

# 物理センサーの限界を突破する バーチャルセンシング技術

Virtual Sensing Technology: Breaking Limits of Physical Sensors

\*設計技術開発センター

## 要 旨

製品競争力向上と市場投入の迅速化に向けて、高度な数値解析を活用した設計と、評価試験レスの実現による開発リードタイム短縮が求められている。しかし、複雑化する昨今の製品を数値解析だけで設計することは難しく、計測点が数百点に及ぶ評価試験を実施しているケースもある。このため、少ない工数で、製品全体を網羅的かつ高精度に計測する手法が求められている。今回、限られた物理計測データと数値解析モデルを融合することで、製品に作用する加振力、加速度分布、応力分布を網羅的かつ高精度に推定するバーチャルセンシング技術を開発した。この技術を、複雑構造を持つ製品の一つである空調室外機に適用することで、高精度に加速度及び応力を推定できて、計測工数を80%削減可能である。

## 1. ま え が き

年々加速する市場環境の変化に対応するためには、製品競争力の向上と迅速な市場投入の両立が必要である。このため、開発リードタイムの短縮が強く求められている。高精度な数値解析を活用して設計を進めることで評価試験レスが実現できれば、開発リードタイムの大幅な短縮が可能になる。しかし、昨今の製品は高度に複雑化しており、数値解析だけで製品全体の挙動を高精度に予測することが難しいという問題がある。そのため現在は、数値解析で予測した製品全体の応答結果に基づいて、特に実測が必要と判断した位置に物理センサーを設置して評価試験を実施している。このように、数値解析と評価試験を相補的に活用する運用としているが、必要とする物理センサー数を増やしたとしても、複雑化する製品全体の応答(加速度、応力など)を実測できない。また、計測箇所が数百点に達するケースもあり、多大な計測工数が生じている。したがって、少ない工数で、製品全体を網羅的かつ高精度に計測する手法が求められている。

そこで、限られた物理計測データと数値解析モデルを掛け合わせて、互いの弱点を補うことで先に述べた課題を解決するバーチャルセンシング技術を開発した。この技術は、最小限の物理計測データと数値解析モデルを高度に融合し、製品に作用する加振力、加速度分布、応力分布などを網羅的かつ高精度に推定するものである。これによって高い安全性及び信頼性の製品を製造することが可能になる。

本稿では、バーチャルセンシング技術について述べるとともに、複雑化している製品の一例として、多くの配管が組み合わされた空調室外機を対象にして、加速度及び応力の推定精度を検証した結果について述べる。

## 2. 製品の機械特性把握に関する従来手法の限界

この章では、製品の機械特性把握に関する従来手法の限界について述べる。

### 2.1 物 理 計 測

開発時に製品の振動や応力を把握する最も一般的な手法が、物理センサーを用いた計測である。製品の実際のデータが取得できるため、真の状態を把握する有効な手段であるが、コスト、センサー設置制約、網羅性の課題がある。設計段階の解析や評価試験に用いる計測データは高精度に取得する必要があるため、計測機器が高価であり、製品に対して網羅的にセンサーを配置すると莫大(ばくだい)なコストを要する。一方、限られた計測機器を用いて、センサー位置を変更しながら計測することも可能であるが、膨大な時間を要する。コストをかけて膨大な計測環境を構築できたとしても、最も故障が起きる回転部や可動部に対しては、物理的にセンサーを設置すること自体が不可能な場合も少なくない。さらに、基本的に一つのセンサーで得られる物理情報は一つに限られるため、加速度、応力など複数の物理量を把握しようとするとならばそれだけの種類のセンサーを要する。同一箇所に複数のセンサーを設置することはできないため、網羅的な計測は不可能

である。このように、多大なコストと物理的制約を伴う計測アプローチ単独での課題解決は不可能である。

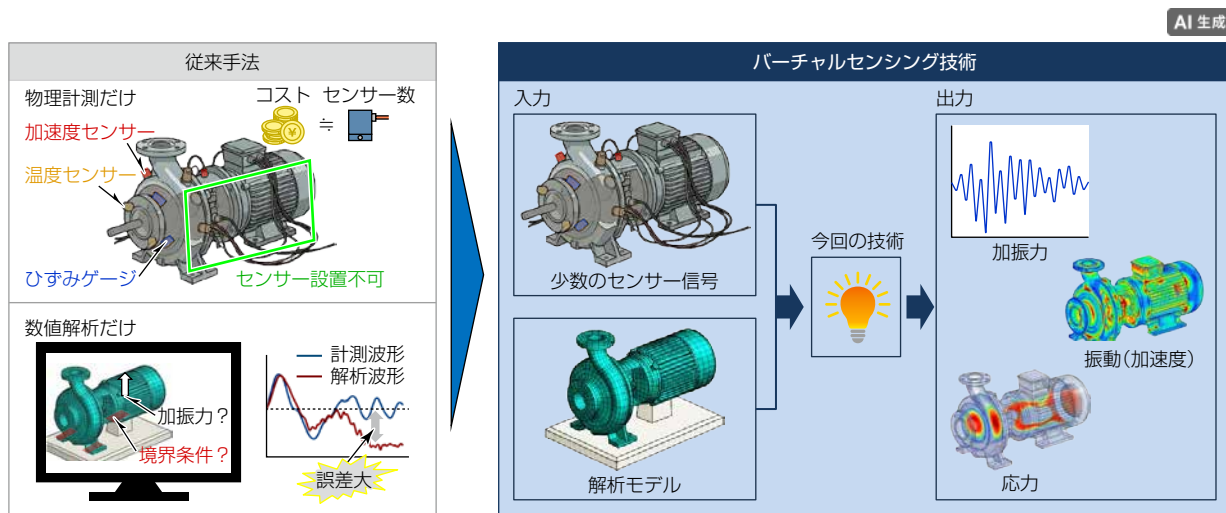
## 2.2 数値解析

2.1節で述べた物理計測の課題を補う目的で、有限要素法などの数値解析を実施することがある。単純な構造であれば解析結果と計測結果は一致するが、実際の製品は多くの部品が複雑に組み立てられているため、互いの部品の締結関係や接触条件などを精密に解析モデルに反映することは不可能である。これらの微小な差異が蓄積するため、特に高周波数帯では実機の挙動と一致しなくなる。また、複雑で非線形な挙動を示す箇所を、計算コスト削減のために単純化(線形化)して計算せざるを得ない点も、物理現象を正確に再現できない要因である。さらに、稼働時の加振力の把握が困難な点が挙げられる。例えば、発電機の電磁加振力のように、空間を移動しながら複雑に作用する動的な力を正確に計測し、数値解析モデルに入力することは困難である。このように、微小な差異の蓄積、計算の単純化、加振力把握の難しさという課題があるため、現在も解析による製品挙動の完全な予測はできていない。

## 3. バーチャルセンシング技術

バーチャルセンシング技術<sup>(1)</sup>の概要を図1に示す。2章で述べたとおり、物理計測と数値解析にはそれぞれの課題があった。例えば振動解析では、物理的な計測データとデジタル上の数値解析モデルを、振動特性(共振周波数や振動モードなど)という共通の次元で比較することで、互いの課題を補う運用がなされてきた。しかし、図1左の従来手法で示すように、両者を完全に一致させることは極めて困難であった。これは、数値解析モデルの一部(局所的な剛性など)を修正すると全体の振動特性に複雑な影響を及ぼすため、モデルの修正、再解析、実測データとの比較という多大な試行錯誤のサイクルが発生してしまうからである。結果として、解析モデルを物理計測データと完全に一致させない限り、製品稼働時のリアルな振動挙動を予測することは不可能とされていた。これに対して、限られた物理計測データによって不完全な数値解析をリアルタイムに補完・同期させる技術がバーチャルセンシングである。図1右に示すように、この技術を用いることで、実機の複雑な挙動をデジタル空間で高精度に再現することが可能になる。

この章では、これを実現した技術的ブレークスルーについて述べる。



AI生成 ラベル付きの画像は、生成AIを用いて作成した参考イメージです。説明・イメージ共有を目的として使用しています。

図1-バーチャルセンシング技術の概要

### 3.1 物理計測と数値解析の融合

今回の技術の優位性を示すために、振動解析での三つの計算手法の違いを図2(a)~(c)を用いて述べる。

図2(a)に示すように、通常の数値解析では、加振力を解析モデルに設定することで、加振力が作用したときの状態(変位、速度、加速度、応力)などを算出するアプローチである。計算が一方通行であるため、単純な構造であれば計測結果と一致するが、実際の複雑な製品構造ではモデルの不完全さや入力となる加振力の設定がそのまま誤差につながって、現実の挙動と一致しなくなるという課題がある。

この誤差の課題を解決する手法が、図2(b)に示す状態オブザーバーである<sup>(2)</sup>。対象モデルから導出したフィルターに対して、図の下方から“センサー信号”(物理計測データ)を注入しているのが特徴である。この物理計測データをガイドとして計算をリアルタイムに補正することで、モデル上のセンサー位置の応答はセンサー信号と一致するように補正される。まず、予測ステップで、モデル上のセンサー位置での状態を予測する。次に、更新ステップで、予測値とセンサー信号との乖離(かいり)具合から、モデル全体の状態をどのように補正すれば実態と一致するのかを計算し、センサーが存在しない部位の状態までも高精度に推定することが可能になる。ただし、依然として入力となる加振力の設定がそのまま誤差につながるという課題が残されている。

これらの二つの手法に対して、加振力と状態を同時に推定し、非定常状態にも適用可能にしたのが図2(c)に示す今回の開発の拡大カルマンフィルター(Augmented Kalman Filter: AKF)である。最大の特長は、図の下部に示された“状態から加振力へと戻る矢印”(z<sup>-1</sup>: 1ステップ前の状態のフィードバック)が追加されている点である。これは、AKFでは加振力そのものを状態量に組み込んで、加振力も推定対象に含めることを示している。この手法によれば、仮に未知の加振力に対して実態と異なる初期値を設定したとしても、センサー信号による補正と、フィードバックのループを通じた“予測と更新”の反復サイクルによって、数サンプル後には誤差が自動的に吸収される。このように、加振力と状態の双方を同時に自己補正し続ける構造を持つため、時々刻々と変化する非定常振動に対しても極めて精度の高い推定が可能になる。

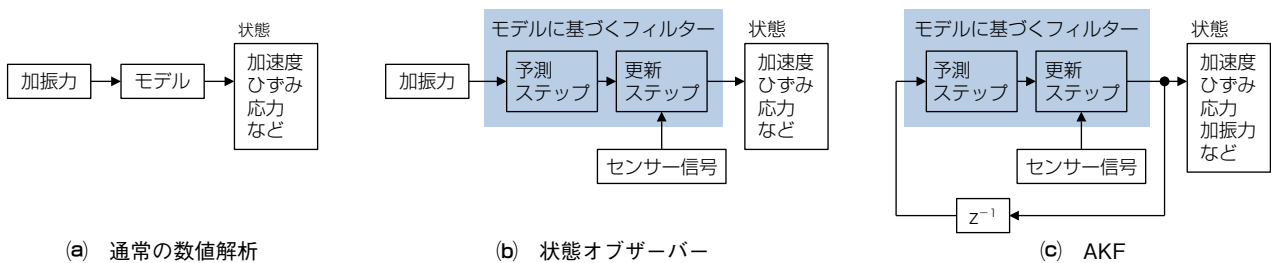


図2-各計算方法の違い

### 3.2 加振力の推定

AKFによって加振力を状態量に組み込むことで、従来の入力(加振力)と出力(振動や応力など)を同時に推定することが可能になる。2章で述べたとおり、解析モデルには不完全さが残るため、実測データを用いて状態量をリアルタイムに補正しながら推定するこのアプローチは非常に有効である。

しかし、同様の先行研究は存在するものの、実際の計測作業で取扱いが容易な加速度センサーで取得したデータを用いる場合、推定誤差の拡大や、推定途中で計算が発散するなどの課題があった。これは、センサーのデータから内部状態を正しく逆算・補正するための数学的な前提(可観測性)が失われやすいためである。対策として、架空のセンサーデータを付加することで、計算を強制的に安定させる方法が知られているが、架空のデータによる人為的な調整に依存するこのアプローチは物理的な厳密性に欠けており、真の意味での問題解決には至っていなかった。

そこで、今回の開発では人為的なパラメーター調整に頼らずに、一意にこれらの課題を解決できる理論を構築した。この理論の要点は、“空間的配置条件”及び“サンプリング周波数のしきい値条件”を同時に満たす条件で加速度データを取得するという点である。空間的配置条件とは、加速度センサーでデータを計測する点と加振点とが、振動モードの節(振幅が0になる点)にならないようにセンサーを配置するという条件である。また、サンプリング周波数のしきい値条件とは、加速度計測時のサンプリング周波数を、推定したい最大の周波数に対して $\sqrt{2}\pi$ 倍よりも高く設定するという条件である<sup>(3)</sup>。数値解析モデル自体に局所的な不完全さがあっても、これらの条件を満たすことでフィルター計算の可観測性が担保され、計算を発散させることなく実機データを基にした高精度な状態推定が可能になる。

世界で初めて<sup>(注1)</sup>の、片持ち梁(はり)によるこの手法での検証方法を図3に示す。図3に示すように、ロードセルが組み込まれたハンマーで片持ち梁を叩(たた)いた際の振動応答を加速度センサーで計測し、片持ち梁の有限要素モデルをAKFに適用することで、ハンマーで叩いた際の加振力を推定した。加振力の推定結果を図4に示す。図4はロードセルで計測した加振力の真値と、従来手法及び今回の手法で推定した加振力の時間波形である。黒線で示す真値に対して、青線の従来手法は0.002秒でのピーク値が真値と大きく異なり、また、時間経過とともに推定誤差が蓄積する様子が分かる。

一方、赤線で示す今回の手法の結果は、高い精度で真値と一致していることが分かる。このことから、大きさや周波数が不明な加振力を受けて振動する構造物であっても、安定かつ高精度な状態推定が可能であることが確認できた。

(注1) 2026年8月9日現在、三菱電機調べ

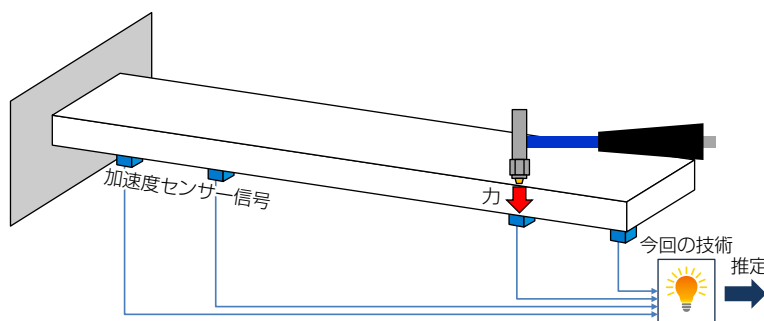


図3-加振力推定の試験セットアップ

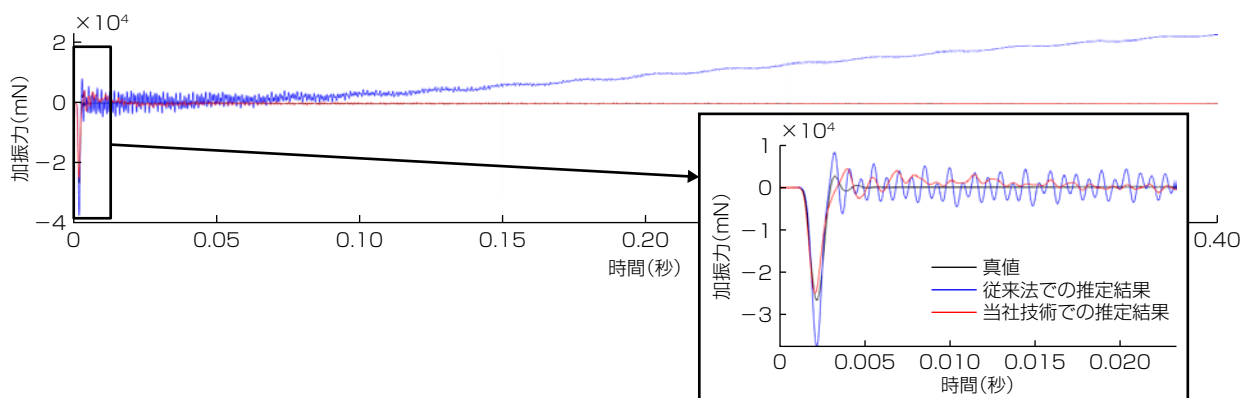


図4-加振力の推定結果

### 3.3 数値解析モデルの低次元化

今回の技術で用いる数値解析モデルは有限要素法で構築する。一般的に、有限要素モデルは対象構造物の形状が複雑になるほど、また、着目する周波数帯域が高くなるほど、モデル自由度(解くべき方程式の数)が増大する。ときにはモデルが数百万自由度に達することもあり、このような大規模モデルをそのままAKFに入力しても、膨大な計算時間が必要になるため実用的ではない。そこで今回の開発では、数百万自由度の大規模有限要素モデルを、システム本来の物理的特性(主要な固有振動数やモード変形)を厳密に維持したまま数百自由度にまで圧縮するモデル低次元化手法として、モード縮退法を利用した。モード縮退法は加振力が作用する場所が変化しても縮退モデルを再生成する必要がない利点がある。これによって、エッジデバイスや一般的なパソコンであっても、現実的な処理時間内でのリアルタイム演算が可能になった。

## 4. 空調室外機を対象とした検証結果

今回の手法の検証に用いた空調室外機のモデルを図5に示す。このモデルは、圧縮機、アキュムレーター、弁、配管、及び支持構造体によって構成されている。室外機の稼働時には、圧縮機が回転する際に生じる加振力に加えて、ファンを駆動するモーターの回転による加振力も発生し、これらが起振源になって配管などの部品が振動する。

計測対象機種の数値解析モデルを構築し、3,869,892自由度であったフルモデルを、モデル低次元化技術によって315自由度に低減した。このモデルから導出したフィルターに対して、図2で述べたように、センサー信号を注入した。このとき、注入したセンサー信号は4か所の3軸加速度センサーの信号である。これによって、センサーが存在しない部位の状態までも推定可能になる。センサーが存在しない部位の状態の推定精度を検証するために、本稿では推定位置に検証用のセンサーを設けた。加速度の推定結果を図6に、応力の推定結果を図7に示す。

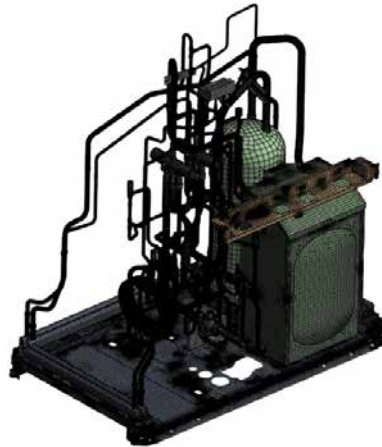


図5-空調室外機のモデル

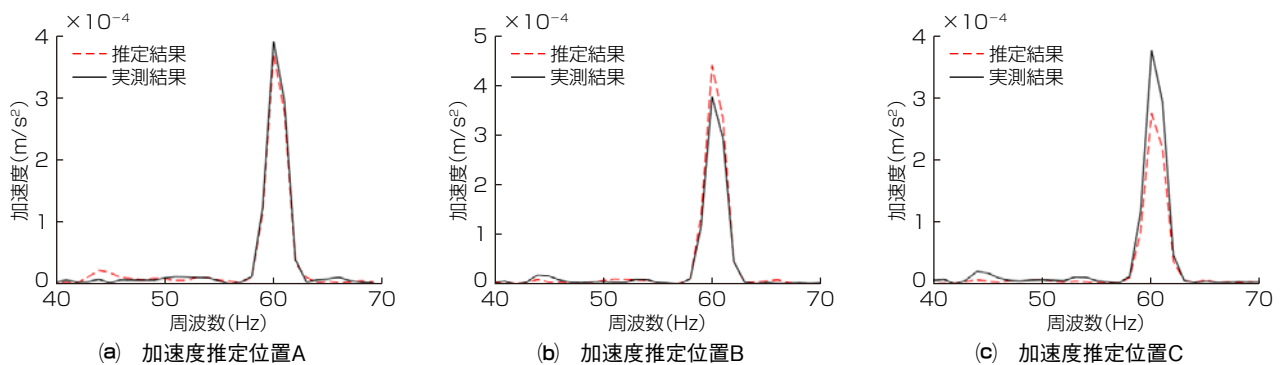


図6-加速度の推定結果

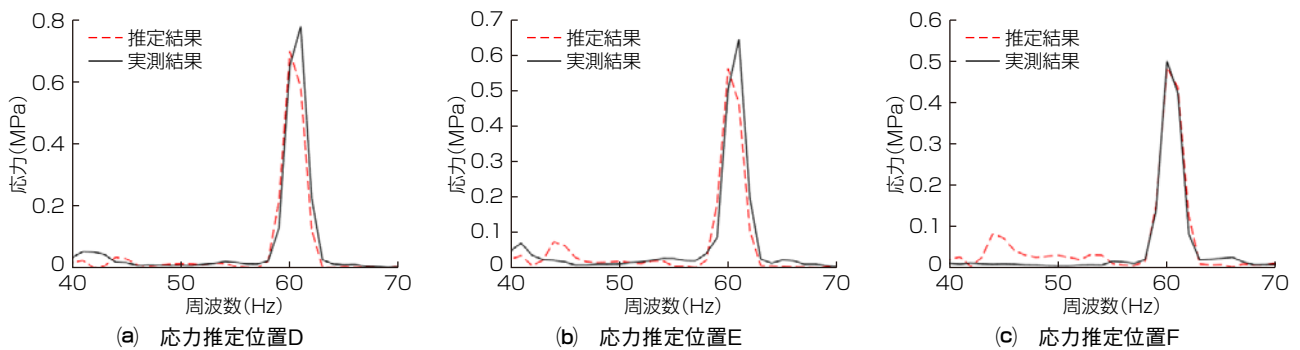


図7-応力の推定結果

図6及び図7に示したように、加速度及び応力のどちらの応答でも、圧縮機の運転周波数である60Hzの成分が卓越している。主成分である60Hzの値に着目すると、今回の技術の狙いどおり実測値と推定値がよく一致しており、応力に関しては疲労評価で実用上問題のない精度であることが確認できた。

一方、図7の応力の推定結果では、45Hz付近の帯域で実測値との誤差が比較的大きく表れている。しかしながら、配管などの疲労強度評価の観点では、振幅が最大になる主要周波数(今回の検証では60Hz)での応答が寿命に対する影響として支配的になるため、このような非主要帯域での局所的な誤差は実用上問題にならないことが多い。

さらに、図7に示した各3か所の計測結果は、異なる位置の異なる配管から選定した計測位置での比較である。このように異なる位置で、いずれも高い精度で応答が一致していることから、今回の手法によって特定の局所部位に限らず、室外機全体の振動や応力状態を網羅的かつ高精度に推定できているものと考えられる。今回の手法によって、従来のひずみ検査試験を数点の加速度センサーで代替可能になる。その結果、試験期間を5日間から1日程度へと大幅に短縮できて、計測工数を80%削減できる見込みである。

## 5. む す び

年々高まる開発プロセス効率化の要求に応えるため、少ない工数で製品の機械特性を網羅的かつ高精度に把握する手法としてバーチャルセンシング技術について述べた。この技術は、最小限のセンサーデータと解析モデルを高度に融合することで、製品に作用する加振力、振動、応力などを網羅的かつ高精度に推定する技術である。特に、振動を励起する加振力を振動応答などと同時に推定することで、過渡的な事象での予測精度の向上を実現した。この技術で取得したデータを、設計現場や検査現場で活用することで、次世代の“ものづくり技術”の発展が見込まれる。具体的には、この手法によって従来のひずみ検査試験を数点の加速度センサーで代替可能になる。その結果、計測工数を80%削減できる見込みである。今回は空調室外機への適用事例を述べたが、今後は全事業領域へこの技術の横展開を進めていく。

## 参 考 文 献

- (1) 柳館直成, ほか: バーチャルセンシングによる振動推定の高精度化, 日本機械学会論文集, **89**, No.918 (2023)
- (2) Yanagidate, N., et al.: Application of virtual sensing to an outdoor air-conditioning compressor unit, Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, **45**, No.1 (2025)  
<https://doi.org/10.1177/14613484251391417>
- (3) Yanagidate, N., et al.: Observability Restoration in Acceleration-Based Force Estimation: A Modal-Rank Perspective on Augmented Kalman Filters Using Zeroth-Order Random Walk Models, SSRN Electronic Journal (2025)  
<https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5379098>

~~~~~