



eVTOLの出力密度と熱管理

航空機推進システムの設計は新たな段階を迎えています。初期の飛行機はプロペラ式であり、その次はジェットエンジンの時代でした。最初のジェット機が出現し航空機業界に大変革をもたらしたのは、第二次世界大戦中のことです。Me 262の登場により戦闘機の飛行技術は一変しました。その後ジェットエンジンを搭載したあらゆる種類の戦闘機が開発され、定期航空業界も大きく進歩し、人々は便利なビジネスジェットで世界中を駆けめぐりようになりました。そして次のフロンティアこそが電気推進技術なのです。

さまざまな分野で「e」のつく用語が増えていくように、eVTOLの「e」も電気 (electrical) の「e」です。つまりeVTOL機とは、電動垂直離着陸機のこと、垂直離着陸の方式の変化とともに業界で普通に使われるようになり、また「e」の意味は、いろいろなことが電動化されて機械的にはとてもシンプ

ルになり、機体構成のある面で柔軟性が増し、より多くのローターが搭載可能になります。電気部品は機械部品よりメンテナンスしやすく、場合によっては信頼性にも優れています。シンプルであるということは、運用コストの総額を抑えられるということです。従来型の垂直離着陸機であるヘリコプターでは、運用コストのかなりの部分をメンテナンス費が占めています。ただし電動化する場合、バッテリーとガソリンとでは出力密度が異なります。また、バッテリーの複雑さに対応するため、重量と性能、そして効率の管理の方法を変える必要も生じます。すべてを電動化すれば熱の問題も重要になります。電気系が発する熱は従来の手段では解消できません。

eVTOL設計における電気推進技術の課題
現在開発されている電気推進ユニットは8年ほど前から航空機のかたちを大きく変えようとしています。

重要な変化の1つに、搭載電力量の飛躍的な増加があります。これまで空を飛んでいたようなものとも比べものになりません。たとえば CityAirbus は、200kWのモーター8基を搭載しています。4人から6人を乗せて飛ぶには800kWが必要になり、残り800kW分のモーターで冗長性を確保しています。この合計1.6メガワットというのは実に驚くべき数字です。一方、787やF-35 JSFなど、従来の固定翼機に搭載された電源は、およそ1メガワット程度です。787は推進力のために電気を使うわけではないので簡単に比較はできませんが、開発エンジニアがどんな新しい課題に立ち向かわなくてはならないかは想像できると思います。そのような電動システムからは大量の熱が発生するため運転中に排熱する仕組みも必要です。

もう一つ従来の航空機の動力ユニットとの違いは、きわめて集中度が高いことです。

化学エネルギーを熱に変え、さらに力学的エネルギーへ、そして推進力へと変換するプロセスは、翼の特定の1点において集中的に処理されます。電源ユニットそのものは、たとえばハイブリッド電源ユニットの場合、ガスタービンとジェネレーターが1ヶ所に配置されており、そこからエネルギーを機体のあちこちに送り出すための配線が張りめぐらされます。基本的には分散して配置されているモーターのためです。そして出力密度は増大します。航空機産業で通用する電源ユニットは軽量でなければなりません。機体構造は常に軽量化を求められており、それは電気装置も同じです。出力密度が大きいほどエンジニアリング上の課題は増えます。システムを軽量化すれば当然熱容量は小さくなります。バッテリー、配電装置、インバーター、モーターといったコンポーネントのレベルでも、機材全体のレベルでも同じです。低温、高温のいずれの条件下でも、運航中の機材の熱バランスを適切に保つ方法を考えなくてはなりません。

熱の問題の次には、電気システムの統合に関連した目に見えない課題もあります。電気装置は従来の航空機よりも大きい電圧、大きい電流を必要とすることは明らかであり、したがって、さまざまな統合の問題が生じます。熱統合、それから電磁統合の問題もあります。さまざまな電磁効果により、電磁干渉 / 電磁両立性 (EMI / EMC) の問題が生じます。高い高度で電気ハーネスを運用することの影響や、コロナ効果によるハーネス内の絶縁体の性能低下などが考えられます。

航空機における電気モーターの設計

航空機の電気推進ユニットの開発は興味深いトピックです。従来型の産業用モーターを搭載した電車や掘削機などの機械では、出力密度は1kgあたり1kW未満です。ところが航空機用の電気推進ユニットの場合、モーターもインバーターも機械の出力密度をもっと高くする必要があります。1kgあたり10kWないし15kWの出力密度が必要です。そこで軽量化し、出力を増やして、バランスのとれた設計にしようという工夫しなければなりません。航空機の種類とミッションに応じてバランスは大きく変わ

るので、出力密度が高いモーターやインバーターなどの物理特性をしっかりと把握する必要があります。そのためにシミュレーションを実施します。このような機械で起きるあらゆる物理現象を考慮しなければなりません。電磁物理学、熱関連、ローターのダイナミクス、構造的挙動、構造動力学的挙動、その他あらゆる物理現象を総合的に見る必要があるのです。

良い例として、ロールス・ロイス社の電動航空機が挙げられます。同社はすでに高出力、高出力密度のモーターをExtra 330などのフライング・テストベッドで成功させています。同社の260D型推進ユニットは、永久磁石を保護するために油冷方式を用いていますが、最新バージョンのエンジン、モーターでは、すでに1kgあたり5.8kWが達成されています。そしてさらに高出力の定期旅客機に搭載可能な2メガワットのモーターなども開発されて、これは1kgあたり10kWを出力できます。

熱処理の課題

航空機業界はいろいろな排熱法を模索しています。解決法の1つは、熱交換の効率を高めて、モーターと関連コンポーネントから熱を排出させることです。たとえば二相冷却サイクル・システムなどが考えられます。しかし明らかにそうした動的な問題は、航空機のアーキテクチャーを定義する前に検討しておく必要があります。それぞれの航空機とそのミッションにはどのような構造アーキテクチャーと、どのようなシステム・アーキテクチャーが最適なのかを考えなくてはならないのです。そのために熱物理学はもちろんのこと、エンジニアリング物理学のあらゆる側面についてコンポーネントのレベルからも航空機全体のレベルからも検討できるデジタル・ツインが必要になります。

ロールス・ロイス・エレクトリカル社の例では、航空機用モーターの開発に最新鋭のデジタル・ツイン技術を導入していて、シーメンスのXceleratorポートフォリオを最大限に活用しています。シーメンスのデジタル・モックアップとCADモデルの開発ソリューションを使ってモーターを開発しているだ

けでなく、すべてのデータと要件をXceleratorポートフォリオで管理しているのです。シミュレーションでは、電気モーターの電磁気学的構成を最適化するために一メンスのツールで電磁挙動を調べています。また、流体力学の機能を使ってモーターを冷やす適切な油冷システムの実装のしかたや、モーターの部分によっては空気流も利用する方法などを研究しています。

また、構造的な完全性や剛性も重要です。出力密度を高めるために構造の質量を小さくすれば、剛性も低下するので、モーターが変形して電磁気学的挙動に悪影響が出るおそれがあります。このような複数の物理学的側面にわたる相互作用も理解しておかなくてはなりません。

そこでロールス・ロイス・エレクトリカル社はシーメンスのツールを使用して、CADモデルのパラメーターとリンクさせた緊密に統合されたデジタル・ツインを作成することにより、適切な解決法を導き出しているのです。

Xceleratorポートフォリオの活用例

シーメンスのソリューションでは包括的で完全なデジタル・ツインを作成できます。航空機の総合的な熱バランスについて、エンジニアリング物理学のあらゆる側面を反映させたシミュレーションが可能です。

まずコンポーネントのレベルで構造的挙動や熱挙動や電磁学的挙動を理解し、それから航空機全体にまで対象を拡大し、最終的には仮想統合航空機モデルを作成することができます。このモデルはエネルギーや熱に関して、異なるシステム間での相互作用を機材レベルで理解するために大切なことです。もう1つは、扱える物理特性という意味でのスケラビリティです。構造を検討することができ、熱挙動やシステム間のエネルギー交換を理解できる必要があります。モーターは電磁学的特性だけでなく、動力学的にも理解しなくてはなりません。たとえば電気ドメイン内では、モーターと関連コンポーネントがどのようにして電磁界を作り出すかを、電磁コンプライア

スと干渉の観点から把握する必要もあります。このように幅広いエンジニアリング物理学の領域を扱わなくてはならない上に、さまざまな手法も必要です。

シーメンスのXceleratorポートフォリオを活用すれば、エンジニアはタスクを効率よく遂行できます。たとえば流体力学機能や、1Dシステム・シミュレーション機能。3D CAE機能もあります。さらに航空機開発プログラム、モーター開発プログラムのライフサイクルにおけるスケーラビリティがあります。トレードオフの検討はなるべく早期に行う必要があり、それには粗モデルが必要です。粗モデルでは、たとえば電気モーターの冷却システムなどについて、さまざまな構成を短時間で検討できます。しかし開発のライフサイクルが進むにつれ、より詳細で高精度のモデルが必要になります。開発後期の検証フェーズで、統合された航空機の検証を、モデルを用いてModel-in-the-Loop (MIL)、Software-in-the-Loop (SIL)、Hardware-in-the-Loop (HWIL) 方式のテストベンチで実施するには、リアルタイムのモデルが必要になります。つまりシステムの物理特性を反映したモデルを、リアルタイムに実行できなくてはなりません。

しかもデジタル・ツインがすべてではなく、幾つものチームのプロセスをどう管理していくかという課題もあります。サプライチェーンのプロセスも同じです。

要件文書からスタートして検証を完了するまでのプロセス管理するために必要になるのが、シーメンスが提供するデジタル・スレッドの機能です。検証管理ソリューションでは、個々の要件をModel-in-the-LoopあるいはHardware-in-the-Loopのテストベンチで作成される対応する情報に紐付けることができます。そのデータを実施したシミュレーションにリンクさせることで、もともなった要件までのトレーサビリティも確保できます。

シーメンスのツールやソリューションを既存のツールキットに加えることで、プログラムのデジタル・ツインを構築できますが、こ

れには会社の規模やプロセスのタイプに合わせて調節できるスケーラビリティが備わっています。マルチフィジックス / マルチドメイン的に進行している業務を深く確実に理解するのに役立ちます。そのような包括的なデジタル・ツインがあれば、きわめて柔軟でオープンなエコシステムに各種のソリューションを素早く組み入れることができます。導入したツールや手法と得られた知識を活用し、ツール間のワークフローを自動化することによって、イノベーションを推し進めることができるのです。管理業務を減らせれば、エンジニアや技術スタッフは問題を解決したり、クリエイティブなソリューションを考え出したりする得意な仕事だけに集中することができるため、認証までの開発期間を短縮することができます。

シーメンスの航空宇宙 / 防衛ソリューションは一歩進んだイノベーションを実現し、明日のテクノロジーを現実的な、実績ある方法によってお客様に提供します。

この記事は「イノベーション」ポッドキャスト・シリーズ (Episode#3) の概要です。

音声 (英語) でお聞きになりたい方は以下のページにアクセスしてお聞きください。

Episode#3: eVTOL Power Density and Thermal Management