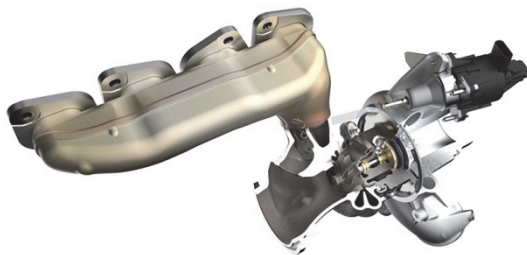


次世代ハイブリッド車用ターボチャージャの高性能化を支える 排気脈動下タービン設計技術

Design Technologies for High Performance Turbocharger Turbine Under Exhaust Gas Pulsation on Engine for Next Generation Hybrid Vehicles



星 徹*1
Toru Hoshi

藤田 豊*2
Yutaka Fujita

横山 隆雄*3
Takao Yokoyama

恵比寿 幹*4
Motoki Ebisu

乗用車エンジンではパワートレインの電制化に沿った進化が進んでいるが、更なる燃費規制強化や性能向上に対応するため、従来にも増してターボチャージャの高効率化が求められている。本報では、エンジン搭載のターボチャージャが排気脈動下で駆動されることに着目し、排気脈動の非定常性を有効利用する新型タービンスクロール形状を開発し、その効果をエンジン台上で計測した取組みを紹介する。排気脈動下のタービン非定常性能計測と大規模非定常流動解析でタービン圧力比に対するタービンの瞬時性能のヒステリシス特性を見だし、その定常時の流量特性を維持しつつスクロール体積を減少させた非線形 A/R スクロールの開発に繋げ、エンジンの燃費性能向上を達成した。

1. はじめに

近年、世界各国の脱炭素化に向けた取組みの中、特に環境先進国では自動車パワートレインの電動化が進められている。一方で新興国では充電インフラの整備等の課題があり、2030年に向けてエンジンを搭載したハイブリッド車の低燃費化が必要と考えられている。乗用車エンジンには厳しい燃費規制が課せられ、ガソリンエンジンでは、実走行時の燃費・排出ガス低減技術の適用が進んでいる。ガソリンエンジンの熱効率向上に向けた適用技術としては可変動弁によるミラーサイクル化や EGR (Exhaust Gas Recirculation) 等があるが、トルクを維持しつつ熱効率を向上するために、更なるターボチャージャの高効率化が求められている。

三菱重工業グループでは、エンジン搭載のターボチャージャが排気脈動下で駆動される事に着目し、排気脈動下におけるタービン性能特性を把握するため、非定常性能計測や数値流動解析を活用して流動現象を解明し、高性能化に取り組んできた。これまでに脈動によりタービンスクロール出口の絶対流出角が変化する事を明らかにし、タービン前縁損失を抑制する斜流タービンの適用を提案した⁽¹⁾。図1は動翼1ピッチの内部流動構造を示しており、脈動条件では低圧力比よりも高圧力比において高い損失が生成されていることがわかる。また、お客様のエンジンに応じて最適なターボチャージャを提案するため、ターボチャージャの過渡的挙動を評価するための非定常低次元モデルを用いたエンジン一次元シミュレーション手法の開発にも取り組んでいる⁽²⁾。本報では排気脈動の非定常性を有効利用する新型タービンスクロール形状を開発し、その効果をエンジン台上で計測した取組みを紹介する。

*1 総合研究所 ターボ機械研究部

*2 総合研究所 流体研究部 技術士(機械部門)

*3 総合研究所 ターボ機械研究部 室長 技術士(機械部門)

*4 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 主席技師

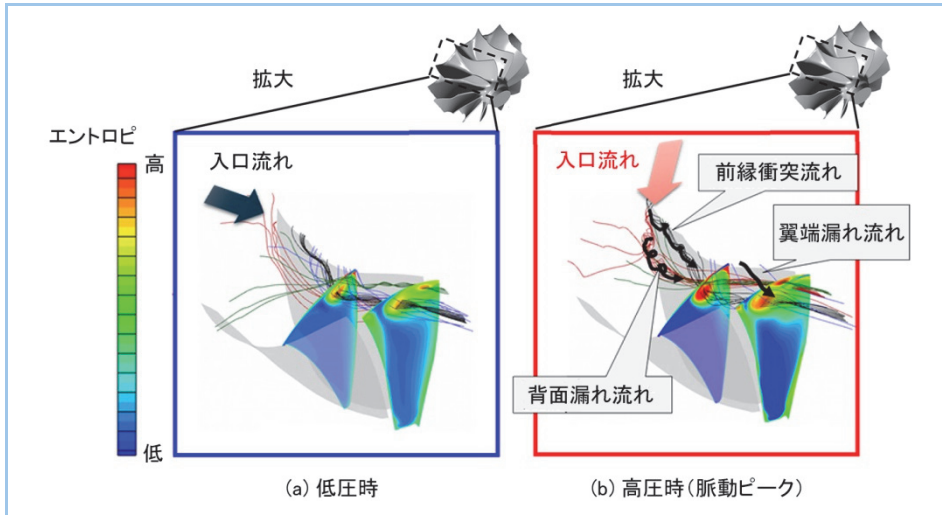


図1 タービン動翼内部損失と流線(流動解析結果)

2. 排気脈動下のタービン高効率化

本章では、排気脈動の非定常性を有効利用するタービンスクロール改良設計の概要について述べる。

(1) 設計コンセプト

タービン性能を向上させるためには、排気脈動の非定常な条件下でタービン内部流動を理解することが重要である。そこで、図2に示すスクロールを分割した理論モデルを用いて調査した⁽³⁾。このモデルにおける質量保存則を式(1)に示す。ここで $\frac{dm}{dt}$: 分割領域内の質量流量変化

の時間変化、 C_θ : 速度の接線成分、 C_r : 速度の半径成分、 A : スクロール断面積、 R_c : スクロールの図心半径、 b : スクロール出口の軸方向幅、 ρ : 流体の密度である。更に制御体積に対しては質量流量の変化は式(2)で表すことができる。また、角運動量保存則より式(3)が成り立つ。式(1)から式(3)と理想気体の状態方程式を組合せることで、スクロール絶対流出角 α は式(4)のように

導出される。ここで $\frac{d(A)}{d\theta}$: A/R の局所勾配、 $\frac{d(P)}{dt}$: 圧力と温度の比の時間変化である。この式は

スクロールの形状及び圧力脈動条件とスクロール絶対流出角の関係を表している。式の右辺の最初の項は特定の周方向位置における流出角に対するスクロール A/R が影響することがわかる。また式の右辺の第2項より圧力と温度の比の勾配が絶対流出角に影響し、脈動の周波数や振幅が高く非定常性が強くなる程、流出角への影響が大きくなることわかる。図3に脈動条件におけるスクロール絶対流出角に対するスクロール A/R の影響を示す。これらが脈動の周波数や振幅の増加によって動翼内部の非定常性が強くなる要因の一つと考えられ、非定常項の精査により、スクロール内部の流動分布に対する脈動の非定常効果は分割した領域で瞬間的な質量の不均衡が生じた結果であると考えられる。そこで、排気脈動下におけるタービンの性能特性を把握するため、インペリアル・カレッジ・ロンドン (Imperial College London, 以下、ICL) との共同研究により非定常性能試験を行った。図4に性能計測結果の一例を示す。修正流量と圧力比の関係を整理した図4(a)では、非定常の流量特性は定常時の流量特性を囲むようにヒステリシス曲線を描く。脈動前半には先に流量が増加し、スクロールを満たしながら (Filling) 圧力が上昇する。逆に脈動後半では先に流量が減少し、スクロールが空になる (Empty) ことで圧力が低下し、ヒステリシス曲線を描くことがわかった。タービン出力と圧力比の関係を整理した図4(b)も同様に大幅に変動しており、これまでは排気脈動の時間スケールは、タービン内部の流動の時間スケールよりも大幅に大きく、タービン動翼の性能は準定常状態になると考えられていたが、実際は Filling と Empty の効果とスクロールや配管内の圧力波の伝播

により準定常状態とは乖離することがわかった。そこで、従来はスクロール入口におけるスクロール A/R に対して、スクロール A/R の周方向変化を線形減少としていたのに対し、その定常時のタービン流量特性を維持しつつ圧力比に対してタービンの瞬時流量が有するヒステリシス特性を抑える狙いから、スクロール体積を減少させた非線形 A/R スクロールを開発した。設計した新型タービンのスクロール A/R 分布を図5に示す。

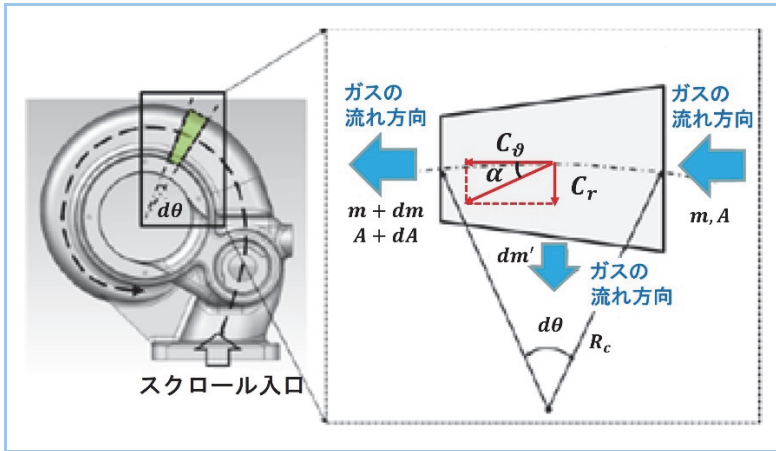


図2 スクロール内部流の一次元分割モデル

$$\frac{dm}{dt} = \rho(C_\theta + dC_\theta)(A + dA) + bC_r R_c \rho d\theta - \rho C_\theta A \quad \text{式(1) 質量保存則}$$

$$\frac{dm}{dt} = R_c A d\theta \frac{d\rho}{dt} \quad \text{式(2) 制御体積に対する質量流量の変化}$$

$$C_\theta R_c = K(\text{const}) \quad \text{式(3) 角運動量保存則}$$

$$\tan \alpha = -\frac{K}{b} \frac{d\left(\frac{A}{R_c}\right)}{d\theta} + \frac{AR_c}{Rb} \frac{d\left(\frac{P}{T}\right)}{dt} \quad \text{式(4) スクロール絶対流出角}$$

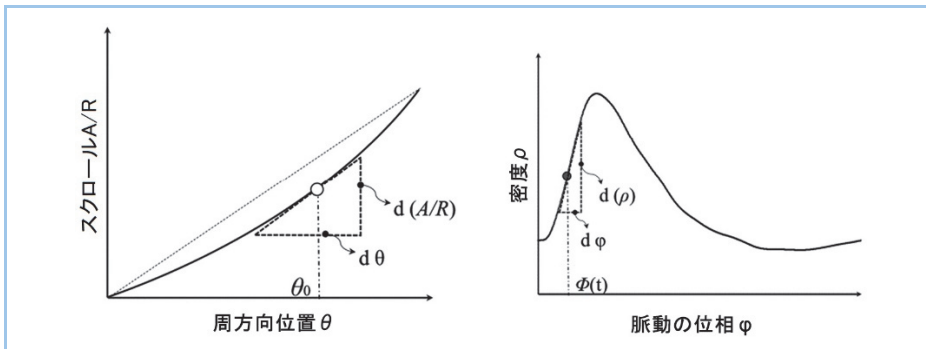


図3 脈動条件におけるスクロール絶対流出角に対するスクロール A/R の影響

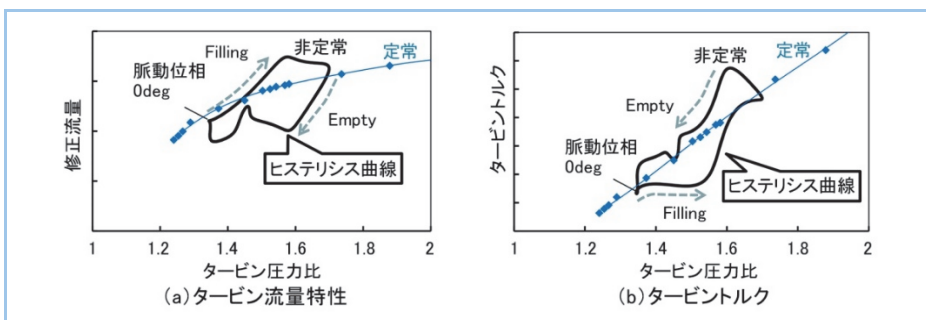


図4 タービン非定常性能(インペリアルカレッジ計測結果)

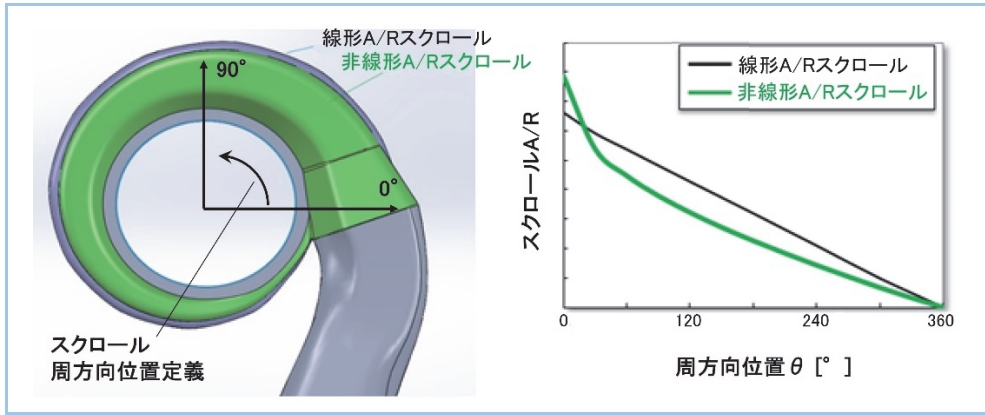


図5 線形 A/R スクロールと非線形 A/R スクロールの比較

(2) 非定常流動解析

今回は排気脈動下での非線形 A/R スクロールの性能改善効果を確認するため、非定常流動解析を用いて排気脈動を表現し、タービンの内部流動を分析した。流動解析モデルを図6に示す。入口配管、タービンスクロール、タービン動翼を解析領域とした。解析条件を表1に示す。試験条件を基に入口境界の全圧、全温は計測した脈動下の時系列データを直接与えた。

線形 A/R スクロールと非線形 A/R スクロールの非定常解析結果を図7に示す。解析の結果、非線形 A/R スクロールは、同等のタービン流量特性を維持しつつ、スクロール断面積を変化させたことにより排気脈動条件でのタービンの瞬時流量のヒステリシス特性が抑制され、広い運転範囲でタービントルクが向上することがわかった。また、式(5)に示す脈動条件でのサイクル平均効率を比較した結果、非線形 A/R スクロールでは、主にタービントルクの増加による効果で効率が 1.3% 向上を確認することができた。

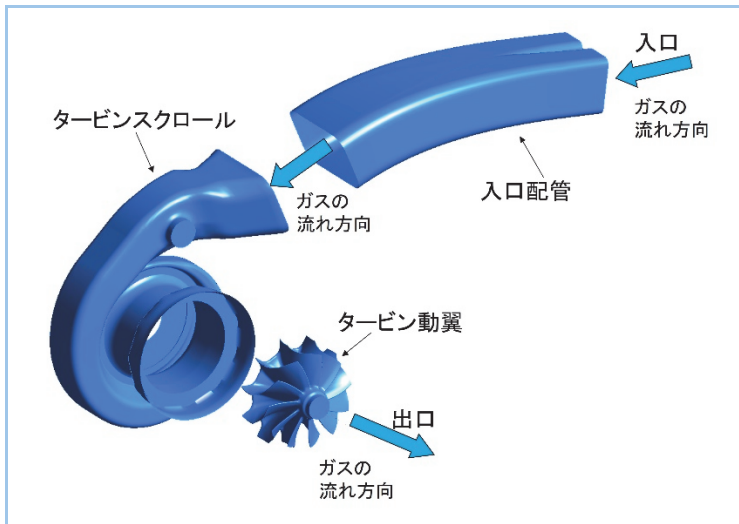


図6 流動解析モデル

表1 流動解析条件

	パラメータ
解析コード	ANSYS CFX
乱流モデル	SST
回転数	50krpm
脈動周波数	60Hz
入口境界条件	全圧、全温
出口境界条件	静圧
解析格子数	タービンスクロール & 入口配管: 1240 000 タービン動翼: 660 000
時間ステップ	77 ステップ / 回転

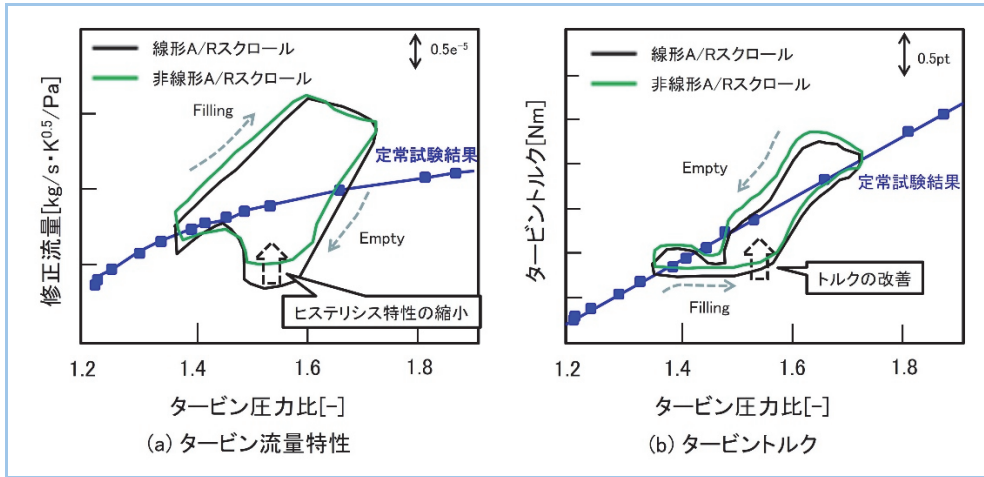


図7 タービン非定常性能比較

$$\eta = \frac{\int_0^T (\tau \cdot \omega) dt}{\int_0^T \left\{ \dot{m} \cdot Cp \cdot T_0 \cdot \left(1 - \pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right) \right\} dt} \quad \text{式(5) 排気脈動下タービン効率}$$

3. エンジン試験装置

次に非線形 A/R スクロールのエンジン性能改善効果を確認するため、マレーシア工科大 (Universiti Teknologi Malaysia, 以下, UTM) との共同研究によりエンジン試験を行った。ICL は UTM と共同で、ターボチャージャ技術をはじめとして輸送機器の低炭素化技術を開発する研究組織 LoCARtic (Low Carbon Transport in cooperation with Imperial College London) を UTM に設立しており、エンジン試験ベンチを有し、様々な検証試験を実施できる体制を持つ。今回はエンジン性能と同時に、タービン内の排気脈動圧力計測を行った。ここで、それぞれのターボチャージャで公平な評価を行うため、計測装置の設定を可能な限り一致させた。

(1) エンジンとターボチャージャ

本試験では、UTM が保有する乗用車の 1.6 リットルターボチャージャ付ガソリンエンジンを使用した。本試験で使用したエンジンの諸元を表2、ターボチャージャの仕様を表3に示す。エンジン排気量に合わせて、ウェイストゲートターボチャージャを使用した。

表2 エンジン諸元

	パラメータ
排気量	1561cc
ストローク	88mm
ボア	76mm
圧縮比	9.5 : 1
シリンダ数	4
点火順序	1-3-4-2
燃料噴射方式	コモンレール ポート噴射
最大出力	103kW @5000rpm
最大トルク	205Nm @2000-4000rpm
燃料タイプ	Petrol RON95

表3 ターボチャージャ仕様

タービンスクロール	線形 A/R	非線形 A/R
タービン動翼	43mm, 11 枚翼	
コンプレッサ	51mm, 6+6 枚翼	

(2) 計測装置

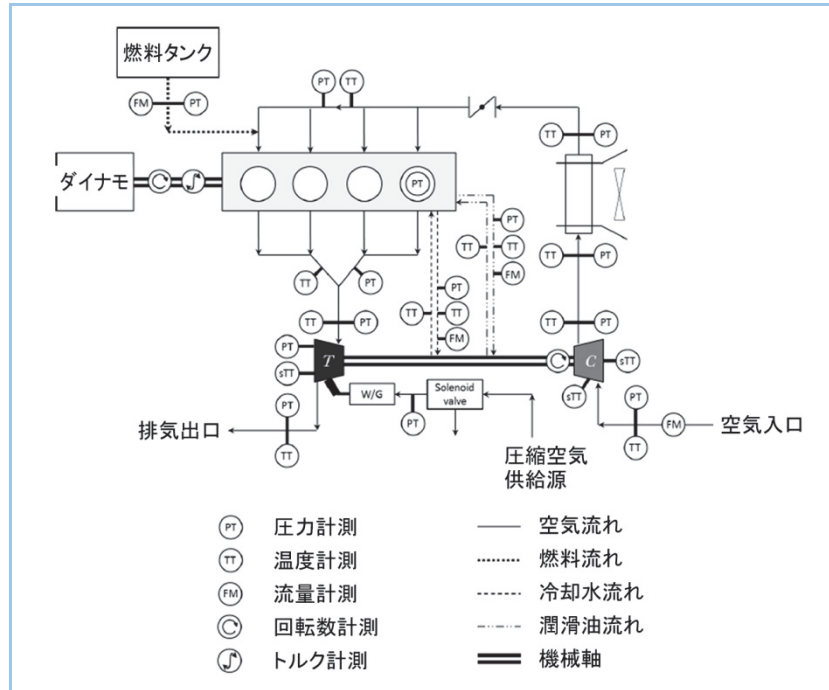
エンジン計測装置を図8に示す。図に示す通り、エンジンのトルク、回転数、各部の流量、圧力、温度などを計測した。

エンジンクランクシャフト出力はカップリングを介してエンジンダイナモメータに機械的に接続されており、今回試験では 260kW の AC ダイナモメータを使用することにより、エンジンに負荷を与えるだけでなく、モータで駆動することを可能とすることで後述するドライブサイクル試験を

実現した。

エンジン計装では、空気流量、燃料流量、冷却水流量、潤滑油流量を計測している。空気流量はターボチャージャのコンプレッサ上流で測定しており、アイドリングから最大出力までの広範囲での流量を計測するため容量の異なる2つのホットフィルム式質量流量計を直列に接続して、測定分解能を維持した。

圧力計測では、吸気側ではコンプレッサとインタークーラの上流と下流で計測した。排気側ではマニホールド、タービン入口、タービンスクロール 45 度及び 135 度の周方向位置、タービン出口で圧力を計測することにより、脈動の圧力伝播を詳細に調べた。



(3) エンジン ECU の調整

本試験では、エンジン性能のポテンシャルを引き出すべく、ターボチャージャとのマッチングに合わせてエンジン ECU (Engine Control Unit) の調整を行った。次にエンジン ECU の調整手順について説明する。全ての条件において理論空燃比が理想的だが、エンジン高速高負荷時は排気温度により制限される。本試験ではターボチャージャのタービン排気温度 950℃以下を制限として、目標出力トルクを達成しつつ燃焼効率の改善のために点火タイミングを変更させた。エンジン高効率化のためには、高圧縮比で且つ最適な点火タイミングで燃焼することが必要であり、点火タイミングを最適な燃焼時期になるように進角させていくと、トルク及び燃費が向上する。ECU 調整中にノッキングを検知した場合は、安全のため点火時期を3度遅らせた。これらをそれぞれのタービンスクロールに対して同様の手順で調整した。

点火タイミングの比較結果を図9に示す。非線形 A/R スクロールでは線形 A/R スクロールに対して広い範囲で点火タイミングをより進角して運転出来ることを確認した。タービンスクロールの変更によって点火タイミングが変化したメカニズムについては次章で考察する。

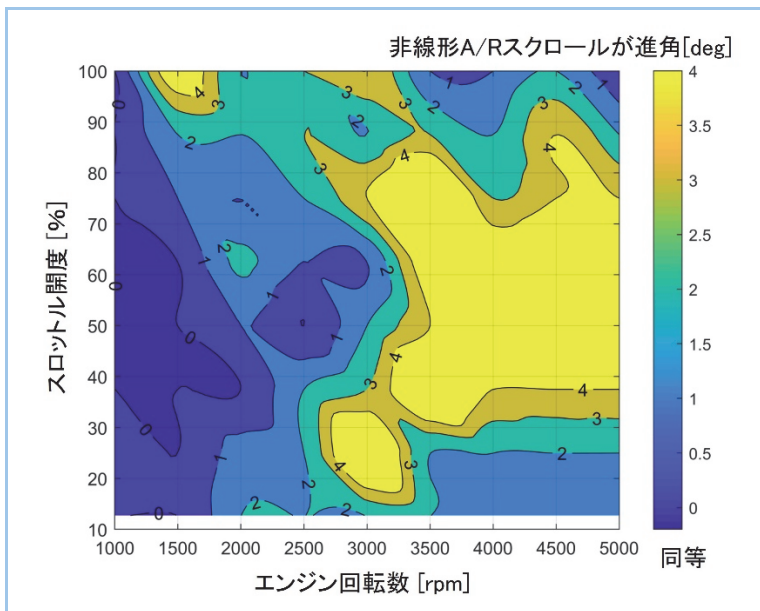


図9 点火タイミングの比較

4. エンジン試験結果

本章ではエンジン試験結果について考察する。まず定常性能の比較を行い、その後に走行モードにおける過渡性能の比較を行った。

(1) 定常性能試験

定常状態のエンジン性能は、エンジン回転数を 1000～5000rpm の範囲で 500rpm 毎に 12.5%から 100%のスロットル位置で 12.5%毎に計測した。計測はエンジン回転数とスロットル位置を目標値に設定し、全ての計測温度の変動が2℃以下の静定した状態で実施した。

図 10(a)–(c)に、タービン入口、タービンスクロール 45 度、及び 135 度の周方向位置における圧力脈動計測結果を示す。非線形 A/R スクロールの圧力変動の振幅は線形 A/R スクロールに対して小さく、これによりタービン出口での流出角の変動が非線形 A/R スクロールでは抑制されていると考えられ、流出角の変動が低減したことによりタービンの効率向上が期待される。また、非線形 A/R スクロールの脈動最大圧力は全てのクランク角度、測定位置で線形 A/R スクロールに対して低減しており、より少ない排気エネルギーで同じエンジントルクを達成していることがわかる。非線形 A/R スクロールの改善コンセプトは排気脈動条件においてタービンの瞬時流量が有するヒステリシス特性によるトルク変動の抑制であり、タービン動翼内部の非定常性が弱まったことでより高効率な作動範囲での運転を可能にした効果が今回のエンジン台でも得られたと考えられる。また、タービン入口圧力の低減はエンジンの吸排気行程でのポンプ損失低減やノッキング改善にも影響しており、図9に示すようにエンジンの点火タイミングをより進角することが出来るため、非線形 A/R スクロールの燃焼効率が高くなる。図 11 に燃料消費率の比較を示す。エンジン回転数 1500rpm 近傍の低回転数高負荷領域を除き、広範囲の領域で非線形 A/R スクロールの燃料消費率が改善されており、新型タービンスクロールのエンジン熱効率向上に対する有効性を確認した。

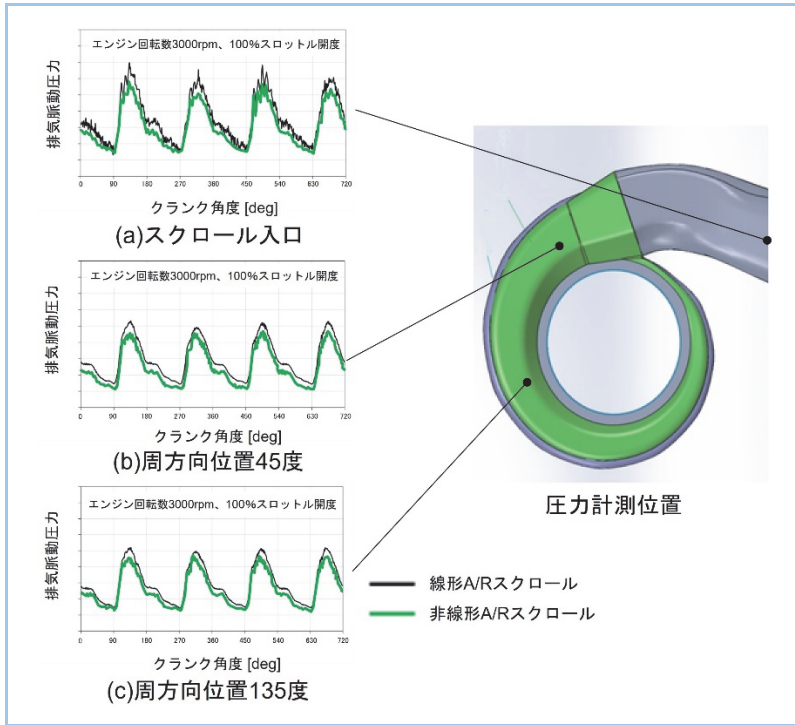


図 10 タービン排気脈動圧力

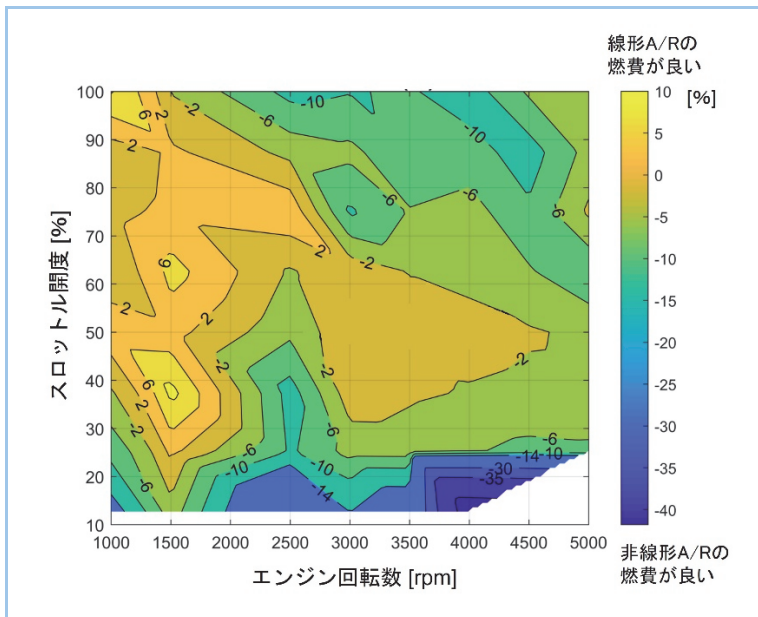


図 11 燃料消費率の相対性能差

(2) 走行モードの性能試験

次に走行モードにおける性能を計測した。ここでは、世界統一試験サイクル WLTC (Worldwide harmonized Light duty driving Test Cycle) にて、総燃料消費量を比較する。走行モードのエンジントルクとエンジン回転数を図 12 に示す。WLTC の走行モードは信号や渋滞等の影響を受ける市街地を想定した比較的低速な低速フェーズ、信号や渋滞等の影響をあまり受けない郊外を想定した中速フェーズ、高速道路等での走行を想定した高速フェーズ及び超高速フェーズで構成され、高速のフェーズになる程エンジン回転数と負荷が高くなるため、エンジン脈動の周波数や振幅の影響が大きくなる。走行モード全体における線形 A/R スクロールと非線形 A/R スクロールの燃料消費率と燃料消費量の比較を図 13 に示す。非線形 A/R スクロールの燃料消費量は線形 A/R スクロールに対して高速域で 0.04L (約 4.5%)、超高速域で 0.03L (約 3.5%) 改善しており、エンジン脈動の周波数や振幅の影響が大きくなる高

速フェーズで効果が大きくなっていることが確認できた。WLTC モードの全域で比較すると、線形 A/R スクロールに対して 0.05L(約 1.7%)燃料消費量が改善しており、非線形 A/R スクロールの有効性がわかる。

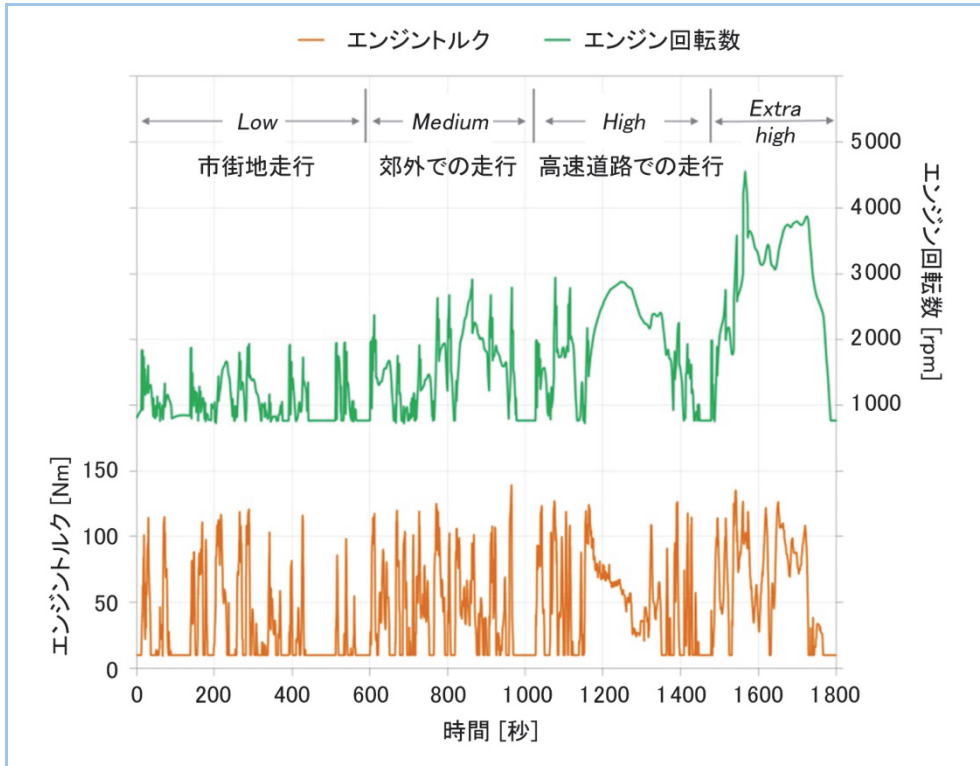


図 12 WLTC モードにおけるエンジントルクとエンジン回転数

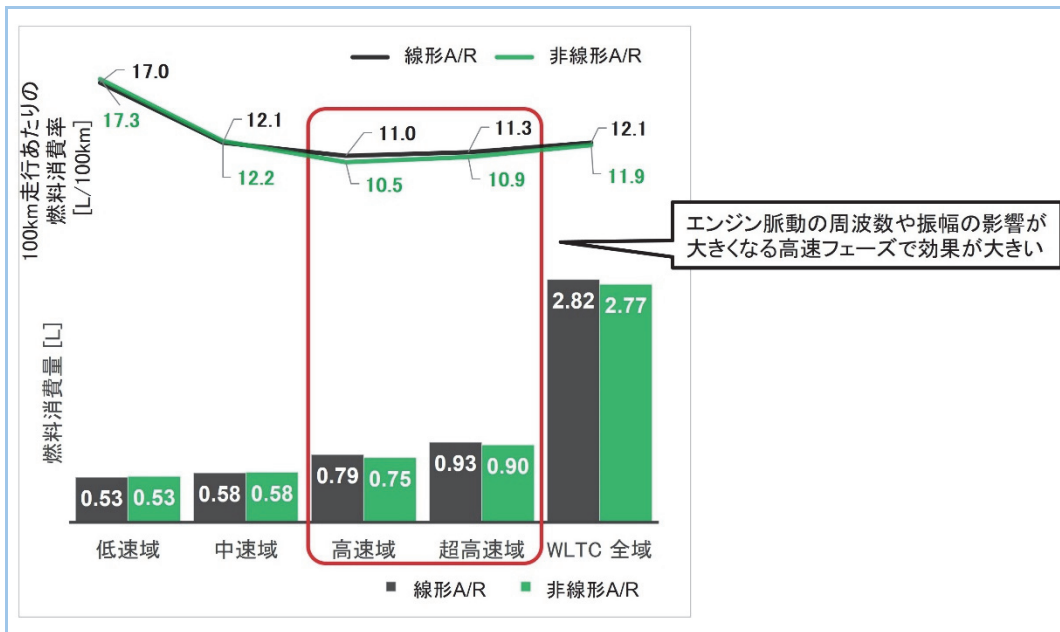


図 13 WLTC モードでの燃料消費率・燃料消費量の比較

5. まとめ

本報では排気脈動の非定常性を有効利用する新型タービンスクロール形状を開発し、その効果を乗用車用のガソリンエンジン台上で検証した。

世界各国の脱炭素化に向けた取組みの中、乗用車メーカーではパワートレインの電動化を含めた様々な開発をしているが、内燃機関にもハイブリッド車に合わせた効率改善に向け、技術開発の余地が多く残されている。その中でも過給技術は有効な手段の一つであり、必要とされる過給

技術も他の環境技術との関わり合いの中で絶えず変化していくことが予想される。今回開発した排気脈動の条件で効果を発揮する非線形 A/R タービンスクロールは、エンジン全負荷条件だけでなく、EGR が多く導入される部分負荷においても広範囲で燃費向上が得られると考えられ、ハイブリッドシステムのエンジンの高効率化に寄与する事が期待できる。今後もお客様のニーズの変化に応える製品の開発を進め、低炭素化社会の実現、地球環境保護に貢献していきたい。

最後に、共同研究を通じて本開発にご協力頂いた ICL の Martinez-Botas 教授、UTM の Rajoo 教授、上海交通大学の Yang 准教授に謝意を表します。

参考文献

- (1) 横山隆雄他:自動車用高性能ターボチャージャを実現する排気脈動下タービン高効率化技術, 三菱重工技報 Vol.55 No.2 (2018)
- (2) 陣内靖明他:インペリアル・カレッジ・ロンドンとのターボチャージャ共同研究組織, 三菱重工技報 Vol.58 No.2 (2021)
- (3) Yang, M. et al., Unsteady behaviours of a volute in turbocharger turbine under pulsating conditions, Journal of the Global Power and Propulsion Society, 2017;1 p.237~251