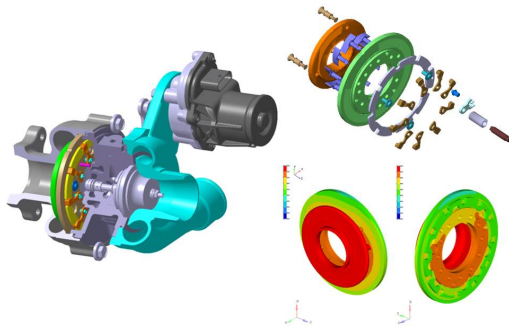


熱変形を考慮した MBD 解析による VG ターボノズルの信頼性評価技術

Reliability Assessment Technology of the Variable Geometry (VG) Turbocharger Nozzle by MBD Analysis in Consideration of Thermal Deformation



アロウラ ロヒット*1
Rohit Arora

金澤 宏幸*2
Hiroyuki Kanazawa

段本 洋輔*3
Yosuke Danmoto

当社製品の一つでもある乗用車向けターボチャージャは燃費と出力を両立する技術として可変容量ターボ(以下、VG ターボチャージャ)が幅広く採用されている。VG ターボチャージャは排気タービンブレードへの排気ガスの流速を制御し、過給効果を高めるものであり、流量を制御するノズル機構は多数部品で構成され高温無潤滑環境下で運用されるため、機能と信頼性を同時に考慮した設計が困難である。

本機構の信頼性向上設計を目的として弾性変形や振動応答を考慮できた従来の MBD 解析技術に構成部品の熱変形を加味した干渉や摺動抵抗を考慮できる動的挙動評価技術を開発したので概要を紹介する。

1. はじめに

当社ではターボチャージャの設計においてあらゆる解析技術を駆使して信頼性、性能改善の向上を図っている。従来の VG ターボチャージャノズル機構設計は常温時の部品形状でクリアランス設計を行い、操作性や摺動摩擦による損傷を評価して寸法公差を規定する手法を取っており、これとは別に運用時の温度環境下における熱変形を予測して接触による機能低下のリスクを回避する設計手法がとられている。実運転時には高温環境下での機構が作動するため、従来手法のような単一の解析技術のみでの評価は困難であり、機構の運動及び振動を予測する MBD (マルチボディダイナミクス) 解析に熱変形の影響を考慮したマルチフィジックス解析の適用が求められている。

本報では、MBD 解析では従来困難であった熱変形の影響を直接取り扱い、MBD 解析の機能と連成して熱変形により時々刻々変化するクリアランスや剛性の変化を考慮可能な技術を開発したので、以下に紹介する。

2. MBD と熱変形の連成解析技術の概要

2.1 解決したい課題

図1に VG ターボチャージャの仕組み・効果、図2に VG ターボチャージャノズルの配置及び機構を示す。本機構に対する運転時の温度分布を予測した一例としてガス温度上昇時(非定常時)の温度分布を図3、ガス温度定常時の温度分布を図4に示す。運転時に排気ガス温度と流れが変化することで温度分布が変化し、連動して熱変形も変化する。この熱変形の変化に対してノズル機構を構成する多数部品それぞれにおけるクリアランス変化を考慮して、いずれの運転条件で

*1 総合研究所 機械研究部

*2 総合研究所 機械研究部 主席研究員 技術士(機械部門)

*3 三菱重工エンジン&ターボチャージャ(株)ターボ事業部 技術部 主席チーム統括

も可変ノズルの絞り量を規定する位置決め性能を維持し、接触摺動による損傷リスクを回避する設計が求められる。

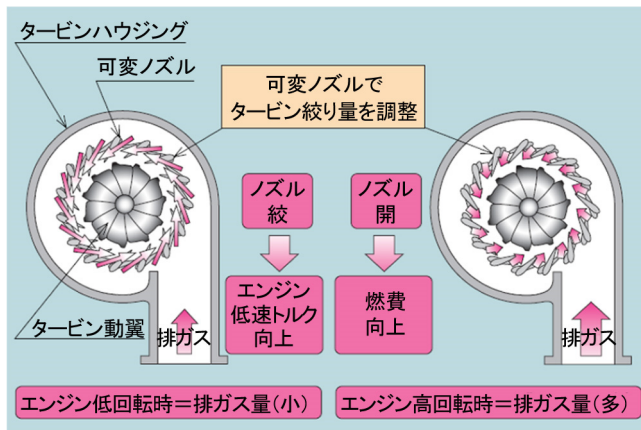


図1 VGターボチャージャの仕組み・効果

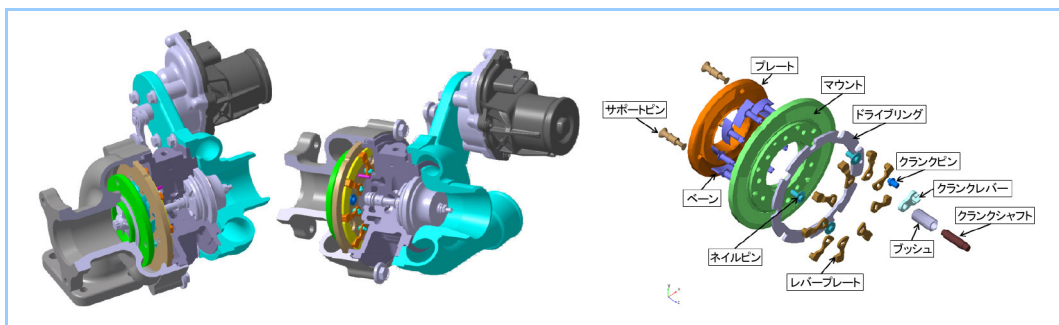


図2 VGターボチャージャノズル機構

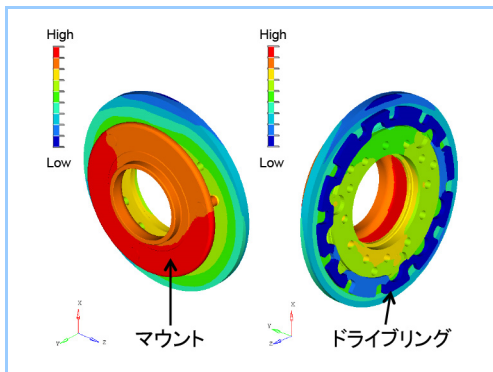


図3 ガス温度上昇時の温度分布

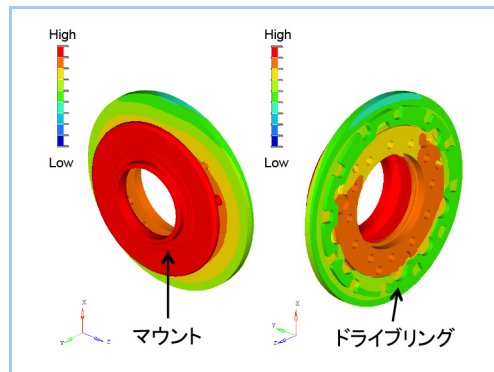


図4 ガス温度定常時の温度分布

2.2 熱変形を考慮した MBD 解析技術の開発

現在の熱変形の予測手法は FEM 解析が主流であり、製品を構成する部品同士の拘束条件を定義することで構成される運動方程式を解く MBD 解析を連成することは難しく、MBD 解析において熱変形を考慮することは困難であった。これに対して熱伝導方程式を微分方程式としてモード分解する手法⁽¹⁾に着目し、MBD 解析の運動方程式と連成することで熱変形と機構の運動を同時に解析評価する手法を IOWA 大学との共同研究で開発した⁽²⁾⁽³⁾。

一般的に前述した温度分布に関する特性式は物体の運動方程式と連成して式1のように表現できる。またドライブリングの温度分布に関するモード(固有値解析結果)を図5に示す。これらのモードの重ね合わせにより図3及び図4に示したような温度分布に対する変形が再現される。

MBD 解析にてドライブリングとマウントについて熱変形を予測した結果を図6示す。温度分布により部品間の相対的な変形量に差が生じることで接触形態に分布が生じている。MBD 解析ではこのような変形、接触状態を境界条件としてドライブリングの回転挙動による部品間の隙間や接触状況の変化が予測可能となる。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{ff} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{q}}_f \\ \ddot{\mathbf{q}}_T \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{D}_{ff} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{D}_{TT} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{q}}_f \\ \dot{\mathbf{q}}_T \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{ff} & \mathbf{K}_{fT} \\ \mathbf{0} & \mathbf{K}_{TT} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{q}_f \\ \mathbf{q}_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_f \\ \mathbf{Q}_T \end{bmatrix}$$

↑ 熱容量効果の項
↑ 熱伝導率効果の項
↑ 熱ストレス効果の項

式1 運動方程式と熱伝導方程式の連成

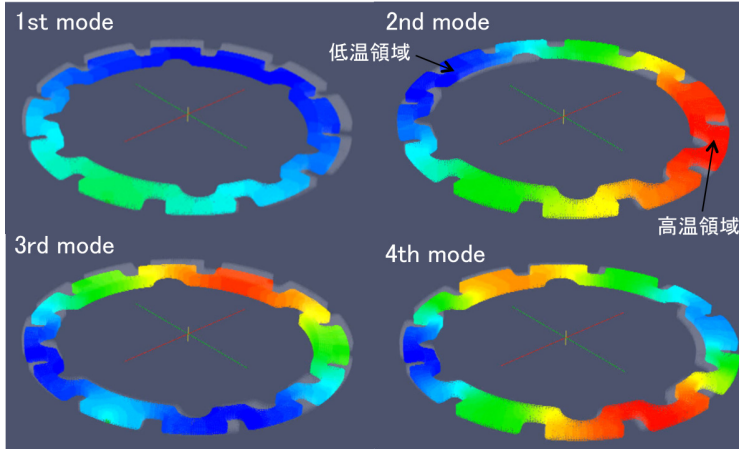


図5 ドライブリングの温度分布モード(固有値解析結果)

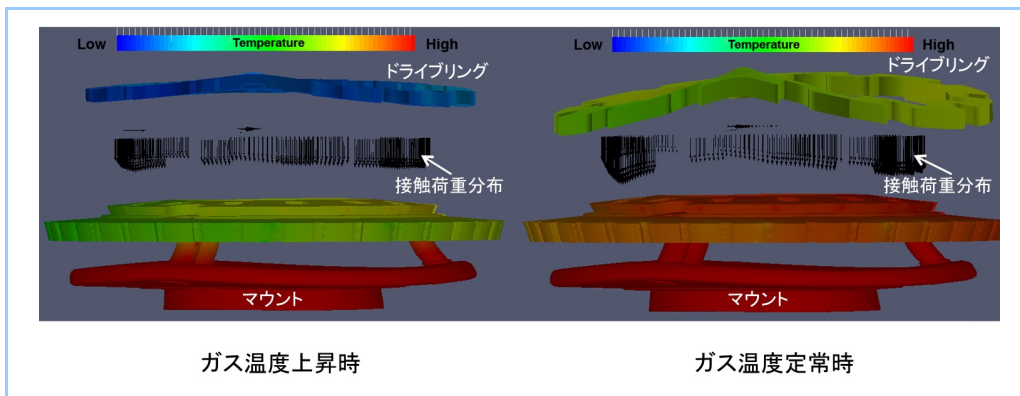


図6 ドライブリング下面とマウント上面の熱変形による接触荷重分布

3. 連成解析を活用した挙動及び発生事象の予測

3.1 ガス温度定常時の温度分布の熱変形に対する挙動予測

図3に示した、温度分布を境界条件とした熱変形を有する部品クリアランス及び接触状態でノズル機構開閉動作の挙動解析を実施した。図7にドライブリングとマウントの接触荷重を抽出した結果を示す。ドライブリング回転角度(ベーン開度)により強く当たる接触部位と荷重が変化する予測結果となっている。

3.2 ガス温度上昇時の温度分布の熱変形に対する挙動予測

次に図4に示すガス温度上昇時の温度分布を境界条件として、ノズル機構開閉動作の挙動解析を実施した。図8に示すようにガス温度定常時の結果と比較して動作時に強く当たる接触部位や荷重の大きさが異なる予測結果となっている。

3.3 開発した解析手法に期待される効果

開発したMBDと熱変形の連成解析技術を用いてVGターボチャージャノズル機構の開閉動作において温度分布の影響を予測した。図7、図8に示すように温度分布やベーン開度により部品同士の接触位置及び荷重の大きさが変化する予測結果となっている。このような応答は試験では計測困難な事象であり、あらゆる運転条件における部品の接触箇所と荷重を把握することにより最適かつ損傷リスクを低減するクリアランス設計を可能にすることができる。

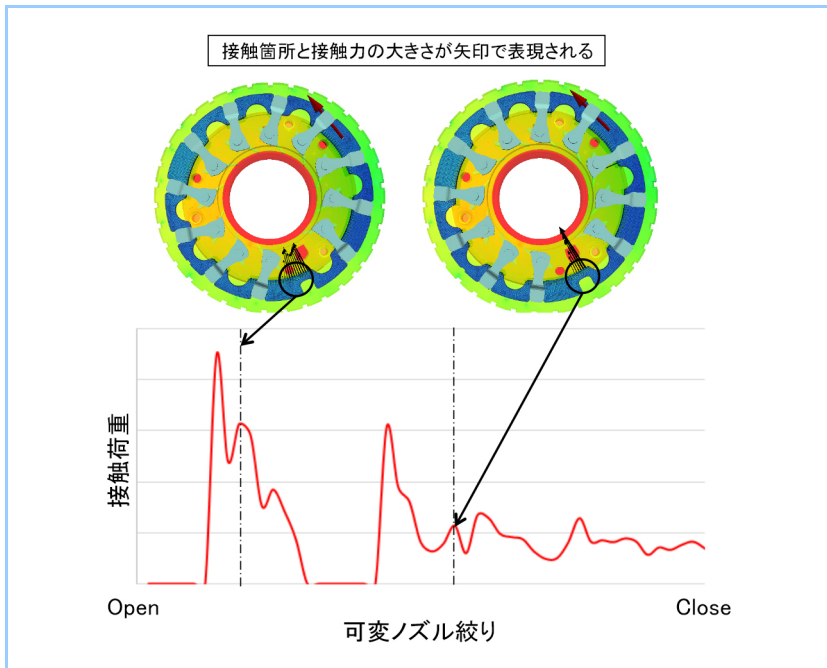


図7 ドライブリング内径とマウント外径の接触荷重変化(ガス温度上昇時)

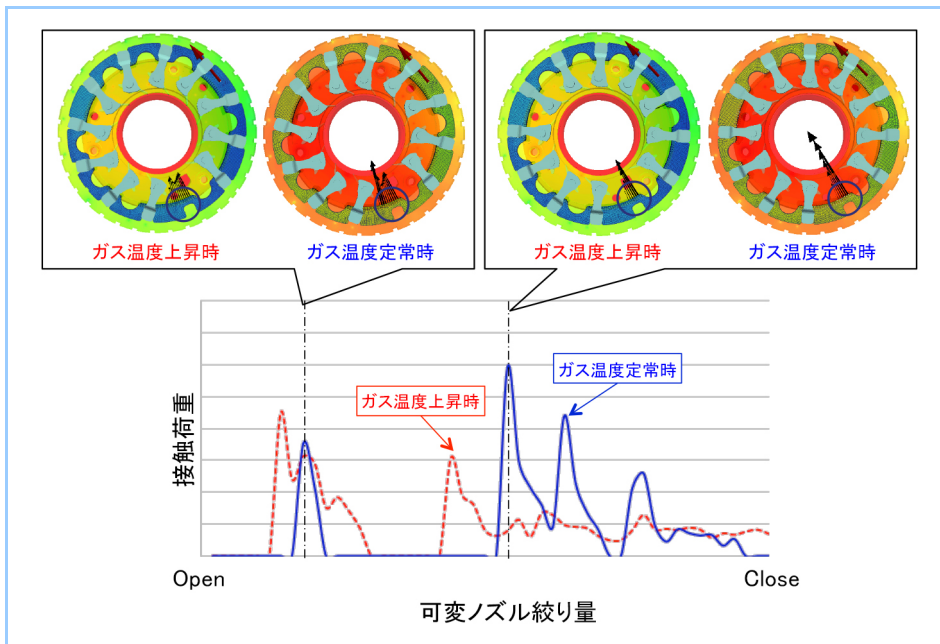


図8 ドライブリングとマウントの接触荷重変化(ガス温度上昇時と定常時の比較)

4. まとめ

本報では VG ターボチャージャノズル機構設計に対して従来困難であった熱変形と MBD の連成解析技術を適用することで得られる効果の例を示した。

実機状況の計測や把握が困難な高温環境下における製品性能の予測が可能となる本解析手法を導入することで信頼性の高い製品設計を達成するとともに試作・試験回数の低減、手戻り防止が期待できる。

参考文献

- (1) A.Heckmann. et. al, FLEXIBLE BODIES WITH THERMOELASTIC PROPERTIES IN MULTIBODY DYNAMICS, MULTIBODY DYNAMICS 2005, ECCOMAS Thematic Conference
- (2) Yamashita, H., Arora, R., Kanazawa, H. and Sugiyama, H., 2017, "Development of Reduced Order Thermomechanical Model Using Floating Frame of Reference Formulation", Proceedings of ASME International Conference on Multibody Systems, Nonlinear Dynamics, and Controls (ASME

DETC2017-67317), Cleveland, OH, United States.

- (3) Yamashita, H., Arora, R., Kanazawa, H. and Sugiyama, H., 2019, "Reduced-Order Thermomechanical Modeling of Multibody Systems Using Floating Frame of Reference Formulation", IMechE Journal of Multi-Body Dynamics, in press (DOI: 10.1177/1464419318810886).