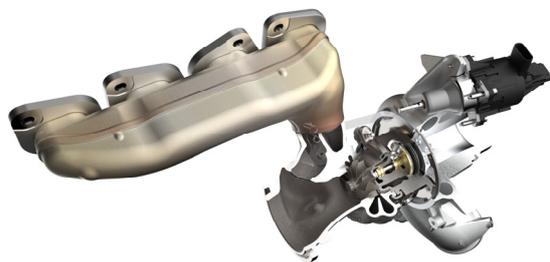


自動車用高性能ターボチャージャを実現する 排気脈動下タービン高効率化技術

Performance Improvement of Automotive Turbocharger Turbine
under Exhaust Gas Pulsation on Engine



横山 隆雄*1
Takao Yokoyama

茨木 誠一*2
Seiichi Ibaraki

近年、乗用車エンジンで過給ダウンサイジングによる低燃費化が進められているが、更なる燃費規制強化に対応するため、従来より広範囲のエンジン作動点で効率が高いターボチャージャが強く求められている。本稿では、エンジン搭載のターボチャージャは排気脈動下で駆動されることに着目し、排気脈動下のタービン性能分析と高性能化に取り組んだ。排気脈動下のタービン非定常性能が計測可能なインペリアルカレッジ、タービン高性能化の権威であるケンブリッジ大との共同研究を通じて、非定常性能計測や大規模流動解析で流動現象を解明した。排気脈動下のタービン性能は準定常では評価できずヒステリシス特性を描くこと、また排ガスエネルギーが高い脈動ピーク圧力では、動翼前縁衝突損失が過大に増加することを把握し、新型斜流タービンの開発に繋げ、排気脈動下におけるタービン高性能化を達成した。

1. はじめに

地球温暖化の対策として温室効果ガスであるCO₂の削減が世界的に推進されている。乗用車エンジンにも厳しい燃費規制が課せられ、今後も更に強化される計画である。エンジン低燃費化手法のひとつにターボチャージャを適用した過給ダウンサイジングがあり、ディーゼルエンジンのもとより、ガソリンエンジンへの適用も急拡大している。

当社では、従来より数値流動解析及び内部流動計測を活用したターボチャージャ高効率化の取り組みを進めてきたが、更なる高効率化のためにはより詳細な流動構造の分析が必須であった。特にタービンは、エンジン排気脈動による非定常圧力変動下で駆動されるが、評価の難しさから定常状態の評価、設計が行われてきた。

本稿では、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との共同研究により非定常性能試験を行った。インペリアルカレッジは早くから排気脈動下のタービン性能特性に着目し、自ら立案、製作した非定常性能試験装置を用いて多くの計測事例を報告している⁽¹⁾。また、内部流動の詳細分析では、ターボ機械の空力研究に多くの知見を持つケンブリッジ大学との共同研究を行い、数値流動解析手法の設定から見直すことで、排気脈動下の性能分析に取り組んだ。これら最先端技術を有する大学との共同研究により、流動現象を解明し高性能化を達成した当社の取り組みを紹介する。

2. 排気脈動下のタービン非定常性能特性

本章では、非定常性能計測による排気脈動下タービン性能分析について述べる。

(1) 試験装置

図1にインペリアルカレッジの性能計測装置を示す。パルスジェネレータで圧力脈動を発生

*1 総合研究所直属 主席プロジェクト統括 技術士(機械部門) *2 総合研究所流体研究部 次長 工博 技術士(機械部門)

させ、ダイナモに働くトルクと回転数変動からタービンの非正常出力を計測する。パルスジェネレータでは、切欠きのついたプレートを回転させることで通路の開閉を行い、任意の圧力脈動を発生させる。事前に熱線トラバースで脈動下の流速プロファイルを把握し、性能試験中は流路中央の代表流速を熱線で計測することで非正常流量を算出する。タービンの負荷はダイナモが吸収するため、広範囲の作動点で計測が可能な特徴を有する。

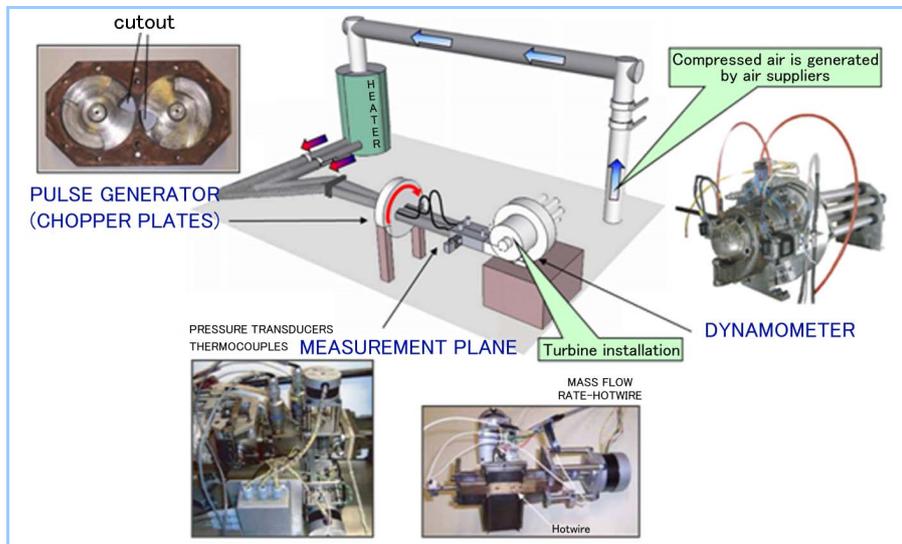


図1 インペリアルカレッジ試験装置

(2) 試験条件

近年市場が拡大している小型ガソリンエンジン(1.4L ガソリン)を対象とし、試験条件と供試体の選定を行った。実機はタービン外径が 40mm 程度のものが用いられるが、試験装置の制約からタービン外径を 74mm とし、各種無次元数(速度比 $U/C0$ (ガスの流速とタービン周速の比)、脈動ストローハル数 MSt , PMS_t) が一致する近似条件を算出した。この場合、エンジン 2000rpm の低速トルク点が試験装置では脈動周波数 20Hz、6000rpm の高速出力点が脈動周波数 60Hz に相当する。図2に供試体を示す。供試タービンは乗用車用の相似拡大モデルであり、低温空気にて駆動することからタービン動翼はアルミで削り出した。

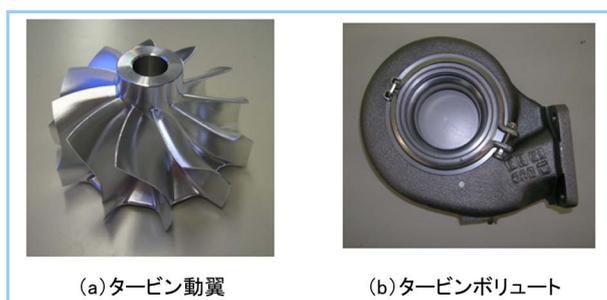


図2 供試体(タービン外径 74mm)

(3) 非正常性能計測

排気脈動条件で非正常タービン性能計測を実施した。図3に脈動状態量(ターボ回転数 50000rpm, 脈動周波数 60Hz)、図4に性能計測結果の一例を示す。圧力は位相 0deg から立ち上がり 120deg で最大となった後、 360deg まで徐々に低下する(図3(a))。一方、流量は圧力よりも早く 70deg でほぼ最大となり、また 240deg 近傍に局所ピークが発生し、圧力比とは異なる特徴が見られる(図3(b))。実際、修正流量と圧力比で整理した図4(a)では、非正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特性を描く。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、ヒステリシス特性を描く。図4(b)のタービン出

力も定常に対し乖離がみられ、大幅に変動していることが確認された。一般的に、排気脈動の時間スケールは、タービン内部流動の時間スケールよりも大幅に大きく、タービン性能は準定常状態になると考えられていたが、実際はヒステリシス特性を描き準定常で表現できないことが判明した。

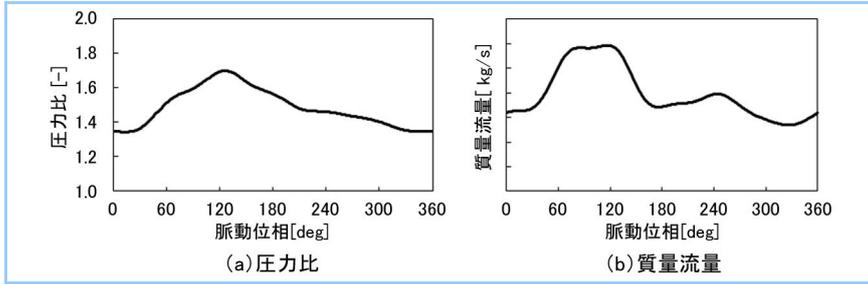


図3 タービン流入状態量(インペリアルカレッジ計測結果)

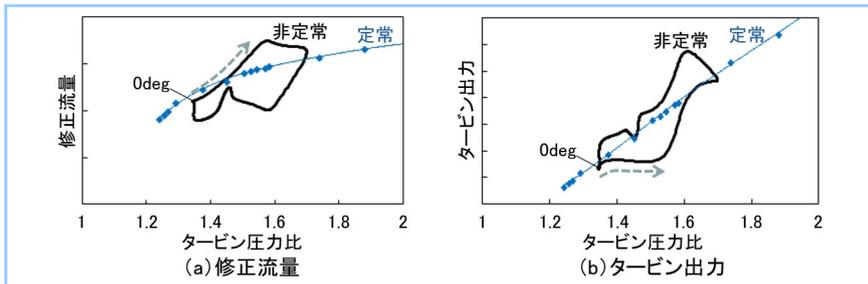


図4 タービン非定常性能(インペリアルカレッジ計測結果)

3. タービン内部流動分析

本章では、非定常流動解析による、排気脈動下タービン内部流動分析について述べる。

(1) 非定常流動解析

非定常流動解析を用いて、排気脈動下のタービン内部流動を詳細に分析した。エンジン回転数のオーダ (10^3 rpm) とターボ回転数のオーダ (10^5 rpm) の違いからもわかるように、両者流動の時間・空間スケールは大幅に異なり、両者の流動現象を高精度に捕らえるには解析負荷が過大となる。そこで、排気脈動下タービンに適した流動解析条件を見出しつつ、内部流動分析を行った。

解析領域を図5に示す。インペリアルカレッジ試験装置に合わせ入口ダクト、タービンボリューート、タービン動翼を考慮した。解析コードはケンブリッジ大が開発した TBLOCK10.9(混合長乱流モデル, SCREE スキーム, 有限体積法)を適用した。ラジアルタービンの内部流動は、前縁衝突による流動ひずみやチップ漏れ流れによる渦があり、このように流速の変化が大きい壁面近傍を中心にメッシュ密度を増加させた。また、事前にメッシュ数、及び時間刻みのパラメータスタディを行い、試験結果で得られたタービン流量と出力のヒステリシス特性が得られつつ、解析負荷を落とせる設定を抽出した。

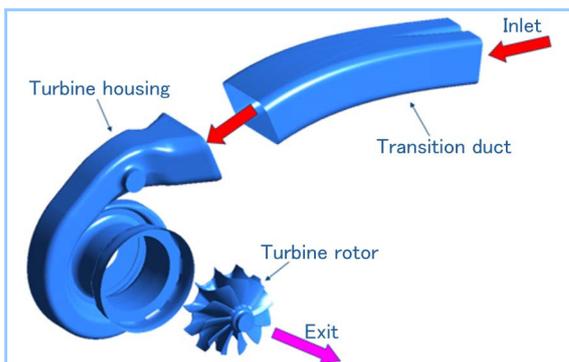


図5 解析領域

(2) 解析結果

試験条件を基に、非定常 CFD を実施した。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。図6に解析結果を示す。流量特性を比較すると、解析では計測結果より周期の短い変動がみられるものの、ヒステリシス特性を良く捉えている。タービン出力は翼面に働く静圧から算出したもので、定性的、定量的にも計測結果と良好に一致した。脈動1波長のサイクル平均出力を比較すると、60Hz、50krpm において誤差は-2.4%に抑制されている。

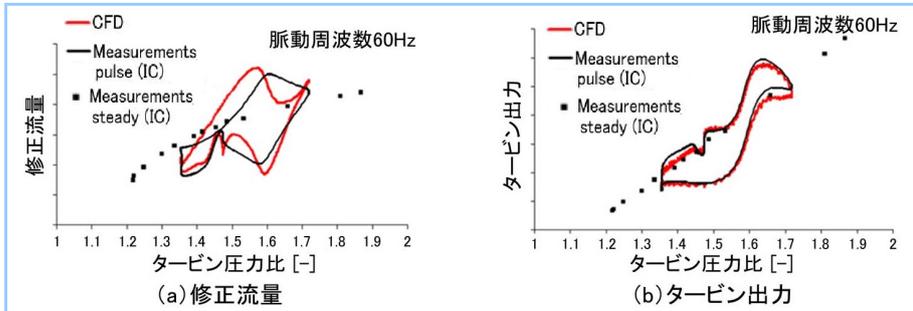


図6 タービン非定常性能(流動解析結果)

(3) 損失構造の解明

図7に動翼1ピッチの内部流動構造を示す。前述のとおり、ラジアルタービンの主な損失には、前縁衝突損失、背面漏れ損失、チップクリアランス漏れ損失がある。脈動条件においては、低圧力比よりも高圧力比条件においてこれらの損失が顕著となり、高い損失が生成されていることがわかる。高圧力比では、タービン入口相対流速が圧力面側に傾くことで、動翼前縁メタル角と流れの角度差が増加して衝突損失が増える。また、翼負荷増加に伴い、背面やチップクリアランスなどの隙間から漏れ流れ損失が増加する。

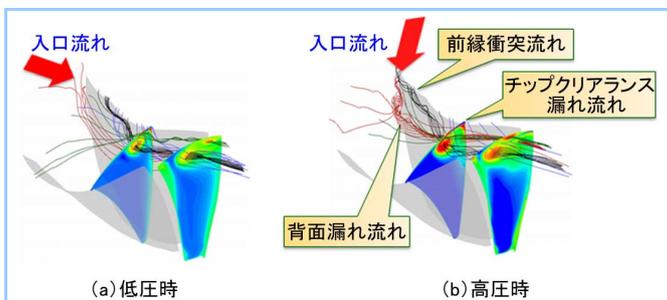


図7 タービン動翼内部損失と流線(流動解析結果)

次に、排気脈動下の損失構造を分析した。タービンの損失には、大きく排気損失(Kinetic energy loss)と不可逆損失(Irreversibility loss)がある。損失生成率の積分範囲を変えることで、各階層の損失比較を行った。また、動翼内部においては、積分範囲を図8に示す領域に細分化する事で、前縁衝突損失やクリアランス漏れ流れ損失などを分離した。

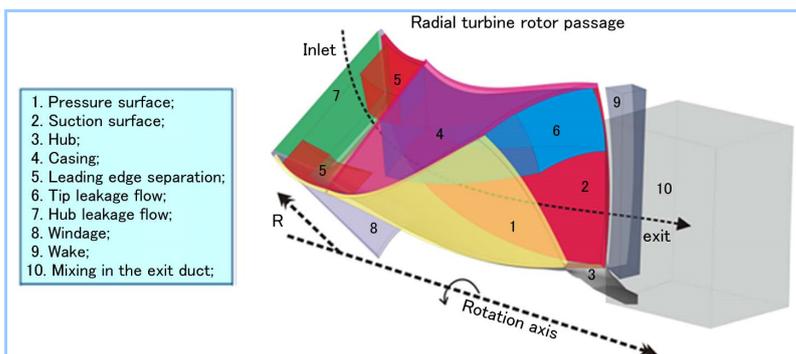


図8 損失分析領域

図9に損失分析結果を示す。脈動圧力がピークとなる位相付近(90-120deg)において、全体の損失が増加し、特に不可逆損失の増加が排気損失よりも大きい。図9(b)は排気損失を軸方向、半径方向成分に分離したものだが、脈動圧力ピーク(120deg)では軸方向の損失が増加し、周方向の損失は抑えられている。すなわち脈動圧力ピークで出口スワールが抑えられている事を示しており、動翼出口翼角が作る速度三角形は、脈動ピークに適した状態にあり、改良の余地は小さいと考えられる。一方、不可逆損失を動翼とボリュートに分離すると(図9(c)), ボリュートの損失は脈動位相によらず一定かつ小さいのに対し、動翼の損失が脈動圧力ピーク(90-120deg)で増加している。損失比率においても同様の傾向が得られ、脈動圧力ピークにおける動翼の損失比率が大きい。図9(d)は動翼内部の各損失を分離したもので、脈動圧力ピークの脈動位相 90deg 近傍で、前縁損失が増大している事が分かる。

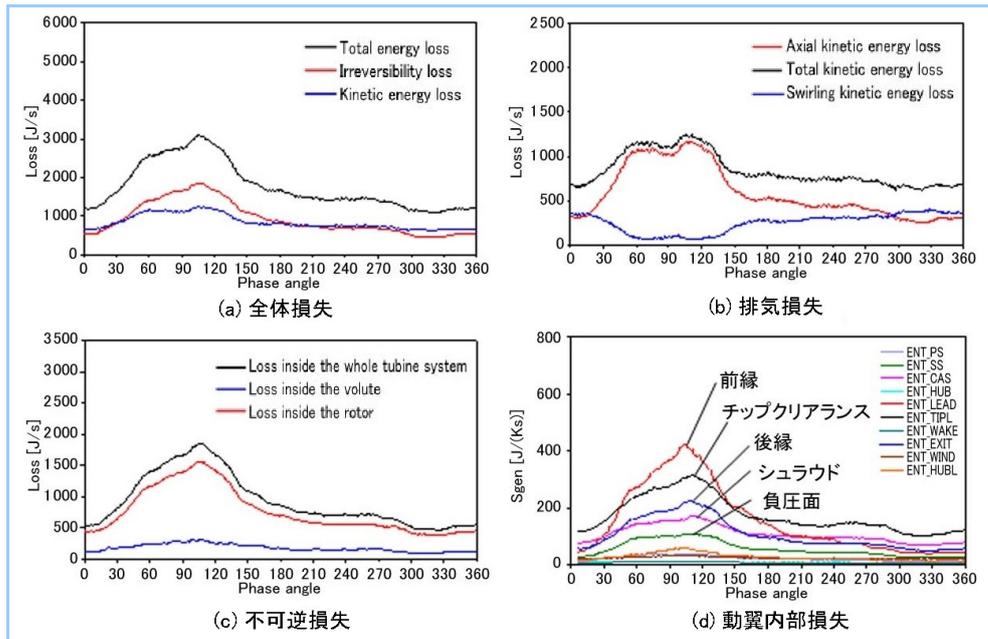


図9 損失分布(流動解析結果)

以上の排気脈動下のタービン損失構造分析により、ガスエネルギーの大きい脈動圧力ピークでは、タービン前縁損失が最も増加していることが判明した。タービン高効率化にはこの前縁損失を低減することが重要である。図10は非定常CFDで得られたタービン動翼前縁の流れ角であり、脈動圧力ピークでは前縁の衝突角が-5deg まで低下していることが分かる。ラジアルタービンの前縁衝突角は経験的に-20deg 近傍がよいとされており+15deg 過大である。

ラジアルタービンの場合、強度上の制約から前縁メタル角の調整が難しい。そこで、本衝突損失低減のために、斜流タービンの適用を検討した。斜流タービンは、ラジアルタービンと同等の強度を保ちながら、前縁メタル角を変更することができる。以降で詳細を述べる。

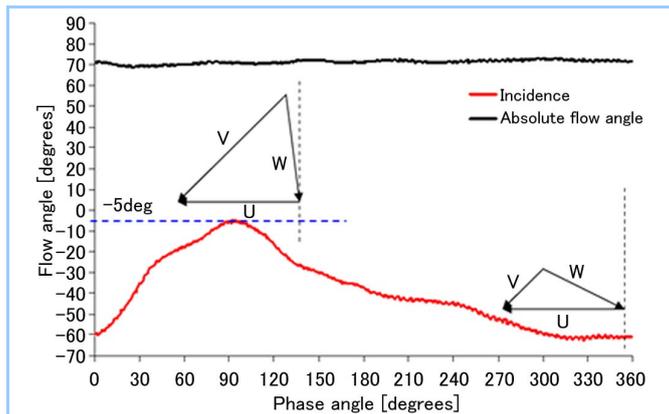


図10 動翼入口流れ角分布(流動解析結果)

4. 排気脈動下のタービン高効率化

これまで得られた性能分析結果、内部流動分析結果を基にタービン高効率化設計について取り組んだ。本章では、タービン動翼改良設計の概要について述べる。

(1) 動翼改良設計

斜流タービンは前縁翼角を圧力面側に傾斜でき、ラジアルタービンよりも低 $U/C0$ 時の性能に優れることを利用し、排気脈動下条件に適した新型斜流タービンの開発を実施した。図 11 に設計したタービンを示す。図9にて分析したとおり、排気脈動下では前縁衝突損失、チップクリアランス流れ損失が比較的大きい。クリアランス流れの原因は翼面圧力差、つまり翼負荷であることに着目し、主にシュラウド側の負荷分布を低減させるよう翼角分布を設定した。前縁衝突損失については、斜流タービンの適用で前縁角度を調整しつつ、前縁円弧子午面による周速上昇で相対流れ角を調整した。前縁翼角を過大に傾斜させると、翼負荷増大によるクリアランス流れ損失増加や強度上の懸念があるため、子午面改良を組合わせた。

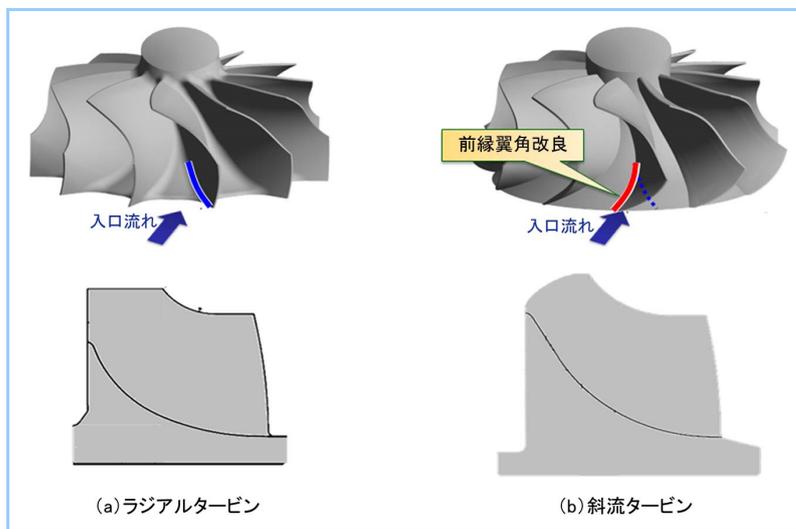


図 11 タービン形状

(2) 流動解析評価

改良斜流タービン動翼を定常流動解析で評価した。図 12 に示す解析結果の通り、ラジアルタービンに対し、ピーク効率は同等を維持しつつ、脈動ピーク圧力で重要となる低 $U/C0$ で効率向上が確認できた ($U/C0=0.5$ で効率+4%)。一方、背反事象として、高 $U/C0$ では大幅な効率低下が確認されており ($U/C0=0.8$ で効率-3%)、良否判断には脈動下サイクル平均による全体評価が必要である。図 13 に示す動翼内部損失分布では、設計の計画通り前縁衝突損失の低減、及びクリアランス流れ損失の低減が確認できた。後縁側に蓄積されたエントロピも抑制されている。

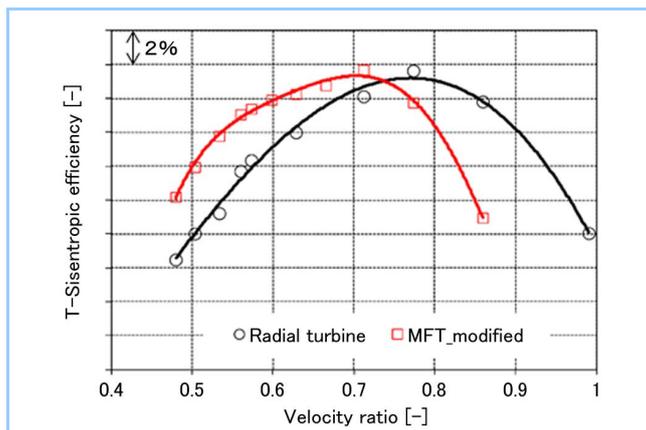


図 12 タービン効率(流動解析結果)

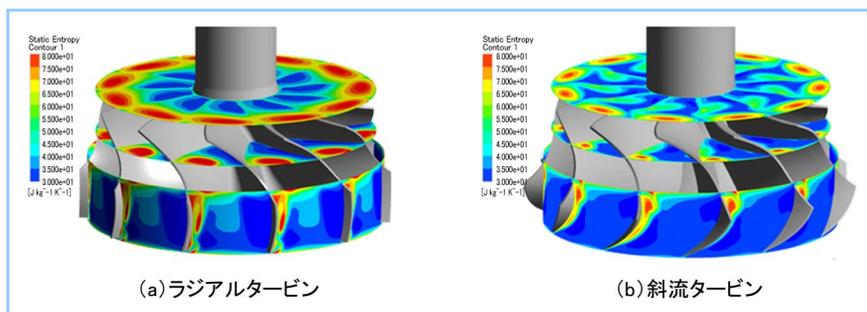


図 13 内部損失分布(流動解析結果)

(3) 試験評価

インペリアルカレッジの試験装置を用いて、新型斜流タービンの性能試験を実施した。図 14 にタービン平均圧力 1.5、脈動周波数は 20, 40, 60Hz3 ケースのサイクル平均タービン効率を示す。エンジン低速トルク点を模擬した 20Hz では、効率が 0.3% 低下したが、エンジン高速出力点を模擬した 60Hz では、+3.1% の効率向上が得られた。また、これらの中間である 40Hz においても、効率+3.0% が得られており、改良斜流タービンの排気脈動に対する性能向上が確認された。

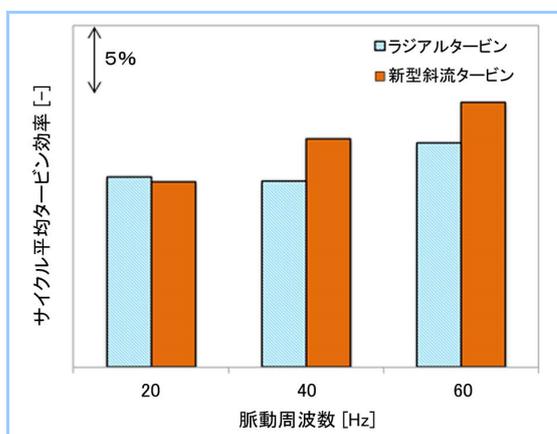


図 14 タービン非定常性能(計測結果)

5. まとめ

ターボチャージャの高性能化を目的とし、エンジン排気脈動下のタービン高効率化に取り組んだ。タービンの非定常性能を取得し、従来の定常試験では検出出来なかった流量、効率ヒステリシス特性を把握した。本計測結果を基に排気脈動下タービンの流動解析手法を構築し、脈動下で発生するタービン損失構造を解明し、新型斜流タービン開発に繋げた。新型斜流タービンをインペリアルカレッジの試験装置で評価し、エンジン高速出力点を模擬した脈動条件において高性能化を達成した。

乗用車エンジンを取り巻く規制強化の動きは今後も続くため、乗用車メーカーはパワートレインの電動化を含めた様々な開発を想定しており、必要とされる過給技術も絶えず変化していく事が予想される。今後も最先端研究機関との連携により常に最新の評価手法、設計手法を取り込み、空力設計技術を更に発展させ迅速かつ革新的なターボチャージャの開発を推進していきたい。

共同研究を通じて、本開発にご協力頂いたインペリアルカレッジ Prof. Martinez-Botas, Dr. Yang(現在, 上海交通大学), ケンブリッジ大学 Dr. Xu, Dr. Cao に謝意を表す。

参考文献

(1) Arcoumanis, C. et al., Performance of a Mixed Flow Turbocharger Turbine Under Pulsating Flow Conditions, ASME Paper, 95-GT-210