実験室規模航空推進機用外周電磁駆動ファンのトルク・出力計測

日大生産工(院)	○阿部	翔一	日大生産工	野村	浩司
日大生産工	菅沼	祐介	宇宙航空研究開発機構	岡井	敬一

1 緒言

2016年現在,航空機には需要増大と規制強化の両面 から環境適応性の向上が求められている.航空機の環 境適応性を向上させる革新技術の一つが航空機の電動 化である.実例として,最新の More Electric Aircraft(MEA)であるボーイング787では主翼の防氷シ ステムなどを電動化している¹⁾.しかしながら,推進 系の電動化を試みる場合,航空機に搭載可能な出力重 量比を持つバッテリおよびモータを包括した新たな推 進系の概念を構築する必要がある.本研究では,航空 機に搭載可能な出力重量比が期待される新たな推進系 の概念としてJAXAより考案された航空機推進用の電 動機である外周電磁駆動ファン(以下,電動ファン)に 着目した.

この電動ファンは、既存の電動機の大きな重量を占 める永久磁石や鉄心を用いないコアレスコイルの使用 を想定している.コアレスコイルを用いることによる 磁束密度の減少が問題となるが、コイルにパルス的な 大電流を複数回印加することで駆動に必要なトルクを 確保することができる.また、大電流を効率的に利用 するため、駆動回路に LC 直列共振回路を使用するこ とを想定している.コンデンサを接続することにより、 駆動力に変換されなかったエネルギを回生することが 可能である.さらに、外周駆動とすることで小さな駆 動力であっても大きなトルクを得ることが可能である.

これまでの研究では、原案の駆動原理および駆動回 路を実現し、実験室規模の6分の1セクタモデルを用 いて駆動原理の実証実験および静止トルク試験を行っ た.静止トルク試験の結果、1次側の駆動コイルと2次 側の移動コイルの幾何学的位置関係および駆動コイル 同士の位相差が静止トルクに影響を及ぼすことが報告 されている².

本報ではファンを模擬した回転体を回転させた状態 で発生する動トルクの計測を行った.計測方法につい て述べたのち,動トルク試験によって得られた性能曲 線から回転速度と位相差が動トルクに及ぼす影響を調 べた結果を報告する.

2 駆動原理

駆動原理を図1に示す.電動ファンはカウリング側に 取り付けられる1次側の駆動コイルとファン側に取り 付けられる2次側の移動コイルによって構成される.ま





た,駆動コイルは駆動時の役割に応じて電流発生コイ ルと磁場発生コイルに分類される.以下,具体的な駆 動原理について説明する.最初に磁場発生コイルに図 中に矢印で示された向きに電流を流す.続いて電流発 生コイルに図中に矢印で示された向きに電流を流す. 電流はそれぞれのコイルには磁界を発生する.電流発 生コイルにより発生した磁界によって移動コイルには 誘導起電力が生じ,誘導電流が流れる.磁場発生コイ ルの磁界と誘導電流により,移動コイルには力の矢印 が付されたコイルの部分にローレンツ力が生じる.こ のローレンツ力が駆動力となり回転体は回転する.以 上が基本的な駆動原理である.

このような駆動原理であるため、この電動ファンの 駆動には一般的な誘導モータにおける滑りが必要なく、 駆動コイルにパルス的に流される電流の周波数が回転 速度に依存しないという特徴を持つ.また、本駆動原 理はリニアモータとしても応用可能である.

3 実験装置

実験装置の概略を図2に示す.実験装置の構成は導体 円板,電源回路,駆動回路および制御回路に大別され る.図3に移動コイルである純銅製の導体円板を示す. 導体円板は電動ファンにおけるファンを模擬している. 直径は250 mmであり,板厚は2 mmである.中心部から 外周部に向かってボルト締結用の円孔,角度検知用の 円孔および移動コイルである長円孔(図中の網掛け部 分)を設けた.回転部の慣性モーメントは0.00586 kgm² である.図4は,駆動力を発生することが可能な,移動

Torque and Power Measurement of Laboratory-scale Electromagnetic Peripherally-Driven Fan for Airplane Propulsion

Shoichi ABE, Hiroshi NOMURA, Yusuke SUGANUMA and Keiichi OKAI

-795-

コイルと駆動コイルの幾何学的位置関係を示している. このように駆動力を発生しうる幾何学的位置関係は6 パターンが考えられ,パターンに応じて適切に駆動コ イルの電流の向きを制御する必要がある.

電源回路は商用電源を電力供給源とし、供給元側か らスライダック、ダイオードブリッジおよび平滑コン デンサによって構成される.スライダックは0から130 Vまで変圧することができる.平滑コンデンサには 6000μFのアルミ電解コンデンサを用い、2つを並列に 接続して静電容量を12000μFとして使用した.

駆動回路の回路図および駆動回路の動作サイクルを 図5に示す. 駆動回路は駆動コイル, 共振コンデンサお よびスイッチング素子によって構成される. 駆動回路 はスイッチング素子のスイッチングにより共振コンデ ンサへ充電、駆動コイルへ放電および駆動コイルから 電力の回生を行うことで一連の駆動サイクルを形成す る. 駆動サイクルのうち、共振コンデンサへの充電時 間(1)を120 µsとした.また,充電終了から放電まで の間(1と2の間)に3µsのデッドタイム,回生終了から 次の充電開始までの間(3と4の間)に100 µsのオフタイ ムを設けた.オフタイムを変更することにより、駆動 サイクルの周期を容易に変更することが可能である. 共振コンデンサの静電容量は1.8 uF, 駆動コイルのイン ダクタンスは43.5 μHである. ゆえに共振周波数は18 kHzであり, 駆動コイルの通電時間 (スイッチング素子 のオンタイム) は共振周期の1/4周期の14 µsとなる. な お,電源の制約により駆動コイルに発生する磁界が弱 いため、駆動コイルにはSS400製の鉄心を挿入した.ま た,スイッチング素子にはIGBTを使用した. IGBTの制 御にはドライブ回路が必要であり、実験装置において は絶縁電源方式を採用した.

制御回路は相対角度の検知を行うフォトインタラプ タおよび演算を行うマイクロコントローラ(Arduino) によって構成される.マイクロコントローラはフォト インタラプタの信号を受けて,駆動コイルと移動コイ ルの相対位置パターンに応じて適切な制御信号を生成 する.フォトインタラプタは誤作動を防止するため, 紫外線によるタイプを採用した.なお,1回の駆動タイ ミングあたり1回の駆動パルス電圧を印加するだけで は駆動に必要なトルクを得ることができなかったため, 1回の駆動タイミングあたり30回の駆動パルス電圧を 印加することによって駆動に必要なトルクを確保した. このため,すべての駆動パルスを印加し終わるまでに 移動コイルと駆動コイルの相対角度は変化する.そこ で,駆動開始と終了の間で移動コイルが移動した角度 を駆動範囲と定義した.

4 実験方法

動トルクの計測にあたり、本研究では加速法と負荷 法の2つの方法で計測を行った.以下,具体的な実験方 法について説明する.

加速法は剛体回転の運動方程式を利用して動トルク を求める方法である.無負荷で駆動力を印加したとき, 導体円板は発生した動トルクに応じてある角加速度を



Fig.2 Experimental apparatus.



Fig.3 Conductor Disk.



Fig.4 Drive pattern.



Fig.5 Drive circuit and drive cycle.

もって回転速度が増大する.また,慣性モーメントの 値は既知であることから,単位時間当たりの角速度の 変化より角加速度を求めれば動トルクを求めることが 可能である.実験では計測時間を210 sとし,0.1 sごと に回転速度を記録した.回転速度の計測には小野測器 製のHT-5500を用いた.回転速度の記録にはKEYENCE 製のNR-2000を用いた.記録した値は,200データの移 動平均をとり,結果を示すグラフには,2 sごとの値を 抜き出してプロットした.

負荷法は、導体円板に負荷を与え、導体円板が等回 転速度になったときの負荷の反力の大きさを計測する ことで、動トルクを求める方法である.図6に計測装 置の概略を示す. トルクアームは長さ 250 mm, 先端に は C 型の鉄心を備えた電磁石が取り付けられており, C型鉄心の隙間で導体円板を挟み込むように設置した. コイルの反対にはカウンターウェイトを設けて重心を 調整した. トルクアームには, 重心より若干カウンター ウェイト側に回転軸が設けられている.回転軸と電磁 石の間のアームで、電子天秤の上に乗せられた先を尖 らせたステンレス棒を上から鉛直下向きに押すように ステンレス棒の長さと位置を調整した.本実験では, ステンレス棒の先端とトルクアームの回転軸の距離は 60mm とした. 電子天秤は A&D 社製の HR-251A を使 用した. トルクアームのコイルは商用電源をスライ ダックにより昇圧後,変圧器を用いて降圧した電源と 接続されている.

実験手順を記述する.計測を行う回転数まで導体円 板を手で回し,駆動回路を作動させない状態で電子天 秤の値をシリアル通信により0.2 sごとに50回読み取っ た.この値を平均したものを基準値とした.次に駆動 回路を作動させ,トルクアームの電磁石の磁界の強さ を,スライダックの電圧を変更することで調整し,計 測を行う回転数に合わせた.その後,電子天秤の計測 値を50回読み取った.この値を平均したものを計測値 とした.計測値と基準値の差を取ることで,トルクアー ムの反作用を求め,動トルクを算出した.なお,計測 は3回行い,動トルクの平均値を実験結果として示した. 負荷法で得られるデータは数が少ないので,加速法で 得られたデータの検証に用いた.

実験では、位相差、駆動範囲および駆動パルス数が 動トルクに及ぼす影響を調べた.位相差は、磁場発生 コイルの電流波形と電流発生コイルの電流波形の位相 差と定義し、磁場発生コイルの電流波形の位相を基準 にして符号を付した.駆動範囲は、フォトインタラプ タのトリガ信号から駆動パルス発信終了までに導体回 転円板が回転する角度と定義した.位相差が動トルク に及ぼす影響を調べる実験では、位相差を0°,90°およ び-90°とした場合の性能曲線を作成した.駆動範囲が 動トルクに及ぼす影響を調べる実験では、オフタイム を50,100,150,および200 µsと変更して駆動パルス周 期を変えることで駆動範囲を変更し、それぞれの性能 曲線を作成した.駆動パルス数が動トルクに及ぼす影 響を調べる実験では、駆動パルス数を30,35および40 回と変更し、性能曲線を作成した.この実験では、オ



Fig.6 Measurement apparatus of load method.

フタイムを調整することで駆動範囲が全ての駆動パル ス数条件で同一となるようにした.

5 実験結果および考察

加速法と負荷法により取得した性能曲線を図7に示 す.加速法,負荷法ともに定量的に非常に近い値が得 られていることが見て取れる.また,動トルクおよび 出力はそれぞれ150および170 pm付近でピーク値を とり,回転速度が増加もしくは減少するとそれぞれの 値は減少する傾向が見られた.

図8に、位相差が動トルクおよび出力に及ぼす影響 を調べた実験結果を示す. 位相差を-90°, 90°とした場 合,0°とした場合と比べて動トルクおよび出力がとも に大きく減少する結果が得られた. これは磁場発生コ イルの電流波形と移動コイルに生じる誘導電流の波形 の位相の関係で説明される. ローレンツ力を最大とす るためには磁場発生コイルの電流波形と誘導電流の波 形が一致している必要がある.実験結果より,位相差 0°のときに動トルクおよび出力がともに最大となるこ と、位相差が-90°の場合と90°の場合の動トルクおよび 出力の値がほぼ等しいことから、誘導電流の波形は誘 導起電力の波形に対して約 90°の位相差を持つと考え られる.誘導電流波形と誘導起電力波形が 90°の位相 差となるためには、移動コイルのインピーダンスはイ ンダクタンス成分が支配的である必要がある.以上よ り、移動コイルのインピーダンスは、インダクタンス 成分が支配的であり、ゆえに位相差は0°とすることが 最適であるという結論に至った. 同様の結論が静止ト ルク試験からも得られている²⁾.

図9に、駆動範囲が動トルクに及ぼす影響を調べた 実験の結果を示した. 図中の破線は、回転速度と駆動 範囲の関係を示している. いずれの条件においてもあ る回転速度において動トルクの値にピーク値が出現し、 回転速度が増加もしくは減少すると動トルクの値は減 少する傾向が見られた.また、ピーク値をとる回転速 度における駆動範囲に注目すると、いずれの条件にお いても駆動範囲が6から7°程度であることがわかる. 以上より、電動ファンの駆動制御においては、回転速



Fig.7 Performance curve obtained by acceleration method and load



Fig.9 Effect of drive range on torque.

が変化しても駆動範囲を6から7°程度に保つような可 変周波数制御が有効であるといえる.

図10は、駆動パルス数が動トルクに及ぼす影響を調 べた結果を示している.駆動パルス数の増加に伴って、 動トルクおよび出力は単調に増大する傾向が見られた. 駆動パルス数の増大は、1回転当たりに導体円板に加 えられる力積が増大することを意味する.回転速度が 一定の場合、単位時間当たりに加えられる力積、すな わち移動コイルに作用する力が駆動パルス数に比例し て増大することになり、動トルクおよび出力が増大し たと考えられる.

以上の結果より、各回転数に対して動トルクを最大 に保つ制御を最適と考えた場合には駆動範囲と駆動パ ルス数の連続的に変化させることが望ましいと考えら れる.これは誘導モータの制御で一般的な VVVF (Variable Voltage Variable Frequency) 方式と類似した要 素があり、今後は VVVF 方式の電動ファンへの適用を 検討するのが良いと考える.

6 結論

実験室規模の外周駆動電磁気ファンを製作し,動ト ルクを計測した.以下に得られた知見を示す.



Fig.8 Effect of phase difference on performance curves.



Fig.10 Effect of number of drive pulse on torque and power.

- (1) 加速法と負荷法により得られた動トルクの回転速 度依存性は定量的にほぼ一致した.
- (2) 電流発生コイルと磁場発生コイルの位相差は、0°の場合にトルクおよび出力が最大である.これは移動コイルのインピーダンスはインダクタンス成分が支配的であるためと考えられる.
- (3) 本報の実験条件においては、駆動範囲を6から7° 程度とした場合にトルクが最大となる.
- (4) 駆動範囲を一定に保って1駆動タイミングあたりの駆動パルス数を増加させると、動トルクおよび 出力は単調に増大する.
- (5) 回転速度が変化しても駆動範囲が一定になるよう に、回転速度に反比例させて1駆動タイミングあ たりの駆動パルス数を連続的に変化させる制御が 本電動ファンには望ましい.

「参考文献」

1) 株式会社 IHI, 航空機・エンジン電動化システムの 現状と動向, 2013, p.38.

2) 住谷祐樹, 野村浩司, 岡井敬一, 田頭剛, 國安清治,

航空推進機用電磁気外周駆動ファンのセクタモデルを 用いた静止トルク測定, 2015,pp.5-6.