

第5章 実験とCAEの連携

第5章 実験とCAEの連携

本章の狙い

第5章では、第3章で説明した実験モード解析と第4章のCAEによる振動解析の連携について、事例を使って説明する。その後、今後の課題や取り組み方について述べる。

第5章の構成を、図5-1に示す。

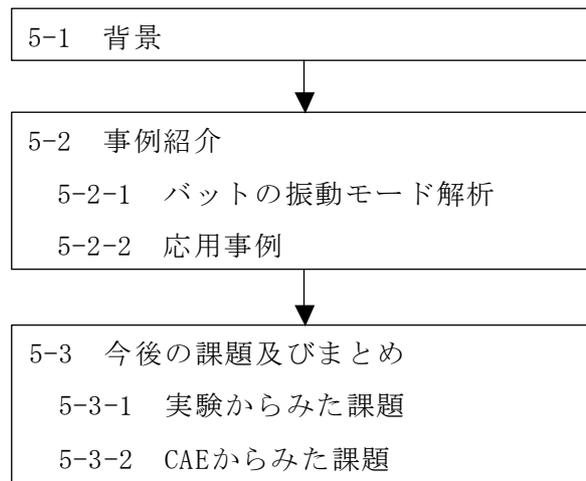


図5-1 第5章の構成

第1節 背景

近年、様々な製品の静音化が進んでいる。例えば、家電製品の代表例である冷蔵庫も、様々な対策が施され、大変静かになっている。研究・開発の現場ではさらなる付加価値の向上を目指し様々な振動・騒音対策が行われている。

このような開発の現場では、開発期間の短縮、製造後の異音や異常振動などの迅速な対応のため、試作を作りトライ&エラーで騒音・振動対策をするのではなく、できる限り試作を減らし、実験（計測）を最小限に抑えたいという要望がある。すなわち、CAEによるシミュレーションを活用した事前検討により、試作数と共に実験回数も減らして開発期間の短縮を図ることが要求されている。このとき、実験と置き換え可能なシミュレーションを行うためには、CAEに使われるモデルも高精度であることが必要となる。その結果、実機の特長（例えば周波数応答関数、減衰率）を正確に計測することが必要になる。このように、CAEと実験との関係は非常に深くなっている。

一方、これからCAEに取り組もうと考えた場合、「単にシミュレーションするだけならまだしも、実験とCAEを連携させるのは難しい。」といった声を聞くことがある。理由としては、「実験もCAEも各々ノウハウが必要で、正しい実験ができる技術者、使えるCAE解析結果を導出できる技術者を確保するのでさえ容易ではない。」「実験とCAEを連携させるには、双方に精通していないとできない。」といったイメージがあるようである。

確かにハンマリング試験はシンプルな計測方法であるが、経験によるスキルアップは必要であることはこれまでに述べてきた通りである。また、ここで紹介する応用事例の騒音のレベル（大きさ）は、半無響室（非常に雑音の少ない環境部屋）であり、開発担当者にこの音ですと説明されないと聴き取れないほど小さいレベルの騒音が課題となっている。普通の人（一般ユーザー）からすれば、「これが騒音なのか？」という感想を持つ場合が多いレベルであり、計測にもノウハウが存在する。

コンピュータが現在のように発達しても、全ての設計データ（形状データ）を盛り込めばシミュレーション結果を得るのに数日かかってしまい、必要な時間で結果を得ることができないといったケースも無い訳ではない。逆に、必要な解析結果を得るために、実際の現象を捉える計測や実験解析の重要度は高まっている。

だからといって、実験とCAEの連携は取り組めないほど難しいものではない。確かに、それなりの準備やノウハウは必要であるが、基本的にはこれまでに説明してきたバットを対象にした実験とCAEでやっていることと考え方は変わらないのである。

ここでは、事例として前章までのバットを使った基礎的な事例と、応用事例として家電製品の騒音対策例により、実験とCAEの連携の考え方について説明する。

なお、ここで取り上げた計測・解析の手法・手順は他の電機製品やOA機器等様々な分野での応用が可能である。

第2節 事例紹介

ここでは、これまでに説明したバットの解析の流れを、実験と CAE の連携の視点で説明する。次に冷蔵庫を対象に騒音・振動の可視化と対策を行った例を応用例として紹介する。

5-2-1 バットの例

第3章で行ったバットの実験モード解析と CAE との連携について説明する。

実験による振動モード解析の場合、対象となるバットを吊り、ハンマリング試験で伝達関数を計測し、振動モード形状を作成する。

CAE の場合は、まずバットの形状データが必要となる。この例では、実物のバットの外形寸法を実測し、バットの肉厚は実際にカットした断面より実測している。次に、バットの材質をアルミ合金とし、境界（拘束）条件を自由として、解析に使う要素を決定し、メッシュを切って、振動モード形状を求める。このとき、実験の伝達関数と CAE により得られた結果を比較し、例えば共振周波数が異なれば、材質などで調整する。

図 5-2 に、シェルモデルによるバットの周波数応答関数曲線を示す。解析は COSMOSWorks (COSMOS シリーズは、米国 SRAC 社の商標です) を用いてモーダル周波数応答解析を実施した。共振周波数は NASTRAN 結果と多少の違いがあるが、概ね一致している。計算では 1N のインパルス荷重をバット中央部に加え、荷重方向の加速度を POINT1, 3, 5, 7, 9 で出力している。また、各モードに減衰比 0.1% を与えた。ここで、POINT 番号は図 3-2-9 の計測点番号にほぼ対応している。CAE でも実験と同様の伝達応答関数を求めることができるが、出力成分や出力位置に注意しないとモードの見落としがあるので、固有振動解析結果や実験モード解析結果と比較して共振周波数とモード形状を確かめておくことが必要である。このように、周波数応答解析を行うことにより、インパルスのや周期的な強制荷重による動的応答量を求めることができる。

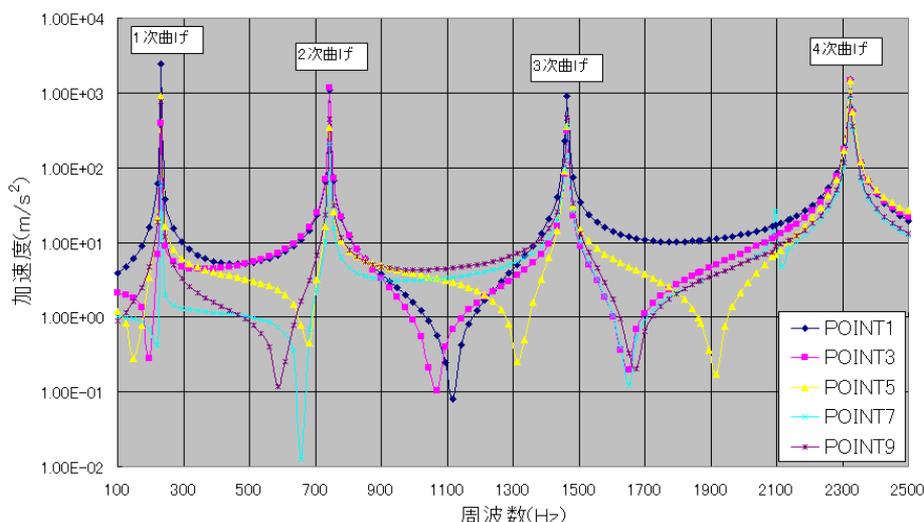


図5-2 バットの周波数応答関数（伝達関数）

この例では、対象の非線形性がないこと、実験と CAE とで支持方法がうまく一致していたことなどから、実験と CAE との結果はよく一致している。

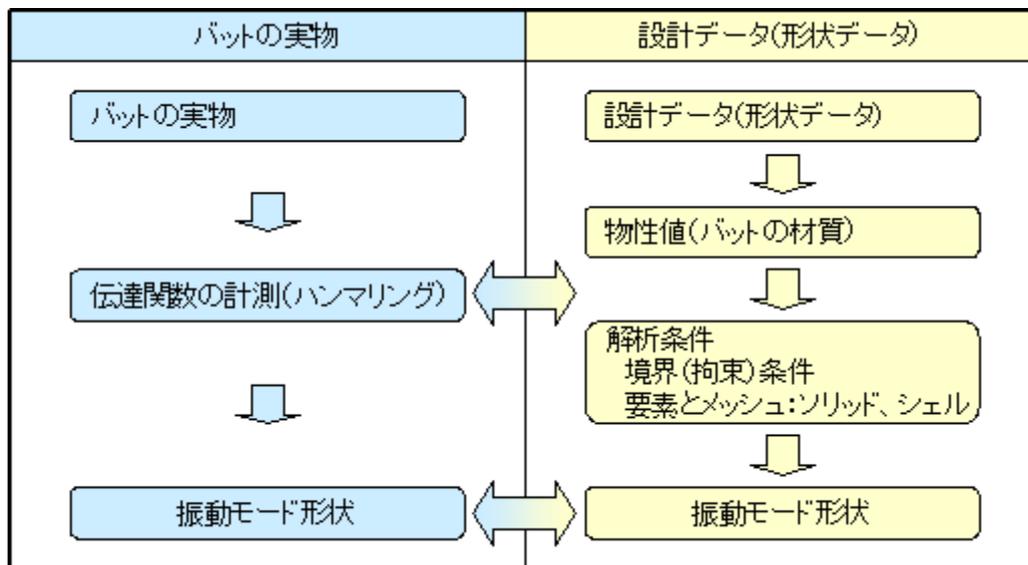


図 5-2-1 実験と CAE の連携

5-2-2 応用例

(1) 騒音（放射音）の発生源の確認

図 5-2-2 に、対象の冷蔵庫と主要な解析部位を示す。

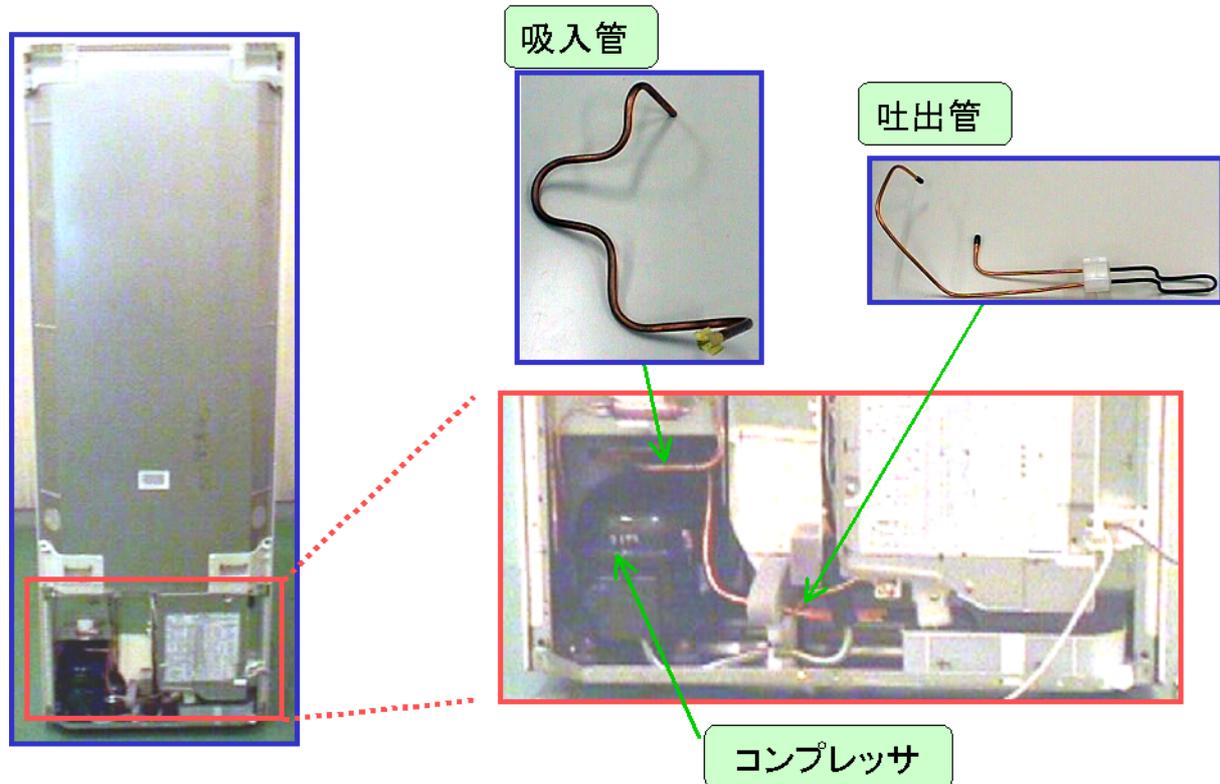


図 5-2-2 対象物の概要

まず、対象の冷蔵庫から出ている騒音の発生場所と周波数を確認する。

この例では、経験的に以下のことが明らかであった。

- ① 問題の音は、冷蔵庫のコンプレッサ付近から出ている、約 700Hz である。
- ② 問題の音は、コンプレッサに接続されている配管の形状に影響を受ける。

そこで、冷蔵庫背面の放射音を確認するため、テトラホンと呼ばれる特殊なマイクロホンを使い、冷蔵庫背面の音響インテンシティ (SI: Sound Intensity) 解析を行う。ここでは、音響インテンシティについて詳細な説明はしないが、簡単にいうとテトラホンを使って、計測点毎の音のベクトルを求めることができる。

なお、実際の冷蔵庫は図 5-2-2 の左側の用にコンプレッサ部分が開放ではなく、防音カバーが設置されている。計測は半無響室で行ったため、対象物周辺の計測環境は良好な（静かな）状態であったが、カバー設置状態では問題となる音を検出（識別）することができなかつたため、カバーを外した状態で計測を行う。

(実際の騒音・振動のトラブルシュートでは、計測や解析に先立ち積極的に経験やノウハウを集めることが大切である。)

まず、冷蔵庫背面全体の解析を行う。

図 5-2-3 に、テトラホン（小野測器 MI-6420）による計測の様子を示す。テトラホンは、4 個のマイクロホンが正四面体の各頂点に配置された独自の構造の 3 次元型インテンシティプローブである。専用ソフトを使用し、4 つのマイクロホンの内、任意の 2 つのマイクロホンペア（6 通り）について、各ペア方向の音響インテンシティを求め、最後に X、Y、Z 座標方向の成分を計算して、3 次元音響インテンシティを求めることができる。



図 5-2-3 音響インテンシティ計測

図 5-2-4 に音響インテンシティ解析結果の 1 例を示す。ここでは、冷蔵庫本体から 100mm 離れた面のインテンシティを 100mm 間隔で計測している。同図において、青から赤くなるほど音圧(dB)が高くなっている。冷蔵庫背面から見て左下の黒い部分がコンプレッサである。コンプレッサ近傍から比較的大きな音が放射されていることを確認できる。

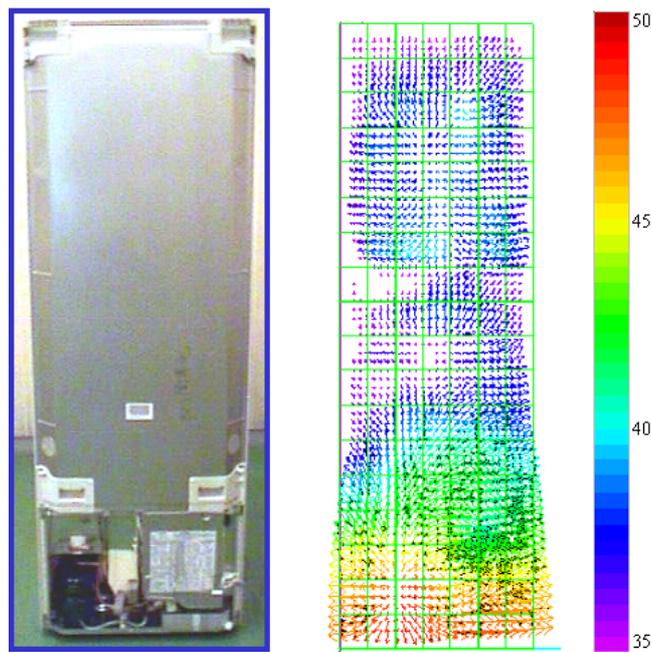


図 5-2-4 音響インテンシティ解析結果例（120～1000Hz）

次に、約 700～800Hz の音響インテンシティを詳細に計測する。その結果、コンプレッサ上部の空間の吸入管付近から、最も大きな放射音が出ていることを確認することができた。図 5-2-5 に、コンプレッサ付近の音響インテンシティをより詳しく解析した結果を示す。同図より、問題となる音はコンプレッサの上部空間から放射され、黄色い部分は図 5-2-6 に示す吸入管がある位置と一致している。

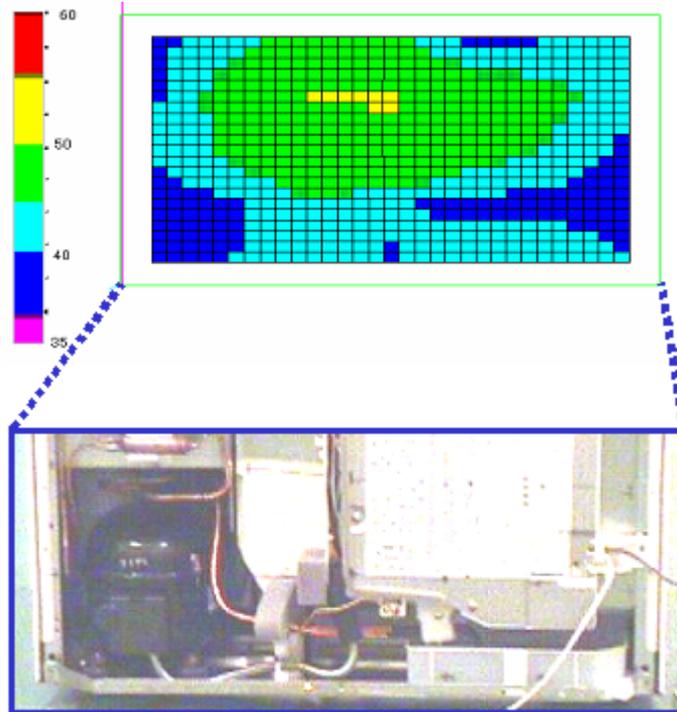


図 5-2-5 コンプレッサ付近の音響インテンシティ解析例（650Hz～750Hz）

(2) 騒音発生源と思われる部品の実験モード解析

音響インテンシティ解析の結果、コンプレッサに接続されている吸入管が、問題となる音の原因の1つと推測されたので、吸入管の実験モード解析を行う。

(なお、吸入管の振動エネルギーのみで放射音を出すという仮定には、無理があると考えられる。吸入管やコンプレッサ振動・騒音が、コンプレッサ室という狭い空間の中で関連し合って騒音となっているのではないかと推測される。)

吸入管の実験モード解析は、加振器を使用し、基準用の加速度計と各点の応答を検出する3軸の加速度計を使い、応答点移動法により周波数応答関数を計測している。

図 5-2-6 に、加振器に吸入管及び加速度センサを設置した様子を示す。

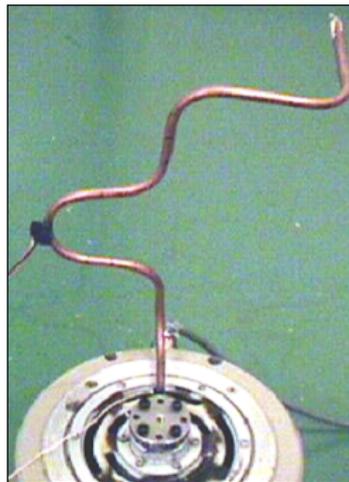


図 5-2-6 計測の様子

図 5-2-7 に、吸入管の形状定義結果を示す。

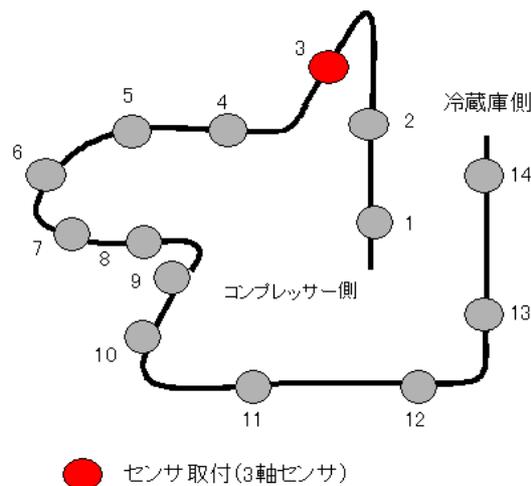


図 5-2-7 吸入管の形状定義

図 5-2-8 に、計測した周波数応答関数の 1 例を示す。

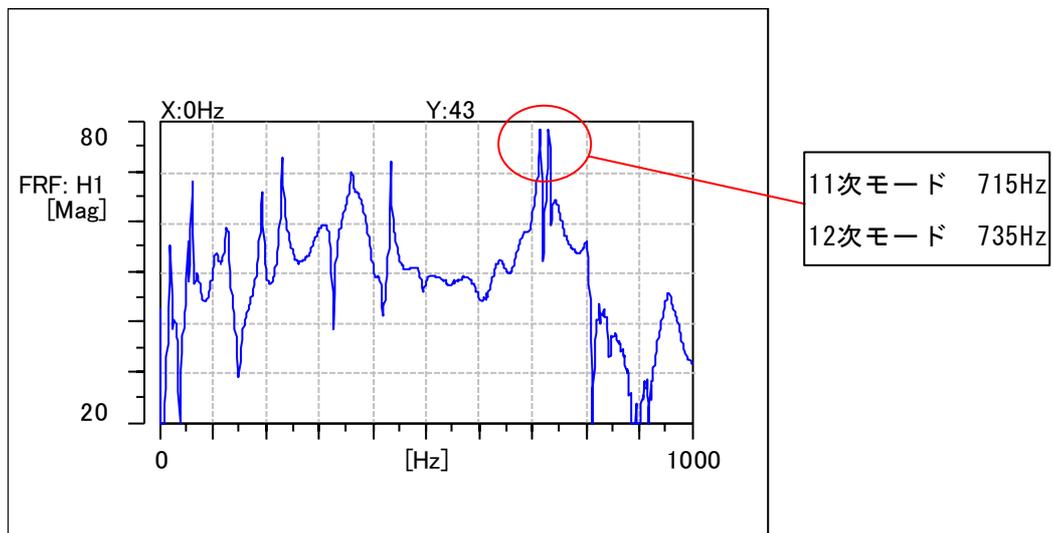
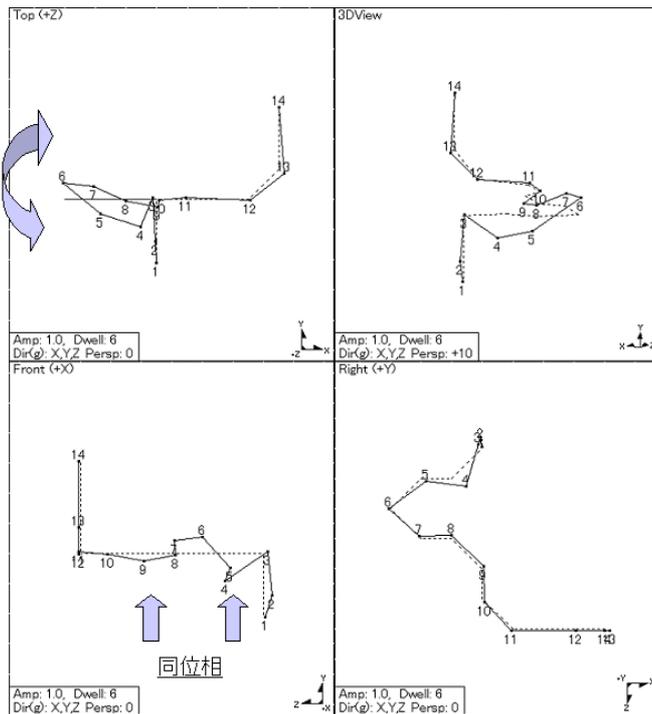


図 5-2-8 吸入管の周波数応答関数の例（ポイント10 Z方向）

ME' scopeVES を使った吸入管単体の実験モード解析の結果のうち、700Hz 付近の振動に影響している振動モードを、図 5-2-9 及び図 5-2-10 に示す。

両図より、11 次モードは、点 4～8 の部分の曲げ振動、12 次モードは点 4～8 の部分のねじり振動であることを確認できる。



曲げ振動

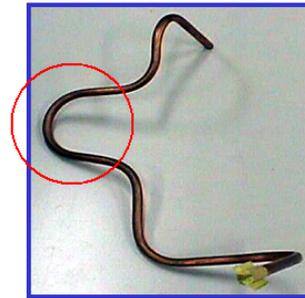
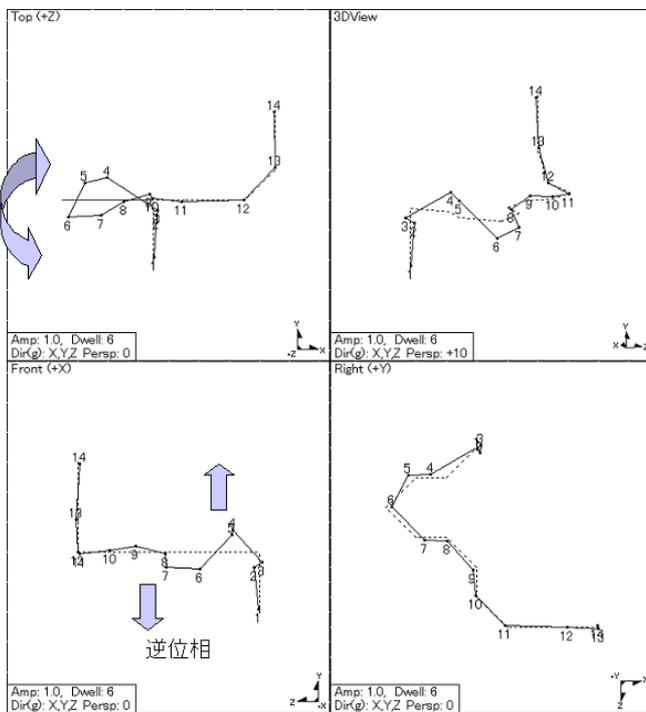


図 5-2-9 モード解析結果 (11 次モード : 715Hz)



ねじり振動

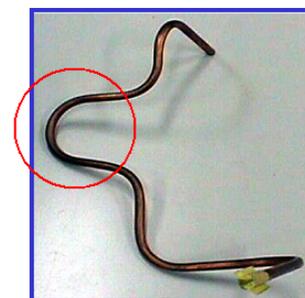


図 5-2-10 モード解析結果 (12 次モード : 731Hz)

(3) 実稼動解析

吸入管が組み込まれた状態での振動現象を可視化するため、実稼動解析を行う。

図 5-2-11 に実稼動解析の形状定義を示す。

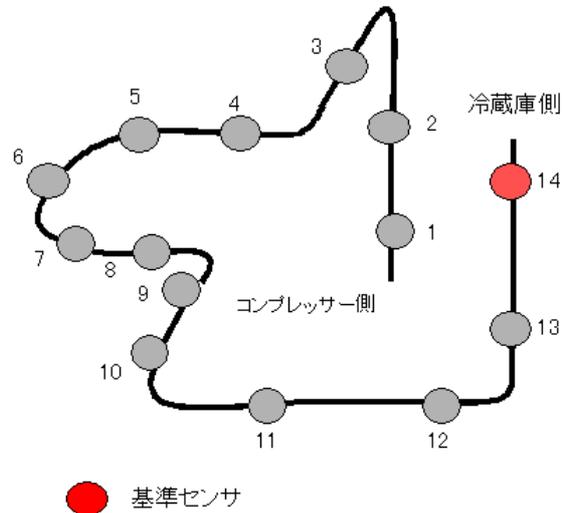


図 5-2-11 実稼動解析の形状定義

図 5-2-12 に加速度応答の例を示す。実験モード解析の 2 つのモードは、振動モード形状を比較した結果、それぞれ図 5-2-12 の 700Hz 及び 735Hz のピークでの振動モード形状と対応している。実稼動解析（実稼動アニメーション）の結果からも、実験モード解析結果と等同様、点 3～7 の部分で 700Hz 及び 735Hz の共振が発生していることを確認できる。

図 5-2-13 に、実稼動解析結果の 1 例を示す。

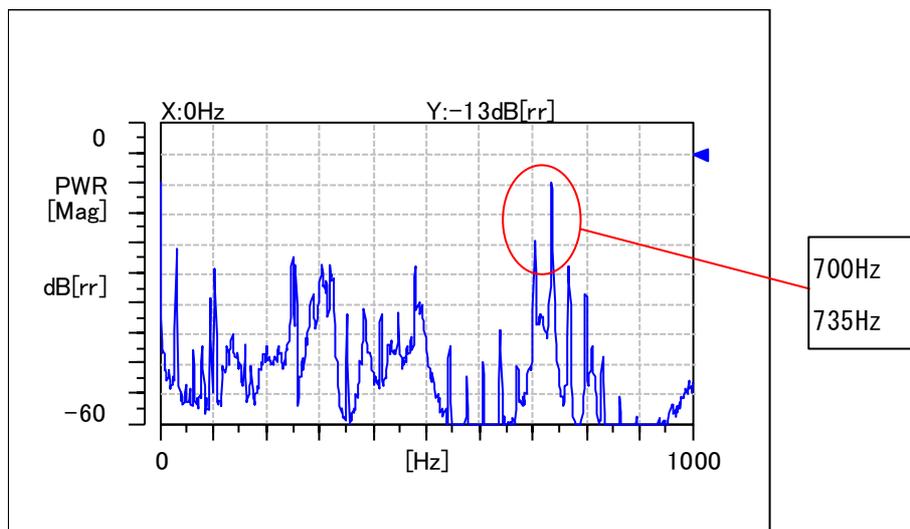


図 5-2-12 ポイント 2 Z 方向の実稼動時の加速度応答例

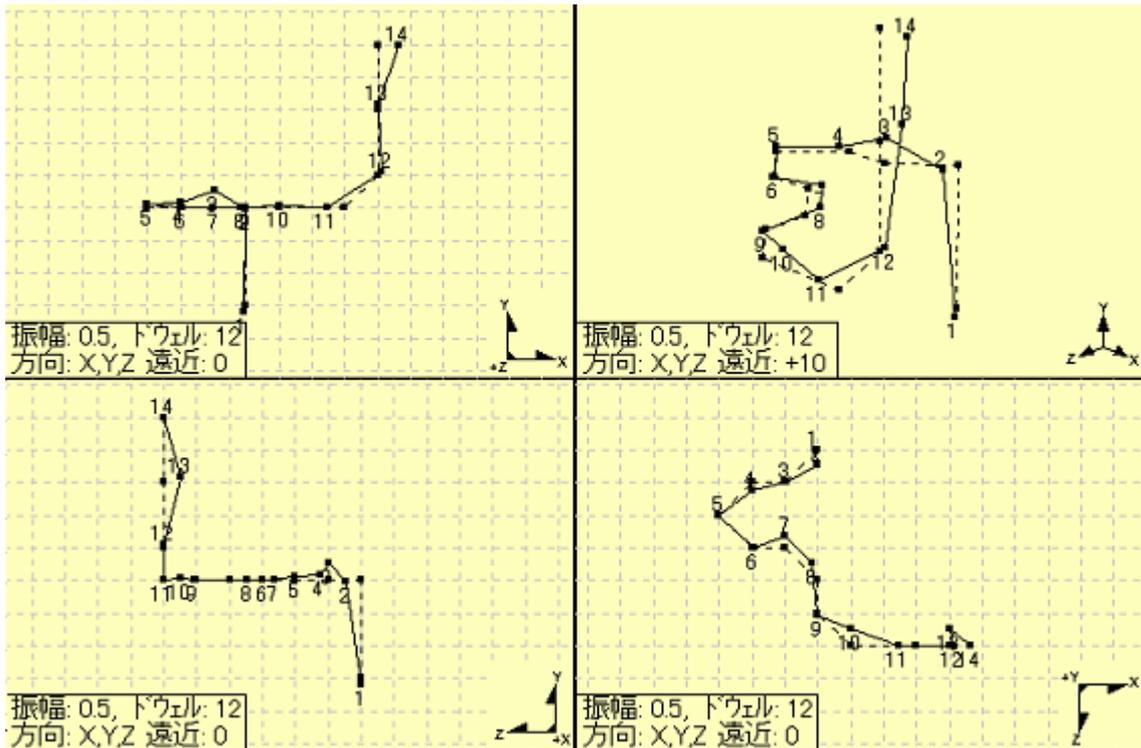


図 5-2-13 実稼動解析の 1 例

(4) 対策と効果の確認

以上の解析の結果、図 5-2-14 で形状を変更した部分の剛性を上げる（共振周波数を高くする）対策を採った。実際には、同図に示すように、湾曲部を短くしている。

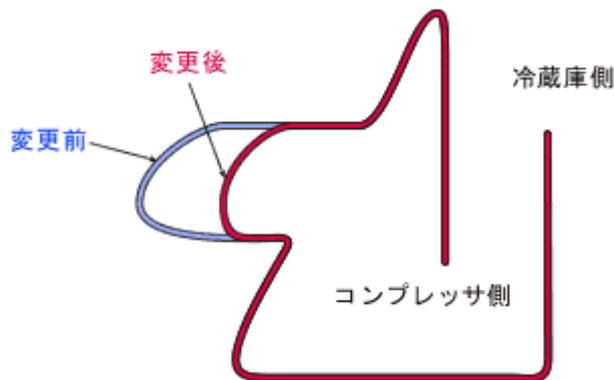


図 5-2-14 対策結果

この対策の結果、図 5-2-15、図 5-2-16 に示すように、騒音レベル、加速度レベルを改善することができた。また、実際に担当者から問題の騒音に対し改善されていることも確認できた。

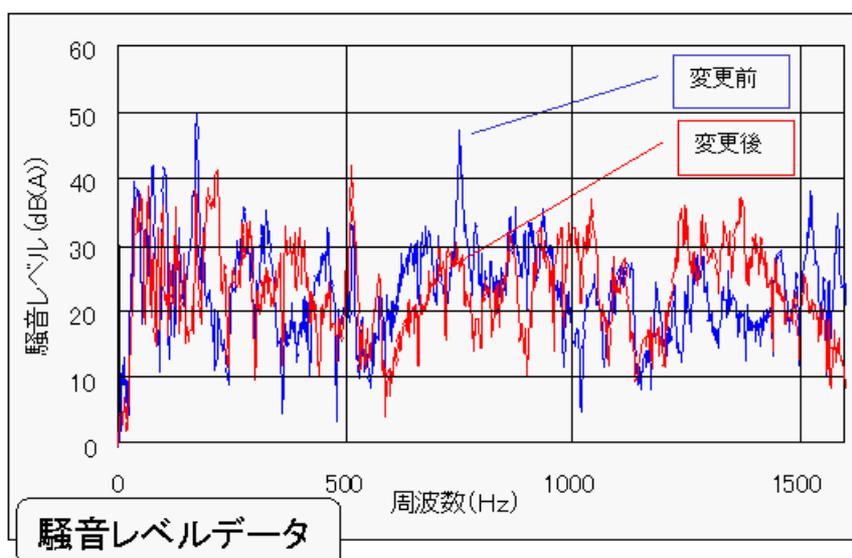


図 5-2-15 対策前後の騒音レベルの比較

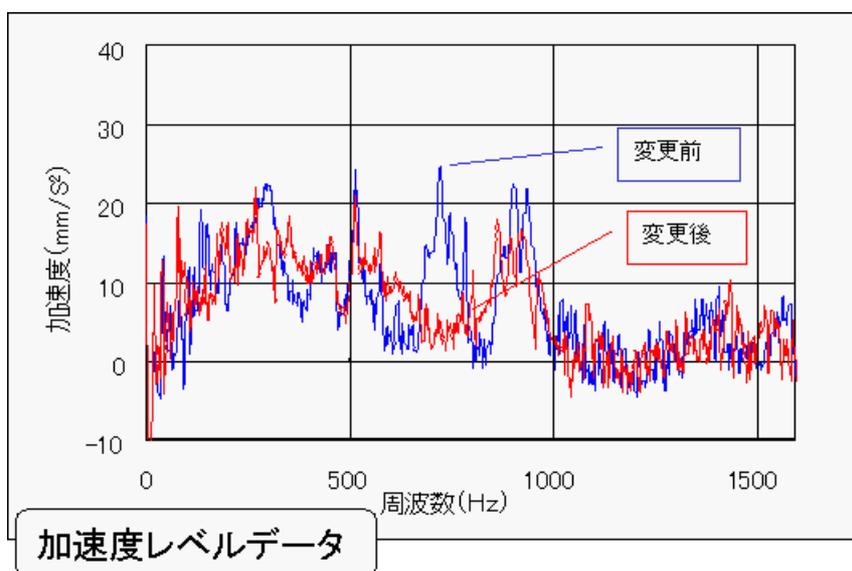


図 5-2-16 対策前後の加速度レベルの比較

(5) 考察

以下の結論を得ることができた。

- ①冷蔵庫の異音に対して音源の特定から、構造変更による異音の低減までを、システムティックなフローを適用できた。
- ②コンプレッサの吸入管の形状変更により、700Hz 近傍における振動及び音を低減した。

図 5-2-17 に、この事例での実験と CAE との連携を図示する。

この例では、実験データを基に CAE (シミュレーション) の精度を上げることはできたが、修正したモデルに対し様々なパラメータを変更してシミュレーションをする迄には、いたっていない。

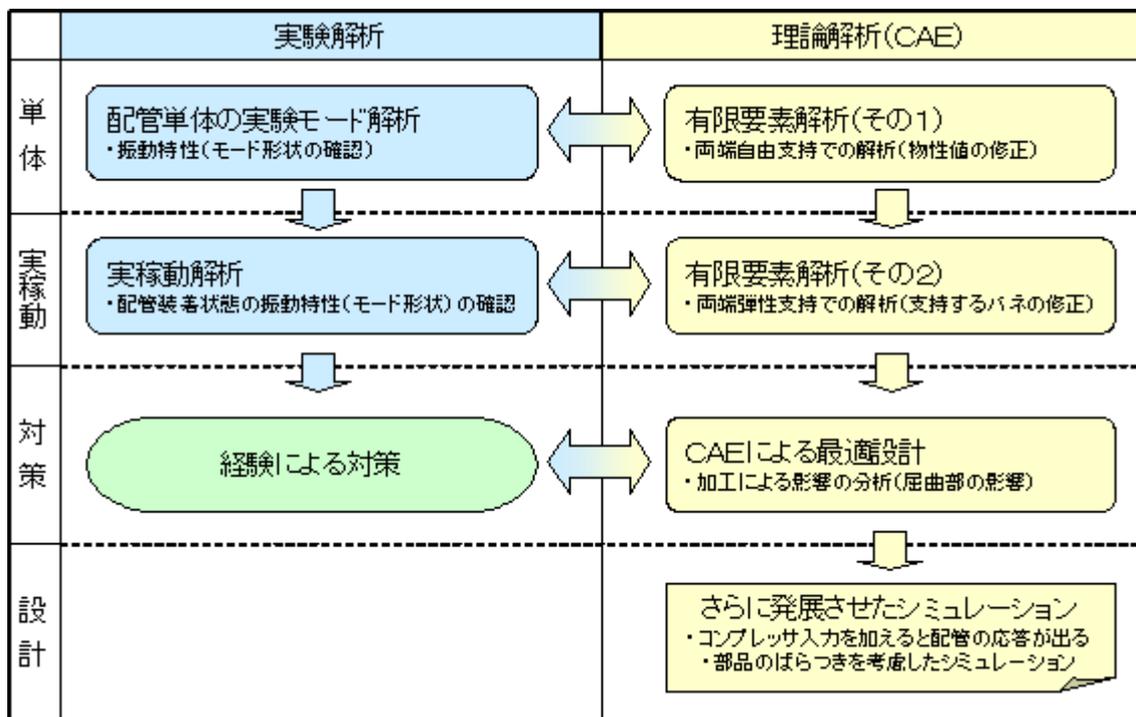


図 5-2-17 実験と CAE の連携

第3節 今後の課題及びまとめ

5-3-1 実験からみた今後の課題

実験を主たる業務とする者からみた実験と CAE の連携への期待や課題について、以下に述べる。

例えば、バットの実験モード解析をするためには、計測点を決める必要がある。この際、実験モード解析用の本計測に入る前に、プレ解析と称して計測点を減らして伝達関数の計測を行い、振動モード形状を作成し、本計測に必要な計測場所や点数を決定している。

このような場合に、CAE を利用して簡単に振動モード形状を確認し、計測場所等の決定に使いたいという要望がある。しかし、CAE そのものが設計から発展してきたためか、形状データを作成するために 3D CAD を使うようなシステムになっていることが多い。そのため、CAE による解析のノウハウではなく、形状データ作成が壁となっている。また、計測点を決めるのに参考になる CAE 結果を得るには、それなりに正確な形状データが必要である。このため、実際に計測した方が早いことになり、なかなか CAE に近づくことができない側面がある。

他にも、

- ・実際の部品の材料特性をどのように決めたらよいのか？
 - ・同じ材料なら、均質と扱ってもよいのか？
 - ・パイプ材は曲げれば、屈曲部の断面は変形する。部品の個体差（ばらつき）を CAE ではどのように扱えばよいのか？
 - ・実験モード解析と CAE では、自由度や解析点数が大幅に異なる。双方の結果を連携するために別のツール（ソフト）が必要なのでは、さらに敷居が高くなる。
 - ・シミュレーションでは、特に高次モードにおいて、振動モード形状や共振周波数の順番が実験と異なる場合が出る。
 - ・問題となる現象をできれば実稼動状態でシミュレーションしたいが、境界（支持）条件をどのように決めたらよいのか？
 - ・修正したモデルを再利用できるようにするにはどうしたらよいのか？
- など、多くの疑問が残されている。

課題が残っているのは、計測や実験解析についても同様である。以下、冷蔵庫の例で列挙する。

- ・この例では、問題の周波数が経験を踏まえて明らかであったが、人が「騒音」と判断している音の周波数分析はどうやればよいのか？
- ・コンプレッサから配管に入力される加振力（起振力）をどのようにして求めるのか？

5-3-2 CAE からみた今後の課題

ここでは、CAE担当者側からみた実験とCAEの課題を述べる。

現在、CAEツールも大きく2つのグループがあるように思われる。一つは、解析専任者が研究や実験検証またはトラブルシューティングのために、シミュレーションによってどれだけの物理現象をどれだけの精度で追いかけるかを求めるものである。ここでは、実験結果との相関や解析精度が要求される。多くの場合、ハイエンド系CAEツールと呼ばれる高機能ツールを使用することになり、設計者や実験者が片手間で行なうのは難しい。

もう一方では、3次元CADを使って日々設計業務を行っている解析専任でない人が、設計判断材料の一つとしてシミュレーションを行うものである。この場合、CAD環境に統合された視覚的で操作し易いツールを使用することが多い。ここでは、実験との比較や精度にはあまり拘らず、注目しているパラメータを振っての相対比較を中心に考察することになる。どちらが良いかということではなくケースバイケースでの判断になるであろうが、特に、既製品については前者の意味合いが大きく、新規開発品では後者のウエイトが大きであろう。

いずれにしても、実機と解析モデルの間にはいろいろな差異を含んでおり、如何に注意深く行ってもその差異をゼロにすることは出来ない。従って、計算結果の絶対値をそのまま引用するには相当の裏付けが必要となる。また、実験値側にもさまざまな誤差が含まれており、解析値と実験値は絶対値レベルでは合わないのが一般的であると思ってよい。では、CAEと実験との住み分けはどのように考えたらよいであろうか。CAE側から考えると、私は、CAEでは現象を可視化しそのメカニズムを理解することが目的であり、実験ではそのメカニズムで説明できるような裏付けが得られれば良いと思っている。つまり、解析精度や実測との誤差の最小化は2次的な問題であって、それ自身が目的ではないということである。より本質的な現象を模擬することのできるモデル構築をCAEの目的とするならば、実験側に要望したいことは、様々な効果の複合された一つの結果しか得られないのではなく、個々の現象の効果を個別に評価検証したいということになる。または、そのような実験を効率良く行なう実験計画が課題とも言えよう。

今後、CAEをより多くの場面で活用するために、技術的課題として挙げるならば下記の項目が考えられる。これらは精度や計算アルゴリズムの改良のみではなく、現象そのものを理解・解明することから考えなければならないものも多い。

- ・ 加工硬化を受けた金属材料物性値の変化
- ・ 加工による形状や板厚の変化
- ・ 樹脂材料・複合材料の異方性、温度依存性、不均一性
- ・ 残留応力の影響
- ・ 溶接部/接着部の特殊性や局所性

- ・ 接触/摩擦問題の大規模モデルでの計算負荷、収束性
- ・ 衝撃/衝突問題の複雑なモデルでの計算負荷、収束性
- ・ 減衰効果のメカニズム（構造減衰、材料減衰、流体との粘性減衰）
- ・ 疲労劣化・環境劣化の問題

上記の現象を汎用的に考慮することは、現在のシミュレーション技術では非常に難しく、また、ある一つの現象のみを追求しても全体の精度向上にはならない難しさもある。

CAEで解析出来る現象は極一部に過ぎないと開き直すこともできるが、それだからCAEは使えない、実物を作って実験の方が早いと決め付けるのは早計である。使い方次第でその価値は変化するのである。いずれにせよ、解析を行う前、実験を行なう前に両者の担当者がよく話し合い、結果を予測しながら目的を常に共有化しておくことがまずは肝要であろう。

5-3-3 まとめ

以上述べてきたように、実験及び CAE の双方とも残された課題は少なくない。理想的には、実験解析のプロ、CAE のプロ、そして、実験解析と CAE の橋渡しをできる人がいれば、非常に効率よく製品開発を進めたりトラブルの未然防止もできることになる。

しかし、だからといって、「実験解析をする際に CAE が使えない。」というわけでも、「実験にはノウハウがあるから CAE 担当者には難しい。」と言っているわけではない。

実験と CAE は、相反するものではなく、両者がバランスよくレベルアップしていくことが、開発のレベルアップのために重要である。

まずは、実験解析者と CAE 解析者が双方の解析内容について興味を持ち、理解しあう気持ちを持つところから始めるのも 1 つの方法である。

