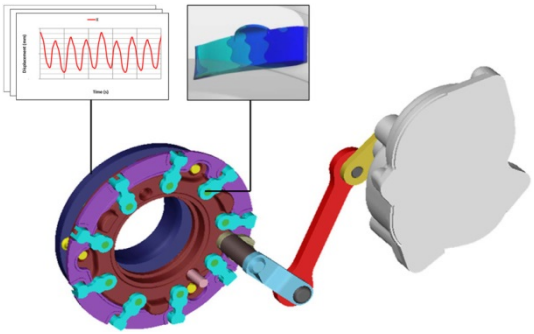
デジタルモックアップを活用した ガソリンエンジン向け VG ターボの挙動評価技術

Evaluation Method on Reliability of Variable Geometry Turbocharger for Gasoline Engine by Digital Mock-up



グプタ ビピン*1 Bipin Gupta
北村 剛*2 Tsuyoshi Kitamura
坂本 慶吾*3 Keigo Sakamoto
中原 優也*4 Yuya Nakahara
林 慎之*5 Noriyuki Hayashi
段本 洋輔*6 Yosuke Danmoto

より広いエンジン回転数・トルクでの運転を要求される実車走行時の排ガス規制(RDE※1規制)に対応可能な,乗用車用ガソリンエンジン向けに開発された可変容量ターボチャージャ(以下,VG※2ターボ)の挙動評価に対し,3D-CAD をベースにしたデジタルモックアップによるシミュレーションを適用した。本手法では,境界条件を設定する流動・伝熱解析と,信頼性評価に用いる構造・機構解析を組み合わせて適用しており,ディーゼルエンジンより高温になるガソリンエンジンに使用される,VG ターボの熱応力による破損や変形,機構部品の摩耗など,信頼性に関わる評価手法を構築し,製品開発へと展開した。

※1:Real Driving Emission ※2:Variable Geometry

1. はじめに

近年,より広いエンジン回転数・トルクでの運転を要求される実車走行時の排ガス規制(RDE 規制)に対応可能な,乗用車用ガソリンエンジンの開発推進,技術革新が進んでいる。その一環として,より高過給に対応した VG ターボの適用が進められており,三菱重工エンジン&ターボチャージャ株式会社においても,コンプレッサ・タービンの空力性能を一新した高効率の VG ターボの開発を実施,既報(1)にてその内容を紹介している。

一方,ガソリンエンジンは,これまで VG ターボが適用されてきたディーゼルエンジンより高排気ガス温度になること,空力的な効率向上と可変ノズル機構の作動性・耐久性との両立が求められることなどから,十分に信頼性に配慮した製品開発が求められる。信頼性に関して特に重要になる項目として,温度上昇による部品の強度低下に伴う破損,高温・無潤滑環境下で使用される可変ノズル部品の摩耗などが挙げられ,高温環境下での変形や流体・エンジン振動などの外力作用時の応答などの挙動評価が信頼性確保のために求められている。本報では,ガソリンエンジン用 VG ターボの開発に,3D-CAD データをベースとしたデジタルモックアップと各種シミュレーションを適用し,設計段階で VG ターボ各部の挙動を予測して信頼性を検証する技術について紹介する。

2. 流動解析を用いた内部流動評価

タービン内部のガスの流動は,タービンの性能を規定するだけでなく,高温となる部品への入熱の条件や可変ノズルに作用する流体力にも影響する重要な因子である。設計段階でのガス流

*1 総合研究所 ターボ機械研究部
*2 総合研究所 ターボ機械研究部 主席研究員 博士(工学) 技術士(機械部門)
*3 総合研究所 強度・構造研究部
*4 総合研究所 機械研究部
*5 総合研究所 機械研究部 主席研究員 博士(工学) 技術士(機械部門)
*6 三菱重工エンジン&ターボチャージャ株式会社 ターボ事業部 技術部 課長

動の評価には，流動解析（CFD：Computational Fluid Dynamics）が有効な手段である。図1にVGターボの構造を示すが，エンジンから出た高温の排気ガスはタービンハウジングの渦巻き状のスクロールから流入し，角度可変のノズルベーンを通過してタービンに供給される。図2にCFDの解析結果から得たスクロール内部，及びノズルベーン周囲の圧力（静圧）分布を示す。ノズルベーンの開度が小さいα1の条件では，ベーンの内外周の圧力差は非常に大きくなるのに対し，開度が大きいα4の条件では圧力差は小さくなる。図2に示すようなノズル開度に応じたタービン内部の流れの変化に対応したタービン効率の最適化検討を実施し，タービンホイールやノズルベーン，スクロールの形状を決定するが，合わせてノズル周囲の圧力分布の影響により発生する流体力が変化することを考慮して，可変ノズル機構の強度や駆動力，摩耗の評価を実施している。可変ノズル機構の動作時のヒステリシスやしゅう動部の摩耗は，ノズルベーンに作用する流体力，特に回転トルクに敏感に影響される。図3はノズルベーンの形状を変更した場合の流体力に起因する回転トルクの開度ごとの変化を示している。従来のノズルベーンの設計ではノズルの開度が大きい条件で回転トルクが小さくなったり反転したりするケースがあり，ノズルの姿勢が不安定になることで摩耗を生じるリスクがあるため，ノズルベーンの回転トルクが開度によらず一定になる設計へと変更を行った。図4にノズルベーン開度が大きい条件でのノズル周囲の圧力分布を示すが，従来品では小さかったノズル前後縁での圧力分布を見直し，開方向の回転トルクを開度によらず安定して発生可能な設計とした。開方向にトルクが作用していると，摩耗発生時でもノズルが開き側に動く。摩耗によりノズルが閉まる側に動くと，タービンロータ入口の流速が増加し，タービン過回転に起因したロータ破損のリスクが懸念される。本設計ではそのリスクを回避するための配慮もされている。

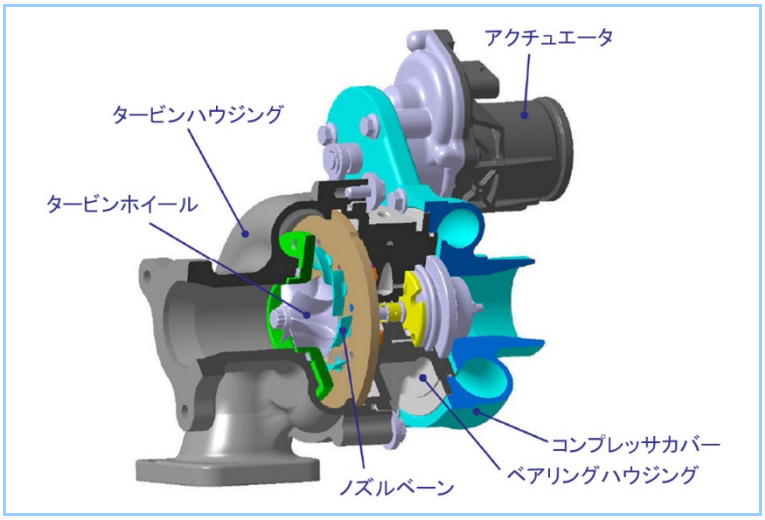


図1　VGターボの構造

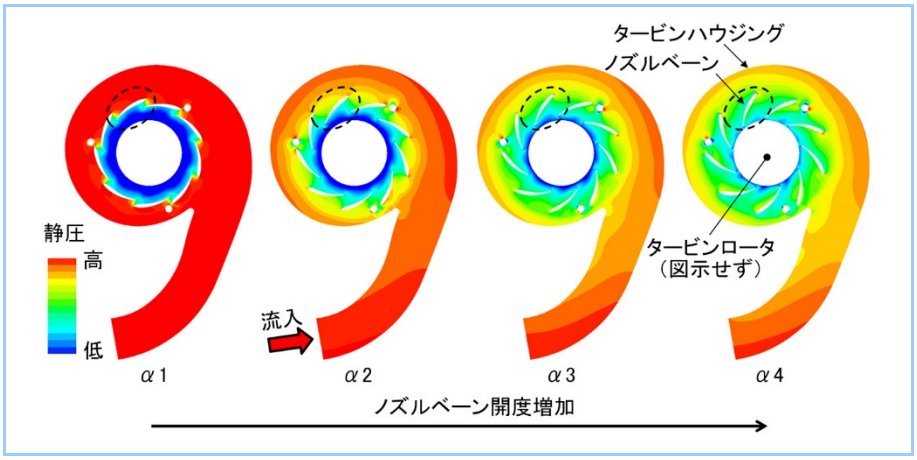


図2　スクロールとノズル周囲の圧力分布

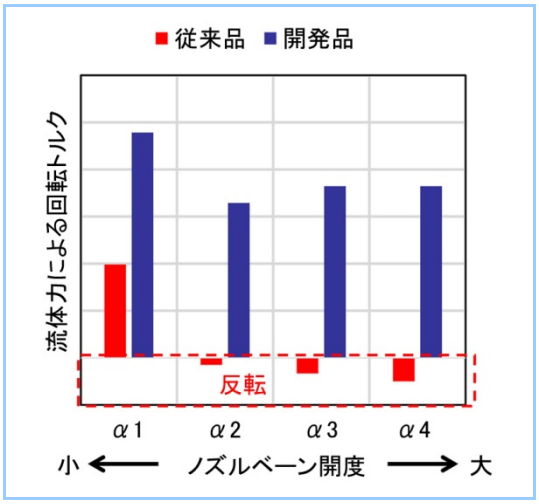


図3 ノズルベーンにかかる回転トルク

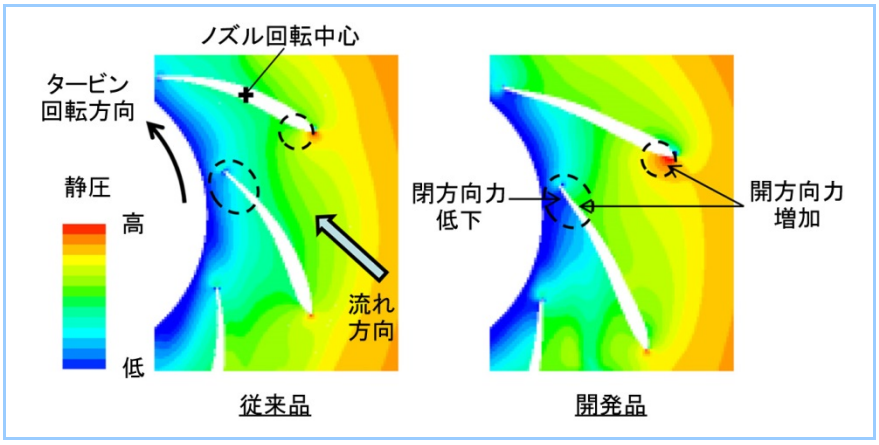


図4 ノズルベーン周りの圧力分布(開度α3)

以上のように，CFD はタービンの性能設計のみならず信頼性設計にも重要であり，実験を併用した精度向上の取組みも継続的に実施中である。また，CFD から得られた内部流動の計算結果は，次に述べる CHT(Conjugate Heat Transfer:流動から伝熱の連成)解析の対流熱伝達にも反映される。

3. CHT 解析を用いた熱流動場評価

VG ターボにおいて，高温ガスの熱エネルギーロスを伴う熱流動場はタービン部の円周方向温度分布の原因となり，結果として可変ノズル機構をはじめとする各部品の温度場，強度及び耐久性に多大な影響を与える。

CHT 解析は，高温流体から種々の構造物への熱伝達を模擬すると同時に，熱エネルギーロスによる流体の温度変化を評価できる。これまでディーゼルエンジン向け VG ターボを対象に詳細構造をモデル化した CHT 解析を行い，その有効性を確認してきたが[(2)]，更に同解析手法をより高温で使用されるガソリンエンジン向け VG ターボの開発に活用している。

図5に高負荷条件における温度分布図を示す。排気ガス流路，可変ノズル機構とベアリングハウジング間の密閉流体層及び冷却水路の CFD に基づく対流熱伝達に加え，放射伝熱モデルを適用することで，VG ターボの詳細な熱流動場評価が可能となる。タービンハウジングからベアリングハウジングにかけ急激な温度勾配が形成され，また可変ノズル機構の温度場は，高温のガスが流入するタービンスクロール入口から出口にかけて，排ガス温度低下の影響をうけることが再現された。そして解析による温度場は，ターボチャージャ単体試験における計測結果の温度分布と同様であることを確認した。

図6に，冷熱サイクル運転時の温度計測結果と非定常 CHT 解析結果との比較を示す。CHT

解析は，計測の過渡温度挙動を良好に模擬できた。この解析データを構造解析に適用することで，熱変形の影響による構造の信頼性評価を実施している。

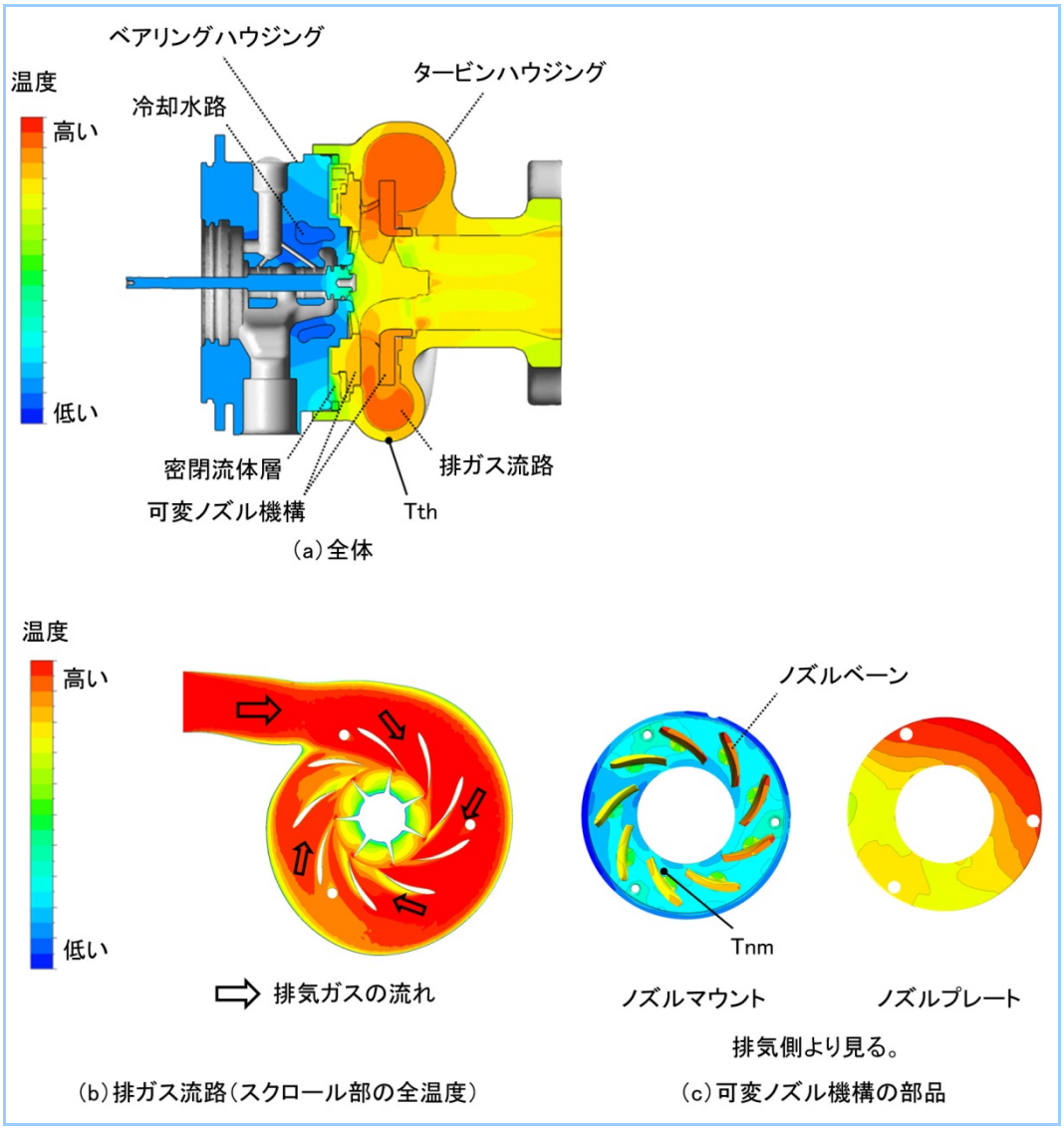


図5 VG ターボチャージャの温度場

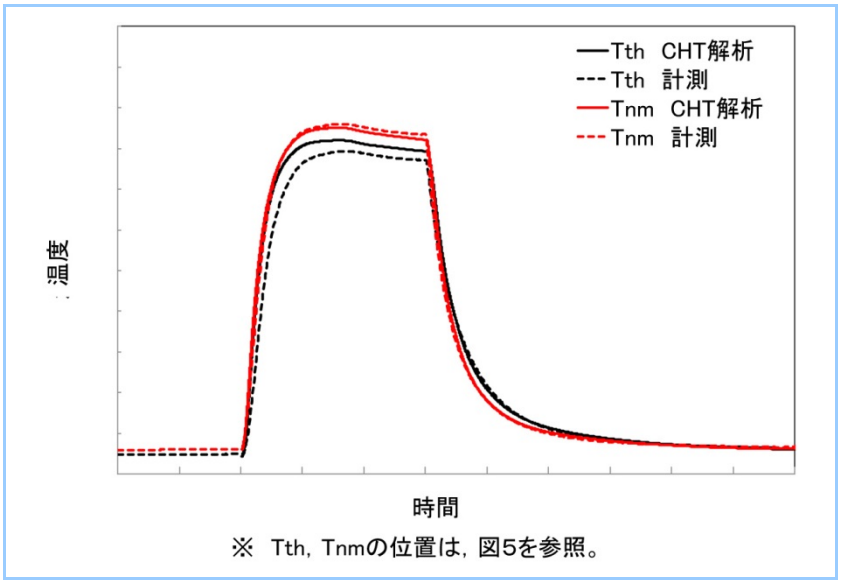


図6 冷熱サイクル条件における過度温度挙動

4. 構造解析を用いた信頼性評価

乗用車エンジン向けVGターボは，車両走行時に加速・減速を繰り返す運転モードで使用されるため，短時間で部品内部の温度変化を生じる。更にガソリンエンジンへの適用に伴い，より高温の環境で使用されるため，温度分布の時刻歴変化を考慮した部品間クリアランス設計や耐熱応力設計が必要となる。そこで，VGターボ全体をモデル化した大規模FEM解析モデルに，前述のCHT解析で得られた精緻なメタル温度分布を反映した構造解析モデルを構築した。

伝熱・温度分布評価に用いるCHT解析と，変形・応力評価に用いるFEM(Finite Element Method)解析の連成，及び膨大な量のデータ処理が要求される過渡運転モードを考慮した細かい時間刻みでの熱応力解析を実施するため，大規模3Dモデル用の非定常メタル温度マッピングプログラムを作成し，より精度の高い過渡条件での温度分布を用いた迅速な強度評価が可能となった。大規模3D-FEMモデルとCHT解析結果を反映し，FEM解析で評価した熱応力分布の一例を図7に示す。この大規模3D-FEMモデルを用いて，可変ノズル機構各部のクリアランス・熱疲労寿命・ボルト締結部の締め付け力・バックプレートの反力等の多岐にわたる強度評価を行い，設計適正化を進めた。これにより，最新のVGターボでは高温環境下での信頼性を確保しつつ，従来に比べて可変ノズル・タービンハウジングを小径化し，軽量化・低コスト化も実現した。

次に，タービンホイールの強度設計技術について紹介する。ガソリンエンジン向けVGターボの使用温度は上昇傾向にあり，タービンホイールの高温強度も非常に厳しくなるため，詳細なクリープ強度設計が必要となる。そこで，設計時に迅速なクリープ強度評価ができるタービンホイールのクリープ解析システムを構築した。図8に，タービンホイールのクリープ解析モデルと解析結果の一例を示す[3]。評価対象となるタービンホイールに加え，シャフトもモデル化して潤滑油による冷却も考慮することで，精度良くメタル温度を推定している。クリープ損傷度図は，クリープ解析によって時刻歴の応力を求めて，時間消費則によるクリープ損傷度をコンター図表示したものである。なお，システム構築に際し，サーモカメラを用いた測温試験によるメタル温度推定精度の検証，クリープ破壊試験によるクリープ寿命予測精度の検証も実施した。

以上より，大規模3D-FEM解析技術・クリープ解析システムを用いた強度設計によって，ガソリンエンジンの超高温環境下における信頼性の確保を実現した。

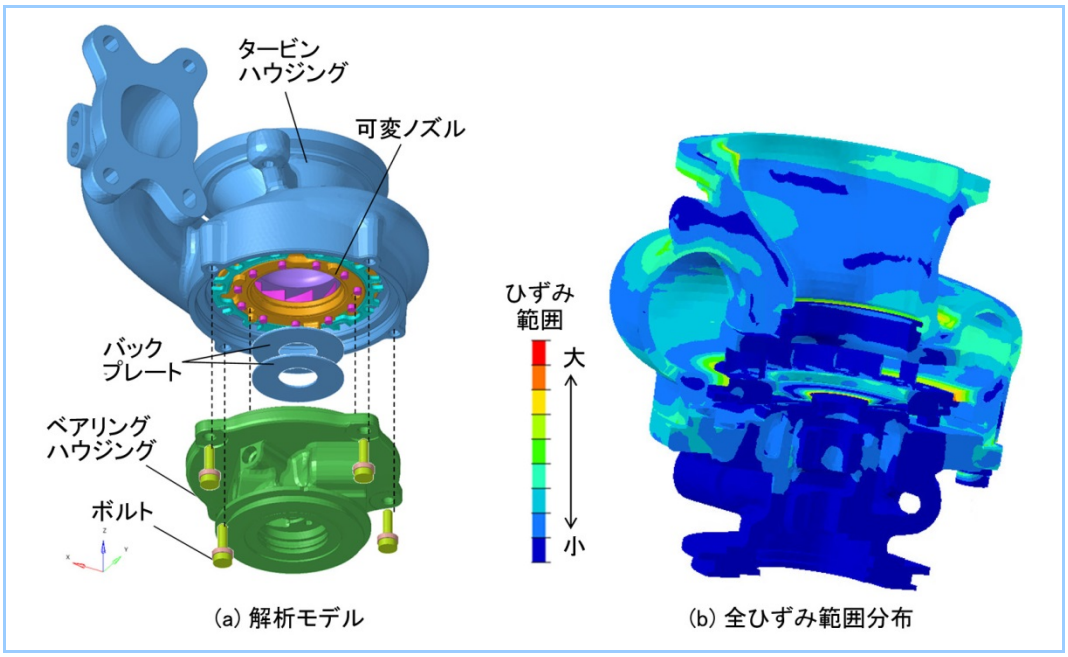


図7 大規模3D-FEMモデルによる構造解析

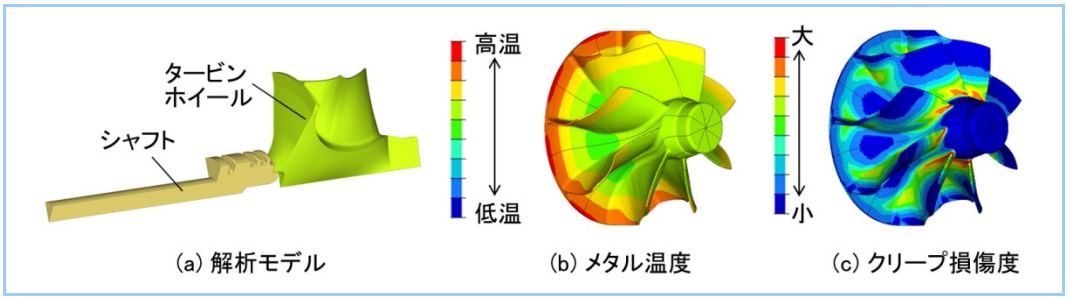


図8 タービンホイールのクリープ解析

5. 機構解析を用いた可変ノズル機構の挙動評価

VG ターボの可変ノズル機構は，流体力やエンジン振動などの外力が作用する中，高温・無潤滑下で目標のノズルベーン開度に設定できるよう作動することが求められる。そのため，作動に必要な駆動力の確保や摩耗発生による位置決め精度の低下を抑制することが求められる。設計段階で駆動力や摩耗の評価を行うためには，流体力やエンジン振動の影響を考慮した部品間の接触力・微動の評価を行う必要があり，その手法として機構解析（MBD：multi-body dynamics 解析）が有効である。以下では，MBD 解析によるノズル駆動部品の摩耗評価事例を示す。

MBD 解析モデルの概要を図9に示す。モデルは 3D-CAD データを基に作成され，外力は CFD 解析で算出したベーン流体力とエンジン振動が入力される。部品間のクリアランスも考慮されているため，外力によって部品同士が接触を伴いながらすべる挙動が表現される。リンク部品間の接触力とすべり速度の計算例を図 10 に示す。図 10 にはノズルベーンに作用する流体力も記載しているが，流体力変動と同期する接触力と，接触状態により変化するすべり速度が計算結果として得られる。

一方，摩耗量は，材料組合せなどで決まる比摩耗量と接触荷重，すべり距離で規定されるが，MBD 解析からは摩耗の過酷さを表現する接触荷重Fとすべり速度Vの積である FV 値を得ることができる。図 11 は，可変ノズル機構の内部部品に関し，MBD 解析から得た FV 値とエンジン耐久試験で得た摩耗量の関係を示したものであるが，FV 値を小さくすることで摩耗量を低減できることが検証されている。そこで，接触力への影響が大きい流体力を適正化するためのノズルベーンやタービンハウジングの形状設計を行い，性能と信頼性の両立を図っている。

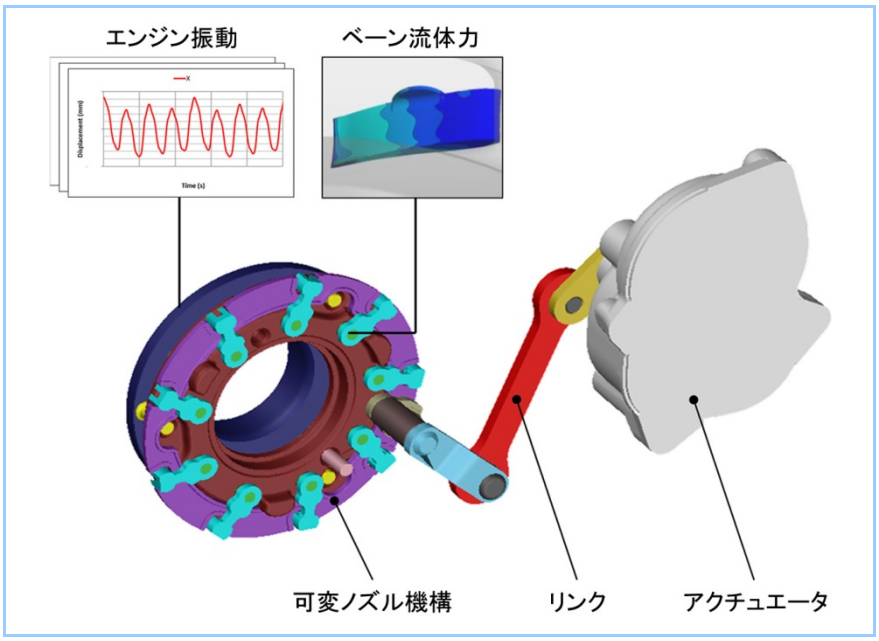


図9 MBD 解析モデル

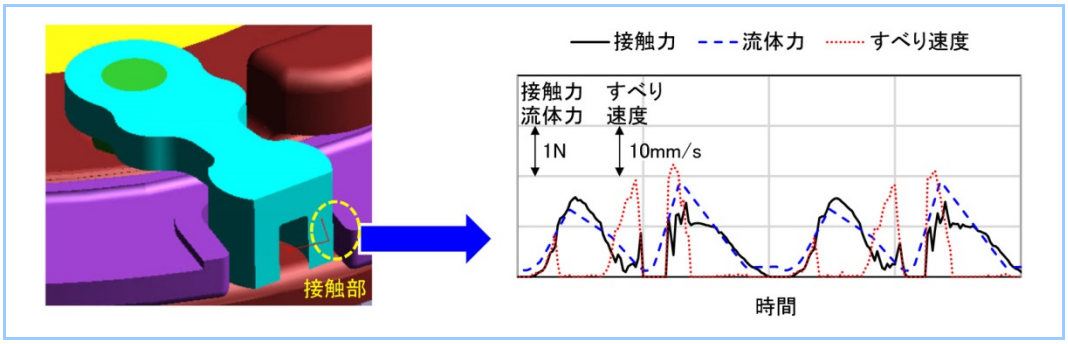


図 10 MBD による部品間接触力・すべり速度計算例

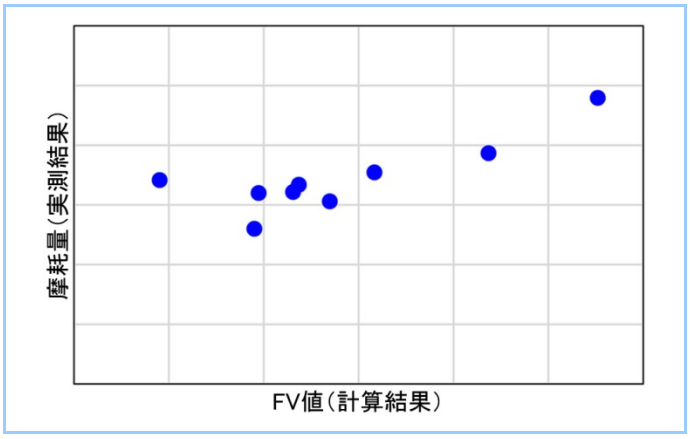


図 11 MBD 解析結果と摩耗量の比較

6. まとめ

本報では，ガソリンエンジン向け VG ターボの挙動を，デジタルモックアップをベースに，CFD，CHT，FEM，MBD 等の各種シミュレーションを組み合わせることで評価する手法を適用し，信頼性の高いターボチャージャの開発を進めていることを説明した。本手法を用いて開発したVGターボが乗用車に実装され始めているが，今後も，多様なエンジンに対応する高性能高信頼性ターボチャージャの開発推進を通じて，低炭素化社会実現に貢献していく。

参考文献

(1) 段本洋輔ほか，次世代ガソリンエンジン向け VG ターボの開発，三菱重工技報 Vol. 56 No. 2(2019) p. 1〜8
(2) Kitamura, T. et al., Study on Analytical Method for Thermal and Flow Field of a VG Turbocharger, IMechE Proceedings of the International Conference on Turbochargers and Turbocharging (London, UK, 2021) p.81〜96
(3) Sakamoto, K. et al, Comparison of the predicted creep life and hot spin tests for the turbine wheel in automotive turbocharger, Proceeding of ASME Turbo Expo 2019: Turbomachinery technical conference and exposition GT2019(June 17-21, 2019, Phoenix, Arizona, USA), GT2019-90424