

実形状再現モデルによる振動解析の精度向上

Enhancement of Vibration Analysis Accuracy Using FE Model Applied by Three-dimensional Measurement Technology

神 村 直 毅*
Naoki KAMIMURA

要 旨

有限要素法の誤差要因の一つとして考えられる実験部品と CAD の形状差異による影響について検証をおこなった。3次元形状計測技術とモデル化技術を複雑形状のパワートレイン構造部品に適用し、実形状を再現した有限要素モデルを作成した。試作トランスミッションケースにおいて、実形状と CAD の形状誤差を明らかにし、CAD から作成したモデルと実形状から作成したモデルの振動特性の比較検証の結果、特に高周波領域の振動モードに対し形状誤差の影響があることを確認した。

以上の結果から、有限要素モデルにおける形状再現性の重要さが明確になった。また、実形状計測技術が高精度な有限要素法のモデル作成ツールになることを実証した。

ABSTRACT

The influence of shape differences between the experimental part and the CAD shape, which is thought to be an error factor in the finite element method, was verified. Three-dimensional shape measurement and modeling technologies were applied to power train structural parts that have a complex shape, and a finite element model was created that reproduces the real shape. The shape error between the real shape and the CAD shape of a prototype transmission case was clarified, and the vibration characteristics of a model created from the CAD and a model created from the real shape were compared and verified. The results confirmed that shape error has a noticeable influence, particularly in the high frequency mode shape. These results clearly showed the importance of shape reproducibility in a finite element model, and proved that real shape measurement technology can be used as an accurate modeling tool for the finite element method.

1. はじめに

近年、自動車の環境性能向上のために部品単位での軽量化要求が高まっている。一方、従来の振動騒音性能向上のための構造対策は、重量増加を伴う場合が多く、軽量で低振動騒音を両立できる構造の実現が求められている。

パワートレインの構造検討に有効な手法として有限要素法(FEM: Finite Element Method)を用いた振動解析を実施しているが、検討すべき周波数範囲が高周波域に拡大していることから、精度確保の難易度が増している。

高周波領域では振動モードが複雑となるために、FEモデルは高い精度でモデル化されている必要がある。

部品図面の3次元化が進み3次元 CAD 形状から FE モ

デルを作成できるようになったが、実験で得られた振動特性である固有振動数、振動モード、周波数応答関数(FRF: Frequency Response Function)と比較すると精度的に不十分な場合もあり、解析誤差要因の明確化と精度向上手法を確立することが求められている。

従来、振動解析の精度向上手法として、実験結果に合うようにモデルの板厚、材料定数などを修正するというモデルアップデート手法⁽¹⁾を用いている。ソリッド要素モデルの場合、材料定数を変更パラメータとしている。しかし、この手法では、実験モーダル解析を必要とすることから長期の解析となること、修正された材料定数は物理的に正しい値とは限らず、汎用性に欠けることなど課題を有している。

パワートレイン構造構成部品単体の振動解析の精度は、

*四輪開発センター

下記3項目に依存すると考えられる。

(1)形状

(2)材料定数(ヤング率, ポアソン比, 質量密度)

(3)要素サイズ

形状誤差による影響は、従来より想定されていたが、複雑な形状を有するパワートレインの構造部品の詳細3次元CAD形状が無かったこと、複雑形状を有する部品の3次元形状計測技術が不足していたこと、計算環境面から忠実な形状を再現したFEモデルでの計算実行が困難であったこと、などの理由から、十分な検証が実施されてこなかった。

近年、3次元CAD化、形状計測技術と応用技術の進歩、計算環境の向上により形状の影響度検証に必要な環境が整ってきた。3次元形状計測技術を応用したCAEへの活用事例^{(2), (3)}も紹介されているが、振動解析での形状差異の影響についての検証報告事例はない。

本稿では、複雑形状を有したパワートレインの構造部品に対し3次元形状計測技術とデータ処理技術を適用し、実形状を再現したFEモデルとすることで形状の影響を明確にするとともに、高精度な解析が可能となることを実証したので報告する。

2. 形状計測手法

2.1. X線CTスキャナ

近年、3次元形状計測技術が向上し、光学スキャナ、X線CTスキャナの活用が図面検証の手法の一つとして一般化しつつある。

特にX線CTスキャナは、袋構造や内部構造を有する部品に対しても非破壊で計測可能という優位性を有しており、複雑な形状を有するパワートレインの構造部品の形状評価に適している。

高い透過性能を持つ高エネルギーX線を利用した高速高精度CTスキャナも開発され、シリンダブロックなどの大物部品にも適用可能となり、活用事例も報告されている⁽²⁾⁻⁽⁴⁾。

評価対象部品のCT画像情報を形状評価に使用するために、積層させた3次元画像から部材の境界となる画素値の等値面をポリゴンモデルとして生成する⁽⁵⁾。この処理をおこなうことで、光学スキャナと同様のデータ構造とする。

2.2. 使用機器と撮像条件

使用したX線CTスキャナと撮像条件をTable 1に示す。

2.3. 形状計測精度

Fig. 1に示す精度検証用テストピースを作成し、上記条件で取得した3次元CT画像から生成したポリゴンモデルにて検証をおこなった結果、一般面で ± 0.15 mm程度の精度であった。鑄造部品の未加工部形状の評価には使用可能な精度である。

Table 1 Equipment and conditions for CT scanning

X-ray CT scanner	HITACHI HiXCT-1M
Energy of X-ray	0.95 MeV
Permeation	Aluminum 330 mm
Scanning mode	Rotate-rotate mode
Slice thickness	1.0 mm
Slice pitch	0.5 mm
Image size	1500 x 1500
Pixel size	0.4 x 0.4 mm

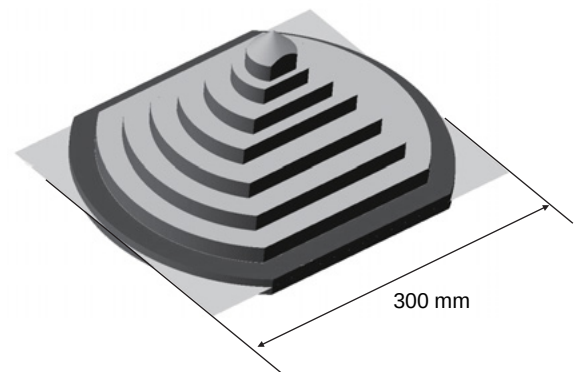


Fig. 1 Artifact used for verification

3. FEモデル化手法

CT画像から生成したポリゴンモデルは、数百万から数千万の微小面で構成されるため、直接的に内部にソリッド要素を生成すると自由度数が膨大なものとなり、現在の環境下では非現実的なものとなる。

計算可能なFEモデル化する手法は、大別すると2手法に分類できる。

3.1. CADサーフェス経由FEモデル化手法

ポリゴンモデルをもとに近似自由曲面を生成し、CADサーフェスとし、一般的なメッシュを用いてFEモデルを作成する手法である。

CADサーフェスを生成する技術は、意匠用途で市販ソフトも多数あるが、FEモデル化の際に必要な特徴線を生成することが困難であり、工数を要するという問題がある。最近では、特徴線を有したサーフェスモデル化技術の研究報告⁽⁶⁾もある。

3.2. メッシュ削減によるFEモデル化手法

ポリゴンモデルのメッシュ数をFEMに適用可能なメッシュ数に削減する手法である。

この手法は、X線CTスキャナによる撮像画像から生成したポリゴンモデルには明瞭な角部が生成されないこと、画像ノイズに起因した微細な凹凸が多いことなどにより、メッシュを削減する際に形状の特徴を十分に再現できない

ことが多い、要素品質が悪いなどの課題がある。これを解決する技術の一つとして多重解像度表現(MRR: Multi Resolution Representation)を用いたメッシュ生成システム(MRR メッシュ)が報告されている⁽⁷⁾。

この手法では形状誤差の少ない大規模ポリゴンモデルの段階で面や稜線等のフィーチャ情報を抽出し、属性情報として与えることにより大規模ポリゴンモデルに近い形状精度を保持し、同時に要素の高品質化をおこなうことでFEモデルを生成している。

3.3. FEモデル化手法の選定

CAD サーフェスは、種々の用途に転用可能という面で有用性はあるが、FEモデル化した際の形状再現性の観点では同等と考えられることから、本報告においては、モデル化工数面で優位性を見込めるMRRメッシュを試行することとした。

4. 形状計測結果

4.1. 対象部品

経験的にCAD形状から作成したFEモデルでは高い精度を得られない場合が多い部品である試作段階の砂型鋳造製のトランスミッションケースを選択した。

Fig. 2 に CAD 形状, Fig. 3 に前述の条件で得た 455 枚の CT 画像の 3 次元表示図, Fig. 4 に CT 画像から生成したポリゴンモデルを示す。

4.2. CAD 形状検証結果

ポリゴンモデルに対する CAD 形状の差異を Fig. 5 に示す。ポリゴンモデル面に対しCAD面が外方向を+, 内方向を-と定義する。

また、壁面厚さをトランスミッションケース内面から外面の距離として評価した結果を Fig. 6 に示す。

CAD形状に対し、全体的なひずみがあること、下面、側面が 0.5 mm 程度薄いことがわかる。

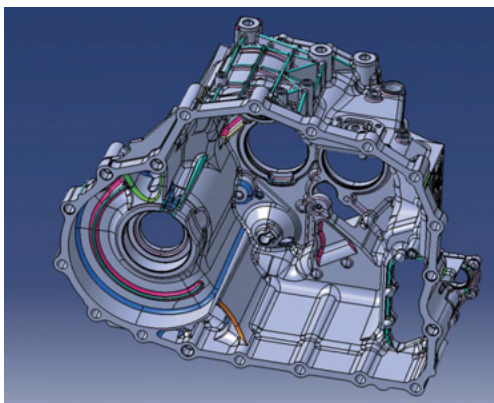


Fig. 2 3D-CAD model of subject part

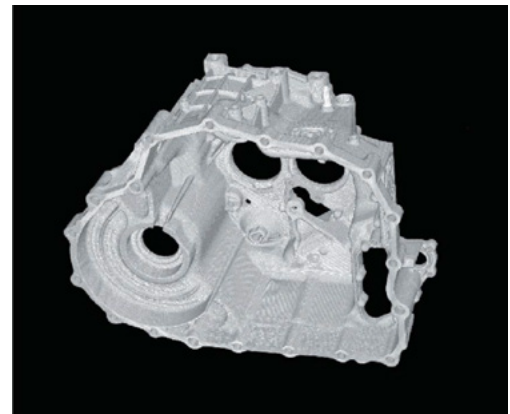


Fig. 3 3D-CT image

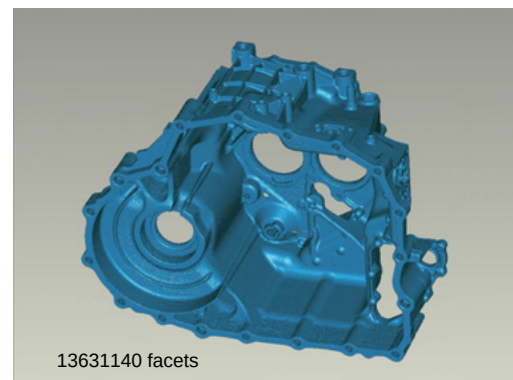
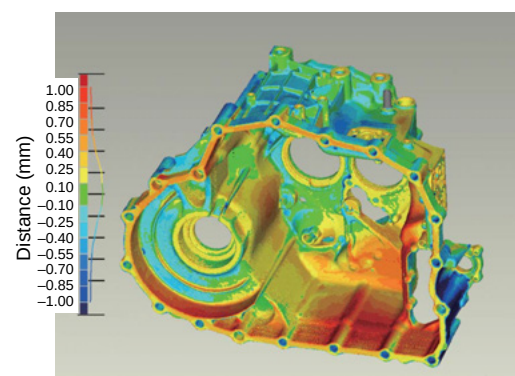
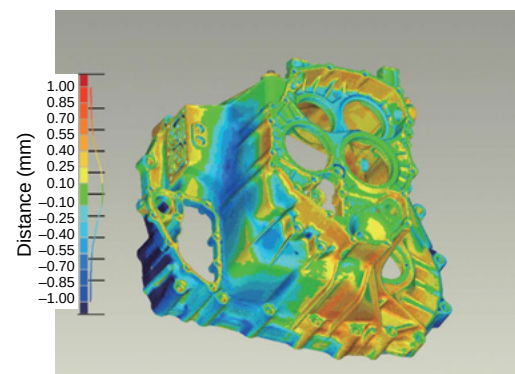


Fig. 4 Polygon model made from CT image



(a) View A



(b) View B

Fig. 5 Difference between CAD and polygon model

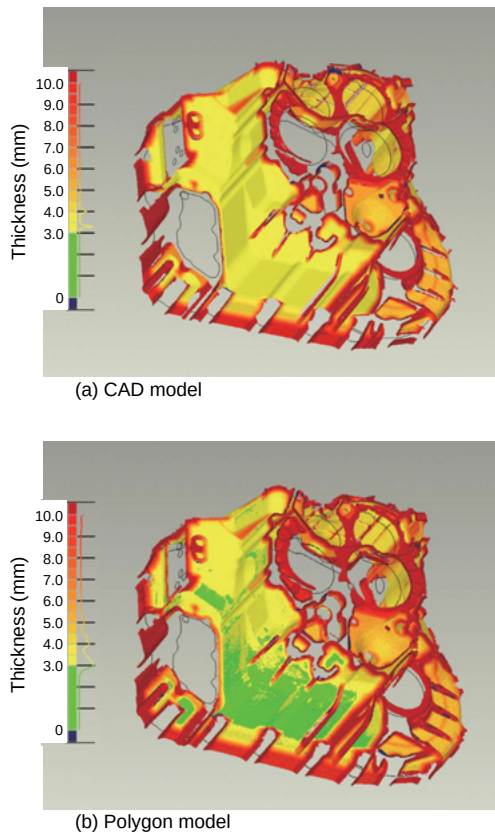


Fig. 6 Wall thickness

5. FE モデル

5.1. 実形状再現 FE モデル

CT 画像から生成した大規模ポリゴンモデル(13 631 140 facets)では MRR メッシュの計算容量上の問題があったため、削減処理をおこなったポリゴンモデル(1 466 387 facets)を使用した。

作成した FE モデルを Fig. 7 に示す。2 次四面体要素で構成されている。

Fig. 8 にポリゴンモデルに対する形状差異を示す。ポリゴンモデル面に対し FE モデル表面が外方向を +、内方向を - と定義する。設定要素長の影響もありフィレット部に差異は見られるが、全体としては形状維持性が高い手法であ

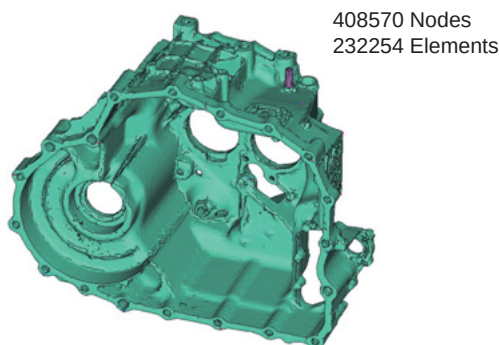


Fig. 7 FE model based on CT scanning

ることが確認できた。Fig. 5, Fig. 6 に示した CAD 形状と実物との差異の影響を評価できる FE モデルと考える。

本事例で FE モデル化に要した時間は一般的な PC(32bit Windows XP, 2.5GHz, 2GB メモリ, 1CPU 処理)で約 3 時間であり、実用的な工数を実現していることを確認した。CT スキャンからの一連の作業期間は約 3 日である。

5.2. CAD 形状 FE モデル

比較対象として CAD 形状から作成した 2 次四面体要素で構成された FE モデルを Fig. 9 に示す。要素長を小さく設定することで形状再現性を確保したため、モデル規模としては大きなものとなっている。

Fig. 10 に CAD 形状に対する形状差異を示す。CAD 面

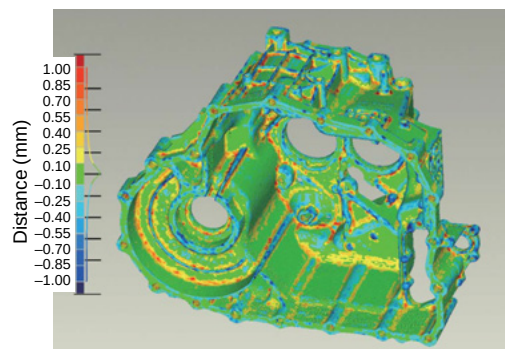


Fig. 8 Difference between FE model and polygon model

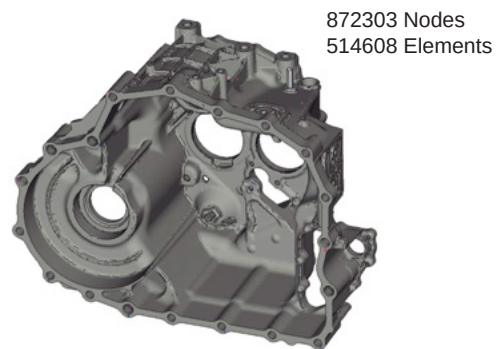


Fig. 9 FE model based on CAD

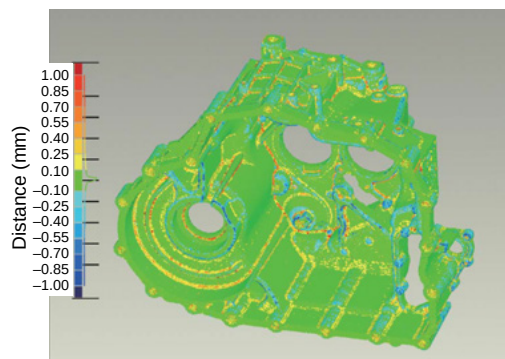


Fig. 10 Difference between FE model and CAD

Table 2 Material properties

Young's modulus	7.2e10 Pa
Poisson's ratio	0.33
Mass density	2.74e3 kg/m ³

Table 3 Comparison of mass

	Mass (kg)	Error ratio (%)
Measurement	8.24	—
CT base model	8.32	+0.96
CAD base model	8.43	+2.20

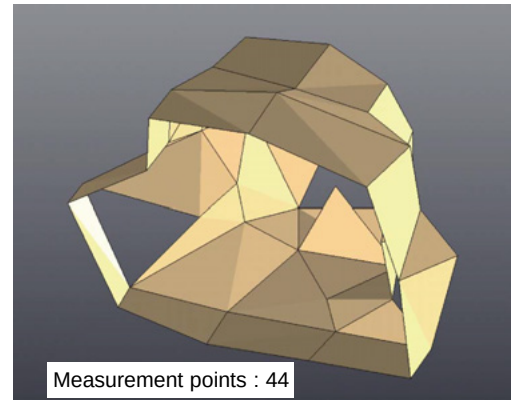


Fig. 11 Measurement points for EMA

に対し FE モデル表面が外方向を+, 内方向を-と定義する。CAD 形状の再現性が高いモデルであることがわかる。

5.3. 材料定数

材料定数による誤差を排除するために, 対象部品と同一ロットの部品から切り出したテストピースを用い, 材料定数計測を実施した。

共振法⁽⁸⁾によりヤング率, ポアソン比を求め, アルキメデス法により質量密度を求めた。材料定数を Table 2 に示す。

5.4. FE モデル質量比較(実測値比)

形状の差異を実物のモデルの質量にて比較した結果を Table 3 に示す。

FE モデルと実物の形状差異が質量差異として現れており, CAD 形状を忠実に再現しても 2.2%の誤差を有している。対して実形状再現モデルでは 1%以内に収まっている。

6. 実験検証方法

本報告においては, 実験モーダル解析(EMA: Experimental Modal Analysis)と FEM 固有値解析・周波数応答解析との比較検証を実施した。

高周波領域の検証用であり実験解析にも高い精度が要求される。

対象周波数が高いことと, 加振機の支持影響を排除するため加振方法としては, ハンマリング法を採用した。また, 複数回に分けて FRF 計測する際のセンサ質量分布の変化による影響を抑えるために, 計測点にセンサと同質量のウェイトを付加し, 計測毎にセンサとウェイトを置換するなど, 実験上の誤差を最小限に抑えている。

高次の複雑な振動モードを表現できるよう Fig. 11 に示す計測点を選択した。

FEモデルに対しては, センサ質量を付加質量として反映することで等価なモデルとした。

7. FEM 精度検証結果

7.1. FEM 振動解析

FEM ソルバーは, MSC/NASTRAN 2005 の固有値解析(SOL 103), 周波数応答解析(SOL 111)を使用した。

7.2. 固有振動数比較

実験の信頼性の観点から比較対象周波数は 2.5 kHz(24次モード)までとした。

モードごとの固有振動数の比較を Fig. 12, EMA に対する固有振動数誤差率を Fig. 13 に示す。

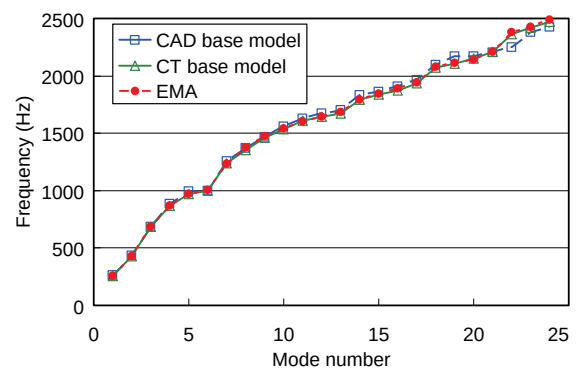


Fig. 12 Eigen frequency to mode number

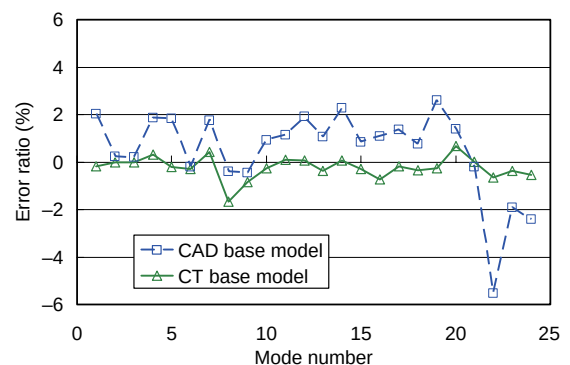


Fig. 13 Error ratio to mode number

Table 4 Eigen frequency error ratio

	Average error ratio (%)	Maximum error ratio (%)
CT base model	0.36	-1.67
CAD base model	1.55	-5.52

Table 4 に EMA に対する平均誤差率と最大誤差率を示す。平均誤差率は、誤差率の絶対値の平均値とした。

実形状再現モデルは固有振動数の実験比において、平均誤差率0.36%、最大誤差率-1.67%と高精度にシミュレートできている。

一方、CAD形状モデルでは、実形状再現モデルに対し誤差が大きく、平均誤差率1.55%、最大誤差率-5.52%である。

7.3. 振動モード相関性の比較

EMA と FEM の振動モードの比較評価をモード相関性係数(MAC: Mode Assurance Criterion)により実施した⁽⁹⁾。結果を Fig. 14 に示す。

Fig. 14(a)に示す実形状再現モデルを用いた場合では、高次の振動モードまで高い相関性が得られる。一方、Fig.

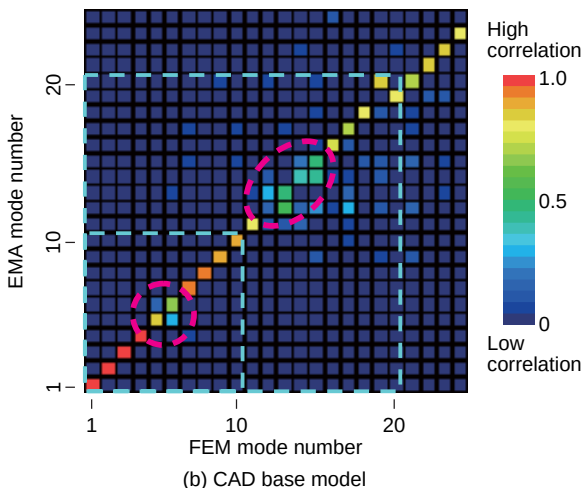
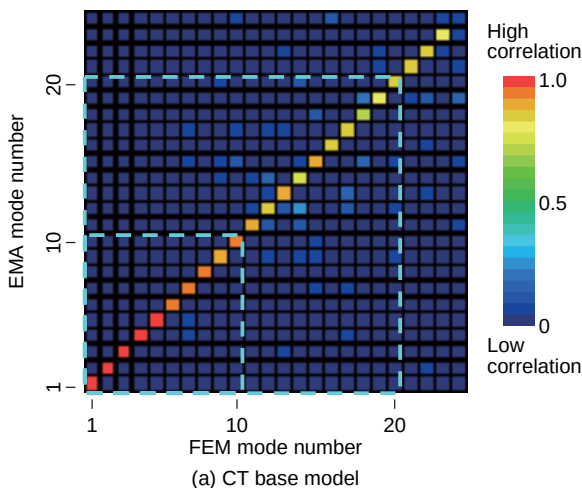


Fig. 14 Comparison of MAC

14(b)に示すCAD形状モデルを用いた場合では、5、6次と比較的低次の振動モードでも相関性が下がることと、12次以上の高次の振動モードでは相関性が低いことがわかる。

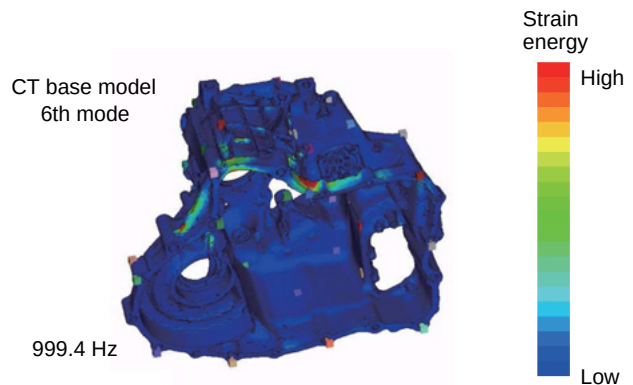
7.4. 要素ひずみエネルギー比較

振動モードの相関性に差異のある6次の振動モードの実形状再現モデルとCAD形状モデルのFEM固有値解析による振動モードを Fig. 15 に示す。カラースケールは、要素ひずみエネルギーを示している。

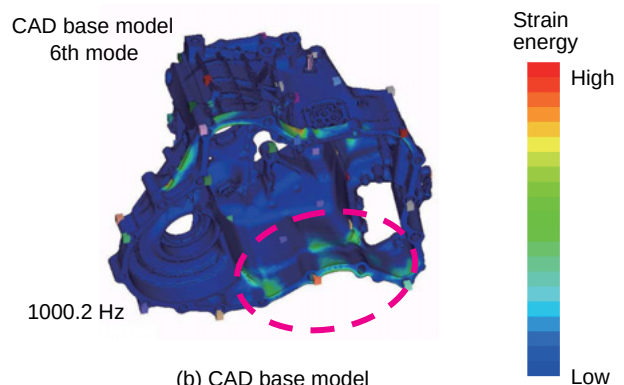
MACでの相関性の高さから実形状再現モデルの要素ひずみエネルギー分布は、実機状態を精度良く表現しているものとする。

実形状再現モデルでは、開口部上部が大きく変形する振動モードであるのに対し、CAD形状モデルでは、開口部下部も大きく変形する振動モードであり、要素ひずみエネルギーも上部と下部に高い部位が存在しており、異なることがわかる。これは、Fig. 6 にみられる下面側面の壁面厚さ0.5 mm 程度の差異に起因するものと推定される。

振動問題の対策は、問題となる周波数の振動モードと剛性感度を意味する要素ひずみエネルギーを参考に対策構造を検討することが一般的である。本結果のように振動モードが異なる場合は、異なる対策検討をおこなう可能性を示している。



(a) CT base model



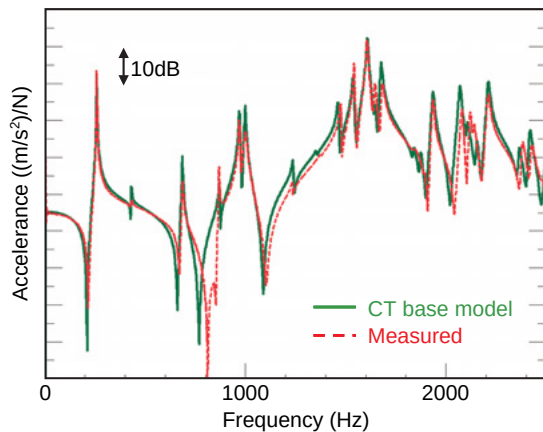
(b) CAD base model

 Fig. 15 Strain energy of 6th mode

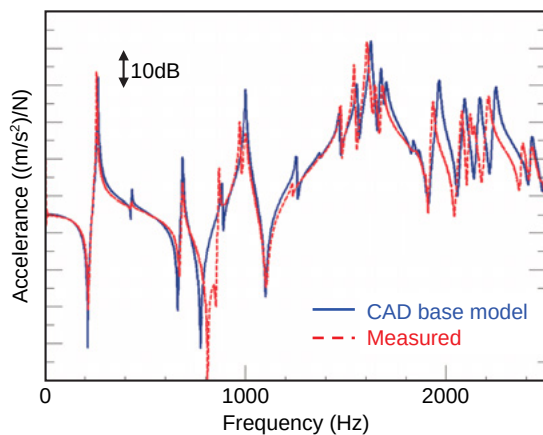
7.5. FRF 比較

実験モーダル解析結果より得られたモード減衰比の平均値を FEM に付与し、FRF を演算した。

両モデルの FRF と実験との比較を Fig. 16 に示す。実形状モデルでは、2.5 kHz までピーク周波数と応答レベルの双方で精度の高い結果が得られている。対して CAD 形状モデルでは、7.2 節で示した固有振動数の誤差、7.3 節で示した振動モードの差異の影響により、2 kHz 以上で FRF の誤差が大きくなっている。



(a) CT base model



(b) CAD base model

Fig. 16 Comparison of FRF

8. まとめ

振動解析の精度向上手法として、3次元形状計測技術とモデル化技術を複雑形状のパワートレイン構造部品に適用し、実形状を再現したFEモデルを作成する手法の有効性を検証することができた。

- (1) 実物形状を再現したモデルを使用することで、高周波領域まで高精度な FEM 振動解析が可能であることを明確にした。
- (2) これまで明確に評価できなかった複雑形状部品の FE

モデルの誤差要因の一つである形状の差異の影響を明確にした。

- (3) 物理的な計測データのみからFEモデル化が可能であることから汎用性が高い高精度化手法であることを証明した。

参考文献

- (1) 酒井竜英, 寺田匡弘, 小野修一, 神村直毅: 室内音予測を目的としたヴァーチャルビークル解析手法, Honda R&D Technical Review, Vol.13, No.2, p.195-204
- (2) 三宅智史, 村田充, 吉田隆博, 下山英昭, 藤井博司, 山下耕司: X線 CT スキャナの導入と活用事例の紹介, マツダ技報, No.22, p.167-172(2004)
- (3) 定岡紀行: X線 CT を活用したデジタルエンジニアリング, 精密工学会春季大会シンポジウム資料, p.69-76 (2004)
- (4) Okada, T., Miwata, Y., Ishii, H.: Three-Dimensional Shape Measurement with X-Ray CT-Scan, SAE Paper, 2003-01-1033, p.1-5(2003)
- (5) Lorensen, W., Cline, H.: Marching Cubes: A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm, ACM SIGGRAPH 1987 Proceedings of the 14th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, p.163-169(1987)
- (6) 松崎幸一, 鈴木宏正, 相馬淳人, 定岡紀行: 測定データの自動 CAD モデル化に関する研究(第1報), 自動車技術会前刷集, No.122-07, p.9-12(2007)
- (7) Date, H., Kanai, S., Kishinami, T., Nishigaki, I., Dohi, T., : High Quality and Property Controlled Finite Element Mesh Generation from Triangular Meshes using Multiresolution Technique, ASME Journal of Computing and Information Science in Engineering, Vol.5, Issue 4, p.266-276(2005)
- (8) 日本機械学会: 弾性係数の測定法, 金属材料の弾性係数, 日本機械学会, p.7(1980)
- (9) 吉村卓也: モード相関係数, モード解析ハンドブック, コロナ社, p.128(2000)

■ 著 者 ■



神村直毅