

軸受関連基礎要素技術シリーズ(2)

転がり軸受における最近の解析技術の動向

浅野憲治

Basic Tecnology Series of Bearings (2)

Recent Development in Numerical Analysis of Rolling Bearings

K. ASANO

By advancement of dynamics using computers, the numerical analysis of rolling bearings is greatly improved. Many surpassing programs which have been developed are essential tools for rolling bearing engineers. Moreover analytical problems to be solved are more and more hard and analytical techniques are more complicated. In practical use, there are many problems, such as calculation time, convergence.

In this paper, representative numerical analysis in rolling bearing developments are described. Also, present situation and future view are briefly discussed.

Key Words: rolling bearing, numerical analysis, computer, dynamics, EHL analysis, contact problem, traction analysis, stress analysis, tribology

1. はじめに

近年の大容量高速コンピュータの出現は解析技術の発展を加速し、それらのダウンサイジング化が数値解析を設計者の身近なものとした。転がり軸受の分野においても数多くの優れたプログラムが開発され、設計段階での事前検討手段として活用されつつある。

D. Dowsonは「トライボロジーの歴史」¹⁾の中で、コンピュータが転がり軸受の設計手順開発の主角を段階を経て演じてきたと紹介している。第1段階は微分方程式の解を求めるための利用、第2段階は設計上の問題を解明するためのプログラムの開発、第3段階が軸受の最適設計ができるプログラムの開発としている。これらにより軸受の選定と設計技術の大きな前進が図られ、開発に多大な労力を費やすことなく最適な軸受を設計できるようになってきたと述べている。

転がり軸受の高性能化、高信頼性に対する要求は年々増してきており、同時に開発期間の短縮と開発コストの低減が求められている。このような付加価値の高い新製品の設計開発、市場ニーズへの対応には、D. Dowsonの言う解析技術の活用が今新たな状況下で求められているように思う。

そこで、本報ではコンピュータを用いた転がり

軸受(以下軸受と称す)の理論解析に焦点を当て、開発現場で用いられている代表的な解析技術を取り上げ、それらの動向とその有用性について紹介する。

2. 静力学から動力学へ

軸受の動力学はその静力学に比べて複雑さゆえに専ら実験的研究が先行して進められてきた。理論的研究が進展したのは静力学に流体潤滑理論(EHL)が組み込まれるようになったことによる。トラクションモデルを考慮することによって各接触部の摩擦力を見積もることができ、転動体のスピン・すべり、保持器などの運動解析、発熱計算ができるようになってきた。

設計検討で用いられている主な解析手法を表1に示す。軸受が高速で回転することによって転動体には遠心力、ジャイロモーメントなどが作用し、転がり接触部には摩擦力や油膜圧力が発生して動的状態となる。しかし、軸受が一定の運転条件で使用される場合には、一般に転動体や保持器の動きを定常状態と見なして準動的問題(あるいは準静的問題)として解析されることが多い。変動荷重や加減速といった運転条件が変化する非定常状態の解析には動解析が必要となる。

表1 軸受の解析手法
Analysis method of bearing

性能項目	要因	解析手法
剛性	変位, 応力	静解析
動剛性	変位, 応力, 油膜	準動的 動解析
寿命	変位, 応力, 油膜, 摩擦	静解析 準動的 動解析
起動トルク	変位, 応力, 摩擦	静解析
動トルク 発熱	変位, 応力, 油膜, 摩擦, ドラッグ	準動的 動解析
回転精度	変位, 応力	静解析
振動 減衰	変位, 応力, 摩擦, 油膜	動解析

同じ特性を求めるにも考慮すべき条件によって静力学的あるいは動力学的に取り扱う方法が異なる。たとえば、軸受が静止している場合の荷重分布や変位などの剛性を求めるには静解析によるが、回転中に形成される軌道面の油膜をも考慮して剛性を求めるには準動的解析が行われる。さらに、振動、減衰応答といった動剛性を求める場合には動解析が必要となる。

静解析に必要な基礎理論は20世紀前半には確立されていたが、動的性能を議論するのに必要な解析ができるようになったのは比較的近年である。準動的解析、動的解析はコンピュータの発展とともに加速し高度化してきたが、複雑さゆえに計算時間や収束性など実用上の課題も多い。

検討する内容・目的に応じた解析手段を選ぶことが必要となる。

3. 荷重分布・剛性解析

剛性の研究はHertzの弾性接触理論をStribeckが1901年に初めて玉軸受の解析に適用したことに始まる。彼は転がり接触部の最大接触応力が材料によって決まる許容応力と等しくなる時の軸受荷重を軸受の負荷容量とする理論を発表した²⁾。その後、Lundberg、Palmgrenらによって玉軸受、ころ軸受の寿命理論が確立され³⁾、ISOやJISの寿命計算法制定の根拠となっていることは周知の通りである。

軸受に作用する荷重分布は外部荷重を数個の転動体が分担して支えるため不静定問題となる。内外輪の相対変位からそれぞれの転動体の変位量と転動体荷重を求め、転動体荷重と外部荷重が釣り合うように変位量を求める。Stribeckは変位量を

逐次変化させて転動体荷重を求め、外部荷重と釣り合う荷重を求めたが現在ではコンピュータを用いた収束計算により瞬時に解を得ることが可能である。

通常、軸受はさまざまな機械装置で使用されるが、弾性変形を無視できない軸・軸箱に組み込まれることが少なくない。このような場合には軸受にかかる荷重は軸・軸箱を含めた複数の軸受配列からなる軸系システムでの解析により求める必要がある。当社では軸と軸箱剛性まで考慮した解析プログラムを開発し⁴⁾、工作機械スピンドルや減速機などの剛性解析を行っている。図1は終減速機ピニオン軸の軸受変位を求めた一例であるが、これにより、従来のためみ・はり理論を用いた解析と比べてより実際の解が得られるようになっている⁵⁾。図中の●が軸・軸箱を考慮、◎が軸のみを考慮の場合を示す。

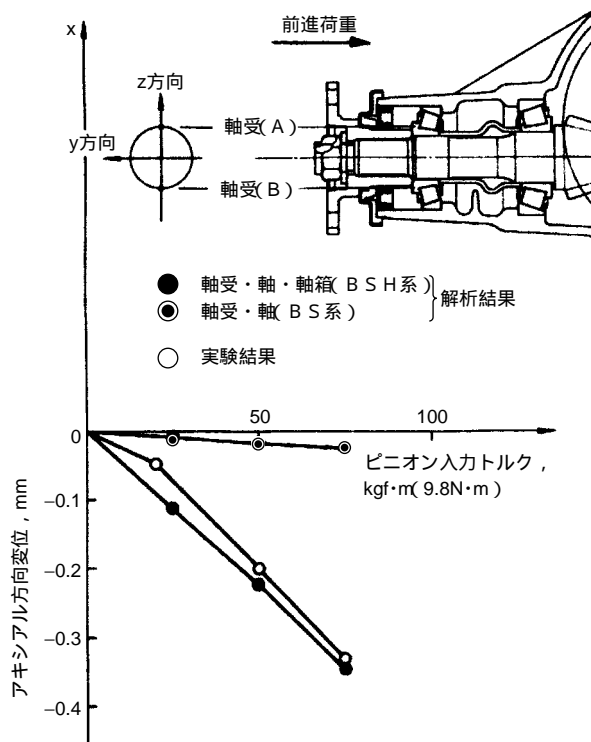


図1 終減速機ピニオン軸の軸変位⁵⁾
Axial displacement of pinion front bearing

4. 接触応力解析

軸受の剛性変位や寿命計算を行う場合、転がり接触部の弾性解析が行われる。転動体と軌道との接触部のように2つの弾性体が一定の荷重で押し付けられた時の接触応力や弾性変位の解析を取り扱う問題は一般に接触問題と呼ばれている。点接触、線接触といった単純なモデルでの接触問題の理論解析はすでに19世紀末にHertzが完成させて

いる。Hertzの解析は一様な曲率を持った平滑面にしか適用できないという問題があったが、FEM、BEMの手法が開発され、近年では任意形状を持った接触面の3次元応力解析が可能になってきている。

当社では、任意の軌道形状を持った3次元接触応力・内部応力の計算が可能な応力解析プログラムを用いて、ころ軸受の最適クラウニング形状の設計検討を行っている。通常の転がり疲れによるはくりの起点が内部となることに着目し、内部応力が均一となるように設計した新しい概念のクラウニングころ軸受を開発した⁶⁾。

表面粗さや圧痕がある場合の接触問題を解析するには要素数の多さからFEMでは計算時間が膨大となり実用的でないのが現状である。当社ではFDMを用いて3次元モデルで高速で計算が可能なプログラムを開発し、表面粗さの最適設計、寿命損傷の解析に活用している⁷⁾。図2に解析例を示す。図の上部が接触面に相当し、材料内部に発生するせん断応力分布を示す。粗さの突起によって表面直下に応力集中が発生していることがわかる。

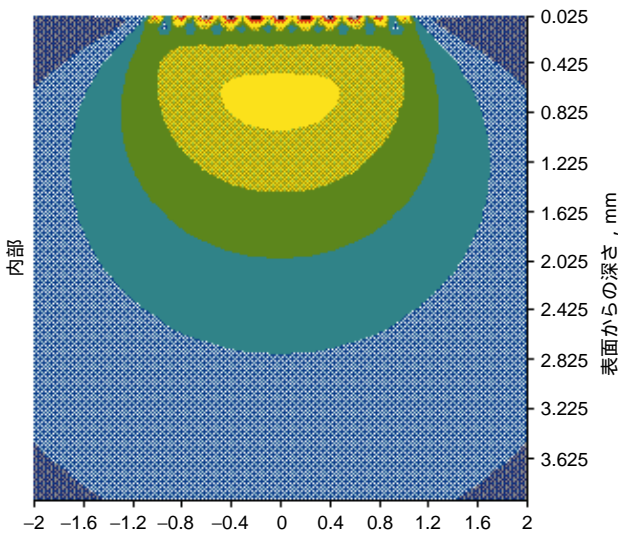


図2 接触面内部の等応力線図
Internal stress distribution

接触部の詳細な膜厚分布、圧力分布が求められる。寿命計算式には油膜厚さと表面粗さとの比で表された値で決まる補正係数(使用条件係数)が組み込まれており、実用条件下での油膜厚さを正確に把握することによってより精度の高い寿命検討が可能になってきている。理想的な運転条件ではD. Dowsonらが導出した簡易式⁸⁾が実験値と良く一致することが確かめられており、設計検討にはそれらの式を用いている。

EHL解析は流体の圧力・粘度特性に起因する非線型性のため、十分な精度で収束解が得られないという困難さや計算時間がかかるといった問題がある。特に、実用条件を想定した高面圧下での解析や表面粗さ・形状を考慮した解析では収束解を得ることが大きな課題となっており、高速化と高精度化を計るためにさまざまな手法が検討されている。当社ではメモリサイズを大幅に節約することができるマルチグリッド法や収束が早く高速化に効果が大きいMLMI法といった手法を活用し、通常の解析では収束解が得にくい超高压下(4 GPa)でのスピンを伴う点接触解析解を得ている。図3に解析例を示す。

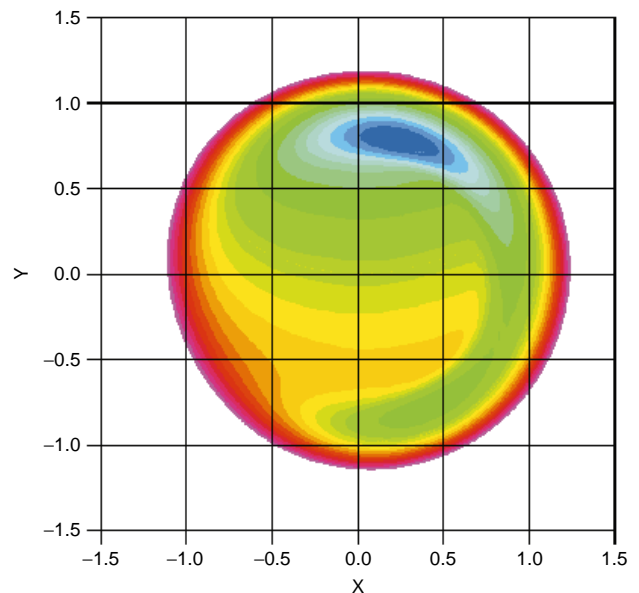


図3 EHL油膜厚さ分布
Film thickness distribution

5. EHL解析

5.1 油膜厚さ

1970~80年代にかけてD. Dowsonらによって、ほぼ完成された弾性流体潤滑理論(Elasto-Hydrodynamic Theory: 以下EHLと称す)は軸受の挙動解析、寿命理論を高める起爆剤となり、現象の解明、性能予測の高度化・高精度化に貢献した。EHL解析は弾性接触理論に流体理論を組み合わせた連成問題を解くことによって、転がり

5.2 転がり摩擦

EHL研究の当初の大きな興味は高面圧で転がり接触する2面間で油膜が存在するかどうかにあったが、それは同時に転がり摩擦の研究にも拡張された。軸受の動摩擦トルクを予測することはパワーロスと発熱を把握し、省エネルギー化の検討を可能にする。PalmgrenやEschmanのトルク計算式はその利便性から現在でも活用されている

が、計算に必要な軸受諸元は限定されており大雑把な目安を立てるに留まっている。詳細な軌道諸元をも考慮したトルク計算式はWitte⁹⁾によってはじめて導出され、EHL理論の拡張により正確で汎用性のある円すいころ軸受の動摩擦トルクの予測が可能になった。

動摩擦トルクはEHL解析で得られた油膜の圧力分布を用いて求められる。EHL圧力分布は接触部入り口の流体の動圧効果のために非対称な分布(図4)を形成し、圧力中心が幾何学的中心から X_{cp} だけオフセットする。このオフセット量 X_{cp} と総圧力 W との積が1つの接触部における摩擦モーメント(転がり粘性抵抗)となり、全接触部での総和が軸受トルクとなる。

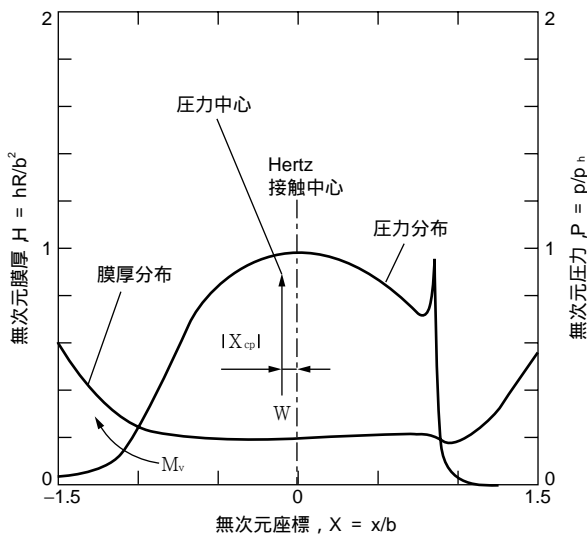


図4 転がり粘性抵抗
Viscous rolling resistance

Witteの式は軌道部の転がり摩擦のみを取り扱ったものであるが、内輪つば面の転がり/すべりを考慮した計算式や低速から高速まで広範囲な使用条件に適用できる高精度な計算式¹⁰⁾が提案されており設計検討に活用されている。

しかし、これらはいずれも線接触するころ軸受が対象であり、玉軸受の場合にはころ軸受のような簡易な式で表すのは難しい。これは玉の運動が複雑であり、粘性抵抗のほかにスピンやすべりによるトラクション、玉や保持器に作用するドラッグを考慮しなければならないことによる。この場合には、後述の運動解析によって数値計算を行うことが必要になる。

5.3 トラクション

EHL接触部に作用するトラクションはI V Tのようなトラクションドライブはもちろんスピン

やすべりを伴う軸受の転走面でも作用する共通の問題である。通常のEHL解析では油はせん断速度とともにせん断応力が比例すると仮定したニュートン流体として取り扱いされる。しかし、潤滑面に大きなすべりが存在するときのトラクション解析では非ニュートン性を考慮しなければ得られるトラクション係数は過大評価となる。

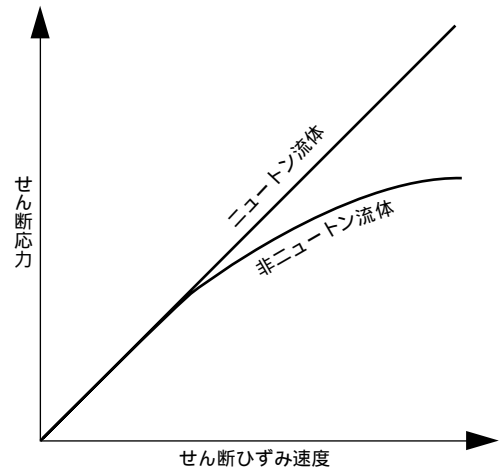


図5 非ニュートン流体の特性
Non newtonian fluid

トラクション解析に必要な構成方程式は非ニュートン・熱EHL方程式に加えて、レオロジー方程式、エネルギー方程式となる。これらを連立させて所定の境界条件の元でニュートンラフソン法やマルチグリッド法を用いて数値解析する。通常の等温EHL解析では5.1で述べたように転がり接触部の油の粘度は圧力に依存するが、トラクション解析では潤滑面の発熱による粘度変化も考慮して、膜厚分布、圧力分布、温度分布、せん断応力分布を求める必要があり、特にI V Tのような高面圧下では極めて困難な解析となる¹¹⁾。

一般的には、転がり接触部の圧力分布の形状などに仮定を置いてEHL接触部をモデル化し、Johnsonらが提案した油の粘弾性モデル(マクスウェルモデル)を用いて近似的にトラクション力を求めることがよく行われている。この方法で、実験的にも比較的良く一致するという報告もある¹²⁾。

トラクション解析においてはプログラムの収束安定性の改善や計算の高速化が大きな課題となっているが、計算には油の高圧物性や非ニュートン性、粘弾性などの特性値が必要であり、これらの特性を正確に把握し数式化するということが重要である。そのための実験的研究が大きなウエイトを占めている。

6. 運動解析

軸受は4つの構成部品からなる単純な構造であるにもかかわらずその挙動は極めて複雑であり今日なお解明されていない事象が数多く残されている。特に高速回転する軸受では転動体と保持器はその幾何学から求められる運動とは異なる挙動を示し、軸受の振動や発熱となって現れる。工作機械や精密機器ではそれらが装置の加工精度、測定精度に大きな影響を及ぼすことから、装置の高速化や高精度化を図るためには動的挙動に対する検討が欠かせない。

軸受の動的挙動を扱った解析プログラムの代表的なものとしてGupta¹³⁾が開発したADOREがある。このプログラムは運転中の軸受の挙動を6自由度(図6)のもとにリアルタイムで克明に追跡することができる。

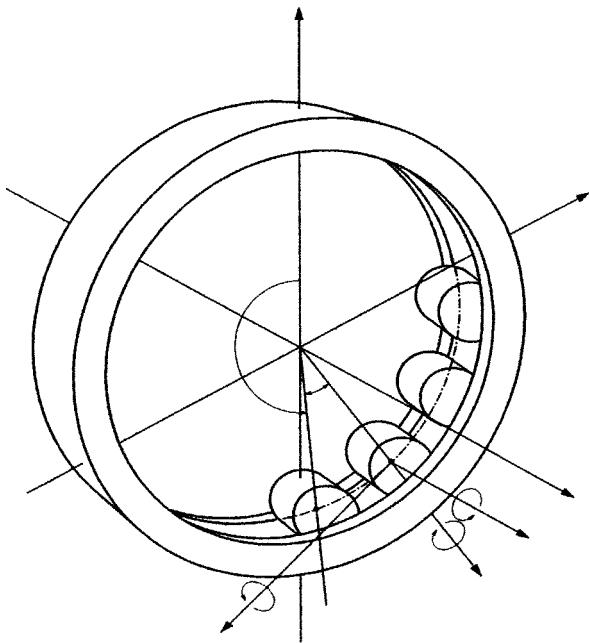


図6 ADOREの解析モデル(円筒ころ軸受)
Analysis model (cylindrical roller bearing)

これにより、従来の静的解析だけでは解明できなかった事象も再現できるようになった。たとえば玉軸受が冬期において加速時に発生することがある保持器音と保持器の過渡的な挙動との関係(詳細は本誌P31参照)や軽荷重下で運転される円筒ころ軸受の保持器の公転すべりの挙動が明らかにされている。図7はジェットエンジン主軸軸受などの高速回転下で発生する保持器の公転すべりとその回復現象を計算で再現したもので、その回復現象の原因が軌道輪の遠心膨張と発熱によることが明らかにされている¹⁴⁾。

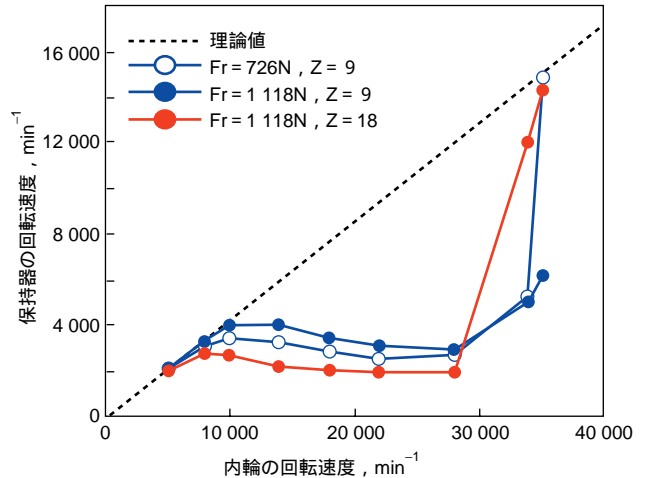


図7 保持器の回転速度の変化(計算値)¹⁴⁾
Rotational speed change of retainer

Guptaのプログラムは運転条件の変動、寸法精度、形状誤差まで考慮して挙動に及ぼす影響をシミュレーションすることができる。たとえば、軌道に表2のようないびつ成分を持つ内輪が回転した場合に発生するNRRO(Non-Repeatable Runout; 非同期回転振れ)を理論的に推定することができる。図8にその計算結果を示す¹⁵⁾。特にハードディスクドライブのスピンドル玉軸受には一般の軸受に比べてはるかに高いナノレベルの回転特性が求められており、このような内部精度を考慮した解析が欠かせない。動解析により影響度の大きい要因を抽出し、NRRO低減のための加工精度の追求が行われている。

表2 軌道いびつ成分
Frequency spectrum of race waviness

山数	大きさ, nm	山数	大きさ, nm
2	200	7	5
3	100	8	3
4	50	9	2
5	20	10	1
6	10	11	0

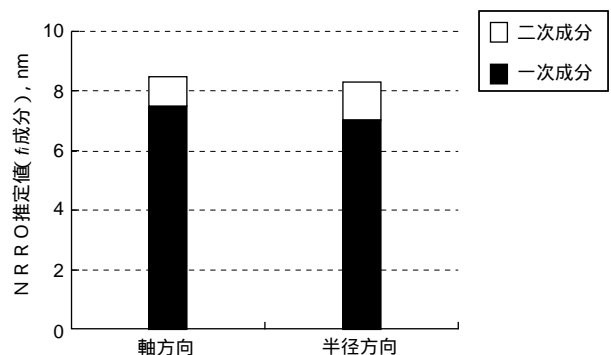


図8 NRRO(fi成分)推定値
Calculation results of NRRO

7. トライボCAD化へ向けて

軸受における解析技術は軸受設計の最適化とそれが組み込まれている機械装置の性能が信頼性向上を計る上で重要な要素技術となっている。コンピュータを駆使した動力学の発達を取り入れて軸受の技術が大きく進歩しようとしていることを紹介した。

軸受設計において3次元CAD化が進められている。作成した形状データを用いてさまざまな設計検討が可能になるが、現状はFEMを用いた強度解析に留まっている。コンピュータに搭載された解析モデルに基づいて設計支援を行うトライボCAD化の実現により革新的なトライボロジー設計が可能になると云われている¹⁶⁾。現状はまだ課題も多く発展段階にあるものの大きな可能性を有しており、近い将来それが現実のものとなることを期待したい。

参考文献

- 1) D. Dowson, トライボロジーの歴史編集委員会訳：トライボロジーの歴史，工業調査会(1997)。
- 2) R. Stribeck : Z. VDI, vol. 45, no. 37, (1901) 118.
- 3) G. Lundberg, A. Palmgren : Dynamic Capacity of Rolling Bearings, Ingeniorsvetenskapsakademiens Nr. 210 (1952)。
- 4) 大嶋昭男 : Koyo Engineering Journal, no. 143 (1993) 5。
- 5) 伊藤慎二郎, 野村達也 : Koyo Engineering Journal, no. 137 (1990) 6。
- 6) 原田昌寛, 鎌本繁夫, 藤原良承 : トライボロジー会議予稿集(東京 2000-5) 171。
- 7) 原田昌寛 : トライボロジー会議予稿集(東京 2001-5) 114。
- 8) R. J. Chittenden, D. Dowson, J. F. Dunn & C. M. Taylor : Proc. Roy. Soc. Lond., A 397 (1985) 71。
- 9) D. C. Witte : ASLE Trans., vol. 16, no. 1 (1973) 61。
- 10) H. Matsuyama, S. Kamamoto, K. Asano : SAE Technical paper, 982029 (1998)。
- 11) R. Yamashita and K. Asano : synopses of the international Tribology Conference Nagasaki, (2000)。
- 12) J. L. Johnson and J. L. Tevaawerk : Proc.

Roy. Soc. Lond., A 356 (1977) 215.

- 13) P. K. Gupta : Advanced Dynamics of Rolling Elements, Springer-Verlag (1984)。
- 14) 立石佳男 : トライボロジー会議予稿集(北九州 1996-10) 114。
- 15) 瀧井裕一 : 精密工学会誌, vol. 67, no. 7 (2001) 1083。
- 16) 田中正人 : 日本機械学会機素潤滑設計部門講演会(IMPT-100)講演論文集(1997) 97。

筆 者



浅野憲治*
K. ASANO

* 総合技術研究所
システム技術研究所 機械システム研究部