

## 軸受動解析システムの開発

## Development of Bearing Dynamics Analysis System

大島吉雄 Y. OOSHIMA 長谷川賢一 K. HASEGAWA 鬼塚高晃 T. ONIZUKA

In recent years, bearings are required to be used in harsh environments such as complex loads and high-speed rotation. In order to understand the bearing behavior under actual operating conditions, JTEKT has developed a bearing dynamics analysis system (S.S.A.P./MBD). This system is based on multi-body dynamics. We used a method of constructing independent equations of motion for each part and solving them by applying the numerical integration method. PV value prediction in a contact ellipse by spin motion analysis and consideration of cage strength for needle roller bearings of planetary gears are provided here as application examples.

**Key Words:** multi-body dynamics analysis, bearing, spin behavior, control, PV value

## 1. はじめに

近年、自動車や各種産業機器メーカーでは電動化や省エネルギー化の動きが加速しており、そこで使用される転がり軸受に対してさらなる低トルク化・高速回転への対応が求められている。また、軸受の用途においては、急加減速や複雑な荷重変動に伴うこれまで以上に厳しい使用環境下での耐久性や性能の維持も保証していかなければならない。このように、これまで経験の無い条件下で軸受が使用される機会が増加する一方で、軸受設計では顧客の要求にタイムリーに応えるべく設計リードタイムの短縮も必要とされている。このような外部および内部環境の変化により、従来の試作・実験を中心とした開発プロセスに対して解析・シミュレーションを活用した開

発プロセスが注目されている。

当社では、このような環境の変化に対応すべく、軸受設計を支援する解析ソフト「軸系解析ソフト S.S.A.P. (Shaft System Analysis Program)」を自社開発してきた<sup>1), 2)</sup>。S.S.A.P. の主な機能を図 1 に示す。S.S.A.P. は複数のシャフトおよびギヤ・軸受を介したユニット単位でのモデル化を可能とし、パワーフローやハウジング剛性、シャフト剛性などを考慮した軸受の解析により、軸受寿命や内部荷重分布、摩擦トルクなどの軸受内部の負荷状態を検討できる。一方、冒頭に述べた背景から、複雑な運転条件下での軸受に対する衝撃や軸受内部挙動に起因する損傷などの問題が懸念されており、従来の静的解析だけでは現象を把握しきれず、動的に確認する必要性が増加している。このため、軸受設計にお

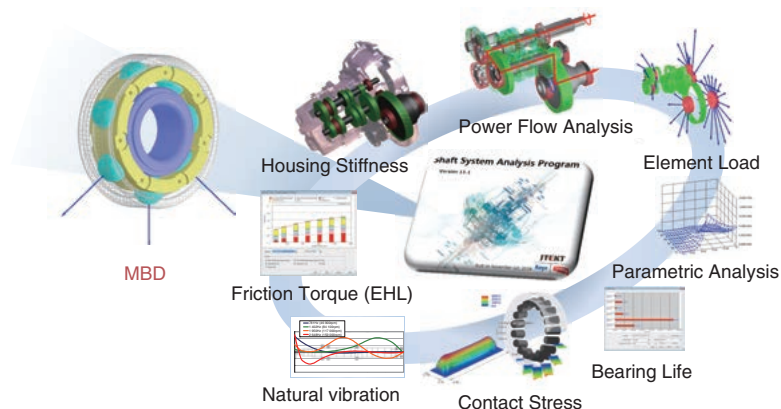


図 1 軸系解析ソフト S.S.A.P.  
Main function of S.S.A.P.

いて、設計初期段階から実際の使用条件下での軸受挙動を把握することが重要とされてきている。

このように動解析（シミュレーション）を活用した軸受解析のニーズが高まっていることから、当社ではS.S.A.P.の新たな機能として軸受動解析システム（S.S.A.P./MBD）を開発した。本報では、S.S.A.P./MBDの概要および活用事例を紹介する。

## 2. システム概要

### 2.1 計算手法

S.S.A.P./MBDは、マルチボディダイナミクス（Multi Body Dynamics：MBD）の考え方にに基づき構築した軸受の3次元動解析システムである。MBDでは複数の部品からなる機械システムに対して部品それぞれの運動方程式を確立し、それを解くことで一般に測定が困難な部品間の相互作用や、各部品の変位、速度などを求める。S.S.A.P./MBDの計算手法を図2に示す。

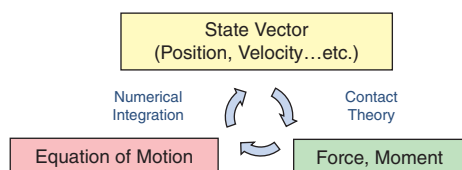


図2 S.S.A.P./MBD 計算手法  
Analysis method of S.S.A.P./MBD

始めに、軸受を構成するそれぞれの部品に対し独立した状態ベクトル（式(1)）を与える。

$$\vec{Y}(t) = \begin{bmatrix} \vec{x}(t) \\ q(t) \\ \vec{P}(t) \\ \vec{L}(t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

ただし、

- $\vec{x}$  : 位置 [m]
- $q$  : 姿勢
- $\vec{P}$  : 運動量 [kg·m/s]
- $\vec{L}$  : 角運動量 [N·m·s]
- $t$  : 時間 [s]

次にその状態における各部品に働く力とモーメントを計算する。たとえば代表的な相互作用力として部品間の接触力がある。接触力は、各部品の3次元空間上の位置関係から幾何学的干渉量を求め、油膜を介した量を弾性接近量として定義し、ヘルツ接触理論を用いて計算することとした。このように各部品に作用する力・モーメン

トを求め運動方程式を構築する。例として転動体に対する運動方程式を式(2)、(3)に示す。

$$\frac{d\vec{P}_{Ball(i)}}{dt} = \vec{F}_{Inner} + \vec{F}_{Outer} + \vec{F}_{Cage} + \vec{F}_{Lub} + \vec{F}_G \quad (2)$$

$$\frac{d\vec{L}_{Ball(i)}}{dt} = \vec{N}_{Inner} + \vec{N}_{Outer} + \vec{N}_{Cage} + \vec{N}_{Lub} \quad (3)$$

ただし、

$\vec{F}$  : 力 [N]

$\vec{N}$  : モーメント [N·m]

添え字（相互作用を示す）：

Inner : 内輪

Outer : 外輪

Cage : 保持器

Lub : 流体・潤滑

G : 重力

式(2)、(3)に示す通り、各部品との相互作用や転がり粘性抵抗、かくはん抵抗などの流体や潤滑により発生する力および重力を考慮し、一つの部品に対し並進・回転の6自由度の運動方程式を構築する。このように構築した運動方程式について数値積分法を用いて解くことで、次のステップの状態ベクトルを得る。以下、このサイクルを繰り返すことで時々刻々の各部品の状態ベクトルを得ることができ、軸受挙動を計算する。

### 2.2 解析の流れ・機能

S.S.A.P./MBDを用いて軸受の検討を行う際の基本的な流れを図3に示す。始めに対象製品を模擬した軸系モデルによる静解析により、検討対象とする軸受に負荷されるラジアル荷重やアキシャル荷重、はめあいによるすきま変化・軌道変形等を把握する。静解析で得られたデータは動解析の入力データへと引き継がれ、さらに現象時間などの動解析に必要なデータを入力する。また、転動体一軌道間の摩擦係数を設定するため、代表的な各種潤滑油において各圧力下で周速度に対するすべり率と摩擦係数の関係（トラクションカーブ）を実測した。これをデータベース化し、自動で設定できるようにした。トラクションカーブの一例を図4に示す。

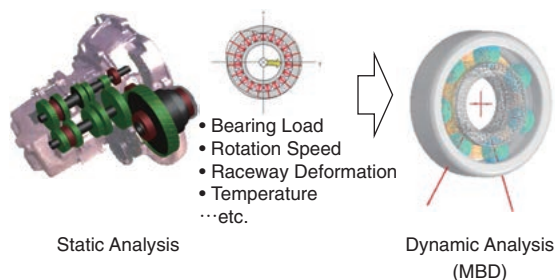


図3 解析の流れ  
Analysis flow

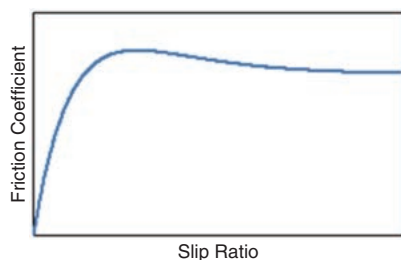


図4 トラクションカーブ  
Traction Curve

また、部品間の接触減衰係数についても、独自の接触減衰試験により各種材料と潤滑油やグリースの組合せによるデータベースを構築し、入力作業の簡易化を行っている。本システムはカタログに記載の軸受品種に対応し、解析条件として各種軸受荷重およびその変動、ミスアライメント、加振などの運転条件に加え軌道真円度崩れやエッジの高精度接触計算（図5）など、汎用ソフトでは容易に解析できない機能も有している。解析完了後の結果処理画面では、解析結果として軸受挙動をアニメーションとして視覚的に確認することができる。また衝突荷重や摩擦仕事などの軸受設計に有用なデータをグラフやコンタ図としてアニメーションと連動して確認することができる。S.S.A.P./MBDの結果処理画面を図6に示す。

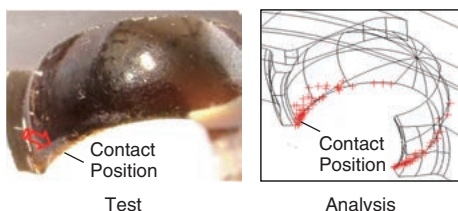


図5 エッジの高精度接触計算  
High-precision calculation of edge contact

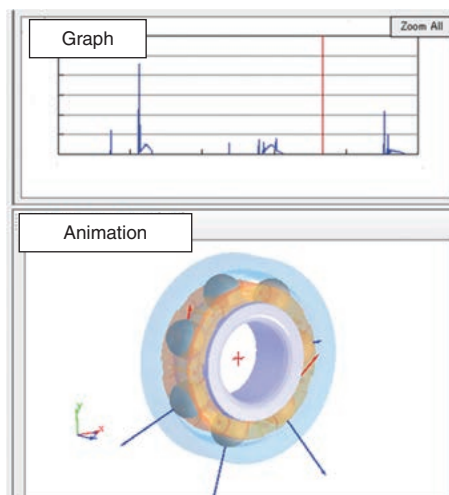


図6 結果処理画面  
Result processing window

### 3. S.S.A.P./MBDの活用事例

#### 3.1 玉軸受のスピン解析

S.S.A.P./MBDの活用事例として、一つ目に玉軸受のスピン解析による内部設計最適化の事例を示す。図7に示すように、アンギュラ玉軸受やアキシアル荷重を受ける深溝玉軸受など、接触角を伴って運転する玉軸受は幾何学的に玉のスピン・ジャイロ回転が発生する。これらは転動体-軌道間の摩擦抵抗となり、玉軸受のトルク増加や高速回転領域での軌道摩耗や焼付き要因となる<sup>3)</sup>。したがって高速化と低トルク化を実現する玉軸受の開発のためには、玉のスピン挙動を正確に把握することが重要となる。玉軸受の運動学を記述する理論として Jones の理論<sup>4)</sup>が挙げられるが、玉のすべり運動について理想状態を仮定しているため、高速回転領域ではジャイロ運動が無視できなくなり実際とのかい離が発生する<sup>5)</sup>。S.S.A.P./MBDでは制約の無い3次元動解析であるため、高速回転におけるスピン・ジャイロすべりを伴う玉-軌道間のすべり運動を解析できる。

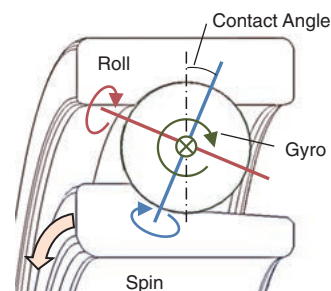


図7 スピン・ジャイロ回転  
Spin and gyro rotation

図8に低速／高速回転領域における玉軸受の玉-軌道間相対すべり速度分布の計算結果を示す。内輪回転の玉軸受において、低速回転領域では外輪側でスピン・ジャイロによる相対すべり速度が発生しており、内輪側の相対すべり速度は外輪側より低くなっていることが分かる。これは低速回転領域では内輪側で玉が駆動されていることを表し、すなわち内輪コントロールであることを示している。一方、高速回転領域では内輪側で相対すべり速度が発生しており、外輪側の相対すべり速度は小さいことから、外輪コントロールとなっていることが分かる。これら解析の傾向は実測および理論と一致することが確認されている。さらに従来理論と異なる点として、コントロール側でも接触だ円内の相対すべり速度は完全にゼロとはならず、わずかにすべり速度が発生しており、

自由な玉の運動が解析できているものと考ええる。

図9に同サイズの軸受において玉材料を軸受鋼とセラミックにした場合の、軌道摩耗の実測および接触だ円内のPV値分布の計算結果を示す。玉材料を軸受鋼とした場合は高速回転時に軌道摩耗が発生し、PV値も大きくなった。一方、質量の小さいセラミック玉を用いた場合、実測にて軌道摩耗は抑制され、解析でも軌道内のPV値が低下することを確認した。このようにS.S.A.P./MBDを用いて実際の使用条件下での玉のすべり運動を解析することにより、軌道摩耗・焼付きの予測や内部諸元の最適化が可能である。

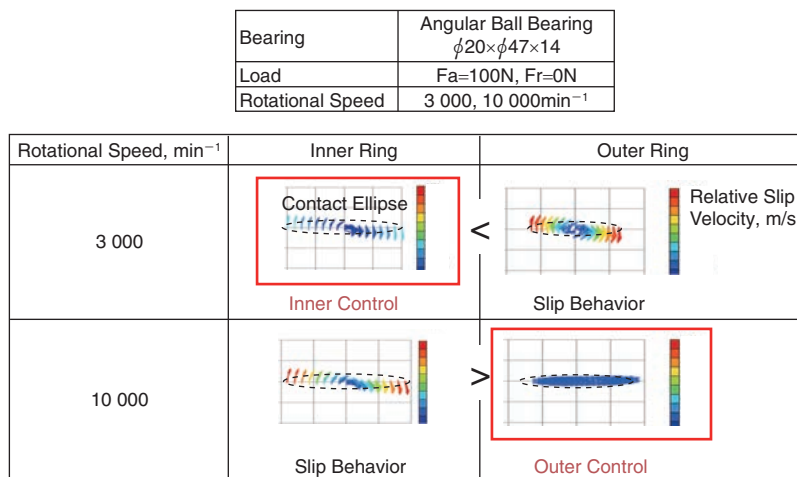


図8 相対すべり速度分布  
Relative slip velocity distribution

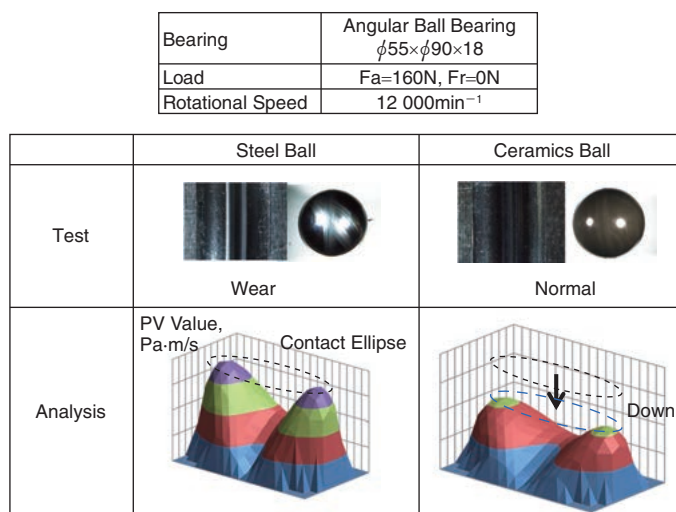


図9 PV値分布の比較  
PV value comparison

### 3.2 遊星歯車用針状ころ軸受保持器の強度検討

変速機用遊星歯車機構のプラネットギヤに使用される針状ころ軸受（図10）は、自転に加えて軸受自体が公転運動を行うため軸受に遠心力が働き、さらにギヤからの荷重やモーメントが加わるため複雑な運動となる。そのような環境下では保持器への負荷が大きくなり、保持器破損が懸念される。複雑な運動下の内部衝撃荷重の把握は既存の静解析では対応できず、本システムを用いたシミュレーションが必要となる。

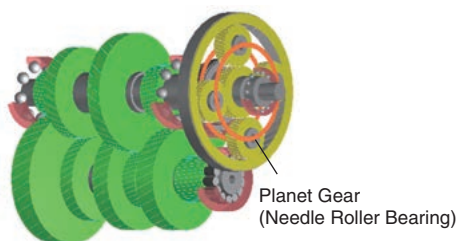


図10 変速機用遊星歯車機構  
Planetary gear for transmission

図11にプラネットギヤ・キャリア回転速度に対する保持器破損の試験結果を示す。図11に示すように、遊星歯車耐久試験にてプラネットギヤ・キャリアの高速回転領域で針状ころ軸受の保持器疲労破損が発生することを確認した。次にS.S.A.P./MBDにて、遊星歯車耐久試験と同等の条件に加え、さらにパラメータを振った条件でシミュレーションを行い、保持器に発生する接触荷重および発生応力を解析した。最終的に対象保持器の疲労限度に対して安全率を計算した結果を図12に示す。図12に示す通り、解析による保持器疲労破損の傾向は実測と一致した。

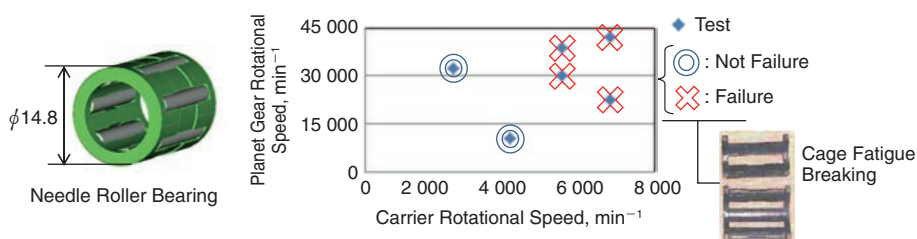


図11 遊星歯車用軸受の保持器破損傾向  
Retainer breakage tendency of bearings for planetary gears

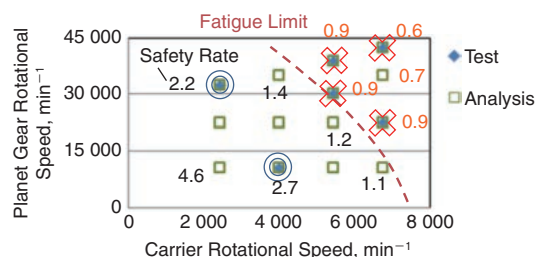


図12 保持器安全率と実測との比較  
Comparison of cage safety rate and test

また最適設計のため高速回転時の軸受挙動を確認した。遊星歯車の高速回転領域における軸受挙動を図13に示す。高速回転領域では公転速度による遠心力がギヤ荷重を上回り、転動体荷重分布がキャリア径方向へ移行することが分かった。このとき、転動体が荷重領域から抜ける位相にてプラネットギヤ自転方向と遠心力の方向が一致し、自由となった転動体が保持器へ衝突することで大きな接触荷重が発生することが分かった。逆の位相では、保持器が転動体を押すことで接触荷重が発生していた。このようなメカニズムを踏まえると、プラネットギヤ用針状ころ軸受保持器への接触荷重の低減には、転動体の軽量化や運転すきまの最適化などが有効であると考えられる。そこで保持器などの内部諸元を再検討した結果、標準設計に対し最大79%保持器への接触荷重を低減できることが分かり、さらなる高速回転領域への対応が可能であることを確認した。軸受設計の最適化結果を図14に示す。このようにS.S.A.P./MBDを用いて複雑な運転条件下の保持器強度を検討することにより、保持器疲労破損の未然防止が可能である。

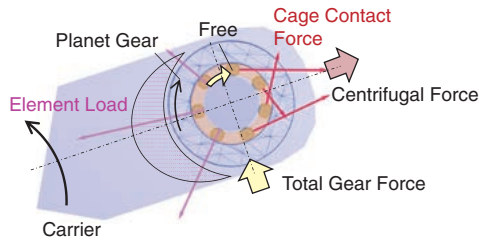


図13 高速回転時の軸受挙動  
Bearing behavior at high speed rotation

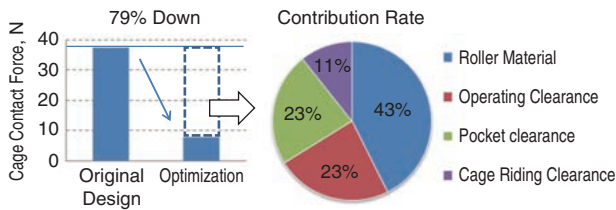


図14 軸受設計の最適化  
Optimization of bearing design

#### 4. おわりに

本報では、高精度な軸受挙動の動的解析を可能とし、あわせて軸受開発の効率化と軸受の最適設計に貢献する軸受動解析システム S.S.A.P./MBD の概要および活用事例について説明した。当社は、S.S.A.P.についてグローバル拠点を含む全技術部門に展開しており、全技術者が机上での軸受シミュレーションを可能とするシステムを構築してきた。本システムを用いることで、技術者は自身のアイデアをすぐさま検討でき軸受挙動を可視化できるため、イノベーション創生への貢献が期待される。シミュレーションは各種条件の選定結果によっては実測と厳密に一致した結果を導き出すことが難しい場合もあるが、製品性能の傾向を把握することで現象の理解が深められることが最大のメリットである。モデルベースデザインが進化するにつれて、今後ますますの利用が期待され、さらなる軸受の長寿命化、低トルク化、高速化の要求に対してシミュレーション技術に対する期待は高まるものと考えられる。また、S.S.A.P.の静解析機能に関して

## 軸系解析プログラム Shaft System Analysis Program

「高精度」「短時間」を低コストで実現するシステム解析  
軸受とその周辺部品を含めた軸系の内部負荷状態を短時間で正確に解析。  
お客様の開発期間短縮に貢献します

軸がり軸受の「疲労寿命」「内部応力分布」「摩擦トルク」などの特性を予測するためには、軸受内部の負荷状態を正確に把握することが欠かせません。特に近年の小型・軽量化設計では軸受単体の解析が不十分な場合が多く、軸受とその周辺部品を含めた負荷状態の解析が必要になります。自社開発の軸系解析プログラムとして、実際の使用状態における軸受内部の負荷状態や様々な解析結果を短時間で正確に求めることができるほか、JTEKT独自のデータベースとの連携も可能。システム設計の最適化や開発期間の短縮に貢献する解析プログラムです。

### 特長

- 簡単な操作**  
直感的なインターフェースで初めての操作でも簡単にご利用いただけます。
- 短時間で解析**  
解析時間約10分以内(1条件に対して)です。
- 各種軸受に対応**  
様々なタイプの軸受に対応した汎用性の高いプログラムです。
- パラメータの変更で簡単に類似モデルを作成**
- 列数・軸受サイズを自由にインプット可能**
- 軸受配置を自由にインプット可能(0.1mm単位)**
- 軸の材料(ヤング率)を自由にインプット可能**
- 各部品(内輪・転動体・外輪)の温度を自由にインプット可能**
- レポート出力に対応**  
解析結果を Microsoft Excel 形式のファイルで、一度にレポートとして出力することができます。軸受温度、軸受寿命、荷重条件などの解析結果が確認できます。結果出力に異なる手順を呼び、複数機設計に活用することができます。

### お客様ご自身で簡単に解析が可能です。

- 軸受寿命の計算**  
グラフィカルなグラフで軸受寿命を一目で確認が可能です。
- 予圧付け荷重の計算**  
軸に作用するアキシャル荷重とアキシャル変位の関係を求めることで、軸受の予圧付けが発生する荷重条件を予測できます。適切な予圧条件を検討できます。
- 軸全体の变形具合の計算**  
図解表により主軸剛性を簡単に把握し軸受選定を支援します。
- 各軸受の転動体荷重の計算**  
軸受内部の荷重負荷状況の確認が可能です。
- 剛性の計算**  
荷重のパラメータ計算により、主軸先端の荷重と変位の計算が可能

図15 お客様配布版 S.S.A.P. パンフレット  
Brochure of S.S.A.P. for customers

は、図15に示すように一部機能に限定したお客様配布版 S.S.A.P. も展開しており、軸受選定をするうえでお客様各位よりご好評を頂いている。当社は、これからも S.S.A.P. を含む各種解析技術の高度化を推進し、ニーズに対応した軸受の開発を通じて、お客様に貢献していく。

### 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) 長谷川賢一, 下村利明: JTEKT ENGINEERING JOURNAL, No. 1006(2009)66.
- 3) 村上正之, 高橋 譲, 岡本大輔: JTEKT ENGINEERING JOURNAL, No. 1011(2013)39.
- 4) A. B Jones: A General Theory for Elastically Constrained Ball and Radial Roller Bearings under Arbitrary Load and Speed Conditions, ASME J. Basic Eng., 82(1960)309.
- 5) 山本精穂: 高速玉軸受の運動学的研究(1), 潤滑, 13, 9 (1958)505.
- 6) 廣中哲也, 山田雅康, 金谷康平, 三尾巧美: JTEKT ENGINEERING JOURNAL, No. 1016(2018)38.

### 筆 者



大島吉雄\*

Y. OOSHIMA



長谷川賢一\*

K. HASEGAWA



鬼塚高晃\*

T. ONIZUKA

\* 軸受事業本部 実験解析部