

論文の内容の要旨

論文題目 Fluid Dynamic Loss in Aeroengine Transmission Gears

(航空エンジン・ギヤシステムの流体力学的損失に関する研究)

氏名 有澤 秀則

民間航空機の燃費低減のために、高バイパス比化および機体の電動化が進展し、今後もその傾向は続くと思われる。高バイパス比化のトレンドとしてエンジンのギヤ化(ファンと低圧段の間に減速ギヤを設置)、機体の電動化のトレンドとして空調等の電動化が挙げられ、いずれも減速ギヤでの伝達動力の増加に伴って動力損失および燃費が増加する。

航空ギヤでは小型軽量化のために高い回転数(周速)のギヤが用いられ、空気と油の二相流の流体力学的損失の割合が増すことから、その低減が重要である。一方、従来のギヤシステム設計方法では、低動力損失設計よりも、強度設計や重量設計が優先される傾向にある。これは、低動力損失設計の精度と信頼性に課題があるためであり、その原因は、流体力学的損失の現象解明・分類とモデル化、およびそれらに基づいた低動力損失設計の標準化が不十分であることによる。

そこで本研究では、「高速ギヤシステムの低動力損失設計の標準化に資する、油と空気の二相流の流体力学的損失現象の解明と分類」を目的とした。加えて、低動力損失設計の標準化の効果を示すため、流体力学的損失の現象解明と分類の結果に基づいた損失モデルの提案、ギヤ直径やギヤ幅などの代表的なパラメータの影響、および低損失設計の実施例として、ギヤアスペクト比(ギヤ幅/ギヤ直径)の最適化およびシュラウド(ギヤの囲い)の最適化を行った。

研究の前提として、本研究で対象とする現象は、ギヤ歯面の動力伝達に必要なヘルツ接触面を除いた面への流体の作用とする。ヘルツ接触面とそれ以外の面は、接触面積が歯面積に対して微小であることなどから、切り分けて取り扱うことが可能であることを把握した。

流体力学的損失現象の解明と分類には、実験検証された数値解析結果を用いた。ギヤ周りの高速気液二相流の数値解析の実用的な前例が見当たらないため、流体力学的損失の検証だけでなく、空気流れの検証、油流れの検証も行い、その妥当性の検証を行った。回転翼の数値解析と異なり、ギヤかみ合い部分の流れの再現が難しいことから、この部分に特に着目して検証を行った。

数値解析方法として、気液界面での計算安定性の確保と計算速度の両立のため、計算格子に矩形格子、気液界面の計算方法に Volume of Fluid 法、物体境界の取り扱いにポロシティ法を選択した。壁面でのせん断応力は、物体速度と流体速度の差、および乱流モデルから計算した。流体力学的損失は、ギヤ歯面にかかる圧力およびせん断力を積分することで求められた。

航空ギヤと同等の諸元を有する実験装置として、最高周速 100 m/s の 2 軸ヘリカルギヤボックスを用いた。計測誤差要因である軸受・シールの摩擦損失の精度向上のため、ギヤボックス内圧および温度の調整による、その場計測方法を新たに考案した。得られた空気の流体力学的損失および油の流体力学的損失について、解析結果と実験結果の傾向が一致した。

空気流れに関する解析モデル化方法として、計算安定性確保のために、実機では接触している歯面に対して隙間を設けた。ギヤかみ合い部の空気流れの検証のため、かみ合い隙間での空気圧力の検証を行った。その結果、数値解析がかみ込みでの圧力の上昇を再現した。その一方、かみ外れでの圧力の低下幅は小さくなった。この差は、ギヤにかかる力で評価すると、概ね実用的な誤差相当に留まった。

油流れに関する解析モデル化方法として、計算格子内の油粒子の運動量変化に着目した粗視化の考え方、微細な格子を不要とする油ジェットの簡易モデル化方法、二相流中では单相流よりも抵抗係数が低下する現象の

考慮による解析精度の向上方法について新たに考案した。油流れの検証のために、ギヤボックス内のオイルミスト影響を排除できるエアパージ機構と光源を同軸に備えたボアスコープを新たに考案し、油ジェットを可視化した。その結果、低回転でのかみ合いからの油の噴出、高回転での油の巻き込み現象について、解析結果が実験結果の傾向を再現した。

空気の流体力学的損失現象を数値解析結果から解明した結果、かみ合い部での空気の押し出しおよび吸い込み流れによるトルク発生、ギヤ周辺部での歯の谷で発生する渦流れによるトルク発生、およびシュラウドはこれらの流れを抑制することでトルクを低減することが分かった。油の流体力学的損失現象を数値解析結果から解明した結果、ギヤかみ合い部での給油された油および再流入する油の加速によるトルク発生、ギヤ周辺部での歯面への油流入やギヤ歯面に付着した油の巻き上がりによるトルク発生、シュラウドはギヤ周りの油の量を増加させることでトルクを増加させることが分かった。すなわち、シュラウドは、空気の流体力学的損失を低減させる一方、油の流体力学的損失を増加させることが分かった。

以上の現象解明に基づき、空気の流体力学的損失を、ギヤかみ合い横を通過する空気流れによる「空気横流れ損失」、ギヤかみ合い頂げき・バックラッシュ隙間を通過する空気流れによる「空気ポンピング損失」、ギヤ周辺部での渦による「空気渦損失」に分類した。油の流体力学的損失を、ギヤかみ合い部で給油された油の加速による「給油加速損失」、ギヤかみ合い部に再流入する油の加速による「油再加速損失」、ギヤ周辺部での油の攪拌による「油攪拌損失」に分類した。分類後の損失要素は、実験により検証された。従来研究は、油加速損失、風損等の分類(要素検証無し)に留まっていた。

空気横流れ損失を、ギヤ歯の空気抵抗モデルとして本研究で初めて考案した。空気ポンピング損失を、従来研究の類推から、頂げき隙間等での空気の加速としてモデル化した(加速される空気の質量流量が小さいため、この損失は無視できる)。空気渦損失を、一般的な回転円筒のモーメント係数を用いて、従来研究の実験式を再整理した。給油加速損失は、従来研究通り、ギヤかみ合いに給油された油をギヤ周速まで加速する損失とした。油再加速損失を、シュラウドの効果を含めたモデルとして、本研究で初めて考案した。油攪拌損失を、従来研究の風損から油の効果のみを抽出したモデルとして本研究で初めて考案した。損失モデルから、主要パラメータを把握した。

低動力損失設計のための設計パラメータの影響について、損失モデルを用いて考察した。流体力学的損失低減には、ギヤ直径の削減が最も効果があり、ギヤ幅・ギヤモジュールの削減は同等となった。ギヤ直径・ギヤ幅の削減では定格荷重(面圧強度)が低下することから、定格荷重を一定とするために幅/直径²(これが面圧強度に比例する)を一定とし、パラメータとしてギヤアスペクト比(=幅/直径)を用いた。ギヤアスペクト比の変化に伴う損失モデルのパラメータの変化から、損失の変化の原因を考察した。また、最適ギヤアスペクト比は、ギヤアスペクト比の増加に対してギヤ歯面の摩擦損失が単調増加、流体力学的損失が単調減少である特性から決定されることを把握した。シュラウドについては、ギヤ設計への影響がないため、流体力学的損失を低減させるように最適化が可能である。シュラウドの最適値は、シュラウド係数の増加に対して空気の流体力学的損失が増加し、油の流体力学的損失が低下する特性から決定されることを把握した。

高速ギヤシステムの低損失設計の標準化には、既に確立されているギヤ強度設計の標準化との類推から、「現象解明と分類」、「標準実験計測方法」、「流体力学的損失モデル」が必要であり、本研究により、高速ギヤシステムの低損失設計の標準化の基礎を構築できたと考えられる。