

研究報告

岩切雄二

Centrifugal Compressor with Variable Inlet Guide Vanes

Yuji Iwakiri

要 旨

自動車用小型ターボチャージャを対象に、可変入口案内翼 (Variable Inlet Guide Vane, VIGV) による入口予旋回流れがコンプレッサ性能に及ぼす影響を、実験と3次元計算流体力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 解析により明らかにした。実験に用いたVIGVは軸流式のもので、軸方向からのVIGV設定角は0, 12, 24, 36, 48, 60degの6条件である。入口予旋回を与えることにより少、中流量域の広い範囲でコンプレッサ効率が向上した。サージ流量はVIGV設定角の増加に伴い減少し、設定角0degと比較して最大で14%以上低減し

た。また、ベースのコンプレッサでは高圧力比域において旋回失速を原因とする騒音を伴う空気振動が発生するが、予旋回を与えることによりその発生を回避できた。

インペラの高効率化技術として、自由曲面翼インペラについてもCFDおよび実験による検討を行い、CFDを活用した高効率自由曲面翼インペラの設計法を確立した。CFDにより翼負荷が均等化するインペラ翼形状を決定することで、従来設計の直線線素翼と比較して約5.5point効率が低いコンプレッサの開発に成功した。

キーワード

ターボチャージャ, 遠心圧縮機, 可変入口案内翼, 予旋回, 羽根車, 計算流体力学

Abstract

The effects of pre-whirl flow generated by variable guide vanes (VIGVs) on the performance of a small centrifugal compressor has been investigated by experiments and three-dimensional CFD. The compressor efficiency and surge limit were examined experimentally. Axial-type VIGVs were employed in this study. The VIGV setting angles were 0, 12, 24, 36, 48 and 60degrees from the axial direction. The compressor efficiency was improved over a wide flow range especially under a high pressure ratio. The surge flow rate was reduced according to the increase in the VIGV setting angle. The maximum reduction rate of the surge flow rate was 14% compared to that without pre-whirl flow. By using VIGVs, the rotating stall

accompanied by noise which usually occurs under a high pressure ratio and far from the surge was removed. Moreover, the design technology for a convex blade impeller was examined which consists of convex wingspans toward the rotational direction. The convex impeller has flexibility of changing the intermediate blade angle between the hub and the shroud independently. The convex impeller was designed to have a gradual change in blade-load and have mostly equal distributions between the full blades and splitter blades by utilizing a three-dimensional CFD. Compared with the straight blade impeller, a compressor with 5.5points higher efficiency has been developed.

Keywords

Turbocharger, Centrifugal compressor, Variable inlet guide vane, Pre-whirl, Impeller, CFD

1. はじめに

自動車用ターボチャージャのコンプレッサには、エンジンの燃費向上、加速性能の向上およびエミッション低減のため、低速域で高い過給圧が得られるとともに広い流量範囲とワイドレンジの効率特性が要求される。広い流量範囲にわたるコンプレッサ効率の向上に有効なデバイスとして、可変入口案内翼（以降VIGV）がガスタービン用圧縮機等で用いられているが、小型ターボチャージャに用いられた例はまれである。本研究では軸流式のVIGVを設置したターボチャージャを試作し、実験と3次元計算流体力学（以降CFD）解析を行うことでVIGVがコンプレッサ性能およびインペラ翼間流れに及ぼす影響を明らかにした。また、インペラの高効率化技術として、翼面を構成する線素を従来の直線から回転方向に凸の曲線とした、自由曲面翼インペラについても検討を行った。

2. 可変入口案内翼（VIGV）の効果

VIGVには、空気にインペラ回転方向の予旋回を与えることでインペラ入口相対Mach数を低減するとともに入口迎え角を小さくする効果がある（Fig. 1）。Fig. 2に、供試した軸流式VIGV付コンプレッサの構造とCFD解析領域を示す。VIGVはインペラ前縁から入口径と同じ34mm上流に設置さ

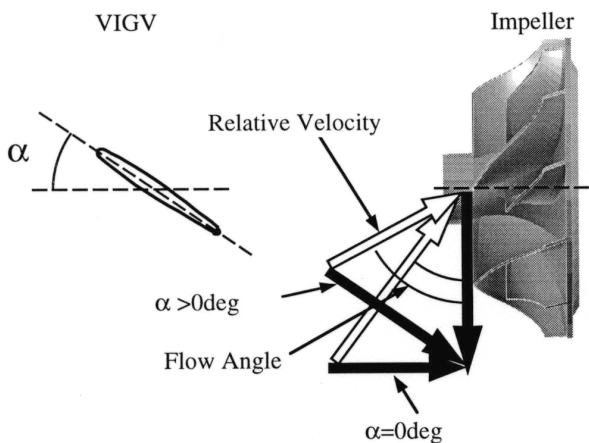


Fig. 1 Velocity triangle at impeller inlet.

れる。断面形状は翼形で、半径方向には一定のピッチ・コード比をもつ。VIGV枚数は6、インペラ翼枚数は12（半翼付）である。実験はVIGV設定角（軸方向に対する角度）を0, 12, 24, 36, 48, 60degの6種の条件で実施した。

2. 1 コンプレッサ効率

Fig. 3にVIGV設定角24degでのコンプレッサ特性を、予旋回無し（VIGV設定角0deg）のものと比較して示す。回転数、空気流量ともに最大値 N^* 、 Q^* で無次元化している。VIGV設定角24degでは少、中流量域で効率が最大約4point向上している（at $N/N^*=1.0$ ）。また、VIGV設定角0degでは高圧力比、大流量域で騒音を伴う空気振動が発生する不安定領域がある（Fig. 3網掛け領域）。これはインペラの旋回失速が原因であり、作動範囲を広くとる必要があるターボチャージャ用のコンプレッサではしばしば発生する現象で、同時に効率の低下を伴う。VIGV設定角24degではこの空気振動が発生しない。チョーク流量の減少量は最高回転数で約6%である。

Fig. 4に圧力比一定条件でのVIGV設定角と効率

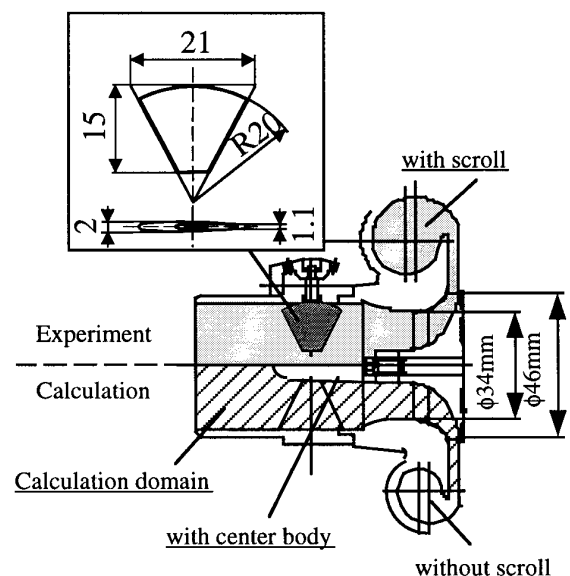


Fig. 2 Structure and calculation domain of compressor with VIGVs.

特性の関係を示す。圧力比1.5ではVIGV設定角0degに対する効率の向上はわずかであるが、圧力比2.0および2.5では少流量域から中流量域の広い範囲でそれぞれ最大1.5pointおよび3point向上している。特に少流量域の効率向上はエンジンの加速性能向上に効果的である。高圧力比側で効率向上しろが大きいのは、インペラ入口相対Mach数が

大きくなる高圧力比域ほどVIGVによるMach数低減効果が大きいためである。

実験で比較的広い流量範囲にわたり効率が向上した、VIGV設定角24degと設定角0degについてCFD解析を実施した。計算は、回転数 $N/N^* = 0.8$ 一定とし、それぞれ5つの流量条件で行った。**Fig. 5**にVIGV設定角24degの計算格子を示す。周期境界条件を用いておりスクロールは計算領域に含まない。また、圧縮性および粘性は考慮しているが、VIGVとインペラとの干渉による非定常性は考慮していない。

Fig. 6に流量 $Q/Q^* = 0.66$ におけるVIGV直後の圧力および旋回角分布を示す。VIGV設定角24degではHubに近づくほど静圧が低下しているが、全圧分布はHub付近を除いて同程度であり、設定角24degでのVIGVによる圧損は0degと同程度である。旋回角は壁面付近で大きく、それ以外の領域では約22degでほぼ一定である。この予旋回により50%Hub-Shroud間距離の位置でインペラ入口迎え角が18degから12degへ減少する。壁面付近で旋回角が大きくなるのは、壁面摩擦による減速が速度の大きい軸方向速度でより顕著なことによる。

Fig. 7はインペラ入口および出口近傍での相対Mach数分布を示している。VIGV設定角24degでは0degと比較して、入口最大相対Mach数が1.61から1.42へ約12%低下しており、出口ではHub-

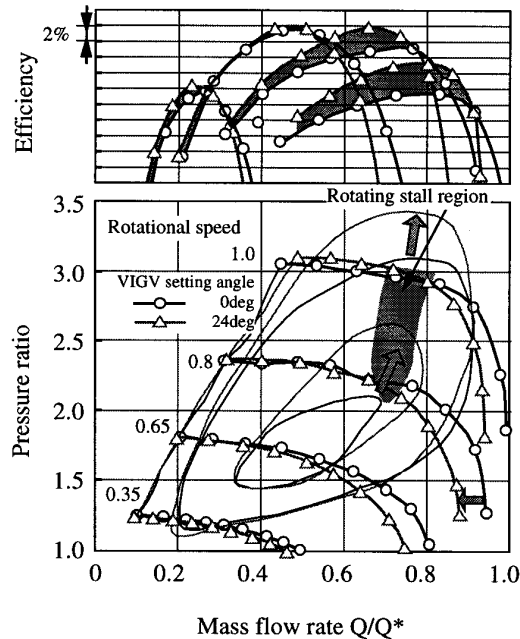


Fig. 3 Effects of VIGV setting angle on compressor characteristics.

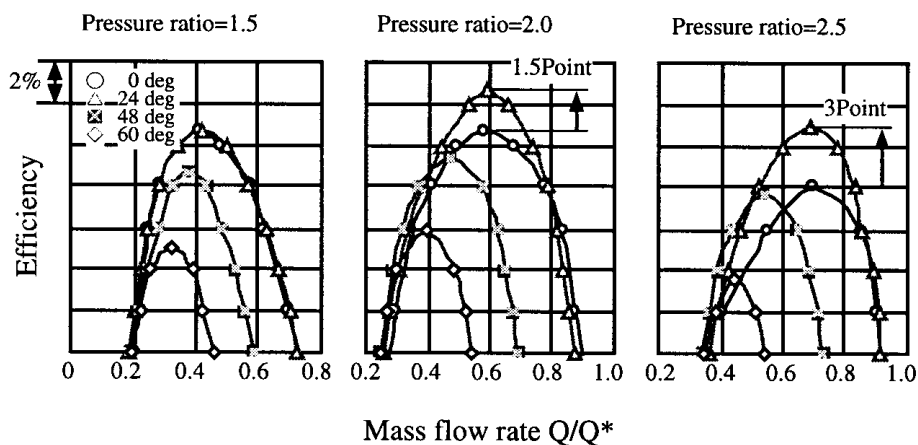


Fig. 4 Relationship between efficiency and VIGV setting angle at constant pressure ratio.

Shroud間の速度差が設定角24degの場合に比較的小さい。入口迎え角の減少に加えて、これらの効果により効率が向上しているといえる。

Fig. 8にCFDで予測した効率特性を実験結果と比較して示す。CFDではスクロールの圧損が含まれないため効率の絶対値が実験結果より高いが、予旋回を付与した場合の効率が少流量域で向上し、大流量域で低下する様子が実験結果と一致している。少流量域の効率差および大流量域での効率の逆転する位置が実験とCFD解析で少し異なるのはスクロールの圧損が原因である。

2.2 サージ特性

Fig. 9はVIGV設定角0degを基準としたサージ流量減少率を、VIGV設定角に対してプロットしたものである。圧力比1.5のデータに特異点があるが、圧力比によらずVIGV設定角を大きくするほ

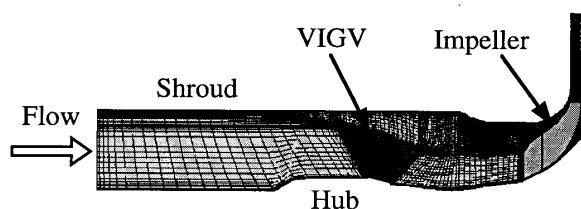


Fig. 5 Computational grid.
(VIGV setting angle = 24deg)

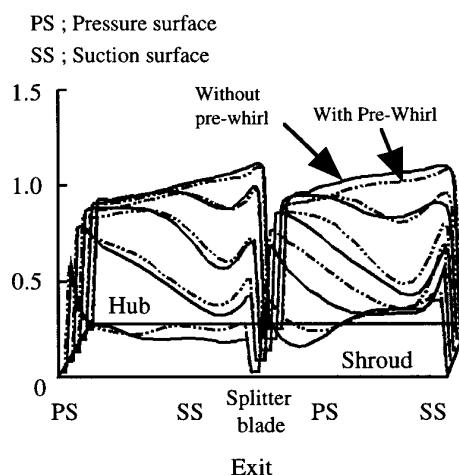
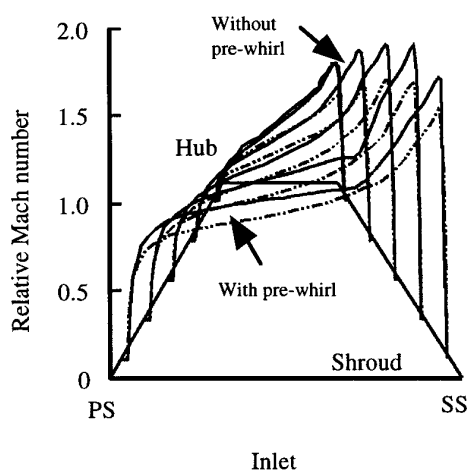


Fig. 7 Relative Mach number distributions near impeller inlet and exit.

どサージ流量が減少する傾向があるといえる。

3. 自由曲面翼インペラの開発

Fig. 10に自由曲面翼インペラの外観図を一般的な直線線素翼インペラとともに示す。直線線素翼ではHub, Shroudにおける翼角分布を決めるとそ

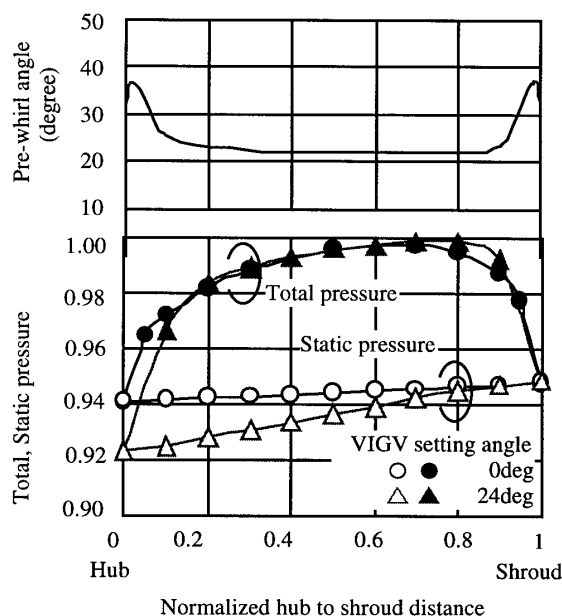


Fig. 6 Mass averaged pre-whirl angle and pressure distributions near VIGV exit.

の間の形状に自由度がないが、自由曲面翼にすることでHub-Shroud間の翼角を最適化できる。開発した自由曲面翼インペラは翼負荷の急変を避け、全翼と半翼との翼負荷分布を均等化することを設計方針とし、翼形状はCFDにより決定した。計算法はVIGVがないことを除いて前述した方法と同様である。計算条件はインペラ回転数 $N/N^* = 0.8$ における最高効率点付近である空気流量 $Q/Q^* =$ 約0.76とした。

Fig. 11にCFDによる50%Hub-Shroud間距離での

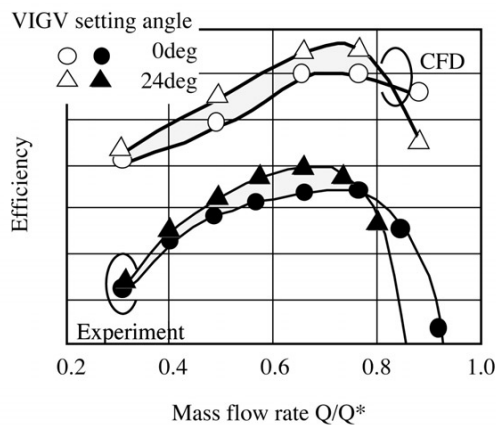


Fig. 8 Comparison of efficiency in experiment and CFD.

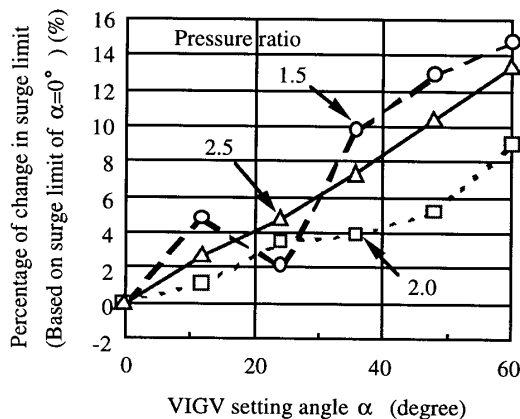


Fig. 9 Effects of VIGV setting angle on surge limit.

翼負荷分布を示す。縦軸の翼負荷は圧力面と負圧面との静圧差を大気圧で無次元化している。横軸は無次元子午面距離で0がインペラ前縁を、1が後縁を示す。直線線素翼は、全翼入口および出口で翼負荷が急変し全翼と半翼との負荷が大きく異なるのに対し、自由曲面翼インペラでは設計指針通りに比較的均等な翼負荷分布である。Fig. 12に、全翼負圧面と半翼圧力面との中央の流路における静圧分布を子午面に投影して示す。等圧線の間隔から、直線翼の入口部では、自由曲面翼と比較し

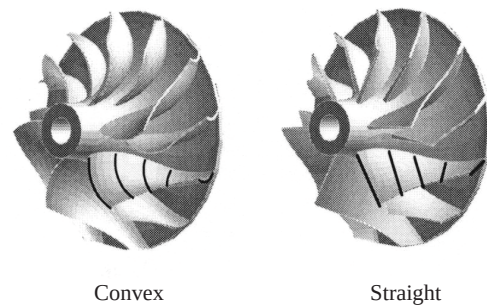


Fig. 10 Convex blade impeller and straight blade impeller.

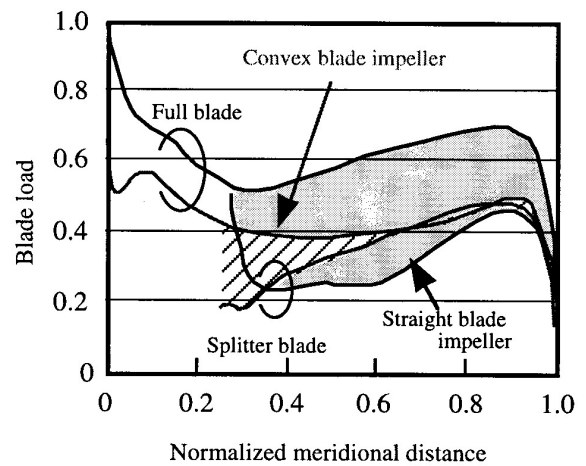


Fig. 11 Comparison of loading diagram at 50% hub to shroud distance, normalized by atmospheric pressure.

て静圧が急変していることがわかる。また、Hub-Shroud間で静圧のひずみ大きい (Fig. 12 網掛け部)。

Fig. 13にCFDによる予測効率と実験による効率を比較して示す。CFDではスクロールが考慮されないため絶対値が高く計算されるが、自由曲面翼インペラの効率が直線線素翼インペラのものより高く予測されており、実験結果と一致している。効率差はCFDで2.5point, 実験では約5.5pointである。翼負荷分布を翼角分布の設計にフィードバック

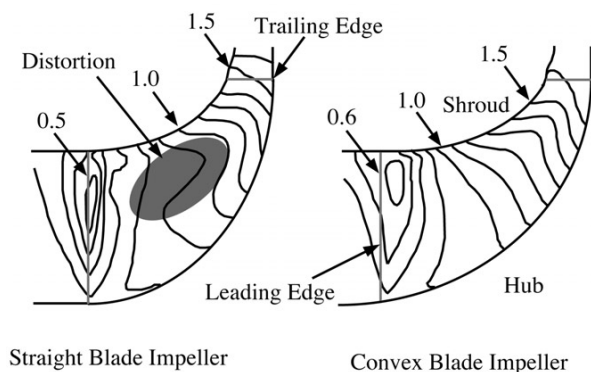


Fig. 12 Distribution of static pressure.

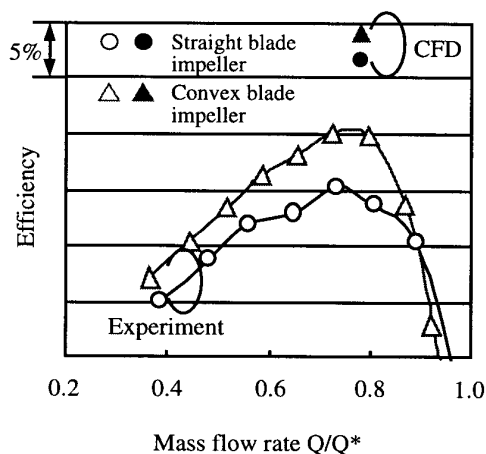


Fig. 13 Comparison of efficiency in experiment and CFD.

クすることにより3, 4回のCFDを繰り返せば、ほぼ最適な翼形状を決定することが可能である。

4. まとめ

可変入口案内翼による予旋回流れがコンプレッサ性能に及ぼす影響を実験および3次元CFDにより明らかにするとともに、高効率自由曲面翼インペラの設計法を確立した。

(1) 入口予旋回を与えることにより少, 中流量域のコンプレッサ効率が向上する。高圧力比域ほど効果が大きく, 圧力比2.5で最大3point向上した。

(2) 予旋回流れが強いほどサージ流量が低減する。また, VIGV設定角を24deg以上にするにより, 予旋回を与えない場合に発生する空気振動を回避できる。

(3) CFDにより, VIGVによる予旋回が効率およびインペラ内流れに与える影響を明らかにした。また, 効率特性の予測も実験結果とよく一致した。

CFDを活用することで翼負荷の急激な変化を無くし, 全翼と半翼との翼負荷分布を均等化した高効率自由曲面翼インペラの設計法を確立した。実験により従来のインペラと比較してコンプレッサ効率が5.5point向上することを実証した。

参考文献

- 1) Ishino M., et al. : "Effects of Variable Inlet Guide Vanes on Small Centrifugal Compressor Performance", ASME Pap., 99-GT-157, (1999)
- 2) 岩切雄二, 内田博 : 第35回日本航空宇宙学会中部・関西支部合同秋季大会講演集, (1998), 19~20
- 3) Whitfield, A., Abdullah, A.H. : "The Performance of a Centrifugal Compressor with High Inlet Preshirl", ASME Pap., 97-GT-182, (1997)

(2000年4月18日原稿受付)

著者略歴



岩切雄二 Yuji Iwakiri

生年：1968年。

所属：エンジン機能制御研究室。

分野：ターボチャージャ内流れの数値解析。

学会等：日本機械学会会員。