

# 軸系における熱と剛性・振動の連成解析

## Coupling Analysis of Heat, Stiffness and Vibration in Shaft System

長谷川賢一 K. HASEGAWA 下村利明 T. SHIMOMURA

As a result of increasingly severe technical requirements from the market, the analysis of shaft systems including the bearing, shaft, housing and peripheral structures has become important. JTEKT has developed its own system analysis program that engineers can utilize in everyday design work. While used mainly for static rigidity analysis and bearing life calculations, this program may also be used for power transmission calculations, vibration analysis, bearing rotational torque calculations, and thermal analysis. Coupling calculations and analyses are also possible with this program. This report presents the analysis capability of this shaft system analysis program developed in-house along with analysis examples.

**Key Words:** shaft system, thermal analysis, vibration analysis, static analysis, coupling analysis

### 1. はじめに

製品設計にCAE (Computer Aided Engineering) は必須のツールになっておりあらゆる分野で利用されている。当社の軸受と軸受関連製品の設計や研究開発においても、CAEは製品開発プロセス日程の短縮や各種解析の高度化に貢献している。

近年の市場要求の高度化により、従来から行われてきた軸受単体みの解析では十分満足できる解析結果が得られなくなってきており、軸・ハウジングなど軸受周辺構造を含むシステム(軸系)の解析が重要になっている<sup>1)</sup>。汎用のFEM解析ソフトウェアでも軸系の詳細モデルを解析することができるが、転がり軸受は内部に多数の非線形接触部を持つことから、解析モデル作成や解析実行に多くの時間とスキルを要する場合が多いため、これらの解析には主に解析専任者が従事している。

このため、設計者でも軸系のシステム解析に日常的に利用できるツールとして、軸受の弾性接触理論とFEM梁要素を連成させる単軸の軸系解析プログラムを開発し、主に自動車や産業機械分野におけるアプリケーションに適用してきた<sup>2)</sup>。また、近年では専用のGUI(Graphical User Interface)を開発した。これにより容易に複数軸の軸系解析を行えるようにして、現在では当社や関係各社の設計者が利用できるようになっている。

軸系解析プログラムの主な解析は、静剛性解析と軸受寿命計算であるが、動力伝達計算、振動解析、軸受回転トルク計算、熱解析、ころー軌道間接触面圧分布計算などの、これまでに自社開発してきたプログラムを含んでおり、さまざまな解析を連動させることができるプログラム構成にしている(図1)。また、FEM解析モデルのハウジングや軸をFEMにより軸受位置などの必要な節点のみに縮退させれば、ハウジングや軸をFEM解析モデルとして、軸系解析プログラムで取り扱うことができ、許容される時間内で解析することが可能である。

ここでは、自社開発した軸系解析プログラムの解析内容と解析事例を紹介する。

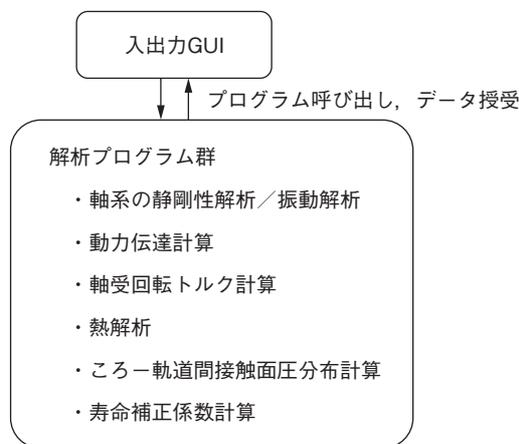


図1 軸系解析プログラムの構成  
Construction of shaft system analysis program

## 2. 静剛性解析と軸受寿命計算

近年、自動車用や産業機械用のトランスミッションは、燃費向上のため、ますます軽量化・小型化・高効率化を目的とした設計がなされる傾向があり、デュアルクラッチトランスミッション（図2）に代表されるような従来のトランスミッションより複雑な構造を持つ変速ユニットが一般的になりつつある。このような構造の中に配置される軸受（特に軸と軸が重なりその間に軸受が配置される部位）を解析する場合に、システムとしての剛性解析が必要となり、軸系解析プログラムが効果を発揮する。また、トランスミッションでは、駆動力伝達経路や駆動力入力回転方向が異なる複数の負荷パターンで解析する必要がある。軸系解析プログラムではこのような各負荷パターンを一度に静剛性解析することにより各軸受の負荷状態を決定し軸受寿命を求めることができるので、顧客の要求に応じた最適な軸受選定によりシステムの小型・軽量化に貢献できる。また、潤滑条件が明らかであれば、転動体-軌道間の EHL 油膜厚さを計算し、寿命補正係数  $a_{23}$  または  $a_{ISO}^{(3)}$  を考慮した補正寿命や負荷状態での軸受回転トルクを計算できる。また、軸受寿命予測精度のさらなる向上とシステム内の軸受に起因する損失トルク予測により、小型・軽量・低損失の軸受設計やシステム設計に貢献することができる。

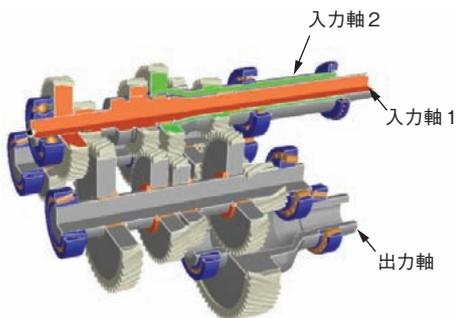
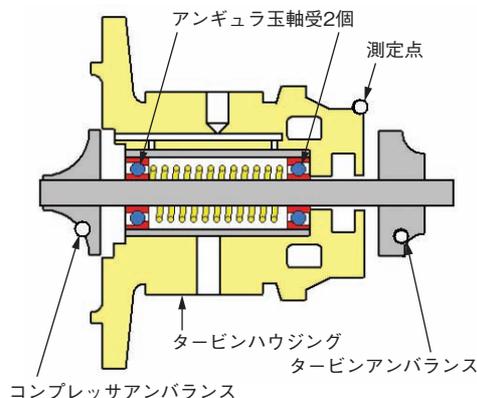


図2 デュアルクラッチトランスミッションの例  
Example of dual clutch transmission

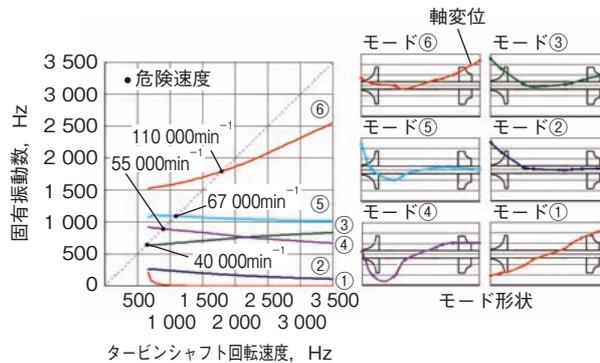
## 3. 振動解析

軸系の固有振動数と回転速度が一致したときに共振が生じて振動振幅が大きくなる。そのため固有振動数と回転速度の関係を精度良く予測することは重要である。また、アンバランス荷重や外部からの強制振動があるときには、応答振動変位や荷重を精度良く予測することも重要になる。

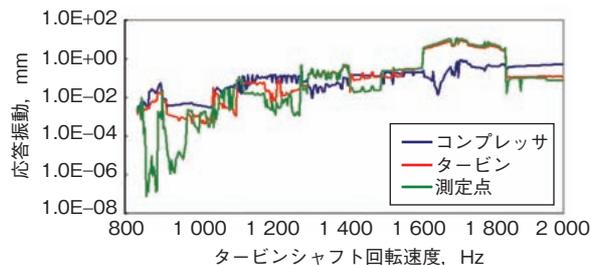
一般に軸受反力は変位や軸回転速度に対して線形ではない。したがって軸系解析プログラムは平衡状態を静剛性解析で求めて線形化し、平衡状態近傍の微小振動を取り扱う。振動解析法としては線形の範囲では伝達マトリ



(a)ターボチャージャモデルのイメージ図



(b)回転速度と固有振動数の関係およびモード形状



(c)回転速度と応答振動の関係

図3 振動解析の事例  
Example of vibration analysis

ックス法や有限要素法があるが、ここでは有限要素法を用い、軸系の動特性を求める。図3にターボチャージャのタービンおよびコンプレッサにアンバランス荷重を与えて振動解析を行った事例を示す。図3(b)は回転速度と固有振動数の関係であり、両者が一致する回転速度が危険速度となる。図3(c)はロータアンバランスによるタービン重心、コンプレッサ重心、およびハウジング上の測定点の応答振動であり、タービンシャフト回転速度が1 600 ~ 1 850Hzの間でタービン重心とハウジング上の測定点の応答振動が大きくなることが予測できる。

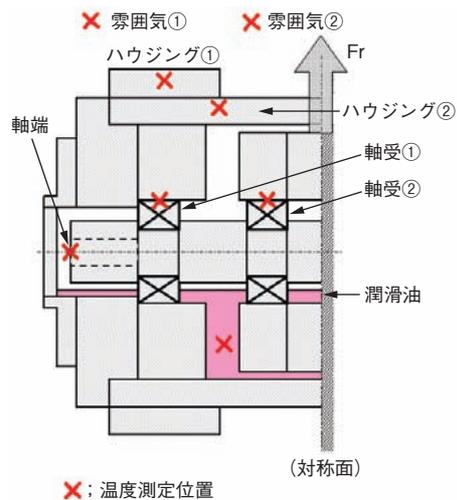
### 4. 熱解析

軸受などの機械要素間の接触部に摩擦があり、これらの要素間に相対的な運動が伴うとそこで発熱し、システムの温度が変化する。荷重が大きい場合や回転速度が大きい場合には温度変化も大きく、特に工作機械のように高い回転精度を必要とする機械においては、その影響は非常に大きくなる。

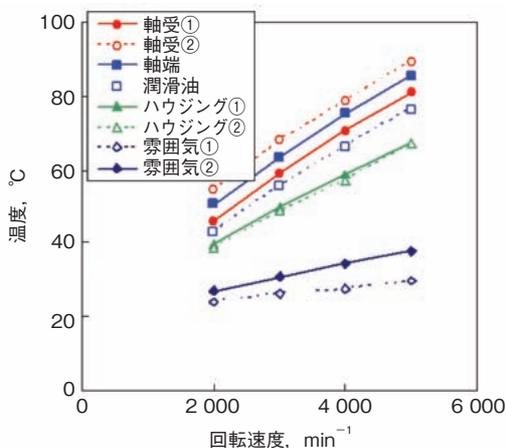
最近では、軸受の定格回転速度を定義する新たな国際規格として、熱定格回転速度が定められ、所定の運転条件下での軸受の温度上昇が70℃となるときの回転速度を熱定格回転速度として定義している<sup>4)</sup>。

これらのことから、熱解析は必要である。そこで、Harrisの文献に記載されている熱解析手法<sup>5)</sup>を基礎として、システムの熱解析を行うプログラムを自社開発し、解析プログラム群の一つとして加えている。なお、軸系解析プログラムで扱う軸やハウジングは形状を簡略化している。

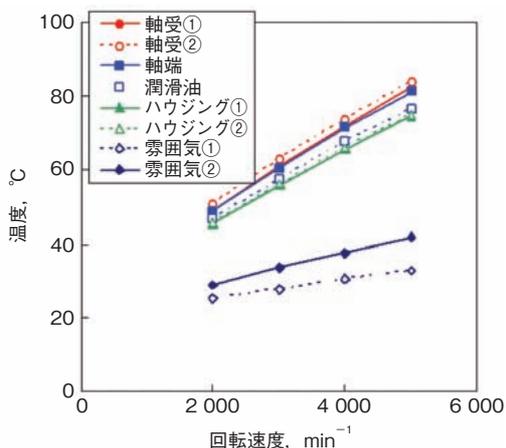
図4に試験装置を熱解析した事例を示す。図4(b)が温度の実測値で、図4(c)が計算値である。計算値は測定位置間の温度差が小さい傾向を示し、ハウジング温度は誤差が15%程度、その他の測定位置は誤差が10%以下である。このような簡単な解析モデルでも温度分布の大局をつかむには十分有効である。



(a)試験装置の熱解析モデル図



(b)回転速度と温度の関係 (実験値)



(c)回転速度と温度の関係 (計算値)

図4 熱解析の事例  
Example of thermal analysis

## 5. 熱と剛性・振動の連成解析

前章に示した手法で軸受の発熱、周辺部位からの放熱、およびシステム内の熱伝導・熱伝達を定義すれば、熱のバランスを解くことによって各部位の温度を知ることができる。しかし、温度が変化すると潤滑油の動粘度と軸受予圧も変化し、発熱量（軸受回転トルク）が変化する。したがって、軸系解析プログラムでは熱解析と静剛性解析・軸受回転トルク計算を繰り返すことによって、システムの温度分布と軸受回転トルクを求めるように解析プログラム群を制御している。さらに、最終的に求められた温度分布における軸系の剛性で振動解析を行うこともできる。

工作機械主軸では高剛性（高精度）、高速回転などの性能が特に要求される。軸受にとっては高剛性にするためには高予圧としたいが、あまり予圧が高いと軸受の発熱により高速回転で焼付きが生じるといった背反事象が生じるため、本手法のような熱と剛性・振動の連成解析により、最適な軸受の選定や予圧設定ができ、また主軸の危険速度の予測により、システムとしての最適設計が可能となる。

## 6. おわりに

以上、軸系解析技術について紹介した。製品開発において、ますますスピードアップと信頼性が要求されている今日、本技術は当社の軸受設計段階での技術検討時間の短縮と高精度化を支えている。今後は自動車分野をはじめ、一般産業分野などさまざまな分野でデータを積み重ねることで、解析結果による予測精度を向上させ、より信頼性の高い解析技術の確立に向けて努力していきたい。

### 参考文献

- 1) 中下智徳, 鬼塚高晃, 長谷川賢一: JTEKT Engineering Journal, no. 1001 (2006)92.
- 2) 大嶋昭男: Koyo Engineering Journal, no. 143 (1993) 5.
- 3) ISO281: 2007
- 4) ISO15312: 2003
- 5) Harris, T. A.: Rolling Bearing Analysis (4th ed.), John Wiley & Sons, Inc. (2001).

### 筆者



長谷川賢一\*

K. HASEGAWA



下村利明\*

T. SHIMOMURA

\* 軸受・駆動事業本部 実験解析技術部