

法政大学学術機関リポジトリ

HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2025-07-01

吹込み法による遠心圧縮機のサージング制御 ：吹込みノズルの構造の影響

橋本, 凧央 / HASHIMOTO, Nagio

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院理工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. 理工学研究科編

(巻 / Volume)

64

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

5

(発行年 / Year)

2023-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00026309>

吹込み法による遠心圧縮機のサージング制御 —吹込みノズルの構造の影響—

NOZZLE INJECTION SYSTEM ON CONTROLLING SURGING IN CENTRIFUGAL COMPRESSOR
—INFLUENCE OF INJECTION NOZZLE STRUCTURE—

橋本 風央

Nagio HASHIMOTO

指導教員 辻田 星歩

法政大学大学院理工学研究科機械工学専攻修士課程

Centrifugal compressor, which is the main component of turbocharger, is known to suffer the instability phenomena such as surge at low flow rate conditions. The nozzle injection system is an effective method to suppress the instability phenomena. In this system, a part of the air compressed by the compressor is bled from the scroll outlet and injected into the impeller inlet by the nozzle installed on the inner wall of suction pipe. The conventional type of injection nozzle is composed of the circular pipe which may locally obstacle the main flow in the suction pipe. In this study, the wall jet type of injection nozzle whose discharge port was located on the inner wall surface of suction pipe was investigated to reveal its effectiveness on the surge suppression. The present results indicated the importance of the injection to the tip of leading edge and the axial momentum of jet.

Key Words : Turbocharger, Surge, Centrifugal Compressor, Instability Phenomenon, Nozzle Injection

1. 緒論

大気汚染や温暖化などの環境問題が年々深刻化しており、世界各国で自動車の排出ガス規制や燃費規制などの取り組みが行われている。その具体的な対応策の一つとしてエンジンのダウンサイジングが挙げられるが、エンジンの出力を低下させてしまうため、ターボチャージャなどを搭載することによりその低下を補う必要がある。このため、ターボチャージャの需要は世界的に増加しており、その性能向上が強く望まれている。ターボチャージャの主要構成要素である遠心圧縮機は、低流量域で作動させると旋回失速やサージングなどの不安定現象が発生し、性能の低下と共に機器の破損に繋がる可能性があるため、作動範囲が制限されてしまう。それらの不安定現象を抑制する方法の一つに、圧縮した空気の一部をスクロール出口付近から抽気し、羽根車翼前縁に再循環させてノズルで吹き込む吹込み法があり、その効果を調査する研究が行われてきている[1]~[4]。

これまでの吹込み法の研究では、主に吹込みノズルの先端が吸込み管内壁から突起する円形パイプを用いたノズル(旧型ノズルと呼ぶ)が用いられており、サージングを効果的に抑制できる最適吹込み位置が、周方向にはスクロール舌部から最も離れた位置周辺に、軸方向には羽

根車翼前縁付近に存在しており、それらの位置は羽根車回転数に依存しないことが明らかにされている。また、旧型ノズルは比較的高いサージング抑制能力を有することが確認されているが、ノズル先端が吸込み管内壁面から突出しているため流れの障害物となりうる。本研究では吸込み管内壁面上に開口端を有する壁面噴射型の新型ノズルを提案し、それを用いた性能試験を実施した。また、その結果を旧型ノズルの結果[1]と比較することにより、吹込みノズルの構造が不安定現象の抑制に与える影響を調査した。

2. 実験装置

本研究で使用した実験装置の概要図を Fig.1 に示す。本実験で使用した吹込み装置では、遠心圧縮機で圧縮された空気の一部がスクロール出口に設けられた抽気孔から取り出され、流量センサとバイパスチューブを経て羽根車翼前縁に吹き込まれる。残りの空気は吐出し管と絞り弁を通過し大気へ放出される。遠心羽根車の仕様を Table 1 に示す。羽根車は長翼 6 枚、短翼 6 枚の後方湾曲型である。Fig.2 に示すようにディフューザ Hub 側壁面上には入口側と出口側に、スクロール舌部を基準に周方向に 45 deg. 間隔でそれぞれ 8 点の静圧測定孔を設けた。

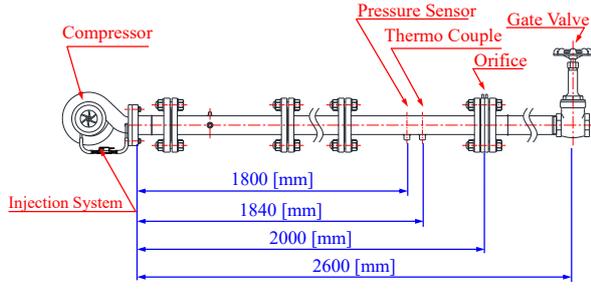


Fig.1 Experimental apparatus

Table 1 Specifications of impeller

Parameter	Symbol	Unit	Value
Inlet diameter	D_1	mm	43.8
Outlet diameter	D_2	mm	56.0
Number of blades	Z	-	6+6
Outlet blade angle	β_2	deg.	40.0

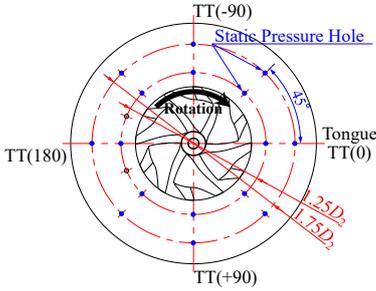


Fig.2 Static pressure taps on hub side wall of diffuser

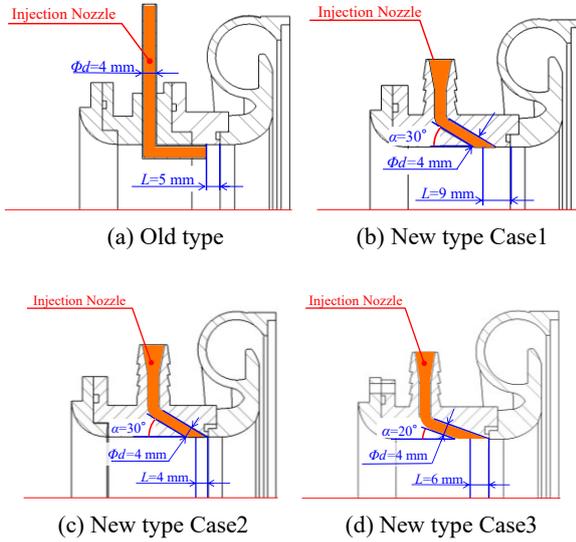


Fig.3 Nozzle injection system

本研究の対象とした 2 種類の吹込みノズルの構造を Fig.3 に示す. Fig.3(a) に示す円形パイプ型の旧型ノズルは、開口部側直管が吸込み管内壁面上から突起した状態で管軸方向に設置されている. 本研究で提案する 3 種類の新型ノズルは、Fig.3(b)~(d) に示すようにいずれも壁面噴射型で、開口部が吸込み管内壁面上に存在する構造となっている. Case1 から Case3 の新型ノズルの違いは、ノズル開口部側直管軸と吸込み管軸のなす角である噴射角 α と

ノズル開口部断面中心と羽根車翼前縁までの距離 L であり、Case1 では噴射角 $\alpha=30$ deg. で $L=9$ mm, Case2 では $\alpha=30$ deg. で $L=4$ mm, および Case3 では $\alpha=20$ deg. で $L=6$ mm に設定されている.

3. 実験方法および実験条件

性能試験においては、羽根車の修正回転数を 60 krpm に設定し、吐出し管下流に設置された絞り弁を全開状態から閉じていき、サージングが発生するまで測定を行った. 本研究ではサージングが発生した弁開度から絞り弁の最小分解能である 1/32 回転手前の弁開度における流量を、サージング発生限界流量 Q_{smin} として定義した. Fig.2 に示す周方向座標 TT は、スクロール舌部を基準位置 TT(0) とし、羽根車回転方向に a [deg.] 移動した位置を TT(+ a), 逆方向に b [deg.] 移動した位置を TT(- b) として定義した. 吹込みを行った周方向位置は TT(0), TT(+90), TT(180) の 3 種類である. 吹込みを行わない場合を Normal, 吹込みを行う場合を Injection と呼ぶ.

4. 結果および考察

(1) 性能特性

Fig.4 に性能特性を示す. 縦軸が圧力比 π , 横軸が修正質量流量 Q であり、それぞれ式(1)と式(2)で定義される.

$$\pi_r = \frac{P_t}{P_{t1}} \quad [-] \quad (1)$$

$$Q = Q_0 \left(\frac{P_{a0}}{P_a} \right) \sqrt{\frac{T_1}{T_0}} \quad [\text{kg/s}] \quad (2)$$

ここで、 P_t は圧縮機出口全圧、 P_{t1} は圧縮機入口全圧、 Q_0 は質量流量、 P_a は大気圧、 P_{a0} は標準大気圧、 T_1 および T_0 はそれぞれ大気温度と標準大気温度である. 本試験装置は出口絞りであり、吸込み管が短いことから $P_{t1}=P_a$ とした. また、本論文の Fig.4~Fig.10 の各図中のシンボルと吹込み条件の対応を Table 2 に示す. Fig.5 にサージマージン改善率 I_R を示す. 縦軸は I_R , 横軸は吹込み条件を表している. I_R は吹込みによるサージング発生限界流量 Q_{smin} の低下量を評価する指標であり、式(3)で定義した.

$$I_R = \frac{(Q_{NS} - Q_{smin})}{Q_{NS}} \times 100 \quad [\%] \quad (3)$$

ここで、 Q_{NS} は Normal でのサージング発生限界流量である.

Fig.4 より、吹込みにより圧力比 π_r が低下する傾向が見られるが、旧型ノズルに比べて新型ノズルの方がその傾向が抑制されており、ノズル部の構造が吹込みによる性能低下に影響を与えていることが分かる. また、最高圧力比を示す流量とともにサージング発生限界流量 Q_{smin} が吹込みにより低流量側へ移動しているが、その低下量に比例して大きくなる I_R が、Fig.5 に示すように旧型ノズルの

方が大きくなっている。また、新型ノズル間で比較すると、Case2 が最も圧力比 π_t の低下は大きく、 I_R は高い値を示している。以上の結果から、吹込みによる圧力比 π_t の低下とサージマージン改善率 I_R の間には相関関係があるといえる。吸込み管内壁面近傍での羽根車翼前縁への回転軸方向の吹込みは、羽根車翼前縁翼端部付近の入射角を低下させる方向に作用するため、同位置付近の負荷が低下し、その結果圧力比 π_t の低下に繋がると考えられる。羽根車翼前縁翼端部付近での噴流の軸方向成分はノズルの開口部での角度や形状を考慮すると旧型ノズルの方が新型ノズルよりも大きくなると推測できるため、圧力比の低下量はノズル形状に依存すると考えられる。また、噴射角 α が同じ Case1 と Case2 の比較では、ノズルからの噴流の拡散を考慮すると、 L の短い Case2 の方が、羽根車翼前縁翼端部付近に流入する噴流の軸方向成分が大きいと考えられる。さらに噴射角 α が異なる Case2 と Case3 を比較すると、Case3 の方が α が小さいため、噴流が羽根車翼前縁に衝突する位置の、吸込み管内壁面からの半径方

向の距離が短い。しかし、Case3 の方がノズル管軸と羽根車翼前縁の軸方向距離 L が長く、またノズル開口部面積が拡大していることから、Case3 の方が拡散が促進され羽根車翼前縁翼端部に流入する噴流の軸方向成分が低下していると予想される。

以上の結果から、サージ発生限界流量を低流量化させるには、ノズルからの噴流を羽根車翼前縁翼端部付近に集中させることが重要であるが、それは圧力比の低下を招く可能性があるため、このトレードオフの関係を最適化することが重要と考えられる。

つぎに、Fig.5 において、高いサージマージン改善率 I_R が得られる周方向の最適吹込み位置に着目すると、旧型ノズルでは TT(180) であるのに対し、新型ノズルでは TT(+90) 付近に見られる。この原因は I_R が全体的に新型ノズルの方が低下しており 10% 以下の低い値を示していることから、最適吹込み位置が顕著に現れなくなったためと考えられる。しかし、全ての新型ノズルで定性的に同様の傾向を示していることから、周方向最適吹込み位置はノズル形状に依存する可能性も示唆している。

(2) 吹込み流量

各吹込み条件に対する、修正質量流量 Q と吹込み流量 Q_{RB} の関係を Fig.6、 Q と式(4)で定義される吹込み流量の循環率 π_R の関係を Fig.7 に示す。

$$\pi_R = \frac{Q_{RB}}{Q} \quad [\%] \quad (4)$$

また、Fig.8 には Q と式(5)で定義される吹込み噴流の運動量の軸方向成分 M_Z の関係を示す。

$$M_Z = \frac{(Q_{RB})^2}{\rho \times \frac{\pi}{4} d^3} \times \cos \alpha \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}] \quad (5)$$

ここで、 ρ は圧縮機出口密度、 d はノズル内径である。

Fig.6 より、吹込み流量 Q_{RB} はノズル形状に強く依存していることが分かる。また、Fig.4 から旧型と新型の各ノズルにおいて実験条件間で比較すると、圧力比 π_t と吹込み流量 Q_{RB} のそれぞれの大小関係がおおよそ一致している。したがって、吹込み流量は圧力比にも依存するが、その依存度はノズル形状に比べると低いといえる。なお、旧型ノズルの方が Q_{RB} が低くなる主な原因は、Fig.3 に示すようにノズル出口側の直管部分とその上流側の直管との接合部の転向角度の違いによる圧力損失の増加であると考えられる。

つぎに Fig.5 に示すサージマージン改善率 I_R と Fig.7 の循環率 π_R を比較すると、旧型ノズルでは π_R の増加と共に I_R も増加していることが分かる。一方、新型ノズル間で π_R を比較すると、 I_R が高い方が π_R がわずかに低くなっている。しかし旧型ノズルと新型ノズルで π_R を比較すると、 I_R の高い旧型ノズルの方が π_R は低くなっている。さらに Fig.8 において噴流の運動量の軸方向成分 M_Z を旧型ノズ

Table 2 Symbols and experimental condition

		Injection		
		TT(0)	TT(+90)	TT(180)
Old type		○	□	*
New type	Case1	○	□	*
	Case2	○	□	*
	Case3	○	□	*
Normal		●		

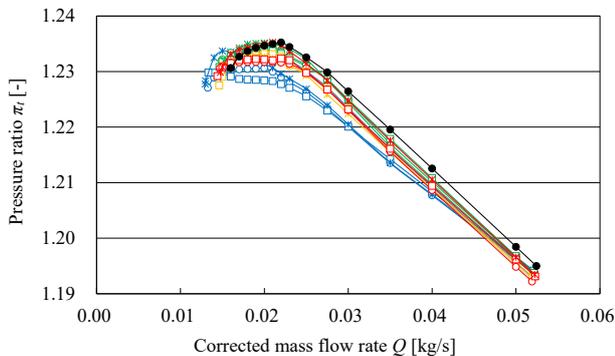


Fig.4 Performance characteristics

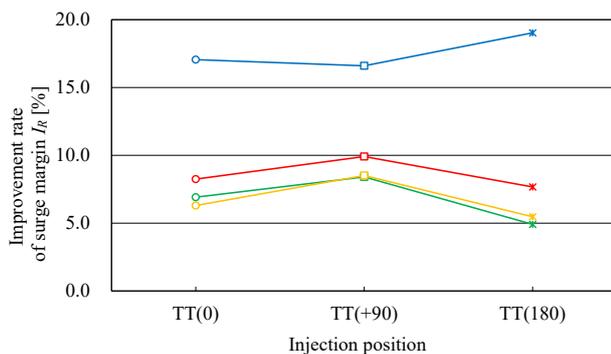


Fig.5 Improvement rate of surge margin

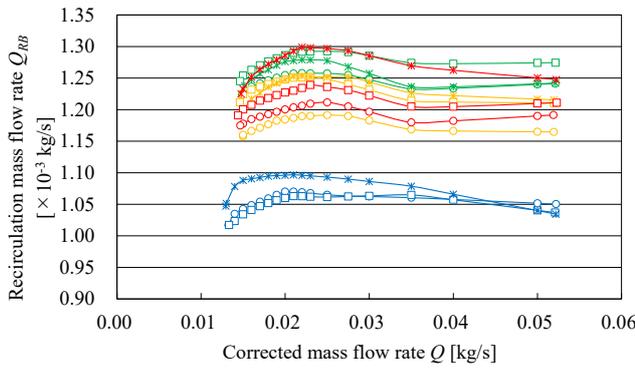


Fig.6 Recirculation mass flow rate

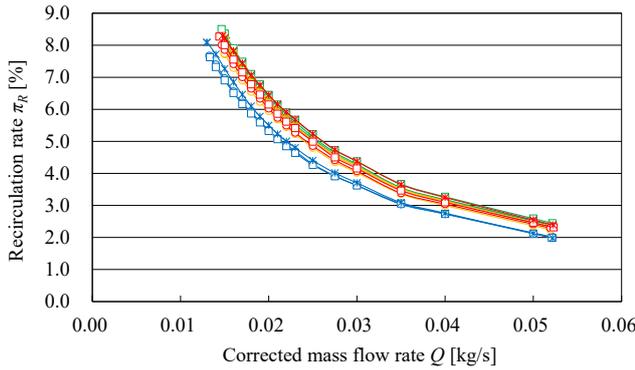


Fig.7 Recirculation rate of injection flow

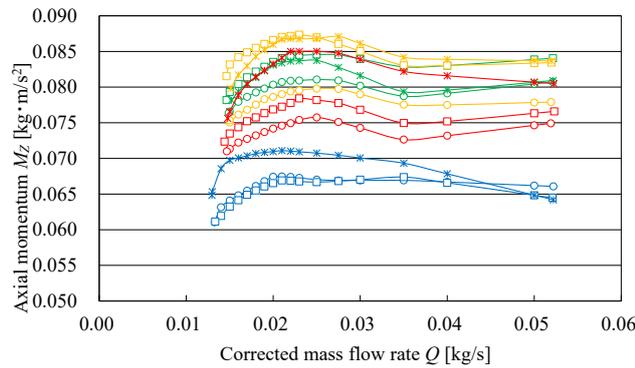


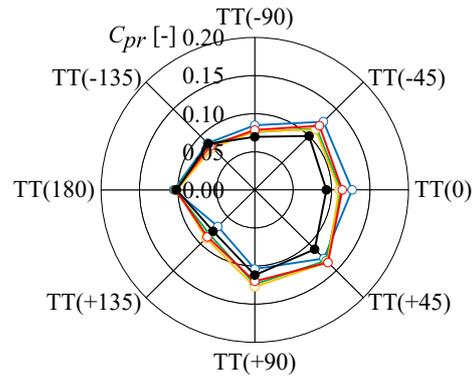
Fig.8 Axial momentum of injection flow

ルと新型ノズルの間で比較すると、 I_R の高い旧型ノズルの方が M_z は低くなっている。これは M_z が大きくても吹込み噴流が入射する羽根車翼前縁の半径方向位置が吸込み管内壁面から離れると、 I_R の向上に対する効果が低下することを裏付けている。

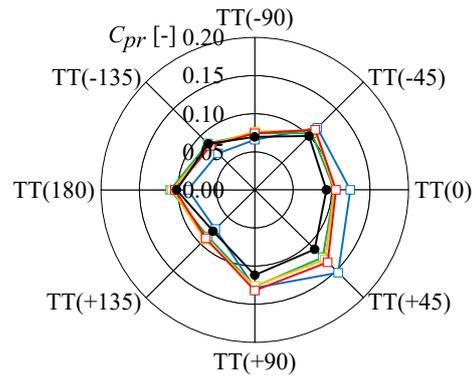
以上の結果を総合的に評価すると、羽根車翼前縁翼端部付近で軸方向の運動量の大きい吹込み噴流を形成することにより、サージマージン改善率 I_R が向上すると考えられる。流量の低下と共に羽根車翼前縁シュラウドケーシング上で成長するはく離渦が、不安定現象発生の引き金になることから[5]、吹込み法ではノズルからの噴流がこのはく離渦の成長に影響を及ぼすことにより、不安定現象を抑制している可能性があることを示唆している。

(3) ディフューザ壁面静圧

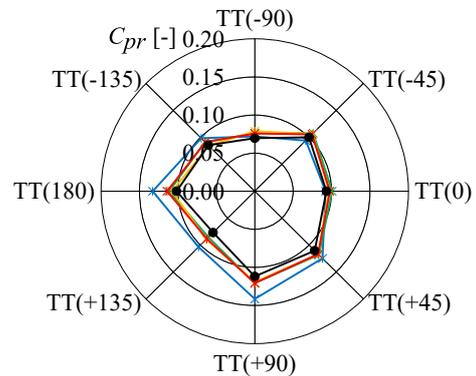
Fig.9 に Normal のサージング発生限界流量 Q_{NS} と同流



(a) Injection TT(0)



(b) Injection TT(+90)



(c) Injection TT(180)

Fig.9 Pressure recovery coefficient

量での、各ノズルに対するディフューザ Hub 壁面上の圧力回復係数 C_{pr} の吹込み位置に対する周方向分布を示す。半径軸が圧力回復係数 C_{pr} 、円周軸が周方向座標 TT である。また、 C_{pr} は式(6)で定義される。

$$C_{pr} = \frac{(P_{s4} - P_{s3})}{\frac{\rho u_2^2}{2}} \quad [-] \quad (6)$$

ここで P_{s3} と P_{s4} はそれぞれディフューザ Hub 壁面上の入口静圧と出口静圧、 u_2 は羽根車出口周速である。Fig.10 に Normal のサージング発生限界流量 Q_{NS} と同流量での各ノズルに対するディフューザ入口および出口静圧比の周方向分布を示す。縦軸は静圧比 P_{s3}/P_a と P_{s4}/P_a 、横軸は周方向座標 TT である。

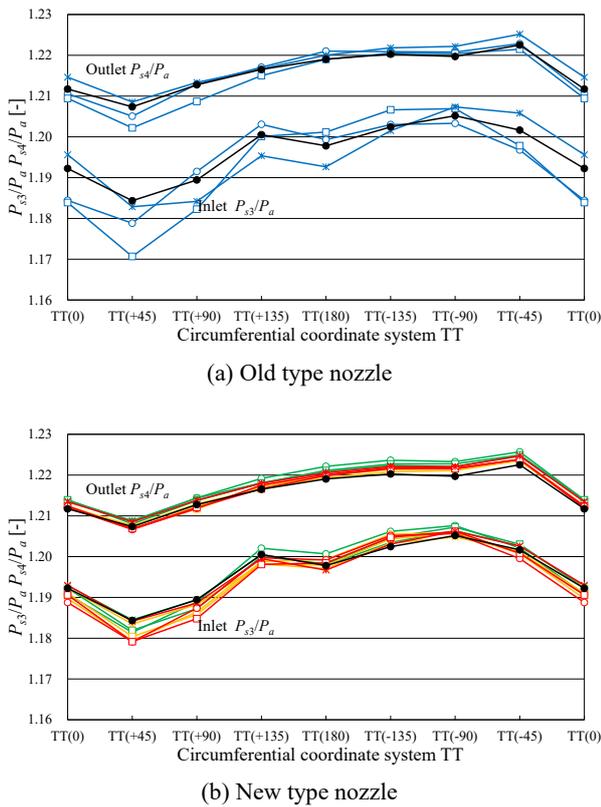


Fig.10 Static pressure distribution on hub side wall of diffuser

Fig.9において旧型ノズルとNormal間で C_{pr} の分布を比較すると、吹込みにより吹込み位置付近の C_{pr} が増加する傾向を示している。しかしこの傾向は新型ノズルとNormal間の比較では低下している。これらの現象はFig.5に示したサージマージン改善率 I_R に対する旧型ノズルと新型ノズルの傾向と一致していることから、Normalに対する吹込みによる C_{pr} の増加量が I_R に与える影響は大きいと考えられる。

Fig.10において、吹込みが出口静圧比 P_{s4}/P_a と入口静圧比 P_{s3}/P_a の周方向の分布に与える影響を比較すると、後者の方が大きい。したがって、吹込みによる影響はディフューザ出口付近まではほとんど及ばないと考えられ、これは顧ら[4]の結果と一致している。入口静圧比 P_{s3}/P_a に着目すると、サージマージン改善率 I_R が比較的高い旧型ノズルでは、Normalに比べて吹込み位置付近を中心に減少する傾向が確認できるが、 I_R が低い新型ノズルではその傾向はほとんど特定できない。したがって、Fig.9で見ら

れた吹込み位置付近での C_{pr} の増加は、ディフューザ入口静圧比 P_{s3}/P_a の吹込みによる吹込み位置付近でのNormalに対する減少によるものであり、その減少量とサージマージン改善率 I_R の間には因果関係があるといえる。この因果関係を引き起こす現象のメカニズムについては今後更なる調査が必要である。

5. 結論

本研究により以下の結論を得た。

1. 新型ノズルのサージマージン改善効果は旧型ノズルより低下した。
2. 吹込み法によりサージマージンを増加させるには、ノズルからの噴流を羽根車翼前縁翼端部付近に集中させ、その速度または運動量の軸方向成分を増加させることが重要であるが、それは同時に圧力比の低下を招く可能性がある。
3. 吹込みによる吹込み位置付近でのディフューザ圧力回復係数の増加は、ディフューザ入口静圧の低下によるものであり、その低下量とサージマージン改善効果の間には因果関係が存在する。

参考文献

- 1) 平本光, 橋本風央, 辻田星歩, 馬場隆弘, 米村淳: 吹込みノズル装置による遠心圧縮機のサージングの抑制 - 高速回転域での吹込みの効果 -, 日本機械学会関東支部第28期総会・講演会講演論文集, 15I21, 2022.
- 2) 内田孝宣, 辻田星歩, 平野利幸: 吹込みによる遠心圧縮機のサージングの抑制 - 最適吹込み位置の圧縮機の依存性について -, 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集, 2010.
- 3) 宮正明, 平野利幸, 辻田星歩: 吹込みノズル形状が遠心圧縮機の性能へ及ぼす影響, ターボ機械第41巻第2号, 2013.
- 4) 顧茸蕾, 池田秀一, 谷田浩祐, 小松原慎治, 辻田星歩, 水木新平: 羽根車への吹込みが遠心圧縮機の性能へ及ぼす影響, 日本機械学会関東支部第13期総会・講演会講演論文集, 351, 2007.
- 5) Hanzhi Zhang, Ce yang, Wenli Wang, Changmao Yang, Yanzhao Li: Experimental Investigation of the Pre-Stall and Stall Evolution in a Centrifugal Compressor With a Volute, Journal of Turbomachinery, Vol.144/081012-1, 2022.