

実稼働振動を用いたエンジン大規模アセンブリ解析の精度向上

Accuracy Improvement Method for Engine Large-scale Assembly Analysis Using Vibration Data During Actual Operation.



加藤 保雄*¹
Yasuo Kato

熊谷 拓也*²
Takuya Kumagai

網代 健也*³
Kenya Ajiro

エンジンの高出力化に伴い、ターボチャージャ、エアクーラ、配管などの給排気系統の部品は大型化し、給排気系アセンブリはエンジン本体からオーバハングして搭載される場合が多くなっている。また、アセンブリの部品点数や結合部が増加することで振動に対する強度評価がより一層複雑になっており、解析精度向上が求められている。そこで、ガスエンジンの給排気系アセンブリを対象として振動解析精度向上手法の構築に取り組み、精度向上に有効なプロセスを明らかにした。

1. はじめに

新機種開発において新規設計となった給排気系アセンブリに関して、設計段階の振動解析結果とエンジンを据え付けた後の実測結果との間に乖離があったために、振動起因の損傷が発生し、振動低減のため部品補強や防振部品の追加などの設計変更を余儀なくされる事例があった。これに対し、三菱重工エンジン&ターボチャージャ株式会社は、トラブルが発生した G16NB エンジンの給排気系アセンブリを対象として、振動解析の精度向上に取り組んだ。本報では、ハンマリングによる解析モデルの振動特性の精度向上、エンジン実稼働時の振動実測値を用いた解析入力条件の算出手法を構築し、給排気系アセンブリの振動モード、振動応力を精度よく推定できることを検証した結果を報告する。

2. G16NB エンジンの概要

G16NB エンジンは、クラス最高レベルの発電効率達成のため二段過給システムを採用した新型発電用ガスエンジンで、エンジン前方部にターボチャージャ4台を搭載(低圧ターボ×2台、高圧ターボ×2台)、一段目の低圧ターボの後流と二段目の高圧ターボの後流にそれぞれ空気冷却器を配置(低圧クーラ×2台、高圧クーラ×1台)、それに付随する配管類も含めてエンジン本体から前方にオーバハングした位置に搭載している。今回解析対象とした G16NB エンジンの給排気系アセンブリを図1に示す。

*1 三菱重工エンジン&ターボチャージャ株式会社 エンジン・エナジー事業部 技術部 主席チーム統括

*2 三菱重工エンジン&ターボチャージャ株式会社 エンジン・エナジー事業部 技術部 首席技師

*3 三菱重工エンジン&ターボチャージャ株式会社 エンジン・エナジー事業部 技術部 上席主任

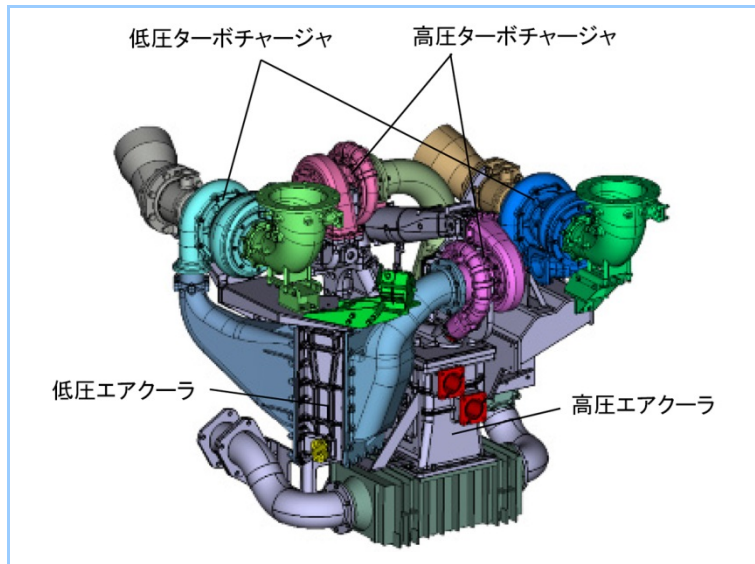


図1 G16NB 給排気系アセンブリ

3. FEM モデルのコリレーション

FEM モデルの精度向上手順を図2に示す。

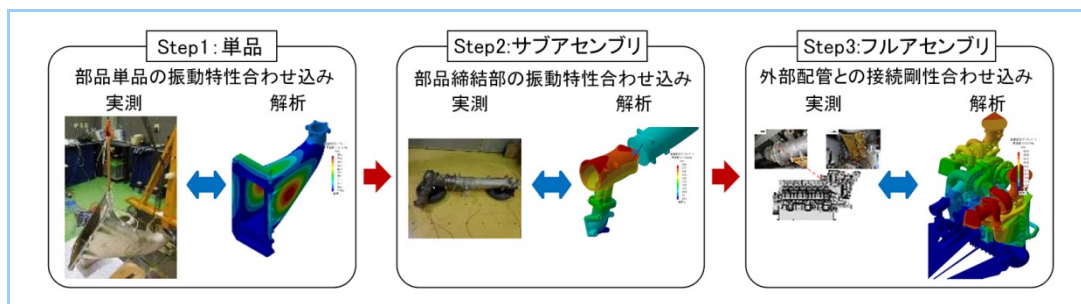


図2 FEM モデルの精度向上手順

Step1: 給排気系アセンブリ構成部品の中から、アセンブリ全体の振動モードに対して寄与が高いと考えられる部品を選定(図3)。部品単品でハンマリング試験を行い、加振点の伝達関数を指標としてFEMモデルの振動特性の合わせ込みを行った。合わせ込みは材料物性値(材料密度、ヤング率、減衰係数)の調整で行った(以降コリレーションと称す)。部品単品のコリレーション例を図4に示す。①実測重量に合うように材料密度を調整、②共振ピーク周波数をヤング率で調整、③共振ピークの振幅を減衰係数によって調整した。部品単品コリレーションを行った13部品について、実測と解析の固有値の比較を図5に示す。実測と解析の固有値の差異は、初期モデルでは最大16%であったが、コリレーションによって板金部品では3%程度に、鋳物部品では7%程度に低減した。

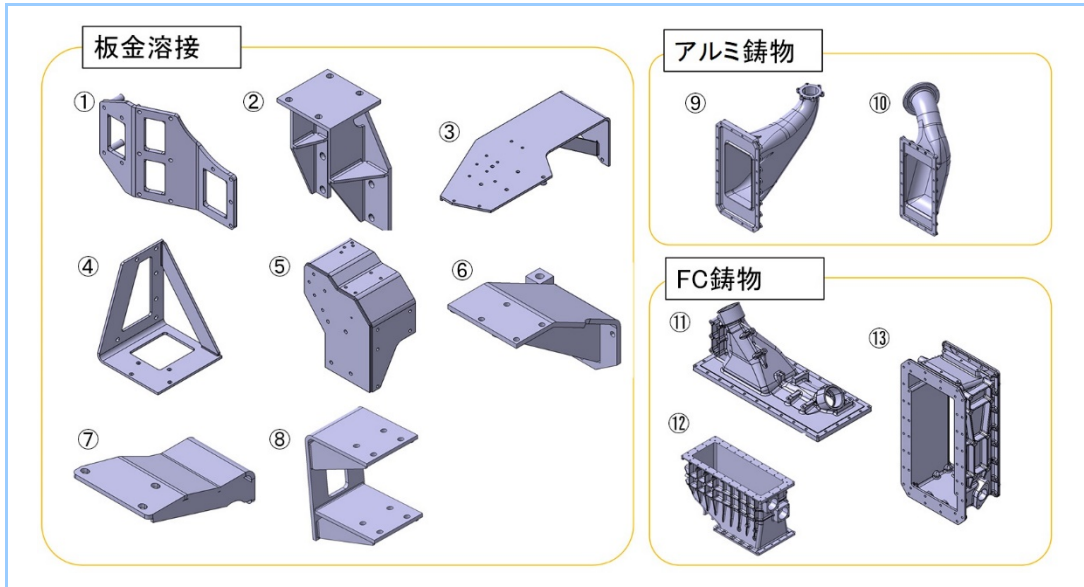


図3 コリレーション対象部品

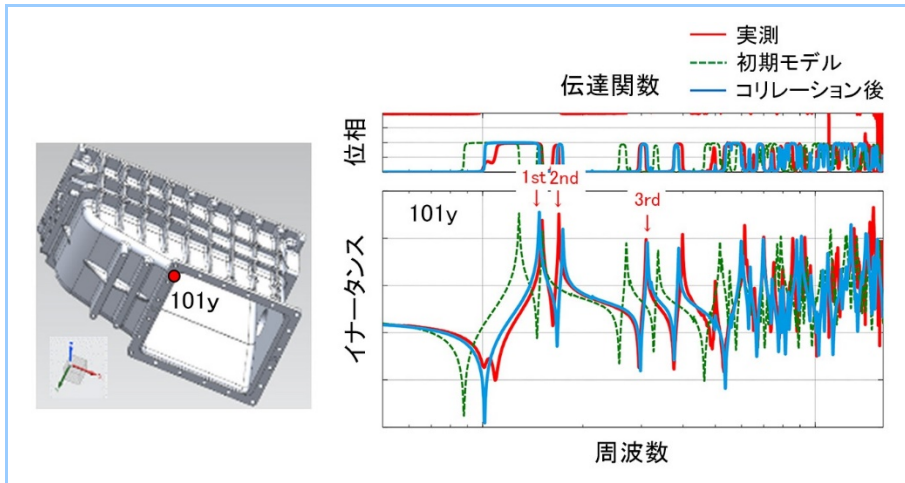


図4 Step1 部品単品のコリレーション例

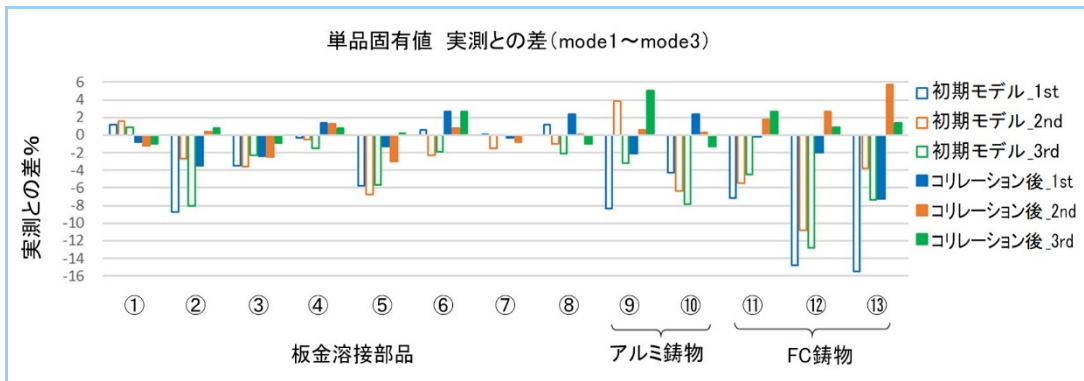


図5 Step1 部品単品のコリレーション結果例(単品固有値の実測との比較)

Step2: 次にベローズやリングを介して締結されたサブアセンブリの状態ではンマリング試験を行い、締結部のばね定数を調整した。ベローズのコリレーション結果を図6に、リングのコリレーション結果を図7に示す。低剛性のベローズ部やリング部はばね要素結合とし、実測の振動特性に調整する必要がある。

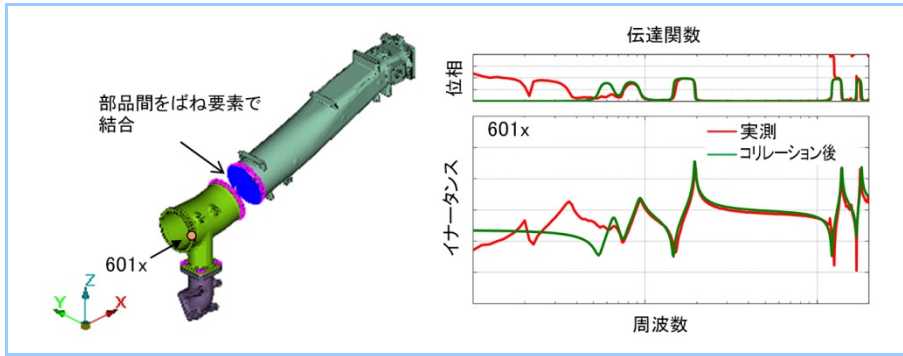


図6 Step2 サブアセンブリのコリレーション(ベローズ)

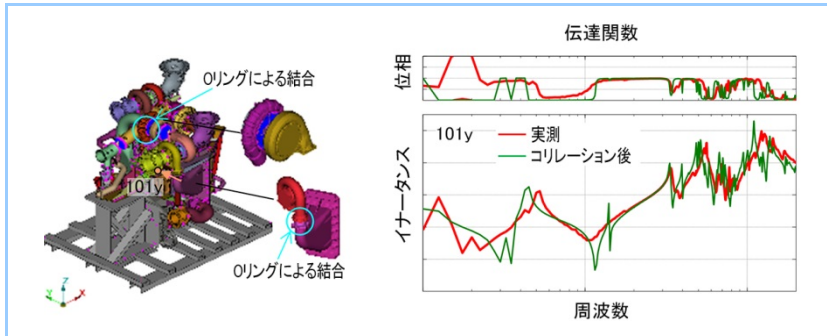


図7 Step2 サブアセンブリのコリレーション(Oリング)

Step3:最終的にはエンジンを発電セットに組み付けた状態で実稼働時の振動レベルに合うように、排気ダクトや冷却水配管と外部配管とを接続するばね要素のばね定数の合わせ込みを行った。図8に示すように、ばね定数はフルアセンブリ振動モードのピークレベルに与える影響が大きいため、据付け状態でのばね定数を解析モデルに反映することが重要であることが分かった。

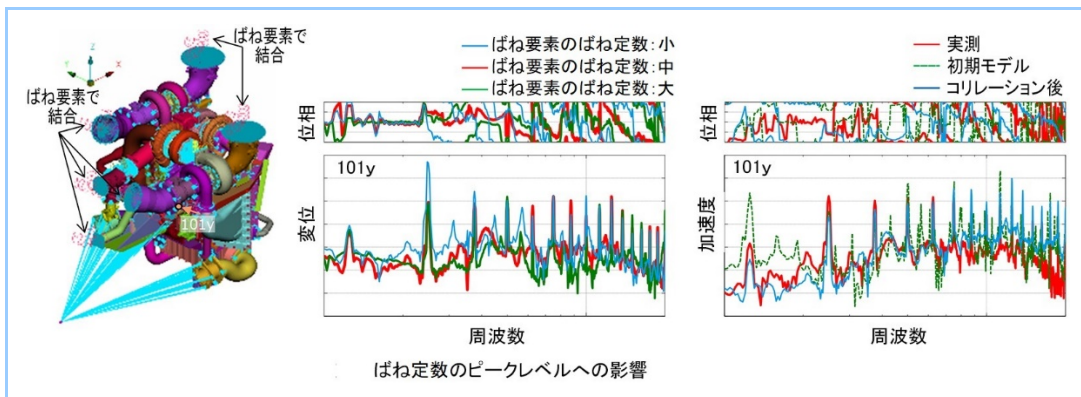


図8 Step3 フルアセンブリのコリレーション

4. 解析起振力の算出

実稼働時の振動計測結果を基にしたアセンブリ解析に入力する起振力算出手順を図9に示す。実稼働時のエンジンマウント4点(計測位置は任意)の3方向振動データを計測。計測データから、エンジン重心1点(任意の仮想点)における、6自由度(並進3方向, 回転3方向)振動を推定する。図10にエンジン重心における変位ベクトル $\{u\}$ と各計測点座標(エンジンマウント4点)における変位の関係式を示す。この式により算出される計測点4点の変位と実測値の差分に対して最小二乗法を用いて変位ベクトル $\{u\}$ を算出する。得られた変位ベクトルを解析の起振力としてエンジン重心に入力する。

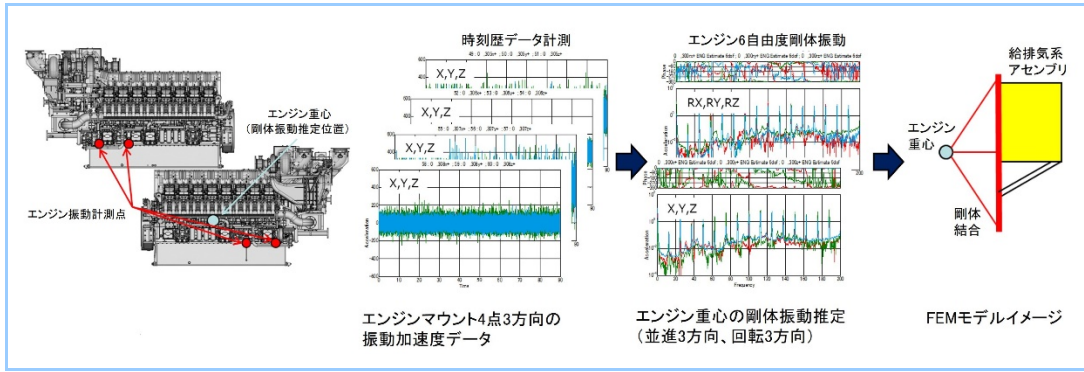


図9 解析起振力の算出手順

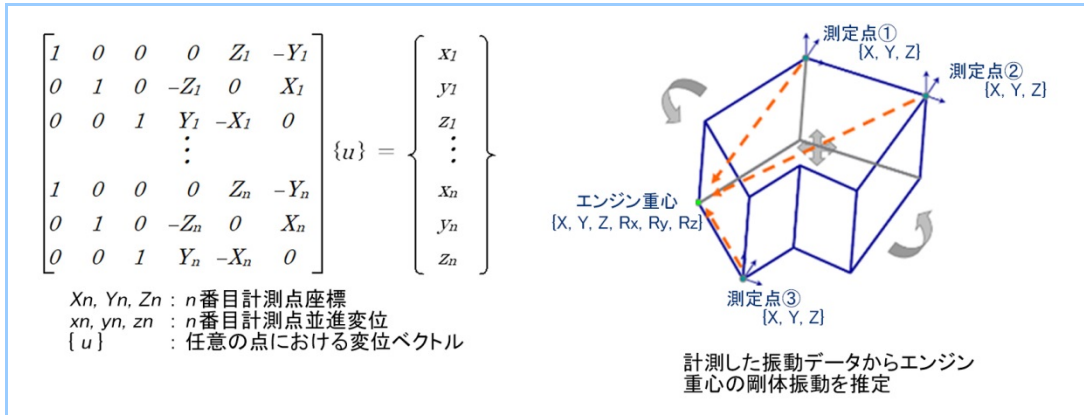


図10 仮想点の変位ベクトルと計測点変位の関係式

尚、本推定はエンジン本体を剛体と仮定しているが、得られた変位ベクトルを用いて計測点4点の変位を逆算し、それが実測値相当になっていることを確認することで、エンジン本体を剛体と扱えることを担保している。

この起振力算出手法により、FEM(Finite Element Method)モデルは給排気系アセンブリのみに限定し、エンジン重心と給排気アセンブリを剛体要素で結合したモデルに対して、振動解析を行うことができる。また、本手法は起振力算出に最小二乗法を用いるため、計測誤差を排除した入力条件を得られる特徴がある。

5. 解析精度検証結果

実稼働時の振動計測結果から推定したエンジン重心の変位ベクトルを入力とした解析結果(変位)を図11に示す。前述の精度向上手法を適用した結果、初期モデルに対して実測結果の振動特性を精度よく推定できていたことが検証できた。また、各モードにおける高応力発生位置と、実機で発生した破損部位は概ね一致している。

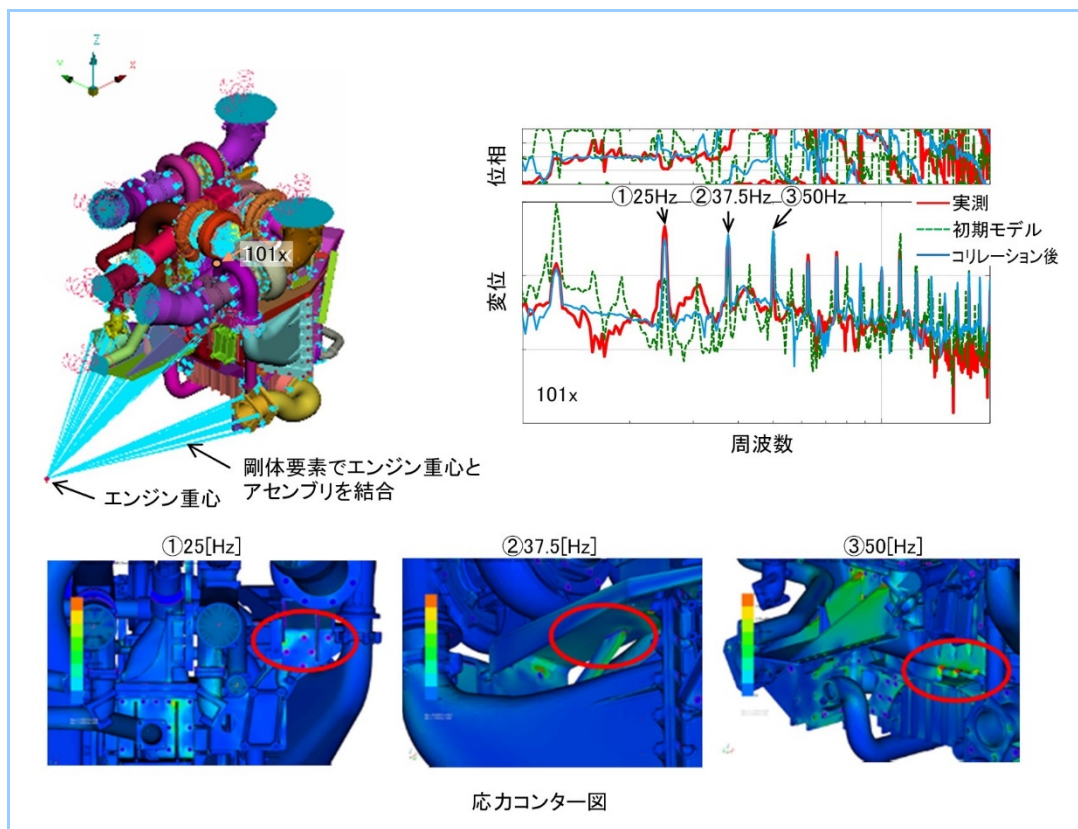


図 11 実稼働解析結果

6. FEM モデル作成指針

今回の取組みで得られた結果を基に FEM モデル作成指針を表1に纏めた。

今後、同様のコリレーション、解析を実施し、相場値の蓄積を行い解析モデル作成手順に落とし込んでいく。

表1 FEMモデルの作成指針

	対象部品・結合部	モデル化	密度	ヤング率	ばね定数・減衰係数
1	部品 (機械加工部品)	図面ベース	[Step1]材料の標準値 [Step2]コリレーション同定値	相場値 (今回の同定値)	-
2	部品 (板金溶接部品)	図面ベース			
3	部品 (鋳物)	図面ベース	[Step1]材料の標準値×1.1 (実体の肉厚増分) [Step2]実測重量で補正		
4	ベローズ部	バネ要素モデル	-	-	[Step1]相場値 (今回の同定値) [Step2]コリレーション同定値
5	Oリング部				
6	吸排気系ダクトの支持剛性・減衰				

7. まとめ

大規模アセンブリの振動解析精度向上のため、以下のプロセスが有効であることを明らかにした。

- ・ハンマリングによる解析モデルの振動特性の精度向上
- ・エンジン据付け状態における外部配管との接続剛性の反映
- ・エンジン実稼働時の振動実測値を用いた解析加振力の推定

今後、類似したエンジン部品の新規設計を行う際に、今回得られた各設定値を相場値として解析モデルに反映することで、設計段階における解析精度向上が期待できる。また、今回実施したプロセス同様にコリレーションを実施し、解析モデルへのフィードバック、相場値の蓄積を行うことで更なる精度向上が図られると考える。

一方、大規模アセンブリ全構成部品のハンマリングを行うことは効率的ではないため、ハンマリング実施部品の選定、各部品における加振位置の設定に関するスキル向上が課題である。