

# 転がり軸受における新しい CAE 解析技術について

## New CAE Analysis Technology for Rolling Bearings

中下智徳 T. NAKASHITA 鬼塚高晃 T. ONIZUKA 長谷川賢一 K. HASEGAWA

Recently, with demands on the market getting higher, it has become insufficient to analyze a part itself to get a satisfactory result, which means detail modeling has been required.

This report presents the analysis example which is intended to get a more precise result than a conventional one not only with static analysis of a part itself but also with analysis of assembled product(the Ass'y condition) or dynamic simulation.

**Key Words:** optimization, shaft system, dynamic simulation, vibration

### 1. はじめに

CAE の最大の利点は実際にものを製作しなくても、評価できることにある。

すなわち、設計した仮想モデルへ考えられるいろいろな条件（荷重、温度、圧力、回転速度など）を入力すれば、どこがどのような変形をし、どれほど応力が発生するのかなどを机上で見て判断（＝評価）できるということである。

近年の市場要求の高度化により、これまでのような製品単体解析では十分な結果が得られなくなってきており、このため詳細モデル化の必要性が出てきている。

今回ここで紹介する解析事例は、製品単体の単純な静的解析ではなく、製品が組込まれた状態（アセンブリ状態）や動的な状態をシミュレーションすることで、より実際に近い解析を目指したものである。

### 2. 最適軽量化CAE解析

最初に、自動車用ホイール軸受であるハブユニット軸受（以下ハブユニットと称す）の軽量化解析の事例について紹介する。ハブユニットの軽量化は、車両運動性能の向上や低燃費化の観点より、常に必要とされる設計ニーズである。しかし、軽量化設計にあたり、製品重量とトレードオフの関係にある強度・剛性などへの影響を正確に評価できなければ、過度の軽量化設計となり、結果としてハブユニットの損傷や周辺部品の耐久性低下につ

ながる危険性がある。したがって、軽量化に付随するそのような問題を回避するためには、アセンブリ状態における強度・剛性の評価が重要であり、製品単体のみでなくシステムを考慮した軽量化解析技術を確立する必要がある。

次項より、実際に行った軽量化 CAE 解析の適用事例について示す。

#### 2.1 アクスルアセンブリ解析

まず、ハブユニット内軸を中心とした回転輪のアクスルアセンブリ解析の実施例を紹介する。図 1 に有限要素解析モデルの構成、図 2 に解析結果の一例を示す。ハブユニット周辺部品の剛性や実車に近い境界条件を解析モデルに反映させることで、より正確に各部の強度・剛性を評価することが可能となった。本解析結果より、ハブユニット内軸には周辺部品の強度を保証するための一定以上の剛性が必要であることが結論付けられた。

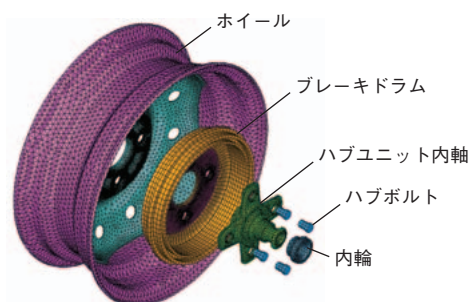


図 1 解析モデルの構成  
Composition of analysis model

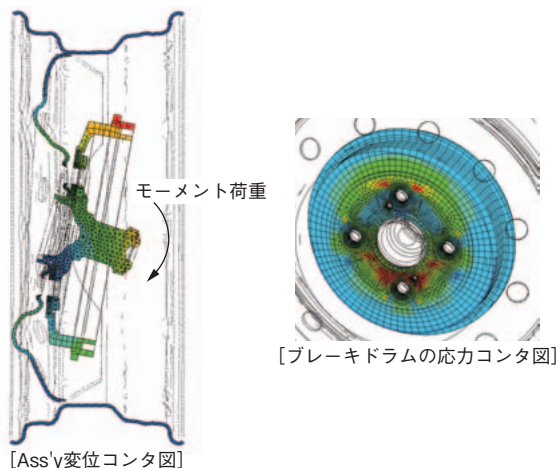


図2 解析結果の一例  
Example of analysis output

## 2.2 形状最適化解析

軽量化のための製品の形状最適化には、トポロジー最適化をはじめとするさまざまな手法があり、最近では自動車部品への適用事例も多く見受けられるようになった<sup>1) 2)</sup>。本取組みでは、有限要素モデルを用いたメッシュモーフィング形状最適化手法を採用した。ここで、最適化の目的関数（最小化する物理量）はハブユニット内軸の体積である。また、本解析では前項のアッセンブリ負荷条件を想定した場合のハブユニット内軸における外力仕事  $J$  [外力  $P$  と変位  $u$  の内積の総和、式 (1)] を求めることで、ハブユニット内軸の必要剛性を定量化し、形状最適化の制約条件として定めている。

$$J = \int_{\Gamma} P \cdot u d\Gamma \quad (1)$$

上記のような条件で形状最適化を行った結果を図3に示す。現行量産モデルであるベース形状は、元々軽量の十字型形状であったが、本解析により重量をさらに5%削減することに成功した。また、最適化形状はベース形

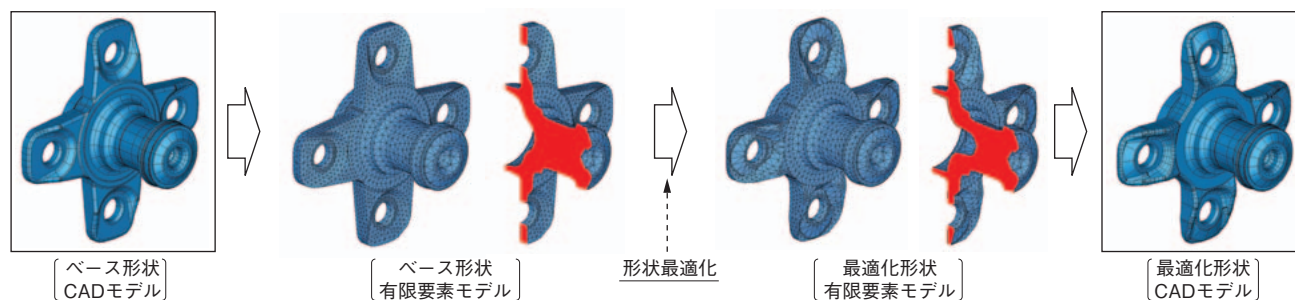


図3 形状最適化解析結果  
Results of design optimization analysis

状の強度・剛性をほぼ100%維持していることに加え、ハブユニット周辺部品の強度も同時に保証している。

本項ではハブユニットの軽量化解析について簡単に紹介したが、今回の取組みは多様化する軽量化設計の中の一例に過ぎない。しかし、このようなCAE解析技術を設計プロセスの中にうまく盛り込むことで、従来の人為的パラメータスタディでは求められない、より最適な形状を得ることができると考えられる。

## 3. 軸系剛性解析

転がり軸受の寿命や摩擦トルクなどの性能を予測するには、軸受内部の負荷状態を正確に把握することが必須となる。

近年の小型・軽量化設計のため、軸受内部の負荷状態を軸受単体の解析のみによって求めていたのでは不十分な場合が多く、軸受とその周辺部品を含む軸系の解析によって、より正確に求める必要性が生じてきた。

ここでは軸受周辺の軸、軸箱の剛性を考慮した多軸系の剛性解析により軸受内部の負荷状態を求め、軸受の寿命や摩擦トルクなどの性能をシミュレーションする手法を紹介する。解析ソフトウェアは市販ソフトウェアと自社製プログラムを併用している。

### 3.1 自動車トランスミッションの解析

図4に示すような自動車用FF5速マニュアルトランスミッションを対象とした3軸の解析モデルを作成した。この解析モデルはトランスミッションケースの有限要素モデルを取り込んでいるため、各軸は独立ではなく相互の影響を考慮している。エンジントルクを入力し剛性解析を行い、軸受内部の負荷状態を求め、寿命計算を行った。解析結果として、ギアかみあい荷重が最大となる1速負荷時における軸心のたわみ曲線を図5に、各軸

受の平均寿命を図6に示す。図6をもとに、要求される寿命に達しない軸受については負荷容量の大きな軸受に変更し、逆に必要以上の計算寿命となる軸受については剛性低下などの影響がない範囲で負荷容量の小さい軸受に変更することで、最適な軸受選定が可能となる。

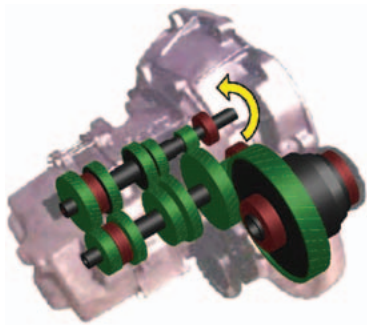


図4 解析モデルのイメージ  
Image of analysis model

赤の円筒が軸受、緑の円筒がギア、ねずみ色の円筒が軸を表す

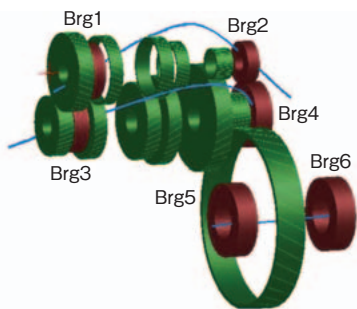


図5 軸心のたわみ曲線  
Diagram of shaft axis deflection

1速負荷時の軸心のラジアル方向変位を数百倍にして表示している。

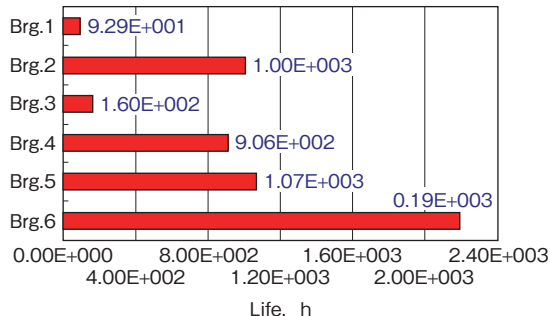


図6 軸受の平均寿命  
Average life of bearings

### 3.2 軸受摩擦トルク

軸系の剛性解析から、軸受内部のすべての転動体について荷重、接触角、差動滑り、スピンなどを求める。軸受の摩擦トルク算出については議論すべきことが多く残されているが（例えば、保持器に起因する摩擦トルク）、これらの解析結果と、潤滑油粘度、潤滑油量から軸受の摩擦トルクを計算することができる<sup>3)</sup>。

トランスミッションケースには軸受組み付け位置の誤差が存在し、軸受外輪には芯ずれが生じる（図7）。図面公差内の芯ずれを与えて軸系の剛性解析を行うことにより、軸受の摩擦トルクに及ぼす影響をシミュレーションした例を図8に示す。

ギアによる減速を考慮しトランスミッション全体として軸受に起因する損失トルクを求め、得られた知見から最適なトランスミッションケース設計や軸受内部設計を提案することにより、自動車の燃費増加を防止することができると思われる。

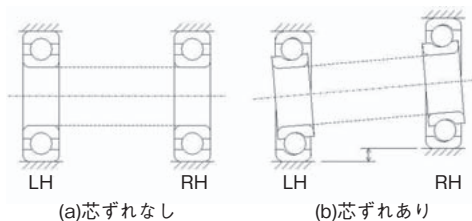


図7 芯ずれの模式図  
Schematic diagram of misalignment

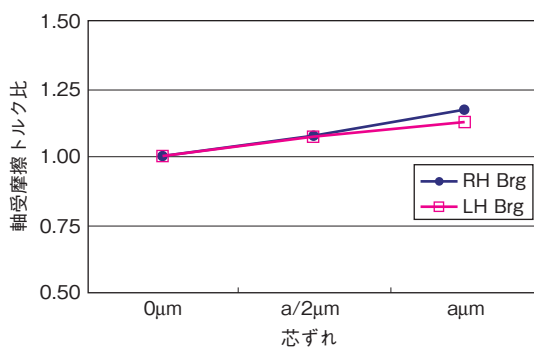


図8 芯ずれと軸受摩擦トルクの関係  
a：図面公差最大値

Relationship between misalignment and friction torque in bearing

## 4. 軸受動解析

回転体の運動は振動や騒音をはじめ、多くのトラブルを引き起こす原因となるため、軸受内部で転動体、保持器がどのような運動をするかを把握することは、極めて重要である。特に高速回転機械に使用される軸受内部では、各部品は取り付け誤差、潤滑状態、動的不釣り合い(アンバランス)などによって、滑り、衝突、振動といった運動を繰り返す。このような運動は、静解析では予測できないため、動解析による運転中の各部品動的挙動の把握が必須となる。

当社ではこれらの動的挙動解析ツールとして汎用機構解析ソフトウェアを用い、接触非線形問題に対応できるようにカスタマイズすることで、運転状態をシミュレーションしている。

次項より、その解析事例を紹介する。

### 4.1 円筒ころ軸受の保持器公転滑り

高速・軽荷重で使用される円筒ころ軸受では、軌道一ころ間の滑りによってスキッピングが発生することが知られており、条件によっては、保持器が機構学的回転速度を超える速度で自転することが確認されている。この現象をシミュレーションで再現した事例を図9、10に示す。

解析モデルは、高速回転では無視できない潤滑油のかくはん抵抗<sup>4)</sup>、および軌道遠心膨張、熱膨張などを考慮している。本解析により、機構学的回転速度を超える速度で保持器が回転するメカニズムにおいては、潤滑油によるころの自転抵抗力が影響し、外輪接触部との相対滑りが大きくなることで、外輪からの駆動力が大きく働くことが関係していることがわかった。これは、通常解析では極力シンプルなモデルを用いるのに対し、より実際に近い形で運動を解析することで、実際の現象を再現したひとつの事例である。

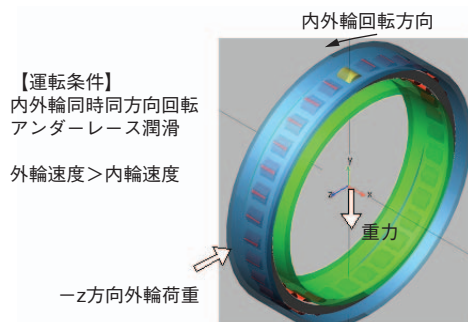


図9 解析モデル  
Analysis model

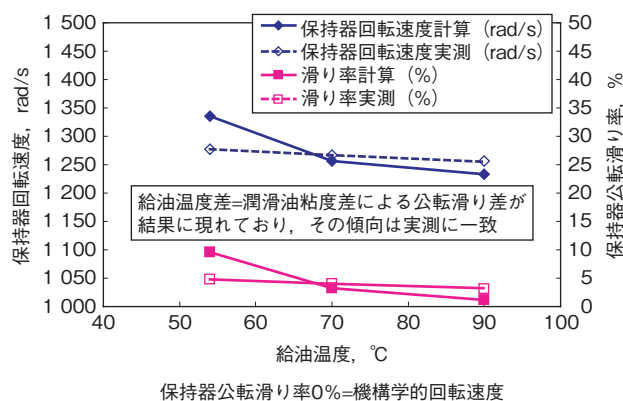


図10 給油温度と保持器回転速度の関係  
Relationship between oil temperature and cage rotation speed

### 4.2 ターボ機械の軸系挙動解析

超高速回転するターボ機械では、振動が重要な課題のひとつである。汎用機構解析ソフトウェアを利用することで、軸系としての振動解析にも対応可能であり、図11のようなモデルを構築することで、周辺部品の動特性を考慮した軸や保持器の振れまわり挙動をシミュレーションできる。

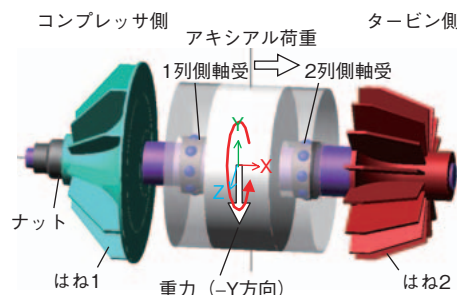


図11 ターボ軸系モデル  
Model of turboshaft system



解析モデルは基本的には剛体とし、軸受の接触部剛性のみ考慮するようカスタマイズしている。軸系の詳細モデル化を行うことで、保持器の振れまわり状態、軸受にかかる荷重変動などを解析することができる(図12, 13)。

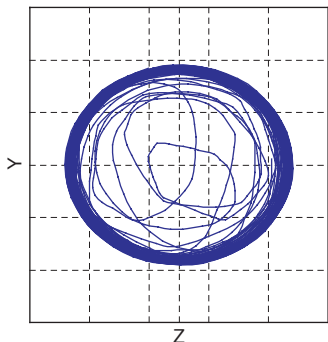


図12 1列側軸受の保持器振れまわり軌跡 (YZ平面内)

Locus (on YZ plane) of wobbling cage at 1<sup>st</sup> row bearing

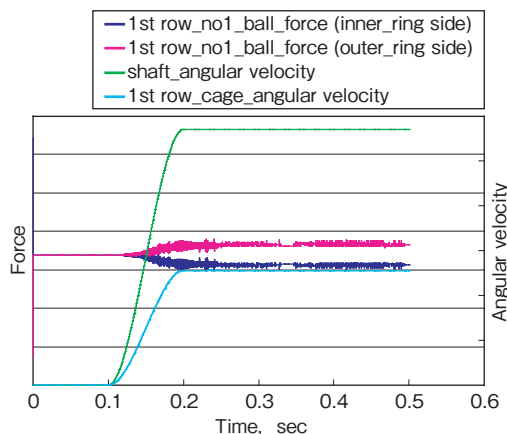


図13 各部品回転速度と転動体荷重変動 (1列側軸受代表玉1個の時間変化)

Fluctuation of rolling element load vs. rotational speed of each component (chronological change in typical steel ball at 1<sup>st</sup> row bearing)

図12にアキシャル荷重を直接受ける1列側の保持器振れまわり軌跡を示す。

また、図13の荷重変動では、軸回転速度上昇に伴って転動体に遠心力が作用するため、外輪側転動体荷重が大きく、内輪側転動体荷重は小さくなっていることがわかる。定常回転における荷重は比較的安定となっている。

本項では、動的挙動シミュレーションの一例を示したが、動解析によって得られるデータは多岐に渡る。これらのデータを活かして振動メカニズムを明らかにし、設計に反映させることが付加価値の大きい製品を作り出すことにつながると考えている。

## 5. おわりに

CAE解析における技術進歩はめざましく、モノづくりに関わる我々としてもさらにCAE技術を進化させるため、より一層注力していきたいと考えている。

CAEの進化は限りなく実際に近づける方向であり、5年、10年後には得られた成果を報告していきたい。

## 参考文献

- 1) 大沼 覚：自動車技術会学術講演会前刷集, no. 90-04, (2004)5.
- 2) 西方恵理：自動車技術, vol. 59, no. 11, (2005)72.
- 3) 角田和雄：日本機械学会論文集, 27, 178(1961)945.
- 4) P. K. Gupta：Advanced Dynamics of Rolling Elements, Springer-Verlag 100-105(1984)

## 筆者



中下智徳\*  
T. NAKASHITA



鬼塚高晃\*  
T. ONIZUKA



長谷川賢一\*  
K. HASEGAWA

\* 軸受事業本部 解析技術部