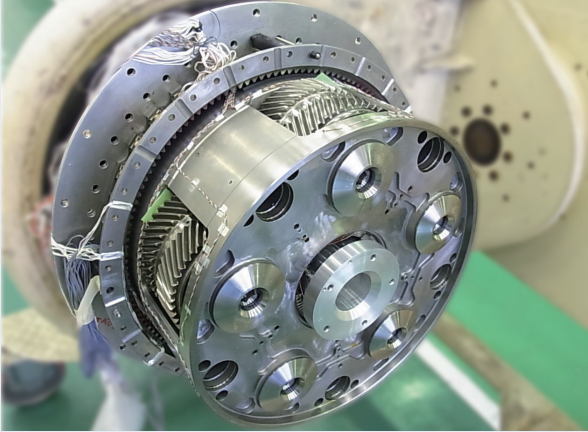


航空機用ギアボックス設計技術の高度化

Advancement of Aircraft Gear Box Design Technology



渡辺 浩二①	Koji Watanabe
五井 龍彦②※*	Tatsuhiko Goi
坂野 孝彦③	Takahiko Banno
今井 秀幸④	Hideyuki Imai
有澤 秀則⑤	Hidenori Arisawa
篠原 俊宏⑥	Toshihiro Shinohara
西川 弘泰⑦※	Hiroyasu Nishikawa

近年の航空機に対する燃費や信頼性向上への厳しい要求に応えるため、航空機用ギアボックスの軽量化・高信頼性・高効率化を実現する必要がある。当社では、これまでさまざまな航空機用ギアボックス製品の開発や製造を行ってきており、さらにCAE技術を活用した解析・シミュレーションによる世界トップクラスの設計技術の開発を行っている。

It is necessary to reduce the weight and enhance the reliability and efficiency of aircraft gear boxes to satisfy recent severe demands for improving the aircraft's fuel efficiency and reliability. We have developed and manufactured a variety of aircraft gear box products and developed world-leading design technologies through analysis and simulation leveraging CAE technology.

まえがき

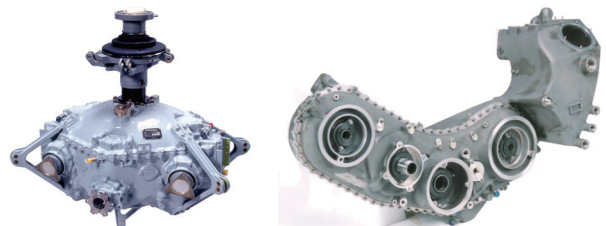
地球温暖化や燃料高騰に伴い、航空機に対する燃費向上・エミッション低減・信頼性向上の要求はますます厳しくなっている。また、旅客数の増加に伴う航空機便数の増加や主に洋上油田へのヘリコプターによる洋上輸送の拡大を受けて、安全性への要求も高くなっている。

用のギアボックスの研究開発を実施している。

航空機用ギアボックスの従来の設計は、これまでの実績や経験をもとに設計し、試作品の試験結果を見て設計変更と再試験を繰り返して最終形態を決定するという手順であり、試行錯誤が必要なために時間やコストを要していた。一方で、次世代航空機用ギアボックス製品に対しては、これまで以上に短期間かつ低コストで軽量・高信頼性・高効

1 背景

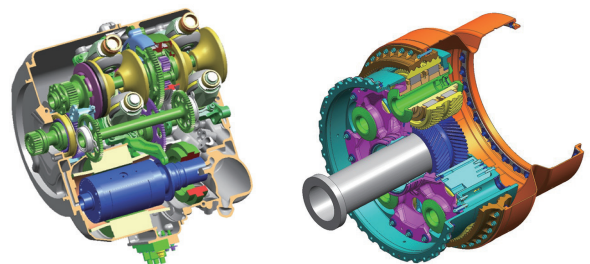
航空機市場は今後も堅調に成長することが予想されており、航空機用ギアボックス製品に対しては、軽量化・高信頼性・高効率化が求められる一方でコスト競争力のある新機種を早期に市場投入する必要性から、短期間かつ低コストでの製品開発が要求される状況となっている。



(a) 「BK117」トランスミッション (b) 航空エンジン用アクセサリギアボックス

2 航空機用ギアボックス設計における課題

当社は、図1に示すような、「BK117」をはじめとするヘリコプター用トランスミッション、航空エンジン用アクセサリギアボックス、トラクションドライブCVT（無段変速機）を応用した航空機用一定周波数発電装置「T-IDG」などの開発・製造および修理・オーバーホール事業を実施している世界トップクラスの航空機用ギアボックスメーカーである。また、近年ギアード・ターボファンなどギアを介してファンを駆動する航空エンジンであるギアードエンジンの開発が進んでおり¹⁾、当社においてもこのエンジン



(c) 「T-IDG」 (d) ギアードエンジン用ギアボックス

図1 当社の代表的な航空機用ギアボックス
Fig.1 Representative KHI aircraft gear box

率かつ安全性の高い製品を開発することが求められる。このため、要求仕様を満足する設計を短時間で実現する効率的な設計手法の開発が必要となっていた。

3 CAE技術を応用した設計効率化

以上の課題を解決するため、これまでの実績や経験および最新のCAE技術を駆使したシミュレーションと解析を組み合わせた設計手法を開発し、試験により検証している。各部品の変形や温度を予測して設計することで信頼性を向上させたり、損失を予測して設計することで効率を向上させたりしている。

(1) ギアボックス変形解析によるミスアライメントの低減

荷重を受けた各構成部品の変形によって起こるミスアライメントは、ギアの噛み合い歯面やベアリング接触部において片当たりを引き起こして、ギアボックスの信頼性に悪影響を与える。すなわち、ギアボックスの信頼性を向上させるためには、この影響を低減する必要がある。変形を抑えるためには、厚みを持たせるなどして剛性を高める必要があるが、重量が増加してしまうことになる。そこで、荷重を受けた際の各構成部品の変形を有限要素法FEM解析で予測して各部品の剛性を調整することで、変形の影響の低減と軽量化を両立した設計手法を開発した²⁾。

プラネタリギアシステムの従来の設計では、図2(a)に示すように、荷重伝達経路の前側と後側で剛性が異なるため、トルクによりキャリアがねじり変形してプラネタリギアの軸が傾いてしまう。これに対して開発した剛性最適化設計では、荷重経路の剛性を最適化することで、図2(b)に示すようにプラネタリギア軸の傾きを低減できる。

変形解析によりミスアライメント低減設計を実施した結果を図3に示す。初期形状ではフロントプレートの剛性が大きく荷重の影響によるプラネタリギア軸の傾きが大きい状態となっていたが、最適設計形状では前側と後側の剛性を均一にすることでプラネタリギア軸の傾きの低減と軽量

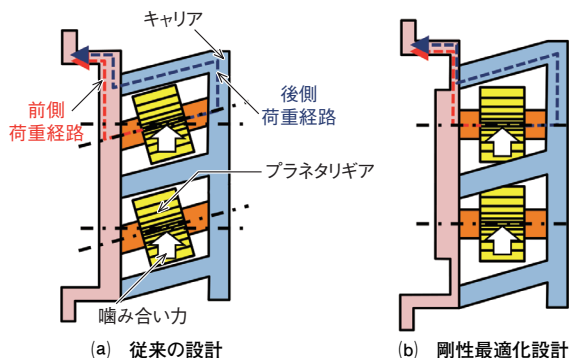


図2 プラネタリギアシステムの設計
Fig. 2 Design of planetary gear system

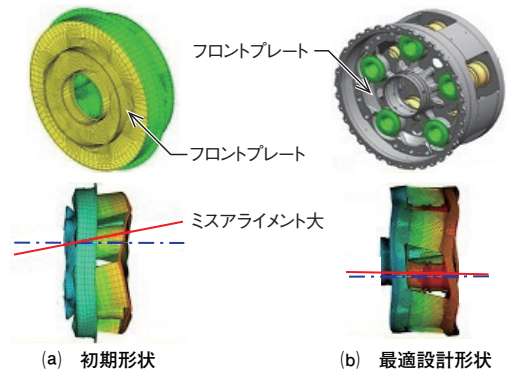


図3 変形解析によるミスアライメント低減
Fig. 3 Misalignment reduction through deformation analysis

化を両立している。本設計を採用した実機サイズの供試体で、実機の運転条件を模擬した耐久試験を実施した。耐久試験後の分解検査結果では、主要構造部材・各ギア歯面・ベアリングはすべて健全な状態であり、本設計手法の有効性を確認できた³⁾。

(2) 構成部品の変形を考慮した歯当たりの最適化

航空機用ギアボックスに使用されるベベルギアの高信頼性を実現するためには、運用中のさまざまな負荷条件において動力を伝達する歯面同士の歯当たり（歯の接触範囲や圧力分布）を適切にする必要がある。歯当りは、ギアとそれを支持する構成部品の荷重による変形に大きく影響される。変形を低減するためには各部品の剛性を高める必要があるが、重量が増加してしまうことになり、軽量化と高信頼性を両立する歯当たりの設計には長期間を要していた。そこで、短期間かつ低コストでこれらを両立させた設計を行うために、負荷による各部品の変形を解析により見積もるとともに歯当たり状態を予測してギア歯面を設計する手法を開発した。

開発した歯当たり最適化設計手法の概要を図4に示す。まず、FEM解析によりギアとそれを支持するハウジングなどの構成部品の変形を解析して、変形後の歯面形状や歯

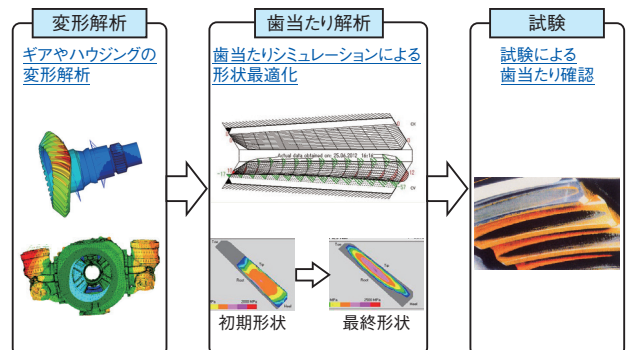


図4 歯当たり最適化設計手法
Fig. 4 Gear tooth contact pattern optimization design method

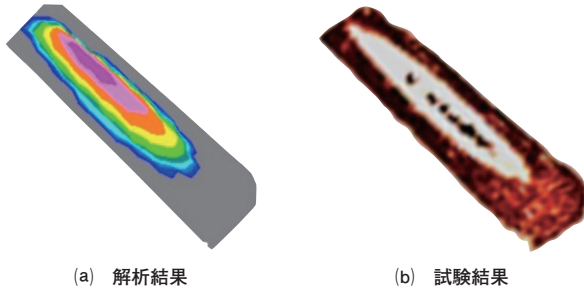


図5 歯当たり解析結果と試験結果
Fig.5 Analysis and test results of gear tooth contact pattern

面どうしの位置関係を予測する。そして歯当たりシミュレーションソフトにより歯当たり状態を解析・調整し、歯当たりが適切となるギア歯面を設計する。その後、実際にギアを試作して、解析どおりの適切な歯当たりとなるかを試験により確認する。

本手法で実施した歯当たりの予測結果と、実際に負荷試験を実施して歯当たり状態を確認した結果の一例を図5に示す。図5(a)に示す解析結果の灰色部と図5(b)に示す試験結果の茶色部が1つの歯面であり、中央の楕円が歯当たり範囲となる。解析による結果と試験結果は良く一致しており、本設計手法が有用であることがわかる。

(3) オイル流れCFDによる損失の低減

ギアボックス製品の効率にはギアボックス内部の回転部品が起因しており、これらが潤滑と冷却に用いるオイルをかきまぜる際のかきまぜ損失と風損、さらには部品同士の摩擦損失が主な要素である。

オイルのかきまぜ損失は、ギアの圧縮機羽根のようなポンプ作用により周囲流体を大きく攪拌することが主要因である。航空機用ギアボックスでは、小型軽量化のために高速回転ギアを用いており、オイルのかきまぜ損失がギアボックス全体の損失の50%を越える場合もある。この損失を低減するためには、オイルに伝達される運動量を最小化する、すなわち必要な箇所に必要な量のオイルを供給するとともに即座に排出する必要がある。

損失を低減した設計を実現するために、オイルと空気の高速二相流およびギアのかみ合い部分の適切なモデル化によるこれまでにないCFDシミュレーション技術を開発した⁴⁾。この技術を用いて、ベベルギアの損失低減のために、ギア周囲をシュラウドで囲みオイルの排出口を設ける構造について、オイルのかきまぜ損失と風損のシミュレーションによる予測と試験による検証を行った。

シュラウドが無い場合の状況を図6に、シュラウドが有る場合の状況を図7に示す。シュラウドが無い場合では、ギアボックス内部にオイルが飛散し、それをギアがかき混ぜるために損失が増加する。一方シュラウドがある場合では、オイルは必要な量だけギア歯面のみを流れ、さらにオ

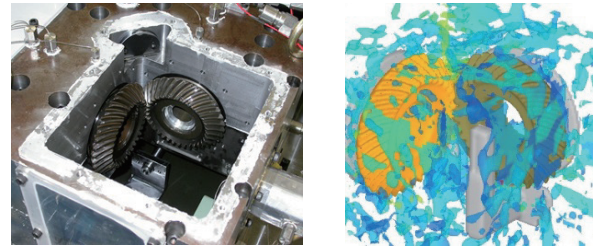


図6 対象ギアボックスとシミュレーション状況(シュラウド無し)
Fig.6 Test gear box and simulation result (without shroud)

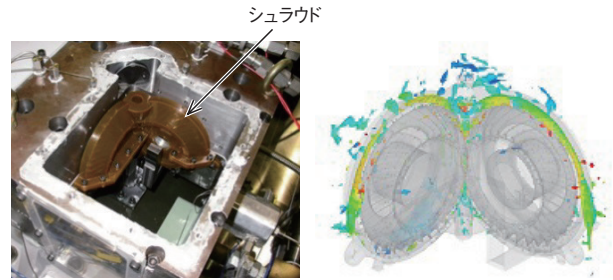


図7 対象ギアボックスとシミュレーション状況(シュラウド有り)
Fig.7 Test gear box and simulation result (with shroud)

イルの排出口の位置を調整することでシュラウド内部のオイル流れをスムーズにして損失を低減する。シュラウドが有る場合の損失の低減率について、試験結果とシミュレーション結果は良く一致しており、本技術が高効率を実現する最適設計に有用であることを確認した。また、本試験でシュラウド形状およびオイルの排出口位置を調整することで、シュラウド無しの場合に比べて30%程度損失が低減されることも確認した。

本設計手法は、プラネタリギアシステムの実証試験用供試体の設計にも適用しており、ギアボックス全体で目標である99.5%以上の伝達効率を達成することができた⁵⁾。

(4) CFDと伝熱解析によるドライラン性能の向上

ヘリコプターの安全性に関する要求のひとつに、トランスミッションのドライラン性能がある。ドライランとは、ギアやベアリングの潤滑と冷却に用いるオイルが失われる状態を指す。ドライラン状態においては、ギアやベアリングが過熱し焼き付いて作動不能となり、ヘリコプターの不時着や墜落という事態に陥るおそれがある。ドライラン状態に陥った際に、飛行を継続できる能力のことをドライラン性能と呼び、現在は30分以上のドライラン性能が要求されている。しかし、ヘリコプターによる洋上油田関連の輸送の拡大を受けて長距離輸送の機会が拡大しており、次世代ヘリコプターに対してはこれまで以上のドライラン性能が要求される。

ドライラン性能向上のための従来の設計は、焼付きを遅らせるようにギアやベアリングの寸法を試験データを元にした経験則から設定するというものであった。より高いド

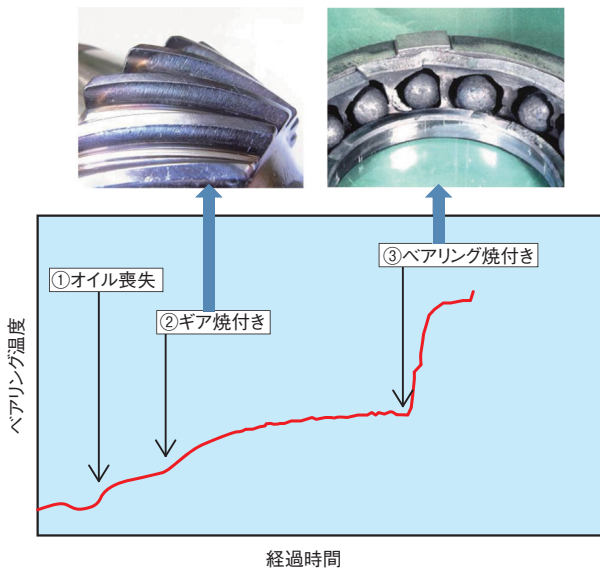


図8 ドライラン試験結果
Fig.8 Dry run test result

ライラン性能を実現するためには、経験則による設計だけでは困難であり、新たな設計手法が必要となっている。

実機用ギアボックスのドライラン試験結果の一例として、オイル喪失後のベアリング温度変化を図8に示す。ギアやベアリングの潤滑と冷却に用いるオイルが失われると、各部品の温度が徐々に上昇して最終的にギアやベアリングが損傷する。ドライラン開始から終了までの温度上昇は、①オイルの喪失による発熱と放熱のバランス喪失、②ギアの焼付きによる温度上昇、③ベアリングの焼付きによる温度上昇、の3つの段階に大きく分けられると推定される。また、これらの各段階において発熱量と放熱量のバランスで決まる温度に向かって、一定の持定数で収束していくと考えられる。

過去の経験や実機試験によらず、設計段階でドライラン性能を定量的に評価するため、上記の推定をもとにCFDと伝熱解析を組み合わせたシミュレーションによるドライラン性能の評価手法を開発中である。

あとがき

昨今のCAE技術の進歩により、設計最適化によるフロントローディング型の開発が可能となってきている。一方で、航空機用ギアボックスに対しては、他分野の製品以上の軽量化・高信頼性・高効率化が要求されるとともに、昨今の航空機市場状況から短期間・低コストでの開発が要求されている。

今回述べた世界トップクラス的设计解析手法やシミュレーション技術をさらに成熟させて実機設計に適用していくとともに新規設計技術の開発も進めていく。これらをもとに差別化とシェア拡大を図り、航空機用ギア関連製品の世界トップメーカーを目指す。

参考文献

- 1) 五井龍彦, “航空機エンジンの“Geared”化動向”, 日本ガスタービン学会誌 Vol.43 No.3 2015.5
- 2) Matsuoka, T. 他, “Light Weight and Low-Misalignment Planetary Gear System for Open Rotor Power Gearbox”, ASME IDETC/CIE 2011, DETC2011-47342
- 3) Sato, K. 他, “Design, Analysis, and Tests of Differential Planetary Gear System for Open Rotor Power Gearbox (Final Report)”, ASME IDETC/CIE 2015, DETC2015-46414
- 4) Arisawa, H. 他, “CFD Simulation for Reduction of Oil Churning Loss and Windage Loss on Aeroengine Transmission Gears”, ASME GT 2009, GT2009-59226
- 5) Imai, H. 他, “Design and Test of Differential Planetary Gear System for Open Rotor Power Gearbox”, ASME IDETC/CIE 2013, DETC2013-12089



渡辺 浩二



五井 龍彦



坂野 孝彦



今井 秀幸



有澤 秀則



篠原 俊宏



西川 弘泰