

平成 21年 6月 5日現在

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2007～2008

課題番号：19760561

研究課題名（和文） 遠心型ウェーブロータの設計開発と小型宇宙熱発電システムへの応用

研究課題名（英文） Development of Radial Wave Rotor for Power Generation System in Space

研究代表者

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

研究成果の概要：

本研究では、遠心型ウェーブロータの内部流動と設計プロセス、特に軸流型との相違点に着目して研究を行った。まず内部流動解析においては、断面積が変化する流路内部を圧力波が伝播する場合に、従来の軸流型のように断面積変化が無い場合と比べて、その伝播速度がどのように変化し、結果として給排気ポートをどのように設計すればよいかについて知見を得た。さらに、宇宙での利用を想定した場合、回転数が制限されることから、諸々の設計パラメータ制限を課した上で設計検討を行い、プロトタイプ的设计・製作を行った。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,800,000	0	1,800,000
2008年度	1,500,000	450,000	1,950,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	450,000	3,750,000

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，流体工学，衝撃波，ウェーブロータ

## 1. 研究開始当初の背景

近年、国際宇宙ステーション(ISS)建設や月及び火星への有人宇宙飛行計画のように、宇宙開発のミッションは大規模化及び複雑化の傾向が見られ、ミッションにおける電力需要も増加の一途をたどっている。現在使われている発電方法としては太陽電池が最も一般的であるが、必要電力の増加に対応するために太陽電池パドルは大型になりがちである。また、ISSのような超長期ミッションあるいはバンアレン帯の外側で一定期間以

上運用するミッションの場合には、宇宙線による性能劣化の影響も無視できず、状況によってはパドルの交換も必要になることから、より小型で運用が容易な発電方法が期待されている。

長年研究されてきている宇宙発電方法のひとつとして太陽熱発電が挙げられる。熱発電の最大の特徴は、太陽電池に比べて高効率、高出力密度(出力/重量 or 容積)が期待できる点である。例えば、ISSで使用されている太陽電池の発電効率は5.6%であるのに対して、

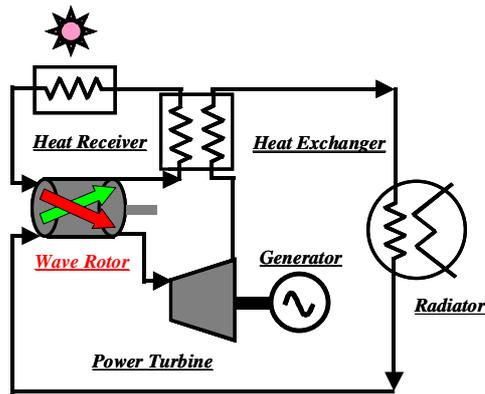


図 1 Closed Wave Rotor Cycle

熱発電の場合は 20～30%程度が達成できると見込まれている。さらに、余剰の熱を利用すれば、システム全体の効率は一層良くなることが期待できる。

現在のところ、宇宙熱発電サイクルとしてブレイトンやランキンなどが考えられているが、これらは概ね 10kW 以上の出力を想定している。そこで本研究では、さらに小型の熱発電システムとして閉鎖系ウェーブロータ発電システムを提案する(図 1)。このような小規模の発電システムを構築することによって、より多彩なミッションへの適用だけでなく、クラスタ化して利用することによってシステムの信頼性を確保できることといった利点が期待できる。

ウェーブロータは、管路内における衝撃波の非定常伝播を利用して流体の圧縮膨張を行う流体機械である。ウェーブロータは通常の翼列機械と比べてシステムをコンパクトにでき、回転数も翼列機械に比べて低く設定できることから、宇宙利用を目的とした小型熱機関として極めて有望であると考えられる。

従来のウェーブロータは、流体の圧縮膨張を衝撃波伝播によって行うためにほとんど軸トルクを必要としないことを利点としているが、図 1 のシステムでは逆にそのために、動力を取り出すためのタービンが必要となっている。そこで本研究では、従来の軸流型ウェーブロータに対して流路を放射状に並べた遠心型のウェーブロータを提案する(図 2)。これは流路を遠心型にすることによって、ロータの回転に必要なトルクの確保及び得られたエネルギーを電力として取り出すことを容易にし、将来的には動力タービンを不要としてシステムを簡素化することを念頭においている。また、ウェーブロータの設計ではロータ回転数と流路長さは概ね反比例する関係にあるため、回転数を低く抑えたい宇宙利用の場合には流路が長くなりがちであると考えられる。そうした場合でも軸流

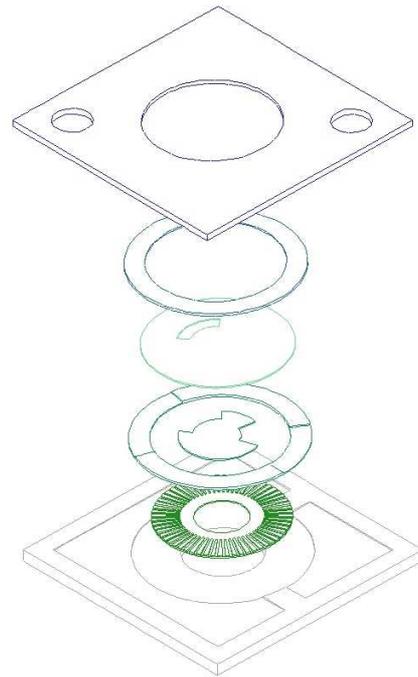


図 2 遠心型ウェーブロータ (コンセプト)

型に比べてロータ製作が容易である点も、遠心型を提案する理由の一つである。

## 2. 研究の目的

本研究では、遠心型ウェーブロータの設計が従来の軸流型とどのように異なるかを明らかにし、適切な設計パラメタの検討を行ったうえで、プロトタイプ製作を行うことを目的とする。

## 3. 研究の方法

まず設計パラメタの制限を明らかにした上で、遠心型ウェーブロータの諸元を決定する。そしてその設計を対象として、遠心型ウェーブロータのポート設計が従来の軸流型とどのように異なるかを、2次元数値解析によって明らかにする。ウェーブロータ設計にはロータ流路内部を伝播する圧力波の伝播速度の見積が不可欠であるが、遠心型では流路断面積が変化する流路を圧力波が伝播するため、これによって伝播速度が軸流型の場合と異なる可能性があるため、これに関する知見を得る。そしてその知見に基づいて適切な設計を得たうえで、プロトタイプ製作を行う。

#### 4. 研究成果

##### (1) 設計パラメタ検討

ウェーブロータの設計パラメタとしては以下の3つが挙げられ、それぞれの値の大きさが、各要因に起因する性能損失の大小を表している。

- ・有限流路開口時間：

$$\tau = \frac{\text{Passage Opening Time}}{\text{Wave Travel Time}} = \left( \frac{W_{cell}}{r\omega} \right) / \left( \frac{L}{a} \right)$$

- ・壁粘性： $F = L/D_h$
- ・漏れ流れ： $G = 2\delta/H_{cell}$

(L:セル長さ, W:セル幅, H:セル高さ, a:音速, r:ロータ半径,  $\omega$ :ロータ角速度,  $\delta$ :クリアランス,  $D_h$ :セル水力直径)

まずパラメタの制限としては1以下であることが必須であるが、過去の設計例を参照すると0.5以下であることが通例である。次に、Fパラメタの制限であるが、これは壁粘性による運動量損失を表しているため、小さければ小さいほど良い。ここで、流路が小さい場合に懸念されるのが、単純に壁面せん断応力による損失だけでなく、境界層と衝撃波の干渉が起こることで性能が大幅に低下する可能性である。

そこで、予備実験として長さの異なる小型衝撃波管を用いた可視化実験を行った。衝撃波管の長さは、F値に換算して14と56に相当する。この実験の結果、F=56の衝撃波管においても衝撃波が伝播する様子が明瞭に

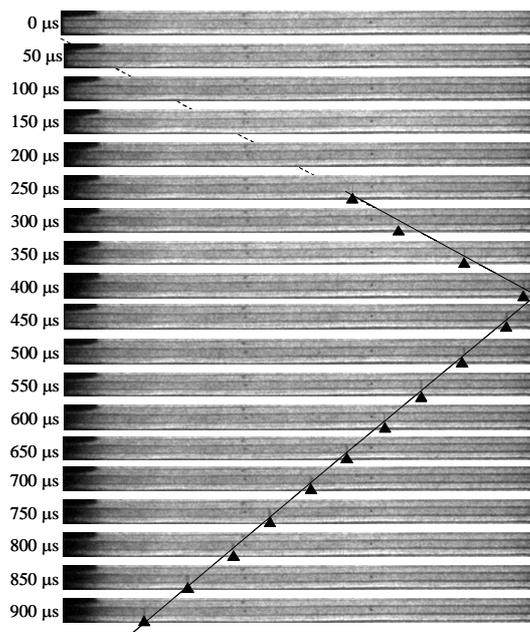


図3 衝撃波可視化 (F=56)

観察され、壁面境界層との干渉は見られないことが確認された(図3)。以上のことから、F値についてはできるだけ小さいほうがよいものの、50程までは衝撃波伝播が阻害されることは無いと判断された。なお、過去の設計例では、一部の特殊なものを除いて20程度以下となっている。

最後にGパラメタであるが、過去の設計例を参考に、0.05以下に抑えるのが妥当と判断した。

以上の設計パラメタ値制限に加えて、様々な設計上の制約条件(ロータ周速は亜音速でなければならない等)を考慮して、以下のような諸元に決定した。ただし、Gパラメタの値については、既存の軸流型ウェーブロータのクリアランス値0.05mmが達成できると仮定した場合の値である

ロータ外径	80mm
ロータ内径	20mm
ロータ回転数	40000rpm
流路数	36
セル高さ	3mm
	0.33
F	10
G	0.033

##### (2) 2次元数値解析

前節で、設計パラメタの値に基づいて諸元を決定したが、さらに給排気ポートの設計を行うためには、流路内部を伝播する圧力波の伝播速度を知る必要がある。これまでの研究では軸流型についてのみ解析を行ってきたが、遠心型では流路断面が変化するために、圧力波伝播が変わる可能性がある。そこで、同等の軸流型流路との圧力波伝播プロセスの比較を行うことを目的とした2次元数値解析を行った。なお、ポート配置としては外周側に吸気ポート、内周側に排気ポートを配置し、流れが外から内に向かうようにした。これは、実際に実験を行う際に、駆動モータのトルク不足を回避するためである。

図4にポートがセルに対して開き始める時刻を基準として70 $\mu$ s経ったときの内部流動の様子を示す。これはちょうど最初の衝撃波が右端に到達するタイミングである。これ

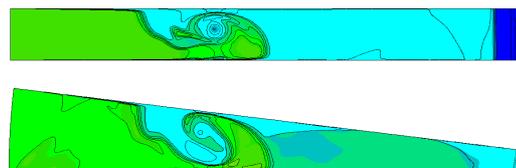


図4 衝撃波到達タイミングの差 (遠心型と軸流型の比較)

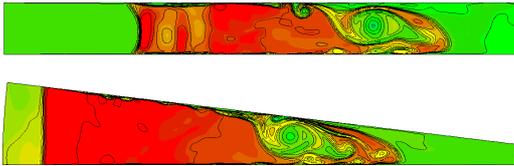


図5 反射衝撃波到達タイミングの差  
(遠心型と軸流型の比較)

を見ると、遠心型のほうが若干衝撃波の伝播速度が速いのが分かる。これは流路が狭まっているために衝撃波の集積プロセスが早くなっているためであると考えられる。ただし、実際問題としてはこの差は非常に小さく、無視できる程度であるとみなせる。一方、150 $\mu$ s経ったときの内部流動の様子を示したのが図5である。これは反射衝撃波が左端に到達する直前に相当するが、図4に比べて差が非常に大きくなっているのがわかる。これは、遠心型と軸流型では流路断面積の違いによって流入ガスの流速分布が異なるため、流れに逆らって伝播する反射衝撃波の伝播速度に大きな差が現れたと考えられる。

以上のことから、特に高圧ガス入口ポートの閉まるタイミングについては補正が必要であると考えられ、最終的には2次元数値解析結果を用いて給排気ポート設計を行った。

### (3) プロトタイプ製作

以上の設計及び解析を元に、プロトタイプ実験装置の試作を行った(図6)。ポート配置は、外側2ポート内側1ポートの3ポートフローディバイダタイプとした。これは、NASA Glen Research Center 等において軸流型ウェーブロータ実験で採用されているタイプであり、熱ループシステムにも応用できると期待されているものである。

実験装置としては組上げ精度に難があり、特に外周側のクリアランス制御が困難であることが、課題として残されている。

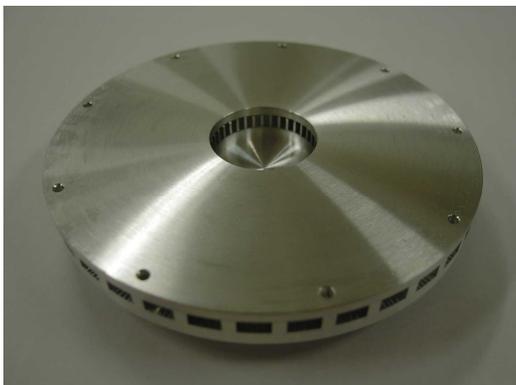


図6 ロータ

## 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, 査読有

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, 査読有

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 8., 2008, 査読有

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.14, 2007, 査読有

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.4, 2007, 査読有

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 Lyons, Jul.4, 2007, 査読有

6 . 研究組織

(1)研究代表者

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

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし