

# 博 士 論 文 概 要

## 論 文 題 目

航空エンジン圧縮機の不安定作動に対する  
能動安定化の試み

A Trial of Active Stall Control  
for  
Instability of Aero Engine Compressor

申 請 者

氏 名

たはら	のぶゆき
太原	信之

専攻・研究指導  
(課程内のみ)

--

2006 年 11 月

本論文は航空機用ガスタービンに使われる軸流圧縮機に関するものであり、空力技術と制御技術の融合による新たな手段により、旋回失速やサージといった不安定現象で制限されている圧縮機の作動域の拡大を試みる能動安定化に関わる研究である。

第1章「序論」では、研究の目的と概要を述べる。

第2章「航空エンジンの実態と動向」では研究対象である航空用ガスタービンおよび圧縮機を紹介し、工学的および歴史的背景から研究のニーズを述べる。

燃料費は取得費、整備費などの直接運航費用の多くを占めるため、エンジンの燃料消費率低減を目指す産業界における技術開発のモチベーションは高い。ガスタービンの総合効率向上には2つのアプローチ、すなわち推進効率および熱効率の改善がある。航空工学的な推進効率の向上には飛行速度に見合った排気速度が必要なため、エンジン形態が派生しターボファンのバイパス比が増加する一方、熱機関的な熱効率の向上を目指してシステム温度および圧力比が高度化してきた。これらの背景を理論的に説明するとともに、運用エンジンのトレンドで確認する。

なかでも高圧力化はガスタービンの主要構成要素である圧縮機に課せられた責務であり、一般に圧力特性のピーク近傍でその作動限界を決定する旋回失速およびサージといった不安定現象が存在し、それは機体のマニューバリングなどによる作動条件の変化の激しい航空エンジンにおいて最も深刻な問題のひとつである。

運用における実際問題および従来研究から検討し、不安定現象の要因を1)設計本質的なものと2)変動的なものに分類する。可変静翼や始動抽気などの従来の静的な回避方策は設計本質的要因には有効であるが、変動的要因に対する方策は確立していない。このため仕様設定段階で変動的要因の大きさを見込んだ失速マージンを確保することにより信頼性を維持しているのが現状であり、圧縮機のピーク特性は十分に発揮されていない。

これに対し、不安定現象の直前に現れる特徴的な流れの変動に応じて抑制操作する動的方策の研究が進んでいる。動的方策は不安定現象の直前に実行するので変動的要因を見込む必要がなく、失速マージンによる作動制限を緩和できる可能性がある。中でもフィードバックにより変動を認識しクローズドループ操作する「能動安定化」について、精力的な研究が展開されている。

第3章「研究の方法」では、本研究で用いる研究装置類について述べる。

実機において不安定現象は始動などの低速条件でも多く発生するので、動翼速度にかかわる流体の圧縮性は必要条件とは考えられない。本論文では旋回失速の発生メカニズムの一端を探る基礎研究として、翼端相対速度  $Mn=0.26$  を有する低亜音速圧縮機を使用する。能動安定化では失速セルの初生を可能な限り早期に捉え、その発達を抑制する必要がある。旋回失速の起点となる局所的な流れの変化に対する翼列レベルの抑制操作を検討するため、試験圧縮機は平行流路をもつ同

一段の繰り返しにより 3 段までの拡張が可能であるが，本研究ではほとんどの試験を単段形態で実施した。

試験圧縮機のほか，計測系および駆動系の実験器材とともに，本論文の柱を構成するハブ失速法に関わる試験装置類も先行してここで紹介する。

第 4 章では「失速抑制技術」について考える。能動安定化は，不安定現象の切迫する圧縮機内の流れに特徴的な変化を見出す失速警報技術および，その本格的な不安定現象への発達を抑制する失速抑制技術の 2 つの技術で構成される。スロットルを含む圧縮システム全体のマクロ的考察を先に展開する論文構成の意図から，後者を先に考える。

旋回失速への移行形態には急激な圧力低下が不連続的に起きるアブラプト型および圧力低下が徐々に進行するプログレッシブ型があり，本論文では航空エンジン圧縮機の多くで発生し深刻な問題となっているアブラプト型を扱う。現象がこれらに分かれる理由は単に翼失速だけでは説明困難であるが，圧縮機流路内における剥離の発生部位により圧縮機特性の全圧損失増加率が異なることに注目し，スロットル特性の関係で決まるシステム安定性の観点からその物理メカニズムを検討する。

試験圧縮機を例にして全圧損失増加率は一般に動翼端が大きいことを示し，旋回失速制御には翼端の剥離防止が重要であることを述べる。空気流量が不足する条件下で失速領域が形成されることは圧縮機の自然なメカニズムであると認識した上で，それを制御すべく全圧損失増加の小さいハブ周囲に集約し，旋回失速の起点となる翼端側へ入口流れを偏向することにより安定化する新たな失速抑制手法（ハブ失速法）を提案する。

ハブ失速法は、翼端ジェット法のように外部からのエネルギー供給がなく低亜音速圧縮機の特性格化をそのまま失速抑制効果として評価でき，また可変案内翼法のように大規模な機械部品を高速揺動させないのでハードウェア作動に無理がない利点がある。

数学モデルを使った安定性解析およびハブフラップを固定した定常試験でハブ失速法の成立性を理論的，実験的に検証する。さらに動翼端近傍の軸方向流速を維持するハブフラップ制御を適用したクロズドループ試験によりハブ失速法の有効性を確認する。多段への適用についても検討したが，有効性の実験的確認は設備的制約から 2 段までにとどまった。

第 5 章「失速警報技術」では一転して圧縮機内部流れのミクロ的観察から，能動安定化の事実上の課題である短尺度擾乱への対応として，その顕在化以前に変化の現れる失速警報手法を考える。

試験圧縮機のケーシング壁面圧力に基づく圧力コンターに，動翼間を流量低下にともない前方に変移し，失速直前に後続動翼の前縁を向く翼端漏れ渦の軌跡を認めた。短尺度擾乱はこの翼端漏れ流れが動翼前方に飛び出たものであることを

3次元数値解析により明らかにした従来研究もあることから，翼端漏れ渦の軌跡の動翼周りのこのような挙動を原理として，旋回失速の進行を短尺度擾乱の発生前に捉える手法の可能性がある。翼端漏れ渦は翼間主流と干渉し，翼間主流の圧力波形に乱れを生じるので，動翼前縁位置で捉えた圧力波形の乱れを自己相関係数で定量化した前縁相関係数を提案する。

ケーシング壁面圧力の時系列データの統計的な相関解析により旋回失速の初生を検出する提案は従来から存在したが，相関解析は一般的に多くの周波数に埋もれた波形を調べるのに利用され，FFT解析を必要とする。本手法も基本的に遅延時間をロータ周期とする自己相関係数であるが，周波数をロータ回転数に固定し波形の類似性を実時間で評価するので，計算負荷が著しく軽い特徴がある。

前縁相関係数の有効性を評価する過程で，その低下領域がケーシング周方向に特徴的な発達を示すことが認められ，その理由を物理的に明らかにする。前縁相関係数はケーシング位置あるいは動翼における旋回失速の進行を表すローカルなパラメータであり，1ヶ所の前縁相関係数でシステムの旋回失速リスクを判断することは困難であるが，その低下は旋回失速発生の必要条件であると考えられる。圧縮機の能動安定化には，ケーシング全周方向位置において前縁相関係数低下の必要条件が揃う前に失速抑制操作を行うことが求められる。

第6章「能動安定化試験」では，第4章および第5章で考案したハブ失速法と前縁相関係数を組み合わせたシステムを試験圧縮機に適用し，能動安定化を試みる。考案したハブ失速法および前縁相関係数を組み合わせたシステムを適用した試験圧縮機は，90度の扇型プレート挿入して付加したステップ的な周方向ディストーションに対して安定作動の継続を示し，能動安定化の実現が確認された。

第7章「結言」では以上，一連の研究活動を総括する。研究成果を示すとともに残された課題および得られた技術の実用化ポテンシャルなど将来展望について述べる。本論文の成果を総括すると，

- (1) ハブ失速法を提案し，失速領域の存在自体が旋回失速を招くのではなく，それが動翼端に発生することによる急激な全圧損失増加がシステムを不安定にすることを明確にした。
- (2) 不安定現象の主たる変動的要因である翼端間隙およびインレットディストーションに対し有意な反応を示し，短尺度擾乱の顕在化以前に変化の現れる前縁相関係数を提案した。これは，時間的余裕のない短尺度擾乱への対応が大きな技術課題となっている能動安定化研究において一つの解決を与えた。
- (3) 短尺度擾乱を示す圧縮機で能動安定化を成立させた。

本研究は発表後も国内外から活動が注目されており，本論文の成果に基づく，多段形態への適用を含む実機適用に向けた今後の活動に大きな期待が寄せられる。

- 以上 -

# 研 究 業 績

種 類 別	題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）
論文	Early Stall Warning Technique for Axial Flow Compressors ASME Journal of Turbomachinery, April 2007, Vol.129, p.1-9 Tahara, N., Kurosaki, M., Ohta, Y., Outa, E., Nakajima, T., Nakakita, T.
論文	軸流圧縮機でのアクティブストール制御の研究 第1報“あるストール 警報手法” 日本ガスタービン学会誌 Vol.34, No.3 p51-56, 2006年5月 太原信之, 太田 有, 中島卓郎, 黒崎正大, 大田英輔
論文	軸流圧縮機でのアクティブストール制御の研究 第2報“あるストール 抑制手法” 日本ガスタービン学会誌 Vol.34, No.3, p57-63, 2006年5月 太原信之, 太田 有, 黒崎正大, 大田英輔
論文	Early Stall Warning Technique for Axial Flow Compressors GT2004-53292, Proceedings of ASME Turbo Expo 2004 2004年6月 Tahara, N., Kurosaki, M., Ohta, Y., Outa, E., Nakakita, T., Tsurumi, Y.
論文	Early Pre-stall Investigation by Sensitive Stall Warning Technique IGTC2003Tokyo TS-044, 2003年11月 Tahara, N., Kurosaki, M., Ohta, Y., Outa, E., Shinohara, H.
講演	Active Stall Control with Practicable Stall Prediction System Using Auto-Correlation Coefficient AIAA2001-3623, 2001年7月 Tahara, N., Nakajima, T., Kurosaki, M., Ohta, Y., Outa, E
講演	Active Stall Control in Axial Flow Compressor Using Artificial Hub Stall AIAA97-2656, 1997年7月 Tahara, N., Kurosaki, M., Ohta, Y., Outa, E., Chiba, K
講演	ハブストール方式によるアクティブストール制御 日本ガスタービン学会第11回ガスタービン秋季講演会, 1996年11月 太原信之, 黒崎正大, 太田 有, 大田英輔, 千葉 薫
	-以上-