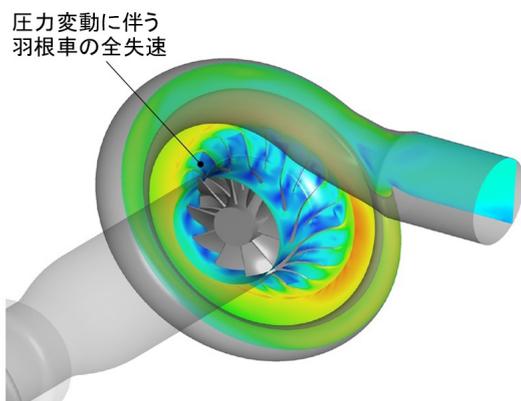


吐出圧力変動を伴うターボチャージャ用遠心コンプレッサの 複雑内部流れ場の解明

Flow Measurement and Analysis Technology for Centrifugal Compressor
under Pulsating Conditions



富田 勲*1
Isao Tomita

林 良洋*2
Yoshihiro Hayashi

リカルド F.
マルチネス-ボタス*3
Ricardo F.
Martinez-Botas

マリア E.
バレラ メドラーノ*3
Maria E.
Barrera Medrano

地球環境保全意識の高まりを受けて、乗用車エンジンの燃費規制・排ガス規制が強化されており、近年ではダウンサイジング・ミラーサイクル化・スーパーリーンバーンなどの低燃費化技術が広く普及しつつある。これに伴いターボチャージャ用遠心コンプレッサに対しては幅広い作動範囲で高い圧力比を達成するワイドレンジ化が強く要求されており、特に小流量側の作動範囲を制約するサージング限界の拡大は必要不可欠となっている。一方で、コンプレッサはエンジンの吸気に起因した圧力脈動下で運転されることから、サージング近傍の内部流動は複雑な非定常性を示し、作動範囲拡大のための現象把握は非常に困難であった。そこで当社では、エンジン実機を再現した脈動試験装置による流動計測を実施するとともに、試験結果を境界条件とした非定常数値解析を援用することで、これまで明らかとなっていなかった脈動流れにおける詳細な流動構造の分析を行った。その結果、脈動流れにおいては配管のヘルムホルツ共振周波数が作動範囲に強く影響するとともに、羽根車先端部における全失速の発生・消失に伴うフローパターンの変化が支配的であることが明らかとなった。

1. はじめに

近年の地球環境保全意識の高まりを受けて、乗用車用エンジンの排ガス規制・燃費規制が強まっており、ターボチャージャに対してもエンジン低燃費化を実現するための性能向上が強く要求されている。図1に乗用車用ターボチャージャのシステムレイアウトを示す。エンジンの排気エネルギーによってタービンが回転することで、同軸上の遠心コンプレッサが駆動され、下流の中間冷却器を介して圧縮空気がエンジンに送り込まれる。このとき遠心コンプレッサ及びタービンの流れ場は、図2に示すようなエンジンに起因した圧力脈動に晒されることから、ターボチャージャの高性能化においてはこの脈動流れを考慮した開発を行うことが重要となっている。

脈動流れにおける過去のターボチャージャ開発として、当社は既報第50号 Vol.1にてタービンスクロールの脈動下での流動に着目した高効率化を実施してきた。本報では、脈動下におけるコンプレッサ性能に着目した開発事例を紹介する。

昨今の遠心コンプレッサの開発動向としては、ダウンサイジング・ミラーサイクル・スーパーリーンバーンなどの低燃費化技術の普及により、広範な作動範囲で安定した過給圧を達成するワイドレンジ化が必要不可欠となっている。図3にターボチャージャ用遠心コンプレッサの典型的な作

*1 総合研究所 流体研究部 主席研究員

*2 総合研究所 グローバルR&Iセンター

*3 インペリアル大学・MHIET ユニバーシティテクノロジーセンター

動点を示す。コンプレッサは車両の運転状態に応じた種々の作動点で使用され、サージングによる小流量側作動限界とチョーキングによる大流量側作動限界にて作動範囲が制約される。とりわけエンジン最大トルク点近傍の作動範囲を制約するサージングは、コンプレッサの逆圧力勾配に起因した逆流を伴う不安定流動現象であり、更なるワイドレンジ化のためには、エンジン実機におけるサージングの流れ挙動を正確に捉えることが必要不可欠となる。

しかし前述の通り、ターボチャージャ用遠心コンプレッサはエンジンの吸気に伴う圧力脈動に晒されることから、その内部流動は脈動を伴わない定常流れに対して大きく乖離した複雑非定常流れとなる。遠心コンプレッサのサージング近傍の流動に関しては、実験・数値解析を問わず旧来より多くの研究¹⁾²⁾がなされておりその一端が明らかとなりつつあるが、上記のような圧力脈動を伴う作動条件下において詳細な分析を実施した例は未だ少なく、十分な知見が得られていないのが現状である。

本報では上記の課題を解決するために、エンジン実機を模擬した脈動試験装置を用いた非定常計測と大規模非定常解析を実施し、脈動下におけるサージング近傍の流れ挙動を詳細に分析した開発事例を紹介する。

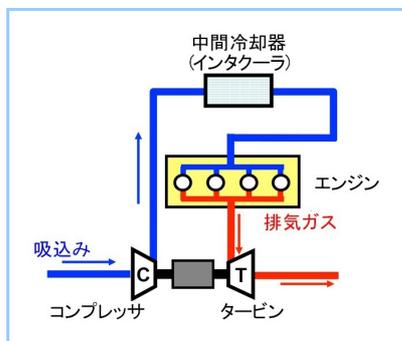


図1 過給機のシステムレイアウト

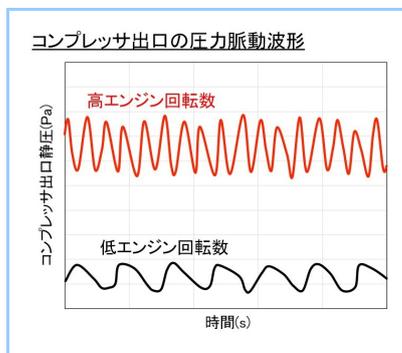


図2 過給機エンジンの圧力脈動

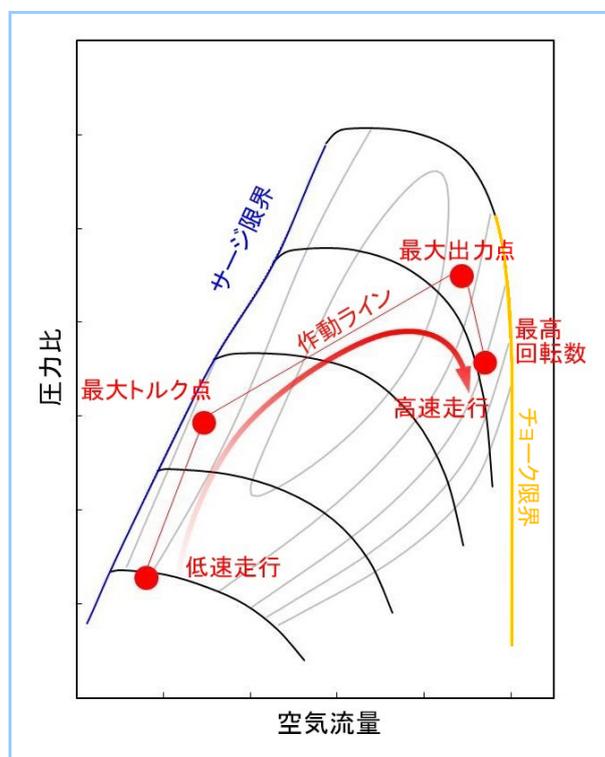


図3 乗用車用過給機コンプレッサの運転点

2. 実験及び流動解析手法

2.1 研究対象

本研究で解析対象とする遠心コンプレッサの外観を図4に示す。本コンプレッサはターボチャージャに使用される遠心コンプレッサであり、羽根車はそれぞれ10枚のフルブレードとスプリッタを有する後方湾曲オープン形を採用している。空気は羽根車によって運動エネルギーを与えられたのち、下流のベーンレスディフューザで減速・昇圧され、吸気マニホールドと接合するスクロールを通過してエンジンへと供給される。なお、本コンプレッサにはケーシングトリートメント^{*1}等の付帯デバイスは採用していない。図5に供試コンプレッサの各回転数の流量と圧力比の関係（圧力流量特性）を示す。本研究では、乗用車用ターボチャージャ小流量運転時の代表的な作動点に相当する圧力比1.7のサージ点近傍を対象として流動を分析した。

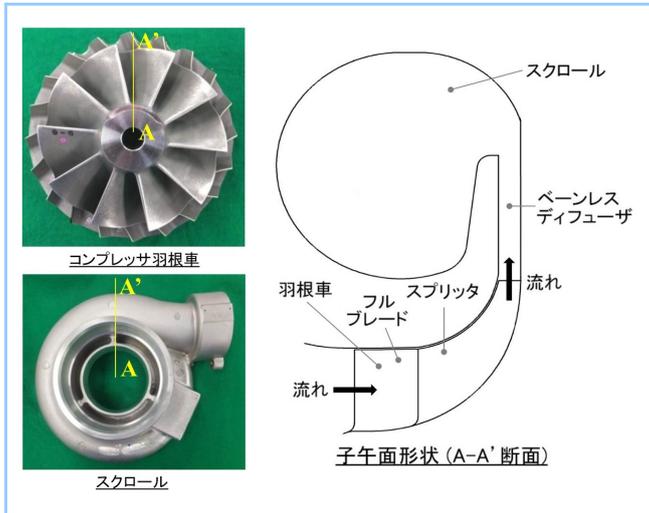


図4 供試コンプレッサ 外観と模式図

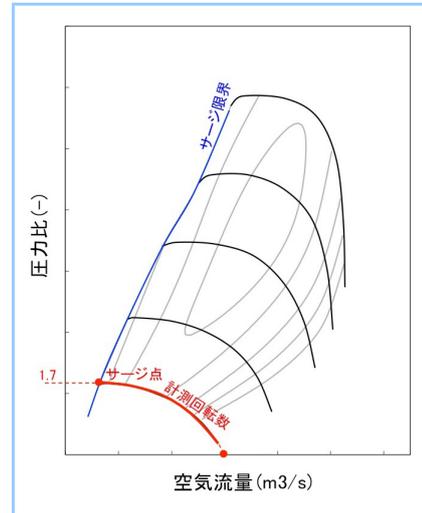


図5 圧力流量特性線図

2.2 圧力脈動下におけるサージ計測手法³⁾

圧力脈動がサージ特性に及ぼす影響を分析するため、当社では脈動流れ計測に関する世界的権威である Imperial College London との共同研究を行い、エンジン実機の圧力脈動を詳細に再現可能な非常流動計測設備を構築した。³⁾ 図6に上記脈動試験装置を示す。本試験装置は、スクロール出口下流に回転バルブを設けることで出口圧力に脈動を与えることが可能であり、バルブの円盤径及び回転数を変更することで圧力の振幅・周波数を任意の値に設定できる。

表1に上記脈動試験装置における試験条件を示す。今回試験では一般的な乗用車用エンジンのトルク点における圧力波形を模擬し、周波数 $f=66.7\text{Hz}$ (エンジン回転数 2000rpm 相当)の正弦波形の圧力脈動を基準条件とし、脈動周波数を変更した性能計測を実施した。各試験条件におけるサージ流量を計測することで、圧力脈動波形がサージ特性に及ぼす影響を分析した。

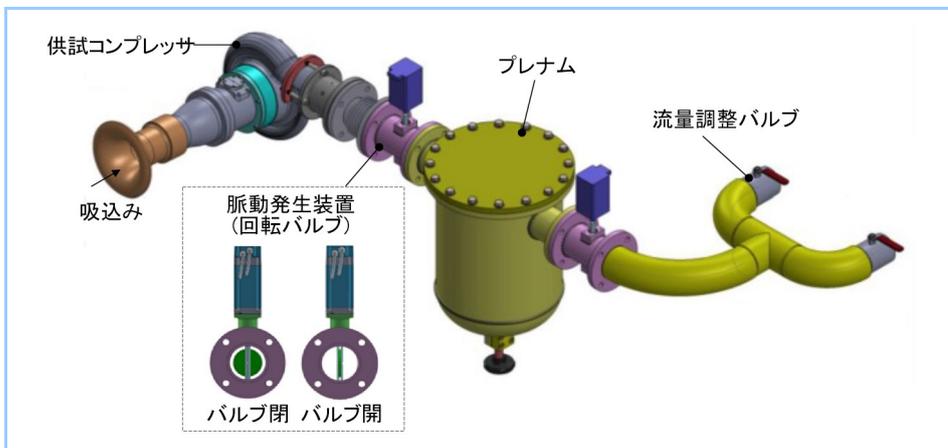


図6 圧力脈動試験装置

表1 圧力脈動試験条件

羽根車回転数	40000rpm
脈動周波数	20~100Hz (基本周波数 66.7Hz)
脈動振幅	平均圧力比に対して 約5%の静圧振幅 (サージ点付近)

表2 非定常数値解析条件

解析ソフト	ANSYS-CFX 14.5
支配方程式	3D-RANS
解析スキーム	2 nd -Order
乱流モデル	SST k-omega
入口境界条件	全圧 1気圧 全温 293.15k
出口境界条件	静圧固定(図8参照)

2.3 非定常流動解析手法

上記試験結果における詳細内部流動を分析するため、数値流体力学(CFD:Computational Fluid Dynamics)を用いた非定常流れ場の解析を併せて実施した。本研究で使用した数値解析

モデルと解析条件を図7及び表2に示す。解析コードには ANSYS-CFX を用い、乱流モデルは SST-k ω モデルを使用している。解析領域は前節における試験装置を模擬し、羽根車吸気ダクト上流の開放領域に相当する半球状のドメインを設けるとともに、出口境界は試験装置の回転バルブに相当する位置に設定し、試験条件と同等の回転数で解析を実施した。解析格子は羽根車・ディフューザは構造格子、スクロールを含む上下流配管は非構造格子にて作成し格子セル数は全体で約 1300 万セルである。前節の計測結果より得られた静圧変動を出口境界条件として付加し、圧力脈動波形4周期分の非定常時刻歴データを取得した。

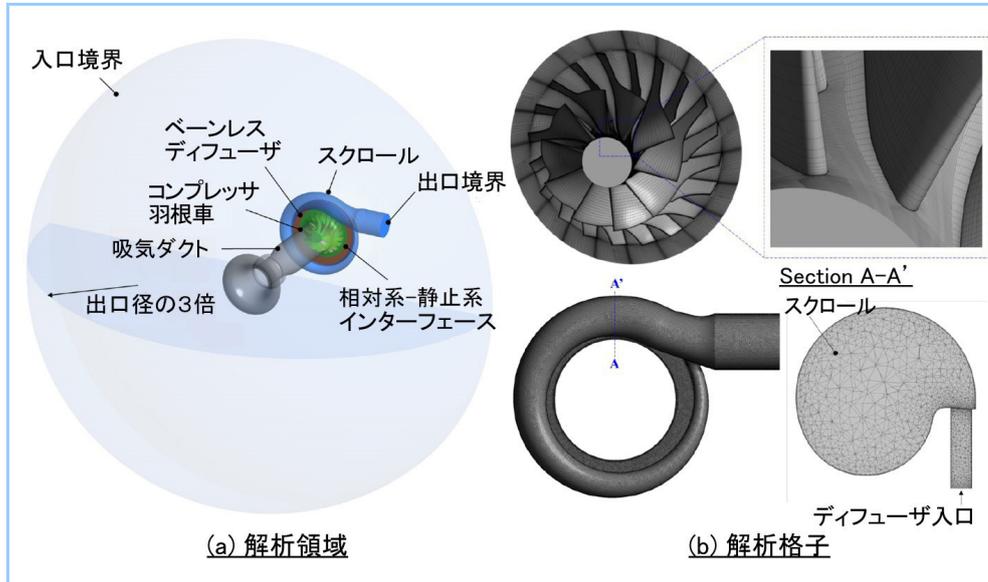


図7 数値解析モデル

3. 吐出脈動下における流動現象の解明と改良

3.1 脈動下におけるサージ特性計測結果⁴⁾⁵⁾

圧力脈動波形の影響を分析するため、脈動周波数を変更したサージ流量計測を実施した。本研究では、一般的な4気筒エンジンの最大トルク点に相当する 66.7Hz (2000rpm 相当) の周波数の脈動を基準波形 (図8) として、脈動周波数 f を 20Hz ~ 100Hz の範囲で変更し、各ケースのサージ流量を取得した。

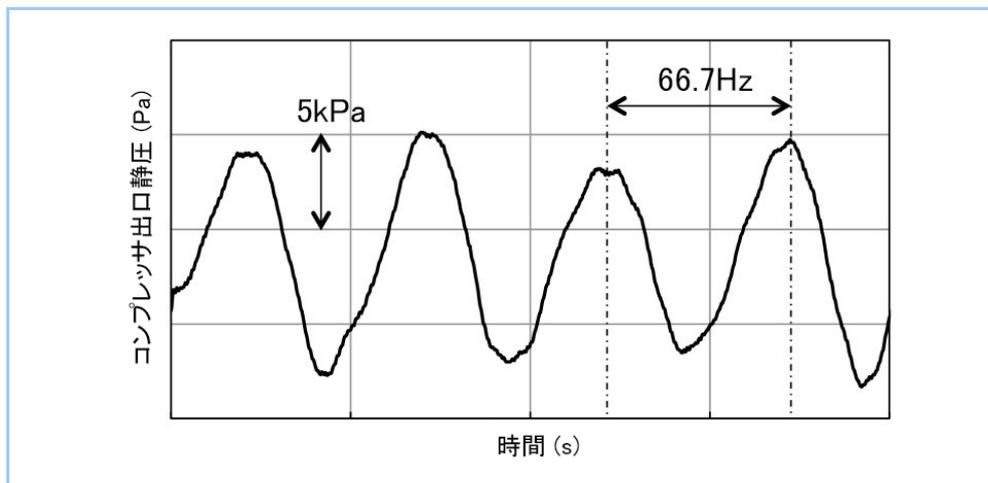


図8 基準圧力波形

図9に圧力脈動を付加しない定常流れと、基準圧力波形を付加した脈動流れにおける圧力流量特性の比較を示す。コンプレッサに圧力脈動を付加した際には、流量の増加・減少に伴う慣性力が流体に作用することによって、定常流れよりもサージングや翼失速に対する安定性が向上す

ることが知られている。⁵⁾⁶⁾本コンプレッサの試験結果においても、定常流れのサージ流量 SP1 に対して、脈動流れにおけるサージ流量 SP2 が 8.0% 小流量側にシフトしており、圧力脈動がコンプレッサのサージングを抑制していることが確認できる。

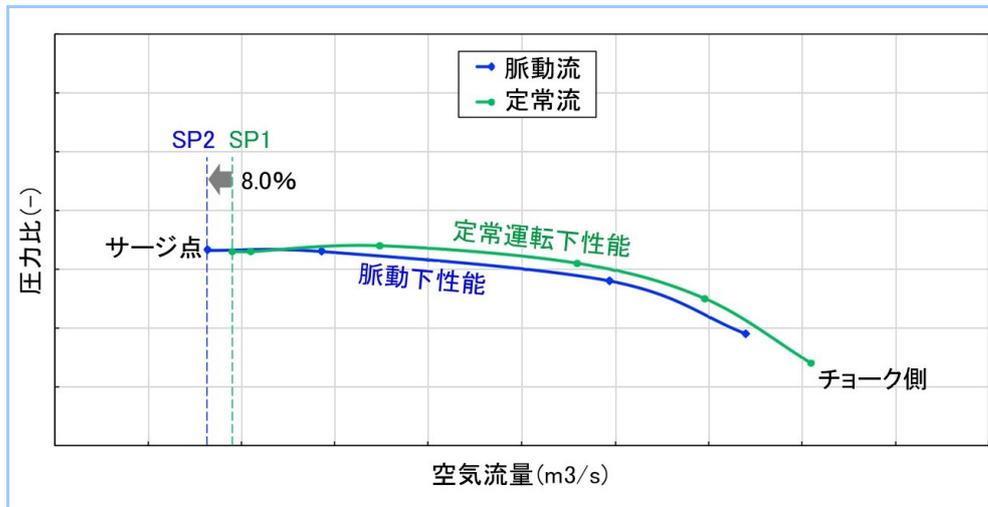


図9 圧力脈動の有無とサージ流量の関係

図 10 に圧力脈動の周波数を変更した場合の供試コンプレッサの圧力流量特性を示す。脈動周波数を変更した際のサージ流量は 20Hz が最も大きく、作動範囲が狭くなっている。これは供試コンプレッサ下流配管の共振周波数と対応しており、配管の断面積及び容積・長さから算出されるヘルムホルツ共鳴周波数^{*2}が 23Hz 前後であることから、これに最も近い 20Hz の条件にてサージ流量が極値を持つ傾向が現れている。上記条件から周波数を上げていくにつれてサージ流量が減少し、ヘルムホルツ共鳴の 2 倍周波数付近の 43.3Hz にて最も作動範囲が広くなる。これらのことから、脈動下におけるサージング特性は下流配管の共振周波数と強い相関があり、エンジン実機の配管形状を適切に設計することで、小流量側の安定作動域を拡大できる可能性があると考えられる。

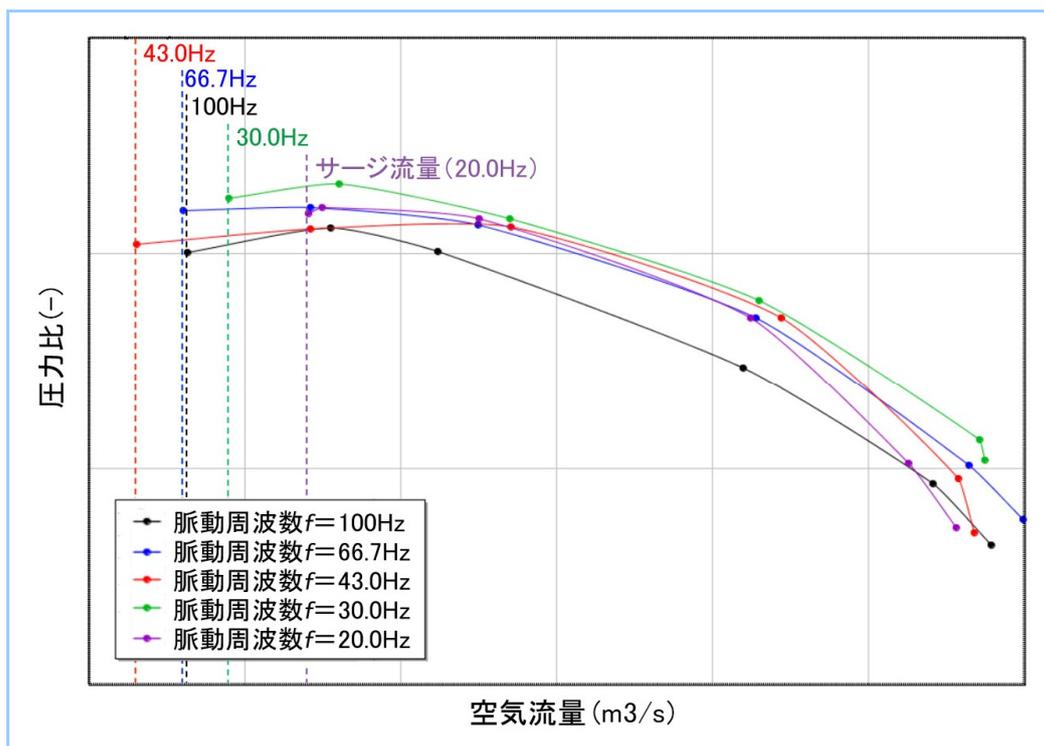


図 10 脈動周波数とサージ流量の関係

3.2 非定常流動解析結果

圧力脈動下における詳細な内部流動を分析するため、上記基準波形の試験結果と同等条件にて流動解析を実施した。図 11 に実験結果との圧力流量特性の比較を示す。図 10 において、特性曲線の傾向には良好な一致が見られ、解析結果は実際の流動を十分に再現できているものと考えられる。図 12(a)(b)に、脈動流の解析結果から得られたコンプレッサ各部の速度ベクトル(流れ角)の時間変動特性を示す。図 12 を見ると、羽根車入口(a)においては、圧力脈動周期に同期した急激な流れ角の変動が確認されるが、ディフューザ出口(b)においては脈動に同期した変動は小さい。今回の計測条件は圧力比 1.7 付近の低圧力比作動点であり、他の作動点と比較してディフューザの減速量が小さいことから、ディフューザ部よりもむしろ羽根車にて脈動に同期した変動が顕れていると考えられる。

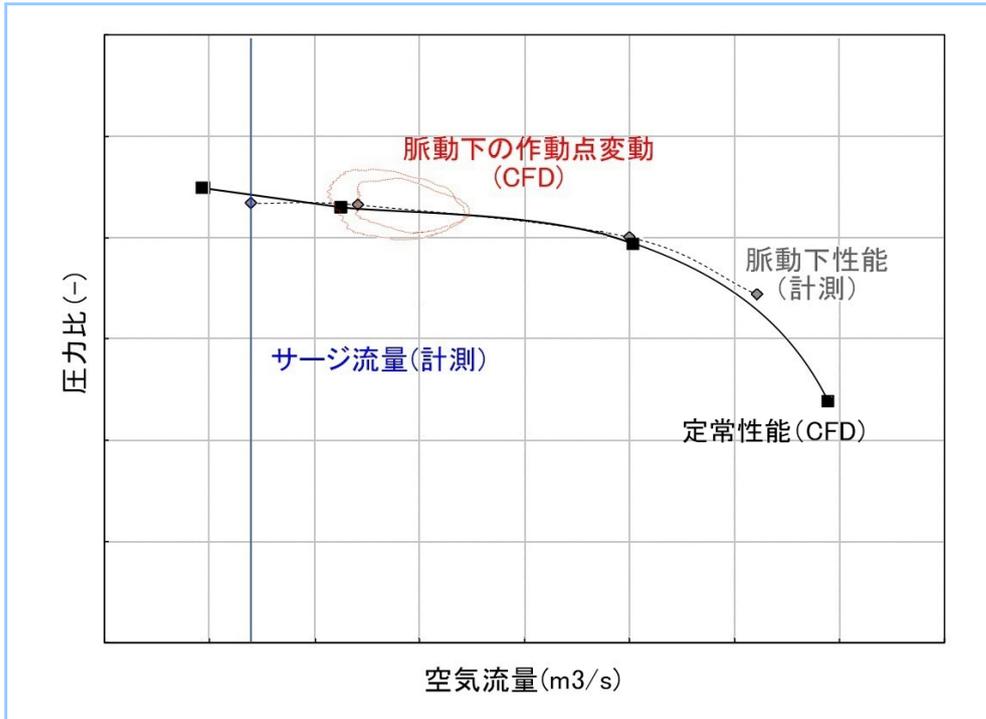


図 11 圧力流量特性(数値解析及び実験計測結果)

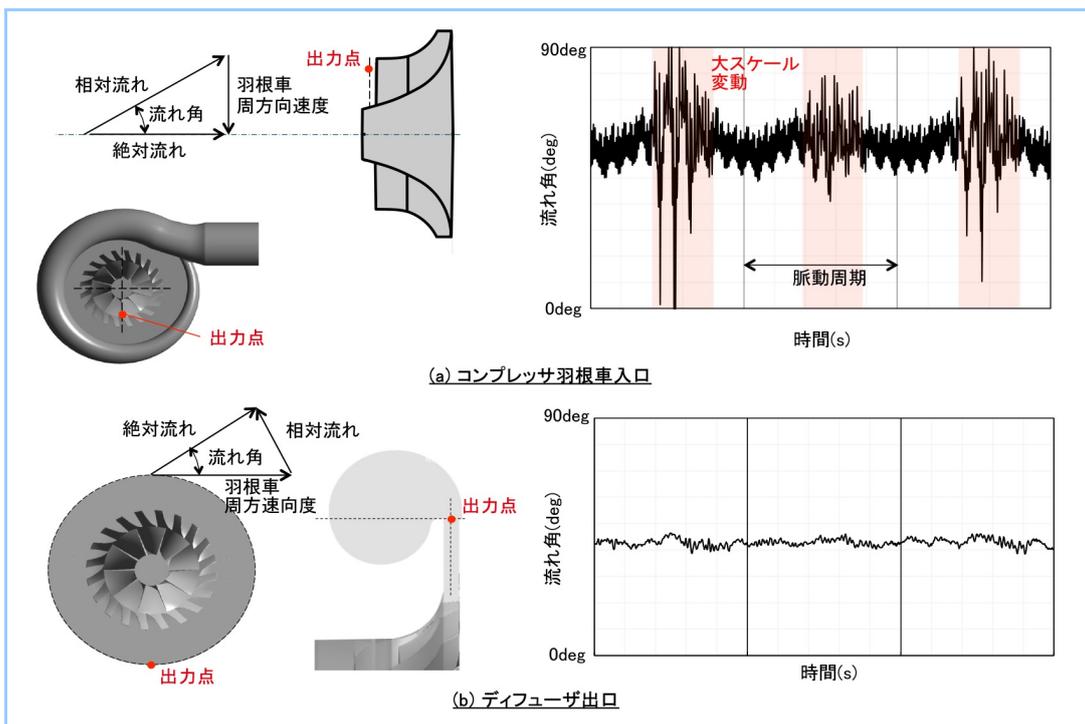


図 12 羽根車入口・ディフューザ出口の流れ角変動

上記の羽根車内部の流動の変化を分析するため、**図 13**に、非定常解析の各時刻 (PointA~D と呼称) における羽根車先端近傍の逆流領域の速度コンタを可視化した。PointA~D における逆流領域の規模は同図に示す吸気流量の大小関係に対応しているとともに、羽根車の入口部よりも上流側にまで発達していることから、前述した羽根車入口における流れ角の変動はこれらの逆流領域の発達・縮小を捉えたものであると考えられる。特に流量が最も小さい PointC においては、羽根車入口が全周にわたって逆流領域に覆われる全失速の流れ場が確認され、脈動によって全失速の発生・消失を繰り返す強い非定常流れが発現していることがわかる。

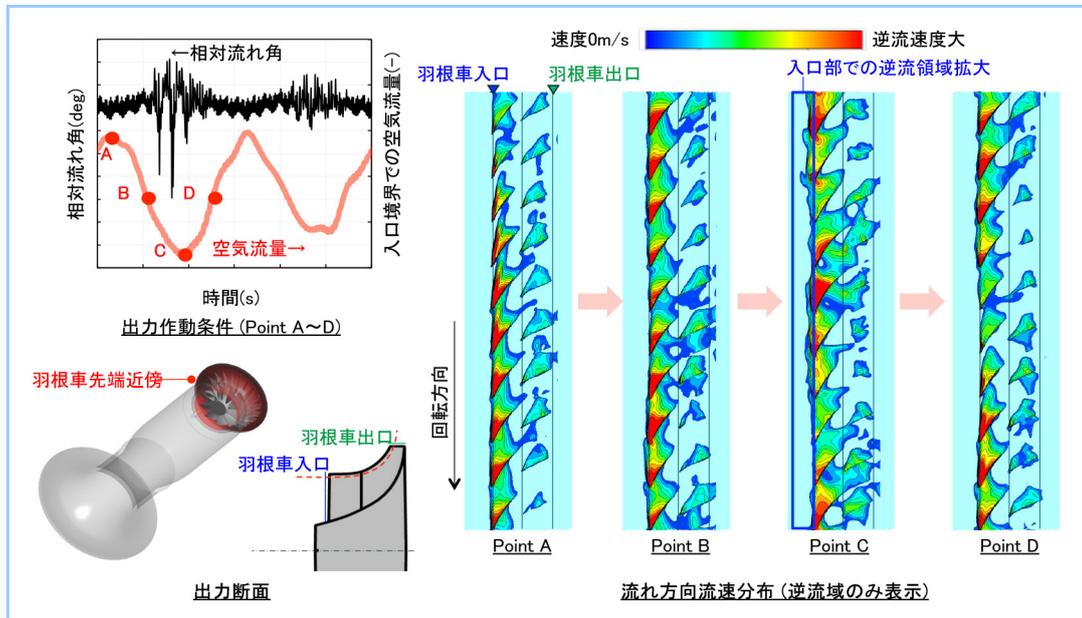


図 13 羽根車内部における逆流領域の分布

これらの非定常流れ挙動に関して三次元的な流動構造の変化を確認するため、特異点理論⁷⁾に基づく渦構造の可視化処理を実施した。**図 14**に PointA~D における三次元渦構造を示す。渦構造は無次元ヘリシティ(速度ベクトルと渦度ベクトルの余弦値)にて着色されており、図中の +1.0(赤)は逆流, -1.0(青)は順流方向の縦渦を示す。同図では羽根車先端側の漏れ流れ渦, 羽根車根元側の二次流れ渦及び馬蹄形渦など、遠心コンプレッサ羽根車の典型的な三次元渦構造のパターンを確認することができる。各作動点において、羽根車先端側の漏れ流れ渦には逆流に伴うヘリシティの反転など顕著な変化が生じている反面、根元側関しては作動点によらずほぼ同様の渦構造が維持されている。これに伴い同図に示す羽根車入口の速度分布では、先端側の逆流領域に顕著な流速変化が生じているが、この影響によって根元側では流速の変動が打ち消され、ほぼ定常流れに近い様相を呈している。これらのことから脈動流れにおいては羽根車先端側の流動変化が支配的であり、当該箇所の流動を積極的に制御することによって、サージマージンの更なる拡大が得られることが示唆される。

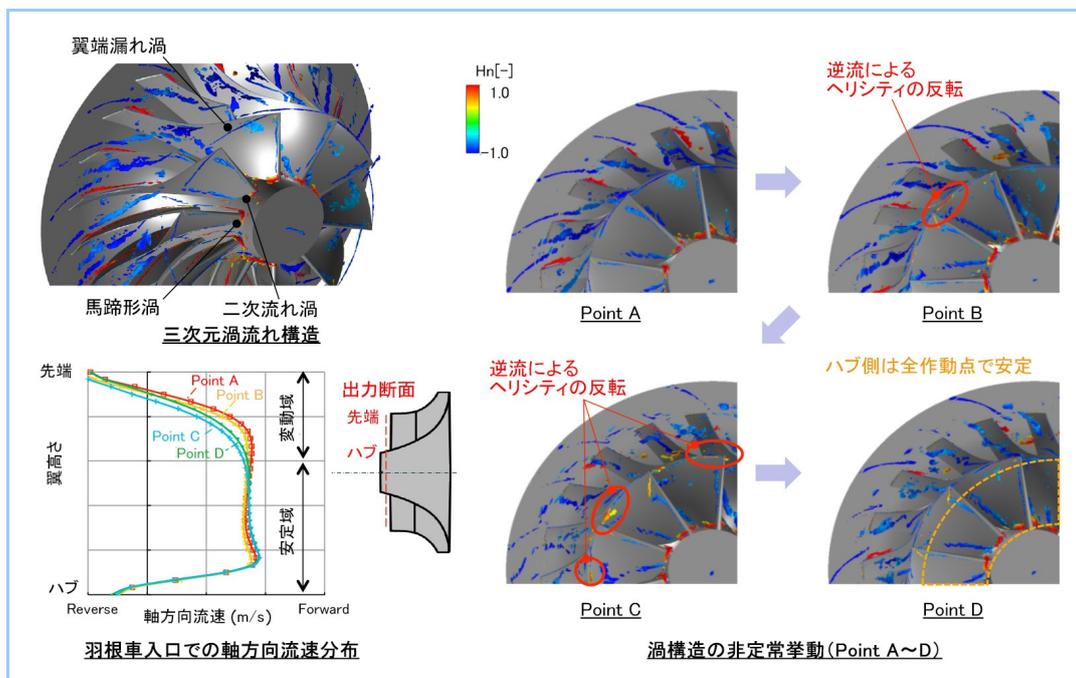


図 14 羽根車内部における三次元渦流れ構造

4. 課題と今後の展望

本技術により、圧力脈動下におけるコンプレッサの非定常流れ挙動が明らかとなった。将来的な課題として、より詳細な流動構造を検証するための更なる内部流動計測と、数値解析スキーム・乱流モデルの高度化による解析精度の向上が必要となる。今後の展望としては、本技術によって得られた結果を設計に反映すべく、脈動流れに適合した空力デバイス開発を推進していきたい。

5. まとめ

本報では、ターボチャージャ用遠心コンプレッサのサージ点近傍の詳細流動分析のため、エンジン実機を模擬した圧力脈動試験装置を構築し、従来困難であった脈動下のサージ特性を計測するとともに、その非定常内部流動を明らかにした。本技術により、サージマージン拡大に結びつく流動の抽出が容易となり、コンプレッサのワイドレンジ化に寄与できると考えられる。今後も、ターボチャージャの高性能化を通してエンジン性能の向上と環境保全に貢献していきたい。

なお、本研究の試験装置は Imperial College London (英国)との共同研究にて開発されたものであり、同大学の Ricardo Martinez-Botas 教授, Maria Esperanza Medrano 博士に謝意を表す。

- *1 再循環型ケーシングトリートメント:羽根車内壁面(ケーシング)と入口管を連通し、再循環流を形成することで作動範囲を拡大するデバイス
- *2 ヘルムホルツ共鳴周波数:開口部を有する配管系において共鳴を生じる際の周波数 音速・開口部断面積・配管長さ・配管容積より算出される。

参考文献

- (1) Eckardt,D "Detailed Flow Investigations Within a High Speed Centrifugal Compressor Impeller", ASME Journal of Fluids Engineering,Vol 98,pp.390-402
- (2) Ibaraki,S.,et al.: Design and Off-Design Flow Field of Transonic Centrifugal Compressor Impeller", ASME GT2009-27791
- (3) M. E. Barrera-Medrano,2017, "The effect of exit pressure pulsation on the performance and stability limit of a turbocharger centrifugal compressor," Imperial College London.
- (4) M. E. Barrera-Medrano and R Martinez-Botas,"On the effect of engine pulsation on the performance of a centrifugal compressor", Institution of Mechanical Engineers Turbocharging Conference , London,2018
- (5) M. E. Barrera-Medrano, 2016,P. Newton, R. Martinez-Botas, S. Rajoo, I. Tomita, and S. Ibaraki,

-
- “Effect of Exit Pressure Pulsation on the Performance and Stability Limit of a Turbocharger Centrifugal Compressor,” J. Eng. Gas Turbines Power, vol. 139, no. 5, p. 052601.
- (6) M Shu and M yang, “Unsteady Responses of The Impeller of a Centrifugal Compressor Exposed to Pulsating Backpressure” ASME, GT2018-76851
- (7) Sawada, K., A convenient visualization method for identifying vortex centers, Trans. Japan Soc. for Aero.Space Sci., Vol.38 (1995), 102.