

航空機推進機用外周駆動ファン実現に向けての検証実験

[論文賞(日本航空宇宙学会)「航空機推進機用外周駆動ファンに関する実験および解析」平成21年4月10日]

日大生産工 ○野村 浩司

1 まえがき

本日本航空宇宙学会論文賞は、航空宇宙工学と航空宇宙産業に貢献する論文に対して、日本航空宇宙学会が与える賞である。受賞論文は、宇宙航空研究開発機構の岡井敬一氏、田頭剛氏、および柳良二氏との共同研究成果をまとめた論文であり、航空推進機用外周駆動電動ファンの提案から、理論解析結果、実験結果までを網羅して記述した。日本大学は、主として実験の部分を担当した。新しい概念である外周駆動電動ファンは、その駆動機構と推進機システムの部分で、国内外の4件の特許を取得することができた。共同研究は現在も継続しており、発電システムのトッピングサイクルとしての燃料電池、ボトムリングサイクルとしての水素ジェットエンジンに関連する実験的研究を日本大学が担っている。

2 外周駆動電動ファンの提案

航空輸送量の増大に伴い、航空用エンジンから発生する排気や騒音の環境に対する悪影響が、従来に増して問題視されるようになっていく。現用の航空機の多くで採用されているターボファンエンジンのさらなる環境適合性向上を目指し、各国で盛んに研究開発が実施されている^[1]。クリーンエンジンプロジェクトやエコエンジンプロジェクトなど、それぞれに顕著な成果があり、当面はターボファンエンジンの性能改善が航空用エンジンの環境適合性向上の鍵となる。

一方で、自動車などの地上用機関の効率・環境適合性向上を目的とした電動化（ハイブリッドシステムや燃料電池導入）からわかるように、中長期的視野に立てば電動航空機の導入は望ましいと考えられる。NASAは、環境適合性を飛躍的に向上させる航空機検討、ゼロエミッションプロジェクトにおいて、燃料電池航空機を一案として提案している。関連した検討も進められているが、その検討の多くが現有の電動モータを利用するものであり、

大型機の電動化を考えれば、新しい概念の大口径・軽量ファンの導入が必要と考えられる。

また、航空用エンジンの要求推力は、離陸・巡航・着陸の飛行条件により大きく異なる。ターボファンエンジンは、大きなファン直径を有し、離陸時の最大推力に対して前面投影面積が設計されているが、この大前面投影面積は巡航時には過大であり、大きな抵抗を発生する。極端な必要推力の差に対処するため、離陸時にアフターバーナを使用する方法が考えられるが、アフターバーナの使用は、効率と環境適合性の両面から適切ではない。

受賞論文の著者らは、推進機の効率・環境適合性向上と前面投影面積変化を可能にする手段を検討した結果、軽量・大口径電動ファンの導入に至った。論文では、電動航空機での使用に適した外周駆動電動ファン（以下、電動ファン）および電動ファンを用いた可変前面投影面積推進機システムを提案し、電動ファンの駆動原理を実証した。

3 電動ファンの駆動原理

現状のターボファンエンジンに用いられているファンの問題点は、口径増大に伴う大幅な重量の増大である。その内、主軸の重量増大の影響は大きい。したがって、軽量・大口径のファンを実現する手段の一つが、主軸で動力伝達を行う機構を別な軽量機構へ変換することである。図1に、受賞論文で提案した電動ファンの概要を示す。この電動ファンは、コンデンサと組み合わせられた励起コイルをファン外殻内側に配し、変動する大電流を供給しすることによって、励起コイルに相対するファン外周上に配された回転コイルに駆動力を発生させる機構となっている。すなわち、動力伝達を担う主軸は必要ない。励起コイルは同種のものが円周上内向きに配されているが、隣り合わせのコイルは交互にその役割を変えている。図2に、ある時点における回路電圧等と生成磁場を例示した。動力生成のため

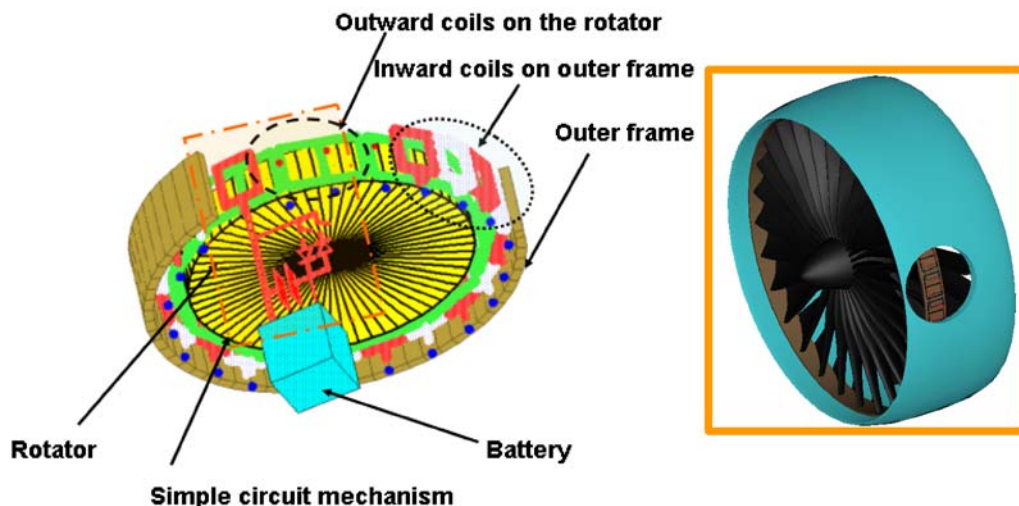


図1 外周駆動電動ファンの概略

の磁場・生成電流の発生期間は、励磁コイルとコンデンサによるLC回路の特性によって決められる。この周期を極めて小さくすることで、事象は準静的過程と捉えることができる。図2-(1)には動力を与える一周期分のコイル構成を示し、図2-(2)および2-(3)には動力発生時の磁場発生コイルと誘導電流発生コイルの役割をそれぞれ示す。これら磁場発生コイルおよび誘導電流発生コイルは、隣り合う励起コイルの機能を便宜的に決めただけであり、それぞれは全く幾何学的に同一の構成であって、その役割は各々の励起コイルの初期位置によって決まる。ここでは、ファンの駆動機構について、一つの ∞ 型回転コイルMとそれを取り囲む励磁コイル（便宜的に誘導電流発生コイル、磁場発生コイル、誘導電流発生コイルの順に B_i , A_{i+1} , B_{i+1} ）に対して説明する。このように、磁場発生コイルおよび誘導電流発生コイルは交互に配置される。励起コイルに与える電圧の変化、およびそれに応じてコイルに発生する電流、磁場および力を図3に示す。励磁コイルに与えられる電圧・電流変化は、図1に示されるようなコイル本体、コンデンサ、電圧供給源、スイッチデバイスの組み合わせで実現される。 A_i , A_{i+1} のように、一つおきにある同一機能のコイルは、位相を逆転させる。

磁場発生コイル A_{i+1} の中心と ∞ 型回転コイルMの中心交差点が一致する瞬間（図2-(2)に示されている状態のとき）に、コイル A_{i+1} に対して電圧印可スイッチのトリガを発信する。電圧印可は、サイリスタの一方がONになることでなされる。コイル A_{i+1} に流れる電流は正弦

波的に変化し、対応してコイルA内に誘導磁場が誘起される。コイル A_{i+1} の両脇にある電流誘起コイル B_i と B_{i+1} には、磁場発生コイル A_{i+1} の電流値が最大になった時点で電圧を印可する。電流発生コイルBに流れる電流によって発生するコイルB内の変動磁場により、回転コイルMのループ内に誘導電流が流れる。この誘導電流を生成する効果は、電流発生コイル B_i と B_{i+1} で倍化される。このようにして、図では重なって表示されている回転コイルMの交差部分に、磁場発生コイルAと電流発生コイルBがそれぞれ磁場と電流を発生させ、結果としてこれらのベクトル外積方向に回転コイルは駆動力を発生する。ここで、磁場発生コイルAも ∞ 型回転コイルMに対して誘導起電力を発生させるが、 ∞ 型回転コイルMの対称性から ∞ 型回転コイルMの誘導電流には寄与しない。

個々の励起コイル（磁場発生コイルAならびに電流発生コイルBとして機能）には、図1のような回路でコンデンサ、スイッチ群、ダイオード組が接続されている。前述の一連の過程を一周期と呼ぶとすると、一周期で半周期分の正弦波的に電流が各励起コイル回路を流れ、コンデンサは元と反対の極性で充電される。すなわち、未使用エネルギーが受動的にコンデンサに再充電される。再充電されない回路抵抗による損失分は、LC回路のインダクタンス L および容量 C の選定により、通電時間を短くすることによって相対的に減少させることができる。すなわち、電流の時間変化率を大きくし、誘導起電力（誘導電流）を増大させることで、回路抵抗による損失を減少させることが可能である。ファン駆動および回

路抵抗損失として消費した分のエネルギーは、電力供給源から周期毎に補充される。したがって、初期状態を除き、運転中は補充分の電力を供給すればよい。

以上のように、未使用のエネルギーを回収するLC回路構成であるため、コイルインダクタンスをむやみに大きくする必要がなく、重量インパクトが大きい鉄芯を使用しなくて済む可能性がある。コイルに鉄芯がなければ、ヒステリシス損失や渦電流損が生じない。また、磁場の飽和が起こらないため、電流の限界もなくなる。回路抵抗による損失は、前述の周期短縮により抑制できる。電流の制約がなくなることで、大電流で電動ファンを駆動させることが可能となる。

4 電動ファンの原理実証実験

電動ファン駆動原理を実証する目的で小規模な電動ファン模型を試作し、運転試験を行った。製作した模型を図4に示す。回転円板外周部に、 ∞ 型回転コイルを12個等間隔で設置した。 ∞ 型回転コイルは、銅板を ∞ 字型に整形して製作した。外殻部内側には、図2で例示した励磁コイル群（2個の誘導電流発生コイルと1個の磁場発生コイル）を一組配置した。この模型では、励磁コイル群を一組とし、電源電圧を200 Vとしたため、大きな駆動力は期待できない。図に示される以外にも、試作装置には極性変化を伴う充電回路を備えている。電圧の制限による電流値の制限に対応して回路のインダクタンスとコンデンサ容量を適切に設定することにより、回路抵抗損失は大きいものの、電動ファン模型を定常回転させる程度の駆動力を発生させることができ、提案した電動ファンの回転原理を実証することができた。実験結果から、回転出力は0.1 W程度であることがわかった。一組の励磁コイル群が一周で発生する出力は、励磁コイルへの印可電圧の4乗に比例すると推定される^[2]。十分な電圧を印可することで、現用ターボファンエンジンのファン程度の駆動力を確保することは可能であると考えられる。

5 電動ファンを利用した推進システム

外周駆動電動ファンは、動力伝達軸を必要とせず、電力輸送配線と、その他必要な配管のみが外部と結合しているため、可動性を有する固定が可能となると考える。この長所を生かした電動ファン適用例が、図5に示される航空機推進システムである。航空機は通常、

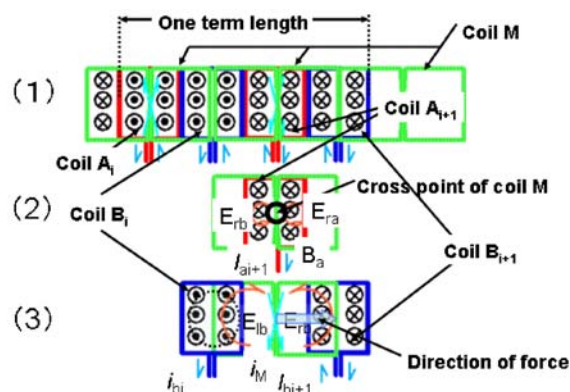


図2 電動ファンの駆動機構

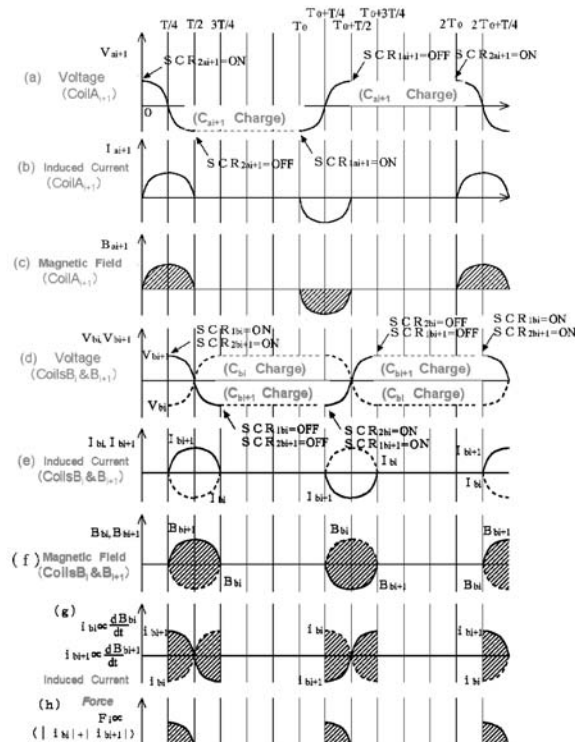


図3 励磁コイルへの印可電圧と励磁コイルに発生する電流、磁場、および力

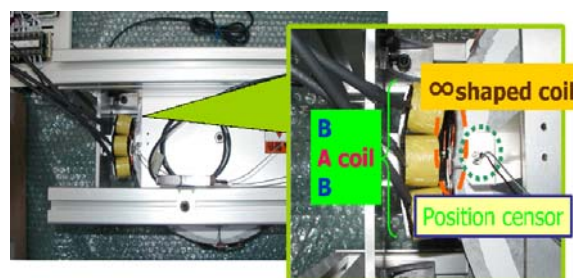


図4 電動ファン模型



図5 外周駆動電動ファンの適用例

離陸時に最も大きな推力を必要とし、巡航飛行時には推力をあまり必要としない。最大推力発生時に合わせて設計された推進機の前面投影面積は、巡航飛行時には大きな抗力の発生に繋がる。図に示す例では、片翼に2機の電動ファンを備えており、外側の電動ファンは可動式である。巡航時において、外側の電動ファンを折りたたむことにより、抗力低減を図ることができる。また、離陸時も可動ファンは任意に推力ベクトル方向を変えることが可能であるため、従来の高揚力装置に比べて簡便に揚力増大を図ることが可能である。電動ファンを用いることで推進機前面投影面積と推力方向の適切な設定が可能となり、推進システムとしての高効率化を期待できる。

6 まとめと今後の予定

受賞論文では、環境適合性を高めるとともに、機体システムとしての効率向上を目的とした、従来のガスタービン形式にとらわれない航空機用推進機のプロトタイプ概念検討結果を示した。現在広く利用されているターボファンエンジンの環境適合性は、ターボジェットエンジンなどに比較して高い。ターボファンエンジンの機構を踏まえると、ファンのバイパス比をさらに高め、加えて環境適合性がより高いファン駆動コアエンジン（現在はターボジェットエンジン）を導入することが、ターボファンエンジンの今後の課題であると考えられる。このような考え方を延長し、電動の軽量・大口径・高効率ファンの概念を提示した。また、提案した電動ファンの軽量・可動性を活用した高効率機体システムも同時に示した。電動ファンの簡易モデルを試作し、駆動原理に基づいて作動することを確認した。

米国を中心として、国内外では燃料電池を利用した環境適合性の高い航空用推進機に関する検討が進められている。しかしながら、燃料電池システムの重量が大きな障害となっているのが現状である。燃料電池をはじめとする発電システムの軽量化に加え、推進システムを構成する他の要素の軽量化・高効率化

も非常に重要である。今後、提案した電動ファンを基軸とした航空用推進システムの成立性ならびに効率向上の検討を実施する。

参考文献

- 1) T. J. Weckenheiser, A. K. Sehra, G. T. Seng, and J. J. Berton, "Emissionless Aircraft: Requirements and Challenges", AIAA 2003-2810, (2003).
- 2) K. Okai, H. Nomura, T. Tagashira, and R. Yanagi, "Analytical and Experimental Approach for the Investigation of Electric Airbreathing Engines", ISABE 2005-1162, Munich, Germany, 2005.