

平成 30 年 5 月 10 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05811

研究課題名(和文) 衝撃波管を用いた軸流圧縮機のサージ・旋回失速共存系の挙動とウインドミル特性の把握

研究課題名(英文) Co-existing Behavior of Surge and Rotating Stall Using Shock Tube and Windmill Characteristics in an Axial-Flow Compressor

研究代表者

太田 有(Ohta, Yutaka)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：50211793

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：軸流圧縮機の新設計運転状態における非定常現象と損失発生機構の解明を目的として、実験および数値解析研究を実施した。研究の焦点を(1)低流量域において発生するサージ、旋回失速共存状態の非定常挙動の把握と、(2)高流量域におけるウインドミル駆動時の非定常流れ場の把握と損失構造の解明に当てた。(1)については、失速発生時のサージ挙動が流れ場の構造によって決定されていることを実験的に示した。一方、(2)については、各種ウインドミル状態での損失構造を非定常数値解析によって明らかにした。軸流圧縮機の新設計状態での非定常挙動を実験および数値解析により明らかにし、幾つかの新しい知見を得ることができた。

研究成果の概要(英文)：Unsteady phenomena and loss generation mechanism of axial-flow compressor off-design operation were investigated by detailed experiments and precise numerical simulations. Research attentions were focused on (1)unsteady flow field and cycle characteristics of co-existing state of surge and rotating stall, and (2)unsteady separated flow field and loss generation mechanism at windmill operation in high volume flow rate. Experimental results showed that global characteristics of surge and rotating stall were found to be determined by the cascade flow structure during the surge cycle. On the other hand, unsteady numerical simulations revealed loss generation mechanism and structure of loss core developed in the rotor and/or stator cascades under the windmill operations.

研究分野：流体工学

キーワード：ターボ機械 旋回失速 サージ ウインドミル 非定常数値解析 非設計運転状態 流体損失 非定常渦

1. 研究開始当初の背景

軸流圧縮機が非設計点で運転される場合には、様々な非定常現象の発生が報告されている。低流量運転時に発生する最も顕著な現象はサージと旋回失速であり、従来は全く個別の現象と考えられてきた。しかし近年、これらが互いに共存するだけでなく、互いに干渉することが報告されているが、圧縮機内部流れに焦点を当てた現象解明は殆んど実施されていないのが現状である。圧縮機運転点の差異によって、サージサイクル自体もその大きさや規模、周波数を微妙に変化させ、サイクル中のごく短時間に動翼列内に失速セルが発生と消滅を高速で繰り返す極めて複雑な流れ場を呈する。その中でも特に、サージサイクルが不規則に選択される不規則サージが発生することが知られており、その挙動や構造、次サイクル選択のメカニズムなど不明な点は数多く残されている。

一方、高流量域での翼列挙動については、先行研究が殆ど無いのが現状である。流入空気のラム圧によって圧縮機翼列がタービン駆動されるウインドミル状態は、上空で航空エンジンが失火した際の再始動時などに大問題となる。また近年では、例えば航空機の電動化に伴い補助動力装置 (APU) をウインドミル駆動させて電力供給を行う試みなどが構想されており、その挙動解明が急務となっている。しかし、損失の発生機構や内部流れ構造、大規模剥離流の様相はもとより、ウインドミル駆動される圧縮機の回転数予測でさえも十分精度良く推定できる状態には至っていないのが現状である。

2. 研究の目的

航空エンジン用軸流圧縮機の非設計運転時の非定常挙動の解明を目的とした実験と数値解析により、以下に示す2つの項目を明らかにすることを本研究の目的とする。

(1) 低流量域で発生するサージ・旋回失速共存状態における非定常流れ場の中でも、特に2つのサージサイクルが不規則に選択される過程に着目し、次期サイクルを決定する物理因子と、サイクル決定に影響を及ぼす流れ場との関係を明らかにすることを目指す。サージサイクルは、圧縮機が運転されている諸条件 (流量係数、管路系総抵抗、動作点の安定性など) によって様々に変化するが、条件を一定に保った状態であっても、不規則に選択される場合がある。この場合の次サイクルを決定する要因は、現在までに一切解明されておらず、サイクル論としての興味はもとより、流体機械の運転や保全の観点からも現象の解明が急務とされている。

(2) 高流量域で発生する圧縮機のウインドミル状態において、動翼列と静翼列内でそれぞれ損失を発生させるメカニズムの解明と作動モードの検証、および非定常内部流れ場の把握を目指す。従来からの研究により、静翼列内では動翼列内より大きな損失が発生するこ

とが知られているが、その損失発生機構の解明と流れ場との関連に研究の焦点を絞る。ウインドミル状態の把握には、動力がちょうど相殺する空回り状態 (Free-windmill 状態) と動力の生成を伴う高負荷状態 (Highly-loaded windmill 状態) とで流れ構造や損失の生成構造がどう変化するかを調査する必要がある。

3. 研究の方法

(1) 低流量域で発生するサージ・旋回失速共存系の非定常挙動の解明には、自作した段数可変軸流圧縮機実験装置 (図1) を用いる。

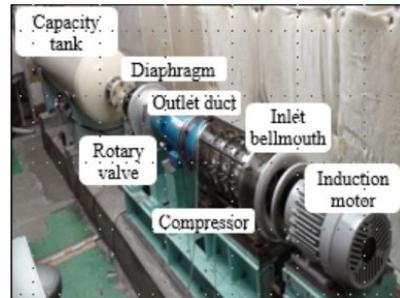


図1 過渡現象調査用軸流圧縮機試験装置

この装置は3段まで拡張可能な軸流圧縮機の駆動軸を、中空二重軸に加工してダイアフラムを介して容積タンクと接続したもので、圧縮機後方から圧力波や膨張波を印加して、圧縮機の過渡状態を模擬できる設定とした。ダイアフラムを撃針で破膜した後は、容積タンクの影響により圧縮機系はサージサイクルに突入するが、その際、サイクル中に失速セルが1個旋回するサージ・旋回失速共存状態となる。流量を調整することで、サージサイクルが不規則に切り替わる状態を実現することができる。

内部流れ場の調査には、動翼列上流・下流での流速、圧力測定に加え、非定常性能曲線を得るために流量と圧力上昇の非定常計測を合わせて実施している。

(2) 高流量域で発生する圧縮機のウインドミル状態の把握では、動翼24枚、静翼36枚から構成される単段の軸流圧縮機試験装置 (図2) を用いた実験計測と部分翼列を計算対象とした数値解析を実施した。

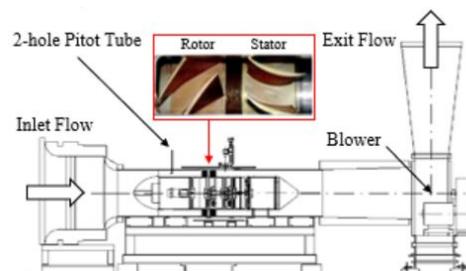


図2 ウインドミル実験用軸流圧縮機

実験では、実際のウインドミル状態を想定した毎分 800rpm の回転数において流量を調節して Free-windmill 状態と Highly-loaded windmill 状態を実現し、動静翼列前後での流速計測に加え、動翼列表面上での非定常圧力

の測定を行った。一方、数値計算では動翼 2 翼間、静翼 3 翼間の部分流路を対象とした 3 次元 URANS コードを自作した。対流項は MUSCL 法で高精度化した FDS、粘性項には 2 次精度中心差分、時間積分法には MFGS 陰解法、乱流モデルには 遷移モデルを採用した。実験と同様に Free-windmill 状態と Highly-loaded windmill 状態を模擬した計算を実施して、主にウインドミル条件下での非定常流線解析の結果より損失の構造と発生機構に関する考察を実施した。

4. 研究成果

(1) 低流量域で発生するサージ・旋回失速共存系の非定常挙動の解明では、図 3 に示す不規則サージサイクルの挙動に焦点を当てた。

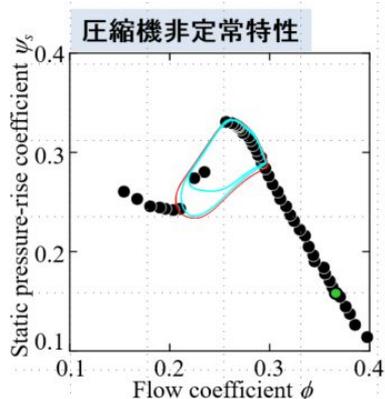


図 3 不規則サージサイクル挙動

この流量係数範囲では、運転点が圧縮機特性の右下がり安定領域に存在するにも拘らずサージングが発生する。これは圧縮機下流側から大振幅の圧力波を印加したためであり、平衡点近傍で線形化した安定性理論では説明が出来ない挙動が観察できる。圧縮機の運転パラメータを一定に保った運転下でも、図に示すような 2 種類にサージサイクルが不規則に選択される。一つは安定運転領域とマイルド失速状態を往復するサイクル (Top cycle) であり、他の一つは安定運転領域と深い失速状態を往復する大きなサージサイクル (Large cycle) である。このように不規則に選択される背景には、システム論だけでは説明がつかない、内部流れ場の微細構造が影響していると考え詳細な計測を実施した。

実験により得られた結果は以下のとおりである。Large cycle が選択される場合には、サイクル中での容積タンク内圧力変動が大きな振幅値を示す。失速初生が発生する圧縮機流量は、容積タンク圧力極大値の差、ひいては圧縮機の背圧変化の影響を受ける。

容積タンク内圧力の極大値の差、および失速初生の発生流量の違いにより、作動点移動速度が変化する。特に、サージ挙動が Large cycle に変化する場合は、Top cycle に変化する場合と比較して、作動点の移動速度は相対的に速い。

以上の実験結果より、失速セルが部分失速もしくは全周失速まで成長するか、これはつまり、サージサイクルが Top cycle になるか Large cycle になるかは、圧縮機作動点の移動速度が重要なパラメータになっていることを確認した。この結果は、以前から指摘されていた内容ではあるが、実験と詳細な計測によりその事実を明らかにすることができた。今後、圧縮機作動点の安定性を議論する上で、動作点の移動速度を新たな実験パラメータにする必要性を指摘した。

(2) Free-windmill 状態における流れ場と損失構造の調査では、実験と数値解析により該当する流量係数に若干の相違が認められた。これは CFD が損失を過大評価しているためと考えられたので、計算に境界層の遷移モデルを導入して、実験との差を小さくする試みを行ったが、依然として損失を多く評価している状態が続いている。これは、ウインドミル試験における今後の課題の一つである。

Free-windmill 状態における動翼表面上の限界流線と、Critical point 法を用いて可視化した渦の様子を図 4 に示しておく。

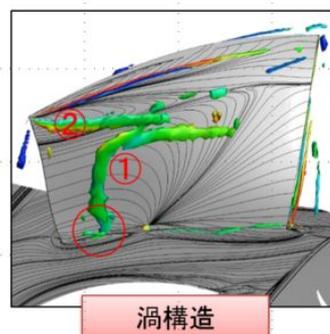


図 4 Free-windmill 状態における動翼

動翼ハブ面に足を持つ巻き上がり渦 (図中) と動翼先端剥離渦 が、スパン 20% tip 近傍で合体して、大きな渦コアを形成していることがわかる。この傾向は翼表面上の限界流線からも認められ、圧力面側の流れはスパン 20% 近傍に寄せられ、スパン方向の流れ状況が大きく変化している。翼表面圧力の測定結果より、スパン 20% より tip 側ではウインドミル駆動、hub 側では圧縮機駆動となっており、駆動モードの切り替わりスパンでロスが著しく増大することが確認された。限界流線から認められる翼表面上のサドル点は、約 70% コード位置であり、コード方向の駆動モードはこのサドル点位置によって決定される。このように供試圧縮機では、駆動モードの切り替わりが、スパン方向とコード方向で複雑に関連しており、他の先行研究に見られるようなコード方向のみの切り替わりは顕著ではなかった。

限界流線の詳細な調査によって、動翼駆動モードの切り替わり位置が予測できることは、ウインドミル状態の損失を予測・評価する上でも貴重な結果であると考えている。

(3) Highly-loaded windmill 状態における流れ場と損失構造の調査で得られた動翼近傍の流れ場を図 5 に示す。

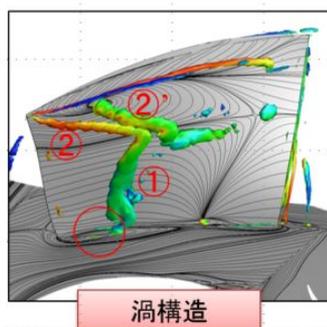


図 5 Highly-loaded 状態における動翼

図 4 の場合と同様に hub 面から巻き上がる渦と翼前縁 tip からの剥離渦が観察される。渦は時間の経過と共に下流側に移流する様子が捉えられており、渦コアに沿って静翼側へと流出する。渦コアのスパン方向位置は 30%tip 近傍に存在し、Free-windmil 状態より hub 側に近づき、ウインドミル駆動領域が増加している傾向が認められる。一方、翼面上限界流線のサドル点位置は約 80%コードまで後退し、コード方向にウインドミル駆動領域が拡大している。

以上の実験・CFD により、ウインドミル駆動状態における動翼の主な損失構造は以下の 3 つであると考えられる。負の入射角に起因する正圧面側の剥離渦、前縁側翼端に見られる負圧面から正圧面への漏れ流れ、後縁側翼端に見られる正圧面から負圧面への漏れ流れ。特に、に示した正圧面側の剥離渦は、図 4、図 5 に示した通り、hub 面に足を持ってスパン方向に巻き上がる渦であり、これが前縁 tip を起点として発達する渦と干渉することで損失コアを形成する。

(4) ウインドミル駆動時の静翼列内流れ。静翼列では負の入射角に起因する正圧面の剥離渦が全スパン位置で発生し、翼面全体を覆うほど大規模に成長する。静翼列正圧面に発生する剥離渦の非定常挙動は、動翼後流の影響を受けており、以下の 4 つの過程に分類することができる。

渦の形成過程：動翼後流の流入に伴う入射角の回復により剥離渦が形成される過程。

渦の成長過程：入射角が負に増大するに伴い、コード方向に拡大・成長する過程。

渦の移流過程：次に形成される剥離渦の影響を受けて、静翼後縁側へと渦が移流する過程。

渦の減衰過程：スパン方向渦は tip 側から次第に減衰を始め、やがて静翼表面上を離れ下流側へと放出される過程。

静翼内では動翼内よりも大きな損失が発生することが従来の研究から報告されている。この原因は、大規模な負の入射角剥離により翼のほぼ全スパンで剥離渦が生成され、それらが ~ に示した過程で次々と生成

と減衰を繰り返すためであることが明らかとなった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 1 件)

Yuu Sakata and Yutaka Ohta, “Co-existing State of Surge and Rotating Stall in a Two-Stage Axial Flow Compressor Using a Double-Phase Locked Averaging Technique”, J. of Thermal Science, 査読有, Vol. 26, No. 1 (2017), pp. 38-46.

DOI: 10.1007/s11630-017-0907-x,

[学会発表](計 7 件)

平山 卓, 太田 有, 後藤尚志, 加藤 大, “軸流圧縮機のウインドミル状態における動翼特性と内部流れ構造”, 第 45 回日本ガスタービン学会定期講演会, 2017 年 10 月, 松山市。

坂田友, 高橋遼, 太田 有, “二段軸流圧縮機の過渡応答とサージ挙動”, ターボ機械協会富山講演会, 2017 年 9 月, 富山市。

坂田友, 高橋 遼, 太田 有, “二段軸流圧縮機におけるサージ・旋回失速共存系の内部流動調査”, 日本流体力学会年会 2017, 2017 年 8 月, 東京理科大学。

Hirayama, T., Ohta, Y., Goto, T. and Kato, D., “Internal Flow Structure and Rotor Performance of an Axial Flow Compressor at Windmill Conditions”, Proc. of the 13th ISAIF, May 2017, Okinawa, Japan.

坂田 友, 野添 直樹, 太田 有, “二段軸流圧縮機に生じるサージ・旋回失速共存系の過渡特性”, 日本機械学会第 94 期流体力学部門講演会, 2016 年 11 月, 山口大学。

Sakata, Y., Nozoe, N. and Ohta, Y., “Coexisting State of Surge and Rotating Stall in a Two-Stage Axial Flow Compressor using a Double-Phase Locked Averaging Technique”, Proc. of 6th Asian Joint Workshop on Thermophysics and Fluid Science, Sept. 2016, Guilin, China.

Oka S., Mitsui, H. and Ohta, Y., “Investigation of Coexisting Phenomena of Surge and Rotating Stall in an Axial Flow Compressor using Double-Phase-Locked Averaging Technique”, ISAIF12, ISAIF12-076, July 2015, Lericci, Italy.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

太田 有 (OHTA, Yutaka)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：50211793