

For New Technology Network

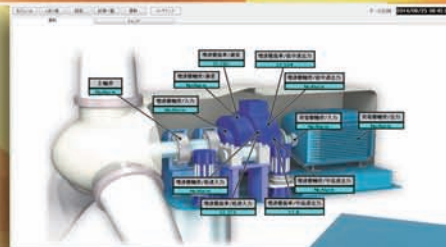
NTN®

TECHNICAL REVIEW

No.
82

特集 ● 複合材料, 産業機械技術・商品

October 2014



風力発電装置用超大形主軸受の試験設備「WIND LAB.」を導入

For New Technology Network

NTNは、今後世界各地で需要拡大が見込まれる洋上風力発電装置の主軸用軸受の技術開発を強化するため、外径約4.2mまでの評価が可能な世界最大級の試験設備「WIND LAB.」を自社開発し、先端技術研究所（三重県桑名市）内に導入しました。

「WIND LAB.」は、垂直・水平方向で計6個の油圧シリンダーを用いて軸受に荷重を発生させ、実際の風力発電装置で使用されている状態を再現することで、軸受の詳細な技術解析や仕様検討が可能です。また、定常状態や極限状態にある荷重条件下での評価のほか、自動調心ころ軸受や円すいころ軸受など各種の軸受にも対応し、お客様のニーズや風力発電装置の形式に合ったさまざまな試験が可能です。

NTNは、風力発電装置を構成する部品のうち、主軸受をはじめ、減速機、増速機、発電機などに用いられるすべての軸受を開発・供給しています。洋上風力発電をはじめ大型化する風力発電装置の主軸受は、直径100mを超える翼（ブレード）の回転を支えるため非常に高い技術力が必要とされます。このため、超大形軸受の実物評価を行うことで、これまで以上に軸受開発のスピードアップや、軸受の信頼性を向上します。さらに、「WIND LAB.」にNTNが開発した風力発電装置用状態監視システム（CMS）「Wind Doctor[®]」（本文P74）を組み込むことで、試験中の軸受状態をモニタリングし、軸受の機能向上およびCMSによる設備診断技術のさらなる高度化も図ります。

今後、「WIND LAB.」を活用していくことで、軸受メーカーとしての優位性をより強固なものとし、風力発電装置向け事業のさらなる拡大を図ってまいります。



NTN TECHNICAL REVIEW No.82

複合材料, 産業機械技術・商品特集号 ● 目次

巻頭言	複合材料・産業機械技術・商品特集号に寄せて	常務執行役員 森 夏比古	1
-----	-----------------------	--------------	---

【寄稿文】	粉からの新しいものづくり -最新の焼結金属の技術とその動向について-	九州大学大学院工学研究院 機械工学部門 三浦秀士	2
-------	------------------------------------	--------------------------	---

● 複合材料商品・技術小特集			
【解説】	成長市場に向けた樹脂・焼結金属・磁性材料の複合化技術と商品紹介	複合材料商品事業部 沖 芳郎	12
【解説】	焼結機械部品の高強度化	先端技術研究所 奥野孝洋/八代尚樹	21
【製品紹介】	高周波焼入装置用高性能磁性コア	日本科学冶金(株) 技術部 原野拓治	26
【製品紹介】	青銅系代替銅鉄系焼結含油軸受	NTN特殊合金(株) 技術部 山下智典	30
【製品紹介】	複写機・プリンタ定着部用高負荷すべり軸受ユニット	複合材料商品事業部 複合材料技術部 服部 圭 NTN精密樹脂(株) 技術部 石井卓哉	34

● モノづくり技術小特集			
【製品紹介】	工作機械主軸用空冷間座付軸受	産業機械事業本部 工作機・航空宇宙技術部 恩田裕士/深田貴久夫 産業機械事業本部 産業機械技術部 山本庸平 先端技術研究所 吉野真人	38
【製品紹介】	工作機械主軸用高速アンギュラ玉軸受の新樹脂製保持器	産業機械事業本部 工作機・航空宇宙技術部 井上和香奈/古山峰夫 産業機械事業本部 産業機械技術部 鬼塚宗一郎	44
【解説】	工作機械主軸用軸受技術計算システム	産業機械事業本部 工作機・航空宇宙技術部 植田敬一/恩田裕士/橋爪翔平	49
【論文】	エアオイル潤滑されたアンギュラ玉軸受の摩擦トルクの推定方法	先端技術研究所 藤原宏樹	54
【論文】	超仕上げにおける加工状態のインプロセスモニタリング	生産技術研究所 東 晃平/伊佐 肇/北川貴一 岡山大学大学院自然科学研究科 産業創成工学専攻 大西 孝/大橋一仁	61
【製品紹介】	ロボット用軽量軸受	NTN-SNR ROULEMENTS Industry Innovative Developments Sebastien BRISSON	68

● CMS・超技術・商品小特集			
【解説】	状態監視システム(CMS)の取組み	産業機械事業本部 CMS技術部 橋爪啓介/竹内彰利/田中弓弦	74
【製品紹介】	アルテージシリーズ高機能ころ軸受の紹介	産業機械事業本部 産業機械技術部 田畑翔悟 産業機械事業本部 新工エネルギー技術部 戸田耕平 産業機械事業本部 建機・鉄道技術部 清水保彦	78
【解説】	航空機用軸受の技術動向	産業機械事業本部 工作機・航空宇宙技術部 西河 崇/林 奈央 産業機械事業本部 桑名製作所 早川亜希子	83

● 論文			
【論文】	アプレシブ摩耗下の鋼に侵入する水素量と湿度の影響	先端技術研究所 伊藤元博	88
【論文】	中炭素鋼及び軸受用鋼の超長寿命域までのせん断疲労特性評価	先端技術研究所 三輪則暁	94

● 受賞案件の紹介			
《2013年度“超”モノづくり部品大賞 日本力(にっぽんぶらんど) 賞受賞》	パラレルリンク型高速角度制御装置	商品開発研究所 磯部 浩/西尾幸宏/坂田清悟/小長井直哉/山田裕之	98
《平成25年度 日本粉末冶金工業会賞 新製品賞・材料部門受賞》	可変バルブタイミング装置用焼結製オイルシールの開発	NTN特殊合金(株) 技術部 須貝洋介/毛利敏彦	99
《平成25年度 日本粉末冶金工業会賞 奨励賞受賞》	超薄型ファンモータ用焼結動圧軸受	NTN特殊合金(株) 技術部 内山土広 複合材料商品事業部 流体動圧軸受部 小松原慎治	100
《2013年度 日本トライボロジー学会 奨励賞受賞》	転がり軸受用鋼のせん断疲労特性を迅速評価するための超音波ねじり疲労試験機の開発	先端技術研究所 三輪則暁	101

新商品紹介			102
-------	--	--	-----

NTN TECHNICAL REVIEW No.82

CONTENTS

Preface

Natsuhiko MORI 1

Contribution

Advanced Powders Processing – Recent Powder Metallurgy Techniques and It's Trend –
Hideshi MIURA Professor, Department of Mechanical Engineering, Kyushu University 2

● Special Issue for Composite Material Products and Technology

Product Introduction and Complex Technology of Resin,Sintered Metal and Magnet for Growth Markets Yoshio OKI	12
The Improvement of Strength of Sintered Machine Parts Takahiro OKUNO and Naoki YASHIRO	21
High Performance Magnetic Core for Induction Hardening Devices Takuji HARANO	26
The Copper Iron-based Material Sintered Oil-impregnated Bearing Equivalent to Bronze Sintered Material Tomonori YAMASHITA	30
High Load Sliding Bearing Unit Used in Fuser of Copier and Printer Kei HATTORI and Takuya ISHII	34

● Special Issue for Manufacturing Technology

Machine Tool Main Spindle Bearings with Air Cooling Spacer Yushi ONDA, Kikuo FUKADA, Yohei YAMAMOTO and Masato YOSHINO	38
New Engineering Plastic Cage of High Speed Angular Contact Ball Bearings for Machine Tools Wakana INOUE, Mineo KOYAMA and Soichiro ONITSUKA	44
Bearing Technical Calculation System for Machine Tool Spindles Keiichi UEDA, Yushi ONDA and Shouhei HASHIZUME	49
Estimation Method for Friction Torque of Air-oil Lubricated Angular Contact Ball Bearings Hiroki FUJIWARA	54
In-process Monitoring of Machining State in Superfinishing Kohei HIGASHI, Hajime ISA, Takakazu KITAGAWA, Takashi ONISHI and Kazuhito OHASHI	61
Lightweight Bearing for Robot Sebastien BRISSON	68

● Special Issue for CMS Supertechnology New Products

Development of Condition Monitoring System Keisuke HASHIZUME, Akitoshi TAKEUCHI and Yuzuru TANAKA	74
Introduction of "ULTAGE" series : High Functionality Roller Bearings Shogo TABATA, Kouhei TODA and Yasuhiko SHIMIZU	78
Technical Trend of Aircraft Bearings Takashi NISHIKAWA, Nao HAYASHI and Akiko HAYAKAWA	83

● Technical Papers

The Influence of the Humidity and Quantity of Hydrogen into Steel under the Abrasive Wear Motohiro ITO	88
Evaluation of Shear Fatigue Properties of Medium Carbon Steels and Rolling Bearing Steels up to Giga-cycle Regimes Noriaki MIWA	94

● Our Line of Award Winning Products

"2013 'CHO' MONODZUKURI Innovate Components Awards" NIPPON Brand Award Parallel Link High Speed Angle Control Equipment Hiroshi ISOBE, Yukihiko NISHIO, Seigo SAKATA, Naoya KONAGAI and Hiroyuki YAMADA	98
"The Japan Powder Metallurgy Association Awards 2013" New Materials Development of the Oil Seal Made of Sintered Metal for Variable Valve Timing Device Yosuke SUGAI and Toshihiko MOURI	99
"The Japan Powder Metallurgy Association Awards 2013" Effort Prize Sintered Hydrodynamic Bearing for Super Thin Fan Motor Tadahiro UCHIYAMA and Shinji KOMATSUBARA	100
"The Japanese Society of Tribologists 2013" Encouragement Award Development of Ultrasonic Torsional Fatigue Tester for Rapid Shear Fatigue Property Evaluation of Rolling Bearing Steels Noriaki MIWA	101

Our Line of New Products

102

複合材料，産業機械技術・商品 特集号に寄せて



常務執行役員
森 夏比古

モノづくり産業がグローバル化し、世界各地でモノの市場・需要が拡大するなか、地球環境への配慮とともに、最小限の資源を最大限に有効活用することが急務となっています。また、日本では持続的かつ、発展的な競争力を維持するため、先端技術、素材の開発・活用が加速しています。そのため、CFRPの適用拡大や3Dプリンタの活用など、素材の活用方法やモノづくりの手法が大幅に変わろうとしています。

このような状況に対し、NTNでは2011年4月から複合材料商品事業部を新設し、樹脂、焼結金属および、磁性材の素材技術を融合・強化し、自動車の低燃費化・電動化や産業機械部品の高性能化などに関わる複合商品および、ユニット・モジュール商品を開発し、市場へ投入しています。

今般、「モノづくりDNAを未来へ、世界へ。」をテーマとした第27回日本国際工作機械見本市（JIMTOF2014）が、10月30日から11月4日に亘って開催されるのに合わせ、NTNの複合材料、産業機械技術・商品を集めたNTNテクニカルレビュー No.82を発行する運びとなりました。

本誌では、初めに粉体および粉末冶金の権威である九州大学大学院工学研究院機械工学部門の三浦秀士教授に寄稿文「粉から新しいものづくり — 最新の焼結合金の技術とその動向について—」をご執筆いただきました。「複合材料商品・技術小特集」では、焼結金属の高強度化を始め、磁性材料や樹脂、さらにはハイブリッド商品などについて紹介させていただきます。また、「モノづくり技術小特集」では、JIMTOF2014に出展する、独自技術でモノづくりを実現する技術や商品を紹介し、「CMS・超技術・商品小特集」では、産業機械向けの基盤技術・商品やモニタリング技術について紹介いたします。

NTNは2017年度に創業100周年を迎えます。「For New Technology Network：新しい技術の創造と新商品の開発を通じて国際社会に貢献する」の理念のもと、独自の技術開発力で世界の産業の発展に貢献してまいります。

For New Technology Network

粉からの新しいものづくり

—最新の焼結金属の技術とその動向について—

Advanced Powders Processing – Recent Powder Metallurgy Techniques and It's Trend –



三浦 秀士 Hideshi MIURA
九州大学大学院工学研究院 機械工学部門

金属粉末射出成形法（MIM）は低コストで複雑形状品を創製するのに適した先端粉末冶金技術として期待されている。これまでに鉄系を始めとしてTiなどの種々の工業用材料にMIMプロセスを適用してきたが、とりわけFe-6Ni-0.4Cの熱処理材は引張強さが2000MPaで伸び8%という超強靱な特性を示し、溶製材を上回る特性を示す。一方、レーザフォーミング技術もTi合金などの複雑形状品の創製能力が大きいことから、先端粉末冶金技術として、最近、航空機や医療用のみならず自動車用としても利用されようとしている。本稿では、これら2つの先端粉末冶金技術を最新の焼結金属の技術として紹介する。

Advanced powder processing techniques such as metal injection molding (MIM) are hoped to be suitable for fabricating complex shaped components with low cost. So far, we have applied MIM process to produce various types of industrial materials such as ferrous and Ti alloys, especially heat treated Fe-6Ni-0.4C showed the super high strengthened properties of 2000MPa tensile strength and 8% elongation which are superior to wrought materials. On the other hand, direct laser forming (DLF) technique is another advanced powder processing technique. Recently, much effort has been made to apply this process to automobile, aerospace and medical fields due to the potential of producing complex shaped Ti alloy structures. In this paper, the above two techniques are introduced as recent powder metallurgy techniques.

1. はじめに

粉末冶金（Powder Metallurgy：以下P/Mと略記する）は、焼結（金属やセラミックスなどの粉末から特異な性質を引き出すために高温（融点以下の温度）にて粒子同士を接合するもので、成分系によっては液相を介する焼結もある）という現象を利用した金属加工法であり、高度工業社会における素材や製品の製造法の1つとして重要な役割を果たしている。P/Mの最大の魅力は粉末を成形・焼結することによって直接最終製品形状に成形（Near NetあるいはNet Shaping）できることであり、材料特性、組成、熱処理および微細組織においてかなりの自由度を持っていることから、溶製法では発現し得ない特性が得られるとともに経済的に量産できることも利点である。このような特徴を有するP/M法により、ギヤやベアリング、コネクティングロット（自動車用）などの各種機械構造用部品をはじめとして、超硬チップや金型などの切削・耐摩耗工具材料、WやMoなどの高融点金属材料、フィルターや生体用インプラントなどの多孔質材料、電

気回路開閉器やパンタグラフすり板などの電気接点・集電材料、磁性コアやセンサーリングなどの磁性材料が生産されている。

従来より、高密度で高性能なP/M製品を目指して、粉末の製造から成形、焼結、後加工に至る各プロセスの改良や新しい技術の開発が行われているが、とりわけ最近のP/M技術は表1¹⁾に示すように他の素形加工技術との境界領域における加工や複合加工技術が多く見受けられるようである。例えば、粉末射出成形法はP/Mとプラスチック成形、レーザによる粉末積層3DプリンティングはP/Mとレーザ加工(CAD/CAM)を組み合わせたもので、このような新しい技術に関する知識や応用分野などを知っておくことは、これからの新材料や新製品の製造・開発、すなわちNTNにとっても大いに参考になるものと思われる。本稿では、斬新で、かつユニークな上記2つの成形・焼結技術に焦点を絞り、それらについて概説するとともに、我々の新しい研究成果を紹介することで将来展望に代えたい。

表1 最新のP/M用途例
Recent applications of various P/M processings

用途	要求特性	プロセスと材料
耐食性部品	真密度, 均一合金	HIP, チタン
熱処理装置	耐浸炭性と耐クリープ性	反応焼結, 押し出し, ニッケルアルミナイド
貴金属装身具類	美観, 複雑形状	射出成形, 貴金属, チタン
管, 薄板, 棒, 板	真密度, ネットシェイブ	スプレーフォーミング, 鋼, 超合金
磁性部品	磁性的機能, 耐環境性	焼結, 射出成形, 急冷凝固粉末
被覆材	耐酸化と耐食性	スプレーフォーミング, 金属間化合物
マイクロエレクトロニクス用基板	熱的性質の調整, マイクロ波吸収	射出成形, W-Cu, Mo-Cu, Al-SiC, Al-AlN
高融点金属	複雑形状	HIPなどの完全緻密化法, 特殊合金
航空機構造用部材	高い比強度	HIPなどの完全緻密化法, 急冷凝固Al合金
構造用部材	疲労強度と破壊強度	粉末鍛造, 鉄合金
動膜フィルター	小さな気孔寸法, 耐食性	CIP, ステンレス鋼
耐摩耗構造用部材	軽量, 高耐摩耗性	ホットプレス, ホウ化物, Al基複合材料

2. 金属粉末射出成形法

P/Mにおいては、高い形状の自由度と高密度化を比較的容易に両立させ得るような成形技術が望まれているが、その一つとして1970年代に開発された技術が、バインダを利用した金属粉末射出成形（Metal Injection Molding: MIM）プロセスである。

MIMプロセスは多様な形態で用いられているが、基本的事柄は似ており、図1¹⁾に主な工程を示す。原料としては、焼結時の緻密化を促進させるため、ほぼ球状に近い形で、平均粒度が0.5~15 μ mのカルボニルや酸化物還元およびガス噴霧による粉末が代表的なものである。通常、バインダは熱可塑性のポリマ材料であるが、水や種々の無機質もうまく用いられている。典型的なバインダは、適当な潤滑剤もしくはバインダに粉末との密着性を与えるための湿潤剤を伴った、70%のパラフィンワックスと30%のポリプロピレンから構成されている。この種のバインダは、約150 $^{\circ}$ Cで完全に熔融する。バインダ量は混練物のほぼ40vol%で、粉末の充填特性に依存するが、鉄系の場合、約6wt%のバインダに相当する。混練物の粘度が100Pa \cdot s以下のとき、最も良好な成形状態が達成されるが、粘性はバインダ固有の粘性だけでなく、混練物温度、剪断速度、固体の量、バインダ中に含まれる表面湿潤剤の種類にも依存する。混練物の良好な均一性がプロセス制御を維持するのに必要となる。粘性は組成に敏感であり、不均一性も金型孔内への流れを妨げることになる。通常はバインダをわずかに多くすることで、系の粘性を望む範囲内に維持する。

成形に用いられる装置は、プラスチックの射出成形に用いられるものと同じである。モーターによって駆動するレシプロ型スクリューで、混練物が均一となるよう原料をかき混ぜたり、金型に充填するのに必要な圧力を発生する。原料は、装入ホッパーから常温で粉砕粒子のまま入れられ、バレルを通過する間にバインダの溶解温度以上に加熱される。熔融した粉末とバインダの混練物は、前方へ押し出され、金型孔を瞬時に

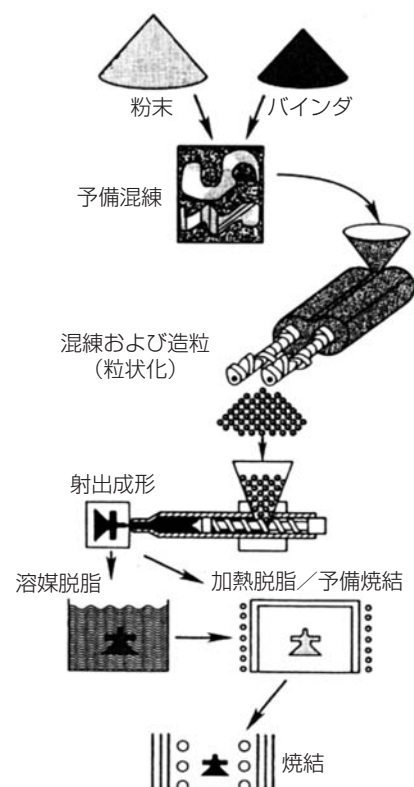


図1 MIMプロセスの基本工程概略図
Conceptual sequence of MIM steps

満たす。十分に冷却した後、成形体は取り出され、本工程が繰り返し行われるが、うまく成形するためには、高圧力あるいは低粘性が必要である。成形機には利用できる圧力に限界があり、温度が粘性を支配することから、結局、温度と圧力が成形における主要な制御因子となる。

成形後、バインダは脱バインダと称されるプロセスにより成形体から取り除かれる。バインダ系と関連する脱バインダ方法には、これまで多種多様のプロセスが開発されており、バインダ成分と合わせて特許の大半を占めるものであるが、表2²⁾に種々の方法を示す。工業的には熱分解や溶媒抽出が主に採用されているが、前者では脱バインダに長時間（600℃までゆっくり加熱）を要したり、製品形状の変形が生じやすいなどの問題点も依然として残されている。また後者では、それらの欠点がかかり克服されているものの、溶媒にはアセトンやエチレンなどのように、人体に害を及ぼすものや環境汚染につながるものが多いことから、その取扱いが問題である。このためエタノールや水溶性の新しいバインダ系の開発に力を入れている。いずれにしても、脱バインダに長時間を要することは生産的に不利であり、このことがMIM製品の許容肉厚を大きく制限している。ちなみに、数年前までは約10mmぐらいの肉厚までが経済的見地からすれば限界とされていたが、最近では脱バインダ技術も進歩して25mm程度の肉厚までは可能となっているようである。さらに特殊な方法として、触媒による脱バインダ法³⁾やクイックセットプロセス⁴⁾と称される一種の水凍結法もある。

次の段階である焼結は従来のP/M法と同様に不活性あるいは還元性の各種雰囲気、または真空雰囲気で行われる。焼結は強い粒子間結合をもたらす、緻密化によって空隙を取り除く。等方的な粉末充填は予想できるように均一な収縮（15～20%）を起こす。従って、初期の成形体は最終成形体寸法に適するよう大きめにしている。焼結後、成形体は他の多くの製造法で可能な特性よりも優れた強度と均一な組織を示す。参考までに、本プロセスにより得られる各種鉄系焼結材料の機械的諸特性を他の製造法によるものと比較した一例を、表3に示す。いずれの鋼種^{5)～9)}においても、従来のP/M材の特性を上回るだけでなく、溶製材に匹敵もしくは凌駕する高性能な機械的的特性が得られており、MIMプロセスが難加工性材料の形状付与に有効であるとともに、材質の改善にも極めて効果的であることがわかる。その代表例を我々の研究成果より以下に示す。

表2 各種脱バインダ法
Various debinding techniques

プロセス名	バインダ成分	脱バインダ条件
加熱分解		
MACPHERSONプロセス	PE, 樟腦	真空
WITECプロセス	WAX, PE	乱送風, 吸収体
VIプロセス (揮発)	WAX, PE, PP	高真空, 蒸発
RIVERSプロセス	水, メチルセルロース	金型内脱水
QUICKSETプロセス	水, PEG	冷凍乾燥
溶媒抽出		
WITECプロセス	PE, PS, PEG	水, 塩化メチレン
MACPHERSONプロセス	PE, PS	トリクレン
AMAXプロセス	WAX, PE, PP ピーナッツオイル	塩化メチレン
化学分解		
BASFプロセス	変性POM	硝酸, 酢酸蒸気
UV分解プロセス	WAX, アクリル	紫外線照射

PE: ポリエチレン, PP: ポリプロピレン, PEG: ポリエチレングリコール, PS: ポリスチレン, POM: ポリアセチール

表3 製造法の違いによる各種合金鋼の機械的性質
Mechanical properties of various alloy steels
by different material processings

鋼種	機械的性質	MIM	P/M	溶製法
高速度鋼 SKH10 (焼きもどし材)	抗折力 (MPa)	3200	2500	2500
	硬度 (H _R C)	70	71	67
マルエージング鋼 18Ni-8Co-5Mo (時効材)	引張強度 (MPa)	1640	1500	1800
	伸び (%)	2~3	1~2	8
	硬度 (H _R C)	47	35	
マルテンサイト系 ステンレス鋼 SUS440C (17Cr-1C) (焼きもどし材)	引張強度 (MPa)	1600	900	1950
	伸び (%)	1~2	4	2
	硬度 (H _R C)	53	30	57
			SUS410	
17-4PH ステンレス鋼 SUS630 (時効材)	引張強度 (MPa)	1340	970	1370
	伸び (%)	11	2	14
	硬度 (H _R C)	44	24	45

2.1 MIMプロセスによる鉄系焼結材料の超強靱化

著者らは、これまでの研究において新しいMIMプロセスでの雰囲気制御による炭素量の精密制御法を提案するとともに、従来のP/M（金型プレス成形の場合、通常の焼結低合金鋼の引張強さは1000MPa級で伸びも1～2%）では得られない引張強度1800MPa、伸び3～4%の極めて高性能な機械的性質（焼結鍛造材に匹敵）を示す混合粉末法による焼結低合金鋼（Fe-2%Ni-0.5%Mo-0.4%C熱処理材）を開発した¹⁰⁾。これに関しては、混合粉末による焼結材料特有の局所的に成分が傾斜した微細不均質（ヘテロ）組織（とくに凝集Ni粉のFe基地粉への不十分な拡散により、最終的にNi濃度の傾斜に応じて出現するマルテンサイト相（濃度が高い場合は残留オーステナイト相）を網目状に焼き戻しマルテンサイト相が取り囲んだ組織）が優れた特性を発現しているものと考えている。

そこで、上記特性がNi粉の凝集という自然現象とFe-2%Ni-0.5%Moの組成のみを用いて得られたものであり、本鋼種を基本に人工的にNi粉の大きさや量あるいは焼結・熱処理条件などを変えることによって、さらに優れた特性（目標：引張強度2000MPa以上、伸び5%以上、回転曲げ疲労強度600MPa以上）を発現させることが十分に期待できることから、ヘテロ組織を構成する各相の成分や割合およびそれらの分散度合などマイクロレベルでの組織形態の最適化について検討を行った。

2.2 実験方法

使用した粉末は、カーボニル鉄粉（福田金属箔粉工業（株）製Fe-OM, 平均粒径4.4 μ m）である。また、添加するNiとして、水アトマイズ粉末（三菱製鋼（株）製AKT-Ni）を3種類の粒度に分級して用いた。平均粒径は6, 16, 24 μ mであり、それぞれをFine, Medium, Coarseと称し、これらをNiの添加量が4, 6, 8 mass%となるように混合して用いた。バインダとして、パラフィンワックスを69mass%, アタクチックポリプロピレンを20mass%, カルナウバワックスを10mass%およびステアリン酸を1mass%配合した。粉末およびバインダは、粉末の配合比が65vol%となるように混練を行い、得られた原料を用いて射出成形により平板のダンベル型引張試験片を作製した。成形体はまずヘプタン気相中での溶媒脱脂によりパラフィンワックスを抽出し、その後、加熱脱脂および焼結を連続的に行った。焼結は10⁻¹Paの真空中で行い、焼結温度1200から1350 $^{\circ}$ Cで1時間保持した。得られた焼結体はAr雰囲気中で熱処理を行った。900 $^{\circ}$ Cにて30分保持した後、油中にて焼入れを行い、その後200 $^{\circ}$ Cにて120分保持した後空冷にて焼もどした。得られた試験片は、アルキメデス法による相対密度測定、炭素量分析、組織観察、EPMAによるNi分布状況の解析、および引張試験に供した。

2.3 実験結果および考察

得られた焼結体の密度は、いずれのNi粉末粒径、Ni添加量においても相対密度95%以上を示した。また、熱処理材の炭素量はいずれも0.4mass%程度であった。図2に代表的な熱処理材の組織写真を示す。いずれの組織にも、図中に矢印で示すように、白く見えるNiリッチ相が点在しており、その周囲に焼もどしマルテンサイト相が取り囲むネットワーク構造を呈し

ていることがわかる。その場合、Ni粉末粒径が大きいほど、またNi添加量が多いほど、Niリッチ相は大きくなっていることが観察される。

EPMAによるNiの分布状況を図3に示す。Ni濃度の高い部分と低い部分が存在しており、Ni濃度傾斜に伴うヘテロ組織であることが明らかである。なお、粒径の小さいNi粉末を使用することにより、NiがFeマトリックスにより拡散し、濃度差は小さくなっていることがわかった。また、Ni添加量が高いと濃度差も大きいことがわかった。

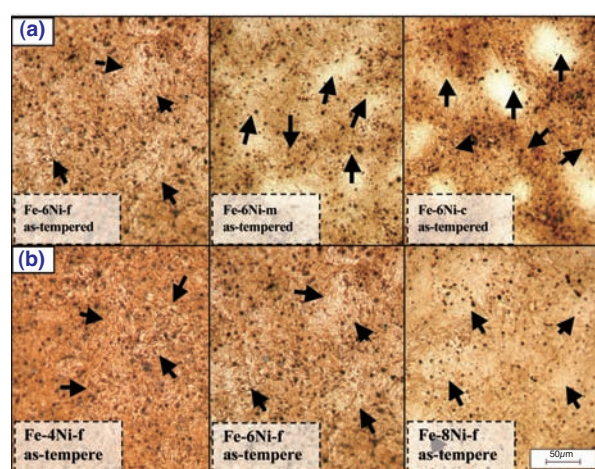


図2 1250 $^{\circ}$ Cで1時間の真空焼結によるFe-Ni系焼結鋼（焼入れ—焼戻し材）の代表的な顕微鏡組織
(a)異なるNi粉粒度の場合 (b)異なるNi添加量の場合。
矢印はマルテンサイト（旧Ni粉）領域を示す。

Representative of optical microstructures for various Fe-Ni steel compacts sintered at 1250 $^{\circ}$ C for 1 hour in vacuum atmosphere. The arrow shows the bright martensite region.
(a) As-tempered compacts of different Ni particle size,
(b) As-tempered compacts of different Ni content (mass%)

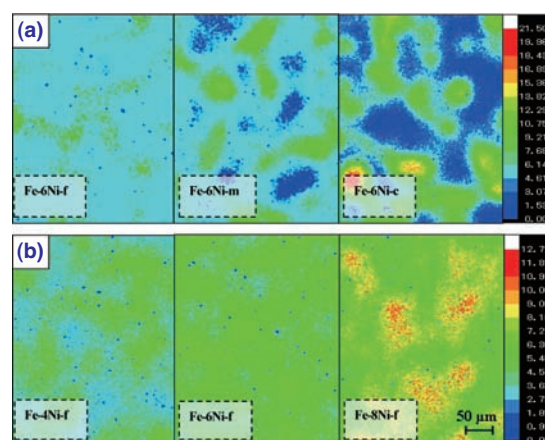


図3 代表的なNiの特性X線像
(a)異なるNi粉粒度の場合 (b)異なるNi添加量の場合。
Representative of Ni element mappings by EPMA analysis for as-tempered Fe-Ni steel compacts changing
(a) Ni mean particle size, (b) Ni content (mass%)

図4に引張試験により得られた引張強度を示す。いずれも2000MPa程度の非常に高い値を示している。その際、Ni粉末の粒径が小さいほうが高い強度および伸びを示しており、Ni添加量は6%のものが最大の値を示した。また、図5に伸びを示す。伸びもNi粉末の粒径が小さいものほど高い値を示し、やはりNi添加量6%で最大の値を示した。Fine Niで添加量6%においては、引張強度2040MPa、伸び8.1%という非常に強靱な特性を示した。これは、報告されているMIMによる焼結低合金鋼¹¹⁻¹⁴⁾で最高のレベルであり、微細なヘテロ組織を有することから、このような超強靱な特性が得られたものと考えられる。

図6に、Fine粉末を用いたNi添加量6%材の引張試験前後の硬度を示す。引張試験前は、Niリッチ相は焼

もどしマルテンサイト相に比べ、低い値を示していた。一方、引張試験後、Niリッチ相の硬度は試験前に比べて20%近く増加しており、焼もどしマルテンサイト相より高い値を示している。一方、焼もどしマルテンサイト相では硬度の変化はほとんど見られない。

ここでさらに、X線回折 (XRD) による引張試験前後の残留オーステナイトの定量化も試みた。図7に引張試験前後の残留オーステナイト量を示す。試験前に17%近く存在していた残留オーステナイトは、試験後は6%まで低減していた。以上のことから、Niリッチ相で応力誘起マルテンサイト変態 (TRIP) が起こり、硬度の向上がみられたと考えられ、このことも起因して、ヘテロ組織を有する焼結低合金鋼の熱処理材で、超強靱な引張特性を示すことが明らかとなった¹⁵⁾。

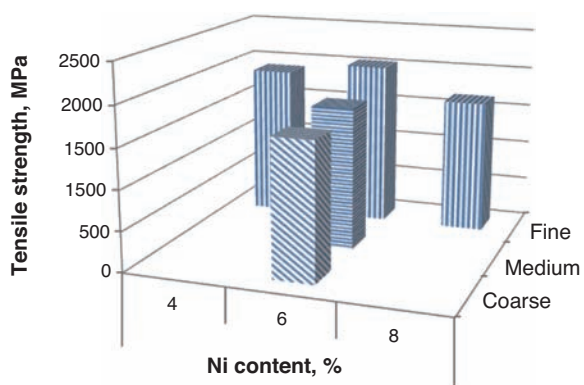


図4 異なるNi粉末粒度、Ni添加量と引張強さの関係
Tensile strength of different Ni content and particle size

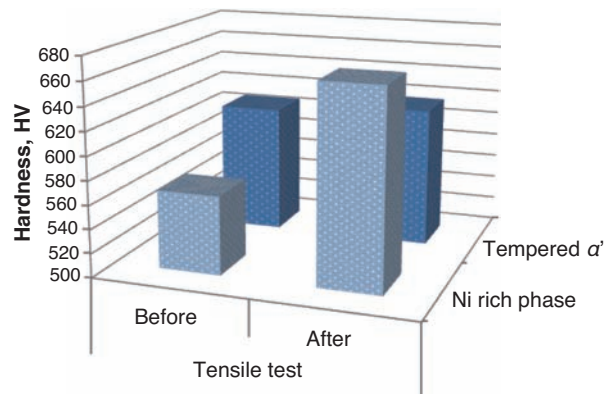


図6 Niリッチ相と基地 (焼戻しマルテンサイト) の引張試験前後の硬さ
Micro vickers hardness of each region at before and after tensile testing

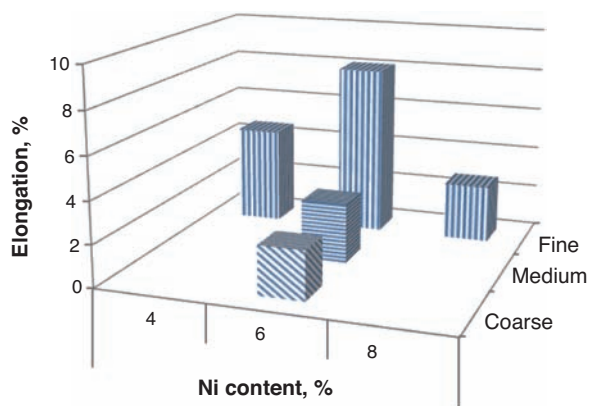


図5 異なるNi粉末粒度、Ni添加量と伸びの関係
Elongation of different Ni content and particle size

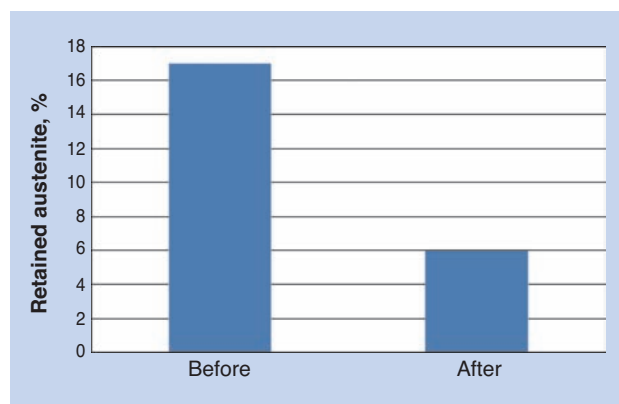


図7 引張試験前後の残留オーステナイト量
Retained austenite at before and after tensile testing

3. 粉末積層3Dプリンティング

様々な部品や製品の開発設計にCADは常套手段として用いられるようになってきたが、なかでも部品形状が3次元CADデータとして貯えられるようになって、これを実体として取り出すための新しい付加工法：AM（Additive Manufacturing）が開発されてきた。その代表は光造形法（Stereolithography）とも呼ばれるもので、光硬化性の液状樹脂を用いてレーザー光の走査により薄層を形成し、随時積層することで造形していくものである。これを金属やセラミックスの粉末にも応用展開されているのがレーザーや電子ビームを用いた粉末床熔融積層法：PBF（Powder Bed Fusion）以後、前者をレーザーフォーミングと略記する）である。AMにはこの他、次のような方法がある。

- 材料押し出し法：ME（Material Extrusion）法ともいい、熱可塑性樹脂を熔融してノズルから連続的に押し出して積層造形する最もポピュラーな方法。
- シート積層法：SL（Sheet Lamination）法ともいい、紙や箔等のシート状の材料を接着して積層造形する方法。
- 指向性エネルギー堆積法：DED（Directed Energy Deposition）法ともいい、プラズマやレーザーを用い金属粉末等を液化してノズルから溶滴として噴出させて積層造形する方法。

特に最近では、材料開発や造形手法の改良が進み、AMが単に形状設計チェック用の金型作りのためだけでなく、機能性に富んだ製品をある程度精度良く造形できるようになってきたため、その適用範囲も広がりつつある。ここではレーザーフォーミングに関する事項を主に扱うこととする。

粉末を用いたレーザーフォーミングについては、粉末供給の形態から様々な方法が研究されている¹⁶⁾。まず、初期のものでは、バインダ成分を混合あるいはコーティングした粉末を用いて、バインダのみをレーザー熱で熔融接合させるもので、本焼結を必要とするものと必要としないものがある。前者の場合には脱脂が必要であり、両者とも含浸が併用されることが多い。樹脂バインダの量が多いほうが成形速度は大きくなるため、グリーン体成形では著しく時間が短縮されるが、樹脂バインダを使用しない場合には成形時間が長くなる傾向がある。前者の場合には樹脂（熱硬化性フェノールとパラフィンワックス）の配合とコーティング方

式、そして基材特性を換えることによって、脱脂・焼結+溶浸から脱脂・焼結・溶浸の1工程への工程短縮が図られている。溶浸の代わりにHIP処理したり、あるいはニッケルリン青銅系の液相焼結後に含浸や溶浸を施し、レーザーの出力制御によって完全熔融して強度と寸法精度を向上させる改良も行われている。Fe-Ni系混合粉末を用いた例では残留気孔をショットピーニングによって封孔処理して寸法精度を高める開発もなされているが、いずれも多工程であり、強度的にも不十分である。

そこで、金属粉末のみに直接レーザーを照射して熔融・接合させ、製品を作り上げていく方法が開発・研究されている。その原理を図8に示す¹⁷⁾。まず造形テーブル（シリンダ）上に一層だけ粉末を敷きつめ、これにCADデータに基づいてレーザーが照射され、粉末同士が熔融固化する。ついで、粉末供給シリンダから次の層を造形テーブル上にローラにより敷きつめ、レーザー照射・熔融固化させる。この積層操作を繰り返していくことで、所望の3次元形状物を得ることができる。この場合、寸法精度や面粗度の点で工業的に満足できるレベルまでには至っていないことから、付加工として精密切削技術を組み合わせた金属光造形複合加工技術も開発されており、これにより短納期・低コストの金型製作が行われている。

ここでは、著者らが生体材料や航空機用部材としてのTiに着目し、Ti粉末を用いた脱気・Arガス雰囲気下でのレーザーフォーミングについて、複雑構造物のネットシェイプ加工技術としての基礎研究を進めていることから、以下に著者らの最近の成果¹⁷⁻²²⁾を示す。

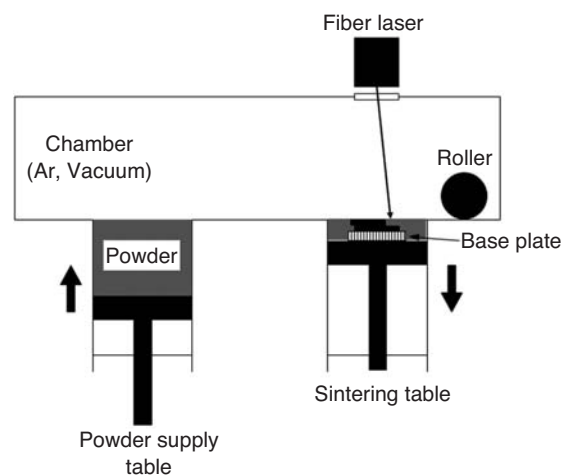


図8 レーザーフォーミング装置の概略図
Sketch of laser forming equipment

3.1 Ti粉末のレーザフォーミング

レーザ3Dフォーミングにおける重要課題は、製品の高密度化と高精度化である。これまでの研究において、粉末供給プロセスの改善によって、造形体の相対密度を97.8%まで向上させた。本研究では更なる高密度かつ高精度な造形体の作製を目的として、レーザ条件の改善による高密度造形体の作製および機械的特性評価、さらに粉末粒径が側面精度に与える影響についても検討を行った。

3.2 実験方法

原料粉末として、ガスアトマイズ法によるTi-6Al-4V合金粉末（大阪チタニウム（株）製TILOP64）を用いた。粒径は45 μ mアンダーであり、平均粒径は33.4 μ mである。また粉末粒径が側面精度に与える影響を評価するために、粒径25 μ mアンダー（平均粒径18.8 μ m）のより微細な粉末も準備した。レーザ発振器には、最大出力330W、連続発振方式のイットリビウムファイバレーザを用いた。この発振器からのレーザ光はガルバノミラーを含む走査システムにより、最終的にビーム径50 μ mのレーザ光として粉末上に走査される。また、造形チャンバ内は脱気後、高純度アルゴン雰囲気（600Pa）とした。

3.3 実験結果および考察

まず、レーザパラメータが表面粗さに与える影響を評価するため、レーザパラメータを変更しつつ1層のみを造形し、レーザ顕微鏡（OLYMPUS, OLS-4000）による表面粗さ測定を行った。1層造形体の表面粗さ測定結果を、式（1）に示すエネルギー密度 E_p [J/mm²]でまとめたものが図9である。

$$E_p = P / (s \cdot v) \dots\dots\dots (1)$$

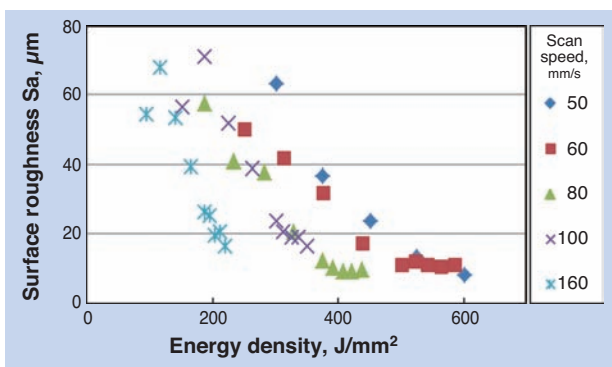


図9 一層造形体における表面粗さとエネルギー密度の関係
Surface roughness of single layers in function of volumetric laser energy density

エネルギー密度は単位面積あたりへのエネルギー投入量であり、 P [W] はレーザ出力、 s [mm] は走査間隔、 v [mm/s]は走査速度を表している。エネルギー密度の増加に従って表面粗さは低減しており、また、表面粗さ $Sa=10\mu$ m程度で収束している。熔融金属の表面張力は温度が上昇する程に減少することが報告されており²³⁾、エネルギー密度の上昇に伴い、熔融部がより高温となるほど基板上で濡れ性が向上し、表面は滑らかな層が形成されたと考えられる。

次に、積層造形実験を行った。造形体の形状は引張試験片形状（14B号試験片）とした。造形パラメータとしては、前節の1層造形実験において表面粗さが最も小さな条件である260W、80mm/sを用いた。一部の造形体には焼鈍処理を施した。焼鈍は、700℃で2時間保持した後、炉冷することにより行った。得られた造形体の断面画像を図10に示す。ほぼ空隙のない相対密度99.8%の高密度造形体である。図11にその腐食組織を示す。レーザ造形により針状マルテンサイトが生成していることが確認できる。また同組織が積層方向に対し垂直に粗大成長しているエピタキシャル成長も確認された。このような組織構造は焼鈍処理の前後でも変化はなかった。

高密度造形体の引張試験結果を図12に示す。チタン合金のJIS 60種の規格においては、引張強度・伸びは895MPa、10%と規定されている。レーザ造形体の引張強度は規格より十分に高い値を示している。伸びは低い値を示しているものの、焼鈍処理により向上し、一部のサンプルでは10%を越えるものも存在



図10 Ti積層造形体の断面組織
Cross sectional microstructure of laser formed Ti compact

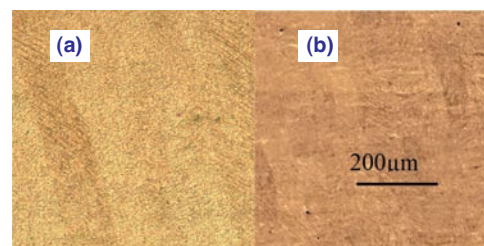


図11 Ti積層造形体の腐食組織
(a)造形のまま (b) 熱処理後
Etched microstructures of laser formed Ti compacts
(a) As – formed (b) After heat treatment

した。積層造形時に造形体表面はレーザー走査によって溶融固化を繰り返すため、造形体内部に残留応力が発生する。この残留応力が伸びの低下を招いた原因の一つと考えられ、焼鈍処理を施すことで残留応力の除去により伸びは上昇し、JIS規格に近い値を示したものと思われる。

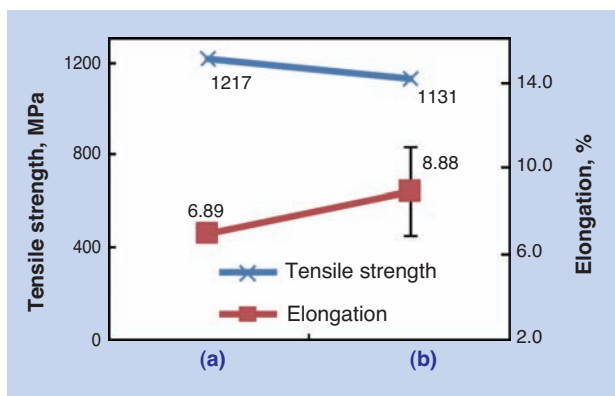


図12 Ti積層造形体の引張特性
(a) 造形のまま (b) 熱処理後
Tensile properties of laser formed Ti compacts
(a) As - formed (b) After heat treatment

次に、動的機械特性も評価した。電気油圧サーボ試験機を用いて繰返し速度30Hz、応力比 $R = 0.1$ の片振り引張疲労試験を行った。疲労試験結果を図13に示す。縦軸は片振り疲労強度（応力振幅の2倍）として表示してある。引張試験結果から推測される疲労強度は600MPa以上であり、今回の疲労強度は260MPaと推測値と比べるとかなり低い値を示した。この原因の一つとして、高密度化されていても依然として小さな空隙が内部に残存しており、その影響が考えられたが、詳細については今後の検討課題としたい。

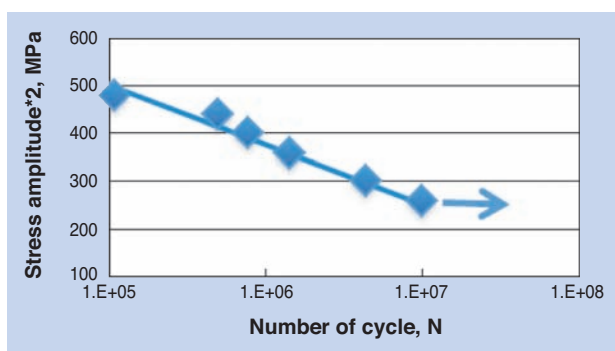


図13 Ti積層造形体（熱処理後）のS-N曲線
S-N curve of laser formed Ti compacts after heat treatment

均一に敷かれた金属粉末層に直線的にレーザー走査を行うと、図14に示すように金属粉末が溶融固化して1本の直線造形体を形成する。その際に造形体の周りに付着した粒状の残留物が発生する。残留物の直径をまとめたグラフを図15に示す。レーザー出力の増加に伴い残留物の直径は小さくなるとともに、微細粉末を用いることで半減していることがわかる。図16に積層造形体の側面粗さを示す。微細粉末を用いた造形体では60%程度の粗さの改善が確認された。微細粉末を用いることによって同じ造形パラメータにおいても側面性状が変化することが確認されたが、微細な粉末は均一な粉末薄層の安定供給が困難になるという問題が生じるため、側面精度の向上には更なる検討が必要である。



図14 1ライン走査後の概観
Appearance of a laser formed line

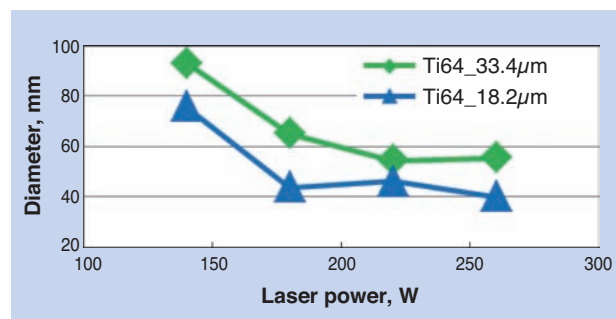


図15 付着粒子の直径
Diameter of adhered particles

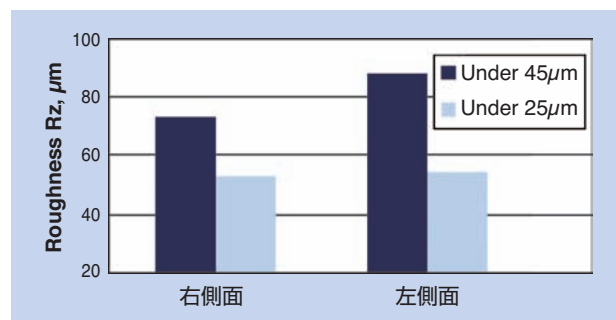


図16 粒度の異なる粉末を用いたTi積層造形体の側面粗さ
Side surface roughness of laser formed Ti compacts using different Ti particle powders

4. おわりに

新しい粉体加工法として、金属粉末射出成形 (MIM) 法ならびにレーザによる粉末積層3Dプリンティングについて我々の研究より紹介させて頂いたが、前者のMIMは既に工業的には有用な加工法として認知されている。ただ、脱バインダ工程時の自重変形や工程の長時間化などにより大形の製品化はまだまだ困難であり、これらが克服されればその適用範囲も大いに拡大するものと期待される。

一方、金属粉末積層3Dプリンティングに関しては未だ途に着いたばかりであり、外形・内部ともに複雑な構造物を造形できることを特徴とするが、粉末を溶解積層することから、特に側面部の面粗さならびに全体の寸法精度を上げる必要がある。なお、量産化に関する問題もあるが、ものづくりの観点からはユニークで最も注目を浴びているところであり、今後の発展を期待したい。

参考・引用文献

- 1) R.M.German著,三浦秀士ほか共訳: 粉末冶金の科学, 内田老鶴圃 (1996).
- 2) 岡村和夫ほか, プラスチック成形技術, 27 (1996) 235.
- 3) D. Weinandほか, プラスチック成形技術, 13 (1996) 19.
- 4) C. Quichand : Proc. of Powder Met. World Congress, EPMA, 2 (1996) 1101.
- 5) 三浦秀士ほか, 粉体および粉末冶金, 40 (1993) 393.
- 6) 三浦秀士ほか, 粉体および粉末冶金, 42 (1995) 353.
- 7) 三浦秀士ほか, 粉体および粉末冶金, 41 (1994) 1071.
- 8) 馬場剛治ほか, 粉体および粉末冶金, 42 (1995) 1119.
- 9) 三浦秀士ほか, 粉体および粉末冶金, 40 (1993) 988.
- 10) 三浦秀士ほか, 粉体および粉末冶金, 42 (1995) 378.
- 11) H. Miura, M. Matsuda, Material Transactions, 43 (2002) 343.
- 12) Materials Standards for PM Structural Parts, 2009 Edition, MPIF, Princeton, NJ, (2009) 48-49.
- 13) Materials Standards for Metal Injection Molded Parts, 2007 Edition, MPIF, Princeton, NJ, (2007) 16-17.
- 14) Metals Handbook, 10th ed., 1, ASM Int., Materials Park, OH, (1990) 430-448 and 793-800.
- 15) W. Harun, H.Miura et al, J. Japan Soc. Pow. & Pow. Met., 59 (2012) 677.
- 16) 今村正人, 粉体および粉末冶金, 48 (2001) 415.
- 17) 三浦秀士ほか, 粉体および粉末冶金, 53 (2006) 740.
- 18) 三浦秀士ほか, 粉体および粉末冶金, 54 (2007) 707.
- 19) 三浦秀士ほか, 粉体および粉末冶金, 55 (2008) 738.
- 20) H. Miura, et al, Proceedings of the MPIF/APMI International Conference on Powder Metallurgy & Particulate Materials (CD-ROM), (2009) 708.
- 21) H.Miura, et al, Materials Science Forum, 654-656, (2010) 2057.
- 22) H. Miura, et al, Proceedings of the 2012 Powder Metallurgy World Congress & Exhibition(CD-ROM), (2012).
- 23) 笹間昭夫ほか: 日本金属学会誌, 40 (1976) 1030.

〈著者紹介〉

三浦 秀 士 (みうら ひでし)

九州大学大学院教授 工学博士 工学研究院機械工学部門

1977年	九州大学大学院工学研究科鉄鋼冶金学専攻 (修士課程) 修了, 助手
1985年	工学博士 (九州大学) 取得, 熊本大学工学部材料開発工学科 助教授
1992年—1993年	米国レンセラー工科大学 招聘研究員
1995年	熊本大学工学部 知能生産システム工学科 教授
2004年	九州大学大学院工学研究院 機械工学部門 教授
2011年	九州大学工学府ものづくり工学教育研究センター長 現在に至る

【専門分野】

材料加工, 粉末冶金, 金属粉末射出成形, レーザ粉末積層3Dプリンティング

【主な学会等の活動】

(社) 粉体粉末冶金協会: 理事 (平8~26), 副会長 (平15~22), 会長 (平24~26), 顧問 (平26~)

(社) 日本金属学会: 第V分科会, 幹事 (平7,8), 副委員長 (平9,10), 委員長 (平11,12)

(社) 日本鉄鋼協会: 部会運営委員 (粉粒体フォーラム委員長) (平10~24),

創形創質副部会長 (平24~26), 部会長・理事 (平成26~28)

アメリカ粉末冶金学会: 粉末射出成形国際シンポジウム組織委員 (平7,8,10~)

P/M Sci. & Tech. Briefs編集査読委員 (平11~17)

国際会議プログラム委員 (平16~)

(社) 日本機械学会: 機械材料・材料加工部門, 81期運営委員 (第2技術委員長) (平15~16), 副部門長 (平17~18), 部門長 (平18~19), フェロー (平成22~)

(社) 日本塑性加工学会: 理事・出版事業委員会委員長 (平19~21), 九州支部長 (平22~24)

その他, 上記学会の講演大会実行委員長, 雑誌編集・査読委員, 各賞選考委員, 代議員, 評議員, 粉末冶金世界会議のプログラム委員, 組織委員, Chair

新幹線とともに50年、 「もの造り」への挑戦は続く。

1964年の東海道新幹線開業から50年。NTNのベアリング(軸受)は、0系からN700Aまで歴代新幹線に採用され、その進化を支えてきました。たとえば車軸用軸受。初代0系に対して、最新のN700Aでは重量で約70%、体積で約60%も軽量・コンパクト化が図られ、車両の軽量化と高速化に大きく貢献しています。新幹線がより早く、より安全に、より快適な乗り心地へと大きく進化するために、私たちの「もの造り」への挑戦は続きます。



車軸用軸受

初代
0系新幹線用
車軸転がり軸受

※1

最新型
N700A新幹線用
車軸転がり軸受

※1

▲ 重量約70%ダウン

■ 体積約60%ダウン

「第1回トライボロジー遺産」認定 ※2

※1 ハウジング(軸受箱)に軸受を収めた状態のカット写真です。 ※2 日本トライボロジー学会が、我が国の科学と技術の発展の歴史に貢献した技術・事象を認定。

祝 東海道新幹線開業50周年

NTN
www.ntn.co.jp

成長市場に向けた樹脂・焼結金属・磁性材料の複合化技術と商品紹介

Product Introduction and Complex Technology of Resin, Sintered Metal and Magnet for Growth Markets

沖 芳郎* Yoshio OKI



NTN複合材料商品事業部では、樹脂材料、焼結金属、磁性材料、流体動圧技術など、幅広い材料・技術によって、軸受や機械部品、ユニット・モジュール商品を開発している。また、多様化する市場ニーズに対応するため、トライボロジー、軸受材料、精密加工、及び磁性材料を応用し、それぞれの技術の融合及び、材料を複合化することで、新たな材料の特性を創造しながら将来市場の開拓に取り組んでいる。本稿では、成長市場に向けた複合材料の開発商品について紹介する。

NTN Composite Material Products Division has developed the mechanical parts and bearings, and the unit module products by a wide range of materials and technology such as resin material, sintered metal, magnetic material and fluid dynamic pressure technology.

In order to meet the market to be diversified, NTN is working to develop the future markets while creating new material properties by promoting fusion of each technology and Composite Materials which are applying tribology, bearing material, high-precision processing technology and magnetic materials.

This paper reports the Developed Products of Composite Products for the further growth markets.

1. はじめに

NTNの複合材料事業は、流体動圧技術とNTN精密樹脂(株)、NTN特殊合金(株)、日本科学冶金(株)の各関係会社が保有する技術を結集かつ融合させ、自動車、産業機械分野で使用されるユニット・モジュール商品の開発に取り組んでいる。特に、成長市場である電気自動車、エネルギーなどに目を向け、具体的には以下のように活動している。

- 1) 要素部品だけでなく、樹脂や焼結金属の組み合わせによる、独自のユニット商品の開発や提案
- 2) 転がり軸受の代替となる軽量でコンパクトなすべり軸受の開発
- 3) 高強度が求められる機械部品の焼結化
- 4) 磁性材料技術を応用した、産業機械及び自動車分野への商品展開
- 5) アモルファス磁性材料をはじめ、オンリーワン技術を成長市場分野へ提案

2. 複合材料商品事業部の商品群と生産体制

NTNの複合材料商品には、主に樹脂材料、焼結金属及び磁性材料の商品がある。これらの商品は図1に示す関係会社4社で生産している。NTNグループ各社が開発した主な開発商品について、3項以降に紹介するとともに、別稿でも各種の技術・商品について掲載している。

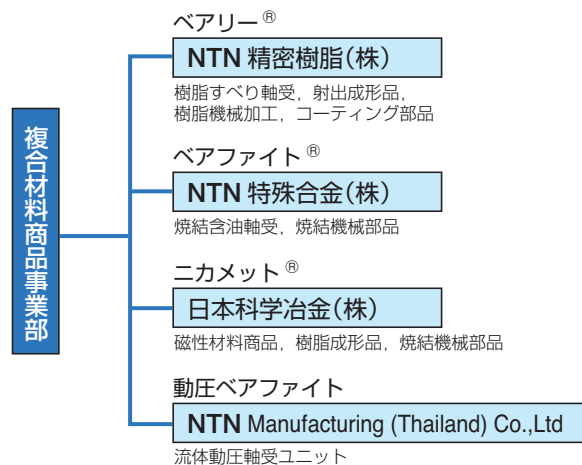


図1 複合材料商品事業部の商品群と生産体制
Products and production system of composite material products

*複合材料商品事業部

3. 樹脂材料商品

樹脂部品は設計の自由度が高く、軽量・コンパクト化が図れるほか、耐食性が良く安価であるため様々な分野で金属部品代替が進んでいる。NTNでは樹脂の材料開発、設計を行い、樹脂の特長を活かした製品の高機能化に取り組むとともに、金属との複合化により、耐荷重性のさらなる向上を図っている。以下に、最近の樹脂商品を紹介する。

(1) 電動ウォーターポンプ用樹脂すべり軸受¹⁾

CO₂排出量削減に向け、電気自動車、ハイブリッド車が増加している。従来の内燃機関を動力とした自動車では、エンジンを冷却するラジエータ水の循環に遠心ポンプが搭載されており、エンジンの回転を、ベルトを介してポンプ主軸に入力しポンプを稼働させている。一方、電気自動車ではエンジンがなく、ハイブリッド車等ではアイドリングストップ時にエンジンが停止するため、インバーターあるいはエンジン冷却系統に電動ポンプが必要となる。この電動ウォーターポンプは高効率、コンパクトであるマグネットドライブ式の遠心ポンプが主流となっている。

マグネットドライブ式遠心ポンプの構造を図2に示す。モータ軸に取り付けたマグネットが回転し、磁力によりケーシング中のマグネットと一体化したインペラ（羽根車）を回転させることで、不凍液などの液体を移送する構造となっている。インペラ中央の軸受には図3のようなポリフェニレンサルファイド（PPS）樹脂に特殊充填剤を配合したベアリーAS5704を使用しており、運転時に発生するラジアル及びアキシャル荷重を、それぞれ軸受内径と固定軸、軸受端面とスラスト受がしゅう接する。

【特長】

- ① 水中での摩耗量が汎用PPS樹脂すべり軸受の1/5以下
- ② ステンレス鋼などの相手材の摩耗損傷が少ない
- ③ 射出成形品のため、設計の自由度が大きい
- ④ 不凍液、酸・アルカリ液中でも使用可能

液中で使用される代表的なすべり軸受の性能比較を表1に示す。カーボン製軸受は液中での耐摩耗性に優れているが、成形素材からの機械加工品となるため、形状の自由度が低く、衝撃による割れ強度及びコスト面で課題がある。ベアリーAS5704製軸受はPPS樹

脂を基材としているため、自己潤滑性、耐薬品性に優れるとともに、射出成形が可能で形状を含めた設計の自由度が高い。射出成形の際に軸受の内径面や端面には潤滑溝を、軸受外径面にはインペラからの抜け止め（Dカット、突起など）を容易に設けることができ、機械加工なしでインペラと一体成形できる。

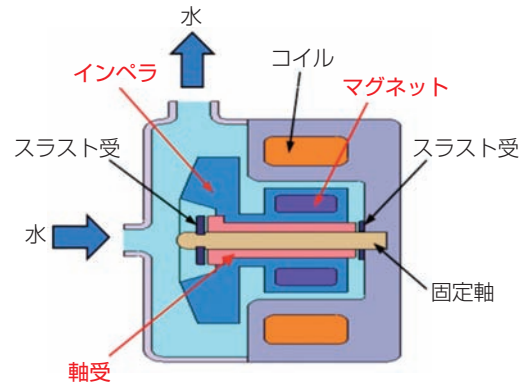


図2 マグネットドライブ式遠心ポンプの構造
Structure of magnet drive centrifugal pump



図3 電動ウォーターポンプ用樹脂すべり軸受
(ベアリーAS5704)
Plastic sliding bearings for electric water pump
(BEAREE AS5704)

表1 各種軸受の性能比較
Comparison of features various bearings

軸受の種類	ベアリーAS5704	カーボン	フェノール樹脂(黒鉛配合)	PTFE樹脂(黒鉛配合)
加工方法	射出成形	機械加工	射出・圧縮成形	機械加工
耐摩耗性(水中)	◎	○	△	×
耐薬品性	◎	◎	△	◎
吸水寸法安定性	○	×	△	○
衝撃による割れ	○	×	×	○
衝撃時の変形	○	○	○	×
設計の自由度	◎	×	○	×
価格	◎	×	○	×

◎ 優 ○ 良 △ 可 × 不可

ベアラーAS5704とガラス繊維，炭素繊維，PTFE樹脂を配合したPPS樹脂材の比摩耗量を図4に示す．AS5704はPPS樹脂に特殊充填剤を配合するため，他のPPS材と比較し耐摩耗性に優れる．

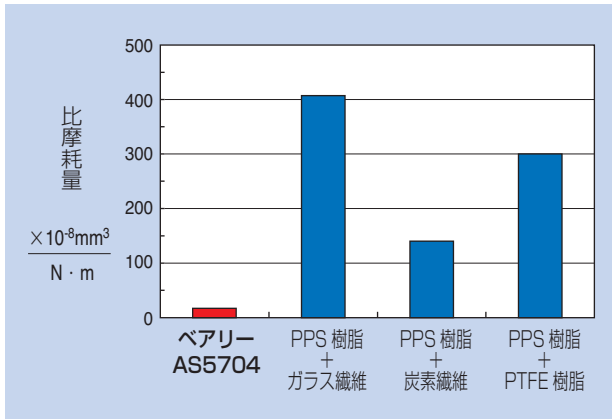


図4 PPS樹脂軸受の比摩耗量
Wear factor of PPS bearings

(2) 高負荷用樹脂すべりねじ²⁾

モータの回転運動を直進運動に変換する送りねじは，医療機器，食品機械などの搬送部に使用されている．送りねじにはボールねじ，樹脂すべりねじがある．表2にこれらの性能比較を示す．ボールねじは耐荷重性やねじ効率に優れるが，高価である．また，グリースで潤滑するため，グリースの飛散や高温での劣化が懸念される用途には適さない．一方，樹脂すべりねじは，耐荷重性は低いが，無潤滑で使用が可能であり，真空中や高温雰囲気などの幅広い環境に適用できるほか，安価で低騒音である．

NTN精密樹脂のすべりねじは，図5のようにPPS樹脂ナットとステンレスねじ軸で構成している．PPS樹脂は，固体潤滑剤を配合し摩擦摩耗特性を改良しているので，汎用の樹脂すべりねじと比較し，長寿命である．

しかし，近年生産現場のクリーン環境化の拡大と搬送能力の向上のため，NTNはこれまで低負荷の用途に限定的であった樹脂すべりねじに対し，高負荷用樹脂すべりねじを開発し提案している．図6に示す黄銅製ナットのねじ山表面にPPS樹脂すべり材を射出成形した複合ナットとし，放熱性を高め，負荷容量を向上させた．黄銅には特殊な表面処理を施し，樹脂との密着力を向上させている．複合化により耐荷重性が向上するとともに，耐久性も向上する．

高負荷用樹脂すべりねじは，従来の樹脂すべりねじと比較し許容アキシャル荷重が2倍，ナットの静的破壊荷重が9倍高い．また，高負荷条件における寿命は，樹脂すべりねじの3倍である．

【特長】

従来品比 (NTN樹脂すべりねじ)

- ① 許容アキシャル荷重 2倍
- ② ナットの静的破壊荷重 9倍
- ③ 摩耗量 1/3

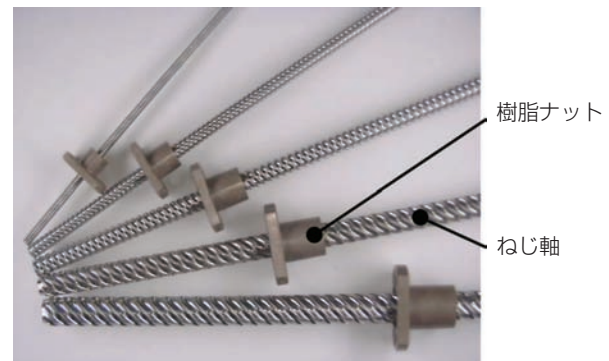


図5 樹脂すべりねじ
Plastic sliding screws

表2 各種送りねじの性能比較
Comparison of features various sliding screws

項目	ボールねじ	樹脂すべりねじ	高負荷用樹脂すべりねじ
潤滑	要 (グリース)	不要 (潤滑有でも可)	不要 (潤滑有でも可)
耐荷重性	◎	△	○
ねじ効率	◎	△～○	○
騒音	△	○～◎	◎
耐熱性	△	△～○	○

◎ 優 ○ 良 △ 可

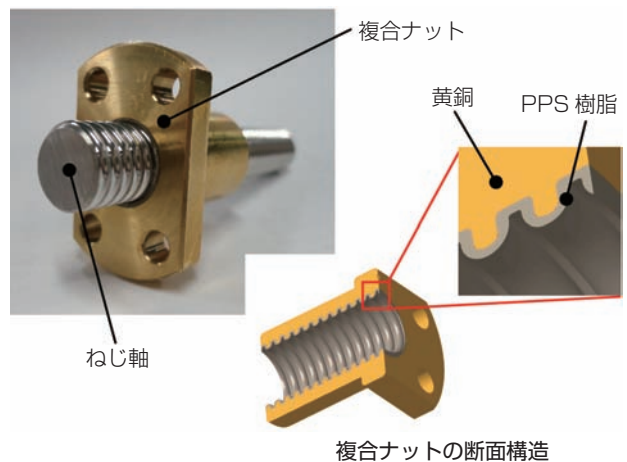


図6 高負荷用樹脂すべりねじ
Plastic composite sliding screws for high load

(3) ハイブリッドPEEK軸受²⁾

エアコン消費電力の大部分はコンプレッサーが占めており、省エネルギー化するために、高効率化が要求されている。コンプレッサーの構造及び軸受設置位置を図7に示す。軸受には摩擦摩耗特性の向上と耐焼付き性の向上（過圧縮にて液化した冷媒が、摩擦面から冷凍機油を流出させる場合があるため）が要求される。

このため、NTNは焼結合金とPEEK樹脂を複合化し、摩擦摩耗特性、耐焼付き性に優れたハイブリッドPEEK軸受を開発している。

ハイブリッドPEEK軸受の構造を図8に示す。本軸受は鋼板上の焼結中間層に含浸・焼成し製造する四ふっ化エチレン（PTFE）樹脂系巻きブッシュとは異なり、焼結合金ブッシュの内径にPEEK樹脂を厚さ0.5mmの薄さで射出成形している。PEEK樹脂は射出成形が可能で、耐熱性、耐摩耗性、耐油・耐薬品性、疲労特性に優れている。また、金属との複合化により、PEEK樹脂材料のみの軸受に比べ放熱性を飛躍的に向上させている。

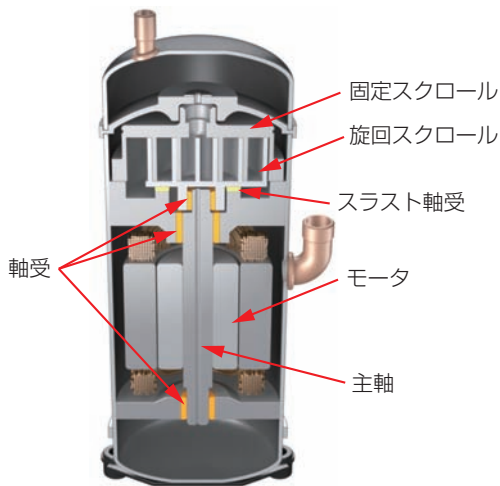


図7 エアコン・コンプレッサーの構造
Structure of air conditioner compressors

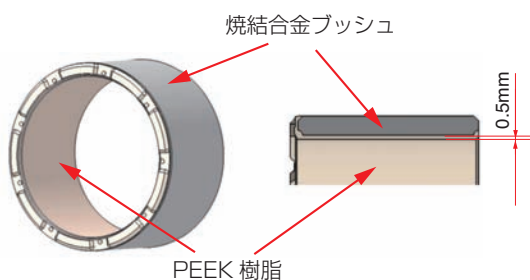


図8 ハイブリッドPEEK軸受の構造
Structure of hybrid PEEK sliding bearing

ハイブリッドPEEK軸受は従来のPTFE樹脂系巻きブッシュと比較し以下の特長がある。

【特長】

従来品比（PTFE樹脂系巻きブッシュ）

- ① 摩擦係数 2/3，摩耗量 1/3
- ② 耐焼付き性 5倍以上

4. 焼結金属商品

NTN特殊合金は、従来の焼結含油軸受の高機能化を図るとともに、自動車用途を中心とした高強度機械部品を開発している。自動車用途では、部品コスト削減の一つとして焼結製品の適用が増加しており、焼結市場の約60%を占め、車両1台あたり約9.2kgの焼結製品が使用されている。この拡大する市場に向けて開発した高強度焼結材及び各種焼結軸受の商品を紹介する。

(1) 高強度焼結材⁴⁾

自動車用途への焼結機械部品の適用はエンジンや駆動部分のほか、車載オイルポンプやスタータモータなどがある。図9に焼結ギヤの例を示す。また、図10に高強度焼結材のリング圧縮疲労強度の比較試験結果を示す。開発品の疲労強度は、従来品の約2.3倍の疲労限が得られている。今後、焼結機械部品には高強度化だけでなく、高精度化、複雑形状への対応なども必要であり、材料組成、製造方法、熱処理の最適化を図り、冷間鍛造品からの置換えを中心に用途展開している。

【特長】

- ① 真密度比 96%達成
- ② 疲労強度 従来比2.3倍
- ③ ヤング率 180GPa達成



図9 高強度焼結ギヤ
High strength sintered gear

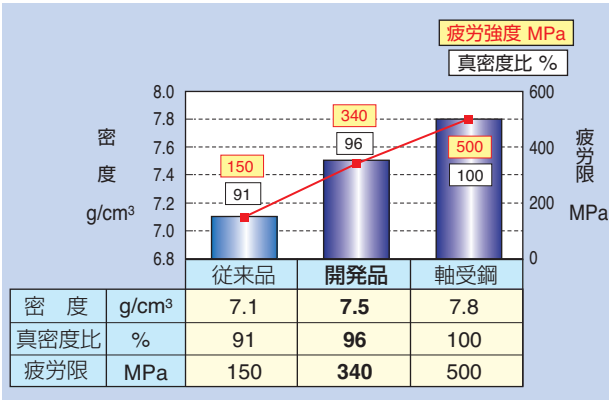


図10 リング圧縮疲労強度
Ring compressive fatigue strength

(2) 複層焼結含油軸受⁵⁾

新興市場をはじめ、各国でのインフラ整備の増加に伴い、油圧ショベルなどの建設機械の需要も高まっている。この油圧ショベルの関節部に使用される軸受は、給脂間隔の延長を目的として、焼結含油軸受の採用が増えている。また、過酷な使用条件から高強度も求められている。従来は、低密度で含油量を確保して給脂間隔を延長するとともに、熱処理を施して強度と硬度を向上させ、その後切削加工で軸受の寸法精度を確保する必要があった。

図11に示す複層焼結含油軸受は、内径面に摺動特性、耐摩耗性を有する材料、外径側に高強度にできる材料など、性質の異なる二種類の粉末を同時成形した軸受である。また、浸炭焼入れなどの熱処理や機械加工を省くことができ、大幅な工数削減も達成した。

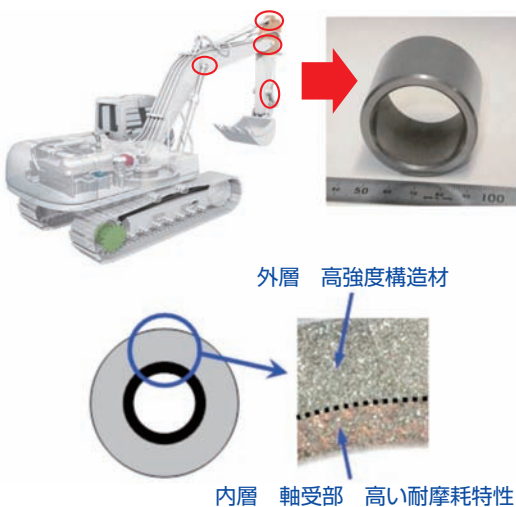


図11 建設機械関節部用複層焼結含油軸受
Multi-layer BEARPHITE for joints
of hydraulic excavators

【特長】

- ① 二種類の粉末材料を同時成形
- ② 内層と外層で異なる特性を有する

図12に本開発品及び従来品（本開発品の内層側の材料のみの軸受）との摩擦係数の比較データを示す。本製品は、内層部のみを高い耐摩耗性を有する材料にしているが、全体を同材料とした従来品と同等の摩擦特性を有する。

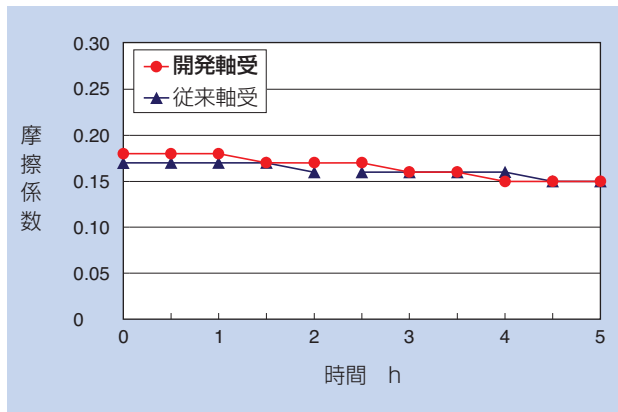


図12 摩擦係数測定結果
Friction coefficient measurements

(3) 耐腐食性焼結軸受⁴⁾

燃料ポンプや排気ガス再循環装置（EGR）のバルブ用軸受には、燃料などに触れることから、高い耐腐食性が求められる。代表的な材料として白銅系材料があげられるが、レアメタルであるニッケルを多く含むため、レアメタルレスで耐腐食性に優れる軸受が求められている。このため、NTNは耐腐食性に優れるアルミニウム青銅に着目し、白銅系焼結軸受よりも耐腐食性、摺動特性に優れる耐腐食性軸受を開発している。図13に燃料ポンプ軸受用の例を示す。

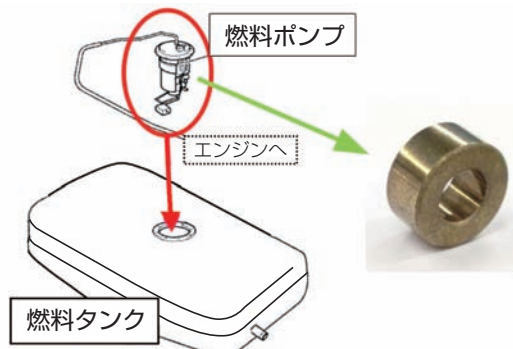


図13 燃料ポンプ用軸受
Sintered bearing for fuel pump

【特長】

- ① 白銅系材料と同等以上の耐腐食性
- ② レアメタルを使用せずに耐腐食性を向上
- ③ 白銅系材料に対して耐摩耗性の大幅な向上

有機酸と硫黄に対する耐腐食性の試験結果を表3に示す。各温度、各時間で、試験液中に試料を浸漬し、その前後の重量差を重量変化率として算出した。

<試験条件>

① 有機酸腐食試験

- ・試験液 有機酸濃度 2%
- ・温度 50℃
- ・試験時間 100h

② 硫化腐食試験

- ・試験液 硫黄300ppm添加ガソリン
- ・温度 80℃
- ・試験時間 300h

表3 耐腐食性試験結果
Result of anti-corrosion examination

	重量変化率 %	
	開発材	白銅系
① 耐有機酸腐食試験	0.14	0.15
② 耐硫化腐食試験	0.10	0.40

また、開発材及び白銅系を比較した場合、摩擦係数は同等、比摩耗量は白銅系の約1/10と良好な結果であった。

5. 磁性材料商品

日本科学冶金では機構部品から機能部品への転換を目的に、磁性材料商品を開発、販売拡大している⁶⁾。

本稿では特に独自技術を応用した成長市場向け商品について紹介する。

(1) 自動車用リアクトル⁷⁾

近年、普及しているハイブリッド車のモータ駆動は、専用のバッテリーを用いている。アクセルによる加減速では、燃料系駆動のエンジンと同等の動力特性を達成しているが、これを満足するには、専用のバッテリーの出力電圧を昇圧（増幅）する必要がある。

このため、装置回路部品には昇圧リアクトルが使用され、大電流・高周波に対応でき、かつ電費の関係か

ら小型化が要求される。現行のハイブリッド車には、圧縮製法によるFe-Si（鉄シリコン合金粉末）品が採用されている。また、電気自動車の高出力化に伴い、さらに大電流が印加される場合には、飽和磁束密度の高い圧縮製法によるFe（純鉄粉）品が検討されている。しかし、これらの材料は鉄損が非常に大きく、発熱も大きくなり、これを回避するため昇圧リアクトルが大型化する傾向にある。

図14に昇圧リアクトルのコア材料における性能比較を示す。上述した圧縮製法のFe-Si品及びFe品は鉄損が大きい。これに対し、日本科学冶金のアモルファス品は、鉄損が小さく、また、射出成形、圧縮成形で製造可能である。

特に開発した「ハイブリッドアモルファスコア」は、射出アモルファスコアと圧縮アモルファスコアを複合化したものである。図15にハイブリッドアモルファスコアの構造を示す。電力を磁力に変換する部分に、損失の小さい圧縮アモルファスを用いて低発熱化し、変換した磁力を再度コイル部まで運ぶための導通路に

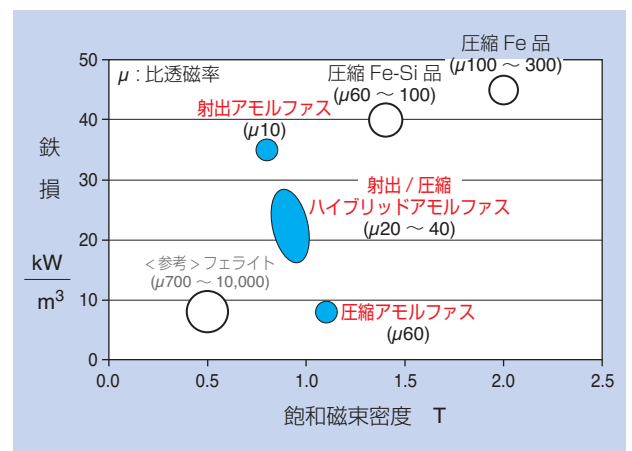


図14 各種コア材料の性能比較
Comparison of features various core material

圧縮アモルファスコア 射出アモルファスコア

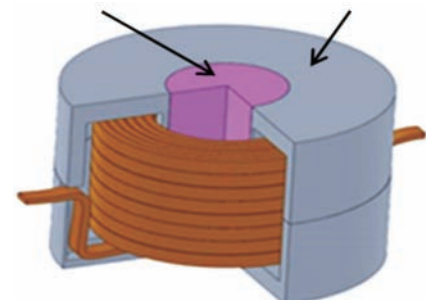


図15 ハイブリッドコアの構造
Structure of hybrid core

なる部分には形状自由度に優れる射出アモルファスを配置している。ハイブリッドコアの発熱状態の解析例を図16に示すが、それぞれのコアが適切に配置していることが分かる。また、ハイブリッドコアの性能について、射出及び圧縮のそれぞれのアモルファスコアとの比較を表4に示す。ハイブリッドコアはいずれの特性においても良好であり、圧縮アモルファスコアでは実現困難なポッド型コアを製造できる。

【特長】

- ① 大電流、高周波用途いずれにも対応可能
- ② 複合化による小型、低発熱化
- ③ 射出成形により、リアクトル形状設計に自由度付与

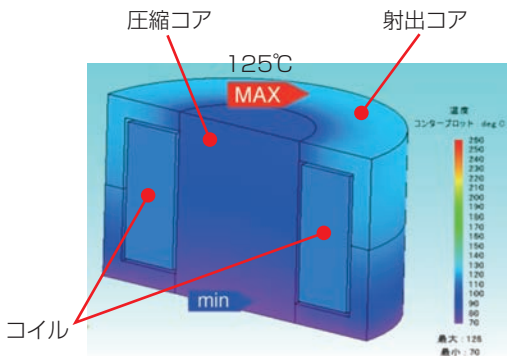


図16 ハイブリッドコアコアの発熱状態の解析結果
Temperature distribution analysis of hybrid core

表4 アモルファスコアの性能比較
Comparison of features various reactor core

	単独有芯コイル (従来品)		ハイブリッド有芯コイル (新規開発)
	圧縮コア	射出コア	ハイブリッドコア
大電流対応	△ (大形プレス必要)	○ (直流重量 良)	○
高周波対応 (底損失化)	○	△	○
小型化対応	○ (透磁率 高)	× (透磁率 低)	○
温度上昇抑制	○ (熱伝導性 良)	×	○
形状自由度	△ (CNCプレス必要)	○ (射出成形 可)	○

(2) 高精度複列磁気エンコーダ

産業機械用ロボットには高い位置決め精度が必要なため、高分解能な絶対角センサを使用しており、このセンシングには高精度なエンコーダが求められる。

開発した高精度複列磁気エンコーダを紹介する。開発品の構造を図17に示す。圧縮成形した鉄系軟磁性材の芯金に硬磁性材料を射出成形している。本図はアキシャルタイプの複列エンコーダであるが、内周側と外周側で異なる極数のパターンを高精度に着磁している。開発品の特長は以下の通りである。

【特長】

- ① 対角検出に対応
- ② 角度精度 ±0.2°
- ③ 中空構造対応

また、開発した高精度複列磁気エンコーダを用いた絶対角計測の方法を図18に示す。内側と外側の着磁面に、それぞれ対向する2つのセンサが、信号を検出する。このとき、ノギスの原理やバーニア原理と呼ばれる2つの磁気パターンのずれ（位相差）を演算し、高精度な絶対角度を得ることができる。

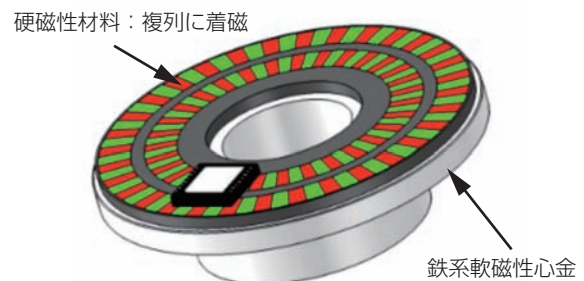


図17 高精度複列磁気エンコーダの構造
Structure of dual-track magnetic encoder

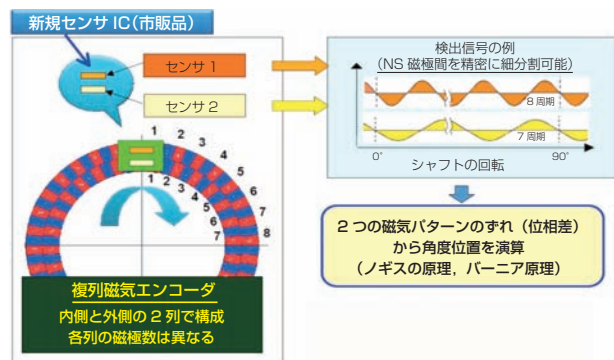


図18 絶対角測定
Absolute angle measurement system

(3) MRI用チョークコイル⁶⁾

図19に示すMRIは、医療現場において、人体の断面を大きな磁力を用いて観察する医療機器であり、この設備に組み込まれるチョークコイルは検査時の傾斜磁場形成のための大電流を発生させるための電子部品である。

開発したチョークコイルに用いる各部品を図20に示す。絶縁ケースで覆ったコイルを射出アモルファスコアに組み込んで、図21に示すチョークコイルを構成している。

この開発商品に使用しているアモルファス軟磁性材と、一般に用いられているフェライト及び鉄-シリコ

ン (Fe-6.5Si) の軟磁性材料について、印加電流をスイープさせた場合の磁場発生能力の尺度であるインダクタンス変化率 (直流重畳特性) を図22に示す。

また、微弱電流を印加した場合のインダクタンスの周波数特性を図23に示す。これらの特性から、以下の特長が挙げられ、大電流かつ安定した高周波特性が要求される本用途に好適である。

【特長】

- ① 従来からのフェライト及びFe-6.5Siに比べ、大電流を流してもインダクタンス変化率は小さい。
- ② フェライトに比べ高周波領域でのインダクタンスの変化率は小さい。



図19 医療用MRI
Medical magnetic resonance imaging



a) コイル b) ケース c) 射出アモルファス

図20 チョークコイル部品
Parts of choke coil



図21 MRI電源用チョークコイル (カットサンプル)
Choke coil for MRI power supply

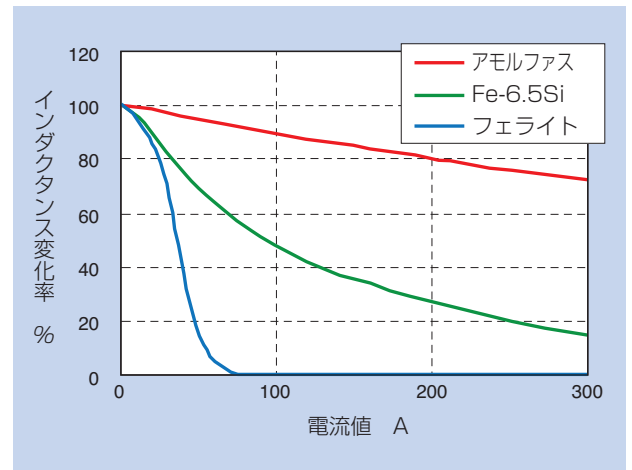


図22 直流重畳特性
DC bias characteristics

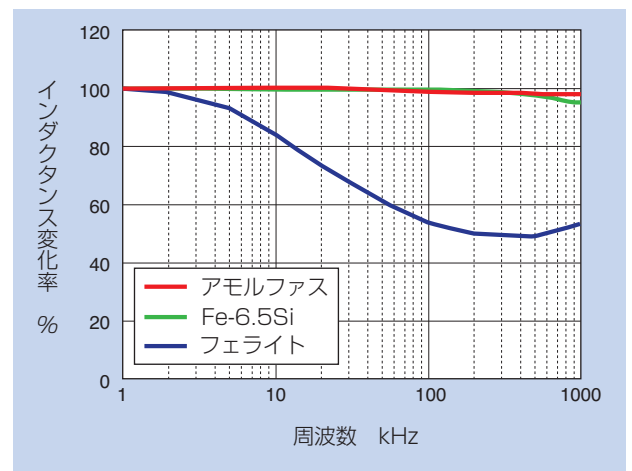


図23 周波数特性
Frequency characteristics

6. おわりに

本稿では成長市場に向けた複合材料の新商品を中心に紹介した。

自動車の低燃費化や電動化に伴い、部品開発では軽量化が注目され複合材料商品の適用が拡大している。また産業機械分野では、医療機器、食品機械、ロボットなど多岐にわたる分野で、顧客での開発に貢献できるように、新商品を提案している。

NTNは常に成長市場の動向に応えながら、幅広い材料・技術の融合で積極的な商品開発を行い、これらの市場に貢献していく所存である。

参考文献

- 1) 伊藤紀男, 石井卓哉: 次世代電池向け電動ポンプ用樹脂すべり軸受, NTN TECHNICAL REVIEW, No.77 (2009) 49-53.
- 2) 石井卓哉, 姫野芳英: 金属との複合化による樹脂軸受の機能向上, 成形加工, 25巻2号, 73, 2013
- 3) 石井卓哉, 安田健: ハイブリッドPEEK軸受, NTN TECHNICAL REVIEW, No.79 (2011) 125-129.
- 4) 山下智典, 園崎智和: 自動車用焼結部品の新商品紹介, NTN TECHNICAL REVIEW, No.81 (2013) 74-76.
- 5) 須貝洋介, 毛利敏彦: 複層焼結含油軸受, NTN TECHNICAL REVIEW, No.80 (2012) 83-86.
- 6) 原野拓治, 宮崎真二, 島津英一郎: 磁性材料商品の紹介, NTN TECHNICAL REVIEW, No.80 (2012) 87-91.
- 7) 小田貴之, 宮崎真二, 勝浦肇: HEV昇圧装置用リアクトルコア, NTN TECHNICAL REVIEW, No.81 (2013) 46-51.

執筆者近影



沖 芳郎

複合材料商品事業部

焼結機械部品の高強度化 The Improvement of Strength of Sintered Machine Parts

奥野 孝洋* Takahiro OKUNO
八代 尚樹* Naoki YASHIRO



現在、焼結機械部品は様々な分野で使用されており、特に自動車分野への採用が拡大している。焼結機械部品の適用分野拡大のためには、機械的性質の向上が不可欠であるが、焼結体中に含まれる空孔が強度低下の原因となっており、焼結体中の空孔低減、すなわち焼結体の高密度化を図る種々の試みがなされている。本稿では、焼結機械部品の製造工程における高密度化・高強度化の方法および高密度焼結機械部品の機械的性質について紹介する。

Sintered machine parts are used in many industrial fields. Especially, these are widely used for automotive parts. It is essential for the increasing use to improve mechanical properties of sintered parts. However, the pores in the sintered body are dominant factor for the strength of sintered parts. Therefore, various kinds of trial to decrease pores in the sintered body, or to increase sintered density were reported.

This article introduces the method of improvement of density and strength, and the mechanical properties of high-density sintered machine parts.

1. はじめに

焼結機械部品は、複雑形状の製品を安価にかつ大量に生産できることから、様々な分野に採用されている。国内の2013年の焼結機械部品の生産量は約9万トンに上り、そのうちの90%以上は輸送機械用途である。特に、近年は自動車分野で積極的に採用されており、自動車一台当たり9.0kg使用され、その50%以上がエンジン向けである¹⁾。

焼結機械部品の適用分野をさらに拡大するためには、その機械的性質の向上が不可欠である。しかしながら、焼結体中には空孔が含まれるので、一般的な焼結機械部品は溶製鋼部品よりも強度が低い。そこで焼結体中の空孔低減、つまり高密度化することで機械的性質の向上を図る手段が試みられている。

本稿では材料、圧粉成形、加工などにおける、焼結機械部品の高密度・高強度化の方法および、それらの機械的性質について紹介する。

2. 焼結合金鋼

焼結合金鋼は焼結機械部品に多く使用されている²⁾。焼結合金鋼の粉末は、粒径がおおよそ300 μ m以下で、鉄 (Fe)のほかに銅 (Cu)、ニッケル (Ni)、クロム (Cr)、モリブデン (Mo)などの合金元素が添加されており、ISOに準拠したJIS Z 2550にその化学成分が規定されている。その内容は溶製鋼とは異なっており、例えば溶製鋼で不純物として扱われるCuは、焼結合金鋼では低温での焼結性向上あるいは、しゅう動特性向上の目的で積極的に利用されている。また、炭素 (C)は黒鉛粉末として添加し、焼結時に鉄中に固溶させる。これは、粉末の時点で鉄中に固溶させてしまうと粉末が硬くなり、成形性が著しく悪化するのを回避するためである。材料メーカーは規格外の独自粉末の開発も行っており、使用する目的に応じて最適な材料を選定できる。

ベースとなる金属粉は、各添加元素を混合した混合粉、添加元素を予め合金化により均質化させた完全合金粉もしくは、圧縮性を損なわない添加元素を予め合金化させたうえで、残りの添加元素を熱拡散により拡散接合させた拡散合金粉のいずれかを用いる。

*先端技術研究所

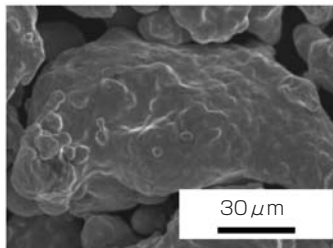
代表的な焼結合金鋼の金属粉の分類を表1に、完全合金粉と拡散合金粉の特徴を表2に、電子顕微鏡写真を図1に示す。以下に機械部品に用いられる代表的な焼結合金鋼を紹介する。

表1 代表的な焼結合金鋼の金属粉の分類
The classification of metal powder of typical sintered alloy steel

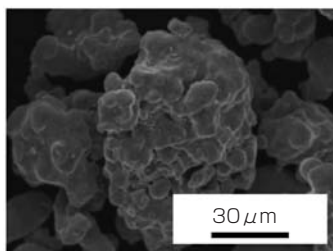
粉末の種類	焼結合金鋼
混合粉	Fe-Cu-C系
完全合金粉	Fe-Ni-Mo-C系 Fe-Cr-Mo-C系
拡散合金粉	Fe-Ni-Mo-C系 Fe-Cu-Ni-Mo-C系

表2 完全合金粉と拡散合金粉の特徴
Feature of completely alloyed powder and diffusion-alloyed powder

	完全合金粉	拡散合金粉
粉末の均質性	高い	低い
成形時の圧縮性	低い	高い



(a) 完全合金粉



(b) 拡散合金粉

図1 完全合金粉と拡散合金粉の電子顕微鏡写真
SEM micrographs of completely alloyed powder and diffusion-alloyed powder

2.1 Fe-Cu-C系

Fe-Cu-C系は、機械部品用の焼結材料として広く用いられている材料である。Cuは融点が1085℃であり、焼結合金鋼の一般的な焼結条件において融解する。そのため、Cuが鉄粒子間に液相として存在し、焼結が促進すると同時に合金化する。これにより、高強度化が図られている。またCuはFe粉末と混合して焼結すると体積膨張することが知られている³⁾。一般的な焼結では体積収縮するので、寸法変化を制御するために用いられることもある。純鉄粉を純銅粉あるいは黒鉛などと混合した混合粉で用いられることが多い。

2.2 Fe-Ni-Mo-C系

Fe-Ni-Mo-C系は、焼結後に種々の焼入れ焼戻しを施すことで高強度焼結体が得られる材料である。また、表面硬化処理を施すことで、高強度だけでなく耐摩耗性を得ることができる。Niによる鋼の靱性向上効果も期待できる。完全合金粉もしくは拡散合金粉で用いられることが多い。

2.3 Fe-Cu-Ni-Mo-C系

上記二つの材料の特長を足し合わせたFe-Cu-Ni-Mo-C系は、Cu、Ni、Moなどの微粉末を純鉄粉に拡散接合させている。高い圧縮性と高い機械的性質の両立が図られ、現在、高強度焼結体材料として幅広く採用されている。

2.4 Fe-Cr-Mo-C系

合金元素としてのCrは、溶製鋼では機械構造部品として一般的に用いられている⁴⁾。一方、焼結材料として使用する場合、酸素との親和力が高いために粉末製造時に酸素含有量を低減することが困難で、成形時の圧縮性が得られにくく高密度化できないという難点がある。しかしながら、近年の材料メーカーの技術進歩により、酸素含有量の低い粉末が開発されており、圧縮性は改善されつつある。上記の酸素との親和力の関係から、Fe-Cr-Mo-C系は完全合金粉で用いられる。

3. 高密度・高強度化の方法

高密度焼結体を得るには、成形時、焼結時、焼結後の各工程で高密度化する方法がある。各工程における高密度化方法を表3に示す。

表3 製造工程における高密度化の方法
The method of densification at the production process

工程	方法
成形時	温間成形 金型潤滑温間成形 など
焼結時	2回成形2回焼結 溶浸 など
焼結後	焼結鍛造 など

3.1 温間成形

温間成形は、金属粉を成形する際、粉末と金型を80~300℃に加熱し、加熱により金属粉の降伏強さが低下して圧縮性が増すことで、高密度圧粉体を得る方法である⁵⁾。

後述する2回成形2回焼結法、焼結鍛造法と比較して低コストなため、自動車エンジンのスプロケットなどに採用されている⁶⁾。

3.2 金型潤滑温間成形

通常、金属粉を成形するには、金属粉と金型との摩擦を低減させるためにZn、Caなどの金属せっけんあるいは、樹脂系の潤滑剤を添加・混合しているが、潤滑剤は焼結時に消失するので密度向上の阻害要因になる。上記温間成形法に加え、潤滑剤を金型に予め塗布することで潤滑剤添加量を低減させ、高密度圧粉体を得る方法が金型潤滑温間成形法である⁷⁾。温間成形法を超える高密度焼結体を得ることができるため、ハイブリッド自動車のリアクトルなどに採用されている⁸⁾。

3.3 2回成形2回焼結

2P2S (2Press-2Sinter)とも呼ばれる方法である。まず金属粉を所定の成形圧力で成形し、1000℃以下の比較的低い温度で仮焼結した後、再度所定の圧力で成形を行い、仮焼結よりも高い温度で本焼結を行うことで高密度焼結体を得る方法である。強度が必要な自動車トランスミッションのシンクロハブなどに採用されている⁹⁾。

3.4 溶浸

溶浸は、焼結体の表面から内部に連通している空孔に対し、溶融した低融点材料を、毛細管現象を利用して焼結体内部に浸透させ、空孔を閉塞させる方法である¹⁰⁾。具体的には、焼結体と低融点材料圧粉体を接触させ、低融点材料圧粉体の融点以上、焼結体の融点以下の温度に加熱して溶浸させる。焼結体中の空孔を閉塞させることが可能なので、コンプレッサ部品あるいは油圧耐圧部品など高い気密性を要求される箇所に採用されている。

3.5 焼結鍛造

焼結鍛造は、金属粉を成形、焼結した後、高温の焼結体を成形金型に挿入し、密閉鍛造して粗形材を得る方法である¹⁰⁾。粗形材に近い形状の焼結体を熱間鍛造する、一般の鍛造のような方法も取られている。真密度に近い値を得ることができることから、自動車エンジンのコンロッドなどに採用されている。

4. 高密度焼結機械部品の開発

NTNでは、様々な用途への適用の可能性がある高密度焼結機械部品の開発に取り組んでいる。以下に、開発材の機械的性質の一例を示す。

4.1 試験片作製方法

FeにNiとMoを拡散接合させた拡散合金粉に、所定量の黒鉛を添加したFe-Ni-Mo-C系材料に潤滑剤を混合した後、フローティングダイ法により外径23.2mm×内径16.4mm×高さ7mmのリング形状試験片を、80℃の温間成形で作製した。次に、圧粉体をN₂、H₂混合雰囲気中にて焼結し、その後、浸炭焼入れ焼戻しを施した。また、従来の高密度焼結体として、Fe-Cu-Ni-Mo-C系材料を比較材として準備した。

4.2 機械的性質

焼結密度および圧環強さを図2に示す。開発材は焼結密度が7.63g/cm³であり、真密度7.8g/cm³に対する比で約97%を示した。圧環強さは2180MPaであり、比較材の1630MPaより30%以上の強度向上を示した。焼結体の断面観察写真を図3に示す。開発材の内部空孔が非常に小さく、かつ少なくなっていることが確認できる。

高密度焼結体の疲労特性をリング圧縮疲労試験で評価した。リング圧縮疲労試験は、リング外径面に繰返し圧縮荷重を負荷し荷重方向の内径面に引張応力を発生させ、疲労強度を測定する試験である。図4に測定方法の概略を示す。試験条件は応力比Rを0.1、負荷周波数を50Hzとした。疲労強度は、繰返し負荷回数が 10^7 回において破断しなかった時の応力振幅とした。ここで、応力比とは最大応力に対する最小応力の比であり、応力振幅とは図5で表される変動応力波形の振幅を指す。疲労試験のS-N線図を図6に示す。開発材の疲労強度は405MPaであり、比較材の180MPaに対し、2.25倍となった。開発材の疲労強度は溶製鋼SCM440調質材と同等の値であり、溶製鋼並みの疲労強度を有している。

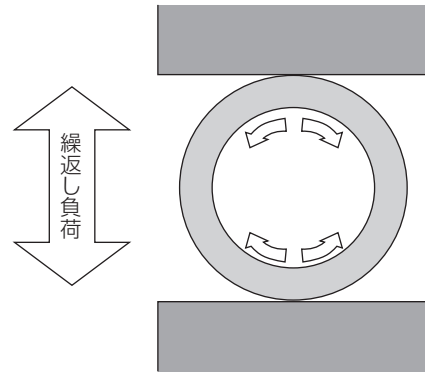


図4 リング圧縮疲労強度測定方法の概略図
Schematic the method of measuring ring compressive fatigue strength

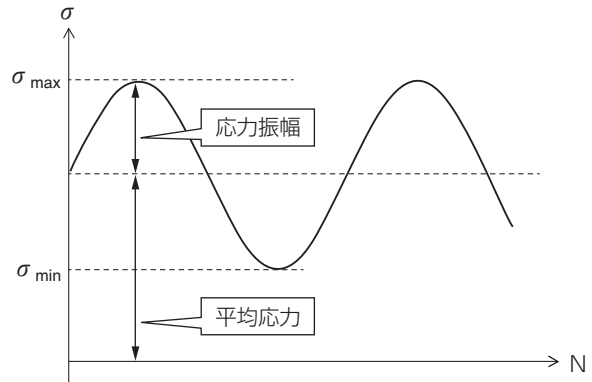


図5 疲労試験時の応力波形
The stress wave form at fatigue test

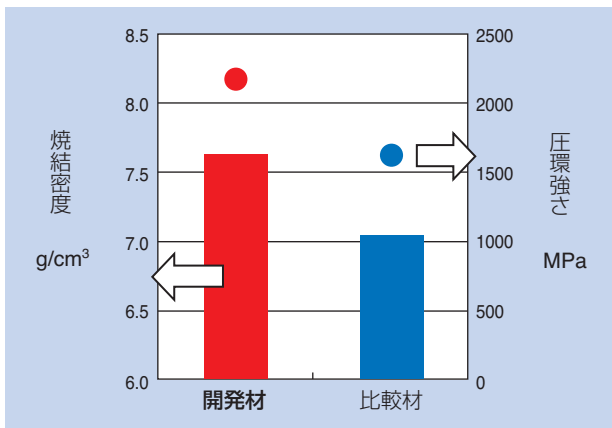
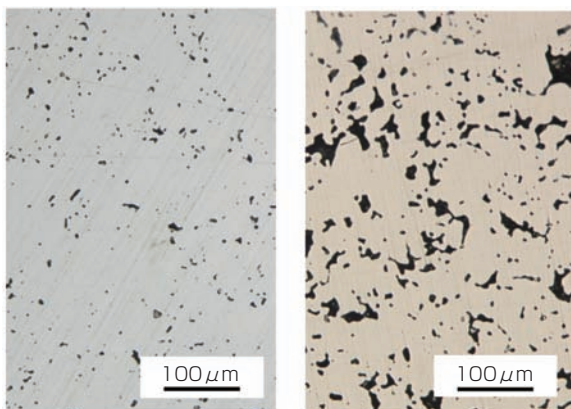


図2 焼結密度および圧環強度
Sintered density and radial crushing strength



(a) 開発材 密度 7.63g/cm³
(b) 比較材 密度 7.01g/cm³

図3 焼結体の光学顕微鏡写真
Optical micrographs of sintered part

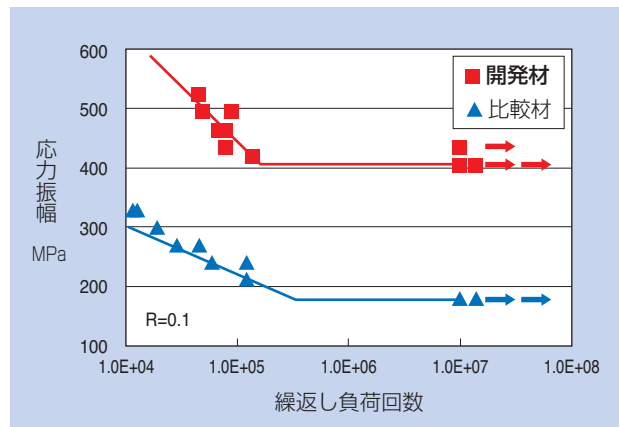


図6 S-N線図
Stress-endurance diagram

4.3 冷間加工による機械的性質の向上

4.1項で作製した焼結体に冷間加工を施し、空孔を低減させることで機械的性質の向上を図った。冷間加工は焼結後、熱処理前に実施した。加工の概略を図7に示す。焼結体を外径拘束治具と押付け治具で挟み、押付け治具を回転させながら焼結体を圧下する。これにより焼結体を片側0.25mm圧下し、その後浸炭焼入れ焼戻しを施した。

断面観察写真を図8に示す。加工により、圧下量の約2倍に当たる表面から0.5mmの領域では空孔率が0.5%未満と緻密化した。加工後の疲労強度は450MPaで加工前の405MPaから10%以上向上した。

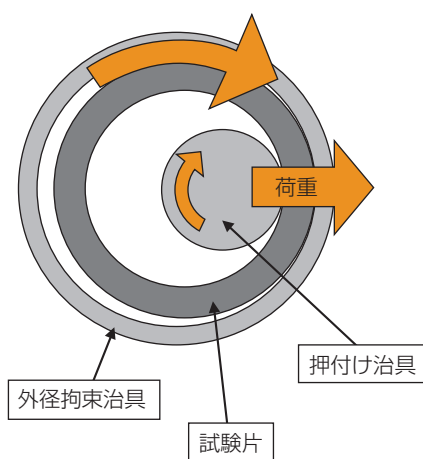
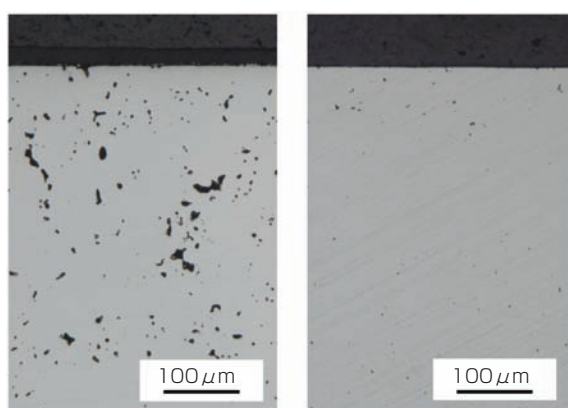


図7 冷間加工の概略図
Schematic cold working



(a) 加工前 (b) 加工後

図8 焼結体の光学顕微鏡写真
Optical micrographs of sintered part

5. まとめ

本稿では、焼結機械部品の高密度・高強度化の方法および、高密度焼結機械部品の機械的性質について紹介した。各工程での最適な方法を用いることで高密度焼結体を得ることができ、溶製鋼SCM440調質材と同等の疲労強度を得ることができた。また、冷間加工などを施すことで更なる強度向上を図ることが可能である。

今後は、本開発材を高強度を必要とする機械部品への適用を進めるとともに、更なる高性能化および用途拡大を図るべく、継続して開発に取り組んでいく。

参考文献

- 1) 新井和則・清水透：平成25年の素形材産業年報 5.粉末冶金, 素形材, 55, 5 (2014) 52-58.
- 2) 粉体粉末冶金協会 編：粉体粉末冶金便覧, 内田老鶴舗 (2010) 236.
- 3) 黒木英憲・藤沢伸也：鉄—銅圧粉体の焼結時における寸法変化機構, 粉体および粉末冶金, 38, 5 (1991) 571-576.
- 4) 日本熱処理技術協会 編：熱処理ガイドブック, 大河出版 (2008) 13.
- 5) 鈴木浩則・関義和・藤沢和久：温間成形用粉末「KHD-セグレス」の特性, R&D神戸製鋼技報, 52, 3 (2002) 70-73.
- 6) 藤木章・前川幸広・菅谷好美・芝野隆：温間成形によるエンジン用スプロケットの開発, 粉体および粉末冶金, 51, 7 (2004) 507-514.
- 7) 近藤幹夫：高精度・高密度粉末成形技術の開発, 粉体および粉末冶金, 54, 7 (2007) 506-512.
- 8) 服部毅, 田島伸, 近藤幹夫, 杉山昌揮, 山口登士也, 岸本秀史, 大河内智, 斎藤貴伸, 武本聡, 藤田雄一郎：車載リアクトル用高密度・低損失圧粉磁心の開発 (1) Fe-Si系圧粉磁心のSi量と成形圧力の影響, 粉体粉末冶金協会講演概要集 平成21年度秋季大会, 名古屋 2009, (2009) 99.
- 9) 粉体粉末冶金協会 編：粉体粉末冶金便覧, 内田老鶴舗 (2010) 245.
- 10) 粉体粉末冶金協会 編：粉体粉末冶金便覧, 内田老鶴舗 (2010) 154.

執筆者近影



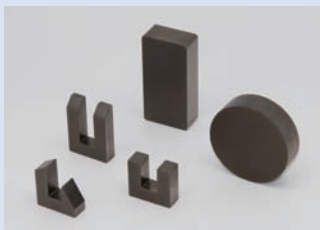
奥野 孝洋
先端技術研究所



八代 尚樹
先端技術研究所

高周波焼入装置用高性能磁性コア High Performance Magnetic Core for Induction Hardening Devices

原野 拓治* Takuji HARANO



NTNのグループ会社である日本科学冶金株式会社は、各種磁性材料商品を開発している。本稿では、高周波焼入装置の加熱コイル部に装着され、焼入深さの制御のために使用される磁気特性と機械的特性に優れた高性能磁性コアについて紹介する。

Nihon Kagaku Yakin Co., Ltd. of the NTN group develops various magnetic materials satisfying demand properties. In this report, it is attached to the heating coil part of the induction hardening device and introduces about a high-performance magnetic core in a magnetism characteristic and a mechanical characteristic to be used for control of the quenching depth.

1. はじめに

軸受やギヤをはじめとする機械構造部品は、信頼性向上のため熱処理を施し、製品強度を高めている。特に、自動車を代表する駆動装置関連の部品は、特定部位に強度が必要とされる一方で複雑な形状が多いため、熱処理には高周波焼入を適応し、必要な部位に最適な加熱が行なわれる。

高周波焼入装置の加熱コイル部には、“コア”と呼ばれる磁性材を取り付けるが（以下、磁性コア）、本稿では、高周波焼入用途に開発した高磁気特性で機械的強度に優れた高性能磁性コアについて紹介する。

2. 高周波焼入加熱コイル用磁性コア

自動車に適用する高周波焼入部品の一つにドライブシャフトがあるが、この搭載例を図1に示す。

高周波焼入装置の加熱コイル部に装着される磁性コアは、コイルの背面に取り付けた場合、ワークに磁力線を集中させ、誘導加熱を促進することができる。

一方、コイルの前面に取り付けた場合は、磁力線を遮蔽して、焼入不要部位の加熱を防ぐ効果が得られ、高周波焼入装置の加熱コイルには欠かせない部品である。

ワークの形状が複雑かつ、部位の焼入深さ調整が必要な場合、装着する磁性コアの形状、サイズ、数量、



図1 自動車に搭載する高周波焼入部品例（ドライブシャフト）
Example of induction hardening parts (Drive shaft)

*日本科学冶金(株) 技術部

方向、位置などを調整することで誘導加熱の状態を変化させ、ワークの焼入深さを制御することができる。

日本科学冶金は、図2に示すような鉄粉と熱硬化性樹脂を複合化し、高性能な磁性コアを開発した。

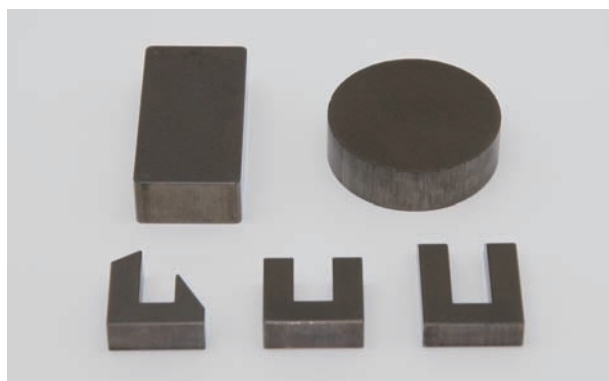


図2 高性能磁性コア
High performance magnetic core

3. 高性能磁性コアの開発

3.1 開発背景

一般に使用されるフェライト製の磁性コアは、高周波領域でも比較的鉄損は小さいが、飽和磁束密度が低いため焼入性能を維持するにはコアのサイズが大形になる欠点がある。また、電磁鋼板は、磁束密度は高いが高周波領域では鉄損が大きくなり適用できない。

一方、高周波焼入装置の加熱コイル部に装着される磁性コアは、粉末冶金法により製造される圧粉製コアが多く使われているが、市販のコアや加工用素形材は、高価かつ、材料強度が低く、加工や取扱いに課題があった。

このため、簡易な製造工程で大量生産ができ、従来品よりも優れた特性を有する磁性コアを開発することとした。

3.2 開発コンセプト

高周波焼入装置の加熱コイル部に装着される磁性コアに求められる磁気特性は、高周波領域（数kHz～百kHz）で使用するため、以下の特性が必要である。

- (1) 飽和磁束密度が高い
- (2) 比透磁率が高い
- (3) 周波数特性が良好（周波数の変化に伴うインダクタンスの変化が少ない）
- (4) 鉄損が小さい
- (5) 機械的強度に優れる

3.3 開発磁性コアの特長と性能

3.3.1 構造と特長

図3に開発した高性能磁性コアの構造を示す。

粉末冶金用の鉄粉を磁性粉末とし、接着効果の高い熱硬化性樹脂を少量添加、造粒処理することで鉄粉の表面に絶縁被膜した。また、低圧で圧縮成形し、加熱硬化することで被膜の破壊を抑えた複合材料である。これにより、強固で磁性粉末同士の接触頻度を低減させた磁性材とし、高周波数で使用しても損失を抑え、広範囲の周波数領域で使用可能となった。

開発した高性能磁性コアの特長は、以下のとおりである。

- ・ 飽和磁束密度 : 1300mT
- ・ 比透磁率 : 54
- ・ 鉄損 [10kHz/200mT] : 1480kW/m³
- ・ 圧環強さ : 150MPa

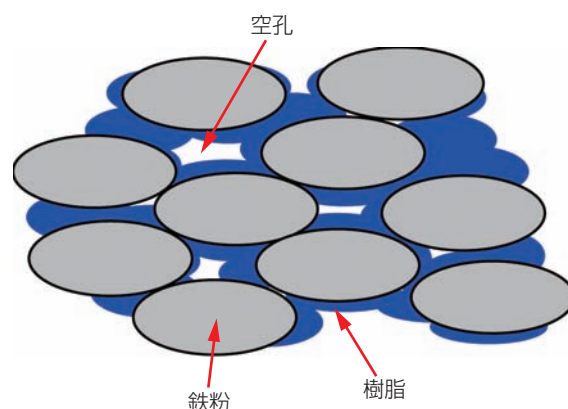


図3 高性能磁性コアの構造（イメージ）
Structure of the high performance magnetic core (Image)

3.3.2 性能

(1) 磁気特性

① 飽和磁束密度, 比透磁率

表1に開発品と従来品の飽和磁束密度と比透磁率の比較を示し、図4に磁束密度Bと磁界の強さHの関係グラフ(B-H曲線)を示す。

開発品は従来品に対し、飽和磁束密度が約10%、比透磁率は約30%向上させた。また開発品は、磁界の強さHに対する磁束密度Bの立ち上がりが早く、高効率であることがわかる。これは、冒頭に紹介した高周波焼入装置において、開発した磁性コアをコイルの背面に取り付けた場合、ワークに磁力線を集中させ誘導加熱を促進することができる。

表1 飽和磁束密度, 比透磁率

Saturated magnetic induction, ratio magnetic permeability

材料名	飽和磁束密度 mT	比透磁率
開発品	1300	54
従来品	1200	40

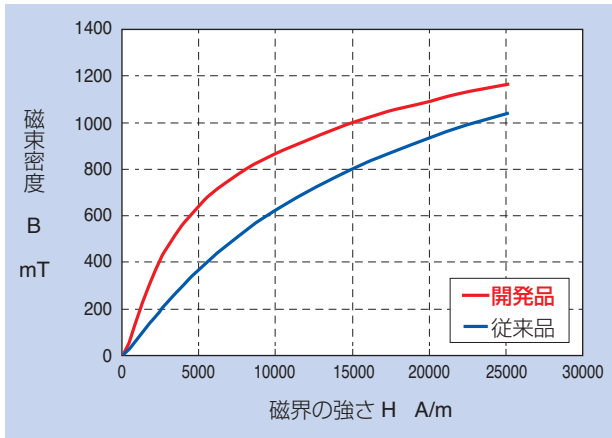


図4 B-H曲線
B-H curve

② インダクタンス変化

磁性材の周波数特性として、高周波領域での磁場発生能力の尺度となるインダクタンス変化率を図5に示す。

開発品のインダクタンスの変化は、高周波領域を含めすべてにおいて従来品と同等であり、双方とも100kHz程度まではインダクタンス変化率は小さい。この結果、本特性は高周波帯域まで安定していることがわかる。

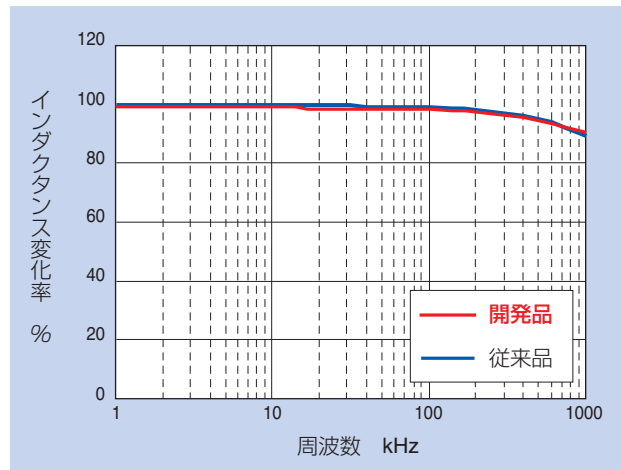


図5 周波数特性
Frequency characteristics

③ 鉄損

高周波焼入処理条件に相当する高周波領域(10kHz)において、開発品と従来品の損失である鉄損を図6に示す。

開発品の鉄損は、従来品に対し200mT時において約15%小さく、エネルギーの損失が少なく良好であった。

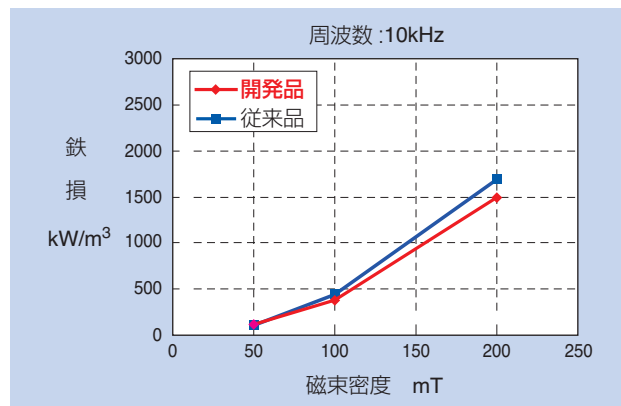


図6 鉄損
Core loss

(2) 機械的強度

開発した磁性コアは、前項で述べた通り鉄粉粒子を熱硬化性樹脂で接着して固めた形態の強固な材料である。開発品と従来品の機械的強度については圧環強さで比較し、図7に示すように円環状の試験片に圧縮応力を負荷し、次式により求めた。

$$K = \frac{F(D-e)}{L \cdot e^2}$$

K : 圧環強さ (MPa)
 F : 破壊した時の最大荷重 (N)
 L : 中空円筒の長さ (mm)
 D : 中空円筒の外径 (mm)
 e : 中空円筒の壁厚 (mm)

この結果を表2に示す。開発品は、従来品よりも約5倍の圧環強さであり、材料強度が十分向上している。

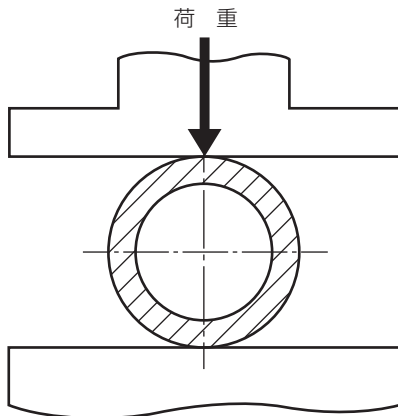


図7 圧環強さの測定方法
Method for radial crushing strength

表2 機械的強度
Mechanical strength

材料名	密度 g/cm ³	圧環強さ MPa
開発品	6.1	150
従来品	6.4	30

4. まとめ

本稿では、磁気特性と機械的特性に優れた高周波焼入装置の加熱コイル部に装着される高性能磁性コアを紹介した。

各種性能評価から開発した磁性コアは、従来品よりも優れた磁気特性を有し、かつ機械的強度を大幅に向上させた。本高性能磁性コアを、高周波焼入装置へ適用することで、高周波焼入部品の安定品質と信頼性が向上するだけでなく、構造部品の強度や硬度の向上で、これらのダウンサイジングはもとより、車両の軽量化にも貢献できるものと考えている。

参考文献

- 1) 小田貴之, 宮崎真二, 島津英一郎: HEV昇圧装置用リアクトルコア NTN TECHNICAL REVIEW, No.81 (2013) 46-51.
- 2) 原野拓治, 宮崎真二, 勝浦肇: 磁性材料商品の紹介 NTN TECHNICAL REVIEW, No.80 (2012) 87-91.
- 3) 友上真: 等速ジョイントの技術動向と開発商品 NTN TECHNICAL REVIEW, No.75 (2007) 10-15.
- 4) 社団法人日本電子材料工業会編: ソフトマグネティック金属材料のはなし.

執筆者近影



原野 拓治
日本科学冶金(株)
技術部

青銅系代替銅鉄系焼結含油軸受 The Copper Iron-based Material Sintered Oil-impregnated Bearing Equivalent to Bronze Sintered Material

山下 智典* Tomonori YAMASHITA



一般に焼結含油軸受の材質は、青銅系、銅鉄系、鉄系に分類されている。青銅系材料はしゅう動性、音響特性に優れているが、銅粉は鉄粉に比べると高価なため、使用量の抑制が課題であった。今回、特殊な銅粉により、銅が少量でも青銅系材料と同等以上のしゅう動特性となる材料を開発した。本稿では開発材料を用いた焼結含油軸受について紹介する。

The materials of the sintered oil-impregnated bearing are classified into bronze-based, copper iron-based and iron-based in general. Bronze based materials are superior in sliding and acoustic feature, the problem is the copper powder is high cost compared with iron powder, so it was necessary to reduce its quantity. By adopting special copper powder, we developed new materials having same or surpassing sliding and acoustic features as in the existing bronze-based materials, even with the small amount of copper inside. This report introduces the sintered oil-impregnated bearing using developed materials.

1. はじめに

焼結含油軸受は自動車や産業機械に広く使用されており、その材料は青銅系と鉄系および両者を組み合わせた銅鉄系に大別される。パワーウィンドやファンモータなどの自動車電装品や、複写機やレーザービームプリンタなど、軸受に高いしゅう動性能が求められる用途に対しては、青銅系材料が適している。しかし、近年の銅価格の上昇から、NTNは青銅系に代わる焼結軸受の新しい材料を開発した。本稿では、この青銅系代替銅鉄系焼結含油軸受の特性について紹介する。

2. 焼結含油軸受の材質

焼結含油軸受において、青銅系材料はしゅう動性に優れ、耐久性は鉄系が優れており、銅鉄系はその中間の特性を有している。

一方、銅より鉄が安価のため、しゅう動性と耐久性、価格はトレードオフの関係になることが多い。NTNは銅鉄系材料をもとに、適用する用途や使用条件などに基づき、しゅう動性、耐久性、価格などのバランスを勘案して銅と鉄の配合比率を決定した。

3. 特殊銅粉の特徴

開発品の材料配合を表1に示し、この材料配合に基づき、特殊銅粉を用いた軸受の断面を図1に示す。図の上側が軸受内径面であり、表層に銅の薄層が形成されている。特殊銅粉は、圧粉体表面部に集中する性質があり、めっきなどの特殊工程を追加することなく、通常の成形工程で、圧粉体が製作できる。一方、圧粉体内部には、材料混合時に配合した汎用の銅粉や鉄粉が多く含まれる。

図2に軸受内径面を示す。内径面の約60%以上は銅が露出しており、これが優れたしゅう動性に寄与する。

表1 開発品の化学成分
Chemical components of the developed product

開発品	化学成分 wt%			
	Cu	Sn	C	Fe
	15~22	0.5~2.5	0.5~2.5	残

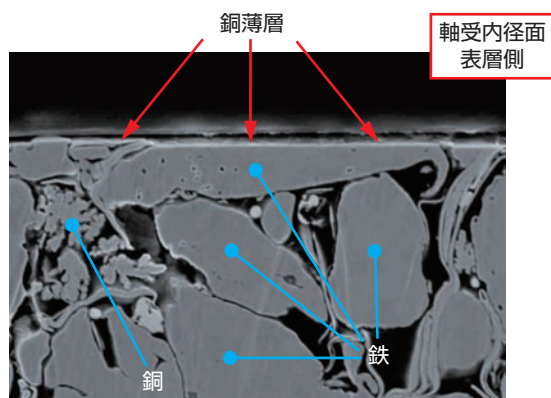


図1 開発品の断面
Section of the developed product

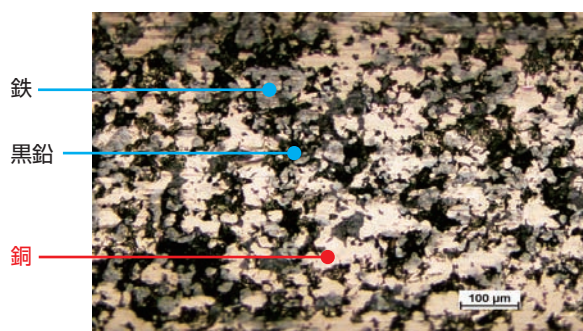


図2 軸受内径面の拡大写真
Macro photograph of bearing bore

開発品の摩擦係数は、運転開始後最も低く、安定するまでの時間も青銅系品と同等であった。また、10分後の摩擦係数は青銅系品と同水準で、同等量の銅を配合した銅鉄系品に比べても低い結果であった。

以上から、本開発品は初期なじみ性に優れ、青銅系品と同等以上の摩擦特性を有していることがわかる。

<試験条件>

- ・周速 75m/min
- ・面圧 1.2MPa
- ・軸受寸法 φ6×φ12×6J
- ・軸材質 SUS420J2
- ・試験温度 常温
- ・試験時間 10min

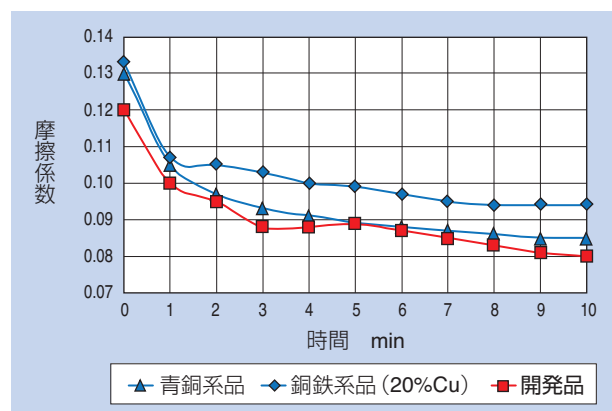


図3 初期なじみ性の評価結果
Result of initial conformability evaluation

4. 開発軸受の性能

開発品の性能として、初期なじみ性、限界PV値、耐摩耗性、低温特性の評価を行った。

4.1 初期なじみ性

焼結含油軸受は、運転開始直後は摩擦係数が高く徐々に低くなっていく。この現象を初期なじみという。モータなどには、安定した運転特性が求められるため、運転開始直後から摩擦係数が低く、早期に安定することが求められる。このため、開発品の初期なじみ性を評価した。

開発品のほか、青銅系品および開発品と同等量の銅20%を添加した銅鉄系品についても評価した。この結果を図3に示す。

4.2 限界PV値

軸受の使用限界を判断する一つの指標であるPV値は、軸受に付与される面圧Pと周速Vの積で示される。この値が大きいくほど、使用条件が厳しい。

各軸受の限界PV値の測定結果を図4に示す。本試験は回転速度を一定に保ち、その状態で軸受に対しておもりにより負荷を与える。一定時間経過後、摩擦係数が安定すればおもりによる負荷を増し、これを繰り返す。一定時間経過後も摩擦係数が安定しない場合は、この時点のPV値を限界PV値としている。

開発品の摩擦係数は、青銅系品と同等の挙動を示し、同等量の銅を配合した銅鉄系品より低かった。また、限界PV値は青銅系品よりも大幅に高く、銅鉄系品と同等であった。

本結果から、開発品は低PV値領域から青銅系品と同等の摩擦係数を示し、かつ、高PV値領域まで低い摩擦係数を維持していることがわかる。このため、広いPV値領域での使用が可能である。

<試験条件>

- ・軸材質 SUS420J2
- ・軸受寸法 $\phi 6 \times \phi 12 \times 6$
- ・試験温度 常温

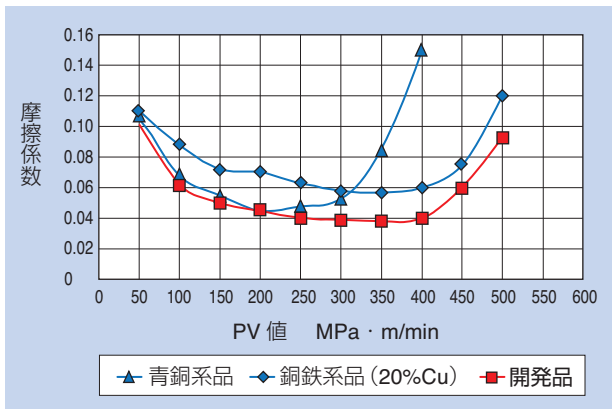


図4 限界PV値測定結果
Result of limit PV value measurement

4.3 耐摩耗性

耐摩耗性の評価は、運転試験前後の軸受内径寸法変化量から摩耗量を推定した。評価結果を図5に示す。

開発品の摩耗量は青銅系品、銅鉄系品よりも少なく、優れた耐摩耗性を有していることがわかる。

<試験条件>

- ・周速 38m/min
- ・面圧 4.0MPa
- ・軸受寸法 $\phi 6 \times \phi 12 \times 6$
- ・軸材質 SUS420J2
- ・試験温度 常温
- ・試験時間 8h

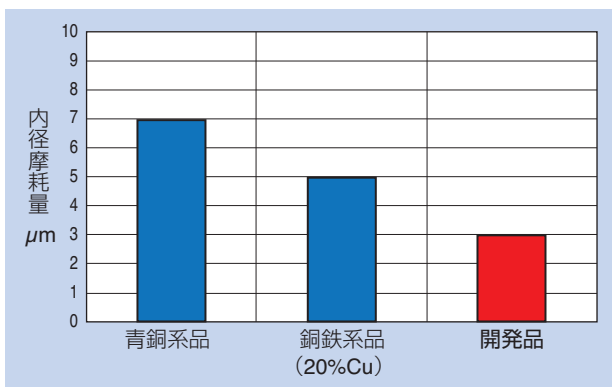


図5 耐摩耗性評価結果
Result of abrasion resistant evaluation

4.4 低温特性

自動車用途に使用する場合、低温雰囲気での起動時に音が発生する場合がある(冷時異音)。この原因は、軸と軸受の金属接触と考えられている。

焼結含油軸受は、軸と軸受のすきまに形成される油膜によって回転軸を支持しているが、低温になると、潤滑油が収縮するため軸受すきま内の潤滑油が減り、金属接触が懸念される。

低温時の油膜形成性の評価として、図6に油膜形成率の測定結果を示し、比較として常温時の測定結果も示す。油膜形成率は100%であれば軸と軸受が非接触、0%であれば完全に接触している状態を示す。

図6(1)において、青銅系品の油膜形成性は悪く、30分後でも金属接触していることがわかる。一方、開発品は、試験開始直後から油膜形成性が良好で、早期に非接触状態になっていることがわかる。この結果、開発品は低温時でも青銅系品より良好な油膜形成性を有しており、低温環境下での騒音、振動を抑える効果があると考えられる。また、図6(2)に示すように、常温においても開発品は青銅系品に比べ良好な油膜形成を示しており、軸受寿命や耐摩耗性に優れるといえる。

<試験条件>

- ・軸材質 S45C
- ・面圧 0.51MPa
- ・周速 93.4m/min
- ・軸材質 SUS420J2
- ・試験時間 30min
- ・試験温度 常温, -40℃

5. 開発品の用途展開

前項で述べた各評価結果から、本開発品の特長は以下の通りである。

- ① 青銅系品と同等の摩擦特性
- ② 銅鉄系品と同等の耐PV値特性
- ③ 耐摩耗性に優れる
- ④ 低温時の高い油膜形成能力

これらの特長から、青銅系品の代替材料としてさまざまな用途への展開が可能である。特に、低温特性が良好であることから、自動車関連製品では、特にスタートモータなどの電装モータへの適用が期待できる。また、産業機械関連では、小径で大きな負荷が作用する振動モータやステッピングモータなどへの適用が可能である。

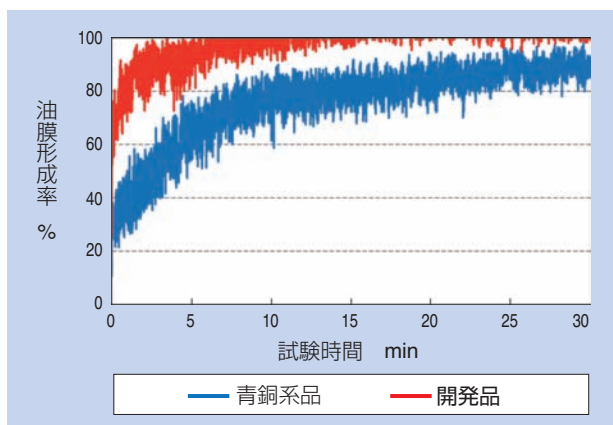


図6 (1) 油膜形成評価試験結果 (-40°C)
Result of oil film forming evaluation (-40°C)

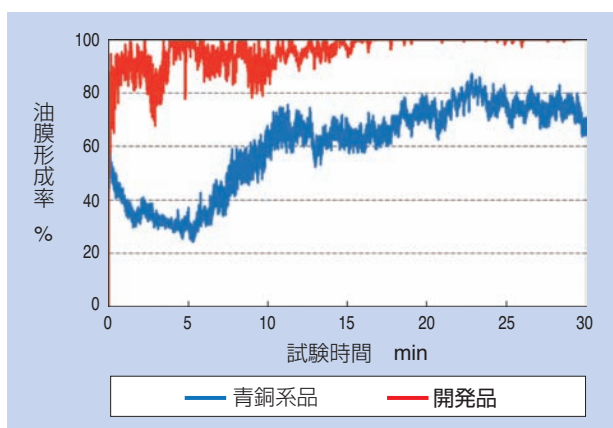


図6 (2) 油膜形成評価試験結果 (常温)
Result of oil film forming evaluation (Room temperature)

6. まとめ

本稿では、新たに開発した青銅系代替銅鉄系焼結含油軸受を紹介した。今後、本商品の特長を活かして販売を拡大するとともに、さらなる高機能化を目指し、開発を継続する所存である。

執筆者近影

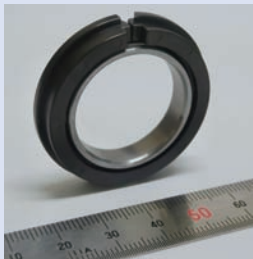


山下 智典
NTN特殊合金(株)
技術部

[製品紹介]

複写機・プリンタ定着部用高負荷すべり軸受ユニット High Load Sliding Bearing Unit Used in Fuser of Copier and Printer

服部 圭* Kei HATTORI
石井 卓哉** Takuya ISHII



複写機，プリンタを代表とする事務機器の低コスト化の一つに，転がり軸受から代替可能なすべり軸受の適用が求められている。

NTNは，特に中速・高速機種で使用条件が厳しく，すべり軸受の適用が困難であった定着部に使用可能とするため，PPS樹脂製外輪と金属製内輪を組み合せ，樹脂すべり軸受に対して耐荷重性が2倍で，低摩擦低摩耗特性を示す「高負荷すべり軸受ユニット」を開発した。本稿では，「高負荷すべり軸受ユニット」の特長，性能を紹介する。

As one of the cost reduction for business machine typified in copiers and printers, rolling bearings is required replaceable from sliding bearings. Because of using bearing conditions at fuser roller of medium and high-speed models are very hard, it is difficult to apply the sliding bearing. Therefore, NTN developed “High Load Sliding Bearing Unit”, that combined the metal inner ring and PPS resin outer ring, has twice load capacity, lower friction and wear properties in comparison with conventional resin sliding bearings. This article introduces the characteristic and performance of “High Load Sliding Bearing Unit”.

1. はじめに

複写機，プリンタの低コスト化に伴い，これらに使用される軸受は可能な限りすべり軸受の適用が求められている。その中で定着部の軸受は，使用条件が厳しく，すべり軸受の適用は機種によって困難であるため，各機種の仕様に応じて転がり軸受，樹脂すべり軸受¹⁾いずれかが決定される。樹脂すべり軸受は，転がり軸受に比べて耐荷重性が劣るため，比較的荷重が低い機種に限られている。

本稿では，ポリフェニレンサルファイド（PPS）樹脂製外輪と金属製内輪を組み合わせて耐荷重性を向上した「高負荷すべり軸受ユニット」を紹介する。

2. 定着部用軸受の仕様と課題

2.1 定着部用軸受の仕様

レーザービームプリンタの構造を図1に示し，さらに定着部の構造を図2に示す。光学部で取り込んだ画像を，現像部・感光部で転写ベルト上にトナーで形成する。そのトナーを紙に転写し，定着部で紙に焼き付

ける。その際，紙は定着ローラと加圧ローラの間を通過し，トナーを焼き付けるために200℃程度で加熱，加圧される。定着ローラはベルトを介して加熱ローラの熱が伝えられるため，加圧ローラより高温である。

また，定着ローラは軸受によって回転自在に固定され，加圧ローラは軸受を介してばねなどで定着ローラに押し付けられている。このため，定着ローラ，加圧ローラの軸受は常に一方の荷重を受け，軸回転で使用される。

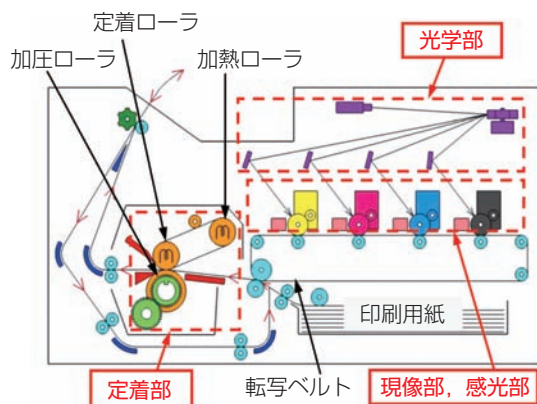


図1 レーザービームプリンタ
Laser beam printer

*複合材料商品事業部 複合材料技術部

**NTN精密樹脂(株) 技術部

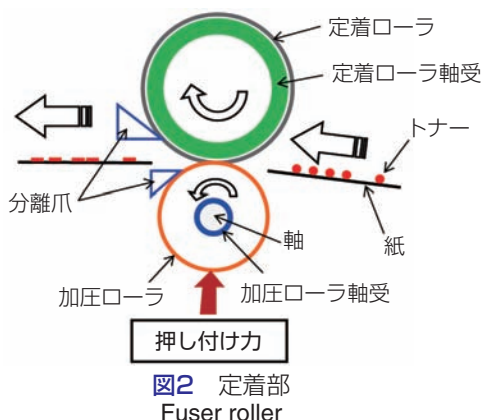


図2 定着部 Fuser roller



図3 高負荷すべり軸受ユニットの構造 Structure of high load sliding bearing unit

2.2 定着部用軸受の課題

印刷速度が毎分30枚以下の低速機では、加圧ローラの押し付け荷重が比較的低いため、樹脂すべり軸受が多く使用されている。印刷速度が速くなるに連れてトナーを短時間で焼き付けるために、定着ローラの温度、加圧ローラの押し付け力がともに高くなる。特に定着ローラ用軸受の使用条件は厳しくなり、樹脂すべり軸受では摩擦・摩耗特性、耐荷重性が不十分なため、転がり軸受が使用されている。

樹脂すべり軸受の採用には上記課題のほか、樹脂すべり軸受は嵌合軸の材質および表面粗さによって摩擦・摩耗特性が変化する、さらに軸のたわみおよび、ミスアライメントによって偏摩耗が発生する場合がある。

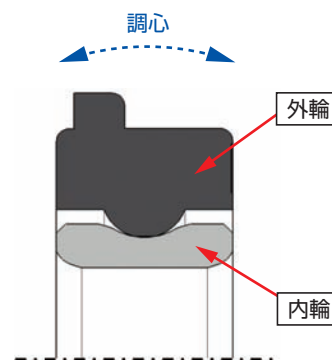


図4 高負荷すべり軸受ユニットの部分断面 Cross section of high load sliding bearing unit

3. 高負荷すべり軸受ユニットの特長

高負荷すべり軸受ユニットの構造を図3に示し、その部分断面を図4に示す。PPS樹脂製外輪と金属製内輪の二つの部品で構成し、凸曲面形状の外輪内径と凹曲面形状の内輪外径でしゅう動する。外輪と内輪の間には、熱膨張を考慮した運転すきまを設け、しゅう動面にはグリースを塗布している。内輪外径の凹曲面を外輪内径の凸曲面より大きくすることで、接触面積が小さくなり、すきまがグリース溜まりとなるので、安定した摩擦特性が得られる。

外輪、内輪、グリースの材質を表1に示す。複写機、プリンタは、その構造により軸受に求められる電気特性が異なる。このため、高負荷すべり軸受ユニットには外輪およびグリースの材質を変えた非導電と導電の2種類がある。それぞれの外輪は表2に示すベアリーAS材であり、高温特性にも優れるPPS樹脂に特殊充填剤を配合し摩擦・摩耗特性を付与している。内輪の

表1 構成材料 Constituent material

構成	非導電タイプ	導電タイプ
外輪	ベアリーAS5056 (非導電性)	ベアリーAS5965 (導電性)
内輪	軸受鋼	軸受鋼
グリース	非導電性 ふっ素系グリース	導電性 ふっ素系グリース

表2 外輪樹脂材の基本物性 Basic properties of outer ring resin material

項目	単位	ベアリー AS5056	ベアリー AS5965
体積抵抗率	$\Omega \cdot \text{cm}$	$\times 10^{14}$ 以上	$\times 10^3$
比重	—	1.58	1.62
引張り強さ	MPa	58	43
線膨張係数	$\times 10^{-5}/^\circ\text{C}$	8.7	7.3
熱伝導率	W/(m · K)	0.32	0.38

注意：上記物性（室温）は代表値である。

金属材料は軸受鋼であり、グリースにはふっ素系グリースを採用している。本構造や材質から摩擦・摩耗特性が向上し、高荷重においても使用可能であり、さらに軸受の調心性も付与できる。

表3に樹脂すべり軸受、高負荷すべり軸受ユニット、転がり軸受の比較を示す。ハイブリッド構造である高負荷すべり軸受ユニットは性能バランスが良く、樹脂すべり軸受と比較し以下の特長がある。

(特長)

- ① 高温環境下においても摩擦・摩耗特性に優れ、耐荷重性2倍
- ② 高い軸の設計自由度（軸材質、表面粗さの影響なし）
- ③ 調心設計で安定したしゅう動特性

表3 各種軸受の比較
Comparison of features various bearings

項目	樹脂すべり軸受	高負荷すべり軸受ユニット	転がり軸受
構造	樹脂単体	樹脂外輪 金属内輪	金属外輪 金属内輪 鋼球
耐荷重性	△	○	◎
摩擦特性	△	○	◎
摩耗特性	△	○	◎
軸の設計自由度	×	○	○
調心性	×	○	△
断熱性	◎	◎	△
コスト	◎	○	△

◎ 優 ○ 良 △ 可 × 不可

4. 高負荷すべり軸受ユニットの性能

4.1 摩擦摩耗特性

摩擦係数、摩耗量を測定するラジアル試験機を図5に示す。試験軸受を取り付けたハウジングに下部から荷重を加えた状態で軸を回転させ、このときの摩擦係数、摩耗量を測定した。試験軸受は、内径25mm、幅7mmであり、軸はヒータで内側から加熱し、熱電対で表面温度をコントロールした。

試験条件を表4に示し、高負荷すべり軸受ユニット（開発品）、樹脂すべり軸受（従来品）の摩擦係数、摩耗量を測定した。開発品、従来品ともに非導電タイプの軸受であり、従来品はPPS樹脂に四ふっ化エチレン樹脂を配合したすべり軸受である。

軸受の摩耗量、動摩擦係数を図6に示す。開発品の摩耗量は、試験前後の内外輪間の運転すきま増加量とした。開発品は従来品と比較し、摩耗量が1/3、動摩擦係数が1/2である。

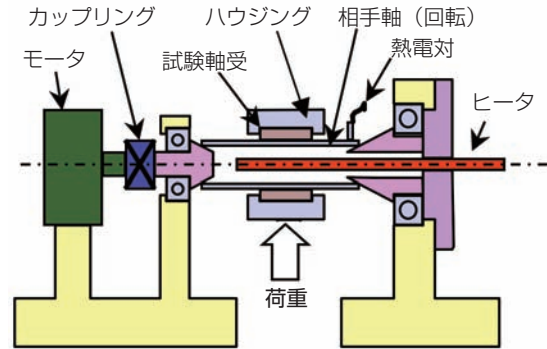


図5 ラジアル試験機
Radial test machine

表4 試験条件
Test condition

項目	内容
軸の回転速度	16.5 m/min (210min ⁻¹)
面圧	0.95 MPa (166N)
相手軸	アルミニウム合金
温度	180°C (相手軸表面)
時間	20h

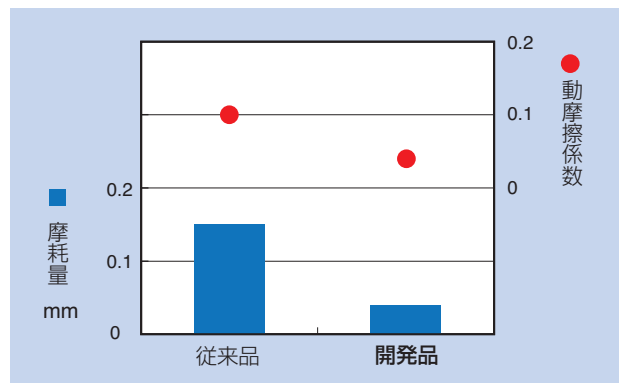


図6 摩擦・摩耗特性
Friction and wear property

4.2 限界PV特性

すべり軸受の使用条件は、一般に軸受しゅう動部の面圧Pとすべり速度Vの積で表される（PV値）。表5に示す試験条件で限界PVを評価した。各軸回転速度で荷重を変え試験し、試験前後の内外輪間の運転すきま増加量が0.1mm以下となる最大面圧を許容面圧とした。なお、面圧は荷重を軸受内径と幅の積で除した値である。

開発品および従来品における軸の回転速度と許容面圧の関係であるPV曲線を図7に示す。この結果、開発品は許容面圧が従来品の2倍と耐荷重性に優れている。

また、軸の回転速度10m/min、面圧1.66MPaにおける開発品の動摩擦係数の経時変化を図8に示す。動摩擦係数は約0.06と低い状態で安定していることがわかる。

なお、導電タイプの軸受も同様に評価したが、非導電タイプと同等の摩擦・摩耗特性、限界PV特性であった。

表5 試験条件
Test condition

項目	内容
軸の回転速度	5m/min (64min ⁻¹) 10m/min (128min ⁻¹) 16.5m/min (210min ⁻¹)
相手軸	アルミニウム合金
温度	200°C (相手軸表面)
時間	100h

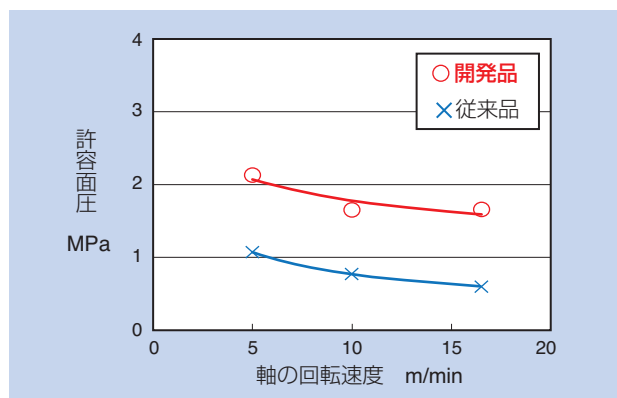


図7 限界PV曲線
Limit P-V curve

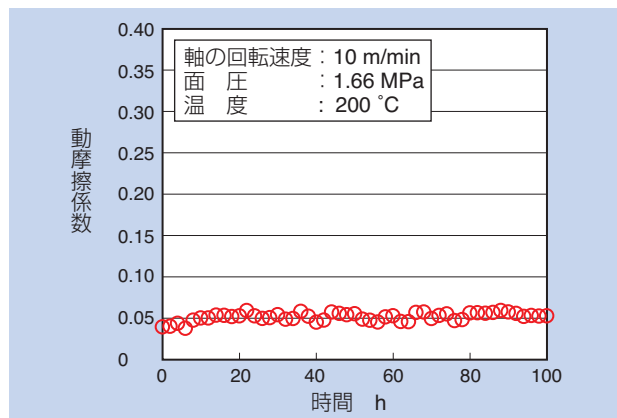


図8 開発品の動摩擦係数の経時変化
Coefficient of dynamic friction

5. 軸受寸法

複写機、プリンタの定着部で使用する軸受の主要なサイズである高負荷すべり軸受ユニットの寸法例を表6に示す。ここでは転がり軸受と類似の寸法を紹介しているが、外輪と内輪それぞれの断面を薄くすることで軸受ユニット外径を小さくし省スペース化した薄

肉軸受ユニットの供給も可能である。また、外輪は射出成形で製作するためフランジ、回り止めの寸法・形状は任意に変更可能であり、止め輪など周辺の部品点数削減も可能である。

ただし、樹脂外輪に割り部があるため、この部分が負荷部とならないように外輪に回り止めを設ける必要がある。

表6 開発品の代表的寸法例
Dimensions of high load sliding bearing unit

主要寸法 mm				許容調心度 mm/mm
内径	外径	フランジ外径	幅	
20	32	34.8	7	1/100
25	37	39.8	7	1/100
30	42	44.8	7	1/100
35	47	49.8	7	1/100

注意：許容調心度は使用条件によって異なるため、参考値である。

6. まとめ

樹脂すべり軸受に対し、高温環境下においても耐荷重性、摩擦・摩耗特性を大幅に向上させ、かつ軸の設計自由度、調心性を付与した高負荷すべり軸受ユニットを開発した。これにより複写機・プリンタの定着部用途で、転がり軸受の代替が可能となった。

また、高負荷すべり軸受ユニットは、構成部品の材質を変えることで様々な用途に適応可能である。今回紹介した複写機・プリンタ以外でも食品機械、医療機器などの用途へも展開していく。

参考文献

- 1) 沖芳郎, 林工, 石井卓哉: スーパーエンジニアリングプラスチックの特性と使い方, トライボロジスト, 49巻7号 (2004) 31.

執筆者近影



服部 圭
複合材料商品事業部
複合材料技術部



石井 卓哉
NTN精密樹脂(株)
技術部

工作機械主軸用空冷間座付軸受 Machine Tool Main Spindle Bearings with Air Cooling Spacer



恩田 裕士* Yushi ONDA
 深田 貴久夫* Kikuo FUKADA
 山本 庸平** Yohei YAMAMOTO
 吉野 真人*** Masato YOSHINO

工作機械主軸の高いレベルで高速、高剛性を両立する新たな技術として、NTNは軸受への空冷技術を適用した「工作機械主軸用空冷間座付軸受」を開発した。本稿では、本技術による軸受冷却効果を説明するとともに、開発軸受の実用化に向けた取り組みを実験および解析結果を交えて紹介する。

NTN developed “Machine Tool Main Shaft Bearing with Air Cooling Spacer” with the air cooling technology for machine tool main spindle bearings, which realizes high-speed and high-rigidity at the same time with higher level than ever. In this paper, bearing cooling effect through the technology and technical activities for practical use are introduced below with tests and analysis results.

1. はじめに

工作機械の主軸は、難削材や複雑な形状の部品を加工する場合、高剛性、高精度が要求される。また、機械部品の金型や、医療分野で使用される部品の加工は、高速かつ高精度で回転することが求められることから、工作機械主軸の特性は、加工内容や加工物によって異なる。このため、近年は1台で複数の加工機能を持つ5軸加工機や、複合加工機の需要が増えており、主軸および主軸用軸受は、高いレベルで高速、高剛性の両立が必要である。

軸受の剛性を上げるためには、組込み時の予圧を大きくすることや、軸受の負荷容量を大きくすることが有効である。しかしその場合は、運転時の発熱が大きくなり、高速運転の妨げや、主軸の熱膨張による加工精度の悪化に繋がる。このため、軸受の剛性を高めて、より高速な運転を実現するためには、運転中の発熱を低減することが重要である。

これまでNTNは、エアオイル潤滑方法の工夫で、主軸用軸受の高速、高剛性および、低騒音化に取り組

んできた^{1), 2)}。今回、新たなアプローチとして、軸受への空冷技術を適用した「空冷間座³⁾」を開発した。本稿では、さらに改良し実用可能なレベルで開発した「工作機械主軸空冷間座付軸受」の構造や、メカニズムを紹介する。

2. 構造

空冷間座付軸受の構造を図1に示す。アンギュラ玉軸受背面合せ（DB配列）の間に設けた外輪間座に、エア量、オイル量の削減、および、低騒音化が可能なNTN独自の環境対応型エアオイル潤滑ノズル⁴⁾を適用するとともに、同ノズルとは独立した空冷ノズルを設置している。

空冷ノズルは軸芯よりオフセットし、軸回転方向に向けて円周上3箇所に配している。空冷ノズルから噴射する常温の空気（以下、空冷エア）が軸回転方向に旋回しながら内輪間座と外輪間座の間および、軸受内を通過して軸受を冷却する。

*産業機械事業本部 工作機・航空宇宙技術部

**産業機械事業本部 産業機械技術部

***先端技術研究所

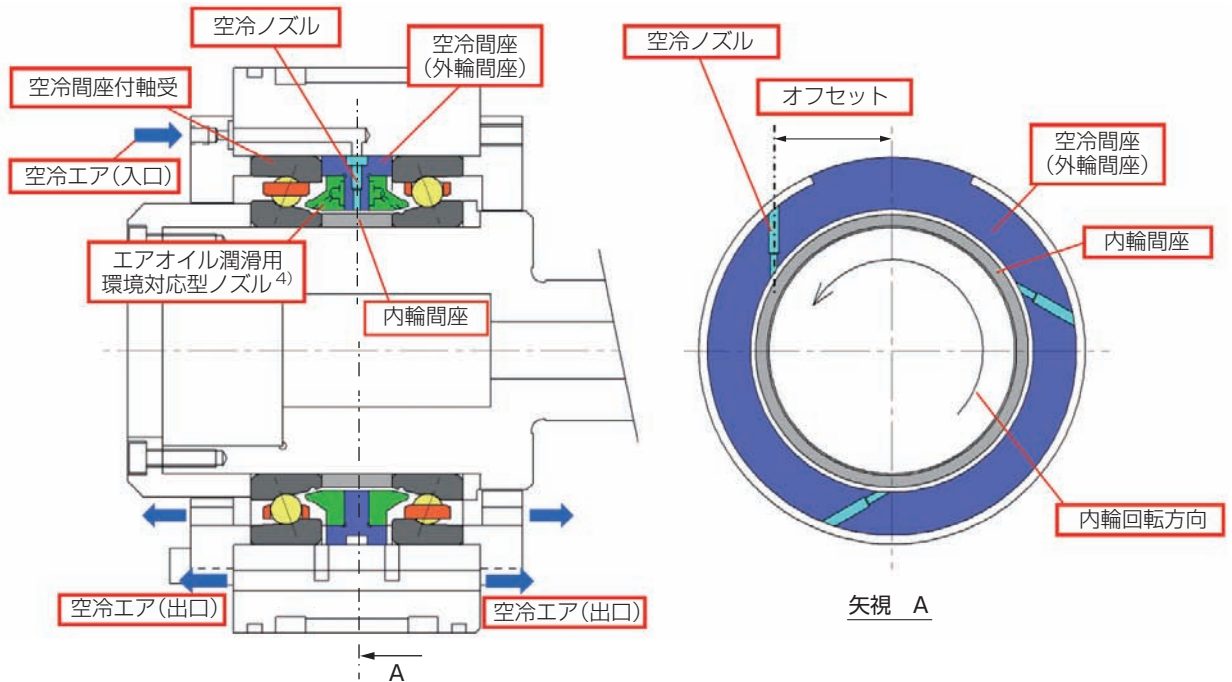


図1 空冷間座付軸受の構造
Structure of the bearing with air cooling spacer

3. 冷却メカニズム

空冷間座付軸受は、軸受から発生した熱を空冷エアで内輪間座表面から奪い、冷却を行っている。空冷エアが間座内に滞留する時間が長ければ、空冷エアと内輪間座表面の熱交換時間が長くなり、軸受冷却効果が高まる。さらに空冷エアの流速が速ければ、内輪間座の表面から奪う単位時間あたりの熱量が多くなり、内輪間座および軸受内輪の冷却効率が高まる。

空冷間座付軸受の内部における空冷エアの流れを流体解析で可視化した。この結果を図2に示す。

空冷ノズルを軸芯からオフセットしない場合、空冷エアは内輪間座外径面に衝突後、軸方向に拡散し、空冷エアは間座外に排出される。そのため空冷エアの軸受冷却効果は小さい。

一方、オフセットした場合、空冷エアは内輪間座外径面に衝突後、内輪間座外径面に沿って周方向に速い速度で流れ、内輪間座外径表面に長く留まっている。そのため、空冷エアの軸受冷却効果は大きい。

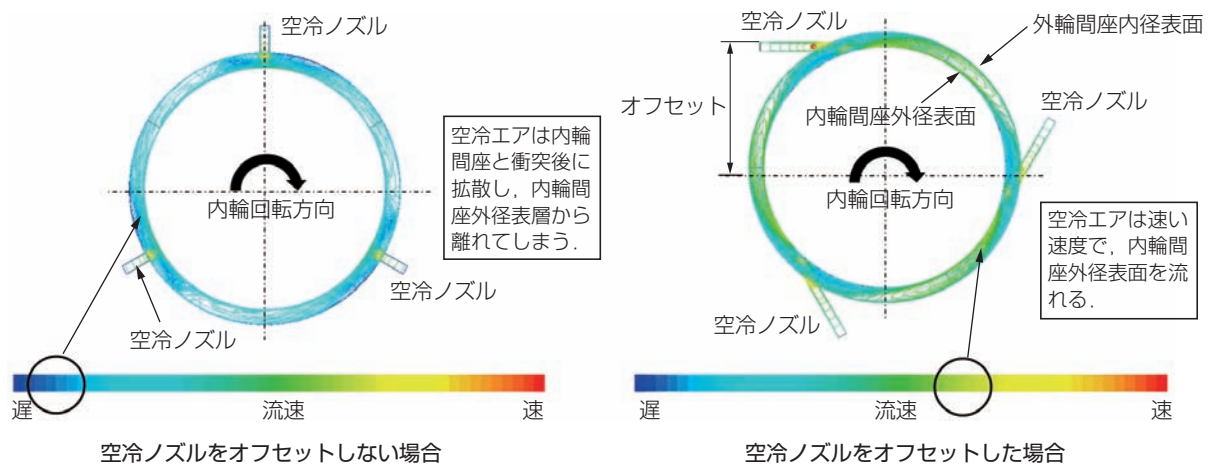


図2 間座内における空冷エアの流れ (流体解析結果)
Cooling air flow in bearing spacer (Fluid analysis results)

4. 冷却効果

空冷間座付軸受の冷却効果を確認するため、軸受の高速運転試験を実施した。試験機構造を図3、試験条件を表1に示し、軸受の温度上昇と騒音値を図4、図5に示す。また、ノズルのオフセット量は、これまでの試験結果¹⁾を基に、内輪間座外径部半径の80%とした。

図4において、空冷エアを供給した場合、空冷エアなしに対し内輪の温度上昇が小さい。この結果、23000min⁻¹ (d_{mn}値207万)での内外輪温度差は、空冷エア量300NL/min時に約14℃低下することを確認した。

この内外輪温度差の低下は、運転時における軸受内部に発生する内輪軌道面の最大接触面圧を約35%低減でき、最高回転速度を約20%向上することができる。また、主軸組込み時の軸受予圧量がONのものは、約1300Nまで高めることができる。

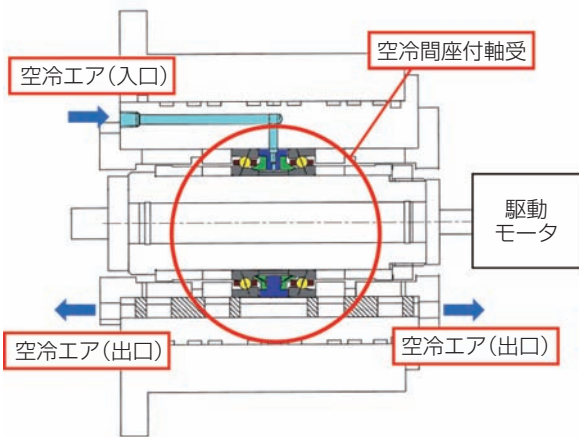


図3 試験機構造
Structure of test machine

表1 試験条件
Test conditions

試験軸受	φ70×φ110×20 5S-2LA-HSLO14相当品
予圧方式	定位置予圧(組込み後予圧ON)
回転速度	0~23000min ⁻¹
潤滑方式	エアオイル潤滑
給油量	0.03ml/10min
潤滑油	ISO VG32
潤滑エア流量	30NL/min
外筒冷却	あり、室温同調(21±1℃)
軸姿勢	横軸

実用的な空冷エア量100NL/minの場合も、23000min⁻¹ (d_{mn}値207万)で内外輪温度差を約4℃、内輪軌道面の最大接触面圧を約6%低減させるため、軸受の最高回転速度を約5%向上可能である。また、主軸組込み時の軸受予圧量ONのものは、約150Nまで高めることができる。

この結果、本技術の採用で高速性と高剛性の両立ができる。

一方、図5において、空冷エア量が300NL/minの場合、中低速域において騒音が大きくなることを確認した。この騒音低減については、次項で紹介する。

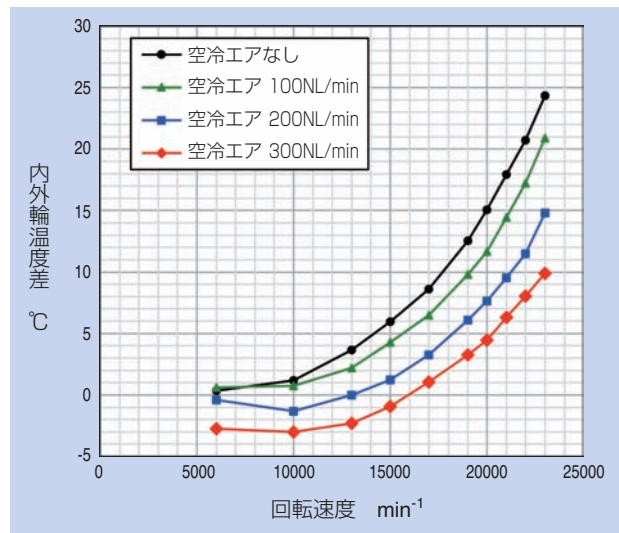


図4 空冷エアの供給有無と内外輪温度差の関係
Cooling air amount and temperature difference between inner ring and outer ring

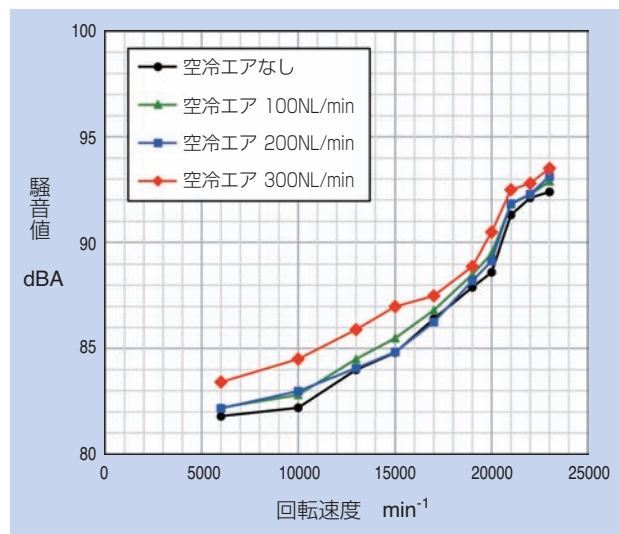


図5 空冷エア量と騒音値の関係
Cooling air amount and noise level

5. 騒音低減の取り組み

空冷エアが多い場合に騒音が大きくなる原因を考察するため、空冷エアの流れを流体解析で可視化した。空冷間座幅22mmにおける解析結果を図6に示す。空冷エアの一部は、空冷ノズルから噴射された直後に軸方向にも拡散し、速い流速を維持したまま軸受部に流入している。この空冷エアと公転する転動体周辺で生じるエアカーテンが強く衝突し、その衝突音によって、騒音が大きくなったと考えられる。

この軸受部へ流入する空冷エア速度を低減させるた

め、内輪間座と外輪間座の間に、円周方向に延びる空間を設けた。この流体解析結果を図7に示す。本空間に噴射された空冷エアは、噴射直後は軸方向に拡散せず周方向に流れ、その後、流速を落としながら軸受空間に流入している。この場合、流入した空冷エアとエアカーテンの衝突は、図6の場合に比べて小さくなるため、衝突音は小さくなる。

上記の空間の効果を確認するため、運転試験で確認した。この結果を図8に示す。内輪間座と外輪間座の間に空間を設けることで、騒音が低減することを確認した。

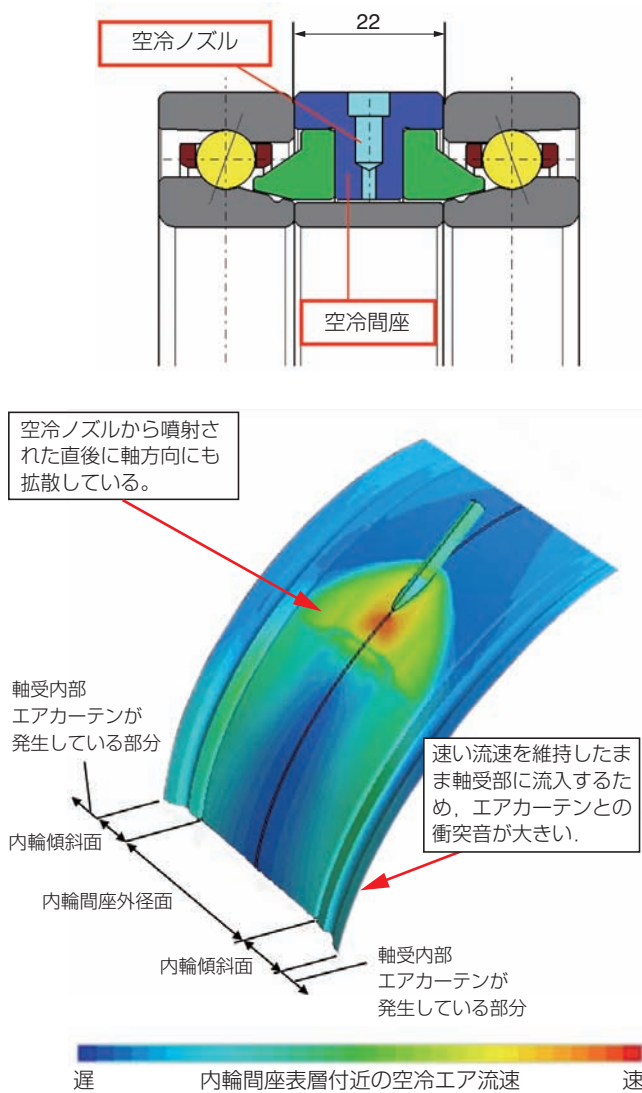


図6 内輪間座表層の空冷エアの流れ
(流体解析結果)
Cooling air flow near inner ring spacer surface
(Fluid analysis results)

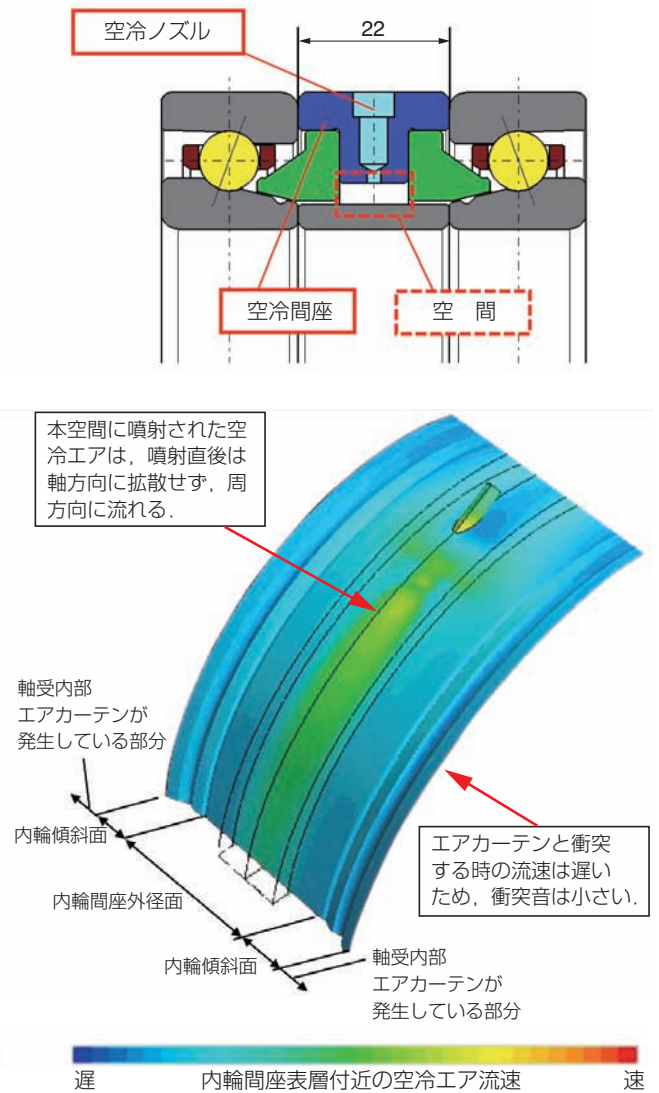


図7 空間を設けた場合の内輪間座表層の空冷エアの流れ
(流体解析結果)
Cooling air flow near inner ring spacer surface
for the case of special space
(Fluid analysis results)

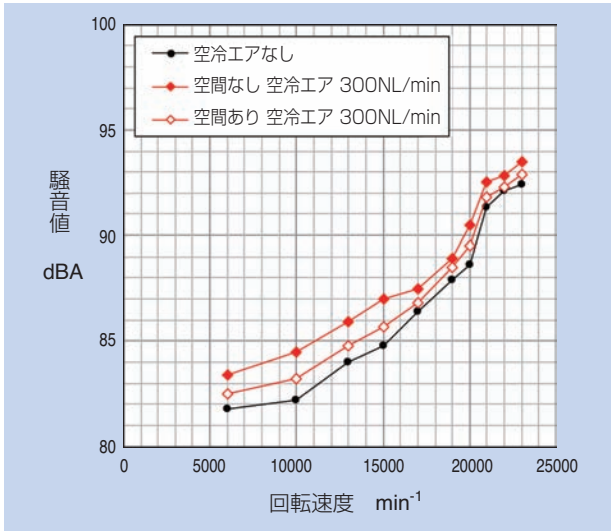


図8 空間有無と騒音の関係
Special space of air cooling spacer and noise level

部までの距離が長く、内輪間座と外輪間座間のすきまを通過する間に、エアの粘性によって流速が低下し、エアカーテンとの衝突による騒音が小さかったためと考えられる。

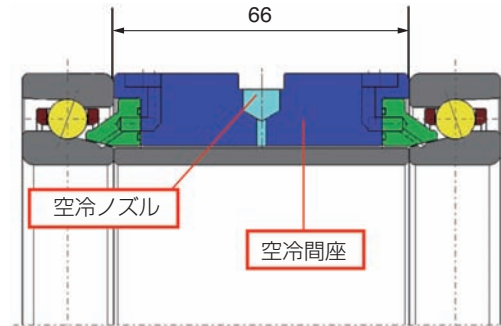


図9 間座幅66mmの空冷間座付軸受
Bearing with air cooling spacer of 66mm width

6. 間座幅と騒音の関係

前項で記載した間座幅22mmに対し、間座幅と騒音の関係を確認するため、図9に示す3倍の幅である66mmの空冷間座で試験した。図10に軸受の温度上昇、図11に騒音の結果を示す。

図10において、空冷エア量300NL/minの場合、23000min⁻¹ (d_{mn} 値207万)での内外輪温度差は約7.5℃、内輪軌道面の最大接触面圧は約20%低下することを確認した。この結果、軸受の最高回転速度は約15%向上し、主軸組込み時の軸受予圧量がONのものが、500Nまで高めることができる。

また、実用的な空冷エア量100NL/minの場合、23000min⁻¹ (d_{mn} 値207万)での内外輪温度差は約2.5℃、内輪軌道面の最大接触面圧は約5%低下することを確認した。この結果、軸受の最高回転速度は約5%向上し、主軸組込み時の軸受予圧量ONのものが、約90Nまで高めることができる。以上から、空冷間座幅66mmにおいても軸受冷却効果が得られること確認した。

一方、図11より、空冷間座幅66mmでは、空冷エア量300NL/minかつ、内輪間座と外輪間座の間に空間がない場合でも、騒音値の上昇は認められなかった。

この原因を考察するため、空冷間座幅66mmにおける空冷エアの流れを解析し、この結果を図12に示す。空冷間座幅66mmで内輪間座と外輪間座の間に空間がない場合、空冷エアの一部は空冷ノズルから噴射された直後に軸方向に拡散している。しかし、軸受

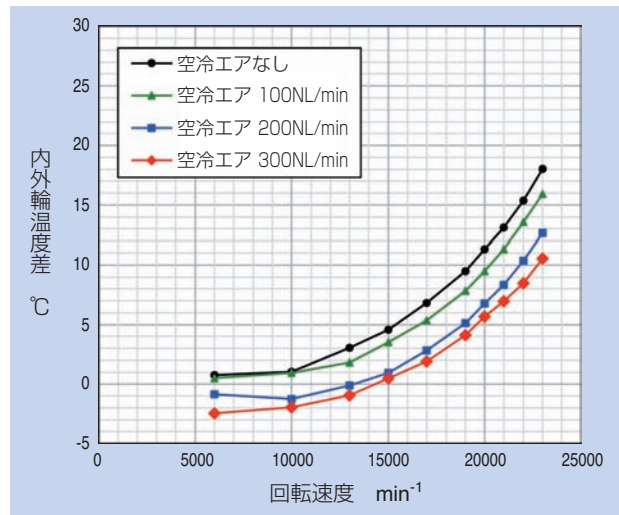


図10 間座幅66mmの時の内外輪温度差
Temperature difference between inner ring and outer ring of bearings with air cooling spacer 66mm width

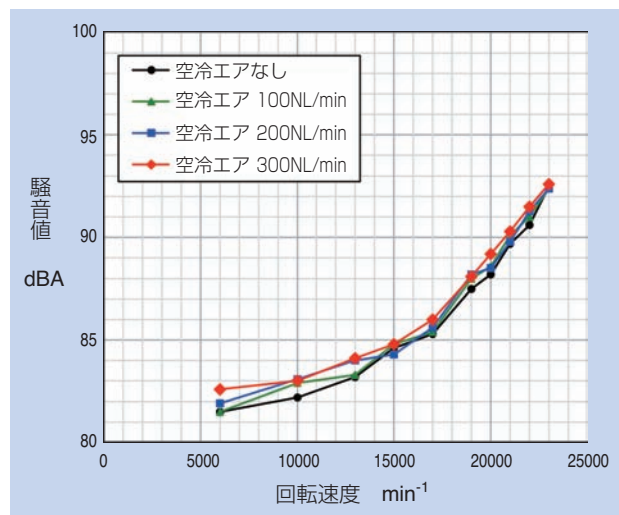


図11 間座幅66mmの時の騒音値
Noise level of bearings with air cooling spacer 66mm width

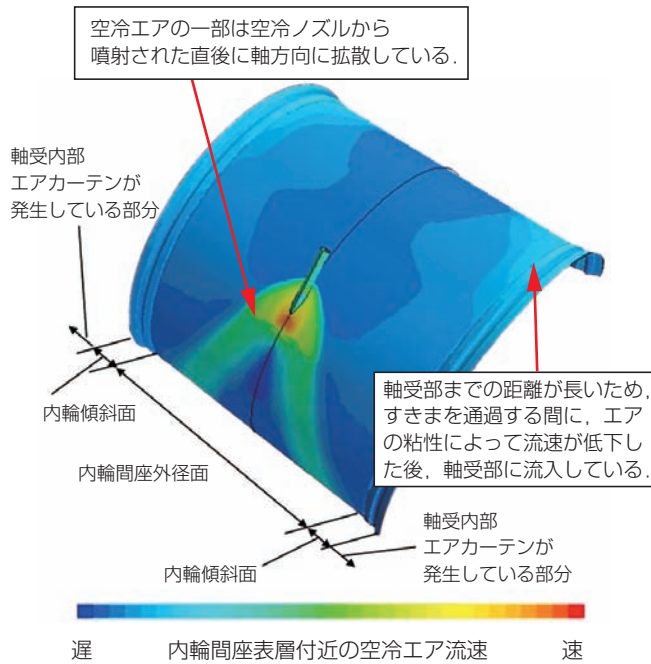


図12 間座幅66mmにおける空冷エアの流れ
(流体解析結果)
Cooling air flow in bearing 66mm spacer
(Fluid analysis results)

7. まとめ

NTNは工作機械主軸における軸受の空冷技術を用いることで高いレベルで高速、高剛性を両立した。この新たな技術で開発した「工作機械主軸用空冷間座付軸受」は、工作機械の更なる高速化、高剛性化、信頼性向上に寄与するものと考え、モノづくりに貢献していきたい所存である。

参考文献

- 1) 藤井健次・森正継・太田好美：工作機械主軸用エアオイル潤滑軸受の低騒音化，精密工学会2000年秋季大会講演論文集（2000）449.
- 2) 赤松良信・森正継：エアオイル潤滑における供給油量の微小化 NTN TECHNICAL REVIEW, No.72（2004）.
- 3) 恩田裕士・水谷守・森正継：工作機械主軸用空冷間座付き軸受 NTN TECHNICAL REVIEW, No.80（2012）.
- 4) NTNカタログ 精密転がり軸受. CAT.No.2260-V/J 12.09.01.

執筆者近影



恩田 裕士
産業機械事業本部
工作機・航空宇宙技術部



深田 貴久夫
産業機械事業本部
工作機・航空宇宙技術部



山本 庸平
産業機械事業本部
産業機械技術部



吉野 真人
先端技術研究所

[製品紹介]

工作機械主軸用高速アンギュラ玉軸受の新樹脂製保持器

New Engineering Plastic Cage of High Speed Angular Contact Ball Bearings for Machine Tools

アルテージ
ULTAGE

井上 和香奈* Wakana INOUE
古山 峰夫* Mineo KOYAMA
鬼塚 宗一郎** Soichiro ONITSUKA

工作機械の高速化・高剛性化・信頼性向上に因るため、主軸用高速アンギュラ玉軸受に使用する新しい樹脂保持器を開発した。この保持器は、耐熱性に優れた樹脂材料を用いるとともに、ボールを配置するポケット部の形状を最適化している。これにより、従来のポリアミド樹脂製の保持器に対し、より高速域での適用を可能にした。本稿では、開発した保持器の特長と評価試験結果を紹介する。

To support the high-speed, high-rigidity and high-reliability requirements of machine tools, NTN developed new resin cage of high speed angular contact ball bearings for machine tools. The new cage has good characteristics in high-temperature range and optimized pocket design. With the modifications, the cage can be applied higher speed range than conventional one. In this document, we introduce the design points and test data.

1. はじめに

工作機械の主軸回転速度は、金型加工用のマシンングセンタに代表されるように、加工面の品位や加工効率の向上を目的に高速化が進められてきた。これに因るため、NTNは軸受の内輪、外輪に特殊材料・特殊表面処理を適用するとともに、内部設計を最適化した高速アンギュラ玉軸受ULTAGEシリーズ※¹HSEタイプを商品化している。

HSE軸受は、高速性に配慮し、フェノール樹脂製のもみ抜き保持器を標準採用しているが、回転速度の指標である d_{mn} 値100万以下の中低速主軸については、コストを配慮したポリアミド樹脂製の保持器を多く用いている。今回、これまでのフェノール樹脂製のもみ抜き保持器を適用していた高速領域の一部に、開発した新しいポリアミド樹脂製の保持器の適用を可能にした。

本稿では、開発保持器の特長と評価結果を紹介する。

2. 高速アンギュラ玉軸受HSEタイプ

図1に示す高速アンギュラ玉軸受HSEタイプは、内輪、外輪に耐摩耗性・耐焼付性に優れた特殊材料と表面改質を採用し、更に高速性・高剛性・高信頼性を考慮した内部設計としている。これにより、主軸の組み込み後予圧量を確認しながら、高速運転が可能となり、高速旋盤やマシンングセンタの主軸に広く採用されている。

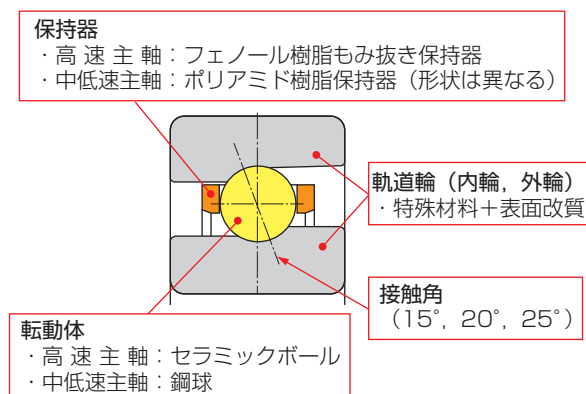


図1 高速アンギュラ玉軸受 HSE タイプ
High speed angular contact ball bearings HSE type

*産業機械事業本部 工作機・航空宇宙技術部

**産業機械事業本部 産業機械技術部

※1 ULTAGE (アルテージ) は、Ultimate【究極の】+Stage【ステージ】を組合せた造語で、精密軸受の究極を求めるNTNの考えを表現したものである。

主軸の使用条件に合わせて、転動体を鋼球、またはセラミックボールにしたり、内輪、外輪との接触角（15°、20°、25°）の設定が可能である。

3. 新樹脂保持器の特長

3.1 従来のポリアミド樹脂保持器の課題

従来のポリアミド樹脂保持器を組み込んだ軸受を d_{mn} 値100万超で高速運転した後の保持器ポケット部の状態を図2に示す。運転条件によるが、保持器ポケットと転動体の接触部が局部的に溶解、摩耗する。こうした損傷は過酷な運転を重ねるうちに進行し、軸受の異常な温度上昇や焼き付きに繋がる場合がある。

保持器ポケット部の損傷プロセスを図3に示す。工作機械の主軸が高速で運転する際、保持器のポケットと転動体の間で高速滑り接触が生じる。図4に主軸回転速度と転動体の周速の関係を示す。主軸径70mm、回転速度15000 min^{-1} のマシニングセンタ主軸の場合、転動体の周速は35 m/s 程度となり、更に高速の主軸では40 m/s を超える場合もある。

また、高速運転時は、転動体と軌道面間の発熱から拡大する内輪と外輪の温度差や、内輪と転動体に作用する遠心力により、軸受の予圧が増大する。このため、各転動体荷重の増加に繋がり、保持器ポケットの転動体との接触部はより厳しい接触状態となる。

この結果、高速運転時は保持器ポケットの発熱が局部的に大きくなり、潤滑不良や溶解、摩耗を生じやすくなる。

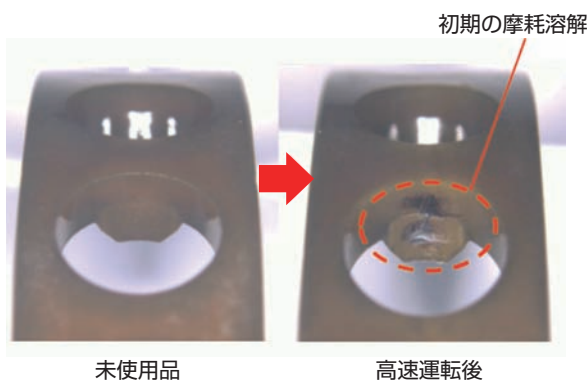


図2 従来のポリアミド保持器ポケット部における状態変化
Conventional cage pocket after high speed operation

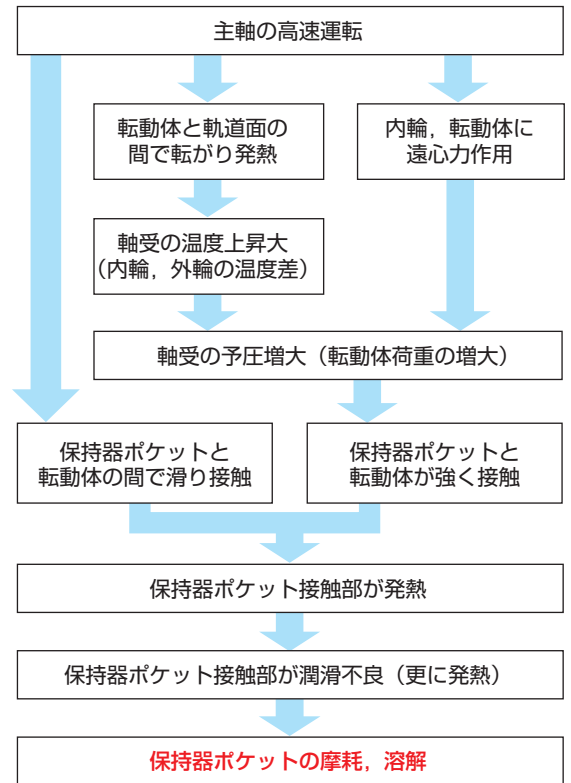


図3 高速運転時における保持器ポケット部の損傷プロセス
Cage damage process in high speed operation

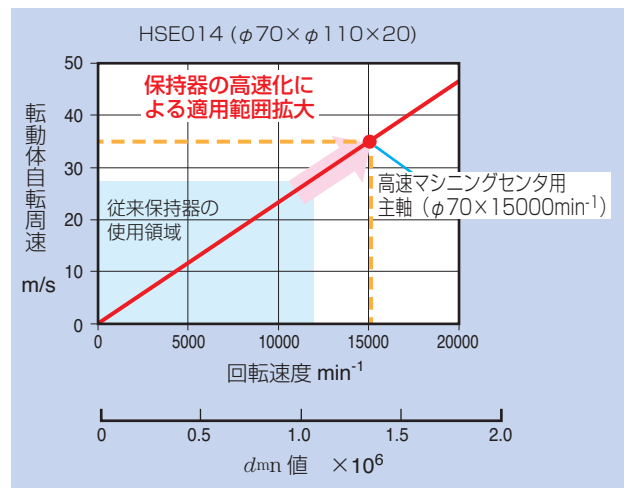


図4 転動体自転周速
Relationship between bearing rotating speed and rolling element surface velocity

3.2 高融点ポリアミド樹脂材料の採用

前項で述べたように、樹脂保持器の高速性を高めるためには、表1に示す通り、特にガラス転移点や融点が高く、保持器ポケットの局部的な摩耗や溶解が生じにくい材料を適用する必要がある。

表2に開発した保持器の材料特性を示す。開発保持器の材料は、半芳香族の高融点ポリアミドを採用した。従来保持器のポリアミドに比べ、融点、ガラス転移温度が高く、高温における強度劣化や寸法変化が小さい。

図5に温度に対する動的弾性率^{*2}の変化を示す。従来保持器のポリアミドは、ガラス転移温度付近の50℃付近から動的弾性率の低下が認められるが、開発保持器の高融点ポリアミドは、ガラス転移温度が高く、120℃付近まで低下傾向が緩やかである。このため、保持器ポケットが転動体との高速滑り接触によって発熱した場合、動的弾性率の低下に伴う転動体との接触部面積の増大や、それに伴う更なる発熱を抑えることができる。

開発保持器材料の評価として、従来品と同一形状の保持器を製作し、比較した。

図6に示す試験機に対し、図7はエアオイル潤滑での試験結果、図8はグリース潤滑での試験結果を示す。

両保持器に温度上昇の差は認められないものの、エアオイル潤滑、グリース潤滑とも、開発保持器の樹脂が従来のポリアミド樹脂より、高速まで使用できることを確認した。

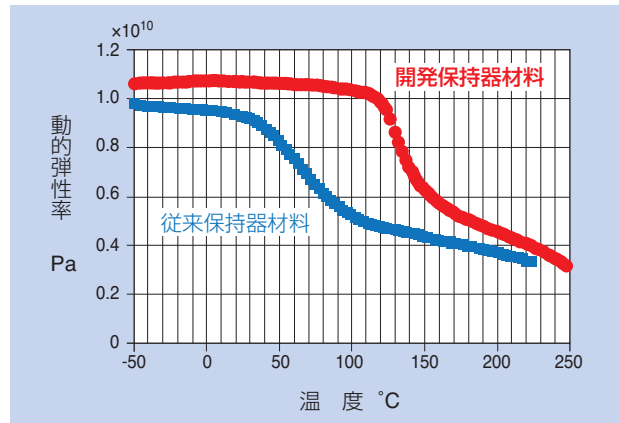


図5 温度に対する動的弾性率の変化
Relationship between the dynamic modulus of elasticity to temperature

表1 高速運転に対応するための保持器材料の必要特性
The necessary characteristic of cage material for high speed operation

	必要特性	目的
1	・吸水性が低く、寸法変化が小さい ・線膨張係数が小さい	寸法バラツキが小さく、安定した使用が可能
2	・引張強度、曲げ強度が強い	高速運転で変形し難い
3	・ガラス転移温度が高い ・融点が高い	高速滑り接触に対し、摩耗、溶解し難い
4	・摺動性に優れる	
5	・射出成形性が良い	品質が安定
6	・低コスト	価格面での制約を受けにくく、適用しやすい

表2 材料特性
Characteristic of cage material

項目	従来保持器材料	開発保持器材料
樹脂の種類	ポリアミド	高融点ポリアミド
融点 Tm	°C	260
ガラス転移温度 Tg	°C	58
引張強度	MPa	160
吸水率	%	2~3
		0.2

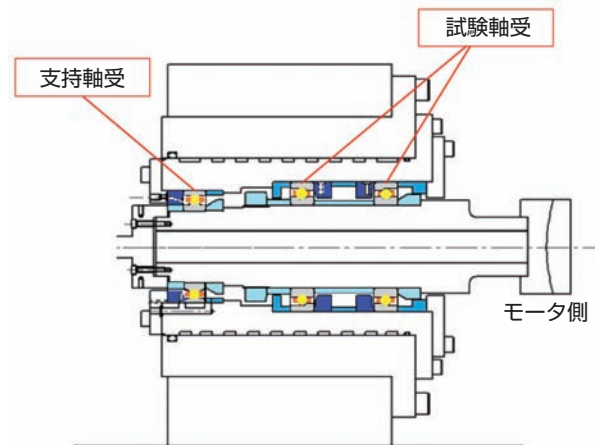


図6 試験機
Test spindle

*2 動的弾性率は、試験片に正弦的な振幅を与え、その応答から弾性率を求めている。

【試験条件】

試験軸受	5S-2LA-HSE014DB (接触角20°) φ70×φ110×20 背面組合せ
予 圧	定位置予圧 組み込み時予圧量 300N
エアオイル潤滑	給油量 0.03mℓ / 8min エア流量 40Nℓ / min
外筒冷却	あり

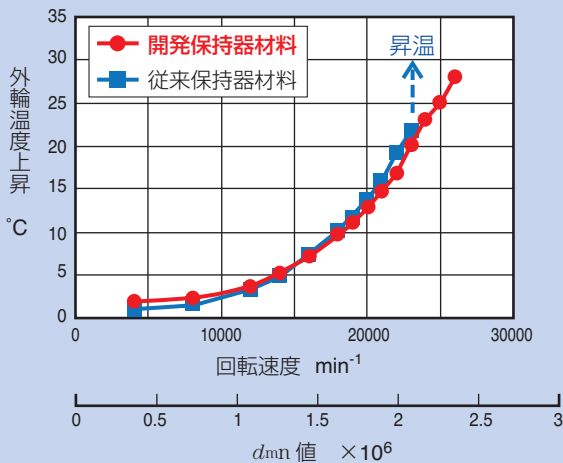


図7 エアオイル潤滑，セラミックボールでの試験結果
Test result under air-oil lubrication with ceramic ball

【試験条件】

試験軸受	2LA-HSE014DB (接触角20°) φ70×φ110×20 背面組合せ
予 圧	定位置予圧 組み込み時予圧量 300N
グリース潤滑	NTN SE-1
外筒冷却	あり

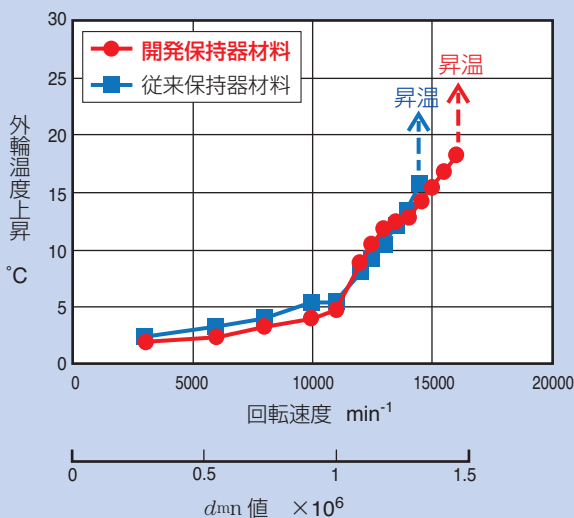


図8 グリース潤滑，鋼球での試験結果
Test result under grease lubrication with steel ball

3.3 保持器形状の最適化

開発した保持器のポケット形状を図9に示す。開発保持器は、転動体と保持器ポケットの接触部近傍に潤滑用の空間を設けた。この結果、エアオイル潤滑の場合、転動体と保持器ポケットの接触位置で円滑な給排油が可能となった。また、グリース潤滑の場合は、同接触部近傍のグリース保持に寄与し、高速運転時の潤滑信頼性を高めている。

さらに、開発保持器は、回転方向と軸方向のそれぞれの案内面となる転動体との接触部を平面としており（図9の平面①、平面②）、従来のポリアミド樹脂保持器の円孔接触部に比べ、転動体との接触部面積を小さくすることで、発熱を抑えることができる。

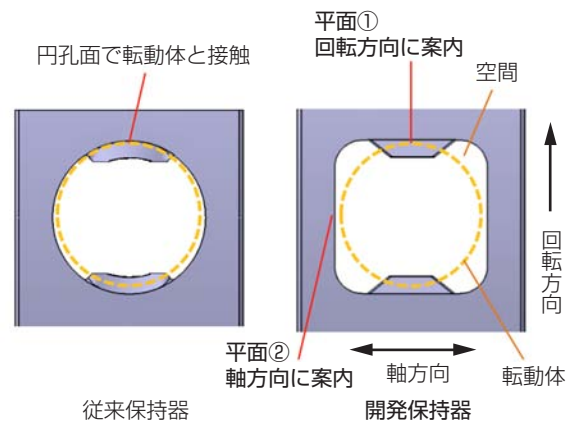


図9 保持器ポケット形状
Cage pocket shape

4. 開発保持器の性能

セラミックボール入りのHSE軸受にエアオイル潤滑とグリース潤滑，ならびに，鋼球を使用したグリース潤滑での高速運転試験を図6で示した試験機で評価した。

この結果を図10、図11および、図12に示す。開発保持器は従来の保持器に対し、温度上昇が少なく、より高速での運転が可能であることを確認した。

【試験条件】

試験軸受	5S-2LA-HSE014DB (接触角20°) φ70×φ110×20 背面組合せ
予 圧	定位置予圧 組み込み時予圧量 300N
エアオイル潤滑	給油量 0.03mℓ/8min エア流量 40Nℓ/min
外筒冷却	あり

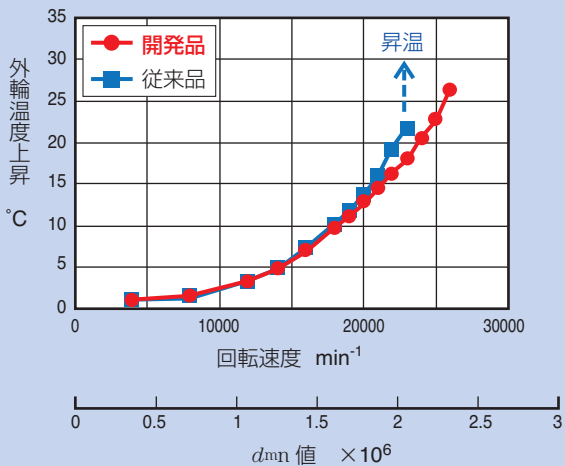


図10 エアオイル潤滑，セラミックボールでの試験結果
Test result under air-oil lubrication with ceramic ball

【試験条件】

試験軸受	2LA-HSE014DB (接触角20°) φ70×φ110×20 背面組合せ
予 圧	定位置予圧 組み込み時予圧量 300N
グリース潤滑	NTN SE-1
外筒冷却	あり

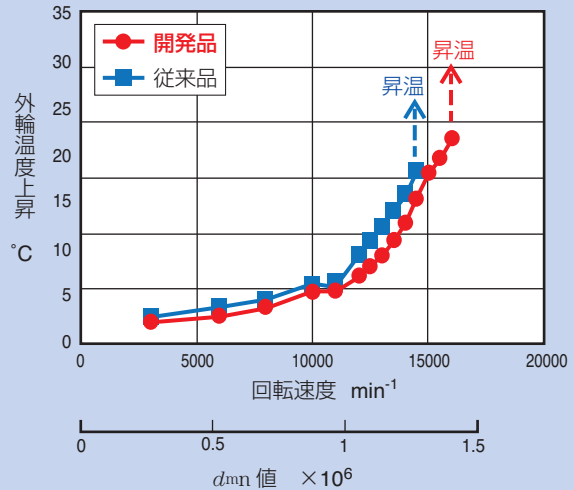


図12 グリース潤滑，鋼球での試験結果
Test result under grease lubrication with steel ball

【試験条件】

試験軸受	5S-2LA-HSE014DB (接触角20°) φ70×φ110×20 背面組合せ
予 圧	定位置予圧 組み込み時予圧量 300N
グリース潤滑	NTN SE-1
外筒冷却	あり

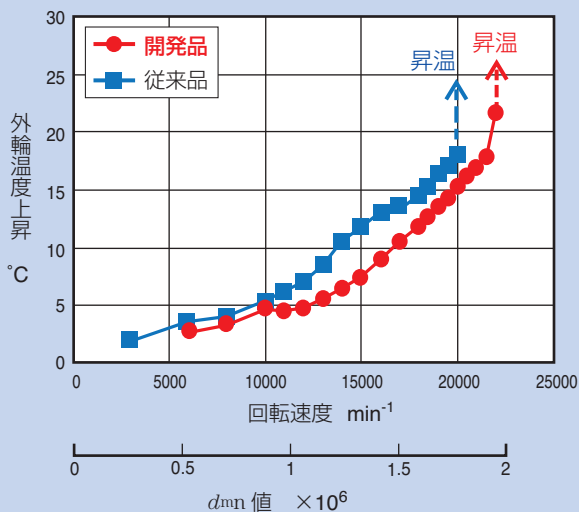


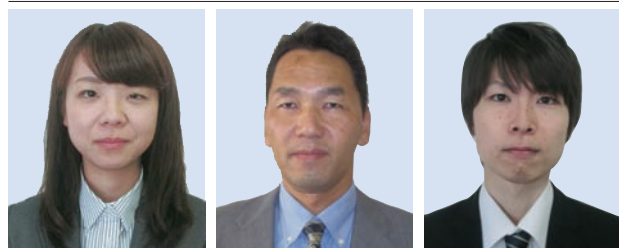
図11 グリース潤滑，セラミックボールでの試験結果
Test result under grease lubrication with ceramic ball

5. まとめ

工作機械主軸用高速アンギュラ玉軸受の保持器において、高融点ポリアミド樹脂と新形状を採用し、従来のポリアミド樹脂保持器に対し、高速性能を高めた。これにより、これまでフェノール樹脂もみ抜き保持器を適用していた領域の一部に、開発したポリアミド樹脂保持器の適用を可能にした。この結果、セラミックボールを採用したHSE軸受のエアオイル潤滑において $d_{mn} 160$ 万で使用できる保持器として市場展開する。

今後も、工作機械の更なる高速化、高剛性化、信頼性向上に寄与、貢献するため、主軸用軸受の性能向上に取り組んでいく所存である。

執筆者近影



井上 和香奈

産業機械事業本部
工作機・航空宇宙技術部

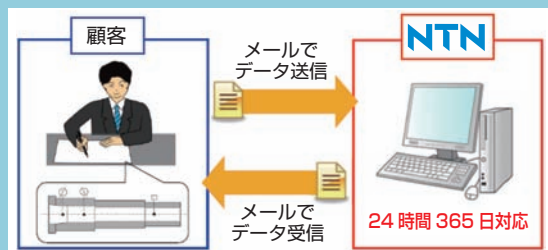
古山 峰夫

産業機械事業本部
工作機・航空宇宙技術部

鬼塚 宗一郎

産業機械事業本部
産業機械技術部

工作機械主軸用軸受技術計算システム Bearing Technical Calculation System for Machine Tool Spindles



植田 敬一* Keiichi UEDA
 恩田 裕士* Yushi ONDA
 橋爪 翔平* Shouhei HASHIZUME

近年、工作機械メーカーやスピンドルメーカーでは、ユーザのニーズに即応した多様な製品開発が行われている。この開発活動を支援するため、NTNは工作機械の主軸に使用される精密転がり軸受を対象に、顧客が主軸の剛性や軸受寿命などの特性値を短時間で自動計算できる「工作機械主軸用軸受技術計算システム」を新たに開発した。本稿では、システムの特長、構成、機能について紹介する。

In recent years, machine tool and spindle manufactures have been developing various products which can meet the new customer demands. To support the activities, NTN developed the bearing technical calculation system for machine tool spindles. Machine tool and spindle manufactures can calculate various characteristics like spindle rigidities and fatigue life of spindle bearings through the system in short time.

Features, mechanism and functions of the system are introduced below.

1. はじめに

工作機械の主軸は、工作機械の加工精度や生産性を左右する基幹要素であり、剛性などの重要特性は、使用する軸受の形式、配列、配置、予圧などで決まる。

このため、工作機械メーカー及びスピンドルの専門メーカー（以下、顧客）が主軸を設計する際には、軸受の仕様とそれによって決まる主軸の特性を計算で求め、目標を満足するかどうか確認する必要がある。

上記の計算は、基本的に軸受メーカーが実施しているため、軸受メーカーは顧客から提示された使用条件などの情報を基に、複数の主軸設計候補の特性値を迅速かつ詳細に計算し、顧客に回答することが求められている。

また、近年は工作機械の加工物、加工法、ユーザがますます多様化しており、主軸についてはこれまでの高速、高剛性、高精度に加え、複合化、小型化、環境指向などが求められている。これらのニーズに適合する主軸を設計するためには、より多くの検討や提案が必要であり、主軸の設計を行う頻度は増加している。

このため、NTNは顧客の設計を支援し、工作機械の開発リードタイム削減に貢献する新たなツールとして、顧客が軸受や主軸の特性値を短時間で自動計算できる工作機械主軸用軸受技術計算システムを開発した。

本稿では、システムの特長、構成、機能について紹介する。

2. 概要

開発した技術計算システムは、軸受の形式、配列、予圧方式が異なる10種類の主軸レイアウトの特性値を計算することができる。この概要を図1に示す。

顧客は、軸受形式や使用条件など、計算に必要なデータを専用のExcel[®]*1ファイルに入力し、ファイルをNTNの専用サーバに電子メールで送信する。これを受信したサーバは入力情報を基に自動計算を行い、主軸剛性や軸受寿命などの計算結果を即座に顧客に自動返信する。NTNが顧客から計算要求を受け、NTNで計算し報告書として回答するまで、これまでは最短で1日程度*2を要していた。しかし、本システムは顧客

*産業機械事業本部 工作機・航空宇宙技術部

※1 Excel[®]は、米国 Microsoft Corporationの米国及びその他の国における商標または登録商標である。

※2 工作機械主軸用軸受の一般的な技術計算所要時間であり、軸受計算内容により異なる。

がメールを発信してから約10分で計算結果が返信される。

本システムは、電子メールの受信から計算結果の返信までをサーバが自動対応するため、顧客とNTNの間の情報の受け渡しに要する時間を大幅に省略することができる。また、顧客が自由に何回でも計算できるため、主軸設計案の絞り込み時間を短縮することも可能となる。さらに、サーバが24時間365日自動対応するため、顧客は時間の制約なく利用することができる。

軸受の最終仕様については、顧客とNTNで打合せて決定する必要があるが、本システムによりそれまでの設計プロセスを短縮ことができ、主軸や工作機械の開発リードタイム削減に貢献することができる。

3. システムの特長と構成・フロー

3.1 特長

業界初の自動対応・技術計算システム

(1) 主軸用軸受の迅速な技術計算

電子メール送信後約10分(従来は最短で約1日)

(2) 多様な主軸レイアウトの技術計算

10種類の主軸レイアウトが計算可能

(3) 専用サーバ内で自動計算対応

24時間、365日自動対応

(4) 簡便な入出力データの通信

実用的なExcel®ファイルの適用

3.2 構成

図1で示した本システムは、下記①～③の要素で構成されており、顧客がExcel® (Excel 97-2003以降) と電子メールが使用できる環境であれば、本システムを利用することができる。専用プログラムのインストールなど、顧客側で特別な環境設定が不要な点も、本システムの長所の一つとなっている。

- ① 専用サーバ (NTNに設置)
- ② ①にインストールされた専用プログラム
- ③ 顧客と①で入出力情報をやり取りするための専用Excel®ファイル

3.3 フロー

本システムのフローを以下に記載する。順序①～⑤は図1の①～⑤に対応している。⑤の後、顧客とNTNで打合せて軸受の最終仕様を決定する

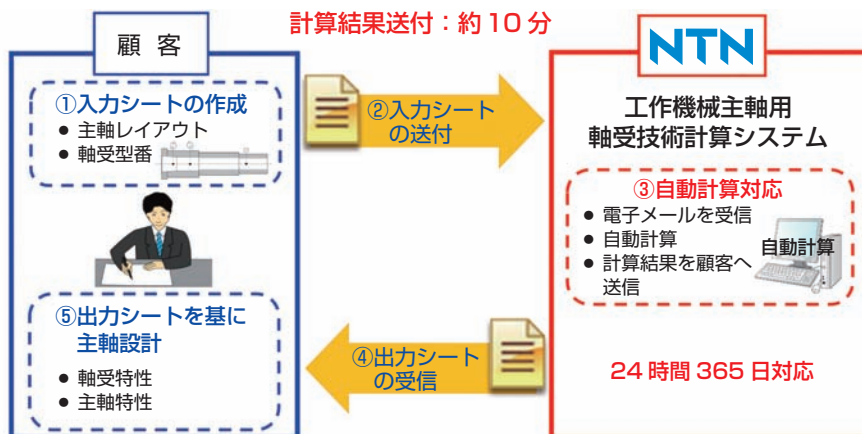
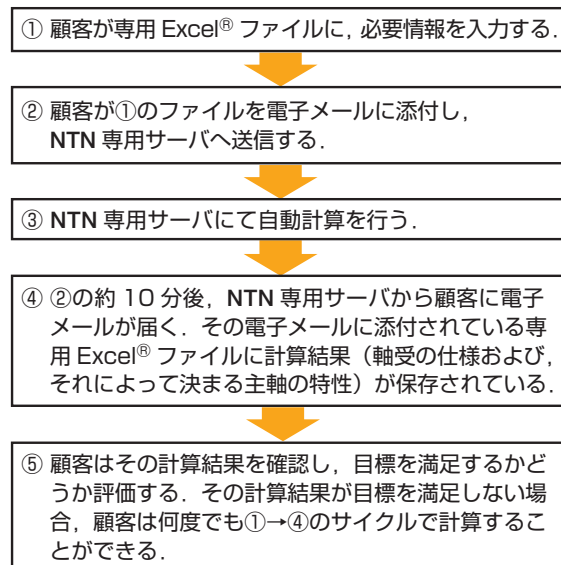


図1 システムの構成とフロー
System flow

4. システムの入出力

4.1 入出力項目

本システムでの入力項目と出力項目を表1に示す。前項で記載した通り、まず顧客が所定のExcel®に入力を行い、本システムが計算し、顧客に計算結果を返信（出力）する。

入力では、主軸に関する項目と運転条件に関する項目を入力する。主軸については、図2に示す10種類のレイアウトの選択が可能であり、様々な主軸設計候補を作成することができる。

出力については、軸受の予圧荷重、ばね定数、転動疲労寿命とともに、主軸への組込時剛性（ラジアル方向、アキシアル方向）が得られる。顧客はその結果を確認し、目標を満足するかどうか評価する。

なお、主軸レイアウトについては今後も順次種類を増やしていく。

表1 入力項目及び出力項目
Input and output items

入力項目	【主軸に関する項目】 ・主軸レイアウト 10通りのレイアウトから選択 ・運転条件 回転速度や外部荷重 など
	【軸受に関する項目】 ・軸受型番, 軸受位置 ・予圧, すきま ・はめあい ・内外輪間座調整量 など
出力項目	【軸受特性】 ・予圧荷重, ばね定数, 転動疲労寿命
	【主軸剛性】 ・組込時剛性 (ラジアル, アキシアル)

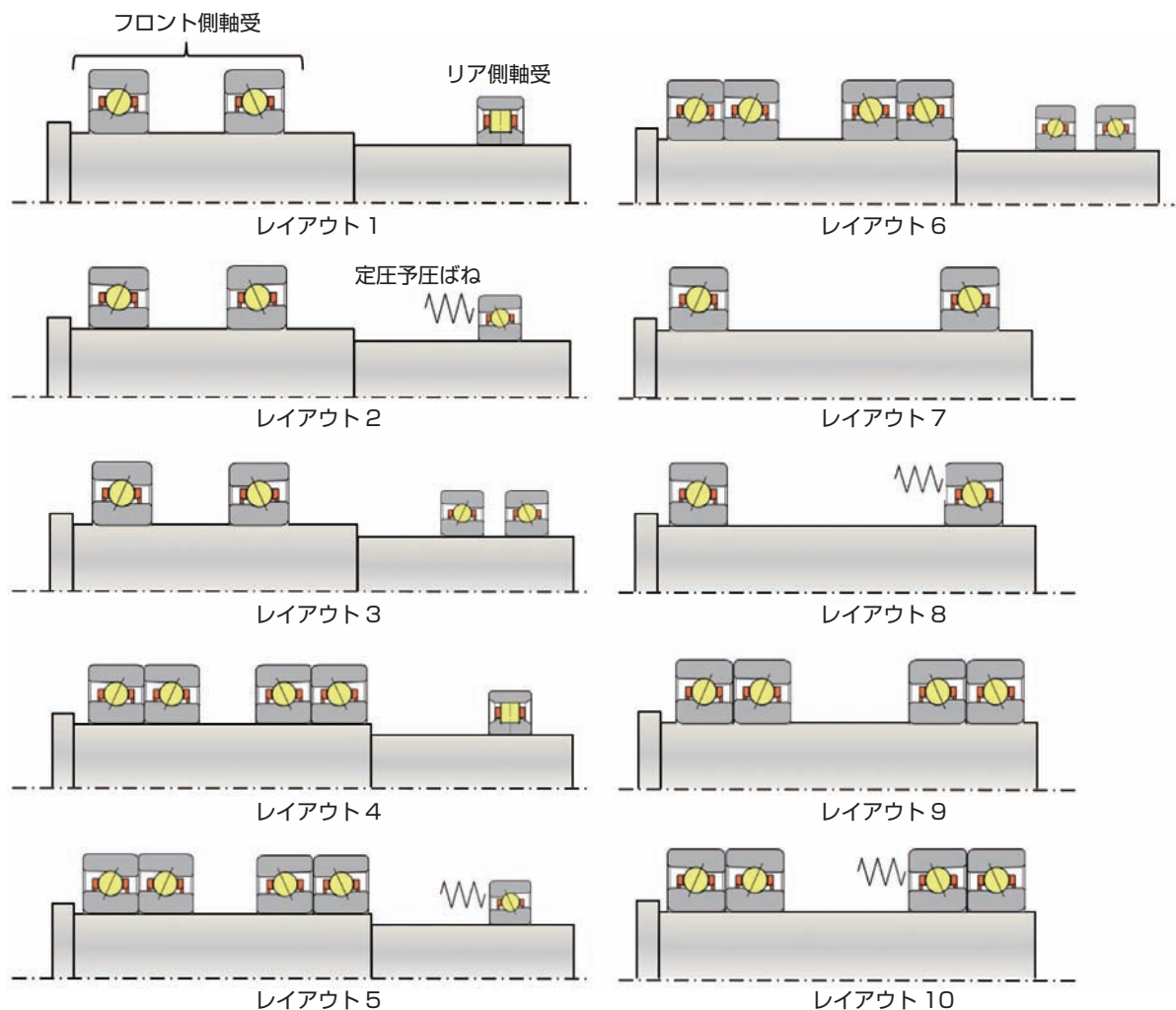


図2 本システムの主軸レイアウト
Spindle layout

4.2 入出力画面例

顧客は、図2の主軸レイアウト群の中から検討したいレイアウトを選択し、図3に示す専用のExcel®ファイルの網掛けセルに必要情報を入力する。同ファイルは、入力項目をチェックする機能を有しており、顧客は入力に不足や誤りがないかを簡単に確認することができる。

入力完了後、顧客は同ファイルをNTNの専用サーバに電子メールで送信する。

これを受信したサーバは、入力情報を基に自動計算を行い、図4に示す同ファイルの出力画面に主軸剛性などの計算結果を自動入力するとともに、同ファイルを顧客へ自動返信する。

顧客は、サーバに電子メールを送信した後、約10分で計算結果を得ることができる。

(Spindle layout 1) Input sheet of automatic technical calculation for spindle bearings

Spindle layout must be input.

For New Technology Network
NTN
INPUT CHECK

1. Bearings arrangement and preload

Number of bearing	Bearing part number	Bearing type	Bearing position [mm]	Contact angle [deg]	Orientation	Kind of preload	Preload value [N]		Radial clearance after shaft mounted [mm]	Spindle bore at bearing position [mm]	Inner ring - shaft fit [mm]
							Fixed position preload before spindle assembly	Spring preload			
1		ACBB			+	Fixed					
2	0	ACBB			-	Fixed	0				
3		CRB									

*1. ACBB: Angular contact ball bearing, CRB: Cylindrical roller bearing

図3 入力画面例 (主軸レイアウト1, 抜粋)
Example of input sheet (Spindle layout 1, extract)

(Spindle layout 1) Output sheet of automatic technical calculation for spindle bearings

Error code
Remark

For New Technology Network
NTN

1. Preload and Bearing spring coefficient
(Cutting force, spindle weight and rotor weight are not considered.)

Status	Rotating speed [min-1]	bearing part number	Temperature		Preload [N]	Bearing spring coefficient	
			IR [°C]	OR [°C]		Radial [N/mm]	Axial [N/mm]
After spindle assembly	0	0	20	20			
		0	20	20			
		0	20	20			
Maximum rotating speed	0	0	0	0			
		0	0	0			
		0	0	0			

2. Spindle rigidity after spindle assembly (0min-1)
(Cutting force, spindle weight and rotor weight are not considered.)

Radial

Status	Rotating speed [min-1]	Radial force [kN]	Radial displacement at origin [μ m]
After spindle assembly	0	0	
		0.1	
		0.49	
		0.98	
		2.94	

Axial

Status	Rotating speed [min-1]	Axial force [kN]	Axial displacement at origin [μ m]
After spindle assembly	0	0	
		0.1	
		0.49	
		0.98	
		2.94	

図4 出力画面例 (主軸レイアウト1, 抜粋)
Example of output sheet (Spindle layout 1, extract)

5. 計算例

図4で示した出力例の一部として、図2から選択した主軸レイアウト1に対し、図5に示す軸受、配列、予圧方式を検討した場合の主軸アキシャル剛性の計算結果を図6に示す。

また、複数の主軸設計候補を比較検討する場合には、各候補の特性値計算を同時かつ、素早くできるため、絞り込みに要する時間の短縮が可能となる。

	フロント側	リア側
軸受	高速アンギュラ玉軸受 5S-2LA-HSE020	円筒ころ軸受 N1018HSK
配列	2列背面 (DB)	—
予圧方式	定位置 (GL予圧)	—

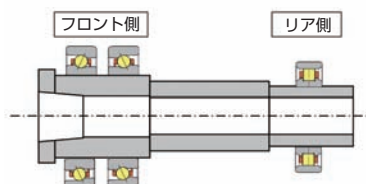


図5 主軸レイアウト1の検討例
Technical study example of spindle layout 1

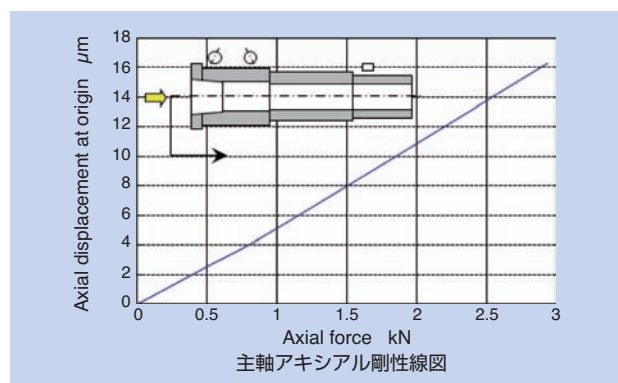


図6 本システムの出力例 (主軸レイアウト1の主軸剛性線図)
Example of calculation result (Axial rigidity of spindle layout 1)

例えば、図5で示したフロント側の軸径100mmの主軸に2列背面組合せ (DB配列) を適用した場合と図7に示す4列背面組合せ (DTBT配列) を適用した場合 (主軸レイアウト4) の剛性を短時間に比較することができる。この場合、図8で示す4列背面組合せが、図6で示した2列背面組合せより高剛性であることがわかる。

	フロント側	リア側
軸受	高速アンギュラ玉軸受 5S-2LA-HSE020	円筒ころ軸受 N1018HSK
配列	4列背面 (DTBT)	—
予圧方式	定位置 (GL予圧)	—

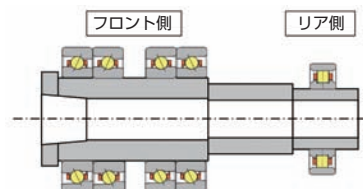


図7 主軸レイアウト4の検討例
Technical study example of spindle layout 4

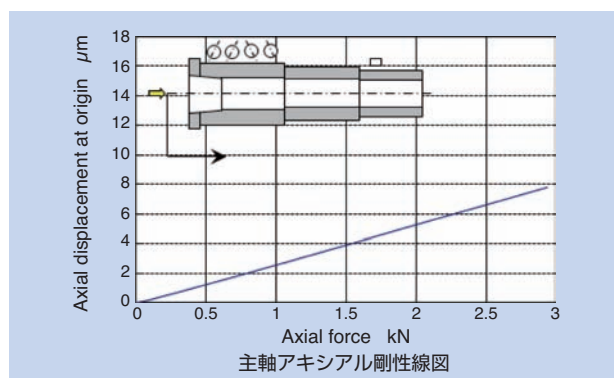


図8 本システムの出力例 (主軸レイアウト4の主軸剛性線図)
Example of calculation result (Axial rigidity of spindle layout 4)

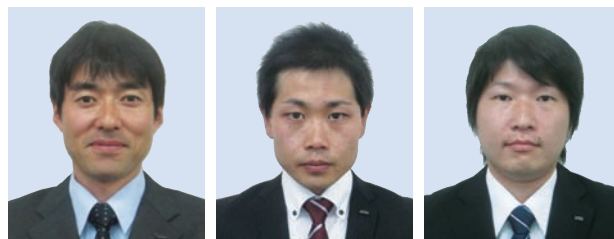
6. まとめ

工作機械メーカーやスピンドルメーカーの多様な製品開発を支援するため、NTNは工作機械の主軸に使用される精密転がり軸受を対象に、軸受や主軸の特性値を短時間で自動計算できる工作機械主軸用軸受技術計算システムを開発した。

本システムにより、NTNの技術サービスをより迅速化し、さらに高い顧客満足を得るとともに、工作機械の開発リードタイム削減に貢献したいと考えている。

今後も、本システムの改良を重ね、より使いやすく、有用性を高めたユーザ・フレンドリーなシステムの構築を目指す。

執筆者近影

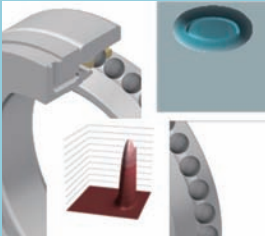


植田 敬一 産業機械事業本部 工作機・航空宇宙技術部
恩田 裕士 産業機械事業本部 工作機・航空宇宙技術部
橋爪 翔平 産業機械事業本部 工作機・航空宇宙技術部

エアオイル潤滑されたアンギュラ玉軸受の摩擦トルクの推定方法

Estimation Method for Friction Torque of Air-oil Lubricated Angular Contact Ball Bearings

藤原 宏樹* Hiroki FUJIWARA



高速スピンドルに使用するアンギュラ玉軸受にはエアオイル潤滑が多用されるが、スターベーションと呼ばれる潤滑油量不足状態の発生により、摩擦トルクの主要因である転がり粘性抵抗が減少する。摩擦トルクの実験結果から推測した転がり粘性抵抗と、十分潤滑の場合の転がり粘性抵抗の計算値を比較し、使用条件から転がり粘性抵抗の減少係数を求める式を提案した。NTN独自の十分潤滑の転がり粘性抵抗の理論回帰式にこの減少係数を乗じ、差動すべり、スピン、弾性ヒステリシス損失、保持器案内面の摩擦を考慮して軸受の摩擦トルクを求めた。

Angular contact ball bearings for high-speed spindles are lubricated by air-oil lubrication. A main factor of bearing friction torque is rolling viscous resistance. On the air-oil lubricated bearings, oil starvation leads to decrease in the rolling viscous resistance. In this article, the expression of deduction factor of rolling viscous resistance under the driving condition is proposed. It is derived by comparing between rolling viscous resistances estimated from measured friction torques of angular contact ball bearings under the air-oil lubrication and calculated rolling viscous resistances under the full lubrication. The friction torque of the bearing is computed with consideration for differential slip, spin, elastic hysteresis loss, cage guiding friction, and the starved rolling viscous resistance. The starved rolling viscous resistance is obtained for product of the deduction factor and the rolling viscous resistance by the NTN original regression formula under the full lubrication.

1. はじめに

高速スピンドルは主軸の熱膨張を抑制するため、主軸用軸受には低発熱であることが要求され、潤滑方法としては軸受の低トルク化が可能なエアオイル潤滑が採用される。エアオイル潤滑では、プランジャポンプの調整により潤滑油量の精密な制御が可能であり、必要最小限の潤滑油を搬送エアによって軌道面近傍のみ供給する。これによって潤滑油の攪拌抵抗をほぼ0とし、さらに、転動体と軌道間の潤滑油量も限界まで削減している。

転動体と軌道輪の弾性流体潤滑 (Elastohydrodynamic Lubrication, 以下, EHL) 接触の入口部に一定量以上の潤滑油が存在するとき、それ以上潤滑油膜厚さが増加しない十分潤滑となるが、損傷防止の観点からは必ずしも十分潤滑である必要はなく、接触する2面間が分離できる程度に油膜が発生していればよい。摩擦トルクの主要因である転がり粘性抵抗はEHL接触入口部の潤滑油量の影響を受けるので、転動体と軌道間の油膜が破断しない程度に積極的にスター

ベーションと呼ばれる油量不足潤滑状態を発生させることで転がり粘性抵抗を低減できる。

油浴潤滑の転がり軸受の摩擦トルクは、差動すべり、スピン、転がり粘性抵抗、転動体と保持器ポケット間の油膜のせん断抵抗などを考慮して計算できる¹⁾。ただし、これは潤滑油が潤滑に存在する場合に適用可能な計算手法であり、エアオイル潤滑の摩擦トルクは十分潤滑時の1/10から1/5ほどの値となり適用できないが、エアオイル潤滑の摩擦トルクの推定について検討を行った報告例は見当たらない。軌道面上に存在する潤滑油量を仮定し、玉の通過に伴う軌道面の潤滑油の掻き分けを考慮してスターベーションの状態を理論的に推定しようとする試みはある^{2), 3)}ものの、エアオイル潤滑時の軌道面に存在する潤滑油量を正確に知ることは困難であり実際への応用には課題がある。

本稿では、エアオイル潤滑のアンギュラ玉軸受について、本軸受特有のスターベーション状態での摩擦トルクの推定方法を提案する。この軸受の摩擦トルクは差動すべり、スピン、転がり粘性抵抗、弾性ヒステリシス損失、保持器案内面と軌道輪間の摩擦からなる。

*先端技術研究所

また、この軸受の潤滑油膜は混合潤滑とならない程度に発生していると考え、差動すべりとスピンによる摩擦トルクはスターベーションの影響を受けないと仮定し、転がり粘性抵抗には実験的に定めた減少係数を与える。この減少係数は摩擦トルクの実験値と十分潤滑の場合の計算値を比較し、実験的に同定した式として提案する。

2. 記号

a	: 接触楕円の長軸半径	s	: すべり率
a_0	: 接触楕円の長軸半径に関する基準値	s_m	: 最大トラクション係数を与えるすべり率
C	: 転がり粘性抵抗の減少係数の定数 (各パラメータの基準値を含む)	s_T	: 玉の通過周期に関する指数
C'	: 転がり粘性抵抗の減少係数の定数	s_v	: 潤滑油の動粘度に関する指数
d_p	: 玉のピッチ円直径	s_a	: 接触楕円の長軸半径に関する指数
F_I	: 差動すべりの内側で生じるトラクション	s_ω	: 角速度に関する指数
F_{II}	: 差動すべりの外側で生じるトラクション	T	: 玉の通過周期
F_{HD}	: 無次元転がり粘性抵抗	T_0	: 玉の通過周期に関する基準値
F_r	: 転がり粘性抵抗	U	: 速度に関するDowsonの無次元パラメータ
F_s	: トラクション	W	: 点接触の荷重に関するDowsonの無次元パラメータ
G	: 材料に関するDowsonの無次元パラメータ	α_0	: 潤滑油の粘度 - 圧力係数
k	: 接触楕円の楕円比	α	: 接触角
l_I	: 差動すべりの内側における、接触点と純転がり点の半径方向の長さ	β	: 玉の自転軸の傾き
l_{II}	: 差動すべりの外側における、接触点と純転がり点の半径方向の長さ	δ	: 純転がり点から接触点までの距離
M	: 玉に発生する自転軸回りのモーメント	μ_t	: トラクション係数
M_r	: 玉/軌道輪間の転がり方向の摩擦による軸受の摩擦トルク	μ_{tmax}	: 最大トラクション係数
m	: F_I , F_{II} によって発生するモーメント	ν	: 潤滑油の動粘度
P_b	: 玉に作用する油膜反力の転がり方向分力	ν_0	: 潤滑油の動粘度に関する基準値
P_e	: 等価系における油膜反力の転がり方向分力	τ	: 玉と軌道輪の接触部のクエット流れによるせん断応力
P_1	: 物体1 (玉) に作用する油膜反力の転がり方向分力	ϕ_r	: 転がり粘性抵抗の減少係数
P_2	: 物体2 (軌道輪) に作用する油膜反力の転がり方向分力	ϕ_{re}	: 転がり粘性抵抗の減少係数 (実験値)
r_1	: 物体1 (玉) の半径	ω	: 角速度
r_2	: 物体2 (軌道輪) の半径	ω_0	: 角速度に関する基準値
r_b	: 玉の半径	ω_b	: 玉の自転角速度
r_b'	: 玉中心から純転がり点までの距離		
r_e	: 等価半径		
S_I	: 内輪接触部の差動すべりの内側の面積		
S_{II}	: 内輪接触部の差動すべりの外側の面積		

添え字

i	: 内輪
o	: 外輪

3. 予圧のみを負荷するアンギュラ玉軸受の静力学解析

高速スピンドル用アンギュラ玉軸受は、一般にフロント側に2列または4列配置し、定位置もしくは定圧予圧を与えて使用する。スピンドルの用途によっては回転中に軽微なラジアル荷重が作用することがあるが、ここではラジアル荷重の影響は無視して予圧のみの純アキシャル荷重とし、玉1個の運動について考察する。アンギュラ玉軸受の静力学解析については藤井が詳細な検討を行っている⁴⁾が、藤井はJonesのコントロール輪理論⁵⁾に基づいて玉の自転軸を定めている。Jonesの理論では、玉は摩擦がより大きいどちらかの軌道輪で純転がりし、他方の軌道輪上のみでス

ピンが生じると仮定している。しかし、実際は、玉の自転軸は力とモーメントが釣り合い、消費エネルギーが最小となるように定まるはずで、以下、すべりによる付加的な力を考慮して玉の静力学的な運動を求める。

3.1 玉と軌道面とのすべりによって発生する力とモーメント

図1は玉1個と内外輪の軸方向断面の模式図であり、接触楕円内のすべりによる力とモーメントを表している。玉に図1のように接線方向の力が作用している時、すべりによって玉に作用する力は次の式で求められる。

$$\begin{aligned} F_{s,i} &= \int \tau_i dS_{II} - \int \tau_i dS_I \\ F_{s,o} &= \int \tau_o dS_{II} - \int \tau_o dS_I \end{aligned} \quad (3.1)$$

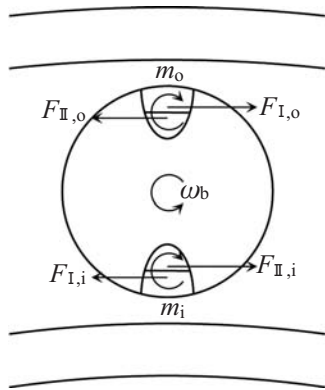


図1 すべりによる力とモーメントの向き
Direction of forces and moments by slip

このとき、すべりによる玉の純転がり点回りのモーメントは次式で計算できる。

$$\begin{aligned} m_i &= \int \tau_i l_I dS_I + \int \tau_i l_{II} dS_{II} \\ m_o &= \int \tau_o l_I dS_I + \int \tau_o l_{II} dS_{II} \end{aligned} \quad (3.2)$$

すべりによる玉の自転軸回りのモーメントは次のように表せる。

$$\begin{aligned} M_i &= \int (r'_b + \delta) \tau_i dS = r_b F_{s,i} - m_i \\ M_o &= \int (r'_b + \delta) \tau_o dS = r_b F_{s,o} - m_o \end{aligned} \quad (3.3)$$

図2より、玉における周方向の力の釣り合いは $F_{s,i} - F_{r,i} + P_{b,i} - F_{s,o} + F_{r,o} - P_{b,o} = 0$ であり、転がり粘性抵抗に関する力には、Zhou-Hoeprich⁶⁾ が述べているように

$$P_e r_e = P_1 r_1 = P_2 r_2 = 2F_r r_e \quad (3.5)$$

の関係があるから

$$F_{s,i} - F_{r,i} + 2 \frac{r_{e,i}}{r_b} F_{r,i} - F_{s,o} + F_{r,o} - 2 \frac{r_{e,o}}{r_b} F_{r,o} = 0 \quad (3.6)$$

と表すことができる。

玉における自転軸回りのモーメントの釣り合いは

$$\begin{aligned} r_b \cos(a_i - \beta) (-F_{r,i} + F_{s,i}) + r_b \cos(a_o - \beta) (-F_{r,o} + F_{s,o}) \\ - m_i \cos(a_i - \beta) - m_o \cos(a_o - \beta) = 0 \end{aligned} \quad (3.7)$$

であって、式(3.3)より

$$\begin{aligned} r_b \cos(a_i - \beta) (-F_{r,i}) + r_b \cos(a_o - \beta) (-F_{r,o}) \\ + M_i \cos(a_i - \beta) + M_o \cos(a_o - \beta) = 0 \end{aligned} \quad (3.8)$$

と書き換えられる。

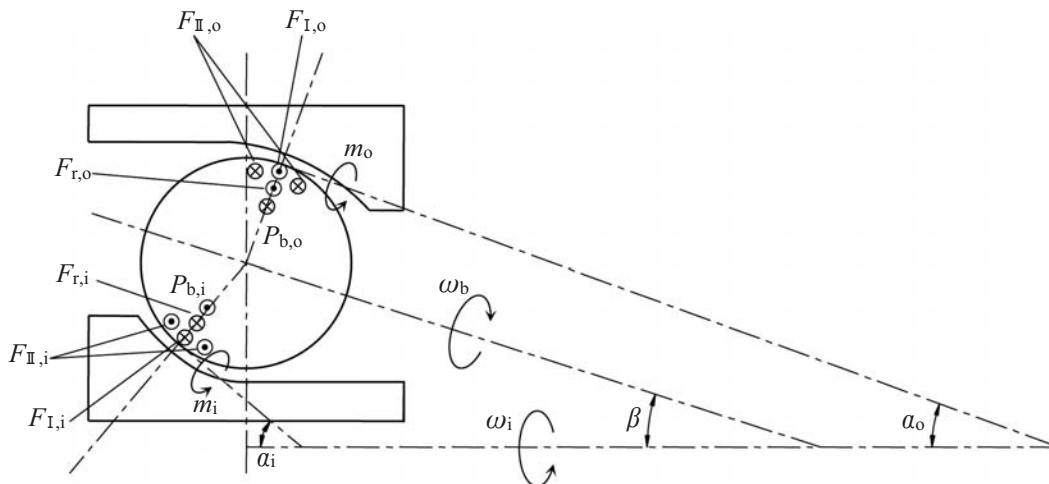


図2 玉に働く力とモーメント
Forces and moments on a ball

図3の外輪に作用するモーメントは式(3.9)で表すことができる。

$$\begin{aligned}
 M_r &= \left(\frac{d_p}{2} + r_b \cos \alpha_o \right) (F_{r,o} + F_{s,o}) - m_o \cos \alpha_o \\
 &= \left(\frac{d_p}{2} + r_b \cos \alpha_o \right) F_{r,o} + \frac{d_p}{2} F_{s,o} + M_o \cos \alpha_o \dots\dots\dots (3.9)
 \end{aligned}$$

これは、玉と軌道輪の接触部で発生する軸受の摩擦トルクである。

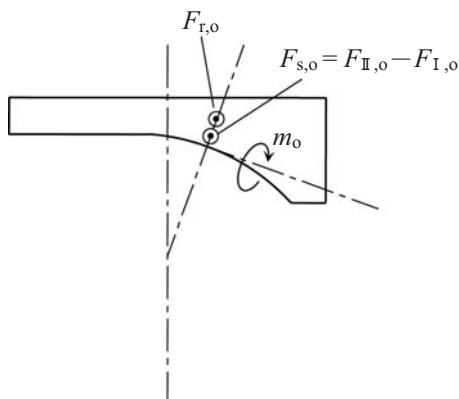


図3 外輪に生じるモーメントを検討する際の力とモーメント

Fores and a moment on an outer ring to calculate the moment on an outer ring

玉の力とモーメントが釣り合い、摩擦トルクが最小となるように、玉の自転速度と公転速度、玉の自転軸の傾きが定まる。

玉の挙動をある状態に定めると、接触面でのすべり分布と転がり粘性抵抗が計算できる。観察点での面圧にトラクション係数を乗じたものが接線力であり、トラクション係数はすべり率の関数として与えられる。ここでは、式(3.10)に示すLee-Hamrockのcircularモデル⁷⁾を採用する。

$$\mu_t = \frac{s/s_m}{\sqrt{1 + (s/s_m)^2}} = \mu_{t \max} \dots\dots\dots (3.10)$$

このモデルでは、最大トラクション係数 μ_{\max} と最大トラクション係数を与えるすべり率 s_m を与える必要があり、ここでは $\mu_{\max} = 0.05$, $s_m = 0.003$ とした。転がり粘性抵抗はスターベーションの影響を考慮し計算するが、その詳細は次章に示す。数値計算では、このすべりと転がり粘性抵抗による力を考慮し収束計算を行う。

4. 転がり粘性抵抗に対するスターベーションの影響

4.1 転がり粘性抵抗の理論回帰式

EHLにおける主要な課題は油膜厚さの検討にあり、Hamrock-Dowson⁸⁾やChittenden et al.⁹⁾などにより多数の理論回帰式が提案されている。一方、転がり粘性抵抗についての報告例は少なく、線接触ではZhou-Hoeprichの式⁶⁾がある他にはEHL理論に基づいて得た計算式は見当たらない。点接触でも転がり粘性抵抗を簡易的に求める式の報告例はほとんどなく、Houpertが提案している式¹⁰⁾はあるが、材料パラメータが含まれておらず粘度-圧力係数が考慮されていない。転がり粘性抵抗は粘度-圧力係数の影響を受けると考える方が自然であり、ここではHoupertの式は採用しない。

藤原は点接触の転がり粘性抵抗に関する理論回帰式を提案しており、無次元転がり粘性抵抗を式(4.1)で定義し、Dowsonらの点接触の無次元数を用いて式(4.2)のようにまとめている¹¹⁾。

$$F_{HD} = \frac{F_r \alpha_o}{r_e^2} \dots\dots\dots (4.1)$$

$$F_{HD} = 44.6 U^{0.694} G^{0.961} W^{0.401} \{1 - 0.962 \exp(-0.818k)\} \dots\dots\dots (4.2)$$

十分潤滑下の転がり粘性抵抗の式としてこの式を採用し、これに転がり粘性抵抗の減少係数を乗じてエアオイル潤滑下での転がり粘性抵抗を求める。

4.2 転がり粘性抵抗の減少係数

軌道面を玉が通過するとき、軌道面上に存在する潤滑油は玉によって掻き分けられるが、次の玉が通過するまでの間に軌道面中央に向かって移動し、EHL油膜入口部の潤滑油量が回復する。潤滑油の回復量は、主に玉の通過周期 T 、潤滑油の動粘度 ν 、接触楕円の長軸半径 a の影響を受けると考えられる。玉の通過周期 T が長いほど回復量は増加する。動粘度 ν が小さいほど潤滑油が移動しやすいために回復量は増加する。玉の接触楕円長軸半径 a が小さいほど潤滑油の移動に必要な距離が短くなるために回復量は増加する。潤滑油に働く遠心力も影響する可能性があるが、内輪側の接触部では遠心力が大きいと潤滑油が軌道面の外側に向かって移動する方向に力が働くために回復量を減少させる一方で、外輪側では潤滑油が軌道面の中央部に向かって移動する方向に力が働くため回復量を増加させ

る。実験上、内輪側で発生するトルクと外輪側で発生するトルクは分離できないので、内輪側でのトルク減少と外輪側でのトルク増加が相殺された結果としての影響を角速度 ω を用いて考慮する。潤滑油量は、スターベーションに影響を及ぼすが、一般的なエアオイル潤滑の潤滑油量程度の場合、実験によれば図4のように潤滑油量の影響は比較的小さいのでここでは無視する。

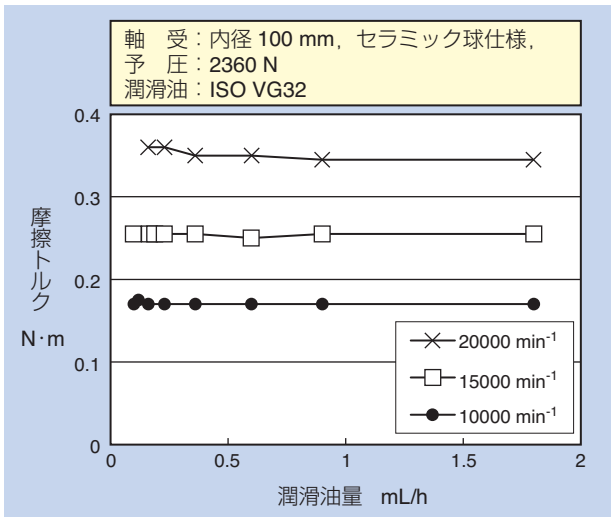


図4 潤滑油量が摩擦トルクに及ぼす影響
Effect of oil quantity on friction torque

転がり粘性抵抗の減少係数は潤滑油の回復量の関数となっており、玉の通過周期 T 、潤滑油の動粘度 ν 、接触楕円の長軸半径 a の関数であると考えられる。転がり粘性抵抗の減少係数は0から1の間であり、それぞれのパラメータはスターベーション係数を1とするような基準値があると考えることが妥当である。そこで、転がり粘性抵抗の減少係数を次のような式で定義する。

$$\phi_r = C' \frac{T^{S_T} \nu^{S_\nu} a^{S_a} \omega^{S_\omega}}{T_0^{S_T} \nu_0^{S_\nu} a_0^{S_a} \omega_0^{S_\omega}} \dots\dots\dots (4.3)$$

$T > T_0$ のとき $T = T_0$
 $\nu > \nu_0$ のとき $\nu = \nu_0$
 $a > a_0$ のとき $a = a_0$
 $\omega > \omega_0$ のとき $\omega = \omega_0$

しかし、基準値 $T_0, \nu_0, a_0, \omega_0$ を実験的に求めることは困難であるから、式 (4.3) を

$$\phi_r = \frac{C'}{T_0^{S_T} \nu_0^{S_\nu} a_0^{S_a} \omega_0^{S_\omega}} T^{S_T} \nu^{S_\nu} a^{S_a} \omega^{S_\omega} = C T^{S_T} \nu^{S_\nu} a^{S_a} \omega^{S_\omega} \dots\dots\dots (4.4)$$

と変形し、 $C, S_T, S_\nu, S_a, S_\omega$ を同定する。

転がり軸受の摩擦に及ぼす要因には転がり粘性抵抗のほか、差動すべり、スピン、弾性ヒステリシス損失などが挙げられる。玉の運動は各種の摩擦力によって生じるすべりによるトラクションとそれらの摩擦抵抗の力学的釣合いによって定まるので、本質的には抵抗を要因ごとに分離することはできないが、要因ごとに与えられる摩擦トルクの総和が軸受の摩擦トルクであると考えられる。ここでは、転がり粘性抵抗の減少係数を同定するために、摩擦トルクの実験値から、計算によって求められる差動すべり、スピン、弾性ヒステリシス損失、保持器案内面の摩擦力による摩擦トルクを減じた値と十分潤滑を仮定して計算によって得られた転がり粘性抵抗による摩擦トルクを比較する。実験値から求めた転がり粘性抵抗を十分潤滑の場合の計算値で除した値を転がり粘性抵抗の減少係数の実験値 ϕ_{re} とする。 ϕ_r と ϕ_{re} の差の2乗が最小となるように式 (4.4) の $C, S_T, S_\nu, S_a, S_\omega$ を定める。多重線形回帰を行えば数学的に厳密な値を定めることができるが、本報の目的、実験精度、仮定の与え方を勘案すれば厳密な値を追及する必然性はなく、 $S_T, S_\nu, S_a, S_\omega$ については0, $\pm 1/2, \pm 1, \pm 2, \dots\dots$ といった整数もしくはそれに準じる数値の範囲から選ぶことにする。また、 C は仮に $C=1$ とおいた場合の ϕ_r と ϕ_{re} の比の平均を有効数字2桁程度でとれば十分である。

データの詳細は割愛するが、軸受サイズ、玉の材質、回転速度、予圧、潤滑油粘度を変化させた時の摩擦トルクの実験データを用い、上記のような考え方で ϕ_r を同定すると次式が得られた。

$$\phi_r = 3.5 \times 10^{-11} \frac{T^{0.5}}{\nu a^2} \dots\dots\dots (4.5)$$

玉の通過周期 T が大きいほど潤滑油量の回復に与えられる時間が長いために ϕ_r が大きくなり、動粘度 ν が小さいほど潤滑油が動きやすいために潤滑油量が回復して ϕ_r が大きくなり、接触楕円長軸半径 a が小さいほど潤滑油量が回復するまでに潤滑油が移動する距離が短くなるために ϕ_r が大きくなるという物理的なイメージと一致する。なお、遠心力の影響を考慮するために導入した ω は無視できた。係数 3.5×10^{-11} は T_0, ν_0, a_0 を含むため、 $[m^4/s^{1.5}]$ の有次元の単位を持つ。

5. スターベーションを考慮した摩擦トルクの計算値と実験値の比較

4.2節のようにして得られた転がり粘性抵抗の減少係数を用いて転がり粘性抵抗を計算し、すべりなどの影響も考慮して求めた転がり軸受の摩擦トルクの計算値と実験値を比較する。弾性ヒステリシス損失や保持器案内面の摩擦力も連立して玉の運動を求めるべきであるが、これらの影響は比較的小さく、個別に考慮して摩擦トルクに換算し最終的に合算した。弾性ヒステ

リシス損失の計算は角田の解析¹²⁾を参考にし、保持器案内面の摩擦抵抗は遠心力に起因する境界摩擦として計算した。弾性ヒステリシス損失と保持器案内面の摩擦の影響は小さく、玉と軌道輪の間に発生する摩擦トルクが全体の60~90%を占めている。

摩擦トルクの実験値と計算値を図5に図示し比較する。図5(a)はセラミック球を使用した内径70 mmのアンギュラ玉軸受に標準的な予圧を付与し、ISO VG32の潤滑油で潤滑したときの結果である。実験値より計算値の方がやや小さいがおおむね一致してい

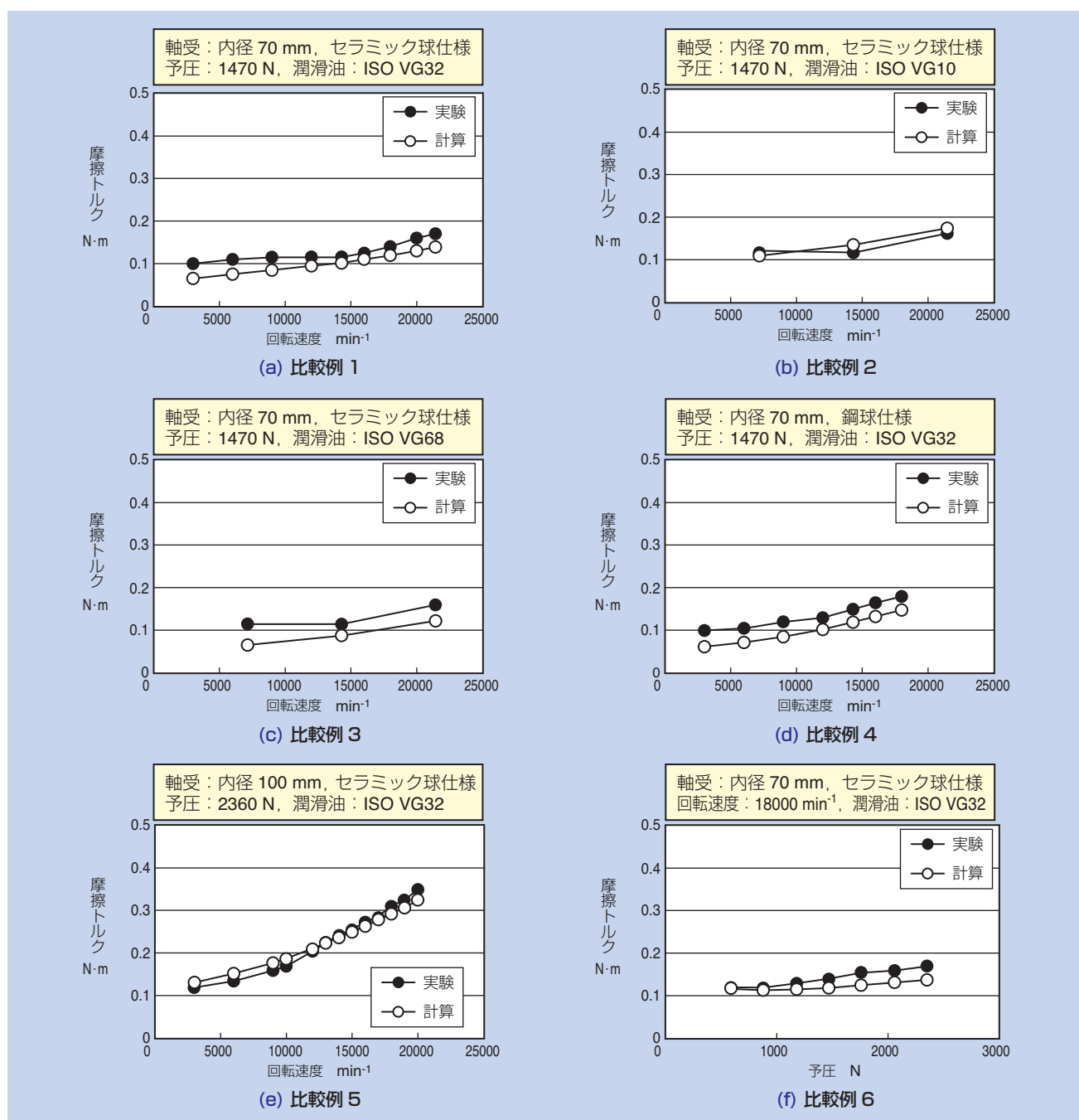


図5 摩擦トルクの実験値と計算値の比較例
Comparative example of experimental results to calculated values of friction torque

る。図5(b), (c)は潤滑油の動粘度を変更した場合である。図5(d)は玉を鋼球にした場合であり、図5(e)では軸受サイズを変更している。図5(f)は予圧をパラメータとした場合の比較である。いずれも実用上十分な精度で実験結果を再現できている。

6. まとめ

エアオイル潤滑されたアンギュラ玉軸受の摩擦トルクを推定する方法を提案した。エアオイル潤滑の場合、十分潤滑とはなっていないので、摩擦トルクの実験値から推定した転がり粘性抵抗と十分潤滑時の転がり粘性抵抗の計算値を比較し、転がり粘性抵抗の減少係数を同定した。エアオイル潤滑の摩擦トルクは、減少係数を乗じた転がり粘性抵抗、差動すべり、スピンのよって発生するトラクションを考慮した力とモーメントの釣合いを解き、弾性ヒステリシス損失と保持器の摩擦を加算することで計算できる。

本技術を高速軸受の選定や予圧設計の高精度化に利用するだけでなく、高速軸受の更なる開発・改良及び、各種高速スピンドルの設計に貢献していきたい。

参考文献

- 1) 藤原宏樹・藤井健次：油浴潤滑下における転がり軸受のトルク，2002年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，219.
- 2) 野木高：再流動を考慮した油量不足状態の点接触EHL，トライボロジスト，59(2014)239-250.
- 3) 柴崎健一・谷口雅人・大島まり：枯渇EHLとマクロ流れのマルチスケール連成解析手法の開発，トライボロジー会議予稿集 東京 2010-5，245-246.
- 4) 藤井健次：転がり軸受の高速化に関する研究，明治大学 博士論文(2001).
- 5) A. B. Jones: A General Theory for Elastically Constrained Ball and Radial Roller Bearings under Arbitrary Load and Speed Conditions, Trans. ASME J. Basic Eng.,82(1960)309-320.
- 6) R. S. Zhou and M. R. Hoeprich: Torque of Tapered Roller Bearings, Trans. ASME, J. Tribol., 113(1991) 590-597.
- 7) R. T. Lee and B. J. Hamrock: A Circular Non-Newtonian Fluid Model: Part I - Used in Elastohydrodynamic Lubrication, Trans. ASME, J. Tribol., 112(1990)486-496.
- 8) B. J. Hamrock and D. Dowson: Isothermal Elastohydrodynamic Lubrication of Point Contacts, Part 2 - Ellipticity Parameter Results, Trans. ASME, J. Lub. Tech., 98(1976)375-383.
- 9) R. J. Chittenden, D. Dowson, J. F. Dunn and C. M. Taylor: A Theoretical Analysis of the Isothermal Elastohydrodynamic Lubrication of Concentrated Contacts II. General Case, with Lubricant Entrainment along Either Principal Axis of the Hertzian Contact Ellipse or at Some Intermediate Angle, Proc. R. Soc. Lond., A 397(1985)271-294.
- 10) L. Houpert: Piezoviscous-Rigid Rolling and Sliding Traction Forces, Application: The Rolling Element- Cage Pocket Contact, Trans. ASME, J. Tribol., 109 (1987)363-371.
- 11) 藤原宏樹：点接触EHLの転がり粘性抵抗，トライボロジー会議予稿集 東京 2009-5，119-120.
- 12) 角田和雄：玉軸受の摩擦モーメントに関する研究(スラスト荷重の場合)，機論，27-178，3(1961)945-956.

執筆者近影



藤原 宏樹
先端技術研究所

超仕上げにおける加工状態のインプロセスモニタリング

In-process Monitoring of Machining State in Superfinishing



超仕上げの利点は1回の加工サイクル中に砥石表面が自生発刃から摩滅状態へ遷移するに
 応じ、加工形態が切削から磨きに移り、良質な仕上げ面が安定して得られることである。これ
 までの超仕上げは、目標の加工精度に対して経験則から砥石と加工条件を選定し、タイマー
 制御で施されることが多い。そこで本研究では、超仕上げにおいて研削抵抗をインプロセス
 モニタリングし、その抵抗比から仕上がり精度の判定を試みたので報告する。

東 晃平* Kohei HIGASHI
 伊 佐 肇* Hajime ISA
 北 川 貴一* Takakazu KITAGAWA
 大 西 孝** Takashi ONISHI
 大 橋 一仁** Kazuhito OHASHI

The advantage of superfinishing is that, the fine surface of workpiece can be obtained by the transition of machining states from cutting action to finishing one, while the condition of superfinishing stone surface changes self-sharpening to wear during one processing cycle. In conventional superfinishing process, to obtain the fine surface, the superfinishing stone, machining condition and timer control have been determined by empirical laws. In this study, we have monitored the machining force during machining process, and have judged the roughness of workpiece by calculating the machining force ratio.

1. はじめに

転がり軸受（以下、軸受）は「機械産業の米」と呼ばれ、高い性能と安定した品質によって自動車や工作機械など日本の製造業を支えてきた。「米」と称されることから想像できるように、軸受は大量生産型の機械部品として常に高品質・低価格・短納期が求められ、これらを実現する生産技術力が要求されている。

軸受の基本性能には主に回転時のなめらかさ（トルク）、静かさ（音響）、製品寿命（耐久性）の3つが高いレベルで求められる。本稿で紹介する超仕上げ加工技術（以下、超仕上げ）は、前記した軸受性能すべてに大きい影響を与える加工法として、軸受生産において重要な工程に位置づけられている。

しかし、従来の超仕上げは、目標の加工精度に対し経験則をもとに砥石と加工条件を選定し、精度的余裕を見込んだ加工時間を設定し、施されることがほとんどであった。またその加工特性から前加工精度の影響を受けやすく、さらに砥石の状態ですり上がり精度が左

右されるという課題をもつ。

このような課題に対し筆者らは、超仕上げにおける加工状態の遷移をインプロセスでモニタリングする技術を開発した^{1), 2)}。本研究ではこのインプロセスモニタリング技術を応用し、砥石に作用する背分力と主分力の比である加工抵抗比に着目し、しきい値を設けて仕上げ精度を判定する制御を試みた。さらに従来の時間固定式の加工サイクルに対する改善効果を検証したのでその結果を報告する。

2. 超仕上げの特徴と加工モデル

2.1 超仕上げの特徴

超仕上げとは、比較的結合度の低い軟らかい棒状微粒砥石を、ある加圧力で工作物に押し付け、砥石と工作物の間に振動的相対運動、回転運動および送り運動を与え、多量の加工液をかけながら表面仕上げを行う加工法である³⁾。

*生産技術研究所

**岡山大学大学院自然科学研究科 産業創成工学専攻

超仕上げにおいて砥石の状態変化サイクルを図1に示す。超仕上げの特徴は、工作物と砥石の初期接触とその後の相対運動によって砥石が目立てされ、新生切れ刃が創成されることである。この作用を砥石の自生発刃という。

- 図1 (a) : サイクル初期は切削状態といい、砥石が自生発刃しながら工作物粗さ成分を除去し徐々に平滑になる。
- 図1 (b) : サイクル末期は磨き状態といい、自生発刃が停止し目詰まりに近い状態になり、粗さが急速に改善される。
- 図1 (c) : 工作物が交換され、工作物の粗さによって急速に自生発刃が発生する。その後はこのサイクルが繰り返される。一般研削で必要な目立て作業は実施しない。

加工精度において超仕上げでは、切削や研削に比べ小さい加工力で数mm程度の低振幅運動を数百～数千Hzで与えるため、方向性のない良好な表面粗さが得られる。また加工熱が小さいため加工変質層が少なく、耐摩耗性の高い軸受に適した加工面が得られる。

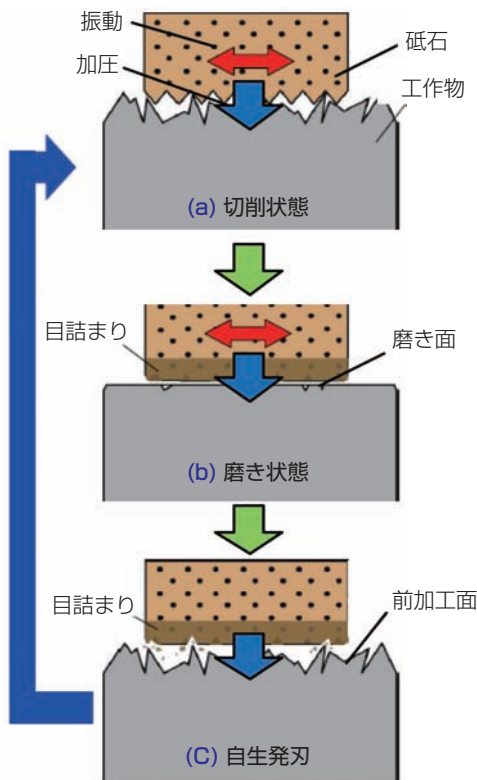


図1 超仕上げの加工サイクル
Mechanism cycle of superfinishing

2.2 加工モデル

超仕上げの一般的な加工モデルを図2に示す。円筒形状の回転する工作物に対し、砥石に鉛直方向の押し付け力を加えながら回転方向と直交する揺動運動を与える。このとき砥粒1個の軌跡に着目すると、工作物表面上を正弦波カーブを描いて運動する。この砥粒が描く正弦波カーブにおいて速度ベクトルが最大となる角度を「切削方向角 θ 」と呼び、式(1)で表される。 θ は超仕上げの加工条件の重要な指標として一般的に使用される。

- a : 砥石揺動振幅 mm
 - f : 砥石揺動数 c/min
 - D : 工作物直径 mm
 - N : 工作物回転数 min^{-1}
- $$\theta = \tan^{-1} (af/DN) \dots\dots\dots (1)$$

一般的に θ を大きく設定すれば切削作用が強くなり、小さく設定すれば磨き作用が強くなる。

実際には砥石上に無数の砥粒が存在するため、平滑で良質な仕上げ面が得られる。

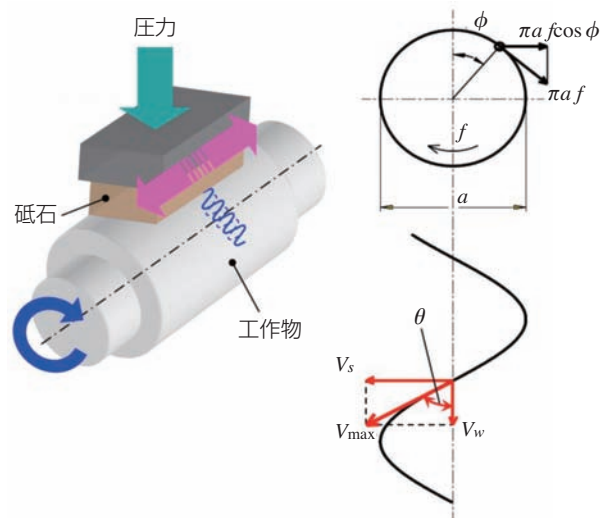


図2 超仕上げの加工モデル
Model of superfinishing

2.3 超仕上げの実施例

軸受において転動体（玉・ころ）と接触する軌道面には、音響を低減するため良好な面粗度で、かつ特に凸部のない高品位な表面性状が要求される。

実例として、**図3**に深溝玉軸受の型番6203（完成品寸法：外径40mm，内径17mm，幅12mm）内輪軌道面の研削完と超仕上げ完の外観と粗さを比べた結果を示す。研削完において面粗度 R_a 0.3であったものが、超仕上げすることで R_a 0.03まで向上し、凸部がない鏡面に近い良質な表面性状に仕上げられる。

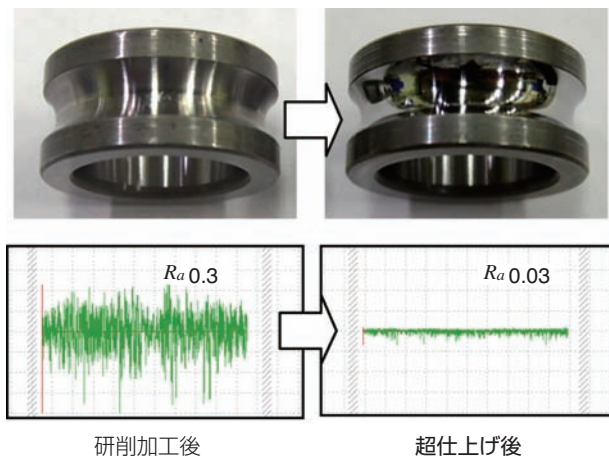


図3 粗さの改善効果（6203内輪）
Improvement of surface roughness

3. 実験装置

本研究で使用した実験装置を**図4**に示す。**図2**のモデルを実現するため、工作物には段付き丸棒の円筒形状を採用した。工作物を両センタで支持し、主軸台よりケレで回転させる。砥石台は揺動装置に揺動軸を介して固定し、工作物の軸方向に対して平行に揺動する。砥石は砥石ホルダに固定し、砥石台上に設置したエアシリンダによって工作物に対して水平直角方向に押し当てる機構となっている。

加工状態をモニタリングするため本研究で採用したセンシング機器と評価項目を表1に記載する。直径寸法を計測する「① 定寸装置」、砥石損耗として砥石台の前進量を計測する「② レーザ変位計」、そして砥石に作用する加工力を検出するために砥石とエアシリンダ間に固定した「③ 3分力センサ」の3種である。この3種から本研究では、砥石に作用する加工力の変化に着目して仕上げ精度の判定を試みた。

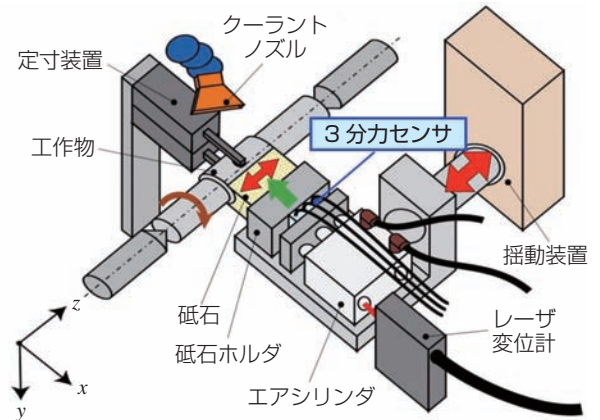


図4 実験装置
Experimental setup

表1 検出機器及び評価項目
Sensing device and evaluation points

検出機器	変化量	評価項目
① 定寸装置	寸法変化	取り代
② レーザ変位計	砥石台前進量	砥石損耗量
③ 3分力センサ	砥石に作用する研削抵抗	背分力 主分力 揺動方向力

4. 超仕上げの加工特性調査

4.1 試験条件

センシング機器の信号特性と超仕上げの加工特性を把握し、仕上げ面の生成過程を推論するため、まず**表2**に示す単一試験条件（1段条件）にて実験を行った。

砥石はWA1200で厚さ5mm，工作物は熱処理した軸受鋼で円筒研削によって前加工粗さを R_a 0.3～0.4に整える。クーラントは専用の不水溶性研削油剤を使用した。切削方向角 θ は、経験的に切削と磨きの中間に位置し、切削状態から磨き状態へ連続的に遷移できる「 3.2° 」とした。加工時間は最大20秒とし、途中の加工状態を都度判断するため2～20秒の間で任意の時間を設定した。

表2 試験条件（1段）
Experiment condition in one step

砥石	スペック：WA1200 20A サイズ：t5×W30 mm
工作物	SUJ2 ϕ 20 (HV770)
砥石揺動振幅	0.75mm
クーラント流量	2.0L/min（不水溶性）
砥石揺動数	1870 c/min
主軸回転数	1230 min ⁻¹
切削方向角	3.2°
砥石圧力	0.54 MPa
加工時間	2～20s

4.2 試験結果

加工部での各センシング機器の作用状態を図5に示す。表2の試験条件で20秒間加工し、横軸を経過時間とした場合のモニタリングデータを図6に示す。上図は砥石台移動量 d 、寸法生成量 R の変化を示す。下図は砥石にかかる背分力 P 、主分力 Q の変化である。砥石台移動量 d に着目すると加工開始3秒後付近からほとんど変化していない。従ってこれ以降は砥石が目詰まりし磨きに遷移したと推定できる。このとき加工抵抗の変化に注目すると、背分力 P は砥石圧力一定条件であるため80N付近でほとんど変動していないが、その一方主分力 Q は3秒後より緩やかに低下する特性が確認できた。

この変化に着目し、加工抵抗比 P/Q （以下、抵抗比と称する）を併記したところ、 P/Q は加工開始直後は一時低下するが、その後時間経過に応じて緩やかに上昇する特性が得られた。これは仕上げ粗さと連動した変化であると推定できる。

4.3 仕上げ面の生成過程について

仕上げ粗さの生成過程を求めため、抵抗比と粗さとの関係を検証した。表2の試験条件にて加工時間を2~20秒の間で7条件を設定し実験を行い、加工完了時の加工抵抗比と仕上げ粗さの関係を求めた。図7に各々をプロットして示す。加工時間が増加するのに伴い加工抵抗比が上昇し、それに反して仕上げ粗さが改善する結果となった。加工開始から2秒以降の7点について、抵抗比と粗さの相関係数を求めたところ、 -0.97 と非常に高い相関が得られた。したがって、加工抵抗比を監視すれば仕上げ粗さが判別できる可能性が高い。

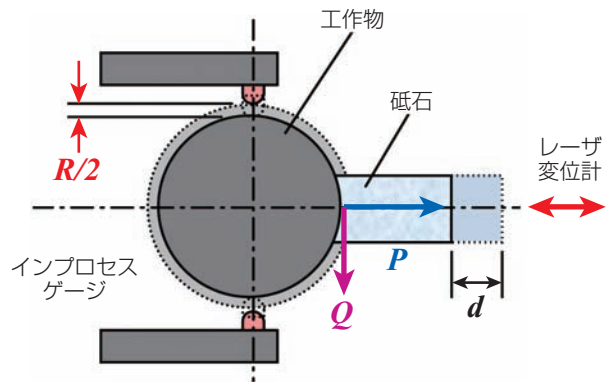


図5 加工部でのセンシング機器の作用
Action of sensing device in machining area

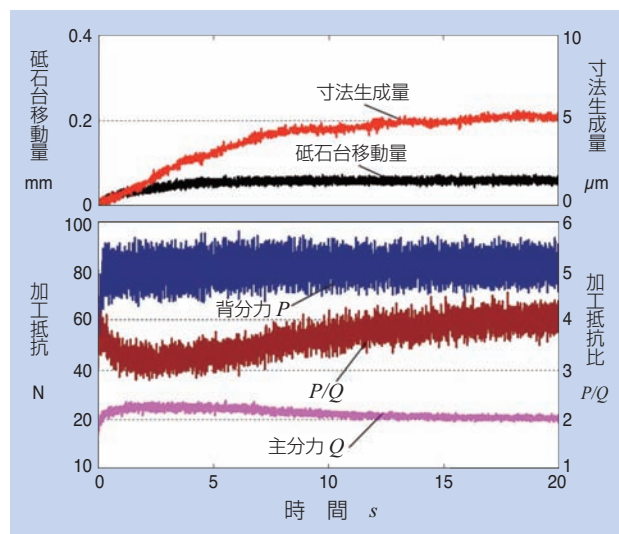


図6 1段加工での信号特性
Measurement signal in one step machining

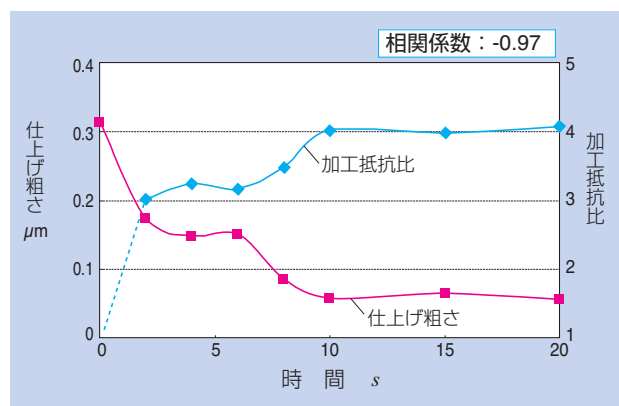


図7 加工抵抗比と仕上げ粗さの関係
Relationship between machining force ratio and surface roughness

5. 強制的な状態遷移を与えた場合の加工特性

5.1 試験条件

実際の超仕上げの量産加工では、工作物の前加工面除去いわゆる取り代と、最終仕上げ精度を両立させる必要がある。そのため取り代を確保した後、強制的に砥石を目詰まりさせるよう、切削と磨きの2段の加工条件を設定し、順次タイマーで切り替えるサイクルを採用することが一般的である。

そこで本試験機において切削と磨きを2段で実施する加工条件を設定し、そのときの加工特性を調査した。表3に実験条件を示す。砥石、クーラント、工作物は表2と同等とし、主軸回転数は切削、磨きともに 670min^{-1} 砥石揺動数を切削時 $1,870\text{c}/\text{min}$ から磨き時 $500\text{c}/\text{min}$ へ小さくすることで切削方向角を変化させ、強制的に切削から磨きへ遷移する条件とした。加工時間については切削、磨きともに各10秒に設定した。

表3 試験条件 (2段)
Experiment condition in two steps

砥石	スペック：WA1200 20A	
	サイズ：t5xW30 mm	
工作物	SUJ2 $\phi 20\text{mm}$ (HV770)	
砥石揺動振幅	0.75mm	
クーラント流量	2.0L/min (不溶性)	
加工条件	切削 (1段目)	磨き (2段目)
砥石揺動数	1870 c/min	500 c/min
主軸回転数	670min^{-1}	670min^{-1}
切削方向角	6.0°	1.6°
砥石圧力	0.54 MPa	0.54 MPa
加工時間	10s	10s

5.2 試験結果

表3で設定した試験条件で加工した場合のモニタリングデータを図8に示す。切削方向角が大きい最初の10秒間は切削状態であり、砥石台、寸法生成ともに一定速度で進行しており、砥石の加工抵抗、および加工抵抗比 P/Q も一定である。10秒後、切削方向角が小さくなり、磨き状態に遷移すると、1段条件の傾向と同様に、砥石台前進と寸法生成が停止し、同時に P/Q が上昇する。合計20秒の加工サイクル完了時点では、抵抗比は4をやや下回り、この場合の仕上げ面粗さは $Ra\ 0.052$ になった。

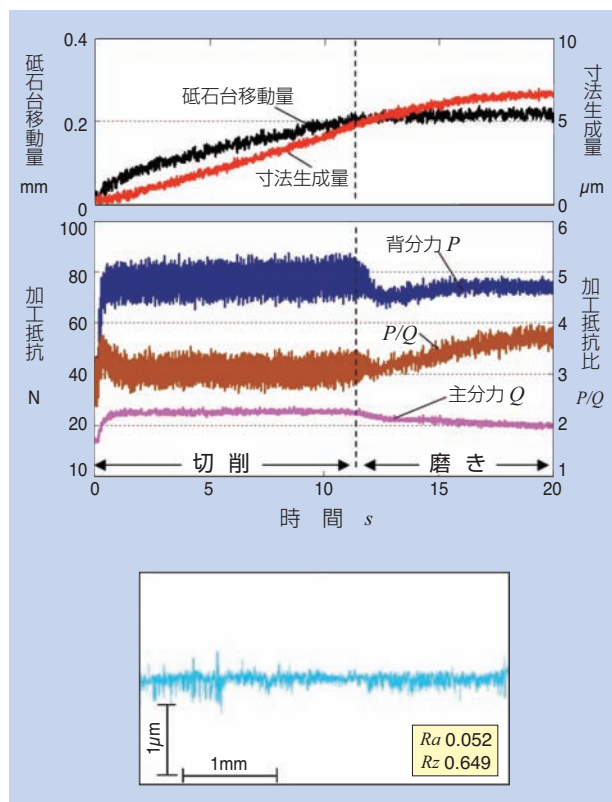


図8 2段タイマーサイクルにおける加工状態の推移
Measurement signal in two steps machining

6. しきい値判定による仕上げ精度の判定

6.1 しきい値の判定方法

図6と図7の結果より、加工抵抗比 P/Q と仕上げ精度（粗さ）との強い関連性が確認されている。そこで、加工中に仕上げ精度を自動判別するため、加工サイクル中に P/Q を監視し、しきい値との比較による仕上げ粗さの判定を試みた。図9に信号処理の概要を示す。3分力センサの出力信号はA/D変換後演算装置へ入力される。演算装置は出力端子を有しており、砥石を加圧しているエアシリンダに後退信号を出力する。

図10に粗さ判定で採用したフローチャートを示す。加工条件は表3の2段条件を採用した。加工開始後、前加工の粗さを十分に除去するため、切削条件を10秒設定する。その後磨き条件に切り替えた後、 P/Q の常時算出を開始し一定間隔で別途設定したしきい値と大小判定を行う。スキャンタイムは0.1秒間隔とした。 P/Q がしきい値より大きくなった時点で仕上げ完了と判定し、エアシリンダに後退指令を出力し砥石を強制的に後退させた。

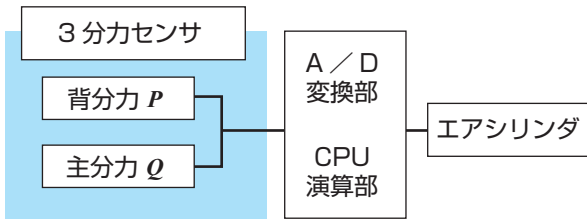


図9 判定信号処理系統
Judgement signal processing system

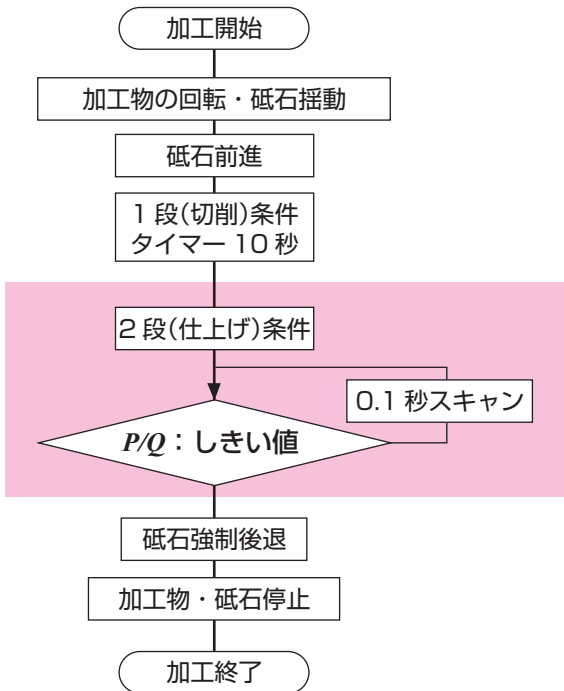


図10 判定信号フローチャート
Judgement signal flow chart

6.2 しきい値判定結果

図11(a), (b)にしきい値をそれぞれ3.4, 及び3.7に設定したときの P , Q , 及び P/Q の測定結果と, 加工前と加工完了時の粗さを示す. しきい値を3.4とした場合, 磨きに入ってから約5秒で P/Q が3.4を超えた. このとき仕上げ粗さは Ra 0.064であったが, 粗さ曲線には目残りと思われるわずかな凹凸が見られた. しきい値を3.7とした場合, 磨きに入ってから約17秒で P/Q が3.7を超えた. このときの仕上げ粗さは Ra 0.037で前述のような目残りは観察されず良好な仕上げ面であった. 両結果から P/Q に対するしきい値を高く設定する方が磨き時間が長くなり, それに対応する仕上げ粗さの改善が確認できた.

6.3 抵抗比と仕上げ粗さの関係

さらにしきい値と仕上げ粗さとの関係を詳細に求めるため, P/Q を0.1ごとに設定したしきい値に対し仕上げ粗さ, 及び磨きに要した時間をプロットした結果を図12に示す. しきい値が大きくなるにつれて磨き時間が増大し, それに応じて仕上げ粗さが改善する. ただし, しきい値3.7以上では仕上げ粗さに大きな改善はみられず加工時間のみ増大した.

ここであらかじめ加工時間を固定する従来手法に対する本加工方式の優位性を検証する. 図12の赤点線で示した従来手法の図2と同等の仕上げ粗さ Ra 0.052を得るには, 本方式においてしきい値を3.6に

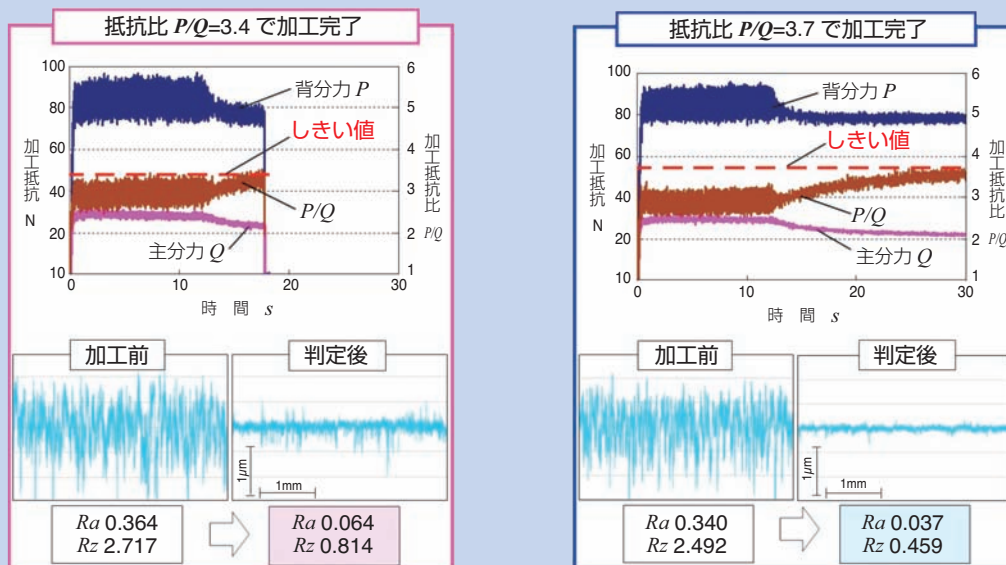


図11 しきい値設定による加工後の表面粗さの違い
Comparison of the surface roughness after processing by the threshold force ratio

設定すればよい。このとき2段目の磨きに必要な時間は6秒であり、10秒を設定した従来手法に対し、大幅に磨き時間を短縮することが可能となった。

以上の結果から、加工抵抗比をモニタリングし、しきい値によって判定することで仕上げ粗さがコントロールでき、また従来の時間固定式の加工サイクルに対して磨き時間を短縮することで、生産性が改善できる。

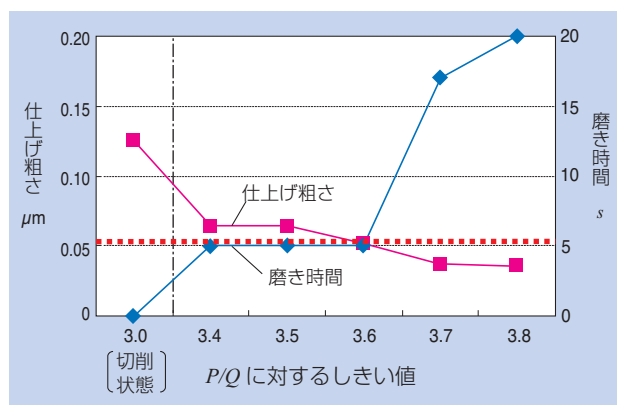


図12 しきい値判定した P/Q と仕上げ粗さの関係
Relationship between finished surface roughness and machining time at 2nd. step in each threshold force ratio

7. まとめ

超仕上げ加工中における状態変化をインプロセスゲージにてモニタリングする技術を用いた検証を行い、以下の結果が得られた。

- (1) 超仕上げにおいて加工抵抗比をインプロセスモニタリングし、加工状態をモニタリングすることで、仕上げ精度の自動判定を行う方法を提案した。
- (2) 磨き条件において、砥石に作用する主文力 Q 、配分力 P 、から求まる加工抵抗比 P/Q は、加工面粗さの改善に応じて増加することが分かった。
- (3) 加工抵抗比 P/Q が設定した任意のしきい値を超えた時に砥石を後退させ、加工完了する制御を採用することで、従来の加工条件をタイマーで切り替える制御方法に対し、加工サイクルが短縮できる。

参考文献

- 1) 井口貴裕, 大西孝, 大橋一仁, 東晃平, 塚本真也: 超仕上げ過程のモニタリング技術の開発, 2011年度砥粒加工学会学術講演会講演論文集 (2011) 297.
- 2) 山下真語, 大西孝, 大橋一仁, 東晃平, 井口貴裕, 山本亮介, 塚本真也: 超仕上げにおける加工状態のインプロセスモニタリングー加工抵抗比による加工状態の把握ー, 2012年度砥粒加工学会学術講演会講演論文集 (2012) 45.
- 3) 中島勝利, 鳴瀧則彦: 機械加工学 (1984) 195.
- 4) T.Onishi, K.Ohashi, K.Higashi, S.Yamashita, T.Iguchi and S.Tsukamoto, In-Process Monitoring of Machining State in Superfinishing, Proceeding of the 7th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (LEM21), (2013) 89-92.

執筆者近影 (所属は開発当時のもの)



東 晃平

生産技術研究所



伊佐 肇

生産技術研究所



北川 貴一

生産技術研究所



大西 孝

岡山大学大学院自然科学研究科
産業創成工学専攻

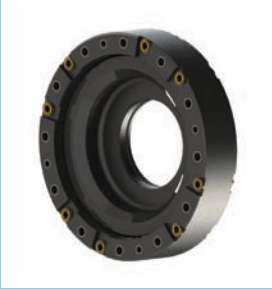


大橋 一仁

岡山大学大学院自然科学研究科
産業創成工学専攻

ロボット用軽量軸受 Lightweight Bearing for Robot

Sebastien BRISSON*



現在の産業用ロボットアームは、さまざまな機能を有しているが、ロボット自身に知性を持たせることよりも、XYZ軸上の動きや、 $\theta_x \theta_y \theta_z$ の回転軸における動作一つ一つをプログラムすることが重要である。さらに、プログラミングやメンテナンスについては専門知識・技能が必要である。また、操作者との接触事故などの災害を防ぐために厳重な安全対策が必要になる。

また、最近では新しい制御技術を有し、操作者とロボットが共存・共働するコボティクスが注目されている。

このようなロボット市場や技術動向に基づき、NTN-SNRはコストを抑え、軽量化した軸受を開発した。本商品の特長と性能について紹介する。

Robotic arms do have many qualities, but intelligence is not their best point. It is necessary and important to be programmed move by move. They work in a XYZ coordinates world associated to $\theta_x \theta_y \theta_z$ for rotations. Moreover, programming and maintenance are matter for specialists. Their size and potential tremendous force imply large secured areas and heavy procedures when an incident occurs.

Some trends can be found such as Cobotics that have new technologies of motion control and can coexist with surrounding humans.

Based on its know-how, experience and Market understanding, NTN-SNR prototyped a bearing concept that aims to accompany the Robotics Megatrends. Making the bearing lighter, less expensive by tuning its stiffness according to real needs of coming technologies.

1. はじめに

産業用ロボットのアームには、さまざまな項目が要求されるが、特に以下の二点が重要な検討項目である。

- 産業用ロボット各種のサイズ・シリーズ化や需要に応じ、コストも配慮したロボットアーム構造・設計であること。
- ロボットアームの高機能化と、オペレータの操作性向上

これらを満足させるため、特に機能面では高剛性で広い稼働範囲を有し、操作が容易であることのほか、さまざまな状況を判定するセンシング技術が必要である。このため、ロボットアームの支持用軸受もこれらの技術動向に応じた設計が必要である。

今回、特に産業用ロボットについて簡単に触れると共に、NTN-SNRで開発したロボット用軽量軸受について紹介する。

2. ロボットの構造と能力

現在の産業用ロボットにおける基本機能は先ず位置を決めること、そして“手”でモノをつかむ、組み立てる、溶接する、塗装するなどといった、人間の代わりに作業が可能な装置として普及してきた。例えば、組み立て工程においては、部品がロボットによって運ばれる場合、ロボットは常に同じ方法で部品をつかみ、所定の位置へ同じ軌道で移動させるが、当然その位置決めは常に正確でなければならない。溶接や塗装工程においても同様で、正確な位置で安定した稼働が必要である。

典型的な産業用の垂直多関節型6軸ロボットを図1に示す。各作業について、ロボットの正確な動きを図2のように、XYZと $\theta_x \theta_y \theta_z$ の座標軸で表現・モデル化して動作のプログラミングを行う。

このようなことから、現在の産業用ロボットアームは以下の項目が性能の優劣を決定する。

- 位置決め精度
- 繰り返し位置決め精度
- 剛性

これらの性能で各動作を連動させ、産業用ロボットとして自動稼働が確立される。また、剛性については、ロボットがワークを移動させる可搬能力に対して、十分保持できることが求められる。

図3に現在の産業用ロボットに求められている性能を示す。現在、ロボットの動きに対し、座標の制御が重要であることから、軸受には高精度、高速回転（加速）が求められる、さらに剛性を高めるため軸受の質量が大きくなる場合がある。

また、図4に産業ロボットのラインナップのイメージを示す。一般的な最大可搬能力は約1500kgであるが、20kg以下の用途が多い。また、剛性については先に述べた位置精度維持のほか、マニピュレータ自重の維持にも必要である。

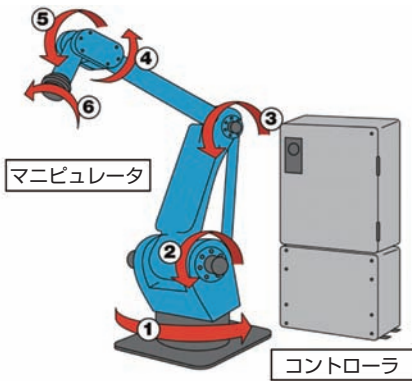


図1 6軸ロボット (マニピュレータとコントローラ)
6 axis robot (manipulator and controller)

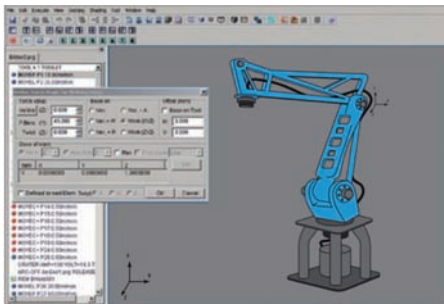


図2 動作モデル化とプログラミング例
Modelling and programming for motion

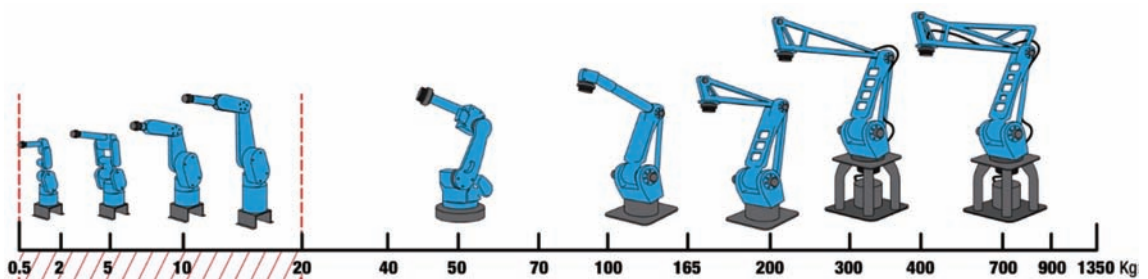


図4 産業用ロボットの可搬能力
Payload of industrial robots

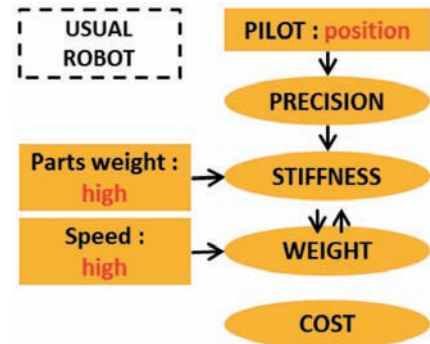


図3 現在の産業用ロボットの要求性能
Specification of usual robots

3. コボティクスと新技術

3.1 コボティクス

コボティクスとは、Collaborative robotの略語であるコボット (Cobot) からの由来であり、人に囲まれた環境で稼働する共存型ロボット技術である。図5に作業例を示す。コボットは協働する人や他のロボットが近づいたことを察知し、接触せずに自ら考えて作業する。また、コボットは自動車の自動運転や運転補助のような動作を行う。例えば、人の作業内容を感じて自ら人の補助を行い、動作も変化させることができる。

また、コボットは、可搬能力が20kg以下のものが多く、これらのロボットは、軽量、コンパクト化が進んでいるが、これらの取組みは大型機へも導入されている。

コボット導入のターゲットは、付加価値の少ない作業、時間を要する作業、重要工程部の繰り返し作業であり、作業者の負荷軽減や関節炎などの災害防止も目的としている。

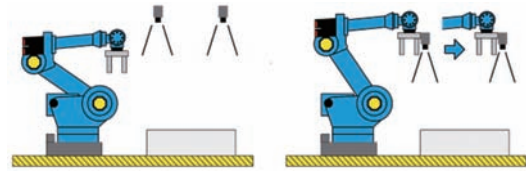


ロボットの自立作業例
Example of autonomous robot

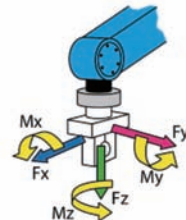


人の動きに合わせて補強するロボット例
Example of robot to follow man's movements while multiplying its strength

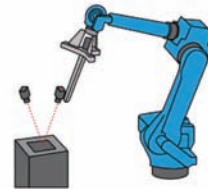
図5 産業用ロボットの可搬能力
Payload of industrial robots



画像処理技術による動作
Movement of vision and image treatment



荷重センサ
Force sensing



レーザー計測
Laser measurement



部品取り出し
Picking



バリとり
Deburring



選別
Sorting

図6 新技術による動作例
Example of movement by new technologies

3.2 新技術

ロボットに関する技術のうち、制御に直接関連する技術は、下記3点が挙げられる。

- 画像処理技術
- 荷重センシング技術
- レーザー計測技術

上記の技術を用いた動作例を図6に示す。これらの技術は、ロボットがワーク形状を理解・支持し、各種動作への演算処理後、正確なワークの移動を可能としている。

さらに、ロボット同士の連携動作のほか、目の前に共存する作業者との位置間隔も調整する。

4. NTN-SNR ロボット用軸受

欧州においてNTN-SNRは、ロボット用減速機的主要軸受メーカーであり、産業用ロボットのみならず、作業・動作補助ロボットにおいても高いシェアを維持している。

図7に一般的な産業用ロボットのマニピュレータと軸受要求仕様例を示す。ロボット用軸受でも、最下部の旋回軸受と先端部の手首回転用軸受の必要な軸受剛

性は大きく異なるため、ロボットの作業内容、可搬能力および、部位・動作によって適用する軸受は個別に選定が必要である。

上記の理由から、旋回や回転・揺動するロボット間接部へ使用する軸受は、図8に示すクロスローラ軸受もしくは、4点接触玉軸受が使用され、最下部の軸受はマニピュレータの自重を支持しなければならない。

これらの要求機能のほか、ロボットの軽量、コンパクト化のため、NTN-SNRでは軸受の軽量化に着目した軸受を開発した。

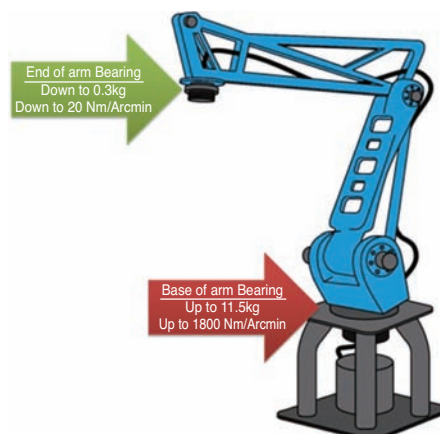


図7 マニピュレータと適用軸受の要求仕様例
Manipulator and specification example of bearing



図8 NTN-SNRクロスローラ軸受
NTN-SNR crossed roller bearing

5. ロボット用軽量軸受

NTN-SNRロボット用軽量軸受の設計コンセプトは、軸受材料の樹脂と鋼による複合化である。従来、内輪・外輪は周辺部品にボルトなどで固定するため、鋼製の特殊形状であったのに対し、開発品は軸受軌道面周辺部および、転動体のみ鋼製にし、軸受を周辺部品に取りつける特殊形状部分については樹脂を適用した。

本箇所の樹脂化は、軸受周辺部品に影響なく機能することが重要である。このため、樹脂材の選定においては、産業用ロボットの使用環境も考慮し、強度に優れた高融点ナイロン樹脂を適用した。

また、本開発軸受は、ロボットの関節部や減速機部の再設計が不要で、従来軸受から置き換え可能である。

次項にロボット用軽量軸受の種類を紹介する。

5.1 非分離タイプ

非分離タイプは、図9に示すように深溝玉軸受の内輪、外輪に樹脂を射出成形している。軸受の内部すきまを抑えることで、剛性を高めている。

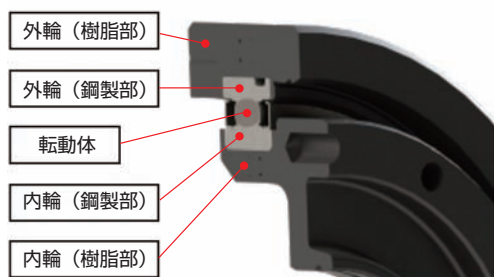


図9 ロボット軽量軸受（非分離タイプ）
Lightweight bearing for robot (non-separate type)

5.2 分離タイプ

分離タイプは、深溝玉軸受を適用した非分離タイプより、より高い剛性を得るため、図10に示すようなクロスローラ軸受としている。軸受の組立上、内輪のみ樹脂と一体成形とし、外輪の樹脂部分は、ころ挿入後に鋼製部分の両側から組み付けている。

また、図11に示すように、分割した左右樹脂部の幅寸法が異なっている。これは、双方の外輪軌道面における径方向のズレが生じないように、片側の樹脂部品のみで、鋼製部の外輪とはめ合うためである。

さらに、双方の樹脂部品の締結については、各種方法があるが図12の①に示すようなリベットのほか、②のように鋼製スリーブを挿入してボルト固定も可能である。

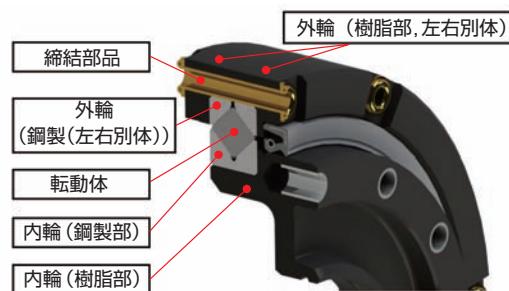


図10 ロボット用軽量軸受（分離タイプ）
Lightweight bearing for robot (separate type)

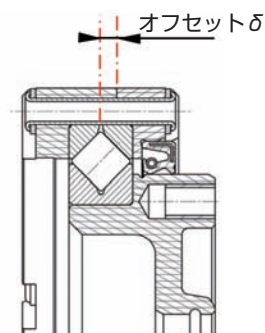


図11 ロボット用軽量軸受（分離タイプ）の取り付け例
Assemble example of lightweight bearing (separate type)

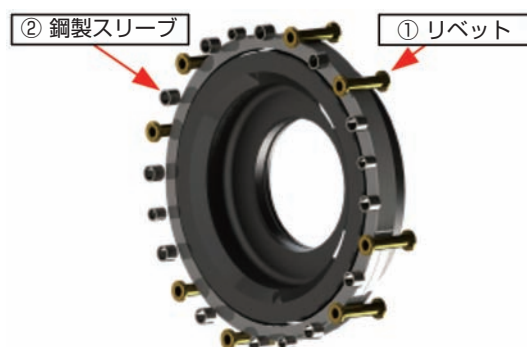


図12 外輪樹脂部の締結例
Fastening example of lightweight bearing

5.3 剛性

軸受内輪・外輪の特殊形状部分を樹脂に変更しているため、開発軸受は、現行軸受に対して剛性が下がる。表1および図13にFEM解析による分離タイプ（クロスロー軸受）の剛性比較結果例を示す。

3項で紹介したコボティクスのような画像処理および荷重センサで制御しているロボットでは、現在のロボットのような高速回転で高い剛性を必要としないため、開発品の剛性低下は許容可能なレベルと考える。

表1 FEM解析による剛性比較
Stiffness comparison between developed bearing and current bearing by FEM analysis

		現行軸受	開発軸受
軸受主要寸法 mm		φ40×φ110×26	
解析条件	①アキシャル荷重 kN	40	
	②モーメント荷重 Nm	1000	
解析結果	①アキシャル剛性 mm (軸方向移動量)	0.020	0.150
	②モーメント剛性 deg (軸受傾き角)	0.04	0.25

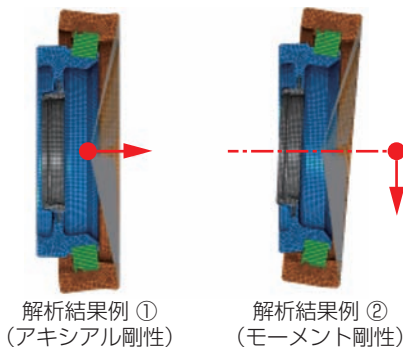


図13 FEM解析例
FEM analysis example

5.4 質量

従来品である鋼製軸受に対し、同サイズの開発軸受の質量比較を表2に示す。開発軸受は従来軸受に対し、分離タイプで63%、非分離タイプで73%の減少率で大幅な軽量化を達成した。

表2 現行軸受と開発品の重量比較
Weight comparison between developed bearing and current bearing

軸受形式	現行軸受 (分離:クロスロー)	開発軸受 (分離:クロスロー)	開発軸受 (非分離:深溝玉)
軸受外観			
軸受寸法 mm	φ40×φ110×29		
質量 kg	1.00	0.37	0.27
低減率 %	—	63	73

6. おわりに

NTN-SNRで開発したロボット用軽量軸受について紹介した。また、改めてロボット業界の動向や新技術、それに伴う軸受への要求項目を図14に示した。

現在は図3でも示したように、ロボットの動きに対し座標の制御が重要であったが、今後は、画像処理による制御や、コボティクスによる作業者のサポートのため、軸受への要求事項は高速、高剛性よりも、コストをふまえた軽量化が重要視されると考える。

今回紹介したロボット用軸受は、これらの動向に対して開発した。引き続き、ロボット業界の動向を注視して開発を継続していくとともに、本製品をさまざまな産業用ロボットに適用いただくことで、欧州をはじめ、グローバルな産業の発展に貢献してきたい。

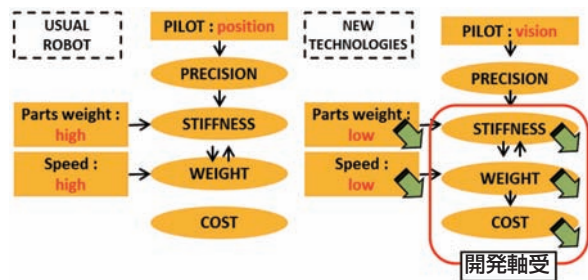


図14 ロボットの技術動向と軸受要求項目
Technology trend for robot and requirement of bearing

執筆者近影



Sebastien BRISSON
NTN-SNR ROULEMENTS
Industry Innovative Developments

Essential Elements for Ecology

風力発電機用状態監視システム(CMS)
Wind Doctor®

データ収集装置

データ管理・監視・分析ソフトウェア



NTNの風力発電機用状態監視システム(CMS)はデータ収集装置、測定用センサ、データ管理・監視・分析ソフトウェアで構成し、遠隔地から軸受等の状態をモニタリング可能です。異常を早期に検知し、発電機の損傷拡大防止や稼働率の低下を抑制します。
CMS:Condition Monitoring Systemの略称

NTN®
www.ntn.co.jp

洋上発電の安定稼働を支える、NTNのシステム商品

状態監視システム (CMS) の取組み Development of Condition Monitoring System



橋爪 啓介* Keisuke HASHIZUME
竹内 彰利* Akitoshi TAKEUCHI
田中 弓弦* Yuzuru TANAKA

NTNIは、これまで培った軸受診断技術を基盤として状態監視システム (CMS) を開発してきた。本稿では、CMS関連商品の紹介ならびに、市場におけるCMSの必要性と今後の展開について解説する。

NTN has developed Condition Monitoring System using bearing diagnosis technology. This article introduces CMS's products, and explains necessity of CMS in the market and expansion in the future.

1. はじめに

地球温暖化防止対策や省エネルギー化、あるいは発電コストの低減を主目的として、世界規模で再生可能エネルギーを利用した発電装置の実証試験や本格導入が進んでいる。日本では2012年7月から再生可能エネルギー（太陽光、風力、水力、地熱、バイオマス）固定価格買取制度がスタートし、今後、導入の動きが益々加速すると考えられる。このうち風力発電は、再生可能エネルギーの中では発電コストが低く、風車先進地域である欧州では主要な発電設備として多くの実績がある。今後、洋上化に伴う風力発電設備のより一層の大型化やアジア圏での大規模導入も予想され、大いなる展開が期待されている。

NTNIは、次世代を担う再生可能エネルギー分野への商品展開として、振動解析技術とセンシング技術を応用した風力発電用の状態監視システム（CMS：Condition Monitoring System）を市場投入し、その後も改良を重ね、図1に示すようなWind Doctor®



図1 データ収集装置 Wind Doctor®
Data acquisition module, Wind Doctor®

として販売している。既に国内風車への設置数を増やしており、大量のデータ収集を開始している。本稿では、CMSが注目される理由とCMSによる解析内容、さらには今後の技術動向に関して解説する。

2. コンディション・モニタリング・システム (CMS)

CMSとは、振動センサ、変位センサ、温度センサなどの各種測定センサを対象物に取り付け、連続または断続的にデータ収集を遠隔で行い、その取得データを基に部品の異常を早期検出する状態監視システムである。発見が早い分、損傷拡大を抑えることでメンテナンスの負担を軽減でき、また、異常箇所の把握により適切な準備と処置が可能となる。

3. 市場におけるCMSの必要性

CMSの必要性について、発電事業を例に挙げて説明する。

発電コストの低減には、初期設備投資の抑制、高効率発電技術の導入、ならびに設備利用率を向上させる必要がある。すなわち、稼動開始後には安定動作の維持が必須であり、装置停止時間（ダウンタイム）を極力短縮したいところである。一般に発電所は安定稼動していることが前提という認識であり、不測の停止は消費者に多大な影響を及ぼすことにもなる。

この対策として、設備の定期点検や予防保全が必要だが、その事前情報として設備の状態変化を早期かつ

正確に捉えて、異常や変調箇所を特定しておくことが重要となる。実際に、ガスタービン発電や蒸気利用の汽力発電では、振動、温度、回転数、圧力、変位、音響など、数多くのセンシング技術を駆使して監視体制を敷き、常時モニタリングとこれにリンクした保全作業が行われている。

一方、産業機械分野においても、鉄鋼、製紙設備や化学プラントなどの長い製造ラインを要する産業を筆頭に、供給能力の維持と安定品質の確保を目的とした独自のCMSを導入し、即効性の高い予防保全を実施している企業もある。

4. 装置例、応用例

NTNは、特殊センサを含めたCMS関連の技術開発と市場展開を進めている。本項ではNTNが商品化している代表例を紹介する。

4.1 風力発電用CMS

前項の図1で示した、風力発電をターゲットとしたデータ収集装置Wind Doctor®について紹介する。

本機はAC100V~240V電源に対応し、信号入力点数17チャンネルを装備している。また、外装面では防塵・防水性能について、電気機械器具の保護等級であるJIS C 0929のIP65レベルを達成している。さらに、リスクヘッジとして電源消失時のデータ保護機能や冷却性能を有することで、動作安定性を高めている。

このWind Doctor®は、図2に示した仕組みで運用する。各センサの多様な出力データ群を暗号化した上で、インターネットを介して専用サーバにアップロードする。この取得データを基に、ユーザ側のPCに展開した専用ソフトを使用して、さまざまな解析、精密診断が可能である。この状態監視の基本画面を図3に

示す。異常発生時には画面へのアラーム表示とともに、指定されたメールアドレスへの緊急配信を行う。

また、図4に示す実効値のトレンド表示のほか、図5に示す取得データの振動波形が表示できる。さらに、図5の振動波形をもとに図6に示すエンベロープ処理及び、図7に示すようなFFT解析スペクトル表示などの計算、解析機能を持つ。また信号に対するノイズ量を表すSN比を最大化するためのバンドパスフィルタの任意設定が可能で、損傷と診断された軸受、または増速機の歯車などの欠陥周波数の表示に適している。

さらにユーザ側でもデータを自由に利用できるように、CSV形式で生データがダウンロード可能である。これらの操作は制限なく繰り返し実行できるので、データ解析ツールとして有効利用できる。

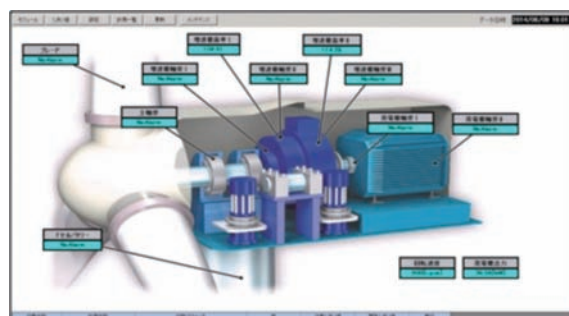


図3 状態監視ソフト画面
Basic screen of monitoring software

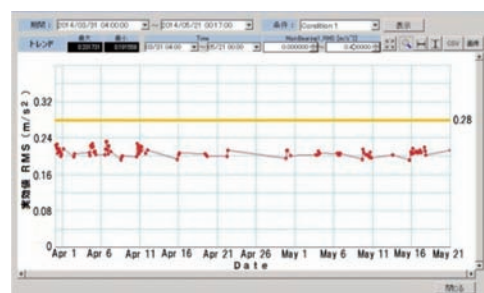


図4 実効値のトレンド表示
Trend view of RMS value



図2 風力発電用CMSの仕組み
Structure of CMS for wind turbines

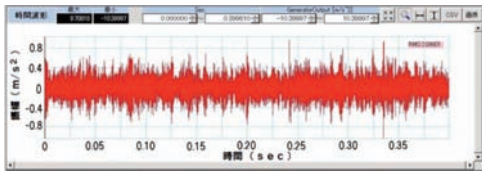


図5 取得データの波形表示
Wave pattern of acquired data

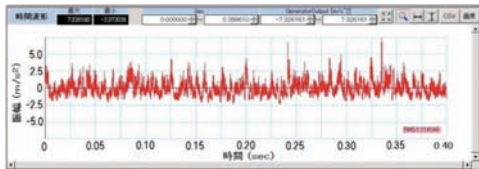


図6 取得データのエンベロープ処理
Envelope signal processing of acquired data

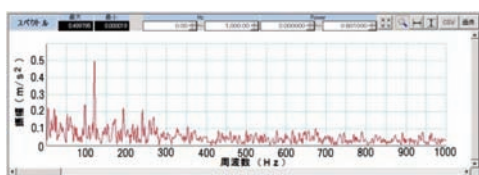


図7 FFT解析結果
Result of FFT analysis

4.2 ハンディ型異常検知装置

汎用モータや送風機など、一般産業機械の状態監視や保全のために開発したハンディ型異常検知装置を図8に示す。

本システムは、NTNが販売する振動ピックアップ及びポケットサイズのA/D変換器と、ユーザで用意するスマートフォンの組み合わせで構成される。これは「手軽に」「いつでも」「その場で」「短時間に」軸受診断を実現することを目的に、長年培ってきた軸受診断技術の応用製品である。

従来の一体型診断機器では、測定した振動データを機器本体内で計算・分析するが、細かなデータを読み取りやすくしようとすると必然的に画面サイズが大きくなり、小型・軽量化に限界がある。これに対してスマートフォンでは、拡大と縮小機能を使えば小型でありながら、細部まで表示データの認識が容易である。また、製造設備やライン保全の担当者は、保守・点検時に工具類や書類と一緒に携帯することが必要である。

このため、NTNのハンディ型異常検知装置は非常にコンパクトで携帯性に優れた振動測定システムとしている。本装置は、図9のように専用アプリを用いて振動データを取得後、インターネット経由にてサーバに自動送信する。サーバ内では、計算分析を経て軸受の外輪、内輪、転動体の正常・異常の判定後、その結果を再びスマートフォンに返信する。

スマートフォンの操作画面と判定結果の表示画面例を図10に示す。また、図11にFFT解析結果、図12にオーバール値、図13には実効値のトレンドを示す。これらのデータは専用サーバに保存され、テンポラリだけでなく時間経過後のダウンロードも可能であり、過去の測定結果をトレンド表示するなど、設備の定点監視にも活用できる。



図8 ハンディ型異常検知装置
Handy type failure detection device

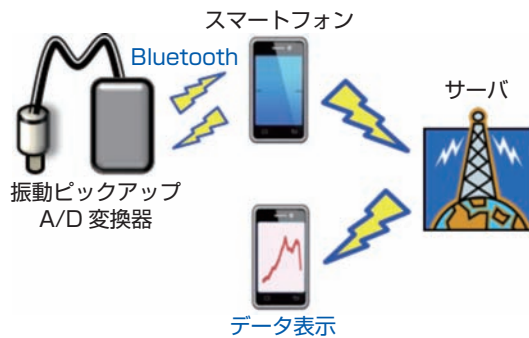


図9 ハンディ型異常検知装置の構成
Structure of handy type failure detection device



図10 ハンディ型の操作画面と判定画面例
Operation screen and judgment screen

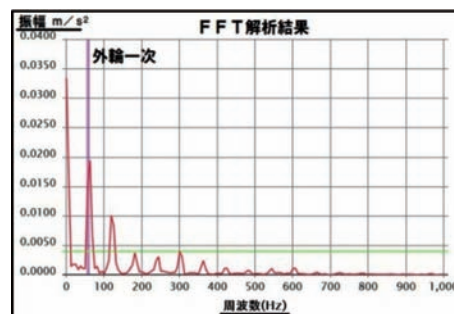


図11 FFT解析結果例
Result of FFT analysis

測定結果		
	Peak	RMS
加速度 m/s ²	16.582	3.052
速度 mm/s	3.266	1.331
変位 mm	0.058	0.023

図12 オーバオール値表示例
View of overall value

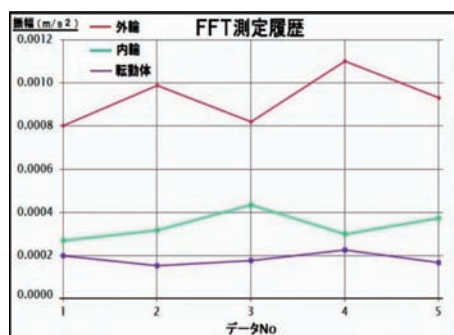


図13 実効値のトレンド表示例
Trend view of RMS value

5. NEDO (新エネルギー・産業技術総合開発機構) プロジェクトへの参画

NTNは、NEDOが実施する風力発電高度実用化研究開発(スマートメンテナンス技術研究開発)に東京大学ほかと参画し、CMSの実証評価を行っている。

本研究開発は、高効率なメンテナンス手法の開発と、実際に既設風車による実証試験を実施することで、国内風力発電の設備利用率を現在全国平均20%弱から23%以上に引き上げることを目的としている。NTNは、この研究開発の中で、全国各地の風力発電装置にWind Doctor®を設置して実証試験を行い、CMSによる設備診断技術のさらなる高度化を図っていく。

執筆者近影



橋爪 啓介
産業機械事業本部
CMS技術部



竹内 彰利
産業機械事業本部
CMS技術部



田中 弓弦
産業機械事業本部
CMS技術部

6. 今後の展開

風力を含めた一般的な発電プラントでは、設備とサイト全体の稼動情報を収集するための遠隔監視制御(SCADA: Supervisory Control and Data Acquisition)システムを構築している。今後、このSCADAから得られたデータと、早期異常検出を目的としたCMSを連動させることで、より多くの情報に基づく自動でのトレンド分析や劣化傾向予測など、高精度な判定が可能になると確信している。

CMSに求められる究極の機能は、損傷の早期発見だけでなく、余寿命予測である。異常に伴うダウンタイムをいかに最小化できるかが重要であり、準備期間の確保のため運用限界の明示を望まれることが多い。

しかし、運転条件や外乱、環境などにより異常検出から破損に至るまでの経過は大きく異なるため、余寿命予測に向けての課題は多い。今後、振動や変位データだけでなく、音響や視覚などのセンシングデータも取り込んだ新たな解析手法と精密診断技術の導入も必要となってくるであろう。

7. おわりに

CMSの必要性をはじめNTNの商品や取り組みについて紹介した。CMSの技術としては、引き続きデータ収集装置の高機能化と高性能化を進めることで、高精度で有益な技術情報サービスを提供し、風力発電のみならず産業機械分野への一層の稼動率向上やメンテナンスの負担軽減などに貢献していく所存である。

参考文献

- 1) 竹内彰利, 長谷場隆, 池田博志: 風力発電装置へのコンディションモニタリングの適用, NTN TECHNICAL REVIEW, No.80 (2012) 15-18.

[製品紹介]

アルテージシリーズ高機能ころ軸受の紹介

Introduction of "ULTAGE" series : High Functionality Roller Bearings



田畑 翔悟* Shogo TABATA
 戸田 耕平** Kouhei TODA
 清水 保彦*** Yasuhiko SHIMIZU

鉄鋼や風力発電などの各種プラント設備や建設機械、鉱山機械、減速機など、運転時の振動・衝撃などの過酷な環境で高出力・高効率を求められる産業機械に使用されるころ軸受について、内部設計の最適化を図ることで、世界最高水準の負荷容量と許容回転速度を達成した。本軸受を地球環境保全に貢献する「ULTAGE® (アルテージ)」シリーズとして新たに標準化し、販売を開始する。

When it comes to the operational demands put on equipment (such as iron and steel machinery, or wind power generation) and industrial machinery (such as construction and mining machinery, or gearboxes), customers are looking to maximize output and efficiency under more severe usage conditions, like higher vibration and impact loads. In response to these increase demands, NTN developed the ULTAGE® Series of cylindrical ,tapered and thrust spherical roller bearings, which deliver the highest load capacity and allowable speed by optimizing the internal design and crowning profile. NTN will release these bearings as the ULTAGE Series which reduce the internal friction resulting in less energy needed to operate.

1. はじめに

地球環境保全に貢献するため、あらゆる産業機械で技術革新が進められている。

産業機械の回転部位に使用される軸受には、「長寿命」、「高負荷容量」、「高速性」及び「取扱い性」の向上が求められ、世界最高水準のNTN新世代軸受を「ULTAGE® (アルテージ)※」シリーズとして商品化している。同シリーズは、既に工作機械主軸用の精密転がり軸受に始まり、新型自動調心ころ軸受や圧延機ロールネック用密封形4列円すいころ軸受などで標準化している。今回、新たに長寿命・高負荷容量・高速化を達成した円筒ころ軸受、円すいころ軸受及び、スラスト自動調心ころ軸受を標準化し、アルテージシリーズに加えたので、以下に紹介する。

2. ULTAGE (アルテージ) 円筒ころ軸受

ULTAGE円筒ころ軸受は、転がり接触部の最適化を図り、重荷重が作用しても転動体と軌道輪の接触面圧分布の均一化を可能とした本軸受の特長を以下に示す。

2.1 特長

- ① 負荷容量 (従来品比)
 - ・基本動定格荷重：1.2倍
 - ・基本定格寿命：1.8倍
- ② 許容回転速度 (従来品比)
 - ・油潤滑条件で最大1.2倍
- ③ 樹脂製保持器を標準仕様として適用
 - ・油、グリース潤滑に対応
- ④ 許容傾き角
 - アルテージ：1/500 (0.002 rad)
 - 従来品：1/2000 (0.0005 rad)

※ ULTAGE® (アルテージ)とは、究極を意味する【ULTIMATE】とあらゆる場面での活躍を意味する【STAGE】を組み合わせた造語で、世界最高水準のNTN新世代軸受のシリーズ総称。

*産業機械事業本部 産業機械技術部

**産業機械事業本部 新エネルギー技術部

***産業機械事業本部 建機・鉄道技術部

2.2 構造

NUタイプ円筒ころ軸受の構造例を図1に示す。

1) 内部設計を最適化

大径ころを採用し、ころクラウニング形状の最適化により傾き角大、重荷重など過酷な条件下での使用が可能となり耐荷重性能が向上した。

2) 樹脂製保持器を標準仕様として適用

材料にはガラス繊維強化型のポリアミド樹脂を使用している。樹脂製保持器は軽量であるほか、低トルク、低ノイズの特性を持っている。

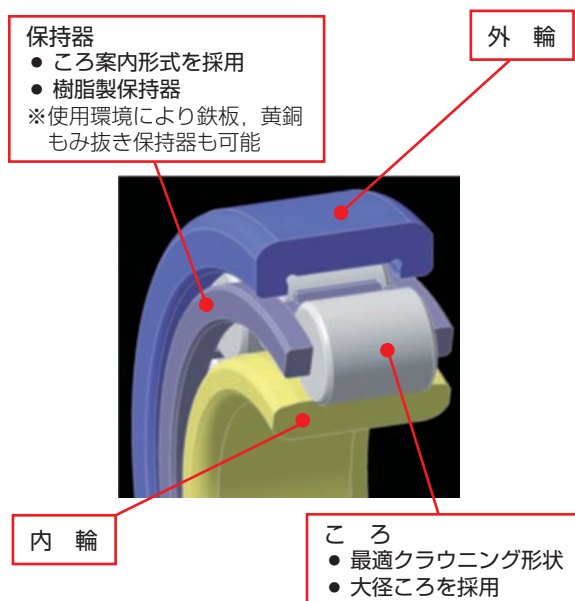


図1 ULTAGE円筒ころ軸受の構造
Design of ULTAGE cylindrical roller bearing

2.3 高負荷容量化

下記計算条件における面圧分布例を図2に示す。

ULTAGE円筒ころ軸受は、ころのクラウニング形状を最適化することで、従来品に比べエッジ応力発生部の面圧を大幅に低減した。また、新加工方法の適用によりころ外径面のストレート部とクラウニングをなめらかにつなぐことで、従来品で見られたクラウニング開始点の応力集中を緩和した。これにより、過酷条件下の使用においても軸受の破損につながる面圧の上昇が低減され、耐荷重性能及び軸受寿命が向上した。

《計算条件》

- 軸受型番：NU304E ($\phi 20 \times \phi 52 \times 15$)
- ラジアル荷重：7.9kN
- 傾き角：1/500 (0.002 rad)

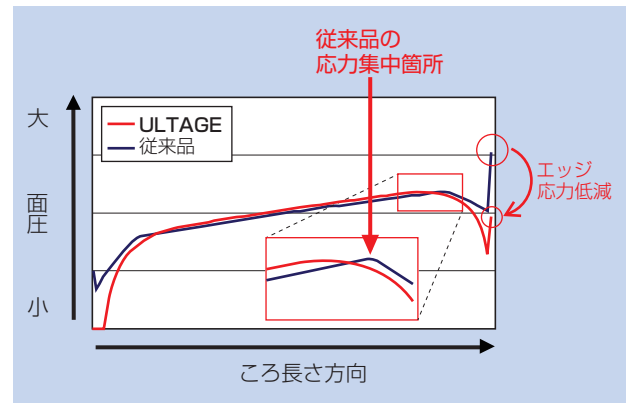


図2 ころの接触面圧分布
Contact stress distribution of rollers

2.4 高速化（許容回転速度の向上）

ULTAGE円筒ころ軸受は、ころと軌道輪間の面圧の低減及び、ころとつば部の接触状態も改良した。これにより軸受内部の潤滑性が改善し、発熱が抑制され、従来品に比べ許容回転速度が20%向上した。油潤滑の温度上昇試験結果を図3に示す。

《試験条件》

- 軸受型番：NU307E ($\phi 35 \times \phi 80 \times 21$)
- ラジアル荷重：3.5kN (5% C_{or})
- 軸受内部すきま：CNすきま (0.025~0.050)
- 潤滑：タービン油 VG32 循環給油

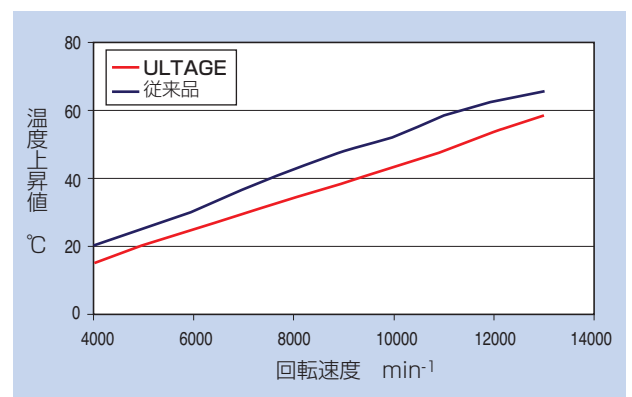


図3 温度上昇試験結果
Temperature rise test results

2.5 標準シリーズ化

ULTAGE円筒ころ軸受は、軸受外径180mm以下の標準シリーズに対応する。

3. ULTAGE (アルテージ) 大形円すいころ軸受

ULTAGE大形円すいころ軸受は、従来の軸受の内部設計を最適化することで以下の特長を有する。

3.1 特長

- ① 負荷容量 (従来品比)
 - ・基本動定格荷重：1.3倍
 - ・基本定格寿命：3倍
- ② 許容回転速度 (従来品比)
 - ・油潤滑条件下で最大1.1倍
- ③ 回転トルク低減
- ④ 経年寸法変化率
 - ・軸受鋼比1/10，はだ焼き鋼比1/4
- ⑤ 許容傾き角
 - アルテージ：1/600 (0.0017 rad)
 - 従来品：1/2000 (0.0005 rad)

3.2 構造

本軸受の構造を図4に示す。

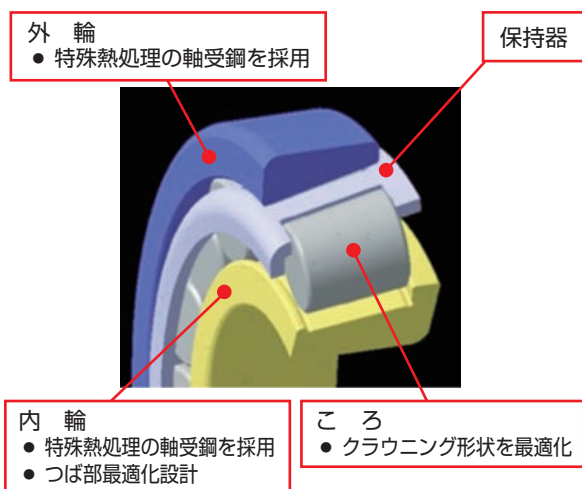


図4 ULTAGE円すいころ軸受の構造
Design of ULTAGE taper roller bearing

3.3 高負荷容量化

ULTAGE大形円すいころ軸受は、ころのクラウニングを最適化し、エッジ応力と呼ばれる過大な接触面圧を大幅に低減し接触面圧分布を均一化することで、従来より耐荷重性能を向上させた。これにより、過酷条件下の使用においても軸受の破損につながる面圧の上昇が低減され、軸受寿命が向上した。

下記計算条件における、ころの面圧分布例を図5に示す。

《計算条件》

軸受型番：30316U ($\phi 80 \times \phi 170 \times 42.5$)

ラジアル荷重：102kN

傾き角：1/600 (0.0017 rad)

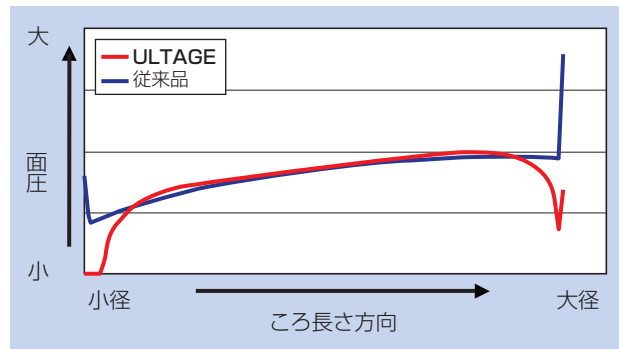


図5 ころの接触面圧分布
Contact stress distribution of rollers

3.4 高速化 (許容回転速度の向上)

ULTAGE大形円すいころ軸受は、図6に示すように、ころと内輪のすべり接触部を最適化することで回転トルクと温度上昇を低減し、許容回転速度を従来品に比べ1.1倍向上した。

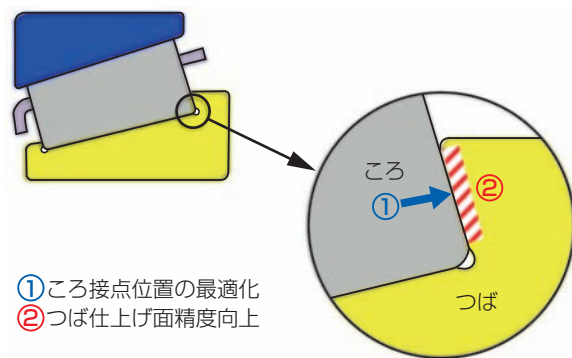


図6 内輪ところのすべり面
Contact point between inner ring large end rib face and roller large end face

(1) 温度上昇試験

ULTAGE大形円すいころ軸受とNTN従来品及び、他社製軸受との温度上昇比較試験結果を図7に示す。

《試験条件》

試験軸受：32940XUE1 ($\phi 200 \times \phi 280 \times 51$)

潤滑：タービン油 VG56 循環給油

軸受内部すきま：C2 (0.100~0.260)

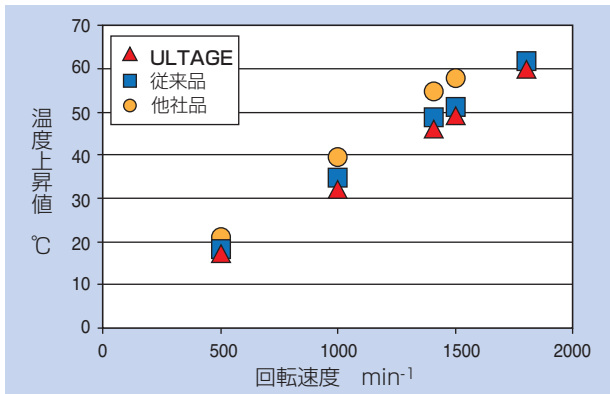


図7 温度上昇試験結果
Temperature rise test results

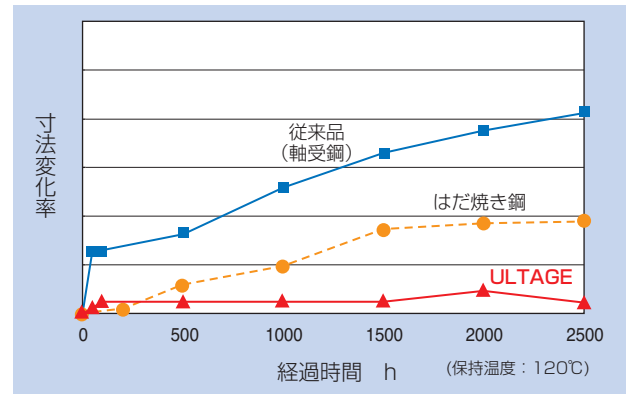


図9 経年寸法変化試験結果
Dimensional change test results

(2) 回転トルク試験

ULTAGE大形円すいころ軸受とNTN従来品及び、他社製軸受との回転トルク比較試験結果を図8に示す。

《試験条件》

試験軸受：30316U ($\phi 80 \times \phi 160 \times 42.5$)

アキシアル荷重：6.9kN

潤滑：タービン油 VG32

温度：室温

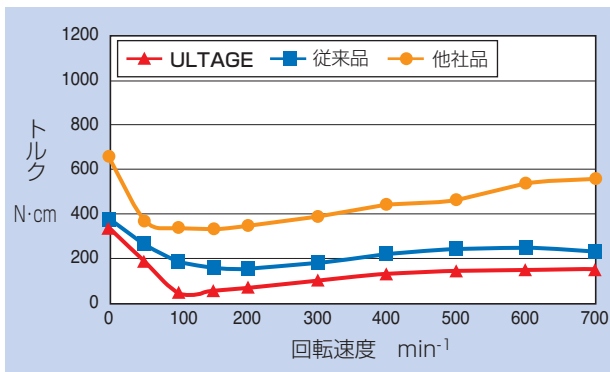


図8 トルク試験結果
Running torque test results

3.5 経年寸法変化の抑制

軸受鋼に特殊熱処理（耐熱寸法安定化処理）を採用することで、使用時における軸受の経年寸法変化率を軸受鋼を用いた従来品と比べ1/10以下（はだ焼鋼比：1/4以下）に抑制した。この結果を図9に示す。

3.6 標準シリーズ化

ULTAGE大形円すいころ軸受は、メートル系の軸受外径270mm以上の範囲で標準シリーズに対応する。

4. ULTAGE（アルテージ） スラスト自動調心ころ軸受

ULTAGE スラスト自動調心ころ軸受は、従来品に対し内部設計を最適化し、以下の特長を有する。

4.1 特長

- ① 負荷容量(従来品比)
 - ・基本動定格荷重：最大1.7倍
 - ・基本定格寿命：最大6倍
- ② 許容回転速度(従来品比)
 - ・許容回転速度：最大1.2倍
- ③ かご型鋼板製打抜き保持器を適用
 - ・油,グリース潤滑に対応
- ④ 200℃耐熱仕様
 - ・特殊熱処理の採用

4.2 構造

本軸受の構造を図10に示す。

1) 内部設計を最適化

ころ径及びころ長さを最大化し、溝及びつばの曲率を最適化した。

2) かご型鋼板製打抜き保持器を適用

打抜き保持器を採用することで、潤滑剤を軸受内部へ流入し易くし、油及びグリースそれぞれの潤滑方法で使用を可能とした

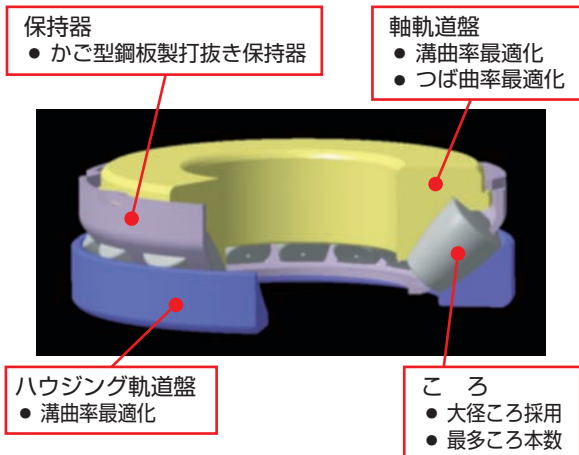


図10 ULTAGE スラスト自動調心ころ軸受の構造
Design of ULTAGE thrust spherical roller bearing

4.3 高負荷容量化

ULTAGEスラスト自動調心ころ軸受は、従来品に対しころ径及びころ長さを最大化することで、世界最高水準の高負荷容量を実現した。

4.4 高速化（許容回転速度の向上）

ULTAGEスラスト自動調心ころ軸受は、従来品で採用していた支持輪案内のみ抜き保持器に対し、かご型鋼板製打抜き保持器を採用した。さらに軸軌道盤のつば曲率を最適化したことにより、温度上昇を抑制し、低昇温化したことから許容回転速度が従来比最大1.2倍向上した。

縦型及び横型試験の温度上昇試験結果を図11,12に示す。双方の試験ともに従来品よりも低い温度上昇である。

① 縦型試験

《試験条件》

- 試験軸受：29418E
- アキシャル荷重：98 kN (5% C_{0a})
- 潤滑：タービン油VG32 循環給油

② 横型試験

《試験条件》

- 試験軸受：29418E
- アキシャル荷重：98 kN (5% C_{0a})
- 潤滑：タービン油VG32 循環給油

4.5 標準シリーズ化

ULTAGEスラスト自動調心ころ軸受は、29400系列における軸受外径130～320mmの標準シリーズに対応する。

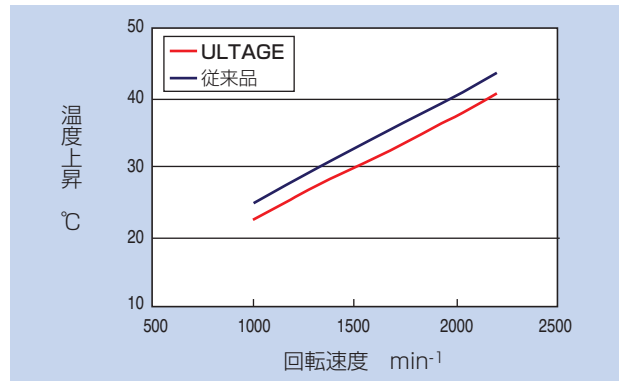


図11 縦型試験機での温度上昇試験結果
Temperature rise test results, vertical shaft

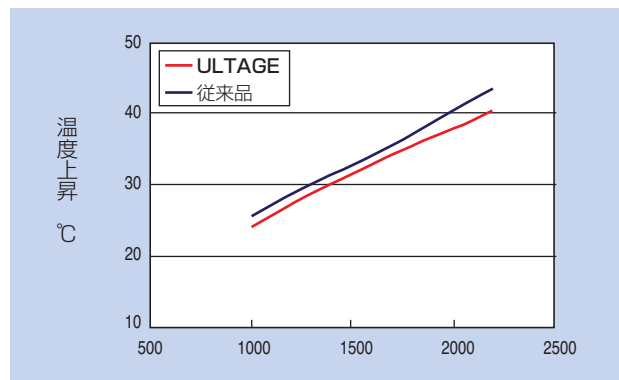


図12 横型試験機での温度上昇試験結果
Temperature rise test results, horizontal shaft

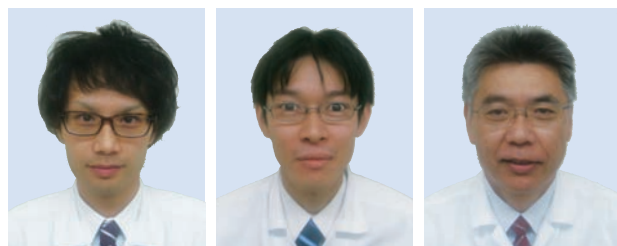
5. まとめ

今回、NTN新世代軸受のアルテージシリーズについて、新たに3タイプのころ軸受を加えた。

地球環境保全に貢献するため産業機械で技術革新が進められている現在、軸受の高負荷容量化と高速化は、軽量・コンパクト・長寿命を要求する市場ニーズに対応できるものとする。

今後も各市場ニーズに応え、さらなる改善と高性能化を図り、次世代軸受の開発を継続して行く所存である。

執筆者近影



田畑 翔悟 産業機械事業本部 産業機械技術部
戸田 耕平 産業機械事業本部 新エネルギー技術部
清水 保彦 産業機械事業本部 建機・鉄道技術部

航空機用軸受の技術動向 Technical Trend of Aircraft Bearings



西河 崇* Takashi NISHIKAWA
林 奈央* Nao HAYASHI
早川 亜希子** Akiko HAYAKAWA

航空機には、ジェットエンジンをはじめ、数多くの軸受が使用されており、NTNは、主要ジェットエンジンメーカー向けに多種多様な形状の軸受を供給している。近年では、軽量化や環境負荷低減などによるジェットエンジンの高性能化に伴い軸受機構は複雑になっているため、更に高い信頼性と厳しい品質管理が求められる。本稿では、NTNの航空機用軸受の取り組みとジェットエンジン主軸用軸受について紹介する。

There are many different types of bearing for aircraft applications. NTN supplies bearings to jet engine manufacturers all over the world. Recently due to new customer requirements for reducing weight, environmental impact and higher performance, bearing systems are becoming very complicated that require higher reliability and quality controls.

In this paper, NTN's design theory to jet engine main shaft bearings along with the industry trends are documented.

1. はじめに

新興国市場の急成長、格安航空会社（LCC）の世界的な普及などもあり、民間航空機の需要と売上は順調に伸びている。航空機には数多くの軸受が使用されており、NTNも主要ジェットエンジンメーカーに軸受の供給を行っている。本稿では、NTNの航空機用軸受の取り組みと、特に過酷な条件で使用されるジェットエンジン主軸用軸受について紹介する。

更には製品出荷の可否判断を行う出荷保証責任者、クリーンルーム内での組み立て・検査など、徹底した品質管理により高精度、高信頼性を保証している。

また技術開発としては、将来需要増加が推定される回転体にセラミックス、軌道輪に軸受用鋼を用いたハイブリッド軸受や、軌道輪及び回転体に窒化処理を施した窒化軸受の開発を行うとともに、潤滑油の供給が遮断された状態で、軸受が一定時間焼き付かずに使用可能なドライラン性能を評価する試験機も独自で開発している。

2. NTNの航空機用軸受の取り組み

航空機や宇宙関連向けの商品開発や製造には、極めて高い技術が求められる。NTNでは航空・宇宙用軸受専用工場をNTN桑名製作所（三重県）とNTN-SNRアルゴネ工場（フランス）に設け、恒温環境での超精密加工をはじめ、熱処理や表面改質、非破壊検査など航空宇宙産業における特殊工程作業に対する国際的な認証制度NADCAP（National Aerospace and Defense Contractors Accreditation Program）や各顧客の認証を取得した特殊工程及び認定検査員、

NTNは、日本及びフランスに生産拠点だけでなく、技術開発拠点も有している。それら拠点を中心にして、日本及びフランスのみならず、世界の主要なジェットエンジンメーカー、ヘリコプターメーカー、航空宇宙関連企業と直接取引し、長年にわたり高品質な製品を数多く提供してきている。最近では、ボーイング787に搭載されているゼネラル・エレクトリック社製GENxエンジン、Airbus A350に搭載予定のロールス・ロイス社製Trent XWBエンジン、三菱航空機MRJなどに搭載予定のプラット・アンド・ホイットニー社製GTFエンジンにNTN製軸受が採用され、航

*産業機械事業本部 工作機・航空宇宙技術部

**産業機械事業本部 桑名製作所

空宇宙産業界でのプレゼンスが向上している。

NTN製軸受は、上述のジェットエンジンの主軸をはじめ、アクセサリ・ギアボックス (AGB) やフライト・コントロール・システム (FCS)、降着装置、補助動力装置 (APU) など、航空機のさまざまな箇所で使用されている。

3. ジェットエンジン主軸用軸受の紹介

3.1 ジェットエンジンの形式

航空機タービンエンジンには、ターボジェット、ターボファン、ターボプロップ、ターボシャフトの4タイプがあり、通常前者二つをジェットエンジンと呼んでいる。高効率、低騒音の特長を持つ2軸式のターボファンエンジンが主流であるが、圧縮機設計を最適化できる3軸式を採用しているエンジンもある。また、ファンを減速して駆動するための遊星歯車機構を有するGFTエンジンもある。

図1にターボファンエンジンの基本構造を示す。本形式では、エンジン最前部から吸い込んだ空気をコンプレッサー (圧縮機) で圧縮して、燃焼室に送り込み、燃料を燃焼させ、その排気でタービンを駆動する。タービンにはコンプレッサー及びファン駆動の2系統があり、ターボファンエンジンの推力のほとんどはファンによる排気から得られる。

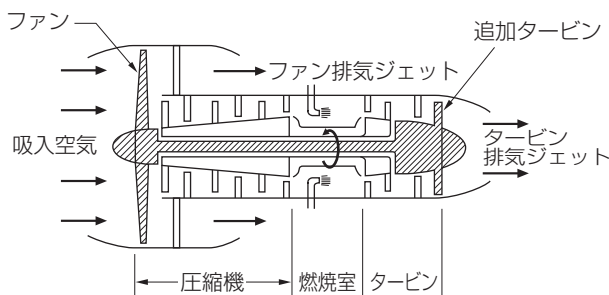


図1 ターボファンエンジンの概略構造
Outline structure of Turbo fan engine

3.2 ジェットエンジン主軸用軸受に求められる特性

ジェットエンジン主軸用軸受に求められる主な特性は、以下の3点である。

- ・高速回転に適していること
- ・高温での作動が可能であること
- ・高い信頼性、トレーサビリティを有すること

(1) 高速

軸受の高速性を評価する指標として dn 値 (軸受内輪内径 (mm) \times 内輪回転速度 (min^{-1})) がある。図2に一般産業機械における代表的な用途における軸受の dn 値を示す。ジェットエンジン主軸用軸受は $dn 2.0 \times 10^6$ を超える条件で使用されるため、疲労寿命と耐焼付き性に優れることが要求される。また、軸受内輪には遠心力による大きなフープ応力が生じるため、これに耐える破壊強度も要求される。

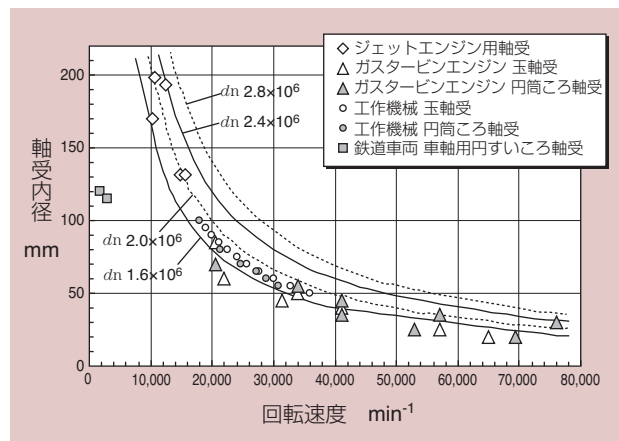


図2 軸受の dn 値
 dn value of bearings

(2) 高温

ジェットエンジン主軸用軸受は、運転中約 200°C の高温雰囲気中に晒される。また、エンジン停止後もタービンはヒートソークバックと呼ばれる熱が逃げずに蓄えられた状態となり、この熱により軸受は 300°C 以上の高温になる。そのため、高温環境下でも寸法変化が少なく、疲労寿命が低下しない事が要求される。

(3) 信頼性とトレーサビリティ

航空機は安全であることが絶対条件であるため、軸受にも高い信頼性が求められる。前項で述べた各種認証取得内容を含め、材料の調達から鍛造・旋削・熱処理・研削・表面処理などの軸受製造工程毎に全数検査を実施し、製造中の不適合が無いことを確認し、高い信頼性を確保している。

軸受の破損など、万一のトラブルに備え、各工程の全製造データを追跡できることも要求される。

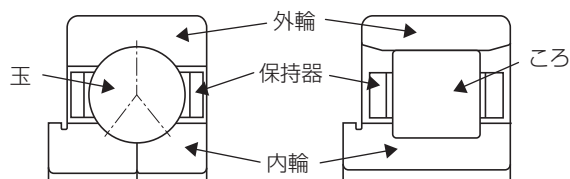
3.3 ジェットエンジン主軸用軸受の主な特徴

(1) 軸受形式

一般的なジェットエンジンは、高速・高圧側のコンプレッサー／タービン及び低速・低圧側のファン／コンプレッサー／タービンの二つの軸系を持ち、軸受はそれらを支える役割を担っている。

ジェットエンジン主軸用軸受の形式は主に図3に示す3点接触玉軸受と円筒ころ軸受である。3点接触玉軸受は、軸方向及び径方向に発生する荷重を支持する。軸方向荷重については、両方向の荷重を受けることができる。本軸受は、大きな負荷荷重下で寿命を確保するため、内輪を二つに分割できる形式とし、可能な限り多くの玉を組み込めるようにしている。円筒ころ軸受は、径方向荷重を支持しながら、エンジン主軸の長さ方向の膨張／収縮を吸収させるため、自由側軸受として使用する。

図4にボーイング社の旅客機B767に使用されている主軸用軸受を示す。



(a) 3点接触玉軸受 (b) 円筒ころ軸受

図3 ジェットエンジン用軸受の形式
Bearing types for jet engines



(a) 3点接触玉軸受 (b) 円筒ころ軸受

図4 ジェットエンジン主軸用軸受の例
Examples of main shaft bearings of jet engine

(2) 軸受材料

ジェットエンジン主軸用軸受の材料には、主に高温下での長寿命、寸法安定性、高強度、耐摩耗性が求められる。軌道輪、転動体には、モリブデン系のAISI M50あるいはタングステン系のT1などの高速度工具鋼を使用する。図5に示すようにM50は300℃でも58HRC程度の硬さを有し、寸法安定性も高い。

軸受を高速回転で使用すると内輪には遠心力が作用し、図6に示すように内輪の円周方向の引張応力（フープ応力）が大きくなる。M50などずぶ焼入鋼の場合、一旦内輪に剥離が発生すると、亀裂の進展速度が速く内輪破断に至ることがあるため、破断に対し耐性を有する耐熱浸炭鋼AISI M50NiLを使用する場合もある。図7に破壊靱性値の比較を示す。

保持器はSAE4340鋼を30HRC程度に硬化した状態で使用する場合が多い。

なお、航空宇宙用軸受の材料は、通常機体メーカーやエンジンメーカーが認定したものしか使用できない。NTNも各エンジンメーカーが認定した供給元から材料を調達している。

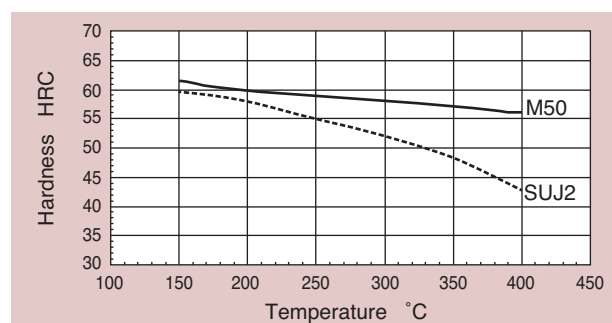


図5 軸受材料の高温硬さ
Hardness of bearing steel for high temperature

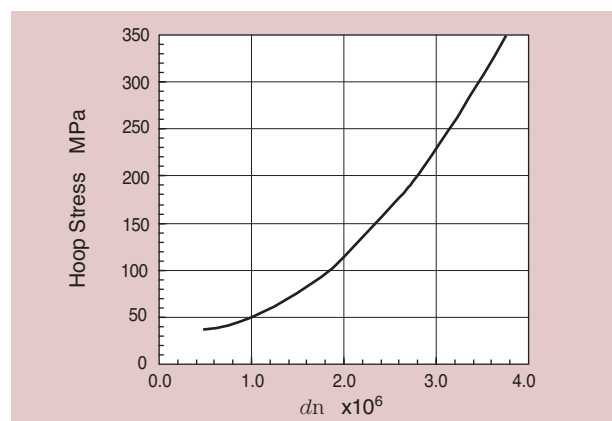


図6 軸受内輪に作用するフープ応力
Hoop stress on bearing inner ring

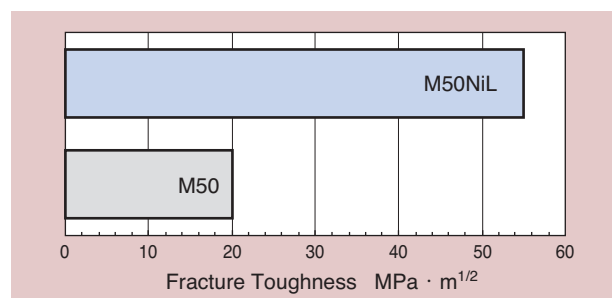


図7 破壊靱性値の比較
Comparison of fracture toughness

(3) 軸受設計

高速回転する主軸で生じる振動を吸収するため、**図8**に示すように、外輪はばね性を有する振動吸収部品に組み込まれ、オイルダンパで支持される。現在は軽量化と部品点数削減のため、振動吸収部品と外輪が一体となった軸受を使用するケースが多い。

現在実用化している一体軸受の一例を**図9**に示す。円筒ころ軸受は、主軸の自重のみを径方向荷重として受けるため負荷荷重が小さく、内輪がころを駆動する力も比較的小さい。ころと軌道面との間ですべりが生じ、早期摩耗する場合がある。そこで**図10**に示すように、外輪外径面を楕円にして、ハウジングに組み込んだ時に、ころに予圧を与える形式を使用するケースもある。

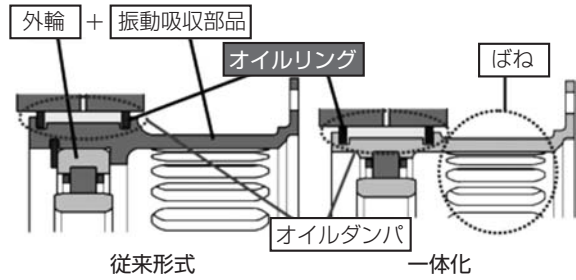


図8 一体化軸受
Unitized bearings



図9 一体化された軸受モデル
Unitized model of a bearing

(4) 潤滑

初期のジェットエンジンの潤滑油には鉱油系のSAE1010が用いられていたが、高温環境下での使用のため酸化劣化が速く、軸受寿命に影響を与えた。この課題に対して、潤滑油の変遷については、まず合成エステル系MIL-L-7808が開発された。その後、耐荷重性能を向上させたMIL-L-23699が開発され、現在はMIL-PRF-23699がジェットエンジンの潤滑油の主流となっている。さらに、高温での酸化安定性や耐スラッジ性能に優れた潤滑油も開発され、MIL-PRF-23699 HTSとして規格化された。それに伴い、従来油MIL-PRF-23699はMIL-PRF-23699 STDとして規格化された。

潤滑油は、軸受転動面及び、保持器案内面である保持器とランドの接触部に供給しなければならない。そのため給油方法は強制給油が必須であり、**図11**に示すようなノズルから高速の潤滑油を噴射するオイルジェット給油を用いる。

主軸の高速回転に伴い、転動体や保持器の回転により、いわゆるエアーカーテンと呼ばれる空気の壁が形成され、ノズルから噴射された潤滑油が必要箇所に十分供給できない。この場合、遠心力により必要箇所に油を供給するアンダーレース給油を用いる。**図12**にアンダーレース給油法の一例を示す。

ノズルから噴射されたオイルジェットはオイルスクープで一旦捉えられ主軸内部へ導かれる。そして、遠心力により油を軸受内部へ供給する。アンダーレース給油法は、油を直接軸受内輪側へ供給するため、軸受の冷却効果もオイルジェットに比べて高い。

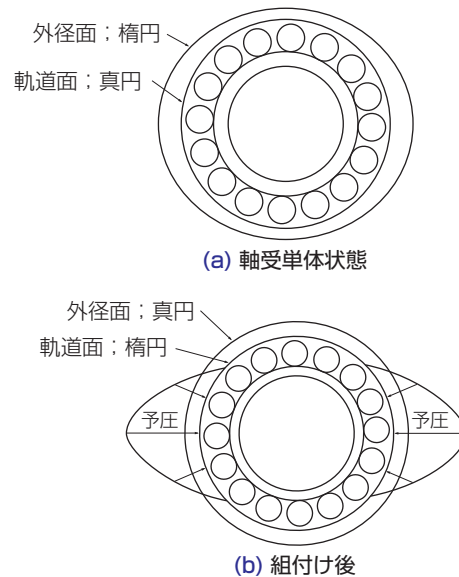


図10 非真円円筒ころ軸受
Non-true circle cylindrical roller bearing

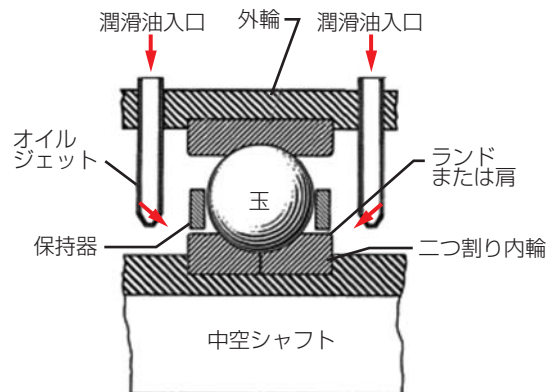


図11 オイルジェット給油
Oil jet lubrication

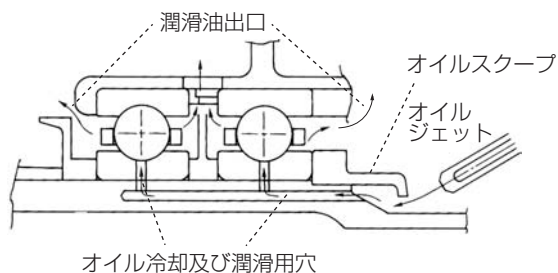


図12 アンダーレース給油
Under-raceway lubrication

(5) 表面処理

保持器案内面では、保持器とランドの間でのすべり摩擦が避けられず、良好な摩擦特性と耐摩耗性が要求される。良好な摩擦特性を得るためには、保持器案内面への確実な潤滑油の供給が必要であり、前述アンダーレース給油法が適用されている。さらに、同種金属同士の接触を避けるため、保持器表面に銀めっきを施している。この銀めっき規格の主流はAMS2412である。

図13に示す軌道輪側のランド面には、耐摩耗性向上のため、硬質セラミックの一種であるTiNコーティングを施す場合がある。

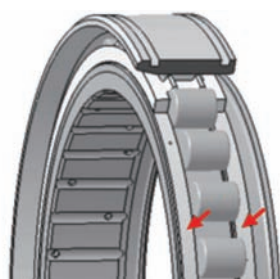


図13 TiNコーティング
TiN coating

3.4 ジェットエンジン主軸用軸受の技術開発

近年のジェットエンジンは、低燃費化や重量軽減を目的に高温化や高圧化する傾向であり、ジェットエンジン主軸用軸受の構造は更に複雑化している。このため、軸受の信頼性を向上させるための開発が重要課題であり、これらについて紹介する。

1) 表面改質

軸受不具合の主な要因は、硬い異物により生じた圧痕などの表面欠陥を起点としたはく離や凝着がある。それらを抑制し高い信頼性に応えるため、表面改質による軌道面硬化の確立に取り組んでいる。

2) 転動体材料

転動体は、高速回転による転動体と軌道輪の接触面圧を抑えるため、比重がM50の約40%と軽量で、摩擦摩耗特性にも優れたセラミック（Si₃N₄）の適用を検討している。しかし、ジェットエンジン主軸用軸受に使用するには、高い信頼性が必要であることから、欠陥検出の方法である高精度な非破壊検査の確立に取り組んでいる。

4. おわりに

航空機にはジェットエンジンをはじめ、さまざまな箇所でも軸受が使用されている。NTNは、長年にわたり高品質な軸受を数多く提供しており、徹底した品質管理を行うことで高精度・高信頼性を保証している。

また、ジェットエンジン用軸受は、ジェットエンジンの高性能化に伴い、軸受の使用条件もさらに厳しくなることが予想される。NTNではジェットエンジンにおける軸受の重要性をさらに認識し、要素技術の研究開発を進めていく。同時にジェットエンジンメカ、ヘリコプターメカなどの新規開発への参画を通じて、NTNの高い技術・品質を世界中の顧客へ提供し、航空産業界へ貢献する所存である。

参考文献

- 1) 松岡増二：航空工学講座第11巻 ジェット・エンジン（構造編）
- 2) NTN TECHNICAL REVIEW, No.67(1998) 7.
- 3) NTN ベアリングエンジニア, 第21巻, 第1号(1972) 61.
- 4) NTN 松森直樹, 空の安全を守るジェットエンジン主軸用軸受, ツールエンジニア, vol.54 no.13, 株式会社大河出版, (2013) 61.

執筆者近影



西河 崇

産業機械事業本部
工作機・航空宇宙技術部



林 奈央

産業機械事業本部
工作機・航空宇宙技術部



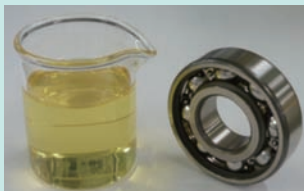
早川 亜希子

産業機械事業本部
桑名製作所

アブレシブ摩耗下の鋼に侵入する水素量と湿度の影響

The Influence of the Humidity and Quantity of Hydrogen into Steel under the Abrasive Wear

伊藤 元博* Motohiro ITO



転がり軸受では、特異な白色組織を伴う早期はく離が起きることがある。その原因として、潤滑剤または水の分解で発生した水素に起因する水素脆化が挙げられ、鋼中に侵入した水素のうち、拡散性水素と呼ばれる水素により引き起こされると考えられている。鋼中の拡散性水素を捉える方法として、鋼をアブレシブ摩耗させた後、昇温脱離水素分析を行なう方法がある。本報では、温湿度を制御した空間内でアブレシブ摩耗を行ない、鋼中に侵入する水素量と湿度の影響を調査した。

An early bearing damage is occurred and accompanied by unique white microstructures in the raceway subsurfaces. The main cause is thought to be the result of hydrogen embrittlement caused by generated hydrogen from decomposition of lubricant and containing water. It is considered that hydrogen embrittlement is occurred by penetrated diffusible hydrogen. There is a method to detect diffusible hydrogen in steel. This method measures the specimen that is worn under abrasive wear by thermal desorption analysis. In this report, we tested abrasive wear in space that is controlled humidity and investigated that relationship between humidity and penetrated diffusible hydrogen into steel via abrasive wear.

1. はじめに

特異な白色組織変化を伴う転がり軸受での早期はく離は、水素が主な原因と考えられている¹⁾。その発生メカニズムは、軸受内の潤滑剤または内部に侵入した水の分解により発生した水素が鋼中に侵入し、鋼を脆化させ、はく離に至ると推定されている²⁻⁴⁾。また、鋼中に侵入した水素のうち、水素脆化をもたらすのは拡散性水素と考えられている。

拡散性水素を検出する方法として、電気化学的に水素を鋼に侵入させ、透過した水素をイオン化電流として捉える方法⁵⁾ および、腐食環境下で鋼に水素を侵入させた後、昇温脱離水素分析 (TDA: Thermal desorption analysis) を行なう方法⁶⁾ などがあ

る。一方、水または油を滴下しながらエメリ紙で鋼をアブレシブ摩耗させた後、昇温脱離水素分析を行なう方法では、水または潤滑剤の分解に由来する拡散性水素を捉えることができる⁷⁾。水または油を塗布していない乾燥摩擦試験でも拡散性水素が検出されていることから、空気中の水蒸気の関与が示唆されている⁷⁾。

本報では、温湿度を制御した空間内でアブレシブ摩耗させて、鋼中に侵入する水素量と湿度の影響を調査した。

2. 摩耗試験

図1に試験機の概略図を、表1に摩耗試験条件を示す。試験では、#220のエメリ紙を回転定盤に貼り、試験片ホルダに取り付けた3枚のSUJ2製ディスクを固定試験片とした。チャンバ内は空調機により、温湿度を制御した空気を循環供給できる構造である。試験片への荷重の負荷はおもりにより行ない、面圧は85.4kPaとした。試験前にエメリ紙へ試験油を5ml塗布し、試験中に1ml/min滴下して摩耗試験を行なった。回転定盤と試験片ホルダは歯車を介して公転と自転をする構造であり、試験片ホルダ中心での回転定盤の公転周速は0.59m/s、試験片中心での試験片ホルダの自転周速は0.03m/sである。

図2に試験片形状を、表2に試験片の処理条件を示す。試験片は通常の焼入焼戻したSUJ2である。焼入れ温度は850℃、焼戻しは180℃×2hである。

表3に鈹油，水添加油，ふっ素系油を用いた各摩耗試験条件を示す。

鈹油は，無添加タービンオイルVG100を用いた。

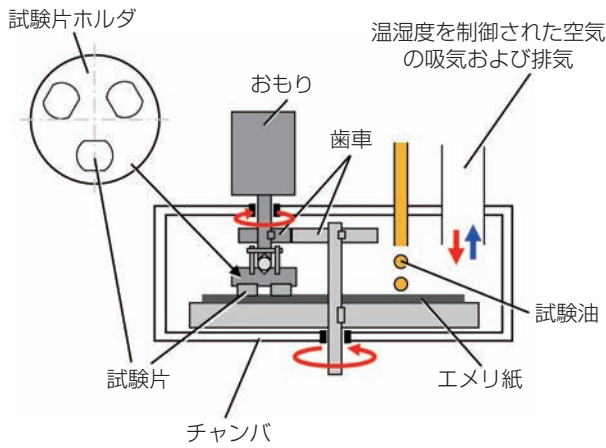


図1 試験機の概略図
Schematic of test rig

表1 共通の摩耗試験条件
Wear test common condition

試験片個数	3個
エメリ紙の番手	#220
ホルダ中心の公転周速	0.59 m/s
試験片中心の自転周速	0.03 m/s
面圧	85.4 kPa
滴下速度	1 ml/min

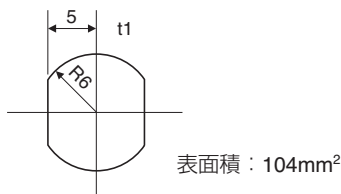


図2 試験片形状 (単位: mm)
Specimen shape (unit: mm)

表2 試験片の処理条件
Disposal condition of specimen

材質	SUJ2
熱処理	焼入れ温度: 850°C, 焼戻し: 180°C×2 h

表3 各摩耗試験条件
Each wear test conditions

項目	鈹油	水添加油	ふっ素系油
試験油	無添加タービンオイル VG100		パーフルオロポリエーテル油
水添加量	0 wt%	2, 5, 10, 15 wt% (純水)	0 wt%
設定温度	20, 30 °C		30 °C
設定相対湿度	25~95 %RH	25, 95 %RH	25, 60, 95 %RH
摩耗時間	40 min		20, 30, 40 min

試験空間内の設定温度は20, 30°Cの2水準，設定相対湿度は25~95%RHの数水準とした。摩耗試験は40min行なった。

水が油に混入した場合の影響を確認するため，水添加油を用いて摩耗試験を行なった。水添加油は，無添加タービンオイルVG100に純水を添加した。添加量は2, 5, 10, 15wt%で，設定温度は30°C，設定相対湿度は25%RH (低湿度)と95%RH (高湿度)の2条件とした。

摩耗試験後の鋼中の拡散性水素は，水だけに由来するものではなく，鈹油の分解によるものも含まれると考えられる。水の分解による水素発生の影響を明確にするため，化学構造中に水素原子を持たないふっ素系油を用いて摩耗試験を行なった。ふっ素系油は，40°Cの動粘度を100mm²/sに調整した無添加のパーフルオロポリエーテル油を用いた。試験空間内の設定温度は30°C，設定相対湿度は25, 60, 95%RHの3水準とした。摩耗時間は20, 30, 40minの3水準とした。

3. 昇温脱離水素分析

摩耗試験終了後から，3つの試験片すべての洗浄および分析管への導入を行ない，20min後に昇温脱離水素分析を開始した。昇温速度は180°C/h，測定終了温度は540°Cとした。水素検出器は熱伝導度検出器 (TCD: Thermal Conductivity Detector) である。図3にTDAプロファイルの例を示す。拡散性水素は200°Cまでに放出された水素とし，その総量を拡散性水素量とした。

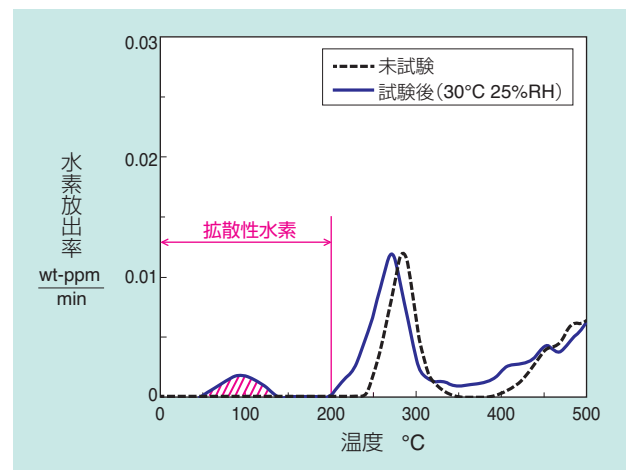


図3 TDAプロファイルの例
An example of TDA profiles

4. 鉱油

図4に摩耗試験前後の試験片のTDAプロファイルを示す。未試験では拡散性水素の放出はなかった。設定温度20, 30℃ともに相対湿度が高くなるにつれ、拡散性水素の放出量が増加した。

図5に相対湿度と拡散性水素量との関係を示す。設定温度20, 30℃の両条件とも、それぞれ高い相関を示した。

図6に容積絶対湿度と拡散性水素量との関係を示す。容積絶対湿度は実測した温度と相対湿度から求めた。容積絶対湿度と拡散性水素量には高い相関が見られ、温度の影響はほとんど見られなくなった。

鋼中の拡散性水素量は単位体積の空気中に含まれる水蒸気量に依存する結果であった。

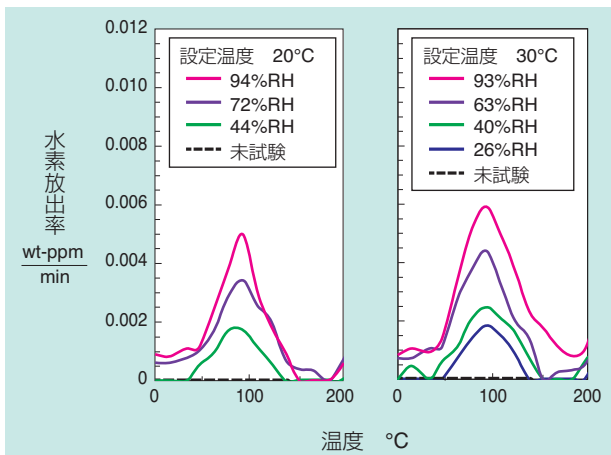


図4 摩耗試験前後の試験片のTDAプロファイル
TDA profiles of specimens before and after abrasive wear testing

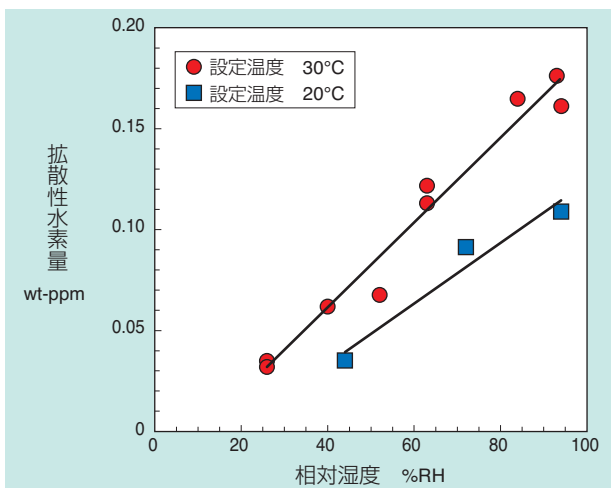


図5 相対湿度と拡散性水素量との関係
Relationship between relative humidity and amount of diffusible hydrogen

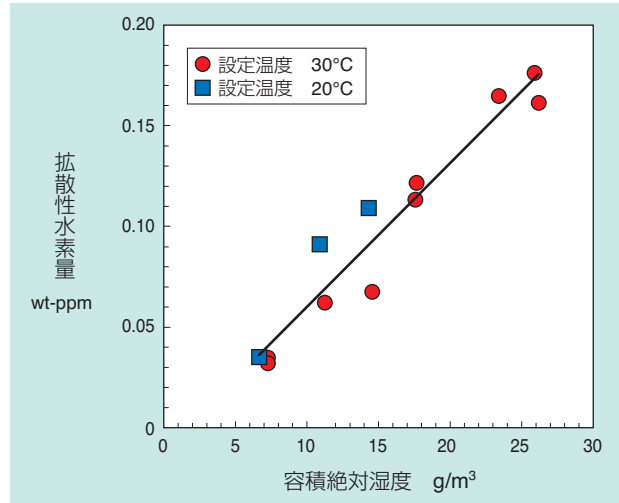


図6 容積絶対湿度と拡散性水素量との関係
Relationship between absolute humidity and amount of diffusible hydrogen

5. 水添加油

図7に水添加量と拡散性水素量との関係を示す。低湿度、高湿度の場合ともに水の添加量が多くなるにつれて、拡散性水素量が増加した。低湿度で15wt%水添加油を滴下した場合の拡散性水素量は、高湿度で水無添加油を滴下した場合の拡散性水素量よりも少なかった。

水を添加した試験油では、水無添加と比較して、高湿度、低湿度ともに拡散性水素量は増えた。これは、空気中の微量な水蒸気に加え、添加した多量の水も、摩耗で生成した鋼新生面により分解され、水素源になったためであると考えられる。

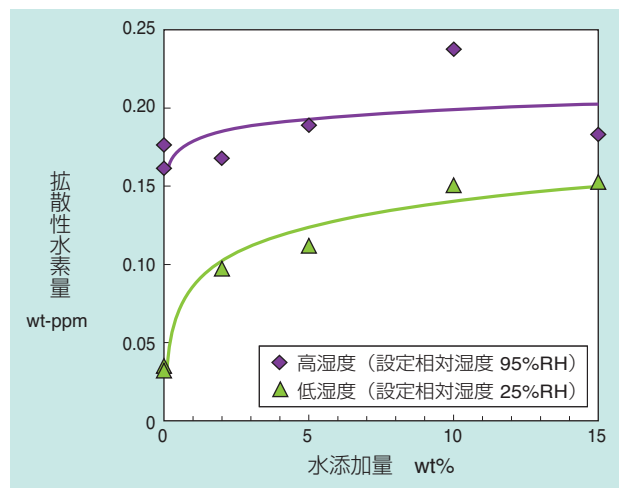


図7 水添加量と拡散性水素量との関係
Relationship between amount of containing water and amount of diffusible hydrogen in cases of water containing oils

しかしながら、低湿度で15wt%水添加油を用いた場合の拡散性水素量 (0.153wt-ppm) は、高湿度で水無添加油を用いた場合の拡散性水素量 (0.176wt-ppm) より少なかった。このことから、摩耗試験後の鋼中の拡散性水素量に対する水の影響は、試験油に添加した水よりも、空間内に含まれる微量な水蒸気の方が大きいことが示された。

表4に摩耗試験に関わった水の量および拡散性水素量を示す。試験空間容積が約0.0104m³であるため、試験空間の空気に含まれる水蒸気の量は、低湿度では0.080g、高湿度では0.271gである。試験油に水を15wt%添加した場合、滴下速度1g/min、および、摩耗時間40minより、滴下した油中の水の量は6gである。低湿度で15wt%水添加油を用いた場合の水の合計量は6.080g (6 + 0.080g) である。一方、高湿度で水無添加油を用いた場合の水の量は0.271gである。すなわち、摩耗試験に関わった水の量は、拡散性水素量が多かった高湿度で水無添加油の場合より、拡散性水素量が少なかった低湿度で15wt%水添加油の場合の方が多かった。水の存在状態により拡散性水素量が異なる理由については不明であるが、摩耗試験後の鋼中の拡散性水素量に及ぼす湿度の影響が大きいことが示された。

表4 摩耗試験に関わった水の量及び拡散性水素量
Amount of water and amount of diffusible hydrogen in wear test

項目	低湿度 (25 %RH)	高湿度 (95 %RH)
	+ 水添加 (15 wt%)	+ 水無添加 (0 wt%)
空間容積	約 0.0104 m ³	
容積絶対湿度	7.6 g/m ³	25.9 g/m ³
空間内の水の量	0.080 g	0.271 g
滴下速度	1 g/min	
試験時間	40 min	
水添加量	15 wt%	0 wt%
油中の水の量	6 g	0 g
水の量の合計	6.080 g	0.271 g
拡散性水素量	0.153 wt-ppm	0.176 wt-ppm

5.1 湿度と油の含油水分量の関係

摩耗試験後の鋼中の拡散性水素量は、空気中の水蒸気の量に依存することが分かった。また、添加した水の影響より湿度の影響が大きいことが示された。そこで、空気中の水蒸気が油に与える影響を確認するために、湿度を変えた空間内に油を静置した場合の油の含有水分量を調査した。

表5に含有水分量測定条件を示す。試験油には鉱油での摩耗試験と同じ無添加タービンオイルVG100を用いた。試験空間内の設定温度は30℃、設定相対湿度は30, 60, 90%RHの3水準とした。試験油を入れた容器を試験空間内に静置し、30min後に取り出し、ただちに含有水分量の測定を行なった。

図8に油の含有水分量の測定結果を示す。容積絶対湿度が高くなるにつれ、油の含有水分量は増加した。すなわち、高湿度では油に混入する水が多くなることが分かった。

高湿度ほど油に混入する水が多くなり、その水が水素源となったため、鋼中の拡散性水素量は単位体積の空気に含まれる水蒸気の量に依存すると考えられる。

表5 含有水分量測定条件
Water content of oil test condition

試験油	無添加タービンオイル VG100
設定温度	30℃
設定相対湿度	30, 60, 90 %RH
静置時間	30 min

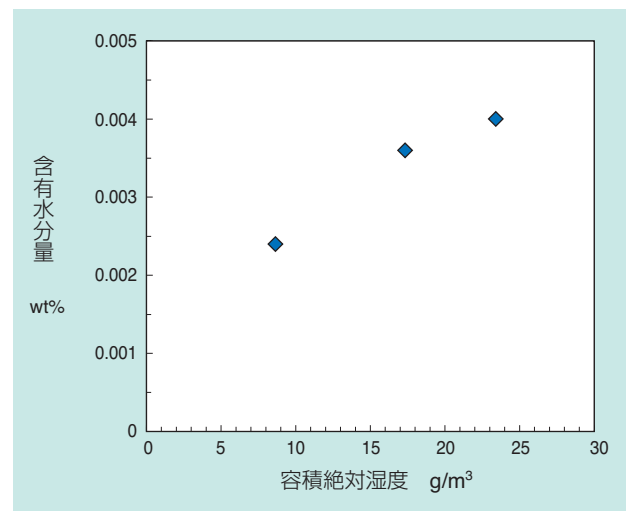


図8 油の含有水分量
Water content of oil

6. ふっ素系油

図9に摩耗試験前後の試験片のTDAプロファイルを示す。摩耗試験後はいずれの試験片からも拡散性水素が検出され、それぞれの摩耗時間において、相対湿度が高くなるにつれて、拡散性水素量が増加した。また、摩耗時間が長いほど、拡散性水素量は増加した。

図10にふっ素系油での相対湿度と拡散性水素量との関係を示す。いずれの摩耗時間でも、高い相関を示した。

図11に摩耗時間と拡散性水素量との関係を示す。設定相対湿度が同じ場合、摩耗時間が長いほど、拡散性水素量は増加した。

鉱油を用いた摩耗試験では、鋼中から拡散性水素が検出され、容積絶対湿度と拡散性水素に高い相関が見られた。そのことから、摩耗試験後の鋼中の拡散性水素量は単位体積中の空気に含まれる水蒸気の量に依存することが分かった。しかし、鉱油の場合、拡散性水素源は、空気中に含まれる水蒸気だけでなく、鉱油の分解によるものも含まれると考えら

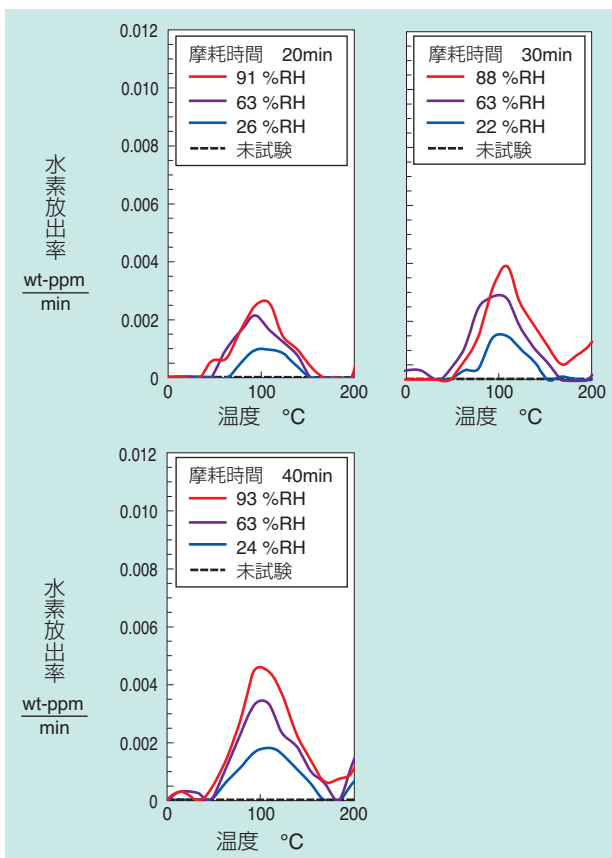


図9 ふっ素系油での摩耗試験前後の試験片のTDAプロファイル

TDA profiles of specimens before and after abrasive wear testing in cases of fluorine based oil for wear duration of 20, 30, 40 min

れた。そこで、ふっ素系油を用いて摩耗試験を行なった結果、湿度が高くなるにつれ、拡散性水素量が増加する相関が得られた。ふっ素系油は、化学構造中に水素原子を持たないため、ふっ素系油を用いた摩耗試験で検出された拡散性水素は、水のみ由来するといえる。

また、今回行なった摩耗時間の範囲では、直線的な増加を示していることから、拡散性水素は鋼中に飽和しておらず、過渡状態であると考えられる。今回行なった摩耗時間より長時間の場合、湿度による影響はさらに大きくなると考えられる。

これまでは、鋼中に侵入する水素量と湿度の影響については注目していなかったが、今回の結果から湿度による影響も無視できない因子の1つであることが示された。

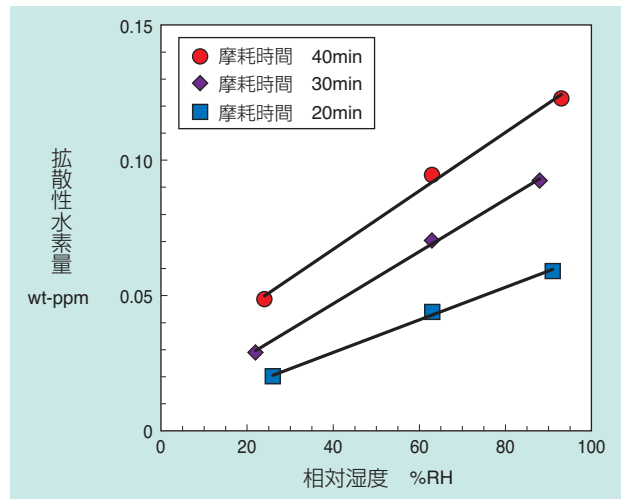


図10 ふっ素系油での相対湿度と拡散性水素量との関係
Relationship between relative humidity and amount of diffusible hydrogen in cases of fluorine based oil

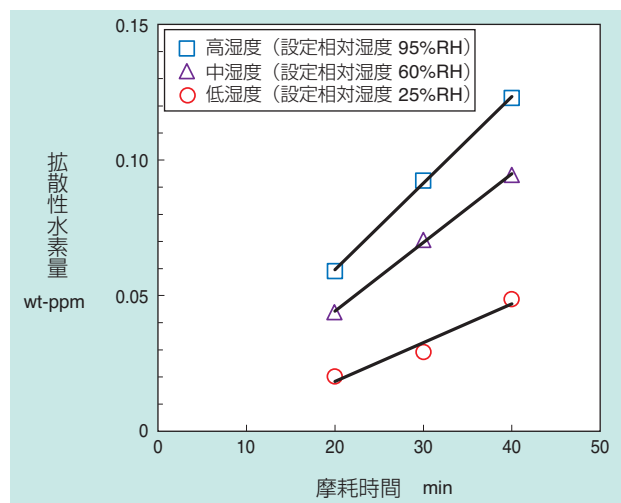


図11 摩耗時間と拡散性水素量との関係

Relationship between wear duration and amount of diffusible hydrogen in cases of fluorine based oil

7. まとめ

温湿度を制御した空間内でアブレシブ摩耗試験を行った後、試験片の昇温脱離水素分析を行ない、鋼中に侵入する水素量と湿度の影響を調査した。その結果以下のことが分かった。

- 1) 鉱油を用いて摩耗試験を行なった場合、同じ温度では、相対湿度が高くなるにつれて拡散性水素量は増加した。相対湿度の代わりに容積絶対湿度で整理したところ、拡散性水素量と単一の高い相関が得られた。
- 2) 鉱油に純水を添加して摩耗試験を行なった場合、低湿度、高湿度ともに拡散性水素量が増加した。本試験の雰囲気温度では、低湿度で15wt%水添加油を滴下した場合の拡散性水素量は、高湿度で水無添加油を滴下した場合の拡散性水素量よりも少なかった。
- 3) 化学構造中に水素原子を持たないふっ素系油を用いた場合でも、鋼中より拡散性水素が検出された。摩耗時間が長く、湿度が高いほど、拡散性水素量は増加した。

参考文献

- 1) K. Tamada, and H. Tanaka, "Occurrence of brittle flaking on bearings used for automotive electrical instruments and auxiliary devices" *Wear*, 199 (1996), pp. 245-252.
- 2) M. Kohara, T. Kawamura and M. Egami, "Study on Mechanism of Hydrogen Generation from Lubricants" *Tribology Transactions*, 49 (2006), pp. 53-60.
- 3) L. Grunberg, "The Formation of Hydrogen Peroxide on Fresh Metal Surfaces" *Proc. Phys. Soc (London)*. B66 (1953), pp. 153-161.
- 4) P. Schatzberg and I. M. Felsen, "EFFECTS OF WATER AND OXYGEN ROLLING CONTACT LUBRICATION" *Wear*, 12 (1968), pp. 331-342.
- 5) 浅野滋, 藤嶋芳雄, 大谷南海男, "室温における鉄中の水素の拡散速度" *日本金属学会誌*, 第37巻 第3号 (1973), pp. 301-306.
- 6) M. Nagumo, M. Nakamura, and K. Takai, "Hydrogen Thermal Desorption Relevant to Delayed-Fracture Susceptibility of High-Strength Steels" *METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS A*, 32A (2001), pp. 339-347.
- 7) 田中宏昌, 谷本啓, 杉村丈一, "昇温脱離分析法による軸受鋼新生面への水素侵入挙動観察" *トライボロジー会議予稿集 東京 2010-5* (2010), pp. 203-204.

執筆者近影

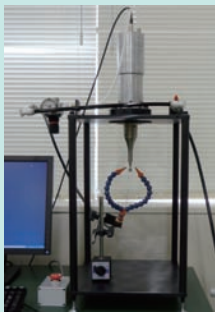


伊藤 元博
先端技術研究所

中炭素鋼及び軸受用鋼の超長寿命域までのせん断疲労特性評価

Evaluation of Shear Fatigue Properties of Medium Carbon Steels and Rolling Bearing Steels up to Giga-cycle Regimes

三輪 則暁* Noriaki MIWA



高強度鋼のせん断疲労特性の迅速評価を目的として超音波ねじり疲労試験機を開発した。本報では、高周波焼入した中炭素鋼と軸受用鋼の超長寿命域までのせん断疲労特性を開発試験機で評価した結果を紹介する。

We have developed an ultrasonic torsional fatigue tester which enables for the rapid evaluation of shear fatigue properties of high strength steels. This report presents the test results of shear fatigue properties of induction hardened medium carbon steels, and rolling bearing steels, up to giga-cycle regimes as evaluated by the developed tester.

1. はじめに

自動車のFF車・4WD車及び産業機械に使われている等速ジョイントのシャフトには繰り返しのねじり負荷が加わるため、駆動部材の長期間の信頼性を保証するためにも超長寿命域までのせん断疲労特性を調べることは重要である。また、転がり軸受の内部起点型はく離に先立つき裂の発生とその初期進展を支配する応力の一つとして、表層で繰り返し作用するほぼ両振りの交番せん断応力が挙げられる¹⁾。そのため、転がり軸受の内部起点型はく離寿命を把握する上で、せん断疲労特性を評価することは重要である。

せん断疲労特性は、ねじり疲労試験によって得ることができ、従来のねじり疲労試験機の負荷周波数は低いため、超長寿命域までの評価は事実上不可能であった。そこで、高強度鋼のせん断疲労特性の迅速評価を目的として、超音波ねじり疲労試験機（以下、USTF試験機; Ultrasonic Torsional Fatigueと称する）を開発した。市販されているねじり振動コンバータは低出力であったため、ねじり振幅拡大ホーンと試験片のそれぞれの形状を適正化し、最大約950MPaのせん断応力振幅を与えることに成功した²⁾。本稿では、開発した超音波ねじり疲労試験機による以下のせん断疲労特性評価結果を紹介する。

- (1) 中炭素鋼高周波焼入品の超長寿命域までのせん断疲労特性に及ぼすBの影響
- (2) 超音波ねじり疲労試験で得られた軸受用鋼のせん断疲労寿命と転動疲労寿命との関係

2. 中炭素鋼高周波焼入品の超長寿命域までのせん断疲労特性に及ぼすBの影響

2.1 背景

一般的な等速ジョイントのシャフトには、中炭素鋼S40Cの高周波焼入品が用いられている。軸径が比較的細い場合は焼入性を高めるためにマンガン(Mn)を増量した材料(ベース鋼)が、また、太い場合は焼入性をさらに高めるため、ベース鋼相当材にボロン(B)を添加した材料(B添加鋼)が用いられる。シャフト材料の超長寿命域までのせん断疲労特性を超音波ねじり疲労試験機で評価すると共に、疲労特性に及ぼすB添加の影響を調査した。

2.2 試験方法

試験材料は、ベース鋼とその相当材にBを19ppm、Tiを420ppm加えたB添加鋼を用いた。図1に高周波焼入条件、図2に試験片の模式図を示す。図2の灰色部を加熱し、最小径部を含む斜線部の硬さを700HVに調整した。その後、170℃×1hで焼戻し、研削で仕上げた。表面粗さの影響をなくすため、超音波ねじり疲労試験の前に、エメリー研磨(#500, #2000)とダイヤモンドラッピング(粒径1μm)を施して鏡面状態にした。試験条件は共振周波数20000Hz、応力比R = -1(完全両振り)とした。試験片にせん断疲労き裂が発生、進展すると共振周波数が低下する。共振周波数が設定値の範囲を超えたときに、破損したと判断し試験を停止させた。USTF試験では連続負荷

すると試験片が発熱するため、負荷と休止を交互に繰り返す間欠負荷法を採用した³⁾。せん断応力振幅が700MPa以上の場合には発熱が大きかったため、破断するまで加振時間0.11s、休止時間1.1sとした。700MPa未満では、加振時間0.11s、休止時間1.1sで負荷回数 10^7 回まで試験し、その後は加振時間1s、休止時間0.2sに変えて試験した。負荷回数 10^9 回まで破損しなければ打ち切りとした。実質負荷周波数は加振時間0.11s、休止時間1.1sの場合は1803Hz、加振時間1s、休止時間0.2sの場合は16529Hzである²⁾。

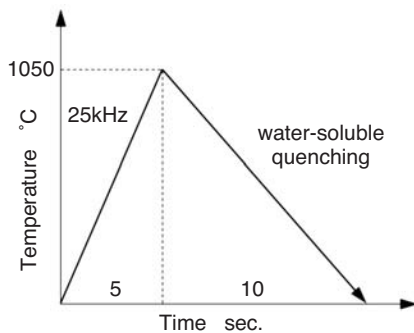


図1 高周波焼入条件
Induction heat treatment condition

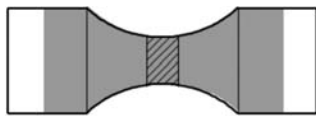


図2 試験片形状と硬化領域
Specimen shape and hardened region

2.3 結果および考察

ベース鋼とB添加鋼のS-N線図を図3に示す。S-N線図は、疲労試験結果を日本材料学会標準JSMS-SD-6-02のS-N回帰曲線法の連続低下型片対数曲線モデルに当てはめて求めた。ベース鋼とB添加鋼の 10^8 回における破損確率10%の疲労強度はそれぞれ636MPa、643MPaであり、ほぼ同じであった。最小径部を起点として、せん断型の初期き裂が発生、進展したのちに引張型に遷移した。せん断型の初期き裂には軸方向と周方向のものがあり、図3では後者のプロットに横線を付した。図4にせん断初期き裂の破面のSEM画像を示す。いずれの材料も粒内破壊であった。Bは粒界強化元素と報告されている⁴⁾が、本実験条件での破壊は粒内破壊であったため、その効果は確認できなかった。

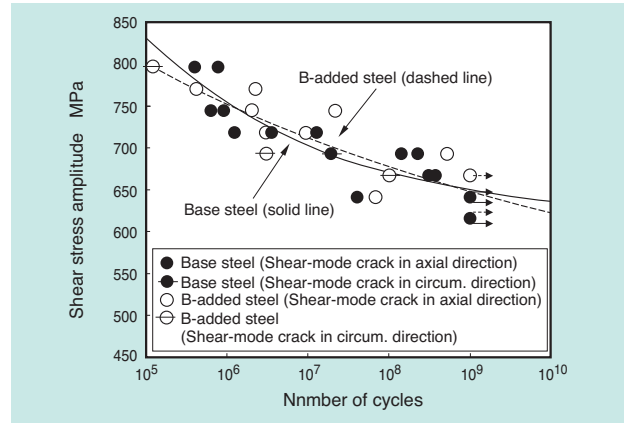


図3 超音波ねじり疲労試験機で評価したベース鋼とB添加鋼のせん断疲労特性
Shear fatigue properties of Base and B-added steels evaluated by USTF tester

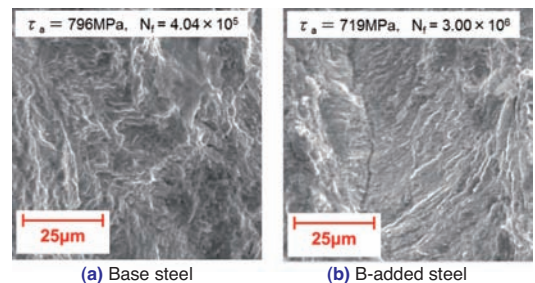


図4 せん断初期き裂の破面のSEM画像
SEM images of fracture surface at initial shear fatigue cracking

3. 超音波ねじり疲労試験で得られた軸受用鋼のせん断疲労寿命と転動疲労寿命との関係

3.1 背景

機械構造用炭素鋼S53Cと耐熱浸炭鋼M50NiL (AMS6278)のせん断疲労特性を評価した。また、これらと過去に実施した軸受鋼SUJ2²⁾を加えた3鋼種のせん断疲労特性と転動疲労寿命試験(以下、RCF試験; Rolling Contact Fatigueと称する)結果との関係を調べた。

3.2 試験方法

表1にUSTF試験片に用いたS53C、M50NiLの化学成分を示す。図5にUSTF試験片の最小径部の断面硬度分布を示す。USTF試験に先立ち、表面粗さの影響をなくす目的で、試験片節部にエメリー研磨(#500、#2000)とダイヤモンドラッピング(粒径 $1\mu\text{m}$)を施して鏡面状態にした。

RCF試験片の形状は直径 $12\times$ 長さ 22mm である。表2にこれまで評価した試験片のロット数と総試験片個数、試験片硬度の平均値と最大、最小値を示す。

USTF試験条件は、2.2節と同様である。負荷回数 10^{10} 回まで破損しなければ打ち切りとした。

図6にRCF試験機の模式図、表3に試験条件を示す。Driving rollerにより試験片を駆動し、高い接触応力条件で接触している3/4インチ鋼球との間で転動疲労させる。試験片がはく離すると、試験機の振動が増大するため、これを停止信号とした。

表1 USTF試験片に使用したS53CとM50NiLの化学成分 (質量%)
Chemical compositions of S53C and M50NiL used for USTF specimens (mass %)

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V
S53C	0.54	0.17	0.86	0.011	0.008	0.02	0.14	-	-
M50NiL	0.12	0.20	0.25	0.005	0.002	3.40	4.08	4.15	1.18

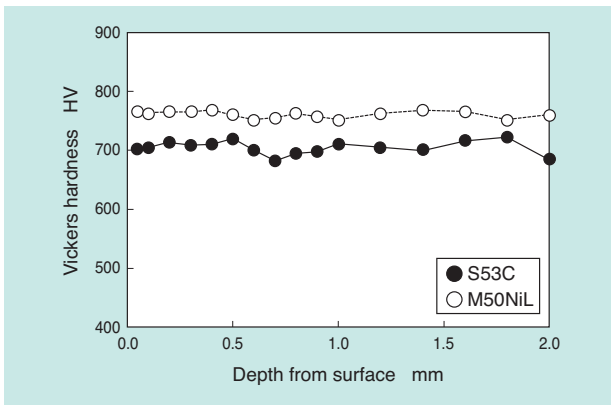


図5 USTF試験片の最小径部のS53CとM50NiLの硬度分布
Hardness distributions of S53C and M50NiL at minimum circumference of USTF specimens

表2 RCF試験で評価したロット数と総試験片個数、試験片硬度の平均値と最大、最小値
Number of lots, total number and hardness of RCF specimens

	Number of lots	Total number of specimens	Hardness (HRC)	
			Ave.	Min.~Max.
SUJ2	9	124	62.4	62.0~62.8
S53C	2	34	61.0	60.5~61.5
M50NiL	3	63	63.8	62.4~64.5

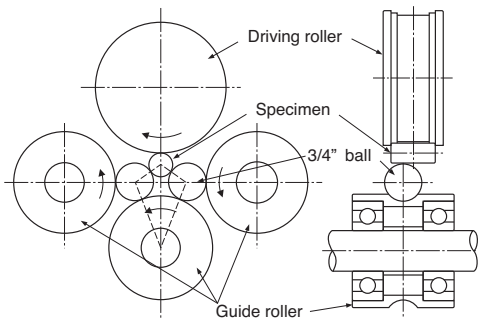


図6 RCF試験機の模式図
Schematic of RCF tester

表3 RCF試験条件
RCF test conditions

Ball	3/4" (19.05mm)×2 made of SUJ2
Max. contact pressure	5.88 GPa
Loading rate	46240 c/min
Lubricant	Turbine oil VG68

3.3 結果

図7に本稿の2鋼種に、過去に評価したSUJ2²⁾を加えた3鋼種のせん断疲労特性を示す。S53Cは、これまでに評価した軸受用鋼3鋼種中で、時間強度、疲労限度 (442MPa) とともに最も低かった。M50NiLは、これまでに評価した軸受用鋼3鋼種中で、時間強度、疲労限度 (680MPa) とともに最も高かった。本報の3鋼種のせん断疲労特性の時間強度域の傾きはあまり変わらなかった。

表4に過去に行ったRCF試験におけるこれら3鋼種の50%寿命の平均値と最大、最小値を示す。50%寿命は、S53C<SUJ2<M50NiLの順で長かった。

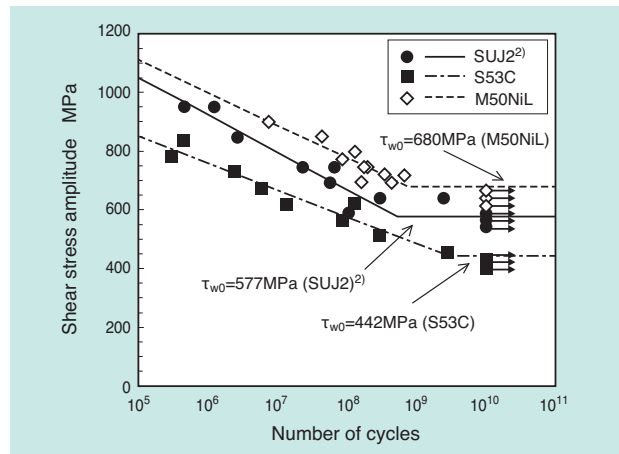


図7 超音波ねじり疲労試験で評価した軸受用鋼3鋼種のせん断疲労特性
Shear fatigue properties of three kinds of bearing steels evaluated by USTF tester

表4 RCF試験結果
RCF test results

	Number of lots	RCF life L ₅₀ (cycles)	
		Average	Minimum~Maximum
SUJ2	9	1.5×10^8	$8.5 \times 10^7 \sim 2.1 \times 10^8$
S53C	2	3.5×10^7	$3.3 \times 10^7 \sim 3.7 \times 10^7$
M50NiL	3	1.0×10^9	$7.3 \times 10^8 \sim 1.2 \times 10^9$

3.4 考察

図8に、3鋼種のせん断疲労特性の応力振幅700MPaにおける時間強度域の疲労寿命（破壊確率50%）とRCF試験で得られた転動疲労寿命 L_{50} との関係を示す。両者には直線関係が見られた。

このことから、USTF試験は、RCF試験の代替、すなわちRCF寿命の相対的な優劣の判定に有効になり得ることが示唆された。

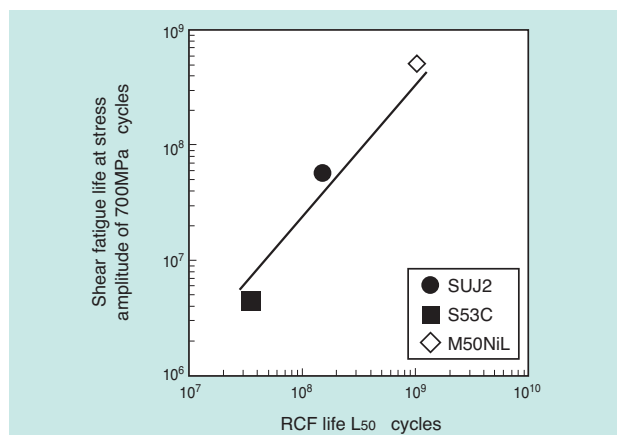


図8 せん断疲労寿命と転動疲労寿命との関係
Relationship between shear fatigue life and RCF life

4. まとめ

等速ジョイントのシャフトには、ねじり負荷が繰り返し作用するため、せん断疲労特性の評価が重要である。そこで、S40CにMnを増量した材料（ベース鋼）と、ベース鋼相当材にBを添加した材料（B添加鋼）の超長寿命域までのせん断疲労特性を、超音波ねじり疲労試験機で評価した。

一方、転がり軸受の内部起点型はく離に先立つき裂の発生とその初期進展を支配する応力の一つとして、交番せん断応力が考えられているため、せん断疲労特性を評価することは、転動疲労寿命を把握する上で重要である。そこで、機械構造用炭素鋼S53Cと耐熱浸炭鋼M50NiL（AMS6278）のせん断疲労特性を評価した。また、これらと過去に実施した軸受鋼SUJ2を加えた3鋼種のせん断疲労特性と転動疲労寿命試験結果との関係を調べた。

- (1) S40CにMnを増量したベース鋼とB添加鋼の 10^8 回における疲労強度（破壊確率10%）は、それぞれ636MPa、643MPaとほぼ同じであり、せん断疲労特性に違いはなかった。

- (2) S53Cは、これまでに評価した軸受用鋼3鋼種中で、せん断疲労特性の時間強度、疲労限度（442MPa）ともに最も低かった。一方、M50NiLは、時間強度、疲労限度（680MPa）ともに最も高かった。
- (3) これまでに評価した3種類の軸受用鋼のせん断疲労特性の時間強度域の傾きはあまり変わらなかった。
- (4) せん断疲労特性の応力振幅700MPaにおける時間強度域の疲労寿命（破壊確率50%）と過去に行った転動疲労試験で得られた転動疲労寿命 L_{50} の間には直線相関が見られた。

本稿は、原著予稿資料^{5), 6)}を基に編集したものである。掲載を許可下さった日本鉄鋼協会と日本トライボロジー学会のご好意に感謝致します。

参考文献

- G. Lundberg and A. Palmgren: DYNAMIC CAPACITY OF ROLLING BEARING, Acta Polytechnica, Mechanical Engineering Series, 1-3, (1947) 5-58.
- 坂中, 松原, 島村, 石井: 転がり軸受用鋼の超長寿命域までのせん断疲労特性の迅速評価, NTN TECHNICAL REVIEW, No.79, (2011) 104-110.
- H. Ishii, K. Yamanaka and K. Tohgo: GIGA-CYCLE FATIGUE STRENGTH IN SOME HIGH STRENGTH STEELS BY ULTRASONIC FATIGUE TESTING, Material Science Research International, Special Technical Publication-1, (2001) 59-63.
- M. Yamaguchi: FIRST-PRINCIPLES STUDY ON THE GRAIN BOUNDARY EMBRITTLEMENT OF METALS BY SOLUTE SEGREGATION: PART1. IRON (FE) -SOLUTE (B, C, P, AND S) SYSTEMS, Metallurgical and Materials Transaction A, 42, 2, (2011) 319-329.
- 坂中, 松原: 高周波焼入した中炭素鋼の超長寿命域までのせん断疲労特性に及ぼすBの影響, CAMP-ISIJ, 26, (2013) 316.
- 三輪: ねじり疲労試験で得られた軸受用鋼のせん断疲労寿命と転動疲労寿命の関係, トライボロジー会議2013秋福岡予稿集, (2013-10) E6.

執筆者近影



三輪 則暁
先端技術研究所

2013年度 “超”モノづくり部品大賞 日本力(にっぽんぶらんど) 賞受賞

パラレルリンク型高速角度制御装置
Parallel Link High Speed Angle Control Equipment

磯部 浩, 西尾幸宏, 坂田清悟, 小長井直哉, 山田裕之
Hiroshi ISOBE, Yukihiro NISHIO, Seigo SAKATA, Naoya KONAGAI, Hiroyuki YAMADA

1. はじめに

回転2自由度の特殊なパラレルリンク機構を応用したパラレルリンク型高速角度制御装置（以後、本装置）を開発し、本装置をグリース塗布用途に適用している。本装置により、作動角90°、旋回角360°の広い可動範囲において高速・高精度な位置決めを可能にしたことが評価され、2013年度“超”モノづくり部品大賞 日本力(にっぽんぶらんど) 賞を受賞した。

2. 背景

本装置に採用したパラレルリンク機構は、元々、最大折れ角90°の高作動角を実現する自動車用等速ジョイントとして検討されていた。自動車用途以外への適用を目指し、本パラレルリンク機構にアクチュエータを組み合わせ、角度制御装置として開発を続けた結果、駆動機構や制御方法の工夫により、回転2自由度のスムーズな動きと高速・高精度の動作を実現した^{1)~5)}。この高速性と優れた操作性が評価され、タクトタイム短縮と高い信頼性が求められる自動車部品の製造ラインなどのグリース塗布用途に利用されている。

3. グリース塗布装置への応用

図1には、グリース塗布用に開発した本装置を、図2には、本装置の先端部に非接触塗布を行うディスペンサを取り付けたグリース塗布装置の構成例を示す。本構成では、XYステージでワークを移動させると同時に、本装置によりディスペンサの姿勢を制御する。1秒間に約10点という高速塗布を実現でき、かつ、斜め方向からの塗布により、複雑な形状のワークに対するグリース塗布工程を自動化できる。

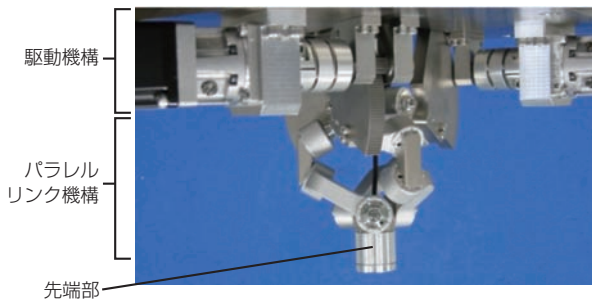


図1 パラレルリンク型高速角度制御装置
Parallel link high speed angle control equipment

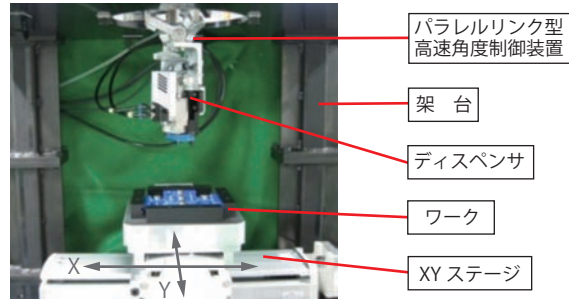


図2 グリース塗布装置の構成例
System configuration example of grease dispensing

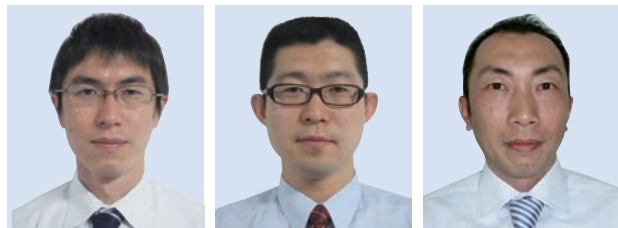
本装置は、生産ラインへの導入を想定し、ティーチング入力作業を容易にするため、作業平面上のXY座標値を指定することで指令角度を設定する機能を持つ。

今後は、生産設備だけでなく、医療・福祉、サービス、エンターテイメントなど様々な分野へ展開し、日本の得意とする自動化・ロボット化のさらなる進化に貢献できれば幸いです。

参考文献

- 1) 曾根啓助, 磯部浩, 山田耕嗣, 高角アクティブリンク装置, NTN TECHNICAL REVIEW, No.71 (2003) 70-73.
- 2) 磯部浩, 西尾幸宏, パラレルリンク型高速角度制御装置, NTN TECHNICAL REVIEW, No.80 (2012) 42-47.
- 3) 磯部浩, パラレルリンク型高速角度制御装置 - 基本構成とグリース塗布への応用 -, 機械と工具, 2月号, (2013) 83-87.
- 4) 磯部浩, 西尾幸宏, 曾根啓助, 山田裕之, 藤川芳夫, パラレルリンク型高速角度制御装置, 2013年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2013) 809-810.
- 5) 磯部浩, 西尾幸宏, 坂田清悟, 小長井直哉, 山田裕之, 藤川芳夫, パラレルリンク型高速角度制御装置-グリース塗布への応用-, 2014年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2014) 1087-1088.

執筆者近影 (発表者)



磯部 浩 西尾 幸宏 坂田 清悟
商品開発研究所 商品開発研究所 商品開発研究所

受賞案件の紹介

平成25年度 日本粉末冶金工業会賞 新製品賞・材料部門受賞



可変バルブタイミング装置用焼結製オイルシールの開発

Development of the Oil Seal Made of Sintered Metal for Variable Valve Timing Device

須貝 洋介
Yosuke SUGAI

毛利 敏彦
Toshihiko MOURI

1. はじめに

自動車に使用される可変バルブタイミング装置は、燃費向上、排気ガスなどの清浄化を目的に、多くの車種に搭載されており、また、今後新興国向けを中心に更なる需要の拡大が見込まれている。

油圧式の可変バルブタイミング装置は、図1に示すように油圧室を区画するためにオイルシールが複数使用されている。従来のオイルシールは樹脂製が使用されているが、今般、焼結合金製を開発し、この市場に投入した。オイルシールに求められる特性には、シール性と強度がある。シールの寸法精度が十分でないと、相手部品とのすきまからオイル漏れが発生し、可変バルブタイミング装置の作動応答性に影響する。また、強度が十分でないと、変形や破損が生じる可能性があった。

開発した焼結製オイルシールは、この度、粉末冶金に関する優れた新技術に対して与えられる『第35回日本粉末冶金工業会賞 新製品賞・材料部門』を受賞した。本報では、その開発の概要を紹介する。

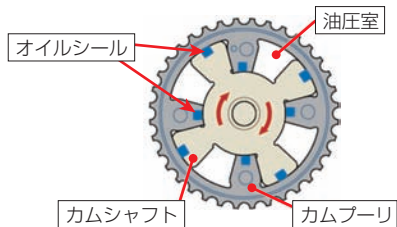


図1 オイルシールの使用箇所
Point-of-use of the oil seal

2. 開発品の特長

2.1 偏析防止処理による良好な寸法安定性

一般的な鉄系焼結材であるFG64材は、寸法精度が不安定になる。これは材料中に含まれる黒鉛の偏析により、粉末の流動性が悪化し、成形での圧粉体重量が安定せず、寸法がばらつくためである。

このため、黒鉛の偏析防止処理を施した鉄粉を用いたことで、粉末の流動性を改善し、圧粉体重量を安定させた。その効果により、寸法安定性が良好となった。

2.2 低融点金属配合による強度向上

焼結製シールの強度を確保するために、材料に低融点金属であるSnを選定し、最適な割合で配合した。SnはCuとのぬれ性が高いため、Cuの融点以下で焼結しても液相が生じて拡散し、鉄粉同士の結合が促進されることで焼結体の強度が向上した。

シールの強度の指標として、抗折力の比較を図2に示す。抗折力とは、切欠きのない平滑な試験片に3点曲げの荷重を加えて、材料の曲げ強さを評価するものである。この結果、樹脂材に対して2倍程度まで強度が向上した。

2.3 焼結条件最適化による加工性・精度向上

低融点金属の添加による強度向上以外に、寸法精度向上のためサイジング工程を追加し、サイジングによる寸法きょう正効果を高めるため、焼結条件の最適化を図った。図3に寸法精度を示す。開発材の組織をほぼフェライト相のみにすることで、サイジング性に優れ、必要な寸法精度を確保できた。

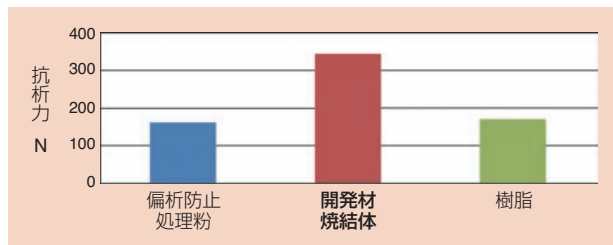


図2 抗折力の比較

Comparison of transverse rupture strength

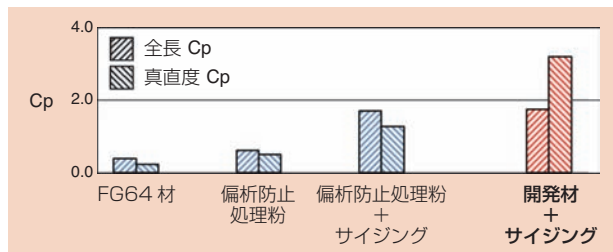


図3 寸法精度 (Cp値)

Dimensional precision (Cp value)

3. 開発の成果

黒鉛の偏析防止粉末の使用、Snの添加及び焼結条件の最適化により、良好な寸法精度、シール性を確保し、強度を向上させることで、市場に投入できた。今後も焼結製オイルシールの開発を継続し、可変バルブタイミング装置の機能向上に貢献していく。

執筆者近影



須貝 洋介
NTN特殊合金(株)
技術部



毛利 敏彦
NTN特殊合金(株)
技術部

平成25年度 日本粉末冶金工業会賞 奨励賞受賞

超薄型ファンモータ用焼結動圧軸受 Sintered Hydrodynamic Bearing for Super Thin Fan Motor

内山 土広
Tadahiro UCHIYAMA

小松原 慎治
Shinji KOMATSUBARA

1. はじめに

近年、モバイル機器が急速に普及し、これらに使用される冷却ファンモータの薄型化が加速度的に進んでいる。使用される姿勢は多様化し、使用環境もより厳しくなっているが、軸受にはより高い静音性、信頼性が求められている。

そこで、従来の焼結動圧軸受が有する高精度でかつ高い軸受剛性を活かし、超薄型の冷却ファンモータに適する焼結動圧軸受の開発を行った(図1)。

この度、本技術は、『日本粉末冶金工業会 平成25年度工業会賞 奨励賞』を受賞した。本報では、その開発の概要を紹介する。



図1 焼結動圧軸受の外観

Appearance of sintered hydrodynamic bearing

2. 開発内容

焼結動圧軸受は、図2に示すようなスリーブ形の軸受内径面にヘリングボーン型動圧溝を形成した軸受であり、軸の回転によって軸受すきまに存在する流体潤滑膜に圧力(動圧)を発生させて、回転軸を支持する。また、材料が焼結合金であるため、軸受内部に潤滑油を保有しており、耐焼付き性に優れている。

図3に超薄型ファンモータの一例を示すが、モータ高さは4mmと薄く、軸受長さは2mm以下にする必要がある。軸受長さが短くなると、軸受の剛性、支持力は小さくなるため、軸受剛性の確保が課題となる。そこで、動圧溝仕様、動圧溝の加工条件に着目し、最適化を図ることで、軸受長さ2mm以下の超薄型ファンモータ用焼結動圧軸受の開発に成功した。

2.1 動圧溝仕様の最適化

前述のとおり、軸受長さが短くなると、軸受剛性が低下し、異音の発生や短寿命が懸念される。そこで、軸受性能に影響するロータ重量やモータ構造などの情報をもとに、独自の解析プログラムを用いた理論解析を行い、動圧軸受の丘溝比、溝角度、溝幅など、設計パラメータを超薄型ファンモータ用に最適化した。モータによる検証試験も行い、理論と実機評価に裏付けされた動圧軸受仕様を早期に確立することができ、開発・設計時間を大幅に短縮できた。

2.2 動圧溝加工条件の最適化

動圧軸受の性能向上のため、動圧溝の精度改善として、動圧溝を形成する金型の高精度化に取り組んだ。金型への動

圧溝加工条件を最適化し、金型精度を向上させた。また、精度良く、安定した溝深さ・溝形状を得るために、動圧溝加工時のプレスタイミングや加工代など、軸受への動圧溝加工条件の最適化も図り、動圧溝の高精度加工を可能にした。

2.3 潤滑油の新規開発

使用条件、要求特性が厳しくなったため、潤滑油の改善も図った。高温時の剛性低下、低温での軸受損失増大などを考慮し、使用される超薄型ファンモータ用軸受に適した潤滑油を開発した。

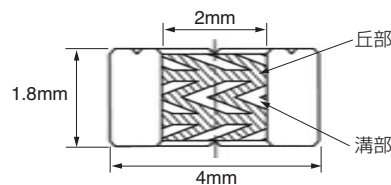


図2 開発品の概略図

Example of sintered hydrodynamic bearing

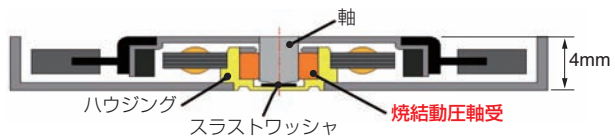


図3 超薄型ファンモータの適用例

Example of the application of super thin fan motor

3. まとめ

動圧溝仕様の最適設計、動圧溝加工条件の最適化および潤滑油の新規開発により、超薄型ファンモータに適した焼結動圧軸受を開発した。優れた静音性、信頼性が認められ、国内・海外のファンモータメーカーに広く採用された。また、エンドユーザであるパソコンメーカーなどからも高い評価を頂いており、今後も採用拡大が期待できる。

執筆者近影



内山 土広
NTN特殊合金(株)
技術部



小松原 慎治
複合材料商品事業部
流体動圧軸受部

2013年度 日本トライボロジー学会 奨励賞受賞

転がり軸受用鋼のせん断疲労特性を迅速評価するための 超音波ねじり疲労試験機の開発

Development of Ultrasonic Torsional Fatigue Tester for Rapid Shear Fatigue Property Evaluation of Rolling Bearing Steels

三輪 則暁
Noriaki MIWA

1. はじめに

転がり軸受の内部起点型はく離に先立つき裂の発生とその初期進展を支配する応力の一つとして、表層で繰り返して作用する両振りの交番せん断応力が挙げられる。せん断疲労特性はねじり疲労試験によって得ることができるが、従来のねじり試験機では低負荷周波数のため、超長寿命域までのせん断疲労特性を評価することが実質不可能であった。そこで、高強度な転がり軸受用鋼のせん断疲労特性の迅速評価を目的として、超音波ねじり疲労試験機(加振周波数20000Hz, 両振り)を開発した¹⁾。この成果が日本トライボロジー学会誌「トライボロジスト」に掲載され、2013年度日本トライボロジー学会奨励賞を受賞した。

2. 超音波ねじり疲労試験機の製作

図1に本体の構成を示す。主要部品はねじり振動コンバータ、アンプ、ねじり振幅拡大ホーンである。コンバータの定格出力が小さかったため、試験片の形状と振幅拡大ホーンを適正化する必要があった。試験片はダンベル形状をしており、ねじり荷重が与えられると最小径部の表面でせん断応力が最大となる。試験片に作用するせん断応力は、試験片を大きくするほど大きくなるが、共振が不安定になり試験継続できなかった。そこで、試験片はアンプ出力90%まで安定して共振する大きさにし、ねじり振幅拡大ホーンの形状を改良することで拡大率を向上させ、安定して高いせん断応力が付与できるようにした。

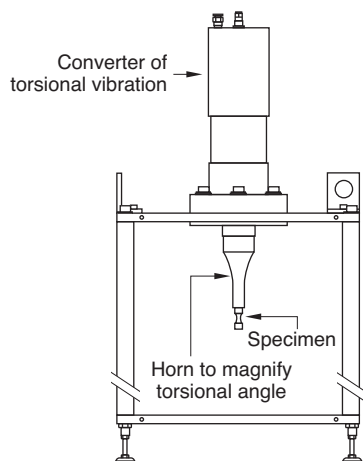


図1 超音波ねじり疲労試験機の模式図
Schematic of ultrasonic torsional fatigue tester

試験片最小径部に作用する最大せん断応力を直接的に測定することはできない。そのため、まずFEM解析で最大せん断応力とねじり角との関係を求め、次にアンプ出力とねじり角との関係を実験で求め、それらから、アンプ出力と最大せん断応力との関係を導出し、負荷応力を制御できるようにした。

3. 軸受鋼の評価と疲労限面圧の推定

図2に開発試験機で評価したSUJ2の超長寿命域までのせん断疲労特性を示す。得られたせん断疲労特性からせん断疲労限度を求め、その値から疲労限面圧の推定方法を考案した。せん断疲労限度から推定したSUJ2疲労限面圧は、ISO規定とほぼ同等の値であった。

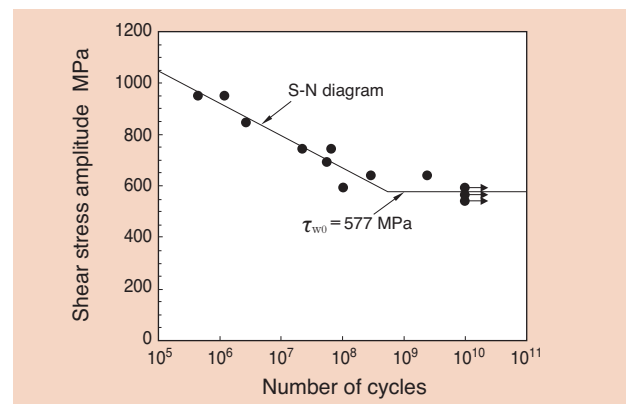


図2 開発した試験機で評価したSUJ2のせん断疲労特性
Shear fatigue property of SUJ2 evaluated by developed tester

参考文献

- 1) 三輪, 松原, 島村, 石井, トライボロジスト, 58, (2013) 658-666.

執筆者近影



三輪 則暁
先端技術研究所

超低フリクションハブベアリング

車両走行時のハブベアリング回転フリクションを大幅低減,
車両燃費を約0.3%改善!



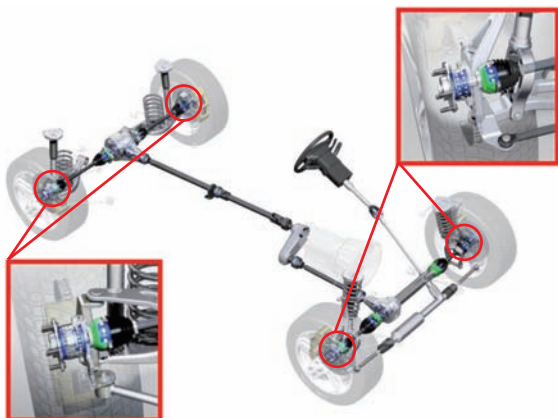
特長

軸受の回転フリクションを33%低減（従来品比）

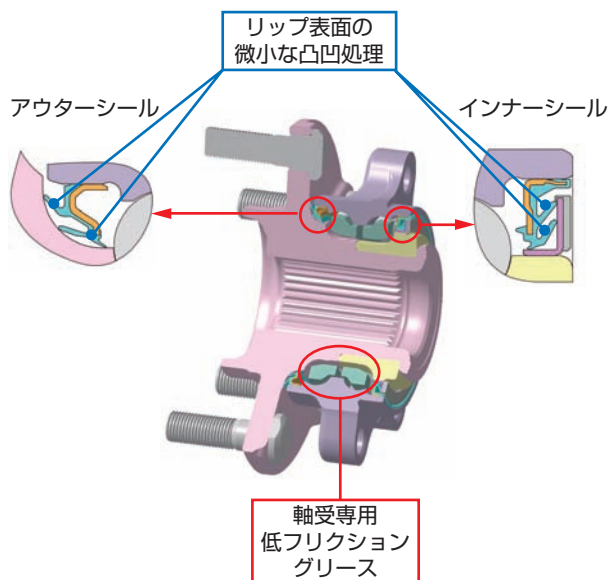
- ① 配合成分と粘度を見直した新開発の低フリクショングリース
- ② シールリップの摺動面に微小な凹凸処理を形成, また専用低粘度グリースを開発・採用

用途

- 乗用車用アクスル部



構造

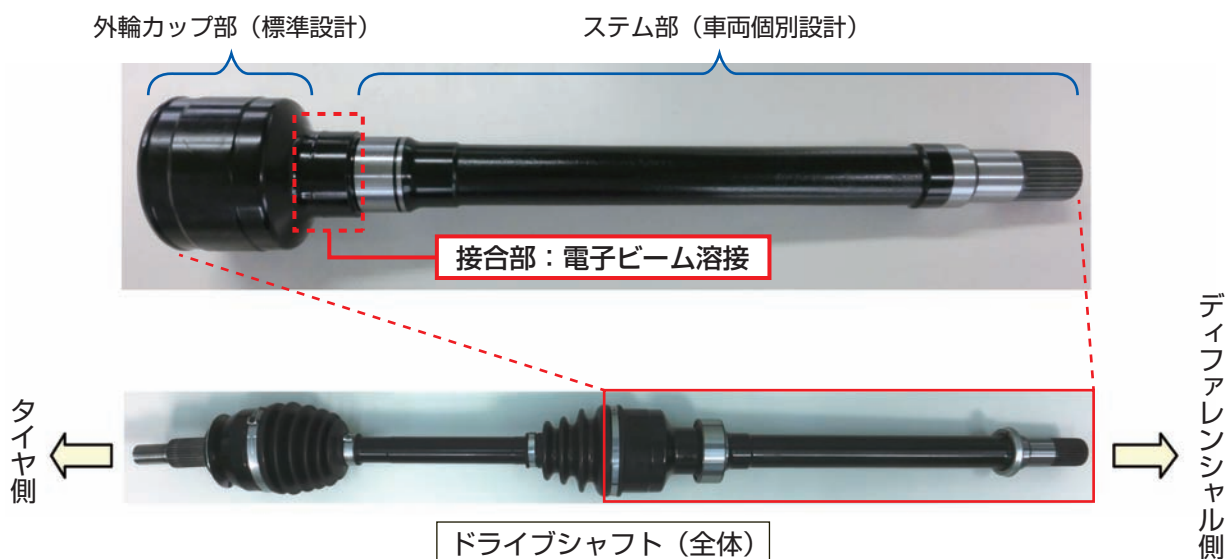


EBWドライブシャフト

EBW : Electron Beam Welding

革新的な新生産方式により、
自動車メーカーの**開発リードタイム短縮に貢献!**

ディファレンシャル側ドライブシャフト



特長

新型車両の開発リードタイム短縮への貢献と高い信頼性

- ① 車両により異なっていた外輪カップ部を共通 (ステム部のみ個別設計)
- ② 電子ビーム溶接により短時間で確実かつ高精度に接合

用途

- 乗用車用ドライブシャフト部



構造

電子ビーム溶接の特性 (摩擦圧接との比較)

項目	電子ビーム溶接	摩擦圧接
接合処理時間	◎	○
接合部強度	◎	◎
接合後の同軸精度	○	△
接合後の二次加工	不要	要

◎優れる ○問題なし △追加工実施

低断面高強度プレスプーリ

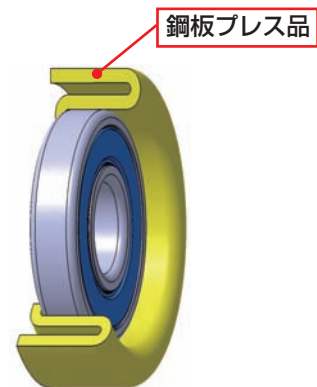
最適形状設計とプレス成形技術の改良により、
業界最高の耐荷重性を実現！



特長

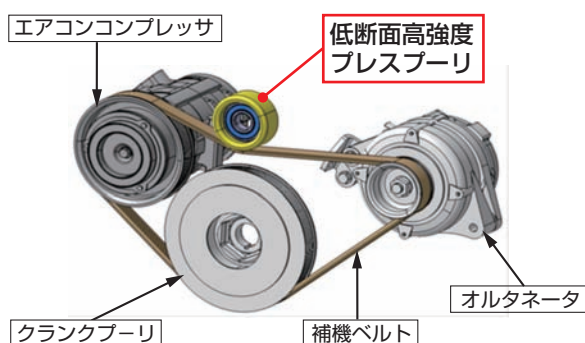
- ① 従来品（鋼板製プレスプーリ）比1.5倍の厚板の鋼板が適用可能
 ⇒ プーリ部の耐荷重性を2倍以上に向上
- ② プーリ部を従来品比の約7割に低断面化
 ⇒ 軸受の寿命や負荷容量が向上
- ③ 高温下での耐久性や異物に対する耐摩耗性に優れ、新興市場向け車両などに適用可能

構造



用途

● 自動車用補機ベルトドライブシステム



- ・ 解析技術により最適設計を確立
- ・ プレス技術を改良、断面形状を小さくし、厚板を採用
- ・ 熱処理条件を見直して金型の強度を上げ、破損、金型への焼き付きを防止

長寿命針状ころ軸受ユニット

異物混入潤滑下で従来品比10倍以上の**長寿命化を実現!**



特長

異物混入油潤滑下で従来比10倍以上の長寿命軸受ユニット

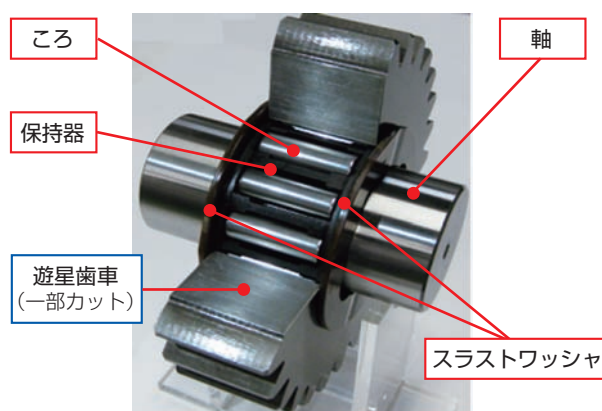
- ① ころと軸に特殊熱処理の適用で、異物混入潤滑下で長寿命
- ② ころクラウニング形状の工夫で、軸受の取り付け誤差によるエッジ応力を抑制
- ③ 保持器ポケット形状の最適設計で、異物の噛み込みを低減
- ④ スラストワッシャに排油溝を付加し、異物の排出性を向上（油の排出量：従来比6倍）

用途

- 建設機械用や農業機械などの遊星減速機



構造



軸受ユニット外観（遊星減速機部）

ご照会・技術相談は…… 下記支社・営業所にお申し付けください。

東京地区：03(6713)3624 FAX. 03(6713)3682	大阪地区：06(6449)6715 FAX. 06(6448)7296	名古屋地区：052(222)3347 FAX. 052(222)3341
東北地区：022(262)6201 FAX. 022(262)6205	広島地区：082(568)1470 FAX. 082(568)5913	九州地区：093(513)3166 FAX. 093(513)3190

NTN株式会社 URL <http://www.ntn.co.jp> 本社 06(6443)5001 〒550-0003 大阪市西区京町堀1丁目3番17号

【自動車事業本部】

関東自動車支社 TEL03(6713)3605 FAX03(6713)3685
〒108-0075 東京都港区港南2丁目16番2号 (太陽生命品川ビル15階)

宇都宮自動車支社 TEL028(632)0511 FAX028(632)0576
〒320-0026 栃木県宇都宮市馬場通り2丁目1番1号 (NOF宇都宮ビル6階)

北関東自動車支社 TEL0276(22)4231 FAX0276(25)5379
〒373-0026 群馬県太田市東本町22番31号

東海自動車支社 TEL0566(72)2030 FAX0566(72)2420
〒446-0056 愛知県安城市三河安城町1丁目4番地4 (カリツービル6階)

浜松自動車支社 TEL053(454)2586 FAX053(454)2589
〒430-0928 静岡県浜松市中区板屋町110番地の5 (浜松第一生命日通ビル7階)

大阪自動車支社 TEL06(6449)6711 FAX06(6448)7296
〒550-0003 大阪市西区京町堀1丁目3番17号

広島自動車支社 TEL082(568)5912 FAX082(568)5913
〒732-0824 広島市南区的場町1丁目2番19号 (アーバス広島7階)

【産業機械事業本部】

東京支社 TEL03(6713)3606 FAX03(6713)3681
〒108-0075 東京都港区港南2丁目16番2号 (太陽生命品川ビル15階)

北海道駐在 TEL011(822)8788 FAX011(822)8835
〒003-0809 札幌市白石区菊水九条2丁目2番37号

茨城営業所 TEL029(823)3528 FAX029(824)7633
〒300-0037 茨城県土浦市桜町1丁目15番11号 (M・Yビル6階)

西関東支社 TEL042(757)1011 FAX042(758)2150
〒252-0239 神奈川県相模原市中央区中央3丁目14番7号 (セントラルビル2階)

沼津営業所 TEL055(962)7573 FAX055(951)6427
〒410-0801 静岡県沼津市大手町3丁目8番23号 (ニッセイスタービル3階)

名古屋支社 TEL052(222)3301 FAX052(222)3341
〒460-0003 名古屋市中区錦2丁目3番4号 (名古屋錦フロントタワー11階)

大阪支社 TEL06(6449)6712 FAX06(6448)7296
〒550-0003 大阪市西区京町堀1丁目3番17号

神戸営業所 TEL078(917)1201 FAX078(917)1205
〒673-0892 兵庫県明石市本町2丁目2番20号 (朝日生命明石ビル6階)

広島支社 TEL082(568)1470 FAX082(568)5913
〒732-0824 広島市南区的場町1丁目2番19号 (アーバス広島7階)

九州支社 TEL093(513)3167 FAX093(513)3190
〒802-0003 福岡県北九州市小倉北区米町1丁目1番7号 (甲南アセット小倉ビル7階)

【アフターマーケット事業本部】

東日本支社 TEL03(6713)3620 FAX03(6713)3682
〒108-0075 東京都港区港南2丁目16番2号 (太陽生命品川ビル15階)

北海道駐在 TEL011(822)8788 FAX011(822)8835
〒003-0809 札幌市白石区菊水九条2丁目2番37号

東北支店 TEL022(262)6201 FAX022(262)6205
〒980-0014 宮城県仙台市青葉区本町1-12-30 (太陽生命仙台駅北ビル7階)

宇都宮営業所 TEL028(632)0553 FAX028(632)0576
〒320-0026 栃木県宇都宮市馬場通り2丁目1番1号 (NOF宇都宮ビル6階)

相模原支店 TEL042(757)1011 FAX042(758)2150
〒252-0239 神奈川県相模原市中央区中央3丁目14番7号 (セントラルビル2階)

甲府営業所 TEL055(232)2301 FAX055(232)2252
〒400-0043 山梨県甲府市国母7丁目5番17号 (サンライン甲府ビル3階)

中日本支社 TEL052(222)3301 FAX052(222)3341
〒460-0003 名古屋市中区錦2丁目3番4号 (名古屋錦フロントタワー11階)

西日本支社 TEL06(6449)6710 FAX06(6448)7296
〒550-0003 大阪市西区京町堀1丁目3番17号

北陸営業所 TEL076(263)8673 FAX076(263)8628
〒920-0024 石川県金沢市西念2丁目37番18号

広島支店 TEL082(568)1472 FAX082(568)5913
〒732-0824 広島市南区的場町1丁目2番19号 (アーバス広島7階)

水島営業所 TEL086(425)6311 FAX086(425)6322
〒710-0057 岡山県倉敷市昭和2丁目4番6号住友生命倉敷ビル3階)

九州支店 TEL093(513)3188 FAX093(513)3190
〒802-0003 福岡県北九州市小倉北区米町1丁目1番7号 (甲南アセット小倉ビル7階)

【NTNテクニカルサービス(株)】

精機商品事業部 販売グループ

東日本：TEL03(6713)3652 FAX03(6713)3687
〒108-0075 東京都港区港南2丁目16番2号 (太陽生命品川ビル15階)

西日本：TEL06(6449)6716 FAX06(6443)1578
〒550-0003 大阪市西区京町堀1丁目3番17号

中日本：TEL052(222)3291 FAX052(222)3341
〒460-0003 名古屋市中区錦2丁目3番4号 (名古屋錦フロントタワー11階)

お問い合わせは

●カタログの内容については、技術的進歩及び改良に対応するため製品の外観や仕様などは予告なしに変更することがあります。また、内容の正確さを維持するため、細心の注意を払っておりますが、万が一、誤記及び製本上の落丁を起因とする損害が発生した場合の保証責任については負いかねます。

©NTN株式会社 2014

NTN TECHNICAL REVIEW No.82

印刷・発行 2014年 10月20日

編集人 森 夏比古
発行人 孝橋 宏二

【禁無断転載】

発行所 大阪市西区京町堀1丁目3番17号
NTN株式会社

印刷所 京都市中京区壬生花井町3
日本写真印刷株式会社