

平成 21年 6月 5日現在

研究種目：基盤研究（B）
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19360380
 研究課題名（和文） 革新航空エンジンに向けたウェーブロータ要素の作動域限界と最適制御
 研究課題名（英文） Investigation of Wave Rotor Operation and Control for Advanced Aero Engines
 研究代表者
 長島 利夫 (NAGASHIMA TOSHIO)
 東京大学・大学院工学系研究科・教授
 研究者番号：70114593

研究成果の概要：

本研究では、特に小型ジェットエンジンへの搭載を想定したマイクロウェーブロータに関する研究を行った。数値解析においては、給排気ポートまで含めた大規模解析を行い、ロータ流路内部の圧力波伝播だけでなく、給排気ポート内部の非定常性や迎角の有無による状態量の変化など、定常・非定常変換デバイスとしての特性を重視した議論を行った。実験においてはプロトタイプ実験機の作動試験を行い、特に小型の場合に問題となる漏れ流れの抑制、及び供給ガスの温度比をパラメタとした作動特性と内部流動を議論した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	7,500,000	2,250,000	9,750,000
2008年度	4,700,000	1,410,000	6,110,000
年度			
年度			
年度			
総計	12,200,000	3,660,000	15,860,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：航空宇宙工学，ウェーブロータ，衝撃波，ガスタービン

1. 研究開始当初の背景

近年、CO₂排出削減の要求が高まる中、航空機用エンジン(ガスタービン)に対しても、さらなる性能向上が求められている。しかし、サイクル最高温度の上昇や高バイパス化、各要素技術の改善といった従来のアプローチは、既に非常に高いレベルに達しており、今後大幅な飛躍を得ることは困難であると考えられる。こうした状況の中、サイクル最高温度を飛躍的に上昇させ、サイクル効率を大幅に改善することが可能な技術として注目

されるのがウェーブロータである。

ウェーブロータは、回転軸周りに円筒面状に多数のチューブ(衝撃波管)を束ねた回転ロータを持ち、両端のポートと呼ばれる開孔ダクトを介してチューブ内部に燃焼ガスと空気をタイミング良く供給し、発生させた衝撃波による圧縮過程を利用するデバイスである。ウェーブロータは、その特殊な作動原理と簡単な構造によって、熱対策が不要、あるいは非常に容易であるため、トッピングサイクルとしてガスタービンに搭載すれば、

懸案のタービン冷却技術上の制約をクリアし、サイクル効率を飛躍的に改善できると期待されている。

ウェーブロータをガスタービンに要素として組込む検討は、NASA Glenn 研究所を中心に米国でも進められており、汎用エンジン予備試験や1次元流動モデルを基にしたシステム解析などが行われている。一方、これまでに行われたサイクル解析によると、小型のエンジンに搭載したほうが、より大きな性能向上が期待できるとされている。しかしながら、これまでに検討されてきたのは比較的大型のものであり、小型ウェーブロータに関しては検討が始まったばかりである。

2. 研究の目的

より大幅な性能向上が見込める小型ガスタービンへの搭載を想定したマイクロウェーブロータの実用化を目指し、数値解析とプロトタイプ実験機を用いた作動試験の両面から、作動特性の理解、及び特に小型化に伴って生じる諸問題の解決を目指す。

3. 研究の方法

(1) 数値解析

ロータ内部の衝撃波伝播だけでなく、給排気ダクト内部の流動に対する理解を深めるために、ロータ全体と全てのダクトを同時解析できる2次元解析ツールを構築する。本解析では、特にポート迎角と内部流動の関係を明らかにし、ポート設計における知見を得ることを目指す。ウェーブロータの内部流動は、ロータ内部が非定常状態であるのに対して、給排気ダクト内部は定常状態であることが理想であり、ロータとポートの境界面における定常・非定常変換が鍵となる。そのため、数値解析モデルにおいても、ロータとポートの領域境界面における数値モデル上の取り扱いには十分留意する必要がある。本解析コードでは、ラグランジュ補間を用いて近似関数を求めることによって、異なる格子点分布を持つ領域の接続を行うこととした。

(2) 作動試験

まず、小型ウェーブロータにおいて問題になると予想される漏れ流れを抑制するために、高温下でも使用可能な特殊アブレイダブルコーティングを採用し、ゼロクリアランスでの運転を目指す。さらに、実験条件を実際にガスタービンに搭載した場合の作動状態に近づけるために、供給する高圧ガスを加熱、及び低圧ガスを冷却することで所定の温度比を与えることを目指す。高圧側には電熱ヒータを使用し、低圧

側には液体窒素を用いた低温ガス供給装置を考案・適用した。

4. 研究成果

(1) 数値解析

図1に、ポート迎角を0度とした場合 (Case A) と、ロータに対する相対迎角が0度になるように調整した場合 (Case B) の解析結果を示す。両者を比べると、Gas HP内に伝播している圧力波の強度に差が見られた。また Case A では Air HP内の図中に示した位置付近で1次元的な圧力波が見られるのに対して case B では明確な圧力波が見られないことも分かった。一方、ロータセル内での圧力波伝播は両ケースでおおむね一致しており、設計時に想定されたものと定性的な相違はなかった。

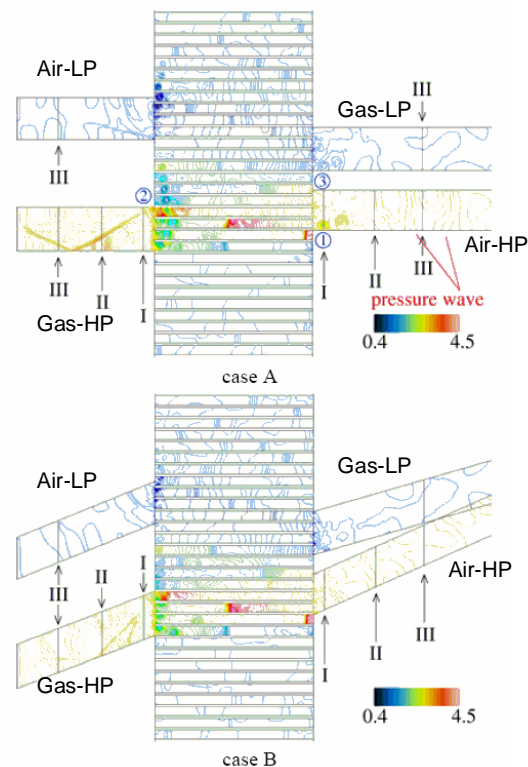


図1 全体解析結果(静圧分布)

図2及び図3に各ポートでの質量流量と全圧の時間平均値(棒グラフ)と変動量(折れ線グラフ)の割合を示す。当初、相対迎角がある場合は有効流路断面の減少により平均質量流量に影響が現れると考えていたが、実際には質量流量の時間平均値には大きな差は見られず、全圧にも同様に時間平均値に差は見られなかった。一方、時間変動の振幅は case A と case B の間

で差が見られた。顕著な違いが見られるのは高圧流体の流れる Gas HP と Air HP であり、適切なポート迎角をつけることで Gas HP では質量流量，Air HP では質量流量と全圧の時間変動が抑制された。

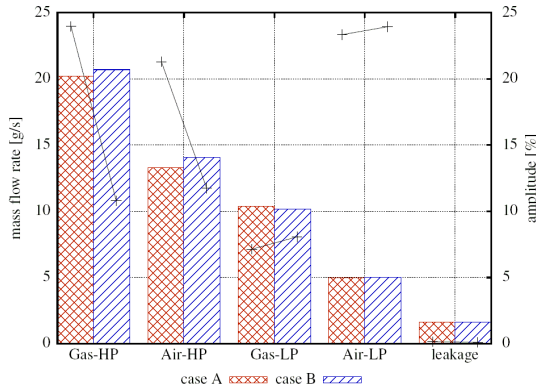


図2 ポート内質量流量 (時間平均値及び変動量)

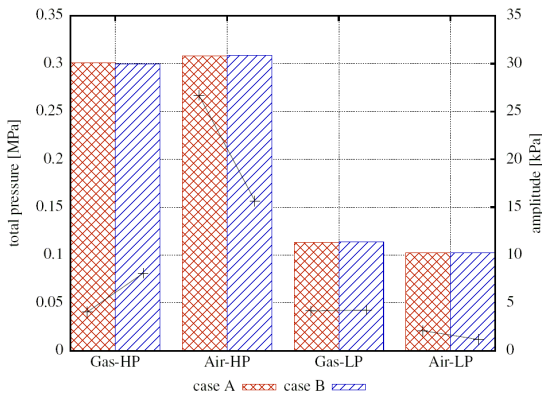


図3 ポート内全圧(時間平均値及び変動量)

以上のようなポート内部の状態量の時間変動は、ロータとポートの境界面付近での非定常流れによって引き起こされると考えられる。そこで、特にポート迎角による影響が大きく現れた Gas HP と Air HP について詳細に調べたところ、迎角の有無によって、ポート及びロータ流路壁面上に生じる剥離領域に差が現れ、さらにその差が圧力波の伝播プロセスに影響を与える場合もあることが分かった。また、特に Air HP においては、迎角が無い場合にはポートからの逆流が生じていることも分かり、こうした流動構造の変化が最終的に時間変動量の差に現れることが明らかとなった。

さらに、ロータを回転させるために必要なトルクについて比較したところ、迎角を設けない場合は設けた場合に比べて2倍以上のトルクが必要であることが分かり、内部流動の観点からだけでなく、システム全体の性能の点からも、適切な迎角を設けることは重要であることがわかった。

(2) 作動試験

漏れ流れ抑制

図4に、本実験で用いたプロトタイプ実験機を示す。小型ウェーブロータにおいて大きな問題となる漏れ流れを抑制するために、アブレイダブルコーティングを導入することによって、ゼロクリアランスでの運転を達成することを目指した。後に述べる高温実験でも適用可能であることを考慮し、コーティング材料として CoNiCrAlY - boron nitride / polyester (Sulzer Metco® 2043)を採用した。この素材は小型タービンのケーシングへの適用実績があるものであり、1000K以上の高温下での使用が可能なものである。

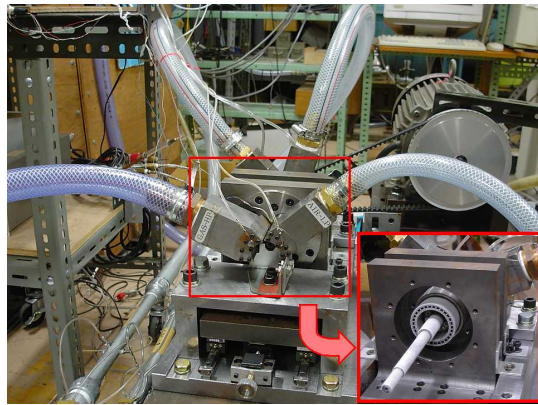


図4 マイクロウェーブロータ

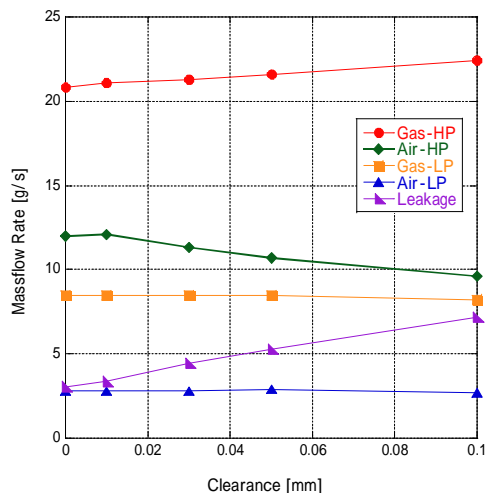


図5 ポート質量流量

図5に、クリアランスを0~0.1mmに変化させた場合の各ポート流量及びそれらから算出された漏れ流量を示す。これを見ると分かるように、0.1mmから0mmにすることによって、漏れ流量は半減している(7.2から3.1g/sに減少)。クリアランス0mmにおいても漏れ流れが生じているのは、セッティングの誤差などが原因と考えられ、未だ改善を必要としているものの、アブレイダブルコーティングを採用することによって漏れ流れを大幅に軽減できることが確かめられた。

入口温度比をパラメタとした作動試験

本研究で使用した実験機において所定の入口温度比を達成するには、実験環境を考えると、高温側を加熱するだけでなく、同時に低温側も室温より下げることが必要であると判断された。そこで、低压空気入口に、液体窒素を用いた低温窒素ガス供給装置を新たに製作し、用いることとした(図6)。装置は2重構造のタンクとなっており、真空断熱が施されている。実験においては、最初に液体窒素をタンク内に充填しておき、電熱ヒーターによって気化した低温の窒素ガスをウェーブロータ本体に供給する。窒素の流量はヒーターに投入する電力によって調整される。

この装置を用いた場合の各ポート温度を図7に示す。これを見ると分かるように、いずれの回転数においても、低压空気入口ポート(Air-LP)において、概ね200K程度の窒素ガスを供給できていることが分かる。また、Air-LP温度の変化に対する相関がAir-HP(高压空気出口ポート)温度にのみ現れていることから、供給された低温

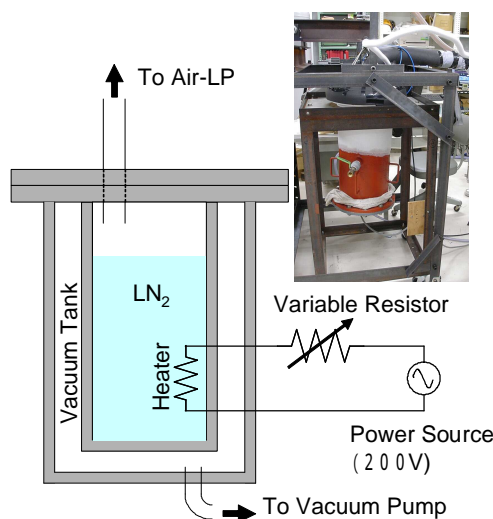


図6 低温窒素ガス供給装置

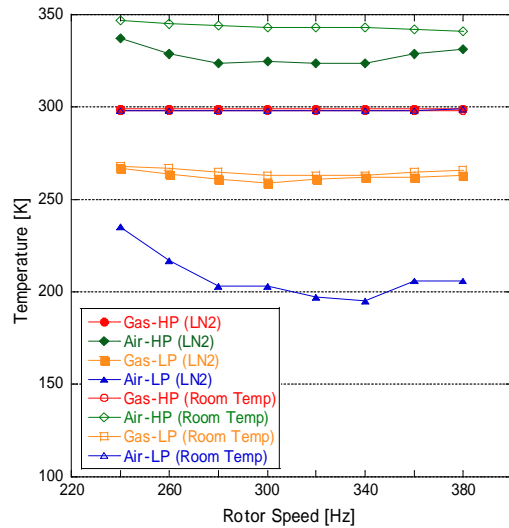


図7 ポート温度(低温窒素供給)

窒素が圧縮された後に、Air-HPに流出していると考えられ、適切な給排気が行われていることが確認された。また、ロータ流路端での非定常圧力計測の結果、温度変化による衝撃波の伝播速度変化が確認され、その変化量は設計用の数値モデルによる予想と良く一致することが確認された。

一方、高压側の加熱については、Air-LP温度が200Kを達成できることが確認されたことから、設計温度比は600Kと定められ、電熱ヒーターによる過熱を行うこととした。これを用いた実験で得られた各ポート温度を図8に示す。ただしここでは、上記の低温窒素供給装置は使用していない。この結果を見ると分かるように、高压ガス入口ポート(Gas-HP)において、概ね450Kまで達成できていることが分かる。また、

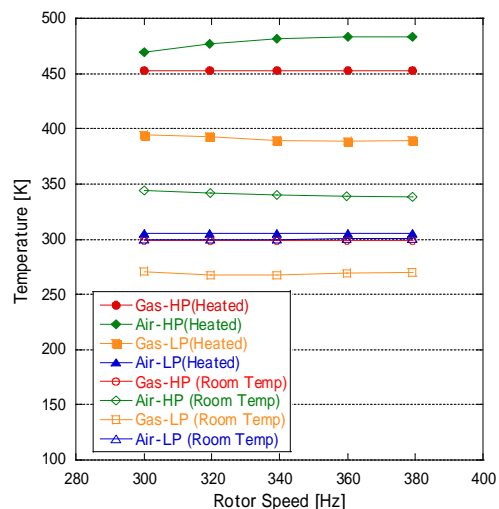


図8 ポート温度 (Gas-HP 加熱)

これに伴って、低圧ガス出口ポート (Gas LP) だけでなく, Air HP の温度も上昇している。これは、設計で採用したサイクルでは, Air HP には圧縮された空気に加えて、再循環されるガスも流出されるようになっているからである。なお、現状では Gas HP 温度が目標の 600K を達成できていないが、これはヒーターの能力不足ではなく、ロータの熱膨張によるクリアランスの変化が著しく、これ以上の加熱を行うことはできなかつたためであり、加熱した場合のクリアランス制御については、依然課題として残されている。

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)

Okamoto, K., and Araki, M., “Shock Wave Observation in Narrow Tubes for a Parametric Study on Micro Wave Rotor Design,” *Journal of Thermal Science*, Vol. 17, No. 2, pp134-140, 2008, 査読有

[学会発表](計 6 件)

岡本光司, “マイクロウェーブロータの作動における温度変化の影響”, 日本航空宇宙学会第 49 回航空原動機・宇宙推進講演会講演論文集 CD-ROM Proceedings, 長崎, 2009 年 3 月 5-6 日
真田章宏, 寺本進, 岡本光司, “ポート迎角がウェーブロータ内部流動に及ぼす影響に関する研究”, 日本航空宇宙学会第 49 回航空原動機・宇宙推進講演会講演論文集 CD-ROM Proceedings, 長崎, 2009 年 3 月 5-6 日

K. Okamoto and K. Yamaguchi, “Clearance Variation Effects on Micro Wave Rotor Operation”, D7-1, Asian Joint Conference on Propulsion & Power (AJCPP) 2008 & 日本航空宇宙学会第 48 回航空原動機・宇宙推進講演会 CD-ROM Proceedings, 慶州 Mar. 6-8, 2008

K. Okamoto and T. Nagashima, “FUNDAMENTAL WAVE PROCESS IN NARROW TUBES FOR MICRO WAVE ROTOR APPLICATION,” IMECE2007-43338, Proceedings of 2007 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, in Seattle, Nov. 12-15, 2007

Koji OKAMOTO, Kazuo YAMAGUCHI, and Toshio NAGASHIMA, “Experimental

Setting Effects on Micro Wave Rotor Operation,” ISABE-2007-1168, International Symposium on Air Breathing Engine, in Beijing, Sep. 2-7, 2007

Koji OKAMOTO, Kazuo YAMAGUCHI, Mikiya ARAKI and Toshio NAGASHIMA, “Shock Wave Observations in Narrow Tubes for Parametric Study on Micro Wave Rotor Design”, ISAI8-0068, 8th International Symposium on Experimental and Computational Aerothermodynamics of Internal Flows, in Lyon, Jul. 2-5, 2007

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長島 利夫 (NAGASHIMA TOSHIO)
東京大学・大学院工学系研究科・教授
研究者番号: 70114593

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

寺本 進 (TERAMOTO SUSUMU)
東京大学・大学院工学系研究科・准教授
研究者番号: 30300700

山口 和夫 (YAMAGUCHI KAZUO)
東京大学・大学院工学系研究科・助教
研究者番号: 90270892

岡本 光司 (OKAMOTO KOJI)
東京大学・大学院工学系研究科・助教
研究者番号: 70376507