

令和 5 年 6 月 5 日現在

機関番号：3 2 6 8 9

研究種目：若手研究

研究期間：2019 ~ 2022

課題番号：1 9 K 1 4 8 9 4

研究課題名（和文）遠心圧縮機の非軸対称性により発生する旋回失速の発生機構の解明と実験的検証

研究課題名（英文）The influence of non-axisymmetric geometry on the generation mechanism of rotating stall in a centrifugal compressor and the experimental validation

研究代表者

藤澤 信道（Fujisawa, Nobumichi）

早稲田大学・理工学術院・専任講師

研究者番号：1 0 7 7 8 1 5 3

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究では、実験・解析両面から、サージ点近傍における遠心圧縮機のディフューザ内部で発生する旋回失速内部の非定常挙動および旋回機構を解明した。ディフューザ失速セルは渦型室の非軸対称な圧力分布に影響を受け初生し、Hub，Shroud壁面交互の境界層剥離と渦型室からの逆流に起因するディフューザ出口部の低速領域で構成されることを明らかにした。また、失速セルの前縁側で羽根車吐出流と渦型室からの逆流が合流することにより、流れ角が小さくなることで、境界層剥離と渦型室からの逆流が周方向に初生・成長し、低速領域を形成しながら失速セルは旋回していることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

社会全般で広く実用化されている遠心圧縮機を対象として、その羽根なしディフューザ部分に発生する旋回失速の初生・旋回機構を初めて解明した。従来、各種圧縮機では失速余裕と呼ばれる安全運転範囲を設定して非定常現象の発生を抑制しているが、これらの運転余裕を設ける必要性から本来要求される高い圧力比や広範な運転流量範囲を犠牲にしている。この基礎研究によって、非定常現象の発生機構が解明され、失速回避策が提案されることでより高い圧力比条件下での運転が可能となり、圧縮機性能を飛躍的に向上させると共に、将来的には温室効果ガスなどの発生を抑制する産業機械の設計手法が提案されることが期待される。

研究成果の概要（英文）：Unsteady diffuser stall behavior in a centrifugal compressor with a vaneless diffuser was investigated by experimental and computational analyses. The diffuser stall generated as the mass flow rate decreased. The diffuser stall cell rotated at 25-30 % of the impeller rotational speed, with diffuser stall fluctuations observed at 180° from the cutoff. First, the diffuser stall cell originated at 180° from the cutoff by interaction with boundary separation and impeller discharge vortex. Then, the diffuser stall cell further developed by boundary separation accumulation and the induced low velocity area, located at the stall cell center. The low velocity region formed a blockage across the diffuser passage span. The diffuser stall cell expanded in the impeller rotational direction due to boundary separation caused by a positive flow angle. Finally, the diffuser stall cell vanished when it passed the cutoff, because mass flow recovery occurred.

研究分野：流体機械

キーワード：流体機械 流体力学 CFD 遠心圧縮機 旋回失速

1. 研究開始当初の背景

過給機やエンジンの構成要素である遠心圧縮機は高効率化・高圧力比化のために、旋回失速を抑制し安定作動範囲を拡大することが求められている。従来より、失速を制御・離脱する技術の開発のため、旋回失速の発生機構および非定常的な渦構造の解明が進められている。しかし、遠心機は羽根車下流に非軸対称な形状を持つ渦型室を持つために、出口圧力の不均一が内部流れを複雑化させる。しかし、失速発生時の遠心機内部の非軸対称な流れを調査するためには、多点での非定常計測および圧縮機全体の数値解析が求められコストを必要とする。そのため、非一様な流入・流出条件下における遠心圧縮機に発生する失速構造の解明の要求が高いにも関わらず、失速の発生機構に焦点を絞った研究報告は少ないのが現状である。さらに、旋回失速の研究はその対象実機に限られた知見が多く、他の圧縮機に応用可能あるいは設計段階で失速を予測できるような汎用性のある失速形成モデルを提案している報告は皆無である。

また、近年大規模計算機の発達から数値流体解析(CFD)を用いて失速セル内部の構造を試みる報告が増えている。しかし、その大部分は実験との検証を容易に計測可能な定常性能などで済ませ、CFD 解析で得られた失速内の流れ構造は試験と検証しない、あるいは数点の非定常計測結果で推定するのに留まっている。高精度な CFD 解析で明らかにした失速内部の流動構造や発生機構をいかに試験で検証するのか、どのような実験手法を用いれば良いのか、どの物理量を測定するのかという新たな課題も重要視されている。

2. 研究の目的

本研究では、1. 遠心圧縮機の幾何形状および流入条件がもたらす非軸対称性により発生するディフューザ旋回失速の初生機構を解明し、汎用的な失速形成モデルを提案することを目的とする。この計画により、一様流入条件下における遠心圧縮機のディフューザ流路内部に発生する失速現象の初生箇所および規模、失速セルの流動構造が明確になる。さらに、ディフューザ流路内部の圧力勾配とせん断応力の関係性から境界層剥離の機構を解明し、失速セルの非定常的な発達を分析することで失速の形成モデルを提案する。さらに、2. 壁面圧力および流速計測を組み合わせ失速形成モデルの検証を行うことを目的とする。この検証を行うことで、提案した失速形成モデルの信頼性を確認し、他の遠心機への応用の足がかりとなる。

3. 研究の方法

本研究では、実験・数値解析の両面から非軸対称な流入・流出条件下における遠心圧縮機に発生するディフューザ失速の初生機構を解明する。失速初生・発達の形態変化の発生箇所を捉えるために、ディフューザ流路壁面での壁面圧力とディフューザ内部の同時計測を行い、羽根車の回転周期と失速セルの回転周期 2 つに位相を固定し平均化する 2 重位相固定平均法により、失速に起因する流動構造を実験により取得する。この解析より、失速セル内部の渦構造および規模の拡大を可視化できる。また、ディフューザ失速の初生から発達する過程での非定常的な渦構造を調査するために、スクロールも含めた圧縮機系全体を対象とした DES 解析を用いた数値解析を行う。以上より、(1)失速初生および発達に起因する流動現象の発生箇所、(2)失速セル内部の渦構造が明らかになる。

4. 研究成果

供試遠心圧縮機は船用ディーゼルエンジンに用いられる過給機用遠心圧縮機である。Table 1 に供試遠心圧縮機の仕様を示す。供試羽根車はインデュースを有する長羽根 7 枚、短羽根 7 枚から構成される開放型羽根車である。ディフューザには羽根なしディフューザを採用した。また、圧縮機内部に発生するディフューザ失速の非定常挙動を調査するために数値解析を実施した。支配方程式は連続の式、3 次元圧縮性 Navier-Stokes 方程式、エネルギー方程式および理想気体の状態方程式であり、有限体積法により離散化した。対流項には MUSCL(Monotone Upstream-centered Scheme for Conservation Laws)法により高次精度化した FDS (Flux Difference Splitting)を用い、粘性項はガウスの定理に基づく 2 次精度中心差分で評価した。また、時間積分には MFGS(Matrix Free Gauss Seidel)陰解法を採用した。乱流モデルには LES/RANS ハイブリッドモデルである Detached Eddy Simulation を採用した。本研究では、SSTk- ω 乱流モデルに基づく DES を採用しており、局所的な乱流の渦スケールに応じて RANS/LES 領域を自動的に切り替えることが可能である。相対系には慣性力として遠心力およびコリオリ力を考慮した。

実験および数値解析から得られた圧縮機性能を Fig.1 に示す。 $\phi = 0.24$ は $N = 6000[\text{min}^{-1}]$ 運転時における供試圧縮機の最高効率点である。また、 $\phi = 0.10$ は羽根なしディフューザ設置時にディフューザ失速が発生する失速点である。ディフューザ失速の旋回速度は羽根車回転速度の約 25%である。また、数値解析結果は実験結果と比べて設計点から失速点より低流量側まで定量的に一致している。羽根なしディフューザ内部で発生する旋回失速の構造を調査するために、失速点($\phi = 0.14$)での数値解析を行った。ディフューザ出口部における質量流量変動の結果を Fig.2 に示す。解析結果より、周方向に低速で伝播する低流量域が確認され、その旋回速度は羽

根車回転速度の 25%程度であった。変動の大きさは周方向で異なり、周方向 45 度付近から変動が強くなり、舌部直前(270 度)まで強い変動が維持されている。また、舌部通過後は減衰していることが確認できる。

ディフューザ失速の非定常挙動を調査するために、ディフューザ内部流れの半径方向流速の変動を可視化した。Fig.3 に数値解析より得られたディフューザ内部の半径方向流速変動の時間変化を示す。白破線で示す半径方向流速変動が負となる領域が逆流域に対応し、これは失速セルにあたる。また、各時間は羽根車 1 周に要する時間を基底とした無次元時間であり、各位置における時間平均値からの差異を変動値としている。Fig.3 より、 $t^* = 0.94$ において 45 度付近から見られる白の破線で囲まれた逆流領域が初生し、時間経過とともに舌部に向かって半径方向および周方向に拡大しながら旋回している様子が確認される。また、失速セルが 90 度を過ぎた後は、ディフューザ出口側からの逆流が増大している。その後、失速セルが舌部を通過して以降、白破線で示す領域が縮小し、変動の大きさも低下していることがわかる。ディフューザ失速が 45 度付近で初生し、成長していく過程における非定常挙動を調査するために、ディフューザ流路から渦型室入口部までの子午面流速分布を Fig.4 に示す。4 つの領域 (I)90-135 度、(II)180-225 度付近を失速セルが通過した時刻におけるディフューザ内部流れを可視化した。Fig.4 には、子午面流速分布とともに、無次元半径方向流速 $u_r / u_t = -0.1$ の等値面を付記している。また、(a)の青破線が Hub 壁面境界層の剥離線に、(b)の赤破線が Shroud 壁面境界層の剥離線的位置に対応している。(I)から、ディフューザ流路入口部から中間部にかけて Hub 壁面に壁面境界層剥離が発生、半径方向下流側において Shroud 壁面に境界層剥離が交互に形成されている。また、ディフューザ出口と渦型室入口の接続部にあたる曲がり部の Shroud 側に、低速領域が形成している。次に(II)の 180 度付近においては、Hub、Shroud 壁面交互の境界層剥離が更に拡大し、スクロール側からの逆流がディフューザ内部まで伸びていることがわかる。

解析で得られた失速の構造を実験で検証するために、ディフューザ内部の流速測定を行った。Fig.5 には、渦位相固定平均法を施すことで得られた流速変動 = 12.5 m/s の等値面にハブからの距離で色付けしたものを付記している。Fig.5 より、ディフューザ中間部から出口部にかけて存在するシュラウド側の逆流が先行し、ディフューザ入口部ハブ側に存在する境界層剥離が大きく遅れて旋回していることが確認できる。この構造は解析から得られた傾向と一致している。

Table.1 Dimensions of tested compressor

Tested Centrifugal Compressor			
Rotational Speed	N	6000	min^{-1}
Mass Flow Rate	G	1.64	kg/s
Pressure Ratio	p_5 / p_0	1.1	
Impeller			
Number of Blades	Z	14	
(Main + Splitter)		(7+7)	
Inlet Diameter	D_1	248	mm
Outlet Diameter	D_2	328	mm
Exit Blade Width	B_2	26.14	mm
Diffuser			
Diffuser Type		Vaned / Vaneless	
Number of Vanes	V	15 / -	
Inlet Diameter	D_3	360	mm
Outlet Diameter	D_4	559	mm
Diffuser Width	B_4	26.14/19.55mm	

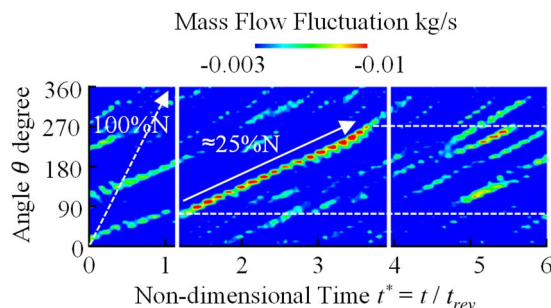


Fig.2 Mass flow fluctuation at diffuser exit ($\phi = 0.10$)

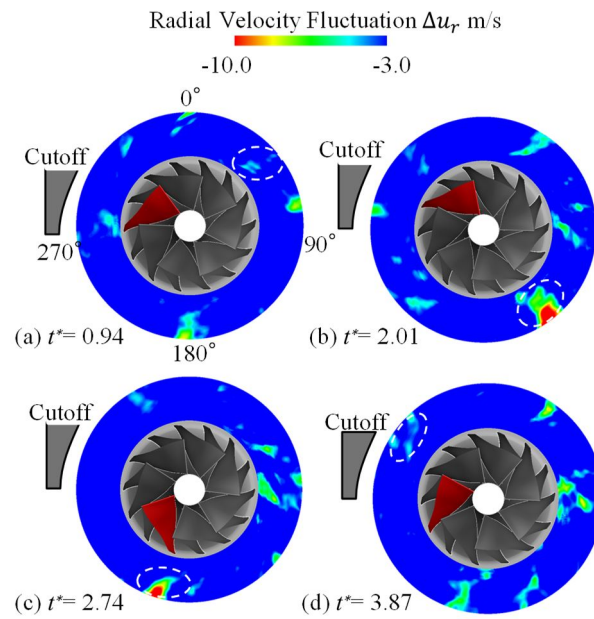


Fig.3 Radial velocity fluctuation within vaneless diffuser ($\phi = 0.10$)

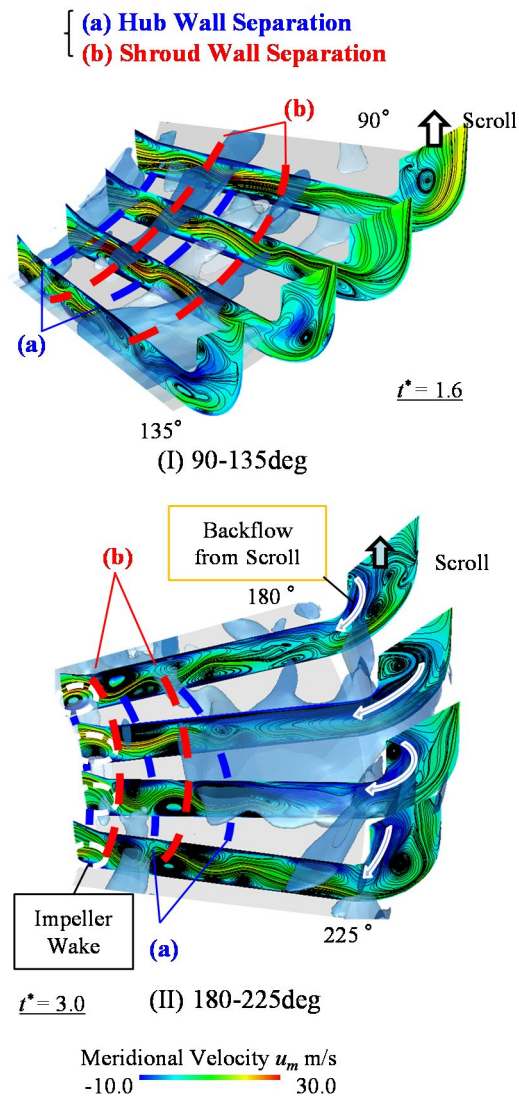


Fig.4 Meridional velocity distribution within vaneless diffuser ($\phi = 0.10$)

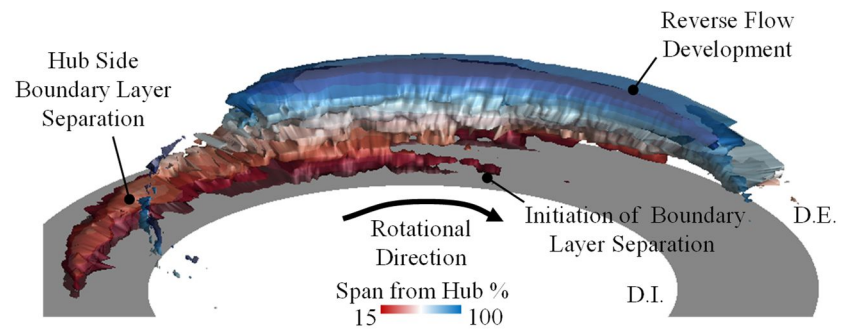


Fig.5 Radial velocity fluctuation within vaneless diffuser ($\phi = 0.10$)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 0件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Fujisawa Nobumichi、Naitou Momoko、Ohta Yutaka	4. 巻 V10DT37A025
2. 論文標題 Interaction Mechanism of Impeller and Diffuser Stall in a Centrifugal Compressor	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of ASME 2023 Turbo Expo	6. 最初と最後の頁 GT2022-82861
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1115/GT2022-82861	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tajima Kenta、Miida Hiroshi、Fujisawa Nobumichi、Ohta Yutaka	4. 巻 1909
2. 論文標題 The effect of unsteady vortex behavior on noise characteristics in a centrifugal compressor	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012021 ~ 012021
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1742-6596/1909/1/012021	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Agari Yuki、Yamao Yoshifumi、Fujisawa Nobumichi、Ohta Yutaka	4. 巻 31
2. 論文標題 Behavior of Vaneless Diffuser Stall in a Centrifugal Compressor	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Thermal Science	6. 最初と最後の頁 3 ~ 12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s11630-022-1557-1	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Fujisawa Nobumichi、Tajima Kenta、Miida Hiroshi、Ohta Yutaka	4. 巻 4
2. 論文標題 Generation Mechanism of Diffuser Stall in a Centrifugal Compressor with Vaneless Diffuser	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the Global Power and Propulsion Society	6. 最初と最後の頁 190 ~ 201
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.33737/jgpps/128974	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 FUJISAWA Nobumichi、MIIDA Hiroshi、TAJIMA Kenta、OHTA Yutaka	4. 巻 87
2. 論文標題 Unsteady behavior and mechanism of a rotating stall in a centrifugal compressor with vaneless diffuser	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Transactions of the JSME (in Japanese)	6. 最初と最後の頁 36410
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.20-00364	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Miida Hiroshi、Tajima Kenta、Fujisawa Nobumichi、Ohta Yutaka	4. 巻 FEDSM2020
2. 論文標題 The Unsteady Behavior of Diffuser Stall in a Centrifugal Compressor With Vaneless Diffuser	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of ASME 2020 FEDSM	6. 最初と最後の頁 FEDSM2020-20128
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1115/FEDSM2020-20128	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 鈴木祐太郎, 岸隼冬, 内藤桃子, 藤澤信道, 太田有
2. 発表標題 遠心圧縮機に発生する羽根車失速と羽根なしディフューザ失速の相互作用
3. 学会等名 日本機械学会2022年度年次大会
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 Nobumichi Fujisawa, Yuki Agari, Yoshifumi Yamao, Yutaka Ohta
2. 発表標題 Rotating Mechanism of Diffuser Stall in a Centrifugal Compressor with Vaneless Diffuser
3. 学会等名 ASME 2021 Turbo Expo (国際学会)
4. 発表年 2021年～2022年

1．発表者名 Yuki Agari,Yoshifumi Yamao,Nobumichi Fujisawa,Yutaka Ohta
2．発表標題 Behavior of Vaneless Diffuser Stall in a Centrifugal Compressor
3．学会等名 Asian Congress on Gas Turbine 2020 (国際学会)
4．発表年 2021年～2022年

1．発表者名 Yoshifumi Yamao,Yuki Agari,Nobumichi Fujisawa,Yutaka Ohta
2．発表標題 Vortical Structure of Vaneless Diffuser Stall in a Centrifugal Compressor
3．学会等名 The 16th Asian International Conference on Fluid Machinery (国際学会)
4．発表年 2021年～2022年

1．発表者名 上利雄貴，山尾佳史，藤澤信道，太田有
2．発表標題 遠心圧縮機の羽根なしディフューザ失速における羽根車内部流れ場の影響
3．学会等名 第49回 ガスタービン学会 定期講演会
4．発表年 2021年～2022年

1．発表者名 Fujisawa Nobumichi、Tajima Kenta、Miida Hiroshi、Ohta Yutaka
2．発表標題 Generation Mechanism of Diffuser Stall in a Centrifugal Compressor with Vaneless Diffuser
3．学会等名 GPPS Chania20 (国際学会)
4．発表年 2020年～2021年

1．発表者名 Kenta Tajima, Hiroshi Miida, Nobumichi Fujisawa, Yutaka Ohta
2．発表標題 Effect of Unsteady Vortex Behavior on Noise Characteristics in a Centrifugal Compressor
3．学会等名 ISROMAC 2020（国際学会）
4．発表年 2020年～2021年

1．発表者名 上利祐貴，三井田弘，田島健太，藤澤信道，太田有
2．発表標題 羽根なしディフューザを有する遠心圧縮機における失速セルの旋回挙動
3．学会等名 第84回 ターボ機械協会講演会
4．発表年 2020年～2021年

1．発表者名 田島健太，三井田弘，藤澤信道，太田有
2．発表標題 羽根なしディフューザを有する遠心圧縮機におけるディフューザ失速の構造
3．学会等名 第48回 ガスタービン学会 定期講演会
4．発表年 2020年～2021年

1．発表者名 上利祐貴，三井田弘，田島健太，藤澤信道，太田有
2．発表標題 遠心圧縮機の羽根無しディフューザに発生する旋回失速セルの非定常挙動
3．学会等名 日本機械学会
4．発表年 2019年～2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

2021年度日本機械学会賞(論文)

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------