

第 5 章 実験と CAE の連携



第5章 実験とCAEの連携

学習のねらい
 実験とCAEの連携について、これまでの単元及び実験の応用所を使って説明し、今後の課題について説明する。

第1節 背景

第2節 事例紹介

第3節 今後の課題及びまとめ

【章全体のねらい】

実験とCAEの連携について事例を使い説明する。

【章全体の解説】

実験とCAEの連携が求められる背景について説明する。

事例としてこれまでに述べたパットの州と応用事例について説明する。

今後の課題について実験からの視点とCAEからの視点を説明し、全体をまとめる。



第1節 背景

学習のポイント
 実験とCAEの連携が求められている背景についての概要を理解する

【節全体のポイント】

実験とCAEの連携が求められている背景についての概要を説明する。

【節全体の解説】

実験とCAEの連携が求められている背景について、実験とCAEの連携に対するニーズやイメージなどから説明する。



CAEによるシミュレーションの活用



製品への要求

- より一層の付加価値の向上
静かだけでなく、
省エネルギー、快適性……



研究開発からの要求

- 開発期間の短縮
試作数と共に実験回数も削減
- 迅速な対応
製造後の異音や異常振動対策

【平井 2019年02月04日撮影】

【ポイント】

CAEによるシミュレーションの活用

【解説】

図参照



実験とCAEの連携のイメージ

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。

実験とCAEの双方に精通していないと連携はできない。

実験もCAEも各々ノウハウが必要なのに、
実験技術者、CAE技術者を確保するのでさえ容易ではない。

【平井 2019年02月04日撮影】

【ポイント】

実験とCAEの連携のイメージ

【解説】

図参照



実験とCAEのノウハウ

<計測のノウハウ>

- ハンマリング試験はシングルな計測方法だが、連続によるスキルアップは必要
- これから紹介する応用事例の観音のレベル(大きさ)は、半導体(非常に精密の少ない環境)であり、非常に小さいレベル(説明されても分からない)の音が観音
- 普通の人が(一般ユーザー)からすれば、「これが観音なのか?」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。

<CAEのノウハウ>

- 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多い訳ではない。
- 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。
- 実験と測り測り可能なシミュレーションを行うためには、①CAEに合う高精度なモデル、②実験の特性(例えばばね定数や摩擦係数、減衰率)の正確な計測が必要

【中々スリ0204事例】

【ポイント】

実験とCAEのノウハウ

【解説】

図参照



実験とCAEの連携の実際を事例で紹介

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。

基本的にはこれまで説明してきた実験やCAEと考え方、
計測・解析の手順は変わらない。

これから紹介する事例は、
他の様々な分野でも応用が可能である。

【中々スリ0204事例】

【ポイント】

実験とCAEの連携の実際を事例で紹介

【解説】

図参照



第2節 事例紹介

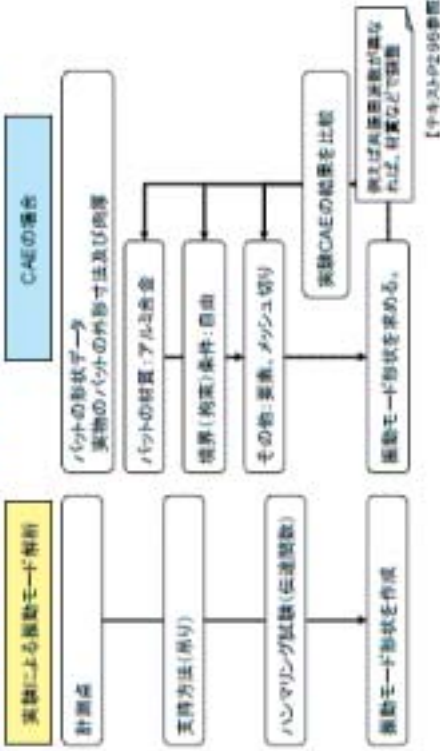
学習のポイント
 実験とCAEの連携の現状について、パットの例と応用事例を例に機要を理解する

- 5-2-1 パットの例
- 5-2-2 応用事例

- 【節全体のポイント】**
 実験とCAEの連携の現状について、パットの例と応用事例を例に機要を説明する。
- 【節全体の解説】**
 1) 事例紹介として、これまでに取上げたパットの例について説明する。
 2) 実際の製品に対する応用事例について紹介する。



パットの振動モード形状を求める手順の比較



- 【ポイント】**
 パットの振動モード形状を求める手順の比較
- 【解説】**
 図参照



CAEによる解析結果

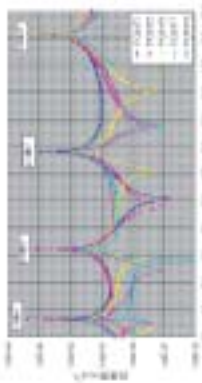


図5-2 バットの頭部の変位成分の固有値(位相関数)

<解析条件>
 ■10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
 ■各モードに減衰比0.1%を与えた。

CAEでも実験と同様の伝達関数を求める
 ことができるが、以下の点に注意
 ■出力成分や出力位置に注意しないと
 モードの差としかある。
 ■異なる振動モード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。

【参考】
 1) 共振周波数は、実験値と一致している。
 2) POINT番号は図3-2-9の打撃点番号にほぼ対応している。
 3) CAEでも実験と同様の伝達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ため、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。
 4) 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。

【ポイント】

CAEでも実験と同様の伝達関数を求めることができる

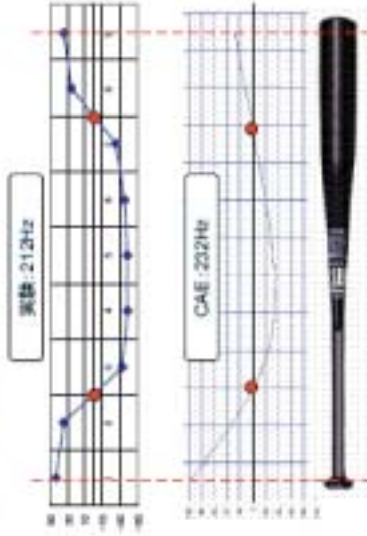
【解説】

四参照

- 1) 共振周波数は、実験値と一致している。
- 2) POINT番号は図3-2-9の打撃点番号にほぼ対応している。
- 3) CAEでも実験と同様の伝達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ため、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。
- 4) 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。



振動モード形状の比較：1次モード



【ポイント】

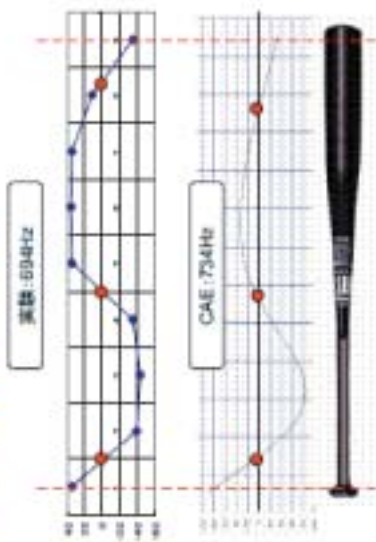
振動モード形状の比較：1次モード

【解説】

四参照



振動モード形状の比較：2次モード



【ポイント】

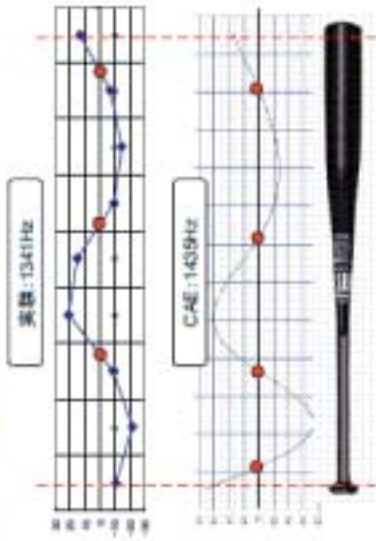
振動モード形状の比較：2次モード

【解説】

図参照



振動モード形状の比較：3次モード



【ポイント】

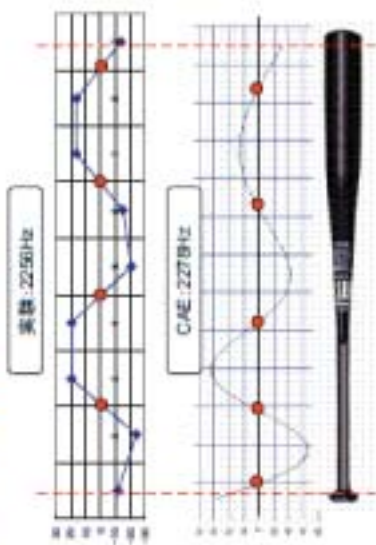
振動モード形状の比較：3次モード

【解説】

図参照



振動モード形状の比較: 4次モード



【ポイント】

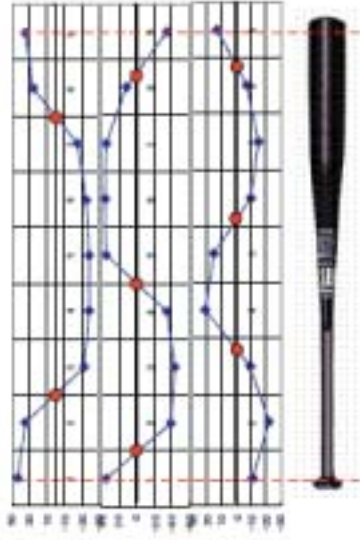
振動モード形状の比較: 4次モード

【解説】

図参照



振動モード形状の比較: 1～3次モード(実験)



【ポイント】

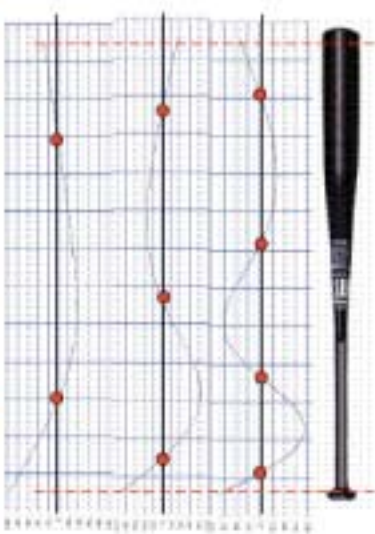
振動モード形状の比較: 1～3次モード(実験)

【解説】

図参照



振動モード形状の比較: 1～3次モード (CAE)



【ポイント】

振動モード形状の比較: 1～3次モード (CAE)

【解説】

四参照



CAEで見えるモード (その1)

バットの大型部分の丸い断面が縦横交互に横円形に変形する振動モード。

1972Hz



バットの大型部の断面

【ポイント】

CAEで見えるモード (その1)

【解説】

四参照

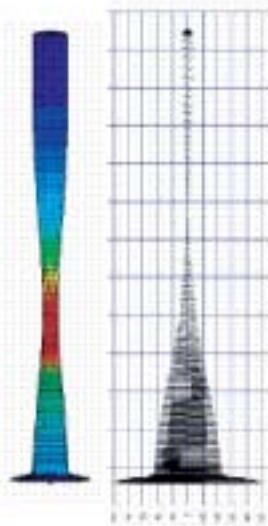
CAEでは、細かい計算を必要とする振動モード形状を可視化することができる。



CAEで見えるモード(その2)

バット小径部(グリップ部)のねじり振動。グリップ部が膨らんだように見えるのは、グリップ部断面の回転方向の変位を拡大して表示しているため。

1/272倍



グリップエンド部の断面



実験とCAEの連携:バットの例

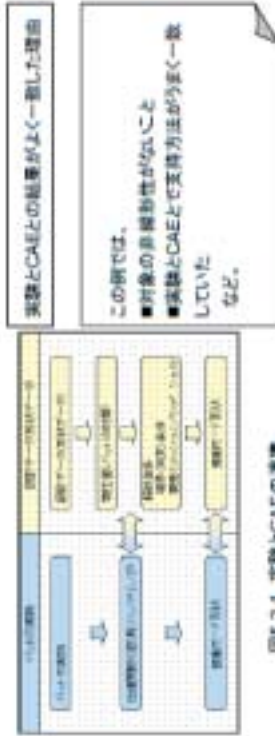


図5-2-1 実験とCAEの連携

【参考文献】

【ポイント】

実験とCAEの連携:バットの例

【解説】

図参照

【ポイント】

CAEで見えるモード(その2)

【解説】

図参照

CAEでは、細かい計測を必要とする振動モード形状を可視化することができる。



応用事例:コンプレッサ配管の騒音対策例

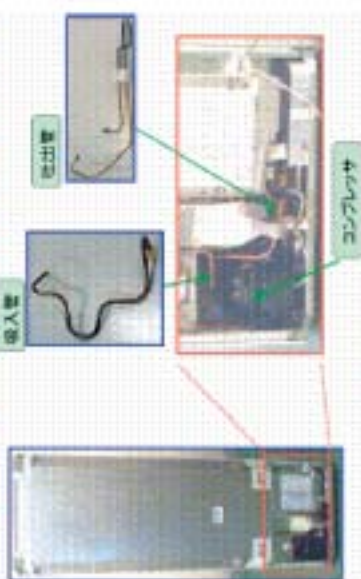


図5-2-2 対象物の概要

【中々スリ0207参照】

【ポイント】

応用事例:コンプレッサ配管の騒音対策例

【解説】

図参照



騒音の計測から対策までの手順



【中々スリ0207参照】

【ポイント】

騒音の計測から対策までの手順

【解説】

図参照



騒音(放射音)の確認:冷蔵庫背面全体

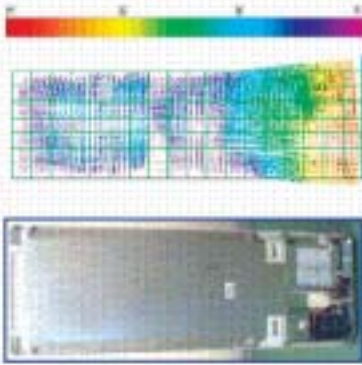


図5-2-3 音響インテンシティ計測
サウホーン(小野測器 M6-6420)

図5-2-4 音響インテンシティ解析結果例(120~1000Hz)

【参考】

【ポイント】

騒音(放射音)の確認:冷蔵庫背面全体

【解説】

図参照

<補足> 経験からの情報

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。

<参考> ゲトラホン

4箇のマイクロホンを正四面体の各頂点に配置した基自構造の3次元型インテンシティプロープである。専用ソフトを使用し、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。

<データの説明>

- 1)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
- 2)図例において、青から赤くなるほど音圧(dB)が高くなっている。
- 3)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。
- 4)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。



騒音(放射音)の確認:冷蔵庫下部

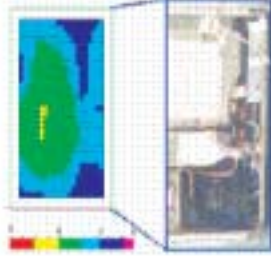


図5-2-5 コンプレッサ付近の
音響インテンシティ解析例(650Hz~750Hz)

【参考】

【ポイント】

騒音(放射音)の確認:冷蔵庫下部

【解説】

図参照

<データの説明>

- 1)次に、約700~800Hzの音響インテンシティを詳細に計測
- 2)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。
- 3)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。
- 4)図例より、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。



部品(吸入管)単体の実験モード解析

共振インピーダンス解析の結果、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。



図5-2-6 計測の様子

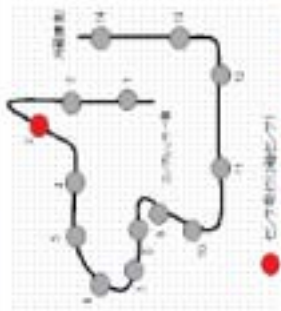


図5-2-7 吸入管の形状定義

【参考文献】
【中キス49300参照】

【ポイント】

部品(吸入管)単体の実験モード解析

【解説】

図参照

- 1) 音響インピーダンス解析の結果、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。
- 2) 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。
- 3) 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。

<補足> 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

- 1) 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。
- 2) 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。

計測データ(周波数応答関数)例

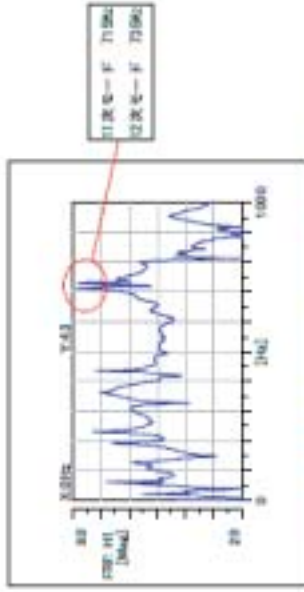


図5-2-8 吸入管の周波数応答関数の例(ポイント10 左方向)

【参考文献】
【中キス49301参照】

【ポイント】

計測データ(周波数応答関数)例

【解説】

図参照



振動モード形状

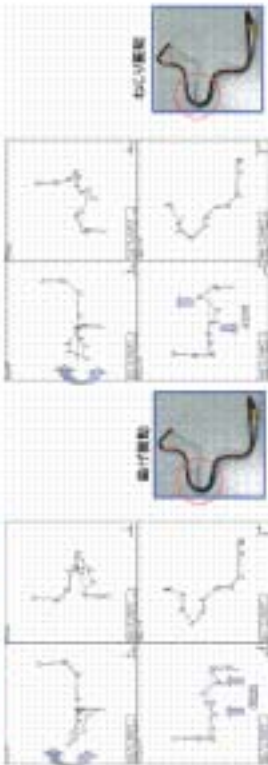


図5-2-9 モード解析結果(11次モード:715Hz) 図5-2-10 モード解析結果(12次モード:731Hz)

【参考文献】

【ポイント】
振動モード形状

【解説】
図参照

- 1) MEscopeVESを使った吸込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。
- 2) 同図より、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。

実験動解析

吸込管が組み込まれた状態での振動現象を可視化するため、実験動解析を行う。

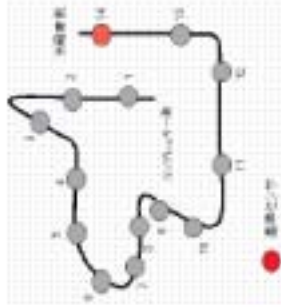


図5-2-11 実験動解析の形状定義

【参考文献】

【ポイント】
実験動解析

【解説】
図参照



計測データ(加速度応答)の例

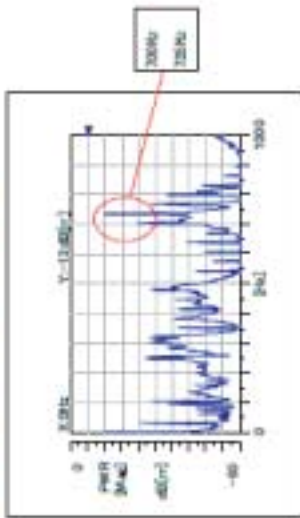


図5-2-12 ポイント2 Z方向の実稼動時の加速度の事例

【参考】
【平成28年03月03日撮影】

【ポイント】

計測データ(加速度応答)の例

【解説】

図参照

1)実稼モード解析の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。
2)実稼動解析(実稼動アニメーション)の結果からも、実稼モード解析結果と等しい。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。

実稼動解析例



図5-2-13 実稼動解析の1例

【参考】
【平成28年03月04日撮影】

【ポイント】

実稼動解析例

【解説】

図参照



対策

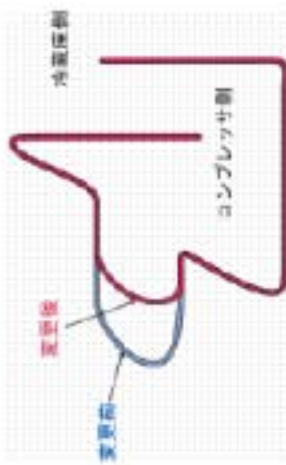


図5-2-14 対策結果

【参考】(P.43)03.04(参照)

【ポイント】
対策

【解説】
図参照

1)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)対策を行った。
2)尖部には、図5-2-14に示すように、高曲率を極くしている。



対策による効果の確認

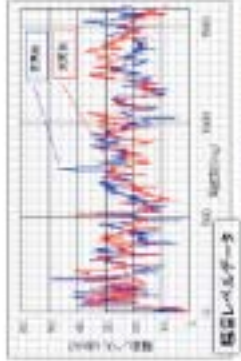


図5-2-15 対策前後の騒音レベルの比較

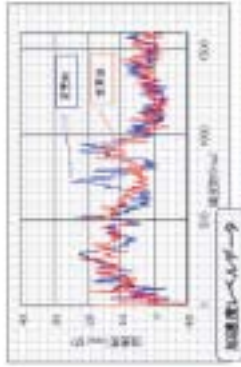


図5-2-16 対策前後の加速度レベルの比較

【参考】(P.43)03.05(参照)

【ポイント】
対策による効果の確認

【解説】
図参照

1)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。
2)尖部に相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。



結論

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コンプレッサー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。

【中々スリPG.06参照】

【ポイント】

結論

【解説】

同参照



実験とCAEの連携：応用事例

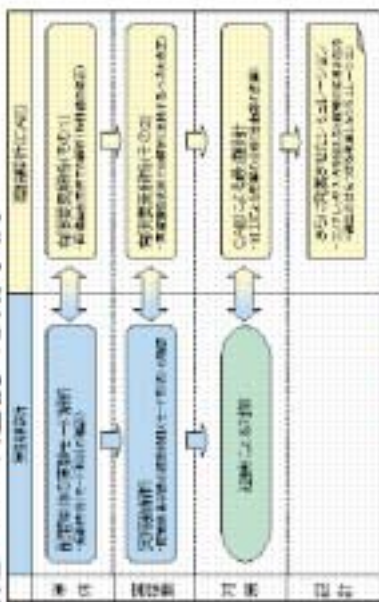


図5-2-17 実験とCAEの連携

【中々スリPG.06参照】

【ポイント】

実験とCAEの連携：応用事例

【解説】

同参照

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ができたが、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際には、いたっていい。



第3節 今後の課題及びまとめ

学習のポイント
 実験とCAEの連携について、実験担当者側及びCAE担当者側から見た今後の課題について説明し、実験とCAEの連携についての概要を理解する

- 5-3-1 実験から見た今後の課題
- 5-3-2 CAEから見た今後の課題
- 5-3-3 まとめ

【節全体のポイント】

実験とCAEの連携について、実験担当者側及びCAE担当者側から見た今後の課題について説明し、実験とCAEの連携についての概要を説明する。

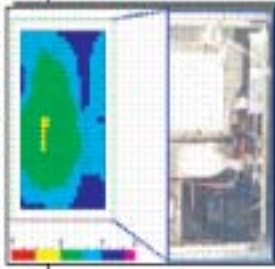
【節全体の解説】

実験とCAEの連携について、基本的な事例としてパットの例と応用事例を取り上げ、実験担当者側、CAE担当者側からの今後の課題を説明し、今後の進め方についての考え方を説明する。

実験

実験・計測に関する今後の課題

- 人が「騒音」と判断している音は、何Hz？
人の聴感と周波数との関係(音質評価)...
- コンプレッサから配管に入力される加振力(起振力)は？
計測方法、推定方法...



【中々3-1-P03.07参照】

【ポイント】

実験・計測に関する今後の課題

【解説】

四参照

実験

実験からみたCAEへの要望

CAEを利用して簡単に振動モード形状を確認し、計測点を減らしての事前検証をなしで計測ポイントを決定し、本計測の計測点を決定したい。



- CAEによる解析のノウハウではなく、形状データ作成が楽(3D CAD)
- 計測点を決めるのに参考になるCAE結果を得るには、正確な形状データが必要

実際に計測した方が正しいことになり、なかなかCAEに近づけることができない。

- その他にも...
- 実際の部品は材料特性などのよみ決めたらよいのか?
 - バンプ等は高げれば、減速効果の減衰、材料、部材厚(ばらつき)の違い?
 - 実験モード形状とCAEでは、自由度や制約点数が異なる点があるか?
 - 実験モード形状とCAEでは、自由度や制約点数が異なる点があるか?
 - 実験モード形状とCAEでは、自由度や制約点数が異なる点があるか?

【中々ス+03.07参照】

【ポイント】

実験からみたCAEへの要望

【解説】

同参照

CAE

CAEの技術的課題

様々な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い。

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。

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・説明することから考えなければならないものも多い。

- 例えば...
- 加工硬化を帯びた金属材料物性値の変化
 - 加工による形状や部品の歪み
 - 樹脂材料・複合材料の異方性、温度依存性、平均一性
 - 積層板の歪み
 - 積層板の特性や非線形性
 - 接触/摩擦問題の本質的モデルでの計算負荷、収束性
 - 電磁/電磁場の非線形モデルでの計算負荷、収束性
 - 減衰効果のマルチスケール(物理現象、材料現象、媒体との粘性減衰)
 - 非線形化、非線形化の問題

【中々ス+03.08参照】

【ポイント】

CAEの技術的課題

【解説】

同参照



CAE

CAEの使われ方

	解析内容	CAEへの要求	ツール
解析専任者	研究や実験検証またはトランスクリプションのために、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高精度で通い分けられるかを求める。	実験結果との相関や解析精度	<ul style="list-style-type: none"> ■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 ■設計者や実験者が片手間で行なうのは困難
解析専任でない人	3次元CADを使って日々設計業務を行っている。	設計判断材料の一つとしてシミュレーション	<ul style="list-style-type: none"> ■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。 ■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揃っての相対比較を中心に考察

【中々スリ403.08参照】

【ポイント】

CAEの使われ方

【解説】

四参照

CAEツールの使われ方から、大きく2つのグループに分けられる。

①解析専任者が研究や実験検証またはトランスクリプションのために、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通い分けられるかを求めるグループである。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。

②3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グループである。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。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揃っての相対比較を中心に考察することになる。

③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いであろう。

④いずれにしても、実験と解析モデルと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できない。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調整が含まれており、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われる。



CAE

CAEからみた実験とは

CAE側から考えると、

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。実験ではそのメカニズムで説明できるような裏付けが欲しい。解析精度や実験との誤差の最小化は本格的な問題であって、それ自身が目的ではない。

<実験への要望>

より本質的な現象を模倣することのできるモデル構築をCAEの目的とするならば、

- 様々な現象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。
- 個々の実験を効率良く行なう実験計画も課題。

【中々スリ403.08参照】

【ポイント】

CAEからみた実験とは

【解説】

四参照



まとめ：実験とCAEの現状

- 現状
実験及びCAEの両方とも高コスト課題は少なくない。
- 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トータルでの未熟防ぎもできることになる。
- 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。

【中々スリPG.09参照】

【ポイント】
まとめ：実験とCAEの現状

【解説】
四参照



まとめ：実験とCAEの連携

- 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必要
- 解析を行う前、実験を行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重要
- 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
こちらから始めるのも1つの方法

【中々スリPG.09参照】

【ポイント】
まとめ：実験とCAEの連携

【解説】
四参照