

吹込みによる小型遠心圧縮機のサージング抑制効果：高圧力比での効果の検証

TAGUCHI, Koichi / 田口, 幸一

(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)

65

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

5

(発行年 / Year)

2024-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00030634>

吹込みによる小型遠心圧縮機のサージ抑制効果 -高圧力比での効果の検証-

EFFECTS OF NOZZLE INJECTION SYSTEM ON SURGE SUPPRESSION IN SMALL CENTRIFUGAL COMPRESSOR -VERIFICATION OF EFFECTIVENESS AT HIGH PRESSURE RATIO-

田口幸一

Koichi TAGUCHI

指導教員 辻田星歩 教授

法政大学大学院理工学研究科機械工学専攻修士課程

The nozzle injection system, which bleeds compressed air from the exit of scroll and injects it into the leading edge at the blade tip of impeller through a nozzle attached on the inner wall of the suction pipe, has been demonstrated to be effective on surge suppression up to about 1.4 of pressure ratio. In this study, the nozzle injection system was installed in a small centrifugal compressor to verify its effectiveness on the surge suppression at about 1.6 of pressure ratio, which is closer to the actual operating conditions. Moreover, the influences of the injection nozzle diameter and the circumferential injection position on the surge suppression were also investigated.

Key Words : Turbocharger, Centrifugal Compressor, Nozzle Injection System, Surge

1. 結論

地球環境保護を目的とした自動車の排出ガスや燃費などに関する法規制が厳しくなる中、自動車メーカーはその対策の一つとして内燃機関のダウンサイジングに取り組んでいる。その際に、エンジンの排気量やシリンダ数が減少しても従来の性能を維持しさらに向上を図るために、ターボチャージャを搭載する例が増えてきている。そのため、ターボチャージャの需要は世界的に高まっており、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の一つである遠心圧縮機は、流量を最高圧力比より低下させていくと旋回失速やサージなどの不安定現象が発生するため、安定作動範囲が制限される。旋回失速は羽根車入口やディフューザ内において局所的な失速領域が発生し、その失速領域が周方向に伝播する現象であり、周方向の圧力変動が軸振動や翼振動を引き起こす。一方、サージは圧縮機内部を通過する作動流体が順流と逆流を繰り返すことにより圧力が激しく変動し、圧縮機やその配管系全体に激しい振動や騒音を発生させる現象であり、その振動が圧縮機の性能低下や周辺機器を含む系全体の破損を招く恐れがある。そのため、これらの不安定現象の抑制は不可欠であり、数多くの研究が行われている。不安定現象の抑制方法の一つとして、圧縮機で圧縮された空気の一部を再循環させて吸込み管内

壁に装着したノズルから羽根車翼前縁に吹き込む、吹込み法が提案されており、圧力比が1.4程度まではそのサージ抑制に対する効果が確認されている[1]。さらに、抑制に最も効果的な遠心圧縮機の回転軸に対する周方向の吹込み位置は、スクロール舌部から最も離れた位置に存在することが報告されている[2]。また、抑制効果を高めるには吹込みノズルからの噴流を羽根車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ことなどが報告されている[3]。しかし、これらの効果は比較的低い圧力比1.4程度までの運転状態において確認されるに留まっている。したがって、吹込み法の実用化のためには、より実機運転状態に近いより圧力比の高い条件下において吹込み法の有効性を検証することが要求される。

本研究では、小型の遠心圧縮機を対象に吹込み法を適用し、より実機運転状態に近い圧力比1.6付近でのサージ抑制効果を検証した。また、同時に吹込みノズルの内径および周方向の吹込み位置が、抑制効果に与える影響について調査を行った。

2. 実験装置

本研究で使用した遠心圧縮機の仕様を **Table 1** に、実験

装置の全体の概要を Fig.1 に示す. 遠心圧縮機により圧縮された空気の一部はスクロール出口付近にある抽気孔より抽気され, バイパスチューブを介して羽根車翼前縁へとノズルにより吹き込まれ, 残りは吐出し管および絞り弁を経て大気へと放出される. 本研究で使用した吹込み装置を Fig.2 に示す. 円形パイプの吹込みノズルが吸込み管内壁面上に管軸と平行に設置されている. 本研究で対象としたノズルの内径 d_N は 3 mm と 4 mm の二種類であり, 肉厚は共に 0.5 mm である. また, その開口端は羽根車翼前縁から軸方向に 5 mm 上流側の位置に設定した. 吹込み流量は抽気孔とバイパスチューブとの間に装着した流量センサにより測定した.

3. 実験方法

遠心圧縮機の性能試験は, 最高圧力比 1.6 程度を達成するために羽根車修正回転数を 120 krpm に設定した. 流量は吐出し管下流に設置された絞り弁で調節し, 実験は絞り弁を全開状態から閉じていき流量を低下させる方法でサージングが発生するまで行った. また, 本研究ではサージングが発生した弁開度から, 絞り弁の弁開度の最小分解能となる 1/32 回転分だけ戻した状態での流量をサージング発生限界流量 Q_{SM} と定義した. また, 羽根車回転軸に対するノズルの周方向の装着位置を規定する周方向座標 TT を Fig.3 に示す. TT はスクロール舌部を基準位置 TT(0), 舌部から最も離れた位置を TT(180) とし, 羽根車回転方向に a° 移動した位置を TT(+ a), 逆方向に b° 移動した位置を TT(- b) と定義した. また, 本研究では常に吹込みノズルは装着した状態で性能試験を行っており, サージング抑制効果を評価する際には, 同一ノズル内径に対して TT(0) を基準とした吹込まない場合(以下, N-Inj)と, 同一 TT に装着した吹込みノズルに対して, N-Inj を基準として吹込んだ場合(以下, Inj)の結果を比較検討した.

Table 1 Specifications of impeller

Inlet diameter	D_1	[mm]	31.1
Outlet diameter	D_2	[mm]	46.0
Number of blades	Z	[-]	5+5
Inlet blade height	b_1	[mm]	10.04
Outlet blade height	b_2	[mm]	3.85

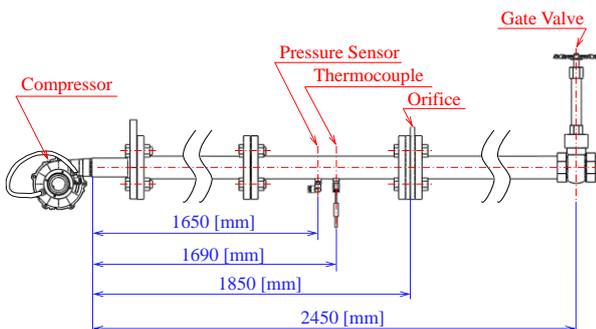


Fig.1 Experimental apparatus

4. 結果および考察

(1) 性能特性

Fig.4(a)に N-Inj の性能特性を, Fig.4(b)に N-Inj に Inj の性能特性を重ねて示す. 縦軸および横軸は, それぞれ式(1)と式(2)で定義される圧力比 π_t と修正質量流量 Q である. また, 同図には赤枠で示す低流量域での拡大図も示す.

Fig.5 には N-Inj の場合の, 吹込みノズルの装着位置 TT と TT(0)を基準としたサージマージン改善率 $I_{R-N-Inj}$ の関係を示す. $I_{R-N-Inj}$ は吹込みノズルの装着のみに起因する Q_{SM} の低流量化の尺度となるパラメータであり, 式(3)で定義される.

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

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

$$I_{R-N-Inj} = \frac{Q_{SM-N-Inj-TT(0)} - Q_{SM-N-Inj}}{Q_{SM-N-Inj-TT(0)}} \times 100 \quad [\%] \quad (3)$$

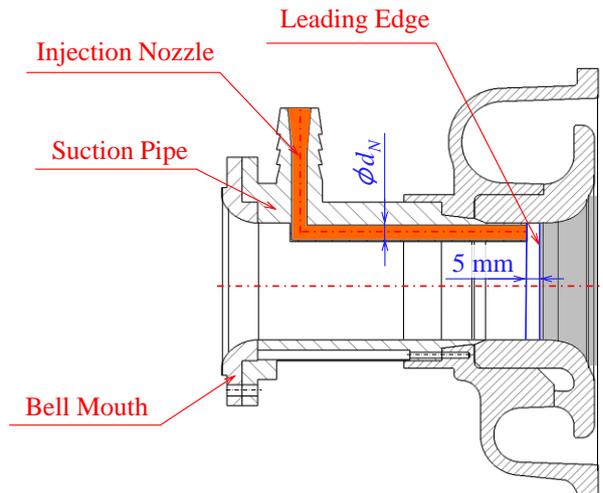


Fig.2 Nozzle injection system

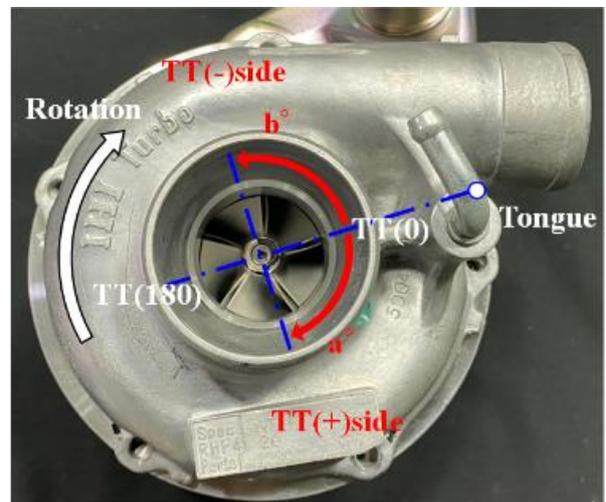


Fig.3 Definition of circumferential coordinates TT

Table 2 Symbols corresponding to experimental condition

Nozzle Diameter d_N	Injection Type	TT(0)	TT(+90)	TT(180)	TT(-90)
3 [mm]	N-Inj	●	●	●	●
	Inj	○	○	○	○
4 [mm]	N-Inj	▲	▲	▲	▲
	Inj	△	△	△	△

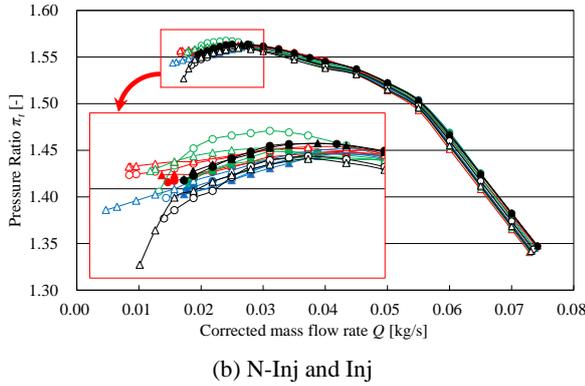
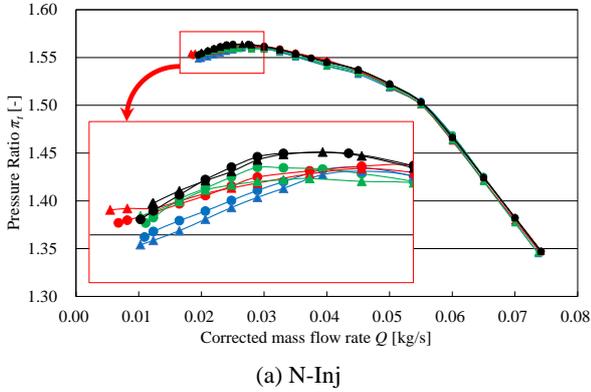


Fig.4 Performance characteristics

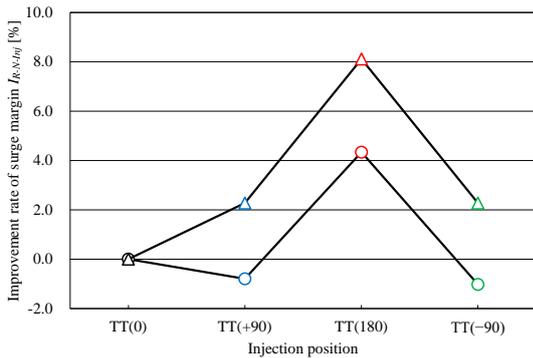


Fig.5 Improvement rate of surge margin

ここで、 P_{t1} は圧縮機入口全圧、 P_{t2} は圧縮機出口全圧、 Q_0 は質量流量、 P_a は大気圧、 P_{a0} は標準大気圧、 T_1 は大気温度、 T_0 は標準大気温度、 $Q_{SM-N-Inj}$ はN-Injの Q_{SM} 、 $Q_{SM-N-Inj-TT(0)}$ はN-InjのTT(0)の場合の Q_{SM} 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。各性能曲線における最大流量は弁開度が全開時の流量、最小流量はサージング発生限界流量 Q_{SM} である。また、

図中のシンボルと実験条件との対応は Table 2 に示すとおりである。

吹込みノズルを装着し吹込みを行わない N-Inj に着目すると Fig.4(a)から、性能曲線の分布については TT に対する依存性は確認できるが、それに比べてノズル内径 d_N に対する依存性は低いことが分かる。一方、サージング発生限界流量 Q_{SM} については、TT(180)において他の TT に比べて顕著な低流量化が確認でき、さらにノズル内径の大きい $d_N = 4 \text{ mm}$ の低下量の方が大きくなっている。この傾向は Fig.5 に示す吹込みノズルの装着に起因する TT(0)基準のサージマージン改善率 $I_{R-N-Inj}$ と TT の関係に明確に表れている。 $I_{R-N-Inj}$ の TT への依存傾向については、TT(180)で最大値を示し、そこからの TT の増減に対して対称な分布を示している。またその分布をほぼ維持した状態でノズル内径 d_N の増加により増加している。この結果は、吸込み管内壁面の舌部の対向位置の TT(180)の位置に障害物を装着すると、そのブロッケージ効果により Q_{SM} を低流量化でき、サージマージン改善率 $I_{R-N-Inj}$ が向上することを示唆しているものと考えられる。つぎに Fig.4(b)において Q_{SM} に着目して Inj の結果を N-Inj と比較すると、全ての TT に対して Injの方が低流量化しており、吸込みノズルの装着に加えて吹込みを行うことにより Q_{SM} が更に低流量化できることが分かる。吹込みによるサージマージン改善効果については後に考察を加える。

(2) 吹込み流量

Fig.6 に Inj における吹込み流量 Q_{RB} を、Fig.7 に吹込み位置 TT と吹込みに起因するサージマージン改善率 I_{R-Inj} の関係を示す。 I_{R-Inj} は吹込みによる Q_{SM} の低流量化の尺度となるパラメータであり、式(4)で定義される。

$$I_{R-Inj} = \frac{Q_{SM-N-Inj} - Q_{SM-Inj}}{Q_{SM-N-Inj}} \times 100 \quad [\%] \quad (4)$$

ここで、 Q_{SM-Inj} は Inj の場合の Q_{SM} である。

Fig.6 から吹込み流量 Q_{RB} の Q に対する変化の傾向は、Fig.4 に示す性能曲線の分布と相関があり、最高圧力比より低流量側では圧力比の増加と共に増加することが分かる。そして、 Q_{RB} は全ての TT に対してノズル内径の大きい $d_N = 4 \text{ mm}$ の方が高くなっており、TT に比べて d_N の変化による影響のほうが大きい。したがって、吹込み流量は吹込みノズル内径に依存し、周方向の装着位置に対する依存度は低いと云える。しかし、同一ノズル内径での比較では、ノズル内径の小さい $d_N = 3 \text{ mm}$ は $d_N = 4 \text{ mm}$ に比べて TT の変化による影響が相対的に大きい。ゆえに、周方向の吹込みノズル装着位置が吹込み流量に与える影響は、ノズル内径の縮小に伴う吹込み流量の低下と共に強くなる可能性がある。また、 Q_{RB} は d_N に関係なく TT(-90)において最も高い値を示している。一方、Fig.7 に示すサージマージン改善率 I_{R-Inj} については、TT(0)から TT(+90)付近の領域では、 Q_{RB} の高い $d_N = 4 \text{ mm}$ の方が高い値をとって

いるが、対向側の TT(180)から TT(-90)付近では d_N による明確な違いは見られない。したがって、 I_{R-Inj} と Q_{RB} の相関性は低いと考えられる。

つぎに、Fig.8 に Q と式(5)で定義される単位時間当たりの吹込み噴流の運動量 M_I の関係を示す。

$$M_I = \frac{(Q_{RB})^2}{\rho \times \frac{d_N^2}{4} \pi} \quad [\text{kg} \cdot \text{m/s}^2] \quad (5)$$

ここで、 ρ は吐出し管の空気密度である。

Fig.8 より吹込み噴流の運動量 M_I は全ての TT に対してノズル内径の小さい $d_N = 3 \text{ mm}$ のほうが高くなっており、Fig.6 に示す吹込み流量 Q_{RB} と逆の大小関係を示している。これは吹込む噴流の平均流速は $d_N = 3 \text{ mm}$ のほうが高いことを示している。また、 M_I は d_N に関係なく TT(-90)において最も高い値を示している。しかし、Fig.7 に示すサージマージン改善率 I_{R-Inj} については、 M_I の高い $d_N = 3 \text{ mm}$ の方が全ての TT に対してほぼ低い値を示しており、いずれのノズル内径においても TT(-90)において最高値を示していない。したがって、 M_I の I_{R-Inj} に対する相関性は Q_{RB} と同様に低いと考えられる。

吹込み流量に関するパラメータとして最後に、 Q と式(6)で定義される吹込み流量の循環率 π_R の関係を Fig.9 に示す。

$$\pi_R = \frac{Q_{RB}}{Q} \quad [\%] \quad (6)$$

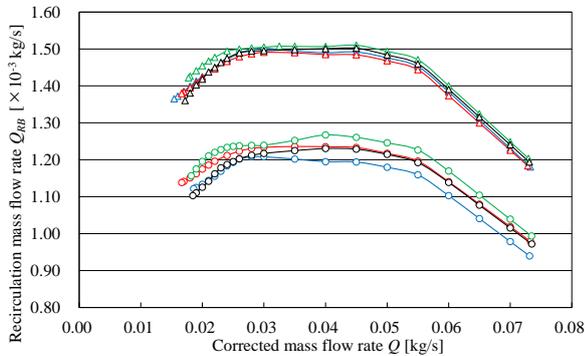


Fig.6 Recirculation mass flow rate

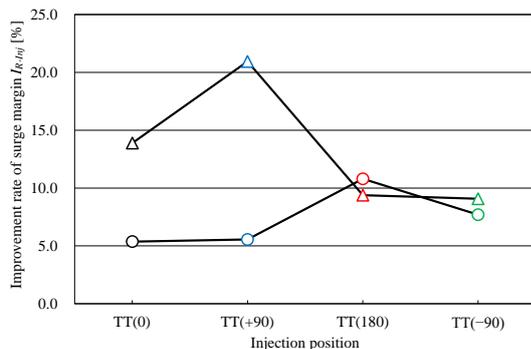


Fig.7 Improvement rate of surge margin

Fig.9 から循環率 π_R は Q の低下と共に、サージングが発生するまで常に増加する傾向を示している。サージング発生限界流量 Q_{SM} での π_R と Fig.7 に示す I_{R-Inj} を比較すると、各 d_N において I_{R-Inj} が最大値を示す TT での π_R が最も高くなっており、 $d_N = 3 \text{ mm}$ においては π_R の増加と共に I_{R-Inj} も増加している。これらの結果は I_{R-Inj} と π_R の間には相関性があることを示唆していると考えられる。

(3) 圧力比の変化率

Fig.10 に吹込み位置 TT と吹込みによるサージング発生限界流量 Q_{SM} での、N-Inj に対する Inj の圧力比の変化率 P_R との関係を示す。 P_R は式(7)により定義した。

$$P_R = \frac{P_{SM-Inj} - P_{SM-N-Inj}}{P_{SM-N-Inj}} \times 100 \quad [\%] \quad (7)$$

ここで、 $P_{SM-N-Inj}$ と P_{SM-Inj} はそれぞれ $Q_{SM-N-Inj}$ と Q_{SM-Inj} での圧縮機出口全圧である。

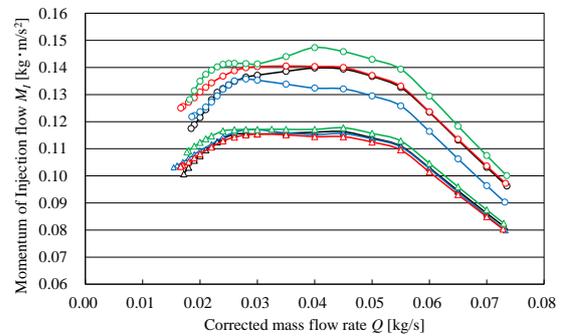


Fig.8 Momentum of Injection flow

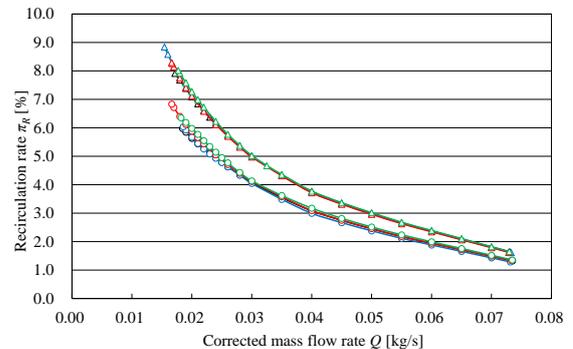


Fig.9 Recirculation rate of Injection flow

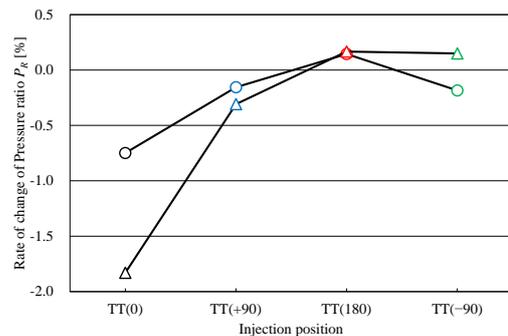


Fig.10 Rate of change of Pressure ratio

Fig.10 から、圧力比の変化率 P_R が TT(0)から TT(+90)付近の領域では負になる傾向が強く、対向側の TT(180)から TT(-90)付近ではゼロ付近の値を示している。これらの傾向を Fig.7 と比べると、サージマージン改善率 $I_{R-I_{nj}}$ の高い TT(0)から TT(+90)付近の領域では、逆に変化率 P_R が低下することが分かる。圧力比は羽根車翼前縁への入射角に影響を受けることから、吹込みによる入射角の減少に伴う負荷の低下がサージマージン改善率 $I_{R-I_{nj}}$ を向上させる一つの要因であると考えられる。一方で、 $I_{R-I_{nj}}$ は TT(+90)において最も高くなっているが、 P_R は TT(0)で最も低下していることから、吹込みにより P_R の減少を抑えつつ $I_{R-I_{nj}}$ を向上させる最適周方向吹込み位置が存在すると考えられる。

5. 結論

本研究により以下の結論を得た。

1. 吸込み管内壁面への吹込みノズルの装着が性能特性に与える影響は、周方向の装着位置に依存するが、ノズル内径には依存しない。
2. 吹込みによるサージマージン改善効果は、吹込み流量との相関性は低いですが、サージング発生限界流量での圧力比の減少量との相関性は高い。

3. 周方向の吹込みノズル装着位置が吹込み流量に与える影響は、ノズル内径の縮小に伴う吹込み流量の低下に伴い強くなる可能性がある。
4. 吹込みによるサージマージン改善効果と、圧縮機流量で無次元化された吹込み流量との間には相関性があることが示された。
5. 吹込みによるサージング発生限界流量での圧力比の低下を抑えつつ、サージマージン改善効果を向上させる最適周方向吹込み位置が存在する。

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, 15121, 2022
- 2) Hirano, T. Uchida, T. Tsujita, H. : Control of Surge in Centrifugal Compressor by Using a Nozzle Injection System, International Journal of Rotating Machinery, Volume 2012, Article ID 259293, 2012
- 3) 橋本風央, 竹内莞太, 辻田星歩, 長尾健一, 大塚隆太郎: 吹込みによる遠心圧縮機のサージング制御効果(吹込みノズル構造の影響), 第 87 回ターボ機械協会講演会, 2022