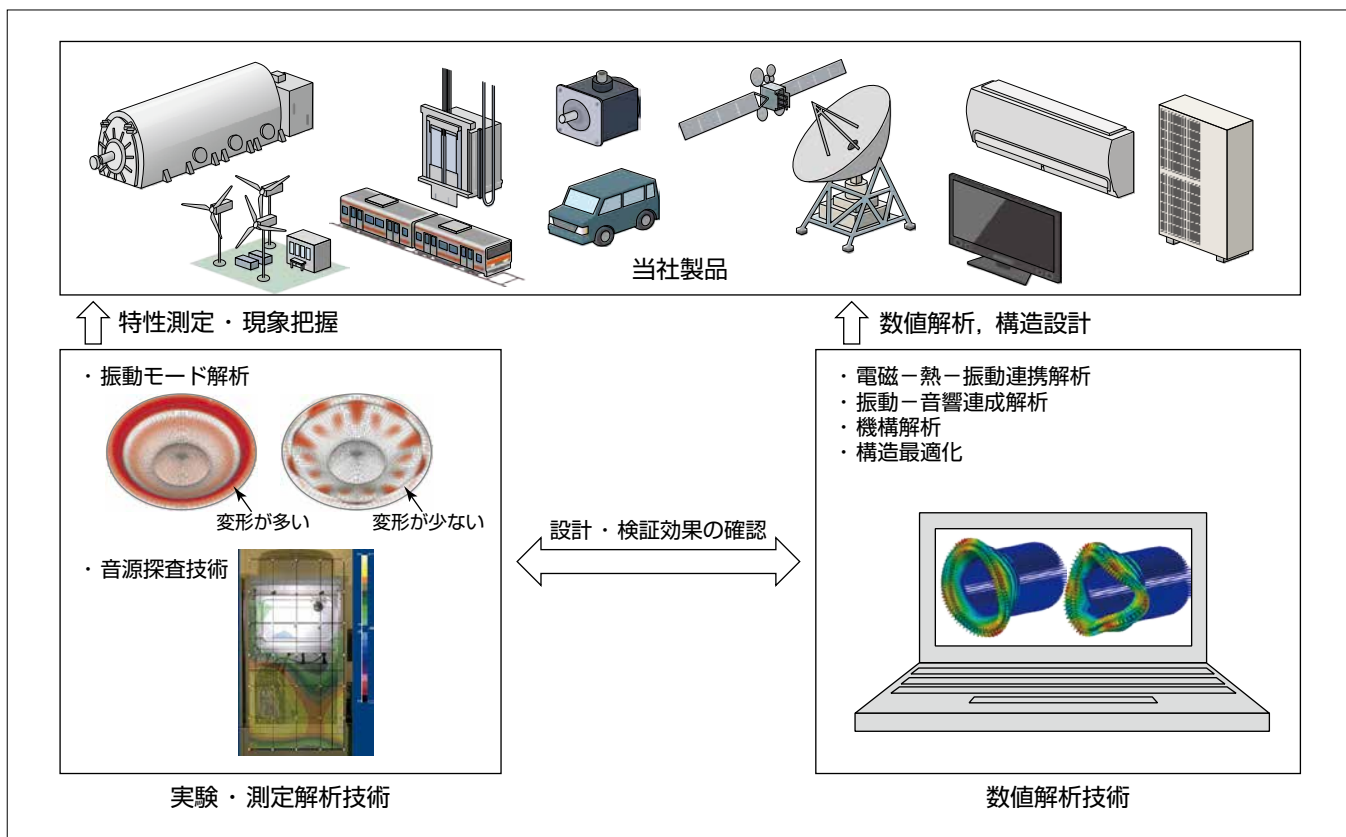
従来は扱えなかった大規模モデルで複数の物理現象をモデル化した数値解析技術を発電機に適用した。

### (2) 音響実験技術

物理現象が複雑で解析が困難な製品に対して、実験的なアプローチで空調機室外機の騒音を改善した。

### (3) 音響解析技術

振動と音を連成させた数値解析を用いて製品構造と振動と音の関係を予測する技術をスピーカーに適用し、高音質なスピーカーを設計した。



## 製品開発を支える振動・音響解析技術

振動・音響解析技術は、製品品質の根幹を成す基盤技術であり、当社の製品開発を支える技術である。実験・測定解析技術で製品やプロトタイプタイプの振動・音響特性を測定し、振動や騒音を低減するために構造変更すべき箇所を特定する。構造変更案を数値解析技術で検証し、振動や騒音の低減効果と対策コスト(費用対効果)などから最も有効な構造を求める。そして、構造変更案の効果を試作品で実験検証し、製品に適用する。

## 1. ま え が き

技術開発が進み、製品性能が年々向上していることで、製品の動力源の加振力が増加している。また、製品の軽量化や小型化が進んだことで、製品の振動や騒音の発生リスクが増加しているため、振動や騒音の対策が不可欠である。そこで、振動解析や音響解析などの数値解析を実施して、製品の振動や騒音を予測し、振動や騒音の低減対策を講じている。また、試作品に対して振動測定、音響測定を実施し、課題を抽出し、対策箇所を特定している。これらの取組みによって、効率的で効果的な設計を実施している。

本稿では、振動解析技術、音響実験技術、音響解析技術の三つに焦点を絞り、技術概要と製品への適用事例について述べる。

## 2. 振動解析技術

### 2.1 電磁-熱-振動大規模連携解析技術

製品運転時の振動は複数の物理現象が連動して生じる。例えば、モータでは回転子が回転することで電磁場が発生する。電磁場は回転移動しながら固定子に電磁力を作用させ、固定子が振動する。また、固定子に電気が発生すると固定子の温度が上昇し、固定子材料の物性値が変化して固定子の固有値が増減するため、振動形状が変化する。つまり、電磁、熱、振動の3種類の解析を考慮しなければ正確な振動を予測できない。ただし、電磁、熱、振動は物理場が異なるため解析方法が異なり連成解析が困難、発電機全体解析は解析モデルの規模が大きすぎて解析できないといった問題があった。

そこで、発電機やモータの挙動を高精度に計算するため、製品全体を大規模解析モデル化した。電磁界解析で求めた電磁力分布や電磁損失分布を、そのまま入力として構造モデルにマッピングし、振動応答や温度分布を計算できる電磁-熱-振動大規模連携解析技術を開発した。この技術では、独自のメッシュ分割と18倍の計算速度を実現する領域分割法を採用することで、大規模解析モデルの高速化と計算精度確保を可能にしている。

### 2.2 タービン発電機への解析適用事例

発電機の運転状況を詳細に把握するため、タービン発電機固定子コイルエンド部の解析を、電磁-熱-振動大規模連携解析技術を用いて実施した。大規模連携解析技術の適用イメージを図1に示す。

発電機の部品サイズは最大数メートルと大きく、また、効率や信頼性に影響が大きい固定子は形状が複雑で部品点数が多いため、従来の解析では解析モデルを簡略化して作成する必要があり、電磁損失や、温度分布や変形を詳細に把握するのは困難であった。今回、図2に示すように、コイル内銅素線のような従来の解析では簡略化する部位も

詳細にモデル化を行い、大規模連携解析を実施した。メッシュ数は電磁界モデル3,000万、熱流体モデル10億、構造モデル1,000万となった。

電磁界解析で得られた全電磁力を構造モデルにマッピングすることで、振動応答解析を実施した結果の一部を表1に示す<sup>(1)</sup>。表のモード形状は全体解析からコイルだけ抽出した結果であり、実機試験結果も併せて示している。表から、この解析と実機試験結果の誤差は4%以下であり、振

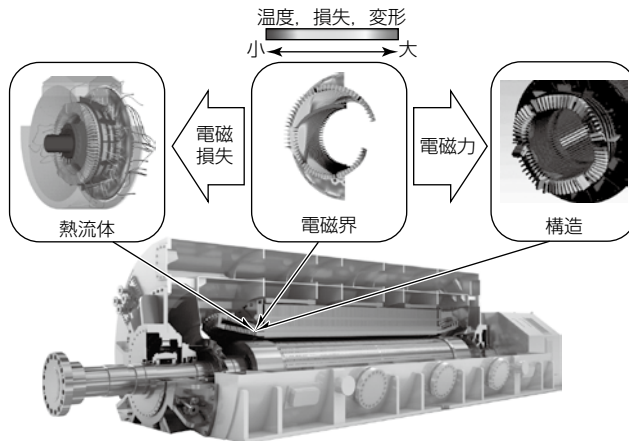


図1. 大規模連携解析技術の適用イメージ

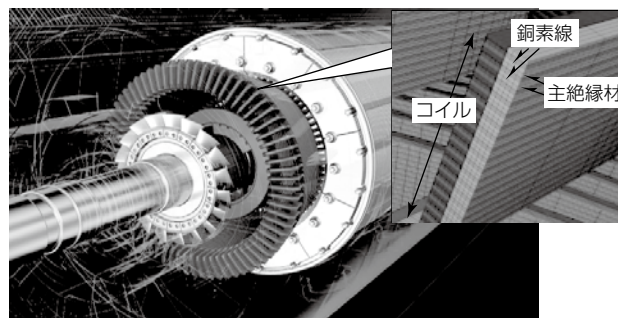




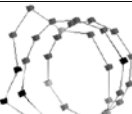
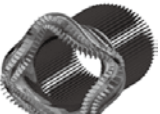


図2. 解析モデルの要素分割イメージ

表1. 振動応答解析結果

| モード形状 | 固有振動数 (Hz (誤差%))  |  |
|-------|---|--|
|       | 実機試験  | 解析   |
| 楕円    | <br>56  | <br>56.4 (0.7)  |
| 三角形   | <br>92  | <br>88.9 (-3.4) |
| 四角形   | <br>121 | <br>122.2 (1.2) |

動応答が高精度に計算できることが確認できた。

今後、固定子の別部位又は回転子の解析も同様に行う。また他製品の解析検討時にもこの技術を用いることで当社製品への技術展開を図る。

### 3. 音響実験技術

#### 3.1 遮音設計

騒音を簡単に低減する方法として、機器を囲い遮閉する防音カバーがある。機器全体を遮閉すると大きな騒音低減効果が望めるが、機器の冷却、低コスト、省スペースを考慮した遮音設計が求められる。

遮音設計で騒音低減を効率的に行うには、騒音の原因を把握して、騒音源や騒音の卓越する箇所に対策を講じることが効果的である。騒音は、動力源からの直接音、部品の共振による振動、流体の乱流などが原因となる。ここでは、空調機の室外機を対象として、騒音の発生原因を特定し、騒音源に対して適切な遮音設計を行った事例について述べる。

#### 3.2 室外機騒音の原因分析

空調機の室外機を対象とした騒音の原因分析事例を述べる。図3に示すように室外機は空気と冷媒を熱交換する送風室と、圧縮機や膨張弁などの冷媒回路部品を収納した機械室で構成される。騒音源は送風室のファンと機械室の圧縮機に分類できる。各装置を単体運転したときの騒音から寄与率を算出できるが、熱交換の都合上、圧縮機単体を運転することは難しい。そこで、室外機全体の騒音からファン単体運転の騒音の差をとることで、送風室と機械室の騒音の寄与率を求めた。

室外機の音響パワーレベル(PWL)と寄与率の例を図4(a)に示す。寄与率は送風室が55%、機械室が45%であり、寄与率に大きな差はないため、送風室と機械室の両方の騒音を低減する必要がある。

送風室の騒音はファンの送風音、機械室の騒音は、①圧縮機自体から放射される騒音と、②圧縮機を支持する防振ゴムや配管から筐体(きょうたい)に振動が伝搬して発生する騒音とに分類できる。高周波数は①の成分が大きく、低周波数は②の成分が大きい傾向にある。機械室音を1/3オクターブバンドの周波数帯域の800Hz帯域以下と1kHz帯域以上に分けた図4(b)に示すように、低い周波数と高い周波数の寄与の差が小さいため、機械室の騒音を低減するためには全域の対策が必要である。

送風音はファン羽根枚数と回転数に比例した周波数で発生する騒音と、風の流れの乱れや羽根の回転速度に応じて発生する渦による乱流の騒音が支配的である。そこで、送風音に対しては、乱流が発生しにくい部品配置、ファン径拡大による回転数低減を行った<sup>(2)</sup>。

圧縮機自体から放射される騒音には、圧縮機を遮閉して騒音を外部に漏らさないようにする遮音設計が有効である。

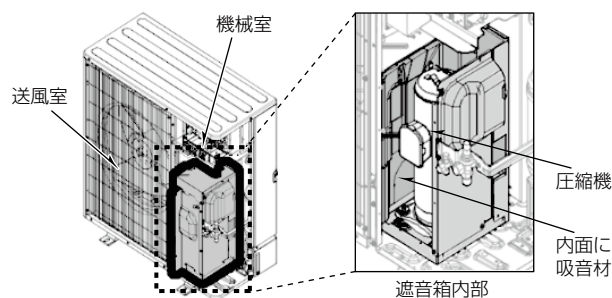


図3. 室外機と遮音箱

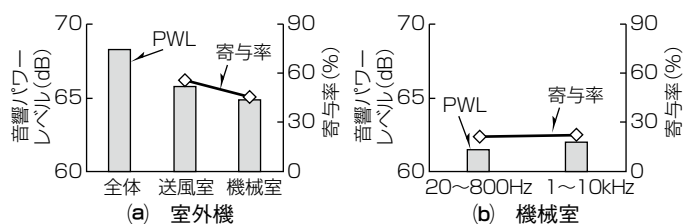


図4. 音響パワーレベルと寄与率

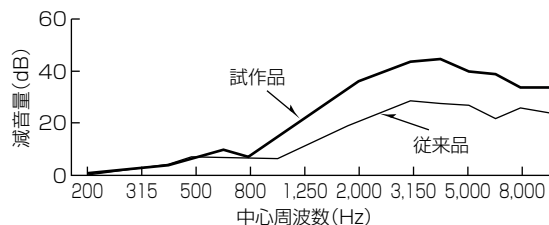


図5. 遮音構造の減音量の比較

また、圧縮機の支持部から伝搬する騒音は防振ゴムや配管構造の変更などで、振動を他の部品に伝搬させないための防振設計が有効である。このように騒音の原因を分析し、製品に対して有効な対策を講じている。

#### 3.3 遮音設計の取組み

圧縮機から放射される騒音を低減するため、圧縮機の遮音方法を検討した。従来、圧縮機に吸音材とゴムを巻きつけていたが、圧縮機を箱体で囲う構造にした(図3)。遮音箱の材質と寸法、隙間量、内部の吸音率から、遮音箱内の残響を考慮した構造設計を行った。また、遮音箱内部は残響によって音圧が増加するため、吸音材を併用した。

試作遮音箱と従来品の比較のため、減音量を計測した。圧縮機容器に加振器を設置し、容器をスピーカー音源とし、遮音構造の有無の音圧を無響室で計測した。減音量の計測結果を図5に示す。減音量と圧縮機の騒音特性から、1kHz帯域以上の騒音を従来よりも10dB低減可能にする結果を得た。

送風音や防振ゴムの形状設計などの対策内容を含めて、全体音で10dBの低減効果を得ている<sup>(2)</sup>。

### 4. 音響解析技術

#### 4.1 振動-音響連成解析技術

音響解析は空間内での音の発生や伝搬の様子を求める解

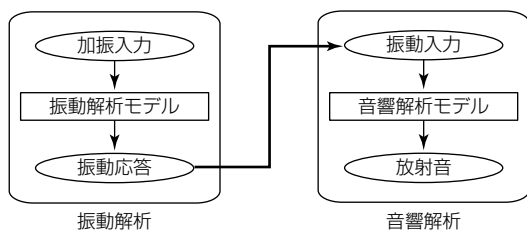


図6. 振動-音響連成解析

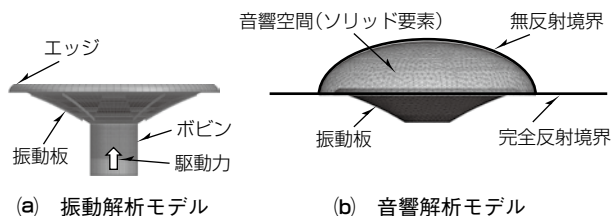


図7. 音響解析モデル



図8. リブ付き振動板

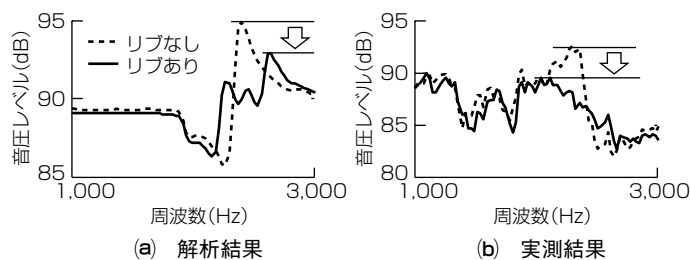


図9. 音圧の周波数特性

析技術で、無響室や残響室といった特殊な音響測定環境を用いることなく製品の音響特性の把握が可能になる。

機器が発する音には振動音と流体音とが存在し、このうち、加振入力を受けた機器の振動で発する振動音を予測する場合、図6に示す振動と音響との連成解析が有用である。

次に、オーディオスピーカーの振動板設計を事例に振動-音響連成解析技術について述べる<sup>(3)</sup>。

#### 4.2 ウーファの高音質化

一般的なスピーカーは振動板が振動することで音が発生する。再生音の周波数特性が広帯域に平坦(へいたん)であるほど、収録音の再現性が良いとされている。しかし、高周波数帯域では振動板の共振によってピークやディップが生じるため、振動-音響連成解析を活用し、周波数特性を平坦化する振動板形状を求めた。

有限要素法によって構築した振動解析モデル及び音響解析モデルを図7に示す。振動解析モデルはシェル要素でモデル化し、エッジ端部を固定境界とした。振動板に用いられているNCV(Nano Carbonized high Velocity)材料はカーボンナノチューブを含む樹脂材料であるため、振動板成型時の樹脂の流れによってヤング率が変化する。そこでこの解析では、図8に示すように、樹脂の流動方向に応じてヤング率を定義した。磁気回路によって与えられる駆動力を入力し周波数応答解析によって振動板表面の振動応答を求めた。

音響解析モデルはソリッド要素でモデル化し、開放空間を模擬するための無反射境界、及びバッフル板を模擬するための完全反射境界を設定した。ソリッドモデルには空気物性値を定義し、求めた振動板の振動応答を入力条件として放射音を解析した。

周波数特性にピークを発生させる原因となる振動板の分割共振を抑制する構造として、振動板にリブを設け、その本数、長さ、断面形状を変数として解析を行い、最適なり

ぶ形状を導き出した。スピーカーの中心軸上1m離れた位置での音圧の周波数特性を図9に示す。リブを設けることで、振動板の共振による振幅増大が抑制され、周波数特性上のピークレベルが低減することが分かる。また、実機でもリブ有無で解析同様のピーク低減効果を得た。

前述したウーファを始めとして、トゥイーター及びサブウーファースピーカーなど、この解析による振動板設計を多様なスピーカー設計に展開している。

### 5. む す び

振動解析技術、音響実験技術、音響解析技術の三つの技術の製品開発への適用事例について述べた。振動解析技術では、従来は扱えなかった大規模モデルで複数の物理現象を考慮した解析技術を発電機に適用した事例について述べた。音響実験技術では、物理現象が複雑で解析が困難な製品に対して、実験的なアプローチで空調機室外機の騒音を改善した事例について述べた。音響解析技術では、振動と音響の連成解析を用いて製品構造と振動と音の関係を予測する技術をスピーカーに適用した事例について述べた。これらの技術を用いて、高品質な製品を開発している。

### 参 考 文 献

- (1) 長嶋孝明, ほか: タービン発電機の大規模構造解析, 日本機械学会 第30回計算力学講演会 (2017)
- (2) 内野進一: 低騒音ATWヒートポンプ, 三菱電機技報, 91, No.10, 550~553 (2017)
- (3) 神田穂高, ほか: 音響解析技術を用いたスピーカーの分割共振を抑制する構造の開発, 日本機械学会Dynamics and Design Conference 2014 講演論文集655 (2014)