航空機推進用外周駆動ファンに関する実験および解析^{*1} Experimental and Analytical Evaluation on the Potential of an Electromagnetic Driving Fan Concept

岡 井 敬 一^{*2}・野 村 浩 司^{*3}・田 頭 剛^{*2}・柳 良 二^{*2}

Keiichi OKAI, Hiroshi NOMURA, Takeshi TAGASHIRA and Ryoji YANAGI

Key Words: Engine, Environment, Electromagnetic Motion, Fan

Abstract: An experimental and analytical investigation for a newly proposed electromagnetic-driven fan concept is described. Environmental friendliness in aviation is a key feature in the development of future air-breathing engines, and a desirable technology to be introduced is an electromagnetic motion fan system, because it will tremendously reduce the total operating emission, reduce weight, increase maintainability and increase energy efficiency. The proposed fan concept has a potential to satisfy the requirements and also possess many other applications such as vector thrust operation. The present paper shows the result of the testing of a concept verification model and the result revealed the importance of the controlling parameters to produce efficient power transmission. The accompanying analytical result further explains the motion mechanisms and gives suggestions for the novel design of the fan system.

1. は じ め に

航空機の輸送需要は、今後も伸びることが期待されている。一方で航空機に関する環境適合性に対する要求は同時に高まりを見せている。各国政府や企業は、航空用エンジンの環境適合性を高める取り組みを積極的に行い、一定の成果を挙げている。

自動車や様々な産業分野においてより一層の環境適合性向上を求め得る電動機や燃料電池複合機関の研究開発が盛んに行われているものの、これを航空機に適用するためには、いまだそのパワ密度が小さいのが現状である。飛行体の動力として電動機を用いる試みは、定点滞空の飛行船や、軽飛行機、模型飛行機などで行われている。たとえば、燃料電池を動力源にした航空機の解析検討については、文献 1)、2) などがある。しかし、推進系の電動化に際しては、動力源のみならずプロペラなど推進機構の径増大に対する重量増大の問題は大型航空機に適用する際には容易に解決し得ないといえる。

近年のターボファンエンジンの導入、ファンバイパス比の増大は、燃料消費と騒音低減の観点から航空エンジンの環境適合性の飛躍的改善に貢献してきた。一方で、現状のエンジンのファンバイパス比は 10 程度に抑えられている。このことの主技術的な原因として、バイパス比を増大させることによる軸重量の増大、タービン回転数の制約（ギア・タンデム導入が解決に必要）、また現状技術では単純に

燃料消費率がバイパス比の増大で単純に改善するわけではないこと、などが挙げられる³⁾。したがって、ファンの駆動が（低圧）タービンの回転数と独立しておりかつバイパス比の拡大が重量の大幅増につながらないことが、現状のターボファンを大きく超える環境適合性を有するファンエンジンにとって重要であることがわかる。電動のファンであれば、ファン動力源の排気特性の向上のみならず、潤滑など機構の簡略化・可動性の増大を望むことができる。

著者らは、以上の背景に鑑み、電動の航空用推進機の可能性を検討し、電動ファンを搭載することによって高速航空機で問題になる離陸時大推力（エンジン入口面積）と高速巡航時の抵抗低減両立を可能にする可変入口面積エンジンシステムならびに大口径で効率的な電動で駆動するファンを可能にする外周駆動電磁回転機（以下、電動ファン）について提案し、基礎的検討を進めてきている。第 1 図に、この電動ファンを搭載した場合の機体の想定図を示す。同図では典型的な亜音速機形状で描かれており離陸時の推力偏向が強調されているが、高速巡航時のファン折りたたみは、超音速機のような高速機により適合する概念であるこ

第 1 図 可変断面面積ファンを搭載した航空機概念図

^{*1} © 2008 日本航空宇宙学会

平成 19 年 8 月 22 日原稿受理

^{*2} 宇宙航空研究開発機構総合技術研究本部

^{*3} 日本大学生産工学部

第 2 図 電動ファンの概念図

とに注意する必要がある。このような折りたたみ式ファンの概念は、たとえば文献 4) に提示されているチップタービン駆動の可動ファンがあるが、本提案の電動ファンであれば可動による制約・付加的な損失が少ないため実現性と可動範囲が広いといえる。また、文献 5) に示されるように大型の将来航空機に対しては電動ファンの搭載が望ましいとされる傾向がある。本報告は、電動ファンの概念を導入するとともに、実証模型試験結果を示し併せて簡易解析を通じて回路パラメタの影響について考察を行うものである。

2. 電動ファンの概念

本電動ファンの概念図を第 2 図に示す。従来のファンは、同軸のタービンからの軸動力によってファンを駆動するものであり、口径が大きくなり軸重量が大きくなると全体重量が大きくなってしまい、また潤滑の難度も増す。ファンを電動駆動とすれば、ファンの配置をコアエンジンと同軸にする必要がなく、推力偏向や折りたたみによる高速巡航時抵抗低減などの運用も可能である。著者らが提案する電動ファンは、外周部に駆動コイルを配し、回転体の回転コイルに電磁力を非接触に印加することにより回転力を与えるものである。モータとしては、扁平型の誘導モータの形式をしており、配置および力伝達機構はリニアモータとしても利用可能なものである。従来のモータは、鉄心を用いることで強い磁力を得ているが、鉄心を用いることは、特に大口径の回転体に適用する際には重量ペナルティとなる。そこで、鉄心を用いる代わりに、パルス的に変動する大電流を駆動コイルに流すことで、駆動コイル側に磁場ならびに電流を誘起する機構とした。大電流を短時間流すことで、駆動に必要な磁場および電場を確保できるとともに、抵抗による損失積分時間を極力短く抑えることで効率の低下を抑制するものである。鉄心を排することで、鉄心ありの際に問題となる渦電流損などの損失による制約がなくなる。本電動ファンはリニアモータのような開口構造をしているため、漏れ磁束など効率低下をもたらしやすく、鉄心がないために駆動コイルと回転コイル間の磁気結合力が弱く、そのまま利用される磁気エネルギーは小さいことが考えられる。この点については、駆動コイルをコンデンサと接続することで、正弦波回路的に使用し未使用の電磁エネルギーを回収

第 3 図 駆動原理説明図

することで全体効率の増大を図ることになっている。各駆動周期ごとに、コンデンサには不足分だけを充電すればよい。以上のように、電動ファンは、(1) 外周駆動による比較的小さい駆動力によって大トルクを発生することができる、(2) 鉄心を除き、大電流を印加することで駆動力を与える相対時間を制限し、抵抗損を極力排し、鉄心なしにより各種制約を排することができる、(3) 駆動コイルと電源の間にコンデンサを介し、LC 回路として使用することで未使用電磁エネルギーを回収し効率増大を図ることができる、という特徴を有する。

第 3 図には、駆動原理を示すための説明図を掲げてある。第 2 図にも示されているように、電動ファン外殻部には内向きに同一形状の駆動コイルが配されており、対向して回転体外周部には、8 の字形の回転コイルが配置されている。駆動力を与える際には、回転力を発生する回転コイルの中心交差部に駆動コイルが対向し、駆動コイル両側に同一形状の隣接する駆動コイルが回転コイル 8 の字の輪にコイルの磁束が掛かるようになっている。第 4 図には、駆動力を与える際の回路履歴の一例を示している。8 の字コイルには、三つの駆動コイルが作用することになるが、8 の字中心交差部に磁束が掛かる中心部の駆動コイルが駆動力の内磁場を発生させるため、これを磁場発生コイルと称する(図では便宜上 A コイルと書くことがある)。両脇のコイルは駆動力の内電流発生に係るため、電流発生コイルと称する(図では便宜上 B コイルと書くことがある)。磁場発生コイル、電流発生コイルとも同様の LC 回路としての作用をするが、両者の違いは電磁力を発生する 8 の字コイルとの相対配置にある。すなわち、磁場発生コイルに対向する

第4図 駆動回路履歴図

点では8の字コイルはねじれており、ループの法線方向は交差部に対して逆向きとなりヌルフラックス接続されている⁶⁾。これに対し、両側の電流発生コイルは、それぞれ位相の反転した電圧波形をループの法線方向の逆転する8の字コイルの輪部に与えることで、同一方向の起電力を生じる。以上のように、隣接する駆動コイルは対向する回転コイルを介して結合していることになるが、ここでは便宜的に、電流駆動コイルの作用として回転コイルに電流が流れ、その状態で磁場発生コイルによる磁場と電流の相互作用で駆動力が発生するものとして説明する。第3図(a)には、第一のステップの電流発生について示されている(ただし、時間的に電流発生が早いわけではない)。電流発生コイルから、正弦波的に変動する電流によって、駆動コイルによる磁束が生じそれが8の字コイルに起電力を与える。続いて、第3図(b)に示されるように、ヌルフラックス接続された回転コイル部に磁場発生コイルからの変動磁場が印加される。この磁場と8の字コイルの誘起電流が回転力(回転方向の推進力)を与えるものである。このように、8の字コイルの形態は、対向する駆動コイルから電流発生、磁場発生双方が一つのターンで担われ、かつファン外周部

第5図 簡易回路モデル

の重量増加を抑制し、構造上も遠心力負荷が小さい構造として採用されたものである。第4図には、これらの過程が、電圧、電流、磁束密度、駆動力の変化として示されている。各過程はSCRと図中にあるようにサイリスタを用いて行われる。第4図における例では、1回の周期ごとにコンデンサは充電されているがその極性は各回反転している。後に示す実験形態では、極性反転がない条件を設定している。

後の解析のための簡単なモデルを第5図に、式を以下に示す。8の字コイルの電流発生については、一つのループで表現している。磁場発生コイルは、8の字コイルとの相互作用はないものとして、回路C0として式(1)で表現す

る．一方で，電流発生コイルについては，電流発生コイルを含む回路 C1 (式 (2)) と 8 の字コイルを模擬するループに係る回路 C2 (式 (3)) を連立して解く：

$$C0: R_1 i_0 + v_0 = -L_{11} \dot{i}_0 \quad (1)$$

$$\left[v_0 = \frac{q_0}{C_1} \rightarrow \dot{v}_0 = \frac{\dot{q}_0}{C_1} \right]$$

$$C1: R_1 i_1 + v_1 = -L_{11} \dot{i}_1 - L_{21} \dot{i}_2 \quad (2)$$

$$\left[v_1 = \frac{q_1}{C_1} \rightarrow \dot{v}_1 = \frac{\dot{q}_1}{C_1} \right]$$

$$C2: R_2 i_2 = -L_{12} \dot{i}_1 - L_{22} \dot{i}_2 \quad (3)$$

ここに，回転速度に対して駆動力の印加は極めて早く，その過程は準定常的に表現されるものと仮定している．力は 8 の字コイル 1 個分に対して，次のように書ける．

$$\vec{F} = (2\vec{l}_2) \times \vec{B}_A l \quad (4)$$

ここに， $\vec{B}_A$ は，回路 0 が相対する 8 の字コイルの交差部に与える磁場の磁束密度であり， l は力の作用する 8 の字コイル交差部の長さである．

一般に，磁場の作用するコイル間に生じる力は (コイルの自己インダクタンスが変化しない場合)，

$$F = i_1 i_2 \nabla M \quad (5)$$

特に x 方向の場合，

$$F_x = i_1 i_2 \frac{\partial M}{\partial x}$$

と書ける⁶⁾ (M は相互インダクタンス) が，これは，

$$\left. \frac{\partial M}{\partial x} i_1 \right|_A \approx B_A l$$

より，式 (4) と対応している． x 軸は回転 (推進) 方向， y 軸はファン流路方向， z 軸はコイル軸方向外向き方向を指す．ここで，力の発生する箇所が 8 の字コイルの交差部であるとしたが，電流発生コイル側両端などにも力は加わっている．しかし，これらはいずれも，回転の速度に対して十分に早く準定常的に駆動力を与えたとした場合，対称性から推進力には寄与しない．ただし，駆動力印加時の幾何学的不均衡はブレーキ力を与える可能性もあるため，設計・制御には注意が必要である．磁場発生コイル，電流発生コイルの回路開始タイミングについては，磁場発生コイルの 8 の字コイル交差部との対向時に行い，電流発生コイルの回路開始は，条件により磁場発生コイルに対して適当な遅れを与える．後に見るように，条件により異なる遅れ時間で最大トルクを与える．第 4 図に示す方法では，スイッチングに反対方向の一对のサイリスタを用いており，正弦波様の半周期で停止し逆相での充電が行われる．十分に短い時間に駆動力パルスを与え，各駆動パルス間隔で不足分の充電を行うための時間を確保する必要があり，コンデンサ容量は充電の時定数の観点からも制約を受けることになる．

なお，式 (5) の y 方向， z 方向成分を案内力，浮上力として利用することがリニアモータで行われている⁶⁾ が，本電動ファンの形態でも，電磁力に適切な分配や制御によって，回転体の支持力へ利用することも検討が行われている．ファンなど回転機構の電動化には，軸受け部分の簡素化と保守工程の低減が目標として掲げられており，磁気軸受けなどの研究も進められている．NASA による磁気浮上ダクトッドファン⁷⁾ もその一つであり，本電動ファンと同様に外周部を駆動機構としているが，磁気浮上に必要な磁力を得るために回転体に永久磁石を配しているため，航空推進のための重量要求を満足することは容易ではないと思われる．本電動ファンにおいても，軸受け・支持機構に関しては設計・制御の観点から，エンジン総体としての成立性を踏まえ検討を行っているところである．

3. 実験装置および解析方法

本研究においては，電動ファン概念を検証する模型試験と，対応した簡易解析を実施している．各々の方法について本節で説明する．

試験模型は，第 6 図に示すような形状をしている．原理を検証するための最小限の簡潔な構成として，第 7 図に示すように 8 の字コイル 12 個に対して，駆動コイルは 1 組 (ABA 3 個) のみとなっている．回転にしたがって逐次向かってくる 8 の字コイルに駆動力を与える形式である．第 4 図における原理の説明では，1/2 周期にわたる波形によって，逐次逆転する位相の充電を行う構成であったが，逆転する位相に対する充電は簡単ではないため，本実験では，別の方法として，1 周期にわたり波形を生成し同相の充電

第 6 図 実験装置写真

• In the case of experiment, one of the thyristors of each circuit is replaced with an diode and the polarity of condensers is kept unchanged.

第 7 図 試験模型概要模式図

を行うものであり、相対するサイリスタのうち一方をダイオードに変更している。損失が十分に小さい条件では、半周期、1 周期いずれでもよく、特に実験でのような 1 周期駆動の場合、コンデンサの極性の変換が必要なく、サイリスタ個数も半分で済むためより簡素な構成であるといえる。本試験では、駆動コイル数を最小にしたため、限られた駆動コイル数、電圧で駆動力を発生させることを目的として、駆動コイル内に鉄心を設けてある。

回転体は、軽量の円盤の周囲に銅製の 8 の字コイルを配している。8 の字コイルは、約 30 mm 直径相当の平板ループ (厚さ 1 mm) 二つを交差したものであり、平板での交差部絶縁は、絶縁紙を挟むことで行っている。アルミ円盤の厚みは 2 mm、直径 250 mm である。回転体は、直径 6 mm の中心軸を支持体に玉軸受けで支えることで支持されている。コンデンサへの充電は、定電圧電源 (最大電圧 1 kV、最大電流 1.2 A) を用いている。試験模型本体の構成は、3 組のコンデンサ、3 組のコイル、3 組の対向するサイリスタ・コンデンサによるスイッチング回路および回転部の 12 個の 8 の字コイルよりなる。駆動コイル部分を除き、850 V までの耐圧設計が施されている。コンデンサと電源間には、電源保護のため、可変保護抵抗が設けられている。コイルのインダクタンスと抵抗は、LCR メータ (HIOKI 製ハイテスタ 3522-50) により計測した。回転試験では、コイル、コンデンサ両端電圧計測、カウンタによる回転数計測、参照静止条件試験では加えて東陽テクニカ製 5170 ハンディガウスメータを使用した磁束密度計測を行った。計測値は、計測器 YOKOGAWA DL-750 に取り込み、接続されたコンピュータ上で処理した。

本模型は、駆動パルスを与えるタイミングを、磁場発生コイルの軸線を含む鉛直断面に配したポジションセンサによって、8 の字コイルの中心部が通過する時点を感じて行う。ある一定入力電圧、遅れ時間を設定した後、回転数がほぼ一定となった時点を実常回転と判断し、各種計測を実施した。なお、計測した回転数は、位置検知センサ信号をカウンタに取り込み、各信号受信が 1/12 回転であるとして換算することで得た。

なお、トルクの推算のために、回路定数および磁気定数を計測ならびに数値解析によって求めた。

計測によるコイルのインダクタンスおよび抵抗はそれぞれ、1.2 mH、3.6 Ω である。駆動コイルは、前述のように鉄心が入っており、軸線上の磁束密度分布を知るために、計測と計算を行っている。磁束密度の分布推定計算については、3 次元磁場解析ソフトウェア JMAG (日本総合研究所製⁹⁾) を使用した。計測には、計測プローブの挿入のために、回転円盤を取り外した状態で、各コイル (磁場発生コイルと電流発生コイルの一方) の軸線上にプローブを配した。試験と同様の LC 回路による電流波形をコイルに与え、発生する磁束密度履歴を LC 回路の電圧履歴とともに計測している。二つのコイルの磁束密度履歴は、2 電圧間の時間差と同様に時間差を持ったものとして得られた。このうち最大値についてコイル端からの z 軸距離依存性を、電磁場定

第 8 図 コイル周りの磁束密度分布図

第 9 図 コイル軸方向の磁束密度の変化

常数値解析結果と比較した。数値計算において使用したコイルの電流値は、後に示す簡易シミュレーションで磁場発生コイル単独の計算を行った結果から得たものである。第 8 図に、コイル周りの計算によって得られた磁束密度ベクトル分布の一例を示す。ここから予想されるように、回転体と外殻駆動コイルの間隔を如何に小さくするかが有効に電磁エネルギーを利用する鍵になることが見て取れる (これは、ファンにおけるクリアランスの問題解決と同様である)。第 9 図には、計測された磁束密度の距離依存性と、簡易シミュレーションから推定された電流値を用いて計算された磁束密度分布を比べたものである。距離が大きいと、実測値は計算値に比べやや小さいが、計測プローブがある範囲を持っていることと位置決め精度、計算が電流予想値を用いていることから判断すると両者は良い一致を見ていると判断される。以上から、コイル間の磁場の関係を決定した。回路に係る計測および計算による値は以下ようになる：

$$L = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} \\ L_{21} & L_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.2e-3 & 0.2 \times (1.2e-3) \\ 0.2 \times (2e-7) & 2e-7 \end{bmatrix} \quad [\text{H}]$$

$$R = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4 \\ 2.4e-3 \end{bmatrix} \quad [\Omega]$$

$$C = (20e-6), (40e-6) \quad [\text{F}] \quad (2 \text{ 通り})$$

第13図 回転数と周期時間の時間遅れに対する変化

第14図 回転速度と入力エネルギーの関係

第15図 実験における無次元遅れ時間と電圧回復率の関係

刻を τ , 1 周期相当の時刻を τ_s としている。

第13図には、2種類のコンデンサ容量に対して、いくつかのコンデンサへ充電エネルギーの場合の、遅れ時間に対する回転速度の関係を示す。ここで本稿では、実験において τ を正確に見積もることが困難なことがあったため、これを $\tau_s/4$ で代用している。

この図から、各充電エネルギーに対して、ある遅れ時間で

回転数が最大値をとること、最大値をとる遅れ時間は同一コンデンサ容量であれば電圧が異なっても同じだが、容量が異なる条件では最大回転数を与える遅れ時間は異なることがわかる。また、遅れ時間に従い、1回のパルスの時間 τ_s が増大することがわかる。 τ_s の時間(1パルスの終了時刻)は、磁場発生コイルの波形によって決まるが、この波形が、回転によって影響を受けていることを示唆している。

より詳細な検討に際しては、このような回転時の磁気相互作用に伴う波形変動にも注意する必要がある。すでに記したように、同一エネルギー入力に対して、波形のパルス時間が短い方が、抵抗による損失が比較的小さい(効率が低い)と考えられる。LC 回路の回路時定数は、 $\sqrt{LC}$ であるため、二つの電気容量の場合では、容量の小さい方が損失が小さく効率が低いと考えられる。第 14 図には、コンデンサの充電エネルギーに対する回転数を示す。二つの容量値に対しては、小さい容量の方が高い回転数を達成していることがわかる。エネルギーの回収という観点での効率は、第 12 図中に定義されている電圧の回復率が参照になる。第 15 図に実験における電圧回復率の無次元遅れ時間依存性を二つのコンデンサ容量条件に対して示す。この電圧回復率は若干の無次元遅れ時間依存性を示すが、概ね同一のコンデンサ容量条件に対して一定値をとることがわかる。また、二つのコンデンサ容量条件間で比較すると、 VR_1 について、コンデンサ容量が小さい場合に大きい場合より大きな値を示すことがわかる。 VR_2 は、遅れ時間により励磁コイルの波形と回転コイルの波形の変化に対する関係が変化するので両コンデンサ容量条件間の比較は難しくなっている。本実験条件では、 VR_1 の定義を与える $1/4$ 周期までに大半の駆動力を発生するので、 VR_1 の相違は、与える駆動力の差になって現れている。これらの試験データを参照に、簡易シミュレーションとの比較から、駆動特性に係る各種パラメタの依存性を評価する。

第 16 図には、簡易シミュレーションによる代表的な波形の履歴を示す。磁場と電流から発生する力が表現されている状況が見てとれる。ここで、このシミュレーションでは、実験結果に示された遅れ時間による駆動力印加時間(第 13 図)や電圧回復率(第 15 図)の依存性は表現されていないことに注意する必要がある。

第 17 図には、試験結果の第 13 図に対応する、遅れ時間に対する計算によって予測されたトルクを示す。 $\bar{T}_{ideal}$ が、計算によって予測されたトルクであり、第 13 図の回転数の傾向と同じく、遅れ時間に対して最大値をとっている。実

験では、コンデンサ容量の違いによって最大値をとる遅れ時間が異なっていたが、計算結果では、いずれも無次元遅れ時間 0.55 程度であった。 $\bar{T}_{rot}$ が、式 (7) から実験結果の対応する回転数を用いて推算した結果である。両トルク推算結果は、遅れ時間に対する増減の傾向は同様であるものの、その大きさは計算結果の値($\bar{T}_{ideal}$)が実験結果を用いた結果($\bar{T}_{rot}$)より 10 倍程度大きい。

この原因として、以下のことが考えられる。 $\bar{T}_{ideal}$ がパルス的に与えられるトルクを平均化したものであるのに対して、 $\bar{T}_{rot}$ は実験での回転速度を定常であると仮定して推算したものであり、実際には、パルス的にトルクを与えている以上脈動は存在するはずである。パルスを与える間隔で摩擦により若干減速しながら逐次パルス的にトルクを与えているのであるから、 $\bar{T}_{ideal} > \bar{T}_{rot}$ となることは自然なことであり、実際のトルクは両者の間の値であると推察される⁹⁾。ここで、式 (6) に対して、トルク印加時間 τ_s に対して一定のトルク T_{pulse} を与え、以降 τ_r の期間にわたってトルク 0 として解いたところ、実際の回転数に相当する

第 16 図 シミュレーションによる時間履歴

第 17 図 計算によるトルク予測

条件でトルク印加時間 τ_s の加速と残り期間の減速がつり合うのは、トルク値を T_{pulse} の $1/4$ 程度とした場合であった。今回製作した小型の試作模型において、回転体のバランスの不均衡、回転体と軸心の偏心の可能性がある、周期的に変動するトルクにより効率が低下している可能性がある⁹⁾。また、理想化した一定のインダクタンス回路として扱っているが、大電流の流れる回路において実際の現象を正しく表現できていない可能性がある。鉄心を用いていることによる損失がある。コイル間の幾何学的形状を簡易解析では表現していないため、磁場の分布などによる効果が欠如している。たとえば、8の字コイルの電流の経路を幅のない線路と捕らえているが、実際には金属板上の電流密度分布が力の掛かり方に影響を与えられとされる。トルク推定のための係数を得るための摩擦減衰試験の際には摩擦力は軸に対して対称に掛かっていたと考えられるのに対して、本試験では、トルクを与える部分が1箇所しかなく偶力となっていないため、軸に対して非対称な力の掛かり方であった。回転によって駆動コイルと回転コイルの相対位置が変化することによる影響が計算では考慮されていない。

以上のように、簡易解析と現実の現象には種々の相違があることが予測されるが、本電動ファンの開発検討段階においては、トルクの推定値がある範囲にあることがわかり、各種パラメタの影響を知ることができれば非常に有効であるといえる。このような判断のもと、以下では得られた結果を吟味して、電動ファンとしての性能を予測する指針を与える。

実験結果として回転数に対して第14図に示したように、駆動に係るトルクは回路での入力エネルギーに関係すると考えられる。先に示した計算によるトルクは、回転時間に対して平均的に同一のトルクが印加されるとした場合だが、実際の駆動力・駆動トルクは式(8)に示されるように τ_s の時間にわたって系に加わる。第18図には、第14図の対応する、入力エネルギーに対する駆動トルクの関係を示す。第14図における回転数の関係と同様に、同一エネルギーに対する駆動トルクは、コンデンサ容量が小さい場合 ($20 [\mu\text{F}]$) の方が大きい場合 ($40 [\mu\text{F}]$) に比べて高い駆動力となることわかり、第14図で示した実験結果と同様に、コンデンサ容量が小さく、駆動力回転周期に対する相対印加時間が短い場合に効率よく駆動力を与えていることが示唆される。

これまで示したように、回路を規定する定数である抵抗、インダクタンス、コンデンサ容量は、電動ファンの性能を大きく左右することがわかる。以下では、実験および解析結果から得られた知見を参照にして、各パラメタの影響について概観することにする。大電流を流す構成であるため、抵抗値を小さく保つことは極めて重要である。回路抵抗は、インダクタンス値と相関するが、便宜的に独立に変更できるものとして考察する。これまでの回路構成の元、回路0 (磁場発生回路) と回路1 (電流発生回路) について、抵抗だけ独立に変化させて解析を行った。ここで、回転コイル側については値を変化させていない。第19図に、抵抗値 R_1 を変化させた場合の電圧回復率、有効エネルギー効率、(衝

第18図 駆動トルクと入力エネルギーの関係

第19図 抵抗の変化の影響

撃)トルク T_{pulse} (以下、パルストルク)を示す。ここで、電圧回復率は、第12図に定義される値、有効エネルギー効率は、入力電力に対する、入力電力と抵抗消費電力の差分の割合として定義される。同図から、抵抗を減じることの影響が顕著に現れることがわかる。とりわけ有効エネルギー効率については、実験における条件 (4Ω) が相対的に効率の低いことが見てとれる。抵抗損を減らす方法としては、抵抗そのものの値を小さくすることと、次に示すように、コンデンサ容量またはインダクタンスを減じることによって回路の特性時間を減らし、抵抗損失を被る時間を相対的に小さく保つことである。抵抗を被る時間を減らし、求める出力を与えるには、短期間に大電流を流すことが重要である。コンデンサ容量は、回路の特性時間と、充電特性時間を決めるパラメタとして重要である。コンデンサ容量を単独で変更させた場合の計算結果を第20図に示す。同図から予め期待されるように、容量が減るに従い各効率は増大する傾向がある。ここで、パルストルクがある容量値を境に減じることが見てとれる。コンデンサの条件設定は、各特性時間を独立に変えられるパラメタとなるので、耐圧やトルク伝達の傾向を考慮してなるべく小さい値を用いることが望ましいといえる。インダクタンスも回路特性時間を決める重要なパラメタであるが、それ自体独立な値ではなく、抵

第 20 図 コンデンサ容量の変化の影響

第 21 図 コイル巻き数の変化の影響

抗値と相関していることに注意する必要がある。第 21 図には、試験で用いたコイルの特性値を基準とし、インダクタンスが、巻き数二乗に（インダクタンスに起因する）抵抗が巻き数に比例するとして、巻き数の相対変化に対する計算した結果を示している。巻き数が減少するに従い抵抗値も減少するが、第 19 図に示した傾向とは全く異なっている。インダクタンスが小さくなることは、コンデンサ容量と同じく回路の特性時間を減らす効果があるが、ここではむしろ、インダクタンスの定義に従い伝達される磁束が小さくなる効果の方が大きいといえる。ここでは、駆動コイル側のみのインダクタンス値を変化させたことも関係している可能性があるが、本図の結果からは、インダクタンスの値を設定することは他の影響が大きいので設計要件に従い慎重になされるべきことが示唆される。回路抵抗を少なくするために同時にインダクタンスを減じることを認め、その分大電流を流すことを想定しているが、いずれにしても生じる発熱をいかに抑えるか、または冷却するかは大きな課題となるはずである。現実には試験形態では、抵抗の値が相対的に大きいために、コイルの発熱が試験時間を制約している。

本稿に示した模型試験結果および関連解析は、各種パラメタの影響を示しているため、より詳細な実機レベルの検

討ならびにエンジンシステム構成の検討に際して重要な基礎資料となると考えられる。

5. 実機サイズのファン適用の可能性に関する考察

前節において、小型模型を用いた概念検討を実施し、いくつかのパラメタの影響などを示した。これらのデータを参照に、実機サイズの電動ファンを導入する際に課題となる点についてここで簡単な考察を行う。

ファンによって与えられるパワ $\dot{W}_{mf}$ は、

$$\dot{W}_{mf} = \sigma F^* r \omega = \sigma F^* r (U/r) \propto N \quad (9)$$

ここに、 F^* は、式 (8) で与えられる 1 回の電磁力印加による撃力として与えられる力の時間平均力であり、 σ は、この平均力が単位時間に加わる回数（ N 組の励磁コイルが同時に作動する場合、 $\sigma = \omega N^2 / 2\pi$ ）、これらの積は半径 r に対して変化せず、 $\sigma F^* \propto N$ である。励磁コイルの個数 N は任意に設定できるが、一般に周囲長が長いほど大きくできるといえるため r の増大に対してパワもほぼ比例して増大するといえる。この際、軸動力のファンであれば、トルクの伝達のためにパワに応じて軸半径が増大すると、その二乗に比例して重量増大するが、電動ファンの場合、仮に周長に比例してコイルが配置されとした場合、径の一乗に比例して重量が増大するのみであり、軸は回転力を伝達しないので、径が大きいき軸動力のファンに比べて著しく重量が軽減されるといえる。なお、文献 2) によれば、電動モータの重量はターボプロップやターボシャフトに比べ、ピストンエンジンと同様にパワの増大に対して数倍の速さで重量が増大することが示されている。一方で、拘束条件として撃力がファンの回転に対して十分に速やかに行われる必要があることに注意しなければならない。これは、電磁力の発生が準定常的に行われることと、逐次の駆動力発生間のコンデンサの充電時間（駆動力発生時間と充電時間の関係は、第 11 図参照）を十分に確保することを想定している。1 回の電磁力発生時間を τ_c 、各駆動コイル間を回転コイルが移動する時間を τ_r とすると、 $\tau_c \approx 2\pi\sqrt{LC}$ 、 $\tau_r = (2\pi/\omega N)$ であり、FJR710/600 エンジンをも想定した中規模のファンであれば、 $\tau_c \ll \tau_r$ のための条件は、 $LC < O(10^{-8}) [s^2]$ となる。この LC の制約は、 r が大きいほど、 N が小さいほど緩和されるが、オーダとしては同程度が要求される。このように、本電動ファンの場合、電磁力印加時間に対する制約はあるが、従来のファンのようにタービン回転数により受ける制約はないため、ファンの径の増大が容易であるといえる。

先の解析の結果、回路定数 C 、 L 、 R あるいは巻き数 N の影響について調べた。まず第一に重要なことは、抵抗の影響を相対的に小さくすることである。ある一定の抵抗値が掛かるとして、その影響を最小限にするために、本電動ファンでは、1 回周期のうちできるだけ短時間に変動する大電流の印加により駆動力を発生させ、抵抗による損失を最小限にするようにしている。コンデンサとコイル間の電送の損失を低減することが重要である。抵抗を小さくすべ

第22図 電気供給用コアエンジンの形態

きことはいうまでもないが、コイルにおける抵抗値とコイルのインダクタンスは相関関係があるので、コイルが果たす役割と相関して設計をする必要がある。コイルのインダクタンス低下に対する回路の性能低下は著しいため、コイルインダクタンスを適切に設定した上で、時定数の設定のためにもコンデンサの容量を小さくすべきであることがわかる。先に示した、 $LC < O(10^{-8}) [s^2]$ を満たす形状の中規模のファンに対する鉄心を用いない電動ファンに関する仮設計の結果、印加電圧が kV のオーダで所期の動力を発生するという見通しが得られている。このような高電圧の条件であるため、コンデンサの容量を小さくともめ、耐圧性を確保する必要がある。

モータにおける効率確保の問題点である銅損の低減の方策の一つが超伝導コイルの導入である。ガスタービンなど電源となるコアエンジンの環境適合性向上のためには、ガスタービンにおいては水素燃料の導入、水素を燃料とした部分的または全部の燃料電池利用が検討されている。航空機としての容積制限などから、水素を航空機に燃料として利用するためには液体水素の利用が望ましい。しかし、液体水素を用いてもなお体積がかさみ、運用が容易でないことから、エネルギー密度以外にも液体水素を利用する場合利点を求める傾向がある。たとえば、極超音速機では機体の冷却等に液体水素は重要な役割を果たすことが期待されている。電動ファンが搭載される航空機においては、超伝導駆動媒体としての液体水素利用がこの役割として挙げられる。コイルでの発熱は重要な課題であるが、ファン外周部近傍に配置されているため、ファンの取込空気や雰囲気空気を積極的に利用しやすいといえる。また、実用に際して大電流を流す前提として鉄心の排除が挙げられているが、鉄心の排除は、磁力の大幅低下をもたらすため、大電流を流すとした場合であっても、製作するファンの仕様それぞれに対して、鉄心の有無も含めて検討がなされるべきであるといえる。本電動ファンエンジンの志向するところは、現状のターボファンエンジンバイパス比の制約を排除し、動力を生成するコアエンジンと独立に電動のファンを駆動することにある。併せて、電力を発生するコアエンジンは、従来のターボエンジンに比べて環境適合性が高いことが望まれる。第22図に、このコアエンジンとして考えられる形

態を例示する。(1)から(4)の順に排気に関する環境適合性が高まることが期待される。第1は、従来のガスタービンの軸に発電機を備え、その蓄電によって電動ファンを駆動するものである。このようなガスタービン軸を発電機とする航空機は、たとえば無人偵察機などで実用化されている。第2の方法として、ガスタービンの圧縮機段と燃焼器の間に燃料電池を備える複合タービンも実現可能であると考えられる。ここでは、コアエンジンの総重量が過大にならないことと、エンジン負荷条件に対する全体制御に対する工夫が必要である。これら両者条件とも、ガスタービンが推力の一部を提供するので、電力の供給は、エンジン始動時に事前に充電した電力を消費分だけ追加するという方針の下負荷の適切な制御を行う柔軟性を持ちうるものである。このように事前の蓄電をしておけば最大推力の離陸時に相応の電力消費があっても飛行期間中電力生成に過大なコアエンジンの負担をかけない運転方法が見出し得るといえる。第3の方法としては、全燃料電池とする場合であり、前2者に比べて環境適合性はさらに高いものと期待し得るが、燃料電池内の圧力損失の補填と、出力向上のためにある程度の空気圧縮を行うことが望ましい。そのためには、コアエンジンの前段に電動ファンを配し(タンデム形態)、コアエンジン入り口に空気を供給するファンの中心付近に圧力比が高くなるようなブレード設計をするなどの方策が考えられる。最後の4番目の可能性としてバッテリーのみ搭載の可能性はあるが、環境適合性の観点からは好ましいものの、重量の観点からは実現性が低いといえる。

模型試験で模擬していない実機ファンの形態として重要な項目に、複数励磁コイルの作動が挙げられる。これらの励磁コイルでは、必ずしも駆動力印加の時間が同時である必要はなく、むしろ分布している方が先に問題点として述べた偏心や非正常性といった問題点を解消する可能性があり、適切なコンデンサの組み合わせは、ファンと駆動回路の配置設定にとって重要であるといえる。この自由に設定できるタイミングと駆動力印加の組み合わせは、たとえば始動時の駆動力印加や、運転時の省電力運転を適切にする可能性も考えられる。こうした定常または過渡運転時の制御は、未解明の点も多く、今後の主要な課題である。

6. 結 論

次世代の環境適合型航空用推進機関に適用するための、外周駆動電磁駆動ファンの概念を導入し、基礎実証試験を実施した。併せて、駆動力をもたらす要素について簡易解析を実施した。以上の結果、各種パラメタの影響を示し、また、結果を利用した各種パラメタを単独で変化させた場合の性能変化の指針を提示した。

電動ファンの基本的な特性は、回路を構成する受動素子の特性に大きく依存することが明らかとなった。エンジンの効率を決める第1の鍵は、いかに抵抗損を減らすかである。抵抗値を減らすことはもちろんであるが、その他回路特性であるインダクタンスやコンデンサ容量を適切に定めて電流印加時間を極力小さくすること、大電流を流すため

に、またコンデンサの充電量を大きくするために(回路特性値である容量は小さく保ったまま)電圧値を大きくすることで抵抗損失の低減を図るべきである。コンデンサ容量の低減は、トルクの低減をもたらさない範囲で有効である。コンデンサは耐圧を保つことにも注視しなければならない。インダクタンスは、抵抗値を小さく保つためにも極力小さい値とすべきであるが、磁束伝達の立場からは慎重に設定すべき値である。鉄心がある場合のコイル近傍での磁場計測および計算結果からは、距離に従い磁場強度が減少する様子が確認された。ファンの駆動部として、隙間制御が駆動力伝達の立場からも重要であることが示された。解析では定性的な傾向は明確化されたが、定量的な評価は十分とはいえない。現状でのモデル化が十分でない点の一つとして、回転コイル部の幾何形状が挙げられる。本研究での磁場数値解析において、幾何学形状が与える影響が確認され、また、導体内での電流の分布も力の評価等に影響を与える可能性がある。

以上のように、定性的に評価する目的においては、電動ファンモデルの実験、解析結果は良い一致を得ており、本研究の結果により、今後の開発やモデル化のための重要な基礎的資料を提供することができたといえる。これらの評価結果をもとに、航空機用に電動ファンを適用する際に課題となる運転方法、設計に関する課題について考察を行った。この結果、電動ファンとしての最適化はもとより、電力を生成するコアエンジンを含めた運転、制御法に関する検討が今後の重要な課題として明確となった。

電動ファンの概念は、航空機に使用するための期待され

る特性である、軽量・大口径・高効率を期したものであるが、一般的な回転機としても多く適用先を有している。本提案が基礎となり、より用途が広く有効な回転機概念が提示されることも期待されることである。

本研究の遂行にあたり、日本大学学部学生 鳥海奈緒さんに実験協力をいただいた。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) Berton, J. J., Freeh, J. E. and Wickenheiser, T. J.: An Analytical Performance Assessment of a Fuel Cell-Powered, Small Electric Airplane, NASA TM-2003-212393, 2003.
- 2) 伊藤文博, 葛原 正, 西沢 啓, 泉 耕二: 燃料電池航空機の成立可能性検討, 第43回飛行機シンポジウム講演集, 1A6, 2005.
- 3) Cumpsty, N.: Jet Propulsion, Second Ed., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2003, pp. 69-70.
- 4) Huete, J. and Singh, R.: A Novel Concept for the Next Generation Civil Supersonic Transport Propulsion System: The Retractable Fan, Aircraft Eng. Aerospace Technol., **69** (1997), pp. 512-517.
- 5) McMasters, J. H. and Kroo, I. M.: Advanced Configurations for Very Large Transport Airplanes, Aircraft Design, **1** (1998), pp. 217-242.
- 6) 電気学会磁気浮上応用技術調査専門委員会編: 磁気浮上と磁気軸受, コロナ社, 東京, 1993, pp. 42-63.
- 7) Magnetically Levitated Ducted Fan Being Developed as a Propulsor Option for Electric Flight, Research and Technology 2003, NASA Glenn Research Center at Lewis Field, NASA TM-2004-212729, 2004.
- 8) JMAG-Studio: Users Manual, Ver. 8, 日本総合研究所, 東京, 2006.
- 9) 石崎秀晴, 鳥居泰男: 回転軸の不安定現象, 国立天文台報, **3** (1997), pp. 79-98.