

転がり軸受用技術計算システムの開発

Development of Technical Calculation Systems for Rolling Bearings

石河 智海 * Tomomi ISHIKAWA
蛭川 博康 * Hiroyasu HIRUKAWA
和泉 麻理子 * Mariko IZUMI
Cedric BURNET **

転がり軸受に求められる性能は多岐に亘っており、近年では環境対応などによりその傾向は加速している。これらの要求に迅速に対応するためには、デジタル技術の一つであるCAE（Computer-Aided Engineering）技術の活用が欠かせない。その事例として、転がり軸受の設計業務の高度化および効率化を目的に開発した2つの技術計算システムを紹介する。

The performance requirements for rolling bearings are diverse, and the trend has accelerated in recent years due to environmental concerns and other factors. In order to respond quickly to these requirements, the use of CAE (Computer-Aided Engineering) technology is indispensable. As examples, two technical calculation systems which are developed to improve the efficiency and sophistications of rolling bearing design is introduced.

1. はじめに

市場動向や顧客ニーズを考慮した競争力のある多種多様な軸受製品をタイムリーに市場投入するには、製品開発業務の高度化と高効率化が必要であり、その実現のためにNTNではCAE技術の活用を推進している。2018年10月には社内におけるCAE技術の研究開発を加速させるためにCAE開発研究所¹⁾を設立した。

従来から軸受の製品開発業務にはNTN独自のCAEシステムや市販ソフトウェアを使用してきたが、開発プロセス全体を見据えた効率化においては、例えば、設計値を算出するために細分化された複数のシステムを設計要件に応じて組み合わせて使用する必要があったり、定常的なFEM（有限要素法）解析作業であってもCAE専任者が作業する必要があるなど、課題があった。

そこで、既存の計算システムを統合し、新機能を加えた転がり軸受用統合技術計算システム“SharcNT”（シャークエヌティー）と、3世代ハブベアリングの設計作業を自動化した統合計算自動化システム“ABICS”（アビックス）という2つのシステムを開発し、業務効率を改善した。本稿では、これらのシステムの概要について述べる。

2. 転がり軸受用統合技術計算システム

2.1 背景

転がり軸受は、機械システムに使用される重要な機械要素で、その要求性能は長寿命、低トルク、高剛性、高精度など様々である。近年は、カーボンニュートラルの実現に向け、省エネルギー化および脱炭素化が進んでおり、転がり軸受の使用環境、要求仕様・性能が多様化している。例えば、自動車や各種産業機械の電動化により、軸受は小型化・軽量化および超高速仕様が求められる一方で、再生可能エネルギーとして期待される風力発電では大型化・洋上化が進み、軸受は大型で長寿命化が求められる。このような市場動向・顧客ニーズへの対応に加え、高信頼性かつ高性能な軸受設計や設計リードタイム短縮の要求は強く、これらに応えるためにはCAE技術の活用が必須である。

転がり軸受の設計初期段階では、軸受の主要性能評価として寿命や内部荷重を理論計算に基づき算出する。近年は、動力伝達機構を含むアプリケーション全体の計算や軸受周辺の弾性変形を考慮した計算など、計算モデルは大規模化、複雑化、高度化している。

そこで、設計者がCAE技術を駆使して迅速に軸受を設計できるよう、NTN独自の転がり軸受用統合技術計算システム“SharcNT”（Shaft, Housing and Roller Coupling with NTN Technology）を開発したので紹介する。

* CAE 開発研究所

** NTN-SNR ROULEMENTS Research, Innovation & Development

2.2 計算システムのグローバル統合

従来 NTN では、転がり軸受の設計要件に応じて、目的別の複数の計算システムを組み合わせることで設計検討を行ってきた。しかしながら複数のシステムを駆使するには、一定の経験が必要であった。そこで、社内の既存システムを精査し、NTN のグループ会社である NTN-SNR で開発、使用されてきたシステムをベースに、NTN の従来計算システムの主要計算機能を統合 (図 1) した SharcNT を開発した。

SharcNT は、軸受寿命、軸受荷重、荷重分布、接触応力、軸受剛性、軸受トルクなど性能評価に必要な計算機能に加え、直感的な GUI を用いて軸受を配した複数軸の計算モデルの構築ができる (図 2)。

統合により一つのシステム内で、多種多様な計算が可能になった。また、複数のシステムの統合により、設計者のスキル習得が容易になった。



図 1 計算システムの統合

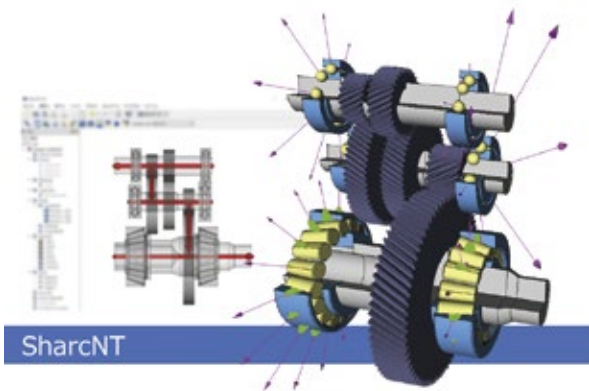


図 2 統合技術計算システム“SharcNT”

2.3 アプリケーション全体の計算

近年の減速機は、自動車を例にとるとガソリン車・ハイブリッド車・電気自動車のそれぞれの特徴に合わせて多様化しており、シンプルな構造から多段で複雑な構造まで様々である。後者で使用される軸受をアプリケーション全体で検討する場合、計算モデルはより複雑となり計算結果の理解や検証も難しくなる一方で、設計リードタイムの短縮も必要とされている。このため、複雑な構造であっても軸受の特性を正確かつ迅速に把握しなければならない。

SharcNT では、複雑な変速機構造に対応するために、平行軸や直交軸などを多数配置した計算モデルの作成や、それらのパワーフロー（動力伝達経路）を考慮した軸受の

詳細な解析を可能としている。また、各運転条件の頻度を設定することで軸受の総合寿命を求めることができる。さらに次節で述べる軸受周辺の弾性変形を加味した高度な計算を短時間に完了できるように開発した。

また、計算により求まる軸受の内部荷重を理解するためには、軸がギヤ荷重や軸受位置などの境界条件により、変形を伴いながらどう変位するかを確認する必要がある。構造によっては、パワーフロー毎に示される数値情報だけで計算結果を検証するのは至難と言える。その対応として各計算結果の可視化を図った。図 3 に変速機の計算例を示す。計算モデルは 3D モデルで表示され、そのモデル上で内部荷重のベクトルや軸の変位などを視覚的に確認できるようにした。また、軸受毎の詳細な結果は、数値データに加え、種々のグラフが出力される。これらの改善により計算条件による特性把握が容易になった。

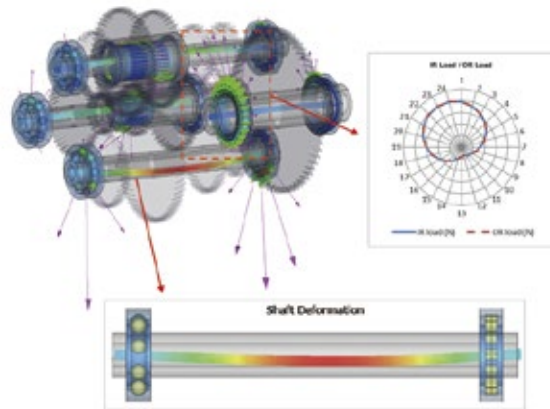


図 3 アプリケーション全体の計算例

2.4 軸受周辺の弾性変形を考慮した計算

通常、軸受の内部荷重は、転動体と軌道面の接触部のみが微小変形するという仮定の元に計算される。しかしながら、一部のアプリケーションでは、ハウジングの剛性が低く（肉厚が薄い、アルミ合金が用いられているなど）、外輪およびハウジングの弾性変形を考慮しなければ、精度よく軸受の内部荷重を求めることができない。この場合、FEM を用いて外輪およびハウジングの弾性変形を考慮した計算を行うことが可能であるが、高精度の計算には専門知識が必要な上、一連の計算に時間を要する。SharcNT では、転動体と軌道面の接触部に自由度を残し、外輪およびハウジング全体を“仮想ばね”（縮約剛性マトリックス）として弾性変形を考慮できる機能²⁾を搭載した。この機能により、外輪およびハウジングの弾性変形を考慮した計算を、FEM と比較して高速に行える。

なお、“仮想ばね”を用いて内輪および軸の弾性変形を考慮した計算も可能であるが、内輪と軸のはめあい部は外輪とハウジングのはめあい部に対して剛性が高く、軸の弾性域内でのたわみのみ考慮すれば十分な場合が多い。こ

のような場合、軸のみをはり要素でモデル化³⁾し計算することで、計算時間を短縮できる。

3. ハブベアリングの統合計算自動化システム

3.1 開発の背景

ハブベアリングは自動車の足回りに使用される軸受で、車両のタイヤホイールの回転を支持する。1970年代後半より、車両への組立性、小型・軽量化、高性能化（軸受負荷容量、低トルク性能、耐泥水性能、剛性、強度など）の市場要求に応じ、周辺部品を取り込んだユニット商品へ進化してきた⁴⁾。現在は図4に示すGEN3と呼ばれる3世代ハブベアリングが主流である。

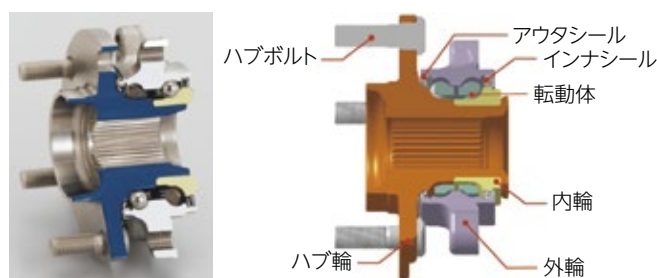


図4 3世代ハブベアリング

ユニット化した3世代ハブベアリングの設計においては、自動車メーカー各社からは長寿命・高剛性と小型・軽量化の相反する性能の両立が求められている。例えば、軸受寿命や操舵安定性に関する応力や剛性を向上させるためには、サイズの大型化が必要とされるが、同時に要求される小型・軽量化にも応えるためには、両者のバランスを考慮した設計の最適化が必須である。また設計作業においては、これらの最適化以外にもCADやFEM解析等の作業があるが、いずれも人による作業のため、ある程度の時間を要していた。

これらの課題を解決するために、各設計作業を自動化し、設計工数およびリードタイム短縮を可能とするハブベアリングの統合計算自動化システム“ABICS” (Axle Bearing Integrated Calculation System) を開発したので紹介する。

3.2 システムの概要

ハブベアリングの設計検討に必要な各種作業を自動化するために、主に以下の4つの機能を持つシステム“ABICS” (図5) を開発した。

- ・ 軸受諸元の最適値探索機能
- ・ 3D形状モデルの自動作成機能
- ・ FEM解析の自動実行機能
- ・ データ管理機能

このシステム利用により、これまでは作業別に担当者を決め分業していた作業を設計者単独で行え、さらに自動化により設計工数とリードタイム削減が可能となった。各機能の詳細を次節以降に述べる。

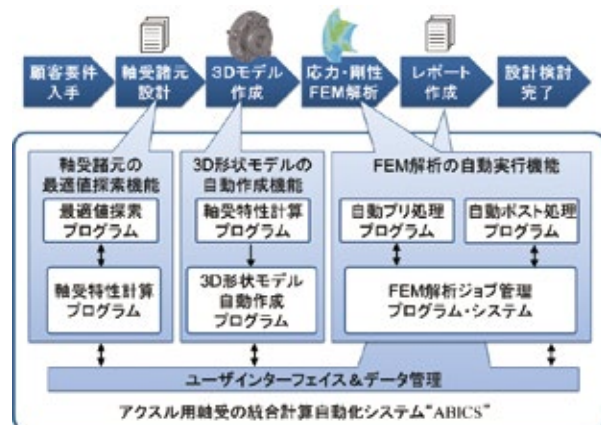


図5 ABICSのシステム概要

3.3 軸受諸元の最適値探索機能

ハブベアリングの軸受諸元を決定する際、従来は顧客の要求特性（寿命、内部質量（転動体周辺の一定領域内の質量）、内部剛性、トルクなど）を満たすまで、各諸元の変更とそれに伴う特性計算を設計者が繰り返し行っていた (図6左)。また特性計算には、特性別の計算ツールを複数使用していた。そのため、人による作業では、最適値探索と計算の両方で時間を要していた。

本システムでは、この計算ツールを統一した軸受特性計算プログラムを作成し、さらにこのプログラムと最適値探索プログラムの組み合わせにより、諸元の最適値を自動的に選定する最適値探索機能 (図6右) を開発した。

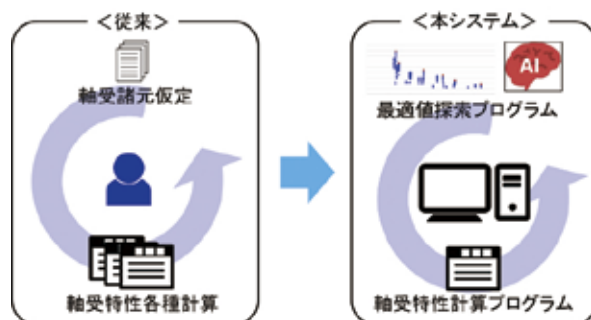


図6 軸受諸元の最適化

最適値探索プログラムには、AIに分類される遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm, 以降GAと称す) を採用している。探索には、最適化したい軸受特性を目的関数とし、この目的関数の特性に影響がある諸元の設計パラメータを説明変数として、条件を設定する。この条件においてGAにて選定された説明変数が、最適値探索プロ

ラムから軸受特性計算プログラムに渡され、軸受特性が計算される。この特性値が最適値探索プログラムに戻され、また新たな説明変数を GA が選定する。この繰り返しにより最適値を探索する。

最適値探索の例を示す。探索条件は、目的関数を相反する特性である寿命と内部質量とし、説明変数をこの2つの特性に関係する3つの諸元の設計パラメータとした。探索結果を図7に示すが、質量に対する寿命のパレート解(赤印)にて最適値の候補が決まる。この結果より、顧客の要求特性に見合った値を設計者が選定する。なお、この例において、総当たり計算で最適値を求めるには約3.4万回の計算が必要であるが、約300回の計算(青印)で最適値を探索完了している。また計算コストだけでなく、探索自動化により人による作業時間も削減した。

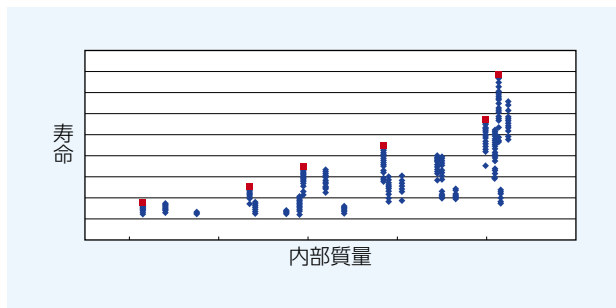


図7 最適値探索の例

3.4 3D形状モデルの自動作成機能

先に決めた軸受諸元を元に、従来はCAD専任者がFEM解析と図面作成に必要な3D形状モデルを作成していた(図8上)。CAD作業は専任者の手作業のため、モデル作成に時間を要していた。また、設計担当者との事前打ち合わせや着手中の作業が終わるまでの待ち時間が発生していた。

本システムでは、このモデル作成作業を自動化する3D形状モデル自動作成プログラムを開発した(図8下)。このプログラムでは、形状テンプレートが各種用意されており、前節の最適値探索機能や軸受特性計算プログラムから得た軸受諸元より、形状に係わる寸法が自動入力され、3D形状モデルが自動的に作成される。またテンプレート化が難しい形状の場合、概ね近い形状にて自動作成した上で、人手による修正を可能としている。



図8 3D形状モデル作成

3.5 FEM解析の自動実行機能

先に作成した3D形状モデルを元に、従来はCAE専任者がFEM解析(応力と剛性の特性評価用⁵⁾)に必要なプリ処理、計算実行、ポスト処理の各作業を行っていた(図9上)。前述の各作業と同じく、専任者の熟練度、設計担当者との事前打ち合わせや作業着手までの待ち時間などにより作業終了までに時間が必要であった。

これらの作業を自動化するプログラムとシステムを作成し、FEM解析自動実行機能(図9下)を開発した。各プログラムの詳細を以下に示す。

- ・自動プリ処理プログラム
解析対象の3D形状モデルに対し、各部位に合わせたメッシュ作成、解析に必要な周辺部品の結合および境界条件の設定などを自動で行う。
- ・自動ポスト処理プログラム
計算結果より、応力・剛性の特性値の取得、コンター図の取得、計算ログのチェック等を自動で行う。
- ・FEM解析ジョブ管理プログラム・システム
PCの利用状況に応じて、上記の各プログラムおよびFEM計算のジョブを実行させるPCを自動で振り分ける。このジョブ管理のシステムを図10に示す。利用者PCの入力情報からABICSのシステムサーバよりジョブがジョブ管理PC(本プログラムの実行PC)に配信される。このジョブ管理PCからは、プリ処理、計算実行、ポスト処理の各用途別に複数用意されたPCの利用状況に応じ、ジョブが振り分けられる。このシステムにより、ジョブの待ち時間削減とPCおよびFEM解析に使用している各種ソフトウェアライセンスの稼働率向上が可能となった。

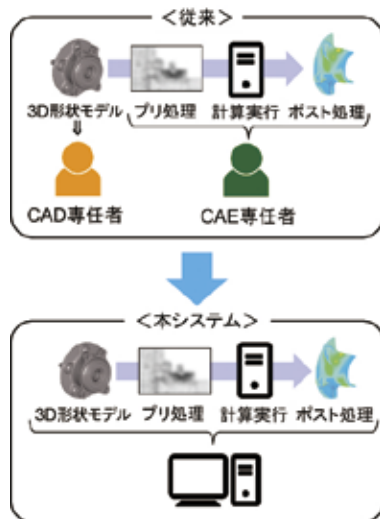


図9 FEM解析作業

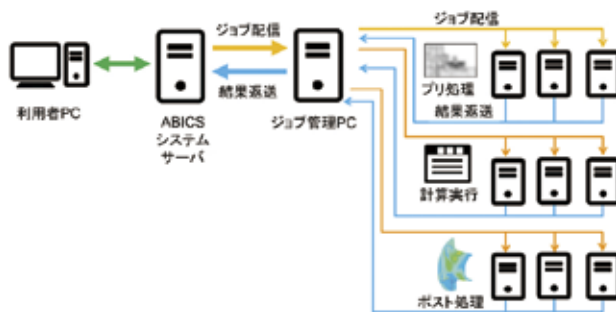


図10 FEM解析ジョブ管理システム

3.6 データ管理機能

ABICSの利用情報(入出力結果等)はすべてデータベースに保存・管理される。そのため、ABICSにて設計した情報を資産化し、有効活用できる。検索機能により、過去の設計結果を容易に閲覧することができ、さらに計算で使用した入力データの再利用が可能のため、製品改良時の再設計が効率的に行える。

また、保存された入出力結果を元に、設計レポートを自動で作成できるため、設計担当者の工数が削減されリードタイムが短縮できる。

執筆者近影



石河 智海
CAE 開発研究所



蛭川 博康
CAE 開発研究所



和泉 麻理子
CAE 開発研究所



Cedric BURNET
NTN-SNR ROULEMENTS
Research, Innovation &
Development

4. おわりに

転がり軸受の性能評価に使用される統合技術計算システム“SharcNT”および3世代ハブベアリングの設計作業を自動化した統合計算自動化システム“ABICS”について紹介した。

今後も引き続きCAE技術の研究開発や活用により、製品開発業務のさらなる高度化、効率化を推進し、市場が求める軸受をいち早く市場投入できる体制を構築する。

参考文献

- 1) CAE 開発研究所の紹介, NTN TECHNICAL REVIEW, No. 87, (2019) 表紙裏.
- 2) 転がり軸受 理論・実践ガイドブック (Cat. No. 9600/J), NTN, (2022)254-255.
- 3) 転がり軸受 理論・実践ガイドブック (Cat. No. 9600/J), NTN, (2022)253.
- 4) 関誠, 低燃費化を目指したアクスル用軸受の開発の歴史, NTN TECHNICAL REVIEW, No.87, (2019) 55-58.
- 5) 芋生明俊, ハブベアリングにおけるFEM解析, NTN TECHNICAL REVIEW, No.70, (2002) 70-73.