

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560171

研究課題名(和文) 軸流圧縮機の過渡失速特性と能動失速制御法に関する衝撃波管実験と数値解析研究

研究課題名(英文) Shock Tube Experiment and Numerical Simulation on Transient Stall Characteristics and Active Stall Control in an Axial Flow Compressor

研究代表者

太田 有 (OTA YUTAKA)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：50211793

研究成果の概要(和文)：軸流圧縮機下流側に衝撃波管を接続した試験設備を設計製作して、圧縮波の印加に伴う圧縮機翼列の非定常挙動と系の全体挙動を実験的に調査した。圧縮波の印加に伴い動翼列は過渡的に失速状態に突入し、動作点の違いによって複雑な非定常回復過程を示す。特性曲線勾配が負となる安定作動点での運転時に圧縮波を印加した場合でも、系は失速・サージへと突入する場合が存在する。また、大規模なサージ周期に合わせて、翼列内で失速セルが旋回する状態が観察され、旋回失速とサージが流れ場で密接に関連していることを示した。

研究成果の概要(英文)：Experimental investigation on the unsteady cascade flow characteristics as well as global behavior of the compressor system under the compression plane wave injection from the compressor downstream were carried out by using an axial flow compressor test rig which connected the shock tube directly in series to its outlet. Rotor blades rushes into stall transitionally with the injection of a compression wave, and shows a complicated unsteady recovery process by the difference in an operating point. Even when the compression wave is injected at the time of compressor stable operation in which the gradient of the characteristic curve is negative, the compressor system may rush into unsteady phenomena such as rotating stall and surge. Moreover, some of the stall cells rotate within the rotor cascade according to a large-scale surge cycle, the rotating stall and surge are found to be related closely each other.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：流体工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：流体機械、軸流圧縮機、旋回失速、能動制御、サージング、衝撃波管

1. 研究開始当初の背景

軸流圧縮機をはじめとする各種ターボ機械には、低流量域運転時にサージあるいは旋

回失速という非定常現象が発生することが知られている。サージは系全体の負性抵抗が原因となって発生する自励振動の一種であ

り、大きな流量・圧力変動を伴う。一方、旋回失速は翼列内の局所的な流れの剥離や流れ渦が直接の原因であると考えられている。従来からこれら2つの現象はその原因や発生機構、特性などの違いから、それぞれ独立の現象であると考えられてきた。しかし、近年になって計算機能力の発達と計測方法の進歩によって詳細な非定常流れ場の情報を得ることが可能となり、流れ場の観点からこれらの現象は深く結びついていることを示唆する結果が数多く報告されている。そこで、過渡現象調査用に軸流圧縮機下流側に衝撃波管を直列に設置した実験装置を自作して、下流側から圧縮波を印加する過渡試験を実施することで、非定常流れ構造を詳細に調査して不安定現象の解明と制御方法を検討する必要性が生じた。旋回失速とサージ共存系の挙動について、内部流れ構造に焦点を当てて研究した例は殆ど見当らず、解明が待たれている状況であった。一方、数値解析研究は、失速、サージという非定常現象を数値的に捕えることが可能な状態にまで発展した。時間スケールが著しく異なる2つの現象に対して、数値計算による解明がどこまで可能かを検討する必要がある。

2. 研究の目的

航空エンジン用軸流圧縮機の安定作動領域を拡大することは、性能のみならず安全性の観点からも大変重要である。流量の低下に伴い、圧縮機翼列内には失速セルと呼ばれる低エネルギー領域が旋回するようになり、圧縮機性能は著しく劣化する。この旋回失速の発生を予知する、あるいは制御する技術を確認することは緊急の課題と考えられている。一方、産業用ガスタービンに用いられる圧縮機では、大規模な流量変動を誘起するサージが支配的である。しかし、これら2つの現象が共存する系の非定常挙動は現在までに殆ど解明されていない。この解明には、旋回失速が発生する条件を備え、かつサージを誘起するだけの容量要素を持つ試験装置が必要である。そこで、本研究の特色の一つとなった過渡現象実験用装置を自作した。圧縮機下流側に設置した容積タンクと圧縮機本体をダイフラムによって隔離し、撃芯によって瞬間的に破幕することで圧縮機下流側背圧の上昇を模擬する。

従来の研究にはない独創的な実験設備を駆使して、サージ、旋回失速共存系の非定常挙動を詳細な計測によって把握すると共に、旋回失速予兆現象の観察や制御法の確立に向けて基礎的な資料を獲得することを目的としている。

3. 研究の方法

実験に数値解析を援用して、圧縮機翼列内

の非定常現象の把握を行う。具体的には以下に示す調査研究を実施した。

(1) 過渡現象観察用軸流圧縮機実験装置の設計・製作：旋回失速とサージが共存する状態での圧縮機特性を把握するために、容積タンクと圧縮機流路を直列に接続した過渡現象解析用試験装置を設計製作する。本装置の最大の特徴は、圧縮機中心軸を二重中空構造とし、内筒を容積タンクに接続する。内筒外壁に設置したスリットを介して、圧縮機下流側流路と容積タンクは接続される。初期状態としては、容積タンクと圧縮機本体はダイフラムによって隔離され、撃芯を用いて破幕することで過渡現象を実現させる。容積タンク内圧力を調整することで、圧縮機下流側に圧縮波あるいは膨張波を印加できる。

(2) 旋回失速初生過程の調査：旋回失速の初生に関しては、従来より多くの研究成果が報告されており、軸流圧縮機の場合には大きく2つの失速初生形態に大別できる。本試験用圧縮機は単段・三段設定時にスパイクによって旋回失速が初生することが確認されており、動翼列先端部からの噴流印加による能動失速制御法の適用も含めて、失速初生形態の把握を行う。圧縮機に接続された衝撃波管から圧縮波を印加することで、過渡的に圧縮機背圧を上昇させて翼列を失速させる。この過程を、軸流速、壁面静圧、非定常流量の計測によって詳細に記録することで、失速初生および失速直後の圧縮機特性に関する基礎資料を蓄積する。

(3) 旋回失速・サージ共存系の挙動調査：圧縮機後方から圧縮波を印加すると、容積タンクが圧縮機出口管路に接続されて、系全体の容積要素が増大する。このため圧縮機系は旋回失速とサージが共存する非定常運転状態となる。圧縮機の運転点によって系全体のサージ挙動は大きく影響を受けるので、各動作点での運転状態下で圧力波を印加して、引き続き系に発生する非定常挙動を観察する。系全体の挙動調査には非定常性能曲線、各段での流れ場調査には熱線流速計と非定常圧力センサーを用いる。

(4) 圧縮機非定常挙動に関する数値解析研究：圧縮機に発生する旋回失速とサージは、代表時間スケールが大幅に異なる現象であるから、同時に同じ数値解析スキームで挙動を観察することは困難であり、従来より、これら2つの現象を同時に扱った例は皆無であろう。本研究では系全体の挙動に関する数値的研究を3次元非定常RANS解析によって、翼端近傍の非定常な剥離流れや渦構造に焦点を当てた微細流れ構造をRANSとLESのハイブリッド計算法であるDetached Eddy Simulation (DES)によって行うことを目指して、計算コードおよび乱流モデルの構築を行う。研究対象期間の3カ年に計算コードの

完成と数値実験の実施まで行うことは非常に困難であるので、計算スキームの完成と予備計算の実施までを目標としたい。

4. 研究成果

3年間の研究期間内に得られた成果および知見を以下にまとめる。

(1) 過渡現象観察用軸流圧縮機実験装置の設計・製作：軸流圧縮機に発生する非定常現象を調査するために、容積タンクと圧縮機を直列に接続した過渡現象実験用試験設備を設計・製作した(図1)。この装置の特徴である二重中空軸とダイヤフラム弁を用いて、圧縮機後方から圧縮波の印加が可能となった。



図1 過渡現象研究用軸流圧縮機

(2) 旋回失速初生過程の調査と能動制御の試み：供試実験用軸流圧縮機を単段および三段仕様状態で失速初生過程の把握を行った。段数の変更に関わらず圧縮機はまず初段でのスパイクを伴って失速に陥ることが予備試験から明らかとなった。さらに、圧縮機に接続した容積タンク内圧力を圧縮機出口圧よりも若干高い値に設定することで、圧縮機後方から圧縮波を印加して、圧縮機が過渡的に失速に陥る過程を調査した。圧縮波を印加する際の圧縮機運転点の状態によって、その後の圧縮機特性や失速初生は大きく影響を受け、通常では失速過程に陥らない性能曲線の右下がり安定運転点においても、外部擾乱の印加によって失速の初生あるいはサージの発生が確認された。この失速初生過程は、印加する圧縮波の振幅と圧縮機運転点によって大きく影響を受け、振幅が小さく運転点が性能曲線の右下がり安定領域にある場合には、通常の失速形態と同様にスパイクを伴って失速する。しかし、圧縮波の振幅がある程度以上に大きく、しかも運転点が性能曲線上の極大点付近に近付くと共に、圧縮機翼列はほぼ瞬間的にスパイクを伴わず失速状態へと変化する。この瞬間的な失速突入過程については、翼列間非定常流れ場の把握と併せて今後の研究課題と考えている。

一方、初段動翼端上流側から噴流を印加することで、失速初生を遅延させ、圧縮機の安定運転作動領域を拡大させる試みを行った。

その代表的な試験結果を図2に示しておく。

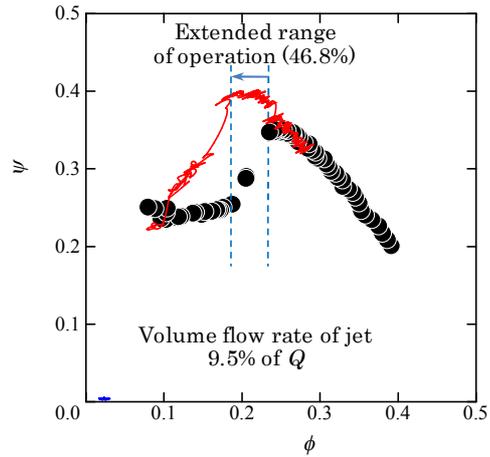


図2 翼端噴流印加による能動失速制御

図中の赤の軌跡が噴流印加後の圧縮機運転点の非定常挙動である。印加する噴流量は圧縮機定格運転流量の9.5%の際に効果は最も顕著に表れ、安定作動領域を設計流量状態から46.8%拡張することができた。この失速能動試験に際しては、失速予兆現象を把握するための手段として圧縮機壁面静圧変動の相関解析を利用した。圧縮機動翼1回転分に相当する12枚の動翼について、その通過時の壁面静圧波形に対して相関解析を実施し、相関係数を算出する。設計点のような安定な運転点では、同一翼の圧力波形は酷似しているので、相関は極めて強く、相関係数もほぼ1の値を示す。流れが不安定になると、相関係数は徐々に低下するので、この相関係数に閾値を設定して失速の予兆現象把握に用いた。本方法は失速予兆を検知するための計算量も少ないため、高速圧縮機にも適用が可能であり、その有効性が確認された。

(3) 旋回失速・サージ共存系の挙動調査：供試圧縮機実験装置は、容積タンクが直列に接続されているため、ダイヤフラム弁を瞬間的に開放すると、圧縮機系の容量要素が大きくなり、系がサージ挙動を示すことが知られている。この本設備特有の特徴を生かし、旋回失速とサージが共存する状態が実現できる。

まずは定常な運転状態から圧縮波を印可すると、運転点が安定であっても系は不安定状態となり、サージと旋回失速の共存状態に陥る。しかしこの際のサージ軌跡は、運転点の状態に大きく依存し、異なるサージサイクルを描くことになる。その一例を図3に示しておく。性能曲線の極大値付近で圧縮波を印可すると、系は図3中に赤い軌跡で示したような大きなサージサイクルを描いて振動する。これは安定な運転状態と、全段失速状態との間を移動する大規模な変動であり、大きな圧力・流量変動を伴う。一方、全段失速状

態からサージに突入すると、安定な運転点までは圧力が回復せず、図中に青色の軌跡で示したように、動翼先端部分で局所的に失速領域が確認できるマイルドな失速状態までしか回復しない。これに伴いサージのサイクルも小さくなる。一方、図中に破線で示した流量係数 $\phi=0.191$ の場合のように、特性曲線の右上り領域内での運転中にサージが発生すると、前述した2種類のサージサイクルが不規則に選択される不安定な状態となる。このサージサイクルの選択には、圧縮機動翼内の非定常流れ構造が大きく影響していることを実験的に示した。

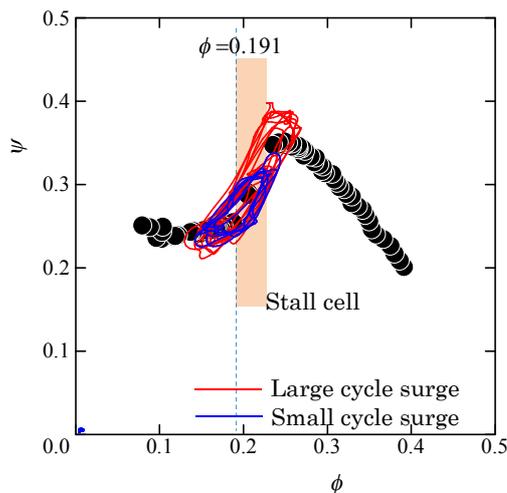


図3 サージ・旋回失速共存系の挙動

図3中に色付けして示した領域は、動翼先端部分に失速セルが発生している。赤で示した大きなサージサイクルでは、1サイクル当たり2回失速セルの発生が確認できる。一方、青で示した小さいサージサイクルでは、流量回復によって失速セルが2回発生する場合と、1回発生したセルが消滅せずに長時間に渡って存在する場合が不規則に発生することが図より明らかである。また、サージサイクルが不規則に選択される過程でも失速セルの存在は大きな役割を果たし、動翼内に発生した失速セルが小さく微弱になると、動翼列内の流路ブロックageが小さくなるために圧縮機流量は大きく回復して、サージサイクルも大きくなる。一方、動翼内の失速セルが十分発達すると、流路ブロックageが増大して流量の回復を妨げるため、サージサイクルも小さくなるのである。

この失速セルの成長に伴う流路ブロックageの増大とサージサイクルの選択過程は、壁面圧力変動および軸流速の非定常波形に対してWavelet解析を援用することで明らかにすることができた。

以上より、サージの挙動は系の容積要素や慣性要素によって定まる基本周波数に

対して、従来は固有値解析を行って決定されてきたが、圧縮機動翼列の非定常内部流れ場が大きく影響を与えていることが明らかとなった。これにより、サージの発生防止や抑制について、内部流れ場の友好的な制御によって達成できる可能性が指摘され、今後の研究課題となる。

サージ周期と内部流れ構造に関する予備的検討として、小さいサージサイクルが発生している運転条件下で、動翼先端上流側から噴流を印加して圧縮機内部流れ構造を変化させる試みを行った。小規模サイクルサージ発生中に失速流量の2.4%の噴流を印加し、内部流動を人為的に変化させると、大規模サイクルサージ状態に変化した。また噴流印加を停止すると、もとの小規模サイクルサージ状態に戻った。これは、噴流印加によって流路ブロックageとなる失速セル等の乱れが抑制され、流量変動が起こりやすくなったために大規模サイクルサージに変化したと考えられ、内部流動構造がサージサイクルに影響を与えていることの証であろう。

(4) 圧縮機非定常挙動に関する数値解析研究：圧縮機の全体特性と大規模な流れ構造を調査するための、3次元RANS計算と、局所的な非定常流れ構造を調査するためのRANSとLESのハイブリッド計算法であるDES計算コードの開発を行った。どちらの計算コードもまず本研究室で実験および汎用数値計算コードによって資料が蓄積されている遠心羽根車の内部流動に焦点を当て、計算コードと乱流モデルの妥当性の検証を实

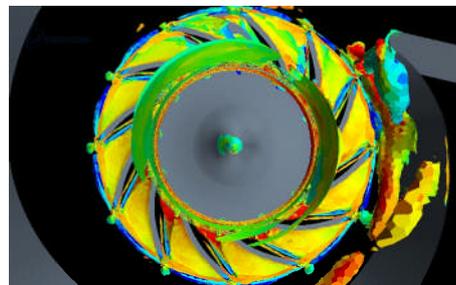


図4 非定常渦の挙動に関するCFD結果

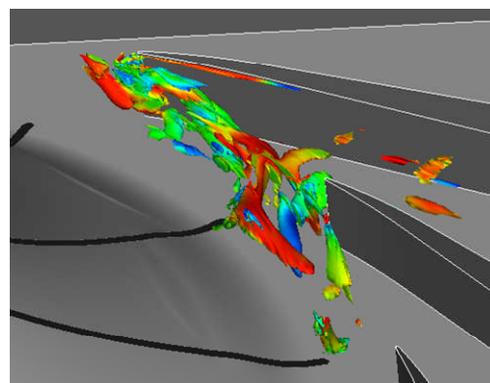


図5 DESによる非定常渦の計算結果

施した。計算結果の例を図4に示しておく。

図4に示した例では、遠心羽根車内の大規模な流動構造と、外周近傍を旋回する非定常渦の存在を確認することができる。このような非定常渦の存在は、側板を有する遠心羽根車では初めて確認されたもので、遠心機に発生する旋回不安定擾乱の一因であることが判明した。

一方、DESを用いた詳細計算では、羽根車一翼間を計算領域として、微細な渦構造を調査した。一例を図5に示しておく。この結果、遠心羽根車の出口近傍で剥離流れに起因した渦が次第に成長して旋回渦となる過程を把握することができた。また、ディフューザ翼前面シュラウド側に前縁渦が発生し、流量の低下とともに成長してディフューザ内に流路ブロックが形成されていく過程を明らかにすることができた。このように本研究で開発を行った2種類の計算コードはいずれも過去の研究資料と対比して極めて類似した結果を残すと共に、詳細な渦構造の把握によって全体性能に与える影響も合わせて検討することが可能となった。遠心機の計算結果で妥当性の検証が確認された後に、本試験装置ような3段軸流圧縮機の場合に適用して、サージと旋回失速併存系の非定常挙動を引き続き調査していく予定である。

以上のように、本研究は研究期間の3年間において、実験装置の設計・製作から各種計測実験の実施、および2種類の数値計算コードの開発に至るまで、軸流圧縮機の非定常現象の解明を指向した総合的な研究を行い、多くの有益な知見と従来報告されていない遠心機の旋回不安定擾乱の把握など、様々な成果を挙げる事ができた。

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4件)

- ① Takayuki Hara, Daisuke Morita, Yutaka Ohta, Eisuke Ota, “Unsteady Flow Field under Surge and Rotating Stall in a Three-stage Axial Flow Compressor”, Journal of Thermal and Fluid Science, 査読有, Vol.20, No.1, 2011, pp.6-12.
- ② 後藤尚志, 太田有, 大田英輔, “遠心圧縮機ディフューザに発生する前縁渦の非定常挙動と制御”, 機論 (B編) 76巻 772号, 査読有, 2010年12月, pp.2039-2049.
- ③ Takashi Goto, Eri Omoto, Yutaka Ohta, E.Ota, “Noise Reduction and Surge Margin Improvement Using Tapered Diffuser Vane in a Centrifugal Compressor”, Journal of Thermal and

Fluid Sciences, 査読有, Vo.19, No.1, Jan.2010, pp.21-25.

- ④ Tomoya Okada, Atsushi Kawajiri, Yutaka Ohta, ” Stall Inception Process and Prospects for Active Hub-Flap Control in Three-Stage Axial Flow Compressor”, Journal of Thermal and Fluid Sciences, 査読有, Vol.17, No.4, Nov. 2008, pp.324-330.

[学会発表] (計7件)

- ① Daisuke Morita, Yutaka Fujita, Yutaka Ohta, Eisuke Ota, “Unsteady Behavior of Surge and Rotating Stall in an Axial Flow Compressor”, 10th ISAIF, 2011年7月, Belgium, 発表決定.
- ② Daisuke Morita, Yutaka Fujita, Yutaka Ohta, Eisuke Ota, “Characteristics of Surge and Rotating Stall in a Three-stage Axial Flow Compressor Using Shock Tube”, AJK2011-FED, 2011年7月, 浜松, 発表決定.
- ③ T. Hara, D. Morita, Y. Ohta, E. Ota, “Unsteady Flow Field under Surge and Rotating Stall in a Three-stage Axial Flow Compressor”, Proc. the 3rd Asian Joint Workshop on Thermophysics and Fluid Science 2010, Sept. 2010, Matsue.
- ④ 原隆幸, 太田有, 大田英輔, “衝撃波管を用いた三段軸流圧縮機の失速過渡特性に関する研究”, 日本機械学会 2010年度年次大会, 2010年9月, 名古屋工業大学.
- ⑤ 佐々功治, 原隆幸, 太田有, 大田英輔, “衝撃波管を用いた軸流圧縮機の失速過渡特性”, 第22回翼列研究会, 2009年12月, 早稲田大学.
- ⑥ 佐々功治, 太田有, 大田英輔, “衝撃波管を用いた軸流圧縮機の失速過渡特性に関する研究”, 日本機械学会 2009年度年次大会, 2009年9月, 岩手大学.
- ⑦ T. Okada, A. Kawajiri, Y. Ohta, ” Stall Inception Process and Prospects for Active Hub-Flap Control in Three-Stage Axial Flow Compressor”, Proceedings of 2nd Asian Workshop on Thermo and Fluid Science, May 2008, China.

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