

For New Technology Network

**NTN**®

# TECHNICAL REVIEW

No.

**80**

特集●環境・エネルギー

October 2012



## 自然エネルギーマネジメント実証試験エリアを設置し、エネルギー有効活用推進に貢献

三重県桑名市の先端技術研究所では、基盤技術の深耕・進化はもちろんのこと、「最先端＝世界一、世界初」を合言葉に、NTNのコア技術であるトライボロジー、素材、表面改質、複合材料、シミュレーション技術などを高度化・融合し、次世代トライボマテリアル、高性能新素材、持続可能エネルギー利用システム、高度計算科学シミュレーションなどの先端技術や地球環境保全につながる革新的な技術の創造に取り組んでいます。

また、昨年12月には『自然エネルギーマネジメント実証試験エリア』を設置し、エネルギー関連システムの評価試験を開始しました。本施設では、既設の太陽光発電および風力発電装置に加え、新たに追尾型太陽光発電設備、植物実験工場を設置し、電気自動車の充電も含めたマイクロ・スマートグリッドを形成しています。また、近隣の公園にマイクロ水力発電装置を設置し、発電実験を行っています。

自然エネルギーを用いた植物の栽培を通じ、NTNがこれまで培ってきた「回転を支える技術」を中心に様々なエネルギー関連システムの開発に取り組み、自然エネルギーの有効活用を推進します。

▼先端技術研究所と風力発電機



▼自然エネルギーマネジメント実証試験エリア



リニアモジュールを搭載し、実証試験中（本文P19）



▲近隣の公園に設置したマイクロ水力発電装置  
(安全のため通常は右のようにカバーをかけています。本文P6)



# NTN TECHNICAL REVIEW No.80

環境・エネルギー特集 ● 目次

【巻頭言】	環境・エネルギー特集号に寄せて	常務取締役 安田喜信	1
-------	-----------------	------------	---

【寄稿文】	自然エネルギー利用がひらく持続可能な社会 ～千年持続学からのアプローチ～	名古屋大学大学院環境学研究所 高野雅夫	2
-------	---	---------------------	---

## 環境・エネルギー小特集

【解説】	風力発電業界の市場・技術動向および、NTNの軸受技術	産業機械事業本部 新エネルギー技術部 堀 径生/山田悠介/片岡雅彦	8
【解説】	風力発電装置へのコンディションモニタリングの適用	産業機械事業本部 新エネルギー技術部 竹内彰利/長谷場隆/池田博志	15
【製品紹介】	太陽光/太陽熱発電追尾装置用電動リニアモジュール	精機商品事業部 プロダクトエンジニアリング部 小和田智之/利見昌紀	19
【論文】	温度制御および組織制御による軸受鋼の高周波ずぶ焼入・高周波焼戻方法の開発	先端技術研究所 藤田 工/鈴木伸幸	23
【製品紹介】	超高温環境用転がり軸受	産業機械事業本部 産業機械技術部 有鼻美葵 先端技術研究所 川村隆之	31

## モノづくり技術小特集 ● 『次世代技術を提案し、もの造りを支えるNTN』

【解説】	工作機械主軸用空冷間座付き軸受	産業機械事業本部 工作機・航空宇宙技術部 恩田裕士/水谷 守 先端技術研究所 森 正継	38
【解説】	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	42
【解説】	自己発電型潤滑油供給ユニットの開発	産業機械事業本部 産業機械技術部 大本 郁/伊藤浩義	48
【製品紹介】	NTNリニアモジュールの紹介	NTN-SNR ROULEMENTS Engineering Bielefeld Ulrich GIMPEL/Michael WILLE 精機商品事業部 プロダクトエンジニアリング部 小和田智之/利見昌紀	52

## 論文・解説・製品紹介

【論文】	インデンテーション法による高強度鋼の局所力学特性評価	青山学院大学 理工学部機械創造工学科教授 小川武史 先端技術研究所 坂中則暁/松原幸生	58
【論文】	TMR効果を利用した最先端磁気センシング	NTN-SNR ROULEMENTS Research & Innovation Mechatronics Christophe DURET/上野新太郎	64
【解説】	鉄道車両車軸軸受用グリースの長寿命化	産業機械事業本部 建機・鉄道技術部 田中崇剛 先端技術研究所 三上英信	72
【製品紹介】	超大型ダンブトラック・ホイール軸受の動向と高機能化	産業機械事業本部 建機・鉄道技術部 内藤健一郎/山本直太 産業機械事業本部 新エネルギー技術部 菅根克典	78
【製品紹介】	複層焼結含油軸受	NTN特殊合金(株) 技術部 須貝洋介/毛利敏彦	83
【製品紹介】	磁性材料商品の紹介	日本科学冶金(株) 技術部 原野拓治/宮崎真二/勝浦 肇	87

## 受賞案件の紹介

《2011年度 トライボロジー学会 技術賞受賞》	転がり軸受の保持器応力の解析技術の高度化	先端技術研究所 坂口智也/原田和慶 自動車事業本部 ニードル軸受技術部 風間貞經	92
《2011年度 “超”モノづくり部品大賞 機械部品賞受賞》	卓上型微細塗布装置	精機商品事業部 プロダクトエンジニアリング部 内山元広	93

# NTN TECHNICAL REVIEW No.80

## CONTENTS

<b>Preface</b>	Yoshinobu YASUDA	1
<b>Contribution</b>	<b>Sustainable Society Powered by Renewable Energy</b> - An Approach from Millennium Sustainability Studies - Masao TAKANO Associate Professor, Nagoya University Graduate School of Environmental Studies	2
<b>● Special Issue for Environment and Energy Engineering</b>		
	<b>Market of Wind Power Generation Industry, Technology Trends and Bearing Technology of NTN</b> Michio HORI, Yusuke YAMADA and Masahiko KATAOKA	8
	<b>Application of Condition Monitoring System for Wind Turbines</b> Akitoshi TAKEUCHI, Takashi HASEBA and Hiroshi IKEDA	15
	<b>Motorized Linear Module for Tracking System of Solor Light / Solor Heat Power Generation</b> Tomoyuki OWADA and Masaki KAGAMI	19
	<b>Development of Induction Through-hardening and Induction Tempering Methods with Temperature Control and Microstructural Control in Bearing Steel</b> Takumi FUJITA and Nobuyuki SUZUKI	23
	<b>Rolling Bearing for Environments of Ultrahigh Temperatures</b> Miki ARIHANA and Takayuki KAWAMURA	31
<b>● Special Issue for Manufacturing Technology "NTN supports the "Mono-Zukuri" manufacturing through the advanced technology"</b>		
	<b>Machine Tool Main Spindle Bearings with "Air Cooling Spacer"</b> Yuushi ONDA, Mamoru MIZUTANI and Masatsugu MORI	38
	<b>Parallel Link High Speed Angle Control Equipment (PHACE)</b> Hiroshi ISOBE and Yukihiro NISHIO	42
	<b>Development of the Lubricating Oil Supply Unit with Self-power Generator</b> Kaoru OMOTO and Hiroyoshi ITO	48
	<b>NTN Linear Modules Series</b> Ulrich GIMPEL, Michael WILLE, Tomoyuki OWADA and Masaki KAGAMI	52
<b>● Technical Papers Technical Articles New Products</b>		
	<b>Evaluation of Local Mechanical Properties of High Strength Steels by Indentation Method</b> Takeshi OGAWA, Noriaki SAKANAKA and Yukio Matsubara	58
	<b>TMR : A New Frontier for Magnetic Sensing</b> Christophe DURET and Shintarou UENO	64
	<b>Long Life Technology of Grease for Journal Bearing</b> Takamasa TANAKA and Hidenobu MIKAMI	72
	<b>Market Trend and High-Functionality of Wheel Bearings for Off-Highway Truck</b> Kenichiro NAITO, Naota YAMAMOTO and Katsunori SONE	78
	<b>Multi Layer BEARPHITE</b> Yosuke SUGAI and Toshihiko MOURI	83
	<b>Introduction of Magnetic Material Products</b> Takuji HARANO, Shinji MIYAZAKI and Hajime KATSUURA	87
<b>● Our Line of Award Winning Products</b>		
	<b>"The Japanese Society of Tribologists 2011" Technology Award</b> <b>Advancement of Cage Stress Analysis of Rolling Bearings</b> Tomoya SAKAGUCHI, Kazuyoshi HARADA and Sadatsune KAZAMA	92
	<b>"2011 'CHO' MONODZUKURI Innovate Components Awards" Machinery Component Award</b> <b>Desktop Type Microscopic Coating Applicator</b> Motohiro UCHIYAMA	93
<b>Our Line of New Products</b>		94



## 環境・エネルギー特集号に寄せて

常務取締役  
安田 喜信

東日本大震災から一年半が経ち、日本のエネルギーの将来像について盛んに議論されています。太陽光、風力、潮力、地熱など、再生可能な自然エネルギーが世界中で見直されており、これらによって安全でクリーンな電力の確保や地球温暖化防止に繋がることに疑問の余地はありません。しかし、自然エネルギーの経済性、安定性には課題も多く、発電システムの効率、信頼性の向上が急務です。

このような状況下、NTNでは洋上風力発電プロジェクトや各地域でのスマートコミュニティ構想・実証試験に積極的に参画すると共に、先端技術研究所内に『自然エネルギーマネジメント実証試験エリア』を完成させ、自然エネルギーで植物を栽培・育てる活動を通し、関連システム技術を開発しています。

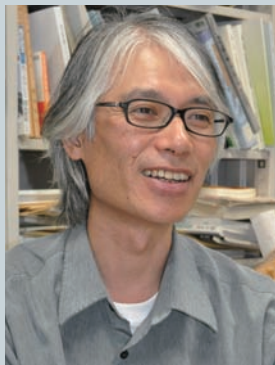
今般、「匠の技と先端技術の融合」をテーマとした第26回日本国際工作機械見本市（JIMTOF2012）が、11月1日～6日に亘って開催されるのに合わせ、NTNの環境負荷低減に関わる商品や技術を集めた『環境・エネルギー特集』を発行する運びとなりました。本誌では、初めに地球と社会のシステム作りの第一人者である名古屋大学大学院環境学研究科の高野雅夫先生の寄稿文「自然エネルギーで利用がひらく持続可能な社会 - 千年持続社会からのアプローチ -」を紹介させていただきます。その後、「環境・エネルギー技術小特集」では、風力および太陽光発電を中心に自然エネルギーと環境関連の技術や商品を紹介します。また、「モノづくり技術小特集」では、JIMTOF2012に出展する、もの造りを支える次世代技術や新商品を紹介いたします。

NTNは2017年に創業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」企業理念のもと、社会の持続的発展に貢献する所存です。

**For New Technology Network**

# 自然エネルギー利用がひらく持続可能な社会 ～ 千年持続学からのアプローチ ～

## Sustainable Society Powered by Renewable Energy - An Approach from Millennium Sustainability Studies -



高野 雅夫 Masao TAKANO  
名古屋大学大学院環境学研究科

千年持続学とは、地下資源が枯渇した千年先でもやっていられるような持続可能な社会や暮らしのあり方を、今から考えて一歩ずつ実現していこうという学問的・実践的な営みである。福島第一原発事故を受けて、将来のエネルギー利用のあり方について多くの国民の関心が高まっている。千年持続学の立場から考えるならば、その姿は、石油など化石燃料に頼らず、原子力にも頼らない、自然エネルギー100%の社会である。自動車の利用は農村での小水力による電気自動車のカーシェアリング利用が有望だろう。

Future style of energy usage in Japan is at great concern after the accident of Fukushima Daiichi nuclear plant. From the viewpoint of Millennium sustainability, the society should be powered by not fossil fuels nor nuclear power but by renewable energy. Principal automobiles may be electric vehicles shared in communities and charged by small hydropower station in rural area.

### 1. はじめに

2011年3月11日に発生した東日本大震災とそれに伴う福島第一原発事故は、私たちに大きな衝撃を与えた。持続可能な社会づくりへの関心が高まり、エネルギーの分野でもこれまでのあり方を反省し、エネルギーシフトという考え方が出てきた。しかしその考え方もいろいろな混乱がある。本論では、千年持続という基本コンセプトを紹介したあと、主にエネルギー利用の分野での具体的な適用の仕方について考えてみよう。

### 2. 千年持続学の基本コンセプト

#### 2.1 『成長の限界』に学ぶ

「千年持続」という考え方が生まれたのは、西暦2000年、ミレニアムの年の正月、科学技術庁（当時）が毎年開催していた、科学技術フォーラムの場である。この会は、さまざまな分野の学者を2泊3日の間、ホテルに缶詰めにして、言いたいことを言わせる、というもので、その中から、将来の科学技術政策のヒントを得ようというものだった。

この中で、科学技術評論家の赤池学氏と岐阜大学教育学部の川上紳一氏がコンビーナーを務めた分科会のテーマが、「地球学に学ぶ21世紀の安全保障と科学技術」というものだった。

筆者は、この分科会で地球システム論の立場から、『成長の限界』<sup>1)</sup>の一連の成果をレビューした。『成長の限界』は、1972年にストックホルムで行われた、国連人間環境会議に合わせて、著名な学者たちで構成されるシンクタンク「ローマクラブ」が、マサチューセッツ工科大学のD.H.メドウズらに委託した研究の成果である。

メドウズたちは、コンピュータを使って、世界の人口、食糧生産、工業生産、資源量、汚染量がどう変化するかということシミュレーションした。今でこそ、コンピュータシミュレーションは、天気予報に使われるなど、日常の道具となっているが、当時は、コンピュータというものがめづらしかった。それを使って未来の世界を「予測」しようとした発想は、当時としては、大胆不敵なものであった。

ここで、成長というのは、ものごとが指数関数的、あるいは幾何級数的に増大することを言う。つまり、例えば人口が50年で倍になるとすると、もう50年た

つとさらにその倍でもとの4倍になる、というふうに倍々ゲームになっていくことだ。20世紀の世界はまさに成長の時代であった。

メドウズたちの作った「ワールド3」というプログラムでは、その計算結果が20世紀の人口、食糧生産、工業生産の急上昇、すなわち成長を再現するように、たくさんあるパラメータが調整された。その上で、21世紀の100年間を「予測」した。

そして、その21世紀像はかなり悲惨なものだった。2020年くらいには、工業生産はピークに達して、急降下する。そうすると、化学肥料や農薬、農業機械など、工業生産物に依存している農業も生産力を急速に低下させ、食糧生産が急減する。そうすると、人口を養えきれず、やや遅れて、人口も急減するというものだ。

計算結果によると、一人当たりの食糧生産量は、1980年代には頭打ちになり、21世紀に入れば減少する。20世紀の間劇的に伸びた世界の平均寿命も21世紀半ばから、急激に短くなる。つまり、子どもが死んでいくということだ。

なぜ工業生産が急減するかというと、プログラムの中では、20世紀の工業生産の急上昇によって、資源量（ここでは石油などの地下資源を想定している）が急減する。そうすると、より難しくコストがかかる資源を採取するために、より多くの投資が必要である。そうすると、工業生産にまわっていた資金が不足し、縮小再生産が始まる、というストーリーである。

これが発表されると、世界中で賛否両論の大論争が巻き起こった。メドウズたちは、1985年、2002年に再計算した結果を出版し、1970年代に行ったもとの計算は、その後のデータの蓄積を加味しても、大筋でまちがっていない、と結論づけている。

## 2.2 千年持続可能性/不可能性とは

図1は、現在の私たちの社会の持続不可能なあり方を、『成長の限界』の考え方をベースに、模式的に示したものである。地球の中に地下資源が蓄積されている。これを採掘して、商品を生産する。それが消費されると、廃棄物が発生する。それをまた地球のどこかに「汚染」として貯める。

例えば、石油を採掘して、製油所でガソリンという商品を生産する。私たちは、ガソリンスタンドで自分の車に給油して、車を走らせ、ガソリンを消費する。この過程で、物質は形を変えるけれども、物質はけっ

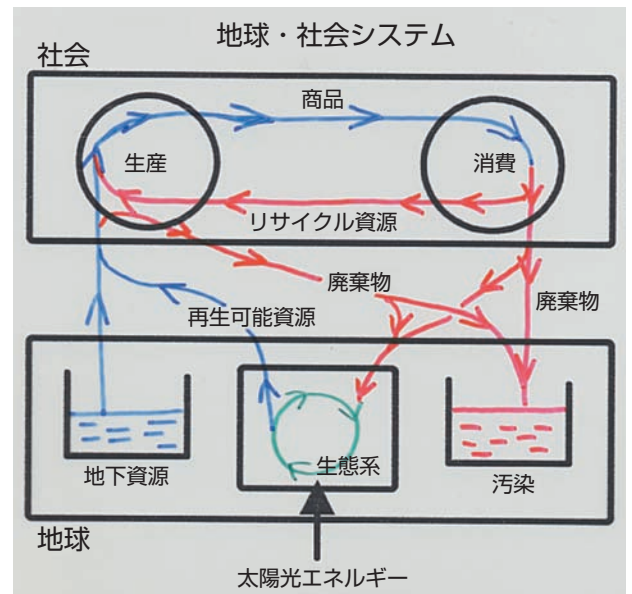


図1 20世紀型社会における物質循環の模式図  
Schematic figure of material flow in 20th century type society

して無から生じないし、けっして消滅しない。これは質量保存則という物理法則である。一見、タンクからはガソリンが消滅したように思えるけれども、それは、排気管から二酸化炭素となって、地球の大気に貯蔵される、というわけだ。

このような物質の流れに依存した社会は、早晚行き詰まる。つまり、地下資源が枯渇するということと、汚染が蓄積するということである。石油の利用は、この二つの行き詰まりに直面している。つまり、石油の枯渇と、地球温暖化問題である。原子力も同様である。天然ウランの枯渇と、放射性廃棄物の処分問題である。

一方、私たちは、生態系からも資源を採取している。木材や食糧などである。これは、生態系を適切に維持していれば、採取した分は、自然に再生されるので、生態系から得られる資源のことを再生可能資源ともいう。ここで発生する廃棄物は、これも適切に処理するならば、また生態系に戻すことができる。

ここで、1000年先のことを考えてみよう。その時には、地下資源は確実に枯渇しているだろう。その時の物質の流れの模式図は図2のようになる。地下資源はもうない。そうすると、汚染も発生しないので、廃棄物問題からも解放されるのである。生態系から資源をいただき、廃棄物をまた生態系に戻すという社会である。言葉を換えれば、人間も生態系の一部として生きる暮らしということだ。



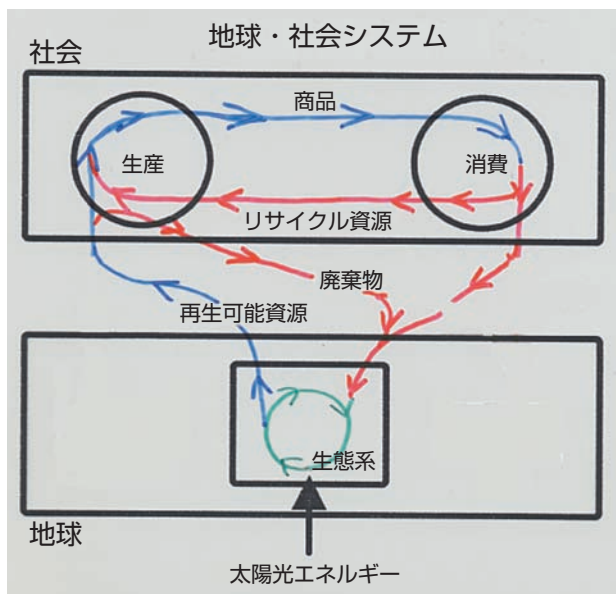


図2 将来の持続可能な社会における物質循環の模式図  
Schematic figure of material flow in future sustainable society

このように1000年先でもやっつけられるような社会のあり方をさして、千年持続可能とよぶ。そのような暮らし方をめざして、今から一步を踏み出すべきだ、というのが千年持続学の基本的な立場である。

とはいっても、石器時代に戻るということではない。かつて地下にあった金属は、今は社会の中に蓄積されている。これを大切にリサイクルしながら活用する。生態系の資源を、科学技術によって高度に、生態系をこわすことなく、むしろ生態系をより豊かにするように利用する。これが千年持続科学技術の考え方<sup>2)</sup>である。

### 3. エネルギーシフトは3段階で

#### 3.1 脱原子力の考え方

ここでは、千年持続学の立場から、将来のエネルギー利用について考察してみよう。今年7月から自然エネルギーによる電力の固定価格・全量買取制度がスタートした。これによって、さまざまな自然エネルギー発電施設を作れば、電力会社が設定された価格で全量買い取ってくれるので、確実に投資が回収できて利益があがるようになった。日本のエネルギー史上、画期的なできごとである。各地でメガワットソーラー施設の建設が進んでいる。また小水力発電所の建設もあちこちで模索されている。

このような状況の中で、自然エネルギーへのシフトによって脱原発を達成しようという「エネルギーシフ

ト」という考え方が浸透しはじめた。しかしながら、この考え方は、裏を返せば「自然エネルギーでおきかえられるようになるまでは原子力発電所を動かす」ということでもある。そうだとしたら、長い間、原子力は止まらないだろう。原子力発電が作り出していた電力量を自然エネルギーで作り返すことは、すぐには不可能だからだ。

そうではなく、すぐに原子力は止められる。エネルギーシフトは3段階で考えるべきだ。つまり第1段階は、すぐに原子力発電所を止めて、その分、これまで止まっていた火力発電所を動かす。いずれの電力会社も原子力発電がなくても、既存の火力・水力によって最大電力需要をまかなうだけの設備容量を持っていることが分かる。すなわち、これまでは原子力発電所を優先して動かしてきたので、相当な火力・水力発電所が止まっていたのである。

実際、2012年の夏は、戦後3番目の猛暑だったにもかかわらず、関西電力大飯発電所以外のすべての原子力発電所が停止している中で、計画停電などの必要はまったくなかった。関西電力以外は、原子力発電所がなくても電力供給が可能であることが実証された。関西電力においても、大飯発電所を動かす必要はなかったことが明らかになっている。

第2段階では、都市は、天然ガス（都市ガス）によるコージェネレーション（電気と熱の同時供給）でやっていく。都市ガスを燃料とする、小型の燃料電池が各家庭や事業所に普及する。そこで電気とともにつくられた熱も給湯や暖房に利用される。ビルの屋上には太陽光発電パネル。無数にある個々の発電設備をICTでつないだ、スマート・グリッドの都市が目に見えよう。

一方、農山村では、集落単位のエネルギー自給をめざすことができる。農山村に豊富にある自然エネルギー資源を最大限活用すれば、エネルギー自給のできる集落が次々に現れるだろう。

そして、第3段階では、都市も自然エネルギーにシフトして、社会全体で自然エネルギー100%をめざす。いずれ枯渇する資源に頼らない、「千年持続可能」、つまり千年先でもやっつけられるエネルギー利用の社会である。

#### 3.2 脱石油という課題

石油については、現在、究極的な埋蔵量のおよそ半分を使いきったところで、生産量のピークを迎えつつある。すぐに枯渇するわけではないものの、生産量が

減少していくと、需要をすべて賄いきれなくなるので、価格が上昇する。実際、2000年以降、原油価格は急上昇と急降下を繰り返す、不安定な時期に入った。

さらに問題は価格にとどまらない。「タンクの底」が見えてきたので、残った石油を誰がコントロールするのか、その利権争いのために戦争が起きる時代になってしまった。それは、湾岸戦争とイラク戦争という二つの戦争である。これは、アメリカのブッシュ大統領親子とイラクのフセイン大統領が戦った戦争というべきであり、その焦点は、当時世界第2位の埋蔵量をもつイラクの石油の利権をめぐる争いだったと言ってよい。実際、湾岸戦争によって、イラクの石油の管理権は、イラク政府から国連の手に渡った。そしてイラク戦争によって、イラクの石油は国連の手を離れ、アメリカ、イギリス政府の管理下に入ったのである。

したがって、石油に依存した社会からは、一刻も早く脱却した方がよい。エネルギーシフトというのは、脱原子力だけでなく、脱石油も中心的な課題なのである。

天然ガスはまだ資源の底が見えていないので、しばらくはつなぎとして利用できるだろう。しかしこれも21世紀の後半には資源の底が見えてきて、その利権をめぐる戦争がおこりかねない。

すでに、その調達にはきびしいものになっている。日本は、東シナ海の天然ガス田の開発をめぐる、中国と緊張関係にある。ロシアのサハリンで開発された大規模ガス田の利用をめぐる、当初は日本にパイプラインを引く計画だったが、後に中国に引く計画がもちあがり、両国間で綱引き状態になっている。このように世界各地で、天然ガス資源をめぐる国際的な緊張関係がある。

そこで、日本社会としては、2050年には天然ガスへの依存も脱して、自然エネルギー100%の社会をめざすべきである。それが、日本が行うことができる、もっとも有効な、世界平和への貢献となるだろう。日本が、1000年持続可能なエネルギー利用の社会へ転換することは、国内での暮らしを守るということだけでなく、世界の平和を維持するために欠かせないのである。

## 4. 千年持続可能なエネルギー利用社会へ向けて

### 4.1 都市の自然エネルギー化

エネルギーシフトの第3段階では、2050年に向けて、都市でも天然ガスをバイオマスなどの自然エネルギーに置き換えていく必要がある。

ただしそれには、現在のエネルギー消費のやり方ではとうてい無理である。図3は、将来のエネルギー利用のあり方についての、筆者の考え方を示している。2050年の分は、日本の中で利用できる自然エネルギーの総量を見積もって、積み上げたものである。現在のエネルギー供給量の1/3以下しかない。

すなわち、自然エネルギー100%の社会を実現するには、前提として極端な省エネが必要である。社会全体で1/3程度、局所的には1/10というような省エネだ。日本の人口は減少をはじめており、2050年には、だいたい2010年の80%程度となると予測されているので、一人当たりになればそれほどでもないけれども、それでも相当な省エネが必要である。

技術の向上は大切な要素である。しかし、それだけでは足りない。技術の向上によって、この20年でエアコンのエネルギー消費量はざっと1/3になった。しかし私たちは、自分の家に、そのようなエアコンを3台以上導入してきたので、社会全体の電力消費量が減

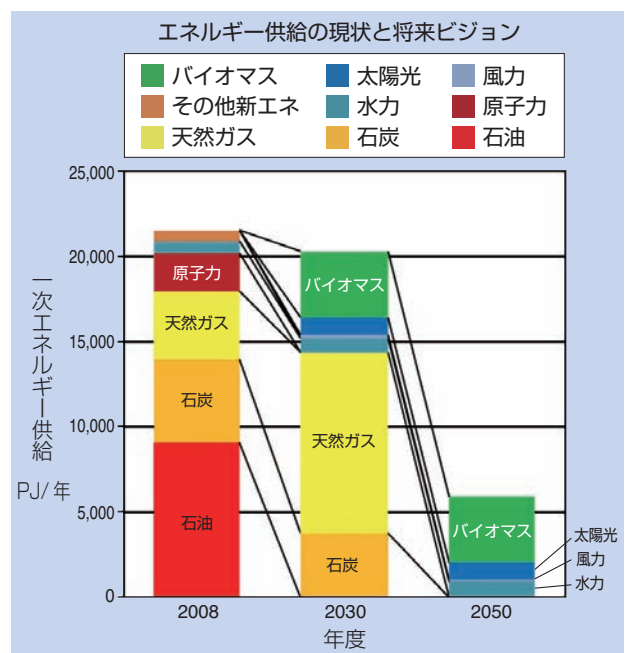


図3 現在の一次エネルギー供給の内訳と将来のビジョン  
Primary energy supply; Present situation and the future vision

少しでも、家庭の電力消費量は増加する傾向が止まらない。自動車の燃費改善はいちじるしい。しかし、そもそも重量の重い大型車は燃費が悪い。私たちは、車を買って替える時に、燃費の改善された大型車を買ってしまう。

これらは、個人の努力でなんとかなる話だけでは済まない。そもそも、個々の部屋にエアコンをつけるようなことをしなくてもすみ、車に乗る必要のないまちづくりをしなければならない。

これにはまず、都市がコンパクトになる必要がある。これは、人口減少とそれに伴う都市構造の変化によってその条件が整うと考えられる。職住近接で自動車を利用しなくてもよい街づくりとライフスタイルの変化が求められるだろう。また市街地の周囲は森林や農地とし、ヒートアイランドを防止して夏を過ごしやすい。天然ガスコジェネ・スマートグリッドを引き継いだ、基本的にはバイオマスによるコジェネと地域冷暖房を実現することになるだろう。

#### 4.2 小規模な水力発電の可能性

日本において有望な自然エネルギー資源としては、水力が考えられる。ダムを建設する大規模なものではなく、堰で取水する1MWクラスの小水力発電や、数～数十kWクラスのマイクロ水力発電、さらにはそれ以下のピコ水力発電などである。

全量・固定価格買取制度のもとでは、数十kWより上のクラスは、売電によって利益を上げることが可能となった。特に段階的な買取価格の設定により、1MWのものが特に有利になっている。このクラスの小水力発電所は、実は今から100年ほど前にさかんに建設された。図4はその模式図で上流の堰で取水さ

れた水は、高圧鉄管を下ってタービンを回す仕組みである。図5は、岐阜県揖斐川町坂内にある広瀬発電所で、出力3.2MW、1925年に建設され、今でも現役で稼働している。戦後はこのような発電所の建設は下火になったが、全量・固定価格買取制度のもとで、再び建設ブームがやってくるだろう。

さらに、全量・固定価格買取制度によって採算がとれない規模のマイクロ・ピコ水力の領域でも、現在さまざまなメーカーが水車の開発に乗り出している。図6は筆者の研究室で開発したらせん水車を利用した発電システムである。



図5 小水力発電所の例  
An example of small hydro power station



図6 農業用水路を利用したらせん水車発電システム  
Power generation system using axial type turbine set in a small irrigation canal

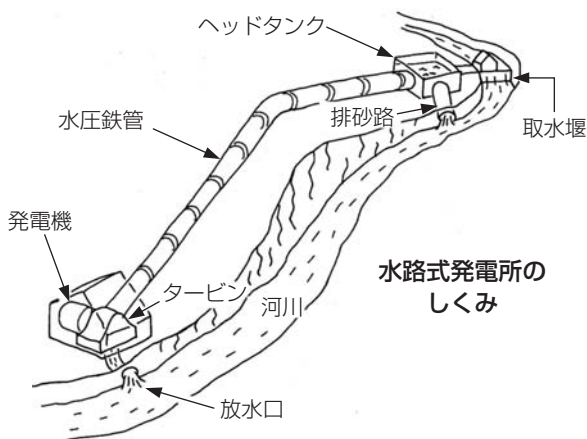


図4 流れ込み式小水力発電所の模式図  
Schematic figure of small hydro power station



農業用水路にすっぽり入るタイプで、出力は30W、低落差で発電し、水路を流れる落ち葉などの塵芥に強いのが特徴である。これらは自給的な利用をめざすものである。送電線が引かれていない山間部などでの利用や、災害による停電時の緊急電源としての利用が見込まれる。開発途上国には電化されていない地域がたくさんあり、そのような場所で、住民自らが投資しメンテナンスできる発電システムとしても期待されている。

#### 4.3 持続可能な将来の自動車利用

農山村での交通はどう考えたらよいだろうか。農山村でこそ、自動車が必要となるだろう。2050年にめざすべき、千年持続可能な社会における自動車利用は、電気自動車が主流となるのではないだろうか。その場合の電源は、水力発電を考えるべきである。そもそも不安定な電源である太陽光や風力は、こちらも変動する需要にマッチさせるマネジメントだけでたいへんである。それよりも、安定して発電できる水力発電、中でも小水力の電力を活用することを考えるのが適当だろう。

例えば、1MWクラスの小水力発電所を考えてみよう。たいていの場合、水は昼夜を問わず安定して取水できる。仮に夜間の電力需要が定格出力の30%であるとすれば、あとの70%、0.7MWは電気自動車の充電に利用できる。そうすれば、例えば三菱のi-MiEVであれば200台が同時に充電できる計算である。集落の中に充電ポイントを置き、カーシェアリングで活用するという世界である。

## 5. おわりに

将来のエネルギー利用のあり方は、国民全体、特に若者たちの徹底した議論と合意によって定めていくべきである。これまでは、そのための体制が欠けていたところに、大きな問題があった。これからは、さまざまな場面で、将来のエネルギー利用のあり方について、思いやアイデア、構想を出し合い、対話を重ねていくことが大切だ。本論がそのためのささやかなヒントになれば幸いである。

#### 参考文献

- 1) D.メドウズ他『成長の限界 人類の選択』、ダイヤモンド社、2005年
- 2) 資源協会編『千年持続社会—共生・循環型文明社会の創造』、日本地域社会研究所、2003年
- 3) 高野雅夫「小水力の大きな力」、季刊『地域』9号、2012年

#### 〈著者紹介〉

高野 雅夫 (たかの まさお)  
名古屋大学大学院環境学研究科准教授

1962年 山口県に生まれる

1981年 名古屋大学理学部に入学、地球科学で博士号(理学)取得

1993年 名古屋大学理学部助手

「全地球史解説」という地球史を調べる研究プロジェクトに参加し、「生命と地球の共進化」というコンセプトで地球史をとらえることを学ぶ。その中で46億年の地球史において人類の時代が特異な時代であることに気づく。

1996年 理学研究科助教授

2001年 4月発足の名古屋大学大学院環境学研究科設立に参加、同准教授

さまざまな分野の専門家と協働し、地下資源が枯渇した千年後でもやっていられるような地球と社会のシステムをつくりだすための「千年持続学」構築にむけて研究教育をすすめる。

また、市民のひとりとして行政やNPOと協働して「千年持続型社会」を実現するための活動に参加。

# 風力発電業界の市場・技術動向および、NTNの軸受技術

## Market of Wind Power Generation Industry, Technology Trends and Bearing Technology of NTN



堀 径生\* Michio HORI  
 山田 悠介\* Yusuke YAMADA  
 片岡 雅彦\* Masahiko KATAOKA

近年、風力発電装置の大型化、洋上化はグローバルで進められている。また、大型化と併せて、高信頼性、長寿命、高効率についても変革している。本稿では風力発電業界の動向に加え、それに寄与する軸受技術について紹介する。

Recently large-sized wind turbine generators and off-shore wind turbine generators have been globally promoted in the field of wind turbine generators industry. It is not only mere enlargement but also accompanying innovations of high reliabilities, longer lives and high efficiencies. In this paper, the trend of the industry will be introduced along with bearing technologies, which contribute the movement of the industry.

### 1. はじめに

風力発電は二酸化炭素を排出せず、環境への影響が最も少ないクリーンエネルギーとして、飛躍的な発展を遂げてきた。

図1に風力発電装置累計容量の推移を示す。最近の経済状況から多少の足踏みが見られたが、2011年の風力発電装置累積容量は、全世界で約240GW<sup>1)</sup>と原子力発電所60基相当\*に到達しており、今後はこれまで以上の増加が予想されている。

\*原子力発電所：100万kW/基、設備稼働率80%  
 風力発電設備：設備稼働率20%と仮定

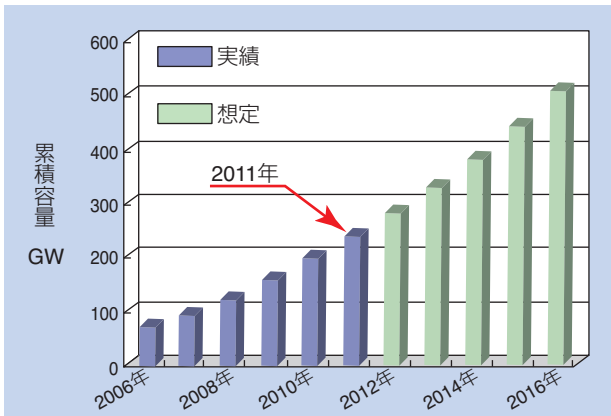


図1 風力発電装置累計容量の推移<sup>1)</sup>  
 Transition of total capacity of wind turbines

図2に各年度に設置された新規設置風車1基当たりの平均発電容量<sup>1)</sup>を示す。2005年に1基当たり1.30MWであった平均発電容量は、2010年には1.66MW/基へと大型化が進んできたが、2011年には1.68MW/基と、収束傾向である。

この理由として、2011年に設置された風力発電装置の大多数98.5%が陸上風車で、風車本体費のほか路上輸送制限、建設費などから、一定の大きさに絞られ、発電容量が集約されてきたと考えられる。

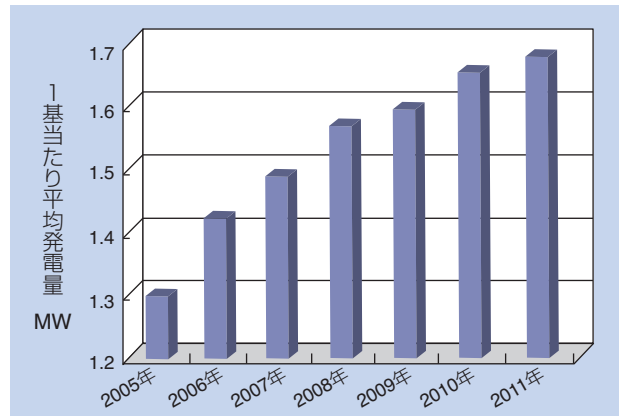


図2 新規設置風車の1台あたり平均発電量<sup>1)</sup>  
 Average capacity per one unit of newly installed wind turbines

\*産業機械事業本部 新エネルギー技術部

図3に昨年設置された風車の台数とその発電容量の関係を示す。建設されたほとんどの風力発電装置が1.5MW~2.5MW<sup>1)</sup>であり、当面はこのクラスが主力と考えられる。

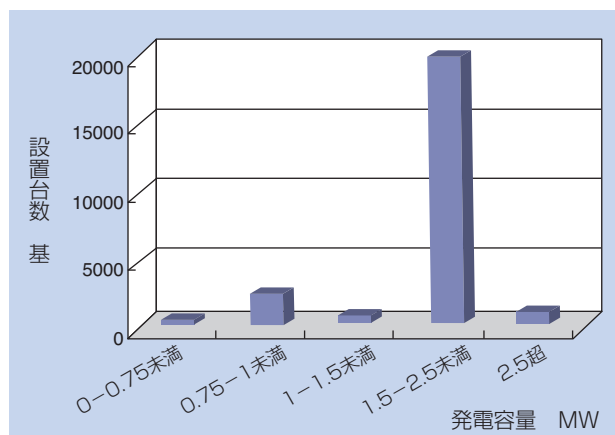


図3 2011年設置風車設置台数と発電容量<sup>1)</sup>  
The number of installed wind turbines in 2011 and their capacities

## 2. 洋上化

陸上の設置場所の減少や発電効率・設備稼働率向上から、風車メーカー各社は洋上を見据えた大型風車の開発を本格化させている。

現在、NTNで検討している70%以上の案件が洋上風車用であり、5、6年後には平均発電容量は再び増加すると考えている。

## 3. 洋上風車用軸受の技術動向

風車には水平軸、垂直軸など多くの形式があるが、代表的な3枚ブレード（翼）で水平軸式の大型風車を紹介する。図4に現在主流の誘導発電タイプのナセル部を示す。ブレードで風エネルギーを受け、ロータが回転し発電機で電気エネルギーに変換する。

洋上に設置された風車へは、簡単にはアクセスできないため、メンテナンスの容易さと信頼性の向上が重要視され、図4におけるナセル内の構成（主軸—増速機—発電機）以外にも、さまざまな機構が開発されている。

- 1) 主軸 — 発電機（ダイレクトドライブ）
- 2) 主軸 — 複数の発電機（フリクションドライブ）
- 3) 主軸 — 増速機・発電機ユニット
- 4) 主軸 — 油圧式増速装置 — 発電機

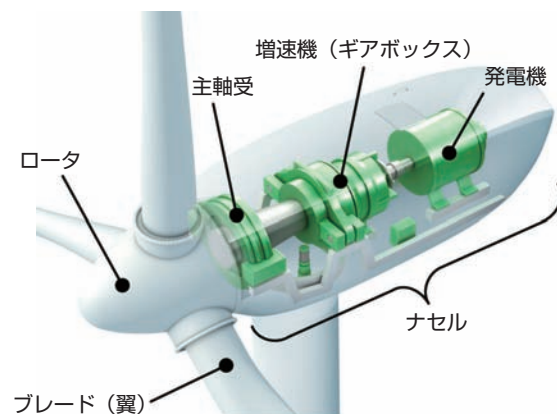


図4 風力発電装置の構造  
Structure of wind turbine

どのタイプにもメリット、デメリットがあり、材料価格など経済情勢によっても最適な構成が変わるため、各社が鋭意開発を続けている。

NTNはこれまで、上記のような洋上風車用軸受の開発を始め、陸上風車用の主軸、増速機、発電機などに用いられる各種軸受について、要求特性に合致した軸受を開発、供給してきた。

また、最近では洋上化に対応するため、状態監視システム（CMS：Condition Monitoring System）も開発しており、これらの技術動向について紹介する。

## 4. 主軸受

ロータを支える主軸受も大型化の一途を辿ってきたが、洋上風車では一般産業機械では経験がない大型サイズの軸受を使用する。

また、主軸の軸受構成は、組み込み時に生じる取り付け誤差の許容能力が高い自動調心ころ軸受を2個使用する仕様が主流であったが、自由側軸受の機能確保や、大型洋上化に伴う軽量設計により、表1に示すさまざまな構成に変化している。

主軸受が破損し交換する場合、主軸受が取り付くロータや主軸をナセルから降ろす必要があり、多大な費用が発生する。洋上風車となれば、交換費用はさらに膨らむため、主軸受には高い信頼性が要求される。

一方、試験機容量や評価時間の点で、実機サイズの台上耐久評価は困難なため、要素試験や解析技術で信頼性を確保することが重要である。



表1 洋上風車の主軸受レイアウト  
 Bearing layout of offshore wind turbine

構成	A		B	C	
構造図					
軸受形式	ロータ側	発電機側		ロータ側	発電機側
	円筒ころ軸受	内向き複列円すいころ軸受	外向き複列急勾配円すいころ軸受	単列円すいころ軸受	単列円すいころ軸受

#### 4.1 軸受内部設計の最適化

主軸受の大型化は、保持器強度に加え保持器全体の变形を左右する剛性も重要な要素であり、転動体や保持器の自重が回転性能に与える影響を解析で評価している。図5に単列円すいころ軸受の動解析例を示す。

ここでは、運転条件をシミュレーションし、保持器柱部に作用する荷重および応力を導出し、保持器強度を確認している。以上のような動解析や静解析で、転動体と保持器の仕様を最適化し、所定寸法内における高負荷容量設計を実現することができる。

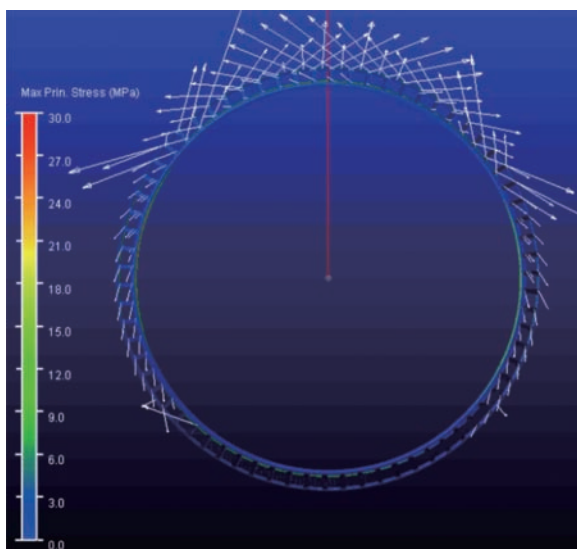


図5 単列円すいころ軸受の動解析例  
 Movement analysis example of single row tapered roller bearing

#### 4.2 軸受周辺設計の最適化

軸受寿命や転動体-軌道面間の接触応力は、周辺構造を考慮した構造解析から各転動体荷重を算出し、評価している。これは、同じ軸受でも軸受箱などの周辺構造により軸受寿命が大きく左右され、大型化するほどその影響も大きくなるためである。

図6に内輪回転で使用される自動調心ころ軸受の軸受箱を示す。自動調心ころ軸受が使用される場合、軸受箱は両端の2箇所がフレーム(ナセル)に連結される。そのため、図7に示すように8時位置付近の転動体荷重は剛体での計算結果に対し増加する。これは、フレームとの連結部付近は部分的に剛性が高く、変形しにくいいため局所的に荷重が負荷されるためである。従い、内輪回転で使用される場合は、使用条件に合わせた軸受箱の形状および、連結位置が特に重要である。

外輪回転で使用される複列円すいころ軸受の解析例を図8に示す。外輪回転の場合、軸受箱は連結部がなく、円周上の肉厚(剛性)が均一であり、荷重が全体に分散されるため、転動体荷重は低く抑えることができる。

このように軸受周辺構造は軸受寿命に大きな影響を及ぼすので、NTNでは軸受内部設計のみならず周辺構造を含めた解析を行い最適な軸受を提供している。



図6 自動調心ころ軸受用軸受箱解析モデル  
Analytical model of housing for spherical roller bearing

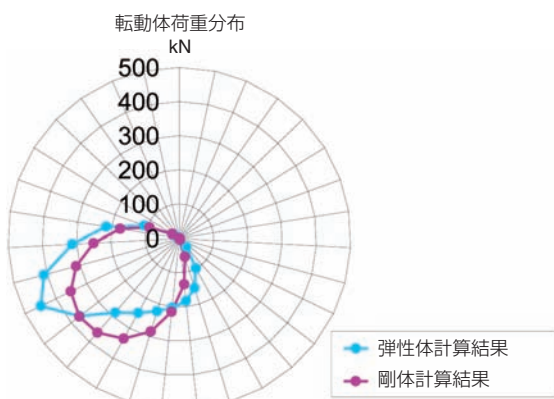


図7 自動調心ころ軸受解析結果  
Analytical result of spherical roller bearing

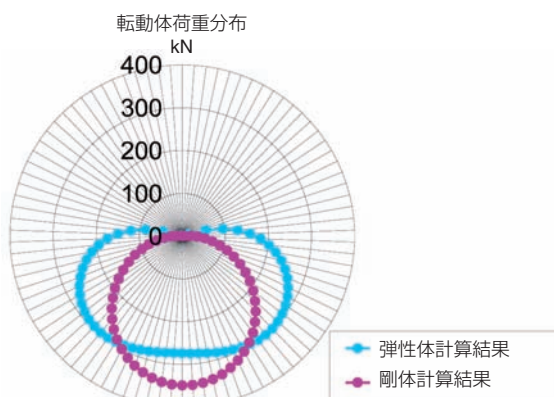


図8 複列円すいころ軸受解析結果  
Analytical result of double row tapered roller bearing

### 4.3 最適な軸受配置

前項で述べたように、軸受を長寿命にするには、軸受箱の剛性を円周上にわたって均一とするか、剛性の分布を極力滑らかにすることである。

また、一般に主軸受に作用する荷重は、図9に示す座標系で、ロータ中心に作用するFz方向のラジアル荷重、Fx方向のアクシアル荷重、およびMy方向のモーメント荷重で決定されるため、軸受をロータ内部に配置することで、モーメント荷重が軽減され、軸受荷重が低減する。

以上より、ロータ内部に軸受を配置し、外輪回転で使用する事が、最も軸受の長寿命化につながり、ナセルの軽量化、コンパクト化が可能な最適設計であると考えられる。

### 4.4 更なる高信頼性に向けて

NTNではユーザのニーズに対応するため、多岐にわたる試験装置を保有している。これらの試験装置で解析の信頼性を確認するとともに、メンテナンスの最適化に向けた潤滑基礎データを収集している。

また、NTNでは洋上風車に使用される実機サイズである外径4m程度の軸受を評価可能な大型試験装置を稼働予定である(図10)。本試験装置では、温度や湿度のほか、砂塵などの過酷な環境条件も設定可能であり、機能確認や基礎データを積み重ねることで、高信頼性を実証したい。

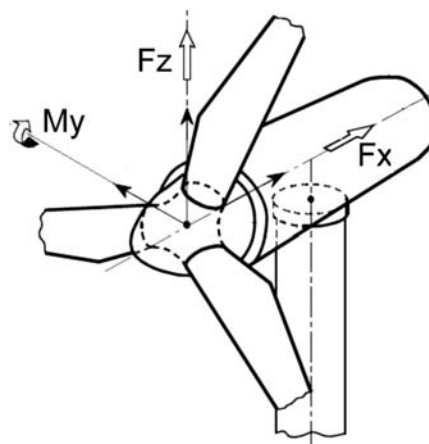


図9 主軸受座標系  
Coordinate system of main bearing

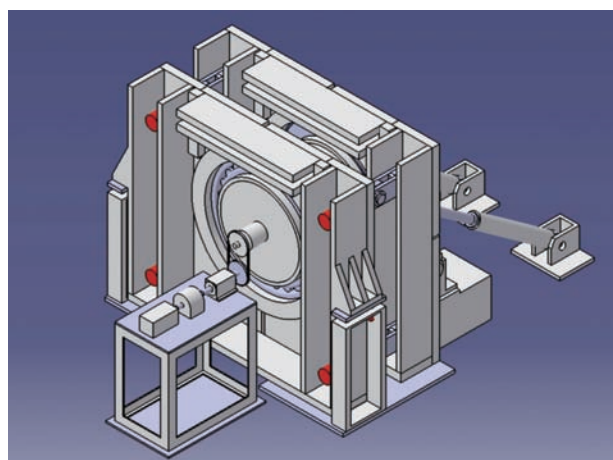


図10 洋上風車用軸受試験装置  
Bearing testing machine for offshore wind turbine

## 5. 増速機用軸受

風力発電装置が大型化する中で、増速機（図11）においては入力トルクが増大する反面、軽量・コンパクト化の要求がある。

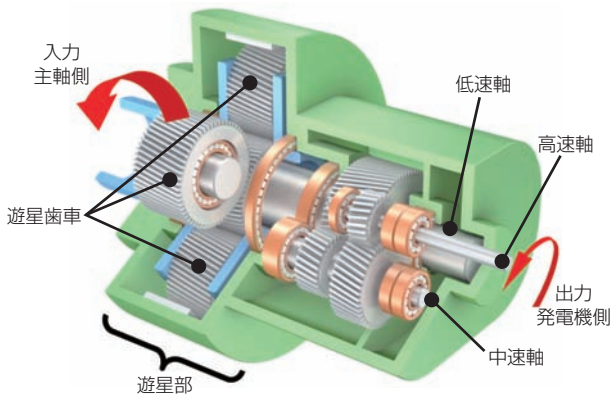


図11 一般的な増速機構造例  
Structure of general gearbox

### 5.1 軸受内部設計の最適化

増速機の軽量・コンパクト化には、遊星部の径方向寸法の設定が重要である。このため増速機メーカーは当該部の径寸法をできるだけ抑えるため、ハウジングの薄肉化、遊星歯車、軸受のサイズダウンなどを検討する。従い、軸受の仕様決定には、荷重、回転数などの使用条件に加え、軸受周辺構造を含めた各部の変形量や荷重分布を解析し、軸受仕様を決定、提案している（図12）。

また増速機は風況によって、トルク・回転速度に変動が生じる。増速機への入力に変動が生じても長寿命・高信頼性は必要であり、NTNでは増速機専用の仕様を適用している。

軸受に高荷重が負荷された場合、転動体であるころに発生する有害なエッジ応力を緩和するクラウニング形状の最適化を行っている。高荷重が負荷された際の標準クラウニングと特殊クラウニング接触応力分布の比較を図13に示す。ころに特殊クラウニングを適用することでエッジ応力が軽減していることがわかる。

また中・高速軸用の軸受は、比較的low荷重であり、スミアリングなど、滑りによる表面損傷の予防策として、内外輪およびころに特殊表面処理を開発した（図14）。

特殊表面処理で油膜形成能力を高め、金属接触によるスミアリングなどの表面損傷を防ぐ。図15は標準

品と特殊表面処理品の耐スミアリング性能を比較した試験結果で、2倍以上の耐スミアリング特性が得られている。

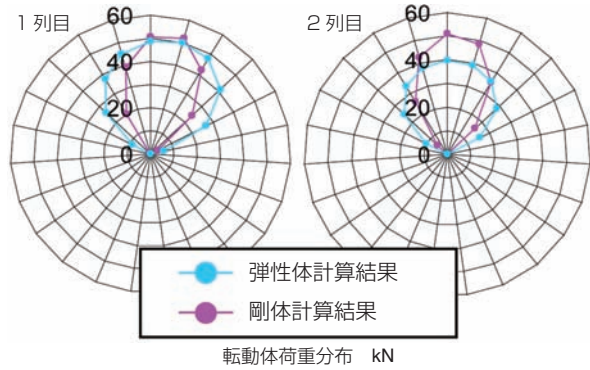


図12 周辺構造を含めた遊星軸受の解析結果  
Analytical result of planet bearing including structure in surrounding

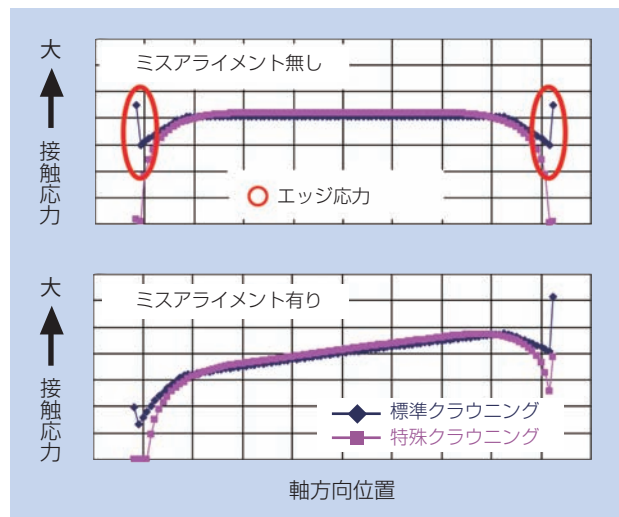


図13 ころ接触応力の比較  
Comparison of contact stresses of rolling element



図14 特殊表面処理軸受  
Special surface treatment bearing

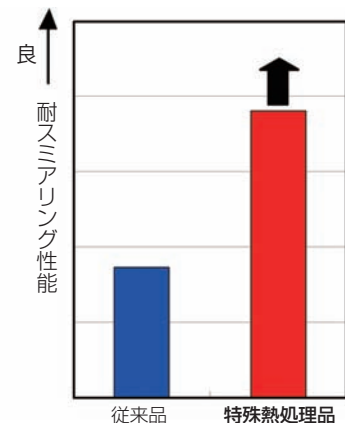


図15 スミアリング試験結果  
Examination result of smearing



## 5.2 変化する増速機構への対応

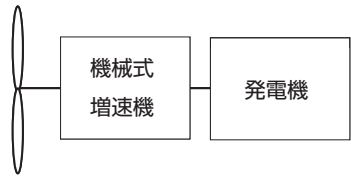
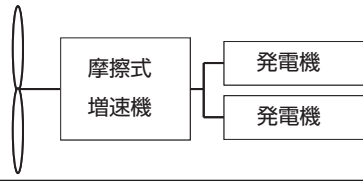
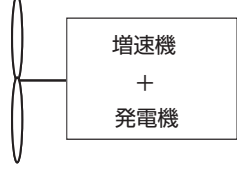
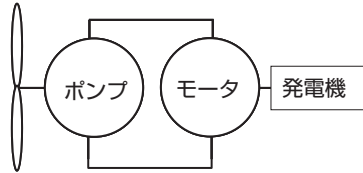
大型化、洋上化に伴い、増速機構にも変化が見られる。

増速機構の構成を表2に示す。これまでは主軸からの入力回転数を機械式増速機で約100倍に増速させ、発電機に伝達してきたが、高信頼性、コンパクト化を目的に、様々な増速機構が提案されている。

### ① 複数発電機構成

信頼性向上のため、複雑な機械式増速機を廃止し、単純なフリクションドライブによる増速機構を採用し、複数の発電機を駆動する。増速機構と発電機のトルク伝達は、NTN等速ジョイント（図16）を使用することで、さらに信頼性が向上する。

表2 増速機構の構成  
Speed increasing system

機械式 (従来構成)	
①複数発電機構成	
②増速機と発電機の ユニット化	
③油圧式	

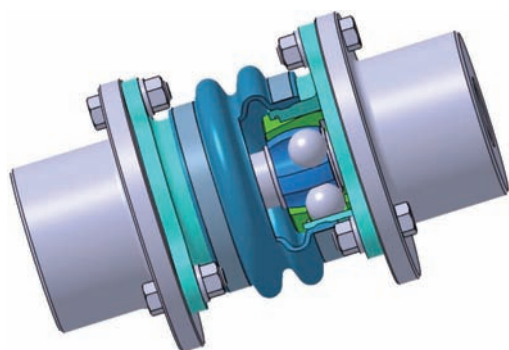


図16 等速ジョイント  
Constant velocity joint

### ② 増速機と発電機のユニット化

増速機と発電機をユニット化することでコンパクト化を実現する。従来のパワートレインに比べ、比較的回転速度は遅く、増速比を10~20倍程度として構造を簡素化し、信頼性の向上を図っている。

### ③ 増速機に代わる機構

増速機の代わりに油圧ポンプ・モータで増速する。信頼性の向上と共に、ポンプ・モータを制御することで回転速度も制御できるため、部品点数削減が可能である。

洋上化にあたり、増速機構は大きな転換期を迎えている。それぞれの機構で軸受に対する要求性能は大きく異なり、NTNはそれぞれに適した軸受の開発を進める。

## 6. 発電機用軸受

発電機用軸受は、回転子両側を深溝玉軸受で支持することが一般的で、1.5MWクラスで軸径は150mm程度である。

発電機用軸受としてNTNは、“MEGAOHM（メガオーム™）”をシリーズ化している。

本商品は、軸受外輪の外径部から側面に特殊セラミックスを溶射した軸受で（図17）、風力発電装置に留まらず、鉄道車両用主電動機、汎用モータなど幅広く採用されている。

また洋上化に向けて、さらなる高信頼性を達成するため、鋼球の代わりに図18に示すセラミックボールを使用した軸受をラインナップしている。セラミックボールによる温度上昇の低減で、潤滑剤の長寿命化を図ることができる。

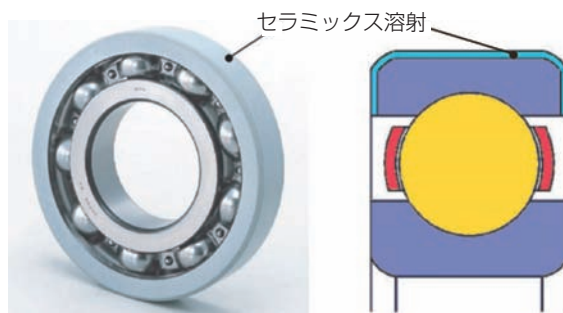


図17 セラミック絶縁軸受  
Ceramic insulated bearing



図18 セラミックボール  
Ceramic balls

## 7. 状態監視システム

風車は、都市から離れた山間や海岸沿いなど遠隔地に設置されることが多く、特に洋上風車などで故障が発生すると、その補修費用は膨大である。

このようなコストを抑制する方法として風力発電装置用の状態監視システム(CMS)が注目されている。

CMSを適用することで、風力発電装置の状態を遠隔地から監視し、早期に異常を検知することができ、二次的な損傷を防止することで、風車の稼働率向上が図れる。本装置については別稿で詳しく紹介する。

## 8. おわりに

風力発電は今後さらに拡大が期待される新エネルギーであるが、その使用環境、経済性、信頼性に対する要求は高まる傾向にある。

NTNではこれらの要求に応え、風力発電の発展に貢献できるよう、さらなる開発、解析を進める。

### 参考文献

- 1) BTM Consult : Word Market Update 2011

執筆者近影



堀 径生

産業機械事業本部  
新エネルギー技術部



山田 悠介

産業機械事業本部  
新エネルギー技術部

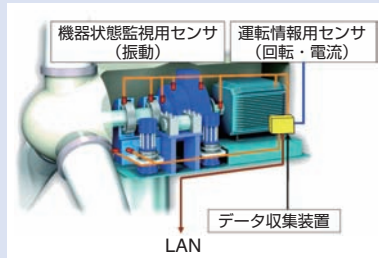


片岡 雅彦

産業機械事業本部  
新エネルギー技術部

## 風力発電装置へのコンディションモニタリングの適用 Application of Condition Monitoring System for Wind Turbines

竹内 彰利\* Akitoshi TAKEUCHI  
長谷場 隆\* Takashi HASEBA  
池田 博志\* Hiroshi IKEDA



NTNは風力発電装置用CMSを開発した。CMSは風車の主軸受、増速機、発電機などの装置の異常を早期に発見するシステムであり、遠隔地から監視できることが大きな特長である。このシステムは、データ収集装置、データ管理ソフトウェア、監視・分析ソフトウェアから構成され、日本メーカーとして初めてGLの形式認証を取得した。本稿ではNTNのCMSの構成と診断方法を解説する。

NTN has developed Condition Monitoring System for wind turbines. CMS can detect the failure of main bearings, gearboxes, generators, and many mechanical components of wind turbines at its early stage. One feature of CMS is users can monitor from a remote location. This system includes a data acquisition module, data management software and monitoring and analysis software for client PC and was the first in Japan to acquire GL certification. In this paper, the structure and the diagnostic method of NTN's CMS will be introduced.

### 1. はじめに

2011年度の日本の風力発電設備容量は2.5GWで世界13位<sup>1)</sup>である。本年7月にスタートした再生可能エネルギーの固定買取制度により、今後、大幅に増加することが期待されている。一方、買取価格は毎年見直されるので、メンテナンスコスト削減や設備利用率向上がより一層求められる。

風車の主要な装置であるブレード、主軸受、増速機、発電機などは、タワー上部にあるため、装置の修理・交換には超大型クレーンが必要である。また、風車の設置場所は山間部が多く、交通アクセスが悪いため、メンテナンスコストの負担が大きい。さらに、故障による停止の前に交換部品が確保できなければ、停止時間が長くなり設備利用率が悪化する。

風力発電装置用状態監視システム（CMS：Condition Monitoring Systems）は、振動や温度などから部品の損傷を早期に検出するシステムで、早期発見による損傷拡大の防止や、交換部品の先行手配による設備利用率の向上を目的としている。また、遠隔地から監視できるため、現地訪問回数を減らせるなど、メンテナンスの負担を軽減できる。

陸上には風力発電に適した場所が少なくなっていることから、今後は、洋上設置が増えると考えられている<sup>2)</sup>。洋上では、陸上以上に交換部品の輸送が困難であり、大規模な故障が発生した場合、停止時間が長くなるため、ドイツロイド船級協会（GL：Germanischer Lloyd）は洋上風車に対して、GLが認証したCMSの使用を推奨している<sup>3)</sup>。

NTNはメンテナンスの高度化に寄与するため、これまで培った振動診断技術を応用しCMSを開発した。このシステムは、日本メーカーとして初めてGLの型式認証を取得した。

### 2. システムの構成

NTNのCMSは、図1に示すように①データ収集装置と測定用センサ、②データ管理ソフトウェア、③監視・分析ソフトウェアで構成している。「①データ収集装置」は、風力発電装置に取り付けたセンサで振動などを測定し、インターネット回線を通してサーバにデータを送信し保存する。「②データ管理ソフトウェア」はデータを一次診断し、データがしきい値を超過した場合はアラームを発信する。

\*産業機械事業本部 新エネルギー技術部



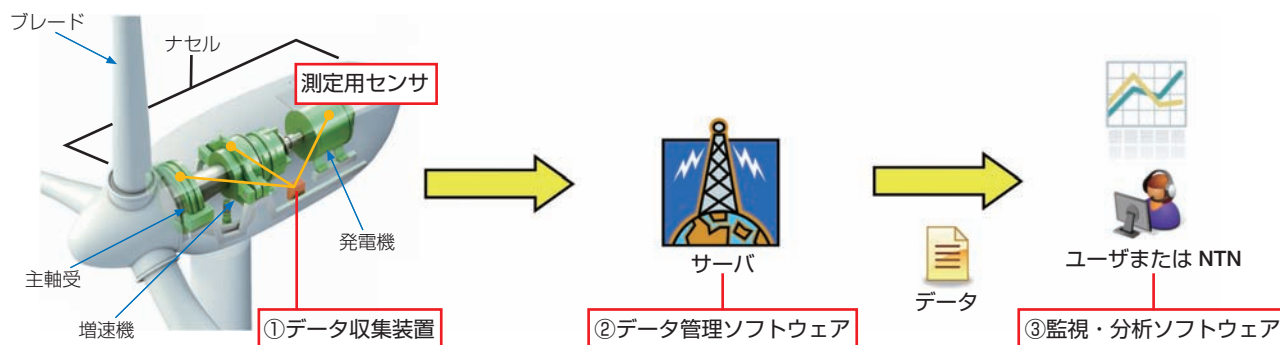


図1 NTNのCMSの構成  
Structure of NTN's CMS

また、「③監視・分析ソフトウェア」をインターネット接続したパーソナル・コンピュータにインストールすると、風車から離れた場所でもアラームやデータを確認できる。このソフトは分析機能も備えているので、精密診断が可能である。

### 3. データ収集装置

「①データ収集装置」の仕様を表1に、外観を図2に示す。装置は、ナセル内への設置性を向上させるため世界最小クラスのサイズを実現しており、既設の風車にも適用可能である。防塵・防水性が高く、使用温度範囲も広いので、洋上風車をはじめ、さまざまな環境下で使用できる。

振動、回転、電流、温度など様々なセンサが使用でき、チャンネル数の変更も容易である。



図2 データ収集装置  
Data acquisition module

表1 データ収集装置の仕様  
Specification of data acquisition module

項目	仕様	
測定信号	振動 (アンブ内蔵加速度センサ)	最大16ch
	温度 (熱電対)	最大6ch
	電圧 (AC, DC, 電流センサ)	最大4ch
	回転速度 (近接センサ)	1ch
電源	AC90 ~ 260V (50/60Hz)	
ケース寸法	250 × 290 × 108 mm	
質量	5.1 kg	
使用温度	-20 ~ +60°C	
ケース保護	電気機械器具の保護等級 JIS C 0929 IP65	
電磁両立性	EN規格 EN61000-6-2, EN61000-6-4に準拠	

### 4. 運転までのフローと診断の考え方

#### 4.1 観測モード運転

CMSの設置から運転までのフローを図3に示す。風車のように運転状態が刻々と変化する場合、振動変化が、運転状態の変化によるものか、軸受や歯車の損傷によるものかを区別しなければならない。運転状態の変化による振動の影響を除くには、常に同一の運転状態で診断する必要があるため、CMSの設置後、診断の前準備として「観測モード運転」とよぶ予備測定を行って、本格運用時の診断運転条件を決定する。

NTNのCMSでは運転状態を示すパラメータとして回転速度と発電量を採用している。「観測モード運転」では、定期的にデータ収集装置を起動し、回転速度と発電量を記録する。

主軸回転速度と発電量の例を図4に示す。一般的には、定格回転速度付近で発電量大きい条件1を診断運転条件とする。風が弱く定格回転速度で回ることが少ない時期でも診断するために、回転速度の遅い条件2を診断運転条件に加えてもよい。

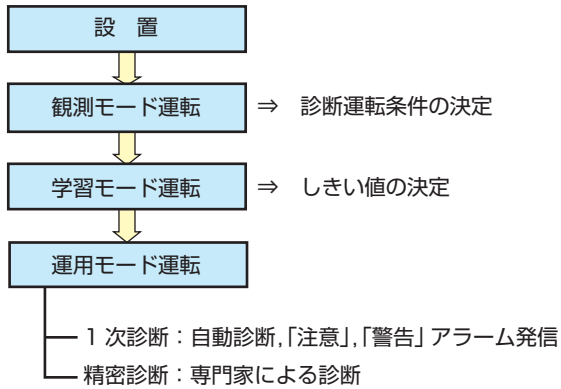


図3 NTNのCMS運用フロー  
Flow of NTN's CMS operation

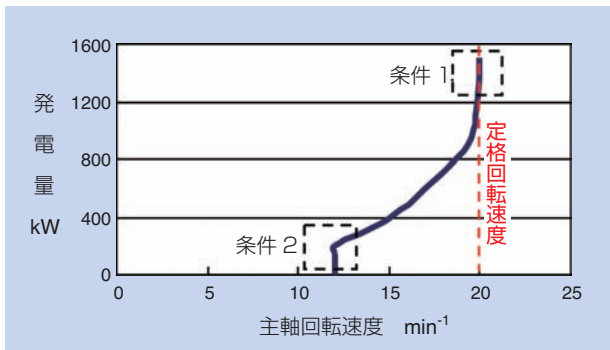


図4 主軸回転速度と発電量  
Main shaft rotational speed and electric power

#### 4.2 学習モード運転

診断運転条件が決まったら、診断しきい値を決定するため「学習モード運転」を行う。ここでは、正常時の診断パラメータを収集する。「観測モード運転」と同じように定期的にデータ収集装置を起動するが、回転速度と発電量が診断運転条件に合致する場合だけ、データ収集する。

NTNのCMSは、“注意”と“警告”のしきい値を自動的に計算する。過去の損傷事例から導出した正常時の診断パラメータと損傷時の診断パラメータの関係と、「学習モード運転」で測定した正常時のデータから、5項の診断パラメータに対するしきい値を自動的に設定する。なお、しきい値は手動でも設定できる。

#### 4.3 運用モード運転

「運用モード運転」において、CMSは定期的に計測し、診断パラメータがしきい値を超過した場合、図3の「1次診断」として、“注意”と“警告”の二種類の警報を発信する。警報は「③監視・分析ソフトウェア」上で確認できる。また、あらかじめ設定した担当

者に、電子メールで自動通知することも可能である。

図3の「精密診断」は、「③監視・分析ソフトウェア」の分析ツールを用いて専門家が診断する。「③監視・分析ソフトウェア」は、診断パラメータのトレンド表示としきい値表示ができるので、診断パラメータの傾向を把握できる。また、時間波形のフィルタ処理、エンベロープ処理、FFT処理が可能であり、軸受や歯車の欠陥に起因する周波数をスペクトル上に表示する機能も付与した。その他、過去の波形と現在の波形の比較も可能である。

### 5. 診断パラメータ

風力発電装置の主な装置は、ブレード、主軸受、増速機、発電機である。NTNのCMSは、すべての装置の損傷を対象とする。故障モードと対比する診断パラメータを表2に示す。故障モードと診断パラメータの関係を下記に詳細説明する。

#### ① ブレードのアンバランス

ブレードの損傷などが発生すると、質量アンバランスが生じ、振動が増加する。アンバランスは回転周波数のピークとして現れる。主軸の回転周波数成分の一次から三次成分を診断パラメータとし、アンバランス異常を検知する。

#### ② ナセル/タワーの異常振動

強風などを受けて異常に大きな振動を発生した状態を示す。振動は低周波の振動であるため、加速度振動のうち低周波帯域のスペクトル値を合計した値を診断パラメータとして用いる。

#### ③ 軸受異常

軸受軌道面、転動面のはく離や異常摩耗を原因とするものであり、実効値と変調度を診断パラメータとした。実効値は振動の平均的な値であるが、変調度は加速度振動のエンベロープ処理後の交流

表2 故障モードと診断パラメータ  
Failure modes and diagnosis parameters

故障モード	診断パラメータ
ブレードのアンバランス	主軸回転数の一次～三次周波数成分
ナセル/タワー異常振動	ナセルの低周波振動成分
軸受異常 (主軸受、増速機、発電機)	軸受近傍における振動の実効値、変調度
歯車異常 (増速機)	歯車諸元から算出される一次～三次のかみ合い周波数成分、高周波帯域の振動成分

成分の実効値であり、衝撃的な振動の判定に用いることができる。

④ 歯車異常

歯面のピッチングや異常摩耗などの歯当たり面の異常を示しており、一次から三次のかみ合い周波数成分と加速度振動のスペクトルから高周波帯域のスペクトル値を合計した値から診断する。

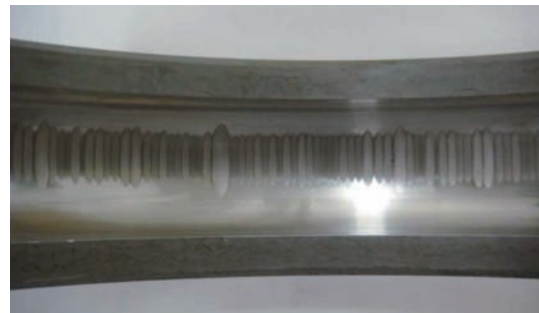


図7 電食による外輪軌道面損傷  
Outer raceway failure by electrical pitting

6. 発電機軸受の診断事例

実際の発電機で電食が発生した軸受と、正常軸受の振動を測定し、診断パラメータの一つである実効値を求めた。図5に風車の主軸回転速度と軸受近傍における振動実効値の関係を示す。電食の発生により実効値は大きくなる。正常軸受との差は回転速度が大きくなるほど顕著である。

振動のエンベロップスペクトルを求めた結果を図6に示す。外輪軌道面の一点が転動体と接触する周波数である外輪欠陥周波数とその高次成分が観測され、これにより外輪軌道面の傷の存在が推定できる。電食が発生した本軸受の分解調査において、外輪軌道面に図7のような波板状のリッジマークが見られ、エンベロップスペクトルの評価結果が正しいことが確認できた。

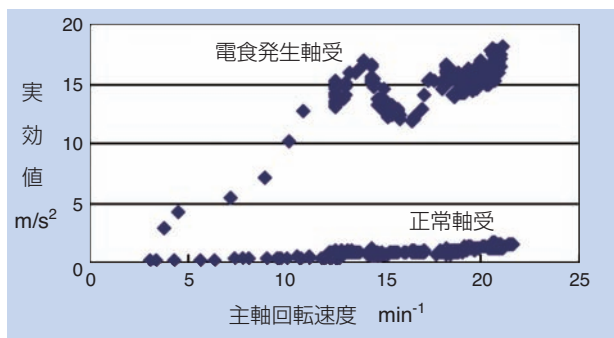


図5 主軸回転速度と実効値

Main shaft rotational speed and root mean square value of vibration

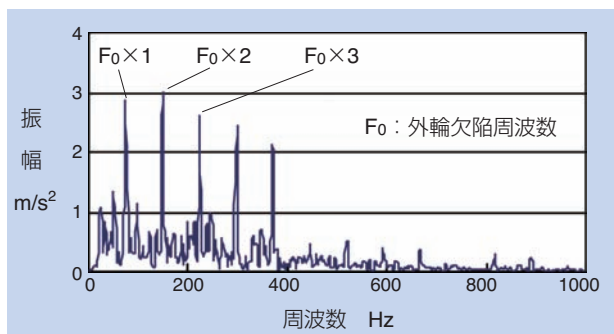


図6 エンベロップスペクトル  
Envelope spectrum of vibration

7. おわりに

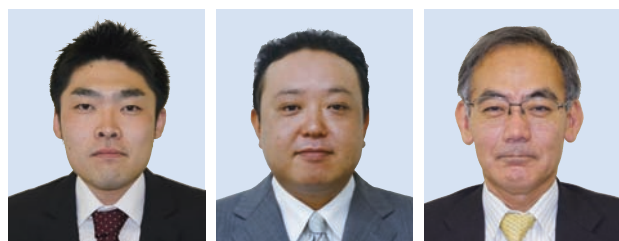
風力発電装置のCMSに求められる機能には、損傷の早期発見だけでなく、寿命予測も求められる。風車の設備利用率を向上させるため、停止時間をいかに少なくするかが重要であり、ユーザにとっては損傷を発見した場合、いつまで使用できるかを知ることが重要で、高精度で寿命予測するには、実機の振動測定と解体調査事例の蓄積が必要である。

今後、風力発電事業者、風車設備メーカー、メンテナンス事業者など、各社の協力を得ながら、診断ノウハウを蓄積し、一層有用な情報を提供できるシステムとして風力エネルギー利用拡大に貢献したい。

参考文献

- 1) Global Wind Energy Council : Global Wind Report Annual Market Update 2011
- 2) 石原 孟：洋上風力発電の現状と展望,電気学会誌, 131巻7号, 2011
- 3) Germanischer Lloyd Industrial Services GmbH : Guideline for the Certification of Condition Monitoring Systems for Wind Turbines,2007

執筆者近影



竹内 彰利

産業機械事業本部  
新エネルギー技術部

長谷場 隆

産業機械事業本部  
新エネルギー技術部

池田 博志

産業機械事業本部  
新エネルギー技術部



## 太陽光／太陽熱発電追尾装置用電動リニアモジュール Motorized Linear Module for Tracking System of Solar Light / Solar Heat Power Generation



小和田 智之\* Tomoyuki OWADA  
利見 昌紀\* Masaki KAGAMI

NTNは、風力、水力、太陽光、太陽熱などの新エネルギー分野向けの商品開発に取り組んでいる。本稿では、太陽光／太陽熱発電装置に使用する、低コスト・高性能・高メンテナンス性を有するシリンダ型電動リニアモジュールの太陽光追尾用途について紹介する。

NTN is engaged on product development for new energy sector. This article introduces the motorized linear modules which possess feature of low cost, high performance and easy maintenance for solar tracking system.

### 1. はじめに

温暖化ガス削減や電力供給の見直しなどにより、再生可能エネルギーへの期待は日増しに大きくなっている。特に太陽エネルギーを利用した太陽光・太陽熱発電は注目度が高い。一方、設備投資は発電コストに影響するため、付帯機器の簡素化、容易なメンテナンス性、ランニングコストを含めた総費用の抑制が求められる。

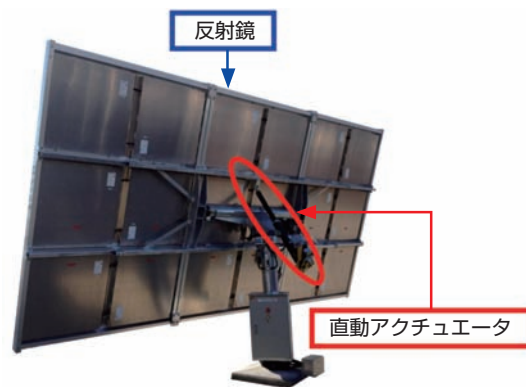
NTNは、耐環境性に優れ、かつ高推力・高分解能な電動モータ駆動方式のシリンダ型の各種リニアモジュールを開発した。

本稿では、これらの構造、仕様について紹介する。

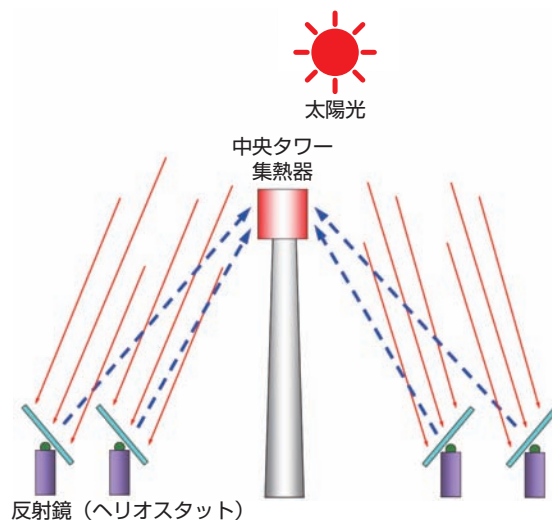
### 2. 太陽熱用追尾装置

太陽エネルギーを効率的に活用する手段として、[図1](#)に示すようなミラーなどの照射面を常に太陽に正対させる機構（ヘリオスタット）が有効である。反射鏡と、太陽の仰角を追尾するための直動アクチュエータ、および水平角を追尾する回転駆動部で構成されている。

ヘリオスタットによって反射した太陽光は、[図2](#)のように中央タワーの集熱器に集められる。集光により集熱器内部の熱媒体を500℃から1000℃程度まで加熱することで、汽力発電の熱源として利用する。



[図1](#) 太陽光反射用ヘリオスタット  
Heliostat mirror



[図2](#) 中央タワー型太陽熱発電プラント  
Central Tower power plants

これまで、太陽の高さを追尾する仰角制御用アクチュエータには、構造が簡素で量産性の高い空圧や油圧シリンダが使用されている。いずれも付帯設備が必須であること、および、シリンダ内部あるいはホースから空気や油の漏れが発生することから、電動化が注目されている。

### 3. 電動リニアモジュールの構造と特長

太陽光追尾用電動リニアモジュールの構造と外観を図3、図4に示す。

#### 3.1 送りねじ

最大推力の確保と長期間使用の信頼性、前進・後退両方向の位置再現性（繰返し位置決め精度）を重視し、ボールねじを採用した。

#### 3.2 直動案内部

図5に示すように、ボールねじのナット外径部から放射状に延びる4本の軸の各先端に軸受を取り付けたトラニオン構造とした。本体ハウジング内面の4つの

軌道面にトラニオンの軸受を接触させ、滑らかな直線案内を得るとともに、スライドシャフト先端に作用する上下・左右方向の偏荷重を受けることができる。

#### 3.3 モータ，減速機

モータは、2相ステッピングモータを採用し、モータに組み合わせる減速機は、ウォームギアを使用している。

#### 3.4 本体への固定方法

固定側（モータ側）と自由側（スライドシャフト側）の両端にロッドエンドを取り付け、一定の範囲内で自由可動する状態としている。

#### 3.5 その他構成

砂塵や異物の侵入を防ぐため、スライドシャフトの出入口部に防塵シールを取り付けている。また、モータおよびセンサ周辺にはステンレス製カバーを取り付け、耐紫外線や耐熱性の高いチューブで配線部を保護している。外装部品の接合部には耐候性モールド剤を充填し、高防塵・防滴性を確保している。

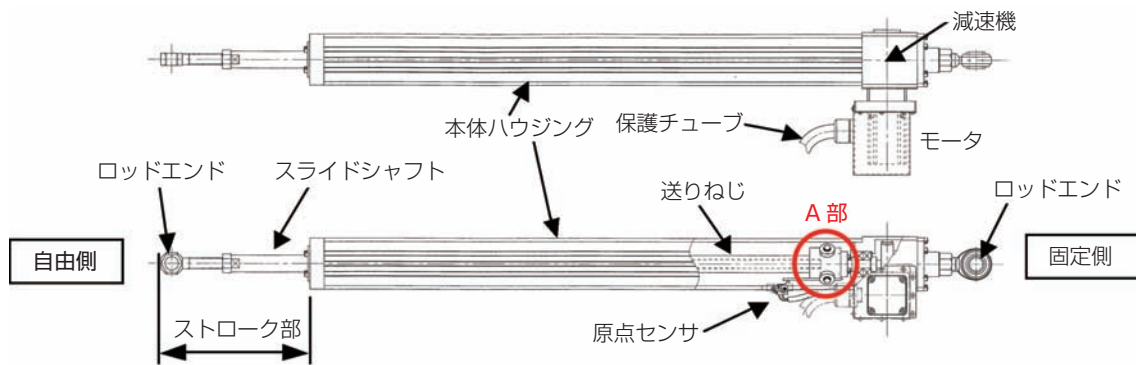


図3 電動リニアモジュールの構造  
Structure of motorized linear module

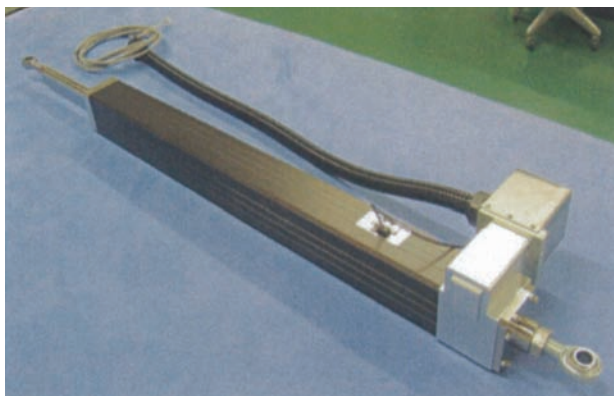


図4 電動リニアモジュールの外観  
External appearance of motorized linear module

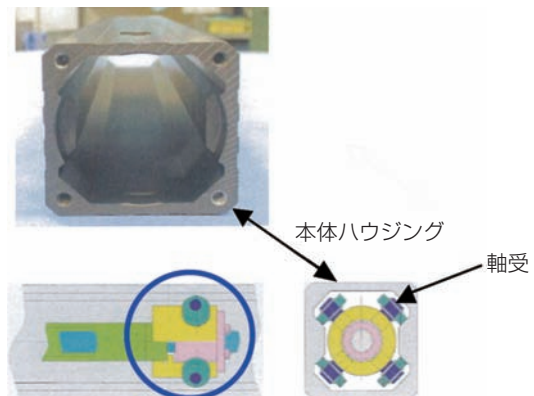


図5 直動案内内部（A部拡大）  
Part of straight guide (Magnified view A)

## 4. 太陽光追尾用電動リニアモジュールの適用

### 4.1 使用条件

表1に開発した電動リニアモジュールの使用条件を示す。本条件は、砂漠地帯などの過酷な環境下での使用を想定したもので、開発にあたっては信頼性を重視して検討を進めた。

通常は太陽の軌道に同期するように、極微量ずつ正確に反射鏡の向きを変えるが、強風時には、危険防止のため反射鏡を最大速度で水平状態に退避させる。この時、モジュール先端に作用する荷重を考慮している。

### 4.2 製品仕様と測定結果

電動リニアモジュール開発品（n=2）の測定結果を表2に示す。総合的に仕様を十分満足する結果であることを確認した。

表1 電動リニアモジュールの使用条件  
Service condition of motorized linear module

項目	使用条件
周囲温度	-10~+45°C
周囲湿度	40~100%
最大推力必要時	風速 40m/s

表2 仕様と検証結果  
Specifications and validation result

No.	測定項目	仕様	開発品 No.1	開発品 No.2
1	分解能	1 μm/p	1	1
2	最大速度	2.5mm/s以上	合格	合格
3	繰返し位置決め精度	±0.1mm以下	±0.004	±0.004
4	発生推力	風速 40m/s相当	合格	合格
5	ステッピングモータ脱調検証	風速 40m/s時	脱調なし	脱調なし
6	位置決め精度	参考値	0.096mm	0.093mm
7	バックラッシュ	参考値	0.002mm	0.016mm
8	消費電力	参考値	29W	24W

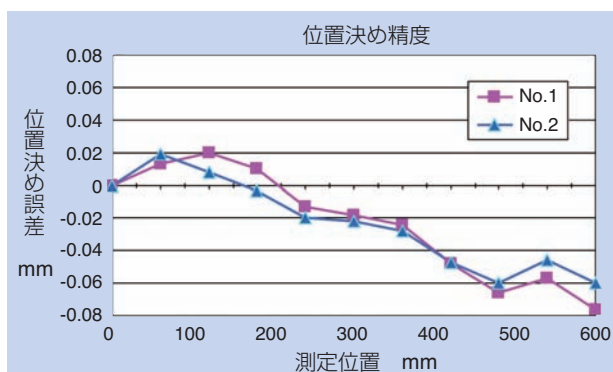


図6 位置決め精度測定結果  
Result of positioning accuracy

### 4.2.1 位置決め精度

繰返し位置決め精度は仕様に対して1/10以下の結果であった。

また、ストローク全域での位置決め精度は、図6のように0.10mm以下と高精度な結果であった。

### 4.2.2 推力性能の検証

強風時の退避動作に必要な推力性能は、図7に示す測定機で評価した。本試験結果から、最大推力は問題なく出力可能であることを確認した。

## 5. 太陽光発電追尾装置

集光型太陽光発電には、主に3種類の方式がある。通常のレンズを同心円状の領域に分割し、厚みが薄くノコギリ状の断面をもったフレネルレンズ方式（図8）、凹面鏡に反射した光を中央部の凸面鏡で再反射して中央の焦点位置に集光する反射ミラー方式（図9）、太陽光をレンズ下部内面の凹面部で反射し、レンズ上部の凸面鏡で対向させて下部凹面鏡の中央に集光するカセグレンレンズ方式（図10）である。これらの方式による発電は、いずれも正確な追尾を必

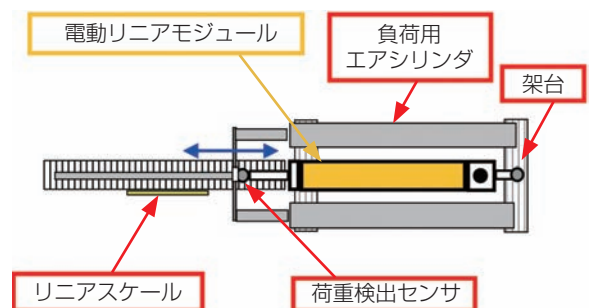


図7 推力測定機  
Thrust force measuring device



要とするが、NTNでは、太陽電池パネルのサイズ、構成によって使い分けが可能のように、高精度仕様タイプと剛性を優先した高剛性仕様タイプを開発し、いずれの仕様についても、実証評価中で特に問題なく連続稼働している。

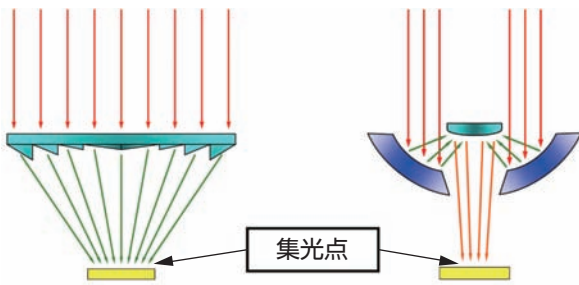


図8 フレネルレンズ方式  
Fresnel lens

図9 反射ミラー方式  
Reflective mirror

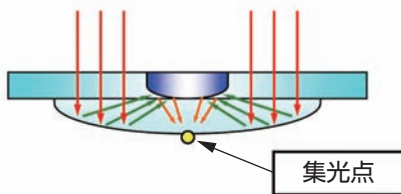


図10 カセグレンレンズ方式  
Cassegrain lens

### 5.1 高精度仕様

小型パネルを高精度で動かすことを主目的とした電動リニアモジュールを図11に示す。

本体ハウジングの両側面にある本体支持用ピンでベースに固定し、スライドシャフト先端のクレビス部に反射鏡を取り付ける。ストロークは200mm程度で、駆動部には太陽熱用と同様に高精度化のためボールねじを使用し、直動案内部にトラニオン構造を採用している。

### 5.2 高剛性仕様

中大型パネルを強固に支えながら、正確に太陽光を追尾するための高剛性タイプを図12に示す。直動案内内部は、他のタイプと同様にトラニオン構造を採用し、偏荷重対策と高剛性化を図っている。ストロークは500mm仕様であり、精密台形ねじを使用している。

また、スライドシャフト部にはジャバラを装備し、防塵・防滴を強化している。

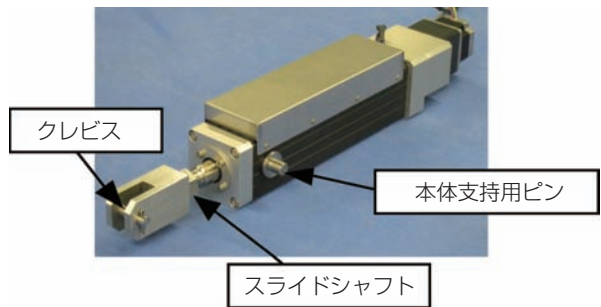


図11 高精度仕様電動リニアモジュール  
High precision spec linear module

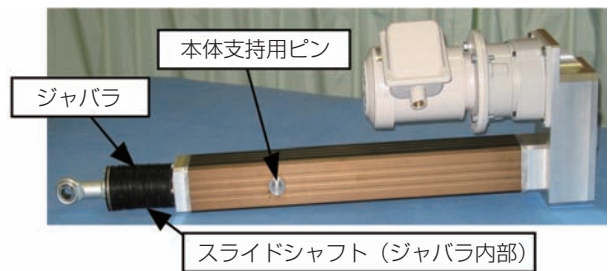


図12 高剛性仕様電動リニアモジュール  
High stiffness spec linear module

## 6. おわりに

今後、再生可能エネルギー分野の需要は益々拡大していくと予想される。

今回、太陽熱発電、太陽光発電の追尾装置について、それぞれの特性に応じた電動リニアモジュールの開発を行なった。

現在、各装置の実証評価を継続するとともに、引き続き耐久性、メンテナンス性などの改良に取り組み、市場の要求に応えた商品化を進めている。

### 執筆者近影



小和田 智之

精機商品事業部  
プロダクトエンジニアリング部



利見 昌紀

精機商品事業部  
プロダクトエンジニアリング部

## 温度制御および組織制御による 軸受鋼の高周波ずぶ焼入・高周波焼戻方法の開発

### Development of Induction Through-hardening and Induction Tempering Methods with Temperature Control and Microstructural Control in Bearing Steel



藤田 工\* Takumi FUJITA  
鈴木 伸幸\* Nobuyuki SUZUKI

本稿では、誘導加熱による軸受軌道輪の高周波ずぶ焼入・高周波焼戻方法について述べる。本技術は温度制御と鋼中炭素の固溶状態監視により軸受鋼の高周波加熱条件を決定することを特徴とし、熟練者でなくても、軸受軌道輪の高周波ずぶ焼入・高周波焼戻条件の設定が可能である。

本技術は高周波加熱による雰囲気加熱の代替を促進するものであり、転がり軸受の製造工程における環境負荷低減と省エネルギー化に貢献できると考える。

In this report, induction through-hardening and induction tempering for bearing rings are introduced. Both technologies determine heat conditions in induction heating by utilizing temperature control and monitoring of carbon solubility in bearing steel. This means the system eliminates the need for qualified experiences in the heat condition design of induction through-hardening and induction tempering.

The system will promote replacements of conventional atmosphere furnaces by induction heating furnaces, and result in a contribution to energy saving in manufacturing process of rolling bearings and reduction of negative environmental impact.

## 1. はじめに

高周波誘導加熱（以下、IH）は、安全性、環境負荷、加熱効率の面で他の加熱方式にはないメリットがあり、燃焼を利用しないため、火災に対する安全性が高いこと、放熱による環境の悪化を引き起こさないこと、燃料の貯蔵設備が不要という長所がある。また、電気を利用した急速加熱のため、必要な時に迅速な加熱が可能である。最近では、これらの特徴を活かしたクッキングヒーターや電気ケトルなどの加熱調理器具が一般家庭に普及している。

一方、工業的な生産活動においても、IHは注目を集めており<sup>1), 2)</sup>、ピースバイピースでの処理が可能で、設備の省スペース化、迅速な起動停止、小ロット品の効率的な処理など、生産工場にとって多くの利点をもたらす。軸受分野においては、ホイール軸受などにIHによる部分焼入が適用されている。

IHは工業的な生産活動において多くの利点があるが、一般軸受のずぶ焼入では適用実績は少なかった。この理由としては2点あげられる。1つは部分加熱であるIHでは、製品全体の均熱を達成することが難しいという先入観であり、もう1つは軸受鋼の焼入に必要な炭化物の母地への溶け込み制御が高温短時間加熱で再現性よく実現できるかという懸念である。これらを払拭するためには、良好な均熱状態を得るための加熱コイルの設計技術と、製品全体の組織を制御する方法が必要である。

本稿では、軸受鋼（JIS-SUJ2、以下SUJ2）製軸受軌道輪全体の組織を制御しながら、加熱時間を最短にできる、高周波ずぶ焼入ならびに高周波焼戻（以下、IHずぶ焼入・焼戻）方法について述べる。

\*先端技術研究所

## 2. IHずぶ焼入・焼戻システム

### 2.1 本システムの概略

1%の炭素を含有するSUJ2の素形材では、被削性向上のために面積率15%程度の炭化物を球状に分散析出させる。素形材を焼入温度まで加熱すると、炭化物中の炭素はオーステナイト中に固溶する。その際、疲労強度、耐摩耗性、寸法安定性のバランスをとるため、炭化物の面積率は6~8%になるように焼入温度を調整する<sup>3)</sup>。雰囲気炉によるSUJ2製軸受軌道輪のずぶ焼入では、全体の炭化物分布をできるだけ均質にするため、肉厚に応じて十分な均熱時間をとる。一方、基本的に部分加熱のIHでは、均質な加熱が雰囲気炉よりも難しいため、軌道輪全体の材質を管理基準内に制御する技術が必要である。以下に、軌道輪の複数個所の測温結果に基づき、全体の材質を制御する方法について概説する。

図1に温度制御によるIHシステムの概念図を示す。加熱部には放射温度計を2台設置し、これらの温度計でコイルから近い位置と遠い位置の表面を測温する。コイルから近い位置では、磁束の侵入量が多いため、温度が速く上昇する。一方、コイルから遠い位置では、磁束の侵入量が少ないため温度が上がりにくい。ここで、コイルから近い放射温度計①の位置を温度制御側、コイルから遠い放射温度計②の位置を加熱停止タイミング側と呼ぶ。本技術の特徴はこれら2箇所の測温結果に基づいた材質予測方法にある。温度制御側の温度をPID制御すると同時に、その位置の材質を測温結果に基づき、パソコンでリアルタイムに予測する。また、並行して、加熱停止タイミング側も測温し、その位置

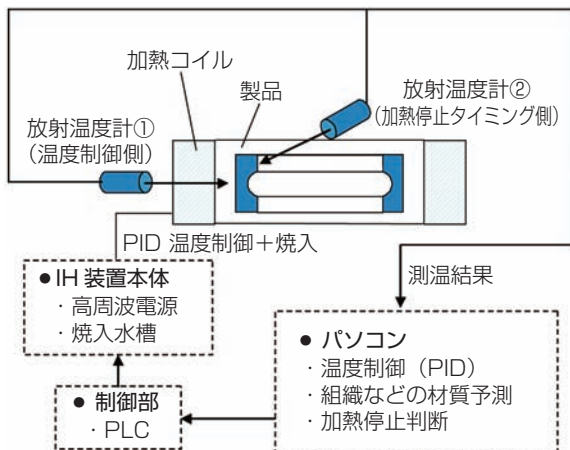


図1 温度制御によるIHシステムの概念図

Schematic of induction heating system with temperature control

の材質も予測する。このとき、両位置の材質の推定結果が材質の管理基準に到達した直後に軌道輪を冷却すれば、最短時間で焼入できる。本システムでは、焼入時に予測する材質パラメータを炭化物面積率、焼戻時に予測する材質パラメータを焼戻後硬さとした。

なお、図1のパソコンと制御部の構成は、プログラミング機能付PLC、応答速度の速いADおよびDA変換ユニット、PID制御が可能な制御ユニット、タッチパネルの構成でも成立する。

### 2.2 IH焼入における炭化物面積率の予測

図2に雰囲気炉で作製したSUJ2焼入品の炭化物分布を示す。図中の炭化物面積率は6.3%である。本技術では、炭化物の分布状態を2台の温度計の測温結果から予測する。予測方法としては拡散方程式を解く方法<sup>4)</sup>と実験式を使う方法があるが、本システムでは、実験式を使う方法を採用した。実験式を採用した理由は、計算モデルに仮定が必要な拡散方程式による方法より、実験結果に基づく方法のほうが予測精度が高いと考えたためである。(1)式と(2)式に実験式を示す。

$$M = M_0 \exp(-kt^n) \dots \dots \dots (1)$$

$$k = A \exp(-E/RT) \dots \dots \dots (2)$$

- M : 炭化物面積率(%)
- t : 加熱保持時間
- M<sub>0</sub> : 生材の炭化物面積率(%)
- T : 温度(K), R : 気体定数
- A, k, n, E : 実験で求める定数

式中のA, k, n, Eは、様々な条件で焼入した試験片の炭化物面積率を(1)式と(2)式で帰帰して得る。

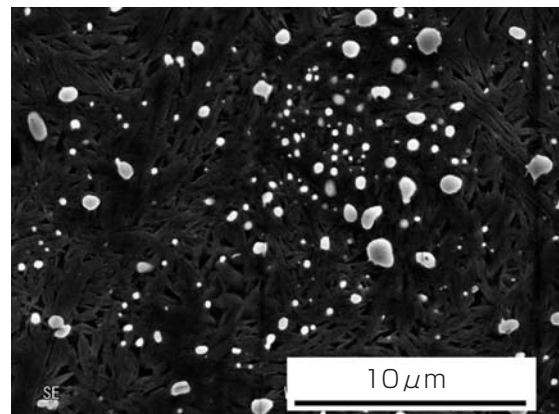


図2 雰囲気炉で熱処理したSUJ2焼入品の炭化物分布の電子顕微鏡像

SEM image of carbide distribution of SUJ2 quenched by atmosphere furnaces



炭化物面積率は各試験片の組織の電子顕微鏡像を解析して求める。50種類の試験片の炭化物面積率から得た回帰式を用いて、加熱条件と炭化物面積率との関係を計算した結果を図3に示す。炭化物面積率は加熱温度が高くなると短時間で著しく低下する。

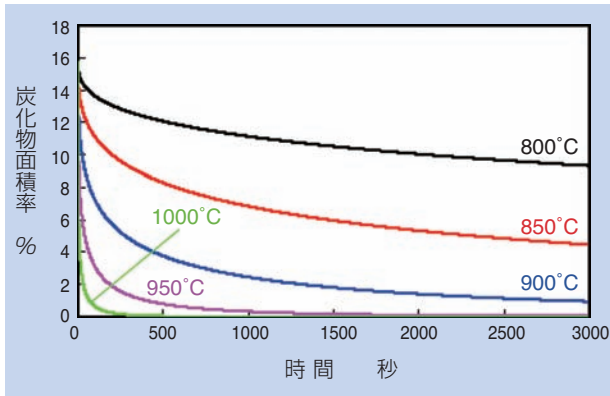


図3 加熱保持時間と炭化物面積率との関係  
Carbide area ratio as a function of holding time before quenching of SUJ2

(1) 式と(2) 式は一定温度での炭化物面積率の時間変化を推定する式であるが、加熱中の軌道輪の温度は一定ではないので、測温結果から炭化物面積率を計算するには工夫が要る。図4に測温結果の模式図を示す。測温結果を拡大すると、温度はステップ状に変化する。炭化物面積率  $M_i$  はステップごとの温度  $T_i$  に基づき、(3) 式と(4) 式を使って計算できる。

$$M_i = M_0 \exp(-(k_i (t_i + \Delta t))^n) \dots \dots \dots (3)$$

$$t_i = \sqrt[n]{\ln(M_0/M_{i-1}) / A^n \exp(nE/RT_i)} \dots \dots \dots (4)$$

$t_i$  は現在のステップの炭化物面積率の変化を次のステップの温度で到達するのに必要な加熱時間に換算したものである。また、 $\Delta t$  は測温のサンプリング周期である。なお、炭化物面積率の計算は炭化物の溶け込みが始まるオーステナイト化温度から開始する。

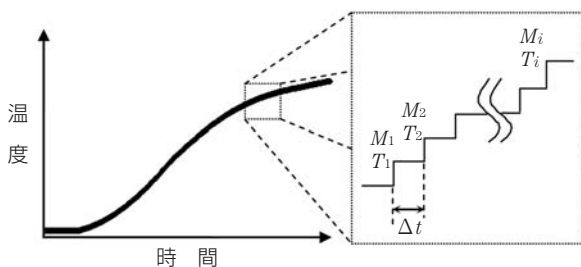


図4 測温結果の模式図  
Schematic of time-temperature chart

温度制御側と加熱停止タイミング側の測温結果から炭化物面積率を計算した例を図5に示す。ここで、温度制御側の温度は880°Cで一定となるようにPID制御した。炭化物面積率は変態点を越えてから、温度上昇とともに低下する。仮に炭化物面積率の許容範囲を6~10%と設定した場合、最短の加熱時間は各測温位置でその許容範囲に達する120秒である。図6に図5の条件で焼入した軌道輪の加熱停止タイミング側の炭化物分布を示す。図6の炭化物面積率は9.5%であり、図5の計算結果とおおむね一致した。

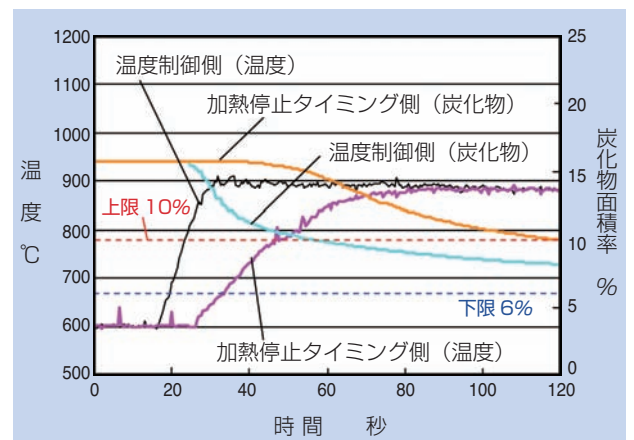


図5 (3)式および(4)式を使った炭化物面積率の計算例  
Specific example of carbide area ratio calculated by equations 3 and 4

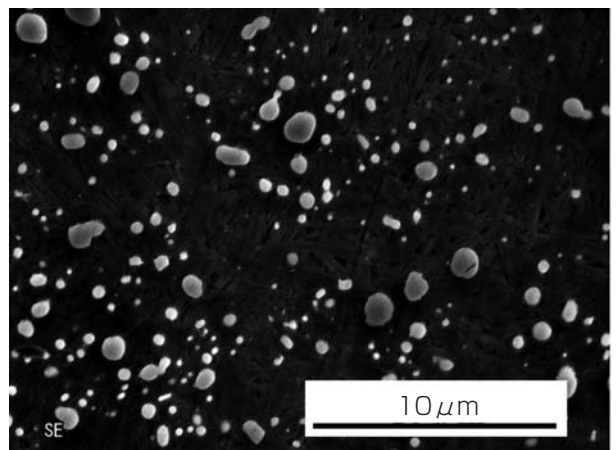


図6 図5のIH条件で焼入したSUJ2の炭化物分布の電子顕微鏡像  
SEM image of carbide distribution of SUJ2 after quenching. The austenitization condition and the predicted carbide area ratio are shown in Fig. 5

### 2.3 IH焼戻における硬さの予測

焼戻では、測温結果から焼戻後硬さをリアルタイムに推定する<sup>5)</sup>。(5)式と(6)式に焼戻後硬さを求める実験式を示す。

$$X = X_0 - (X_0 - X_f)(1 - \exp(-(k' t)^{n'})) \dots\dots\dots (5)$$

$$k' = A' \exp(-E' / RT) \dots\dots\dots (6)$$

- X : 焼戻後硬さ (HRC)
- t : 加熱保持時間
- X<sub>0</sub> : 焼入後硬度 (HRC)
- X<sub>f</sub> : 生材硬度 (HRC)
- T : 温度 (K), R : 気体定数
- A', k', n', E' : 実験で求める定数

図7に加熱保持時間と焼戻後硬さとの関係を焼戻温度ごとに示す。この関係は図3を作成したときと同じように、焼戻条件を系統的に変えた試験片を硬さ測定し、その結果を回帰分析して得た。なお、IH時のリアルタイムでの焼戻後硬さは焼入のときと同様の方法で計算する。

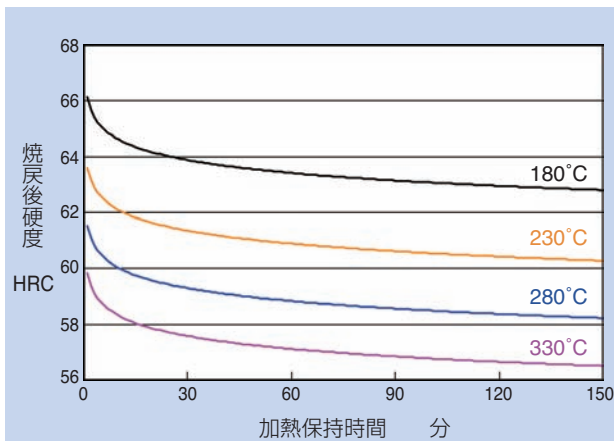


図7 加熱保持時間と焼戻後硬さとの関係  
Relationship between hardness and tempering time

### 2.4 材質調査結果

本技術を用いてSUJ2製6206玉軸受内外輪にIHずぶ焼入・焼戻を施した。表1に試験片リストを示す。表1の8種類の試験片に対して、図8に示す9箇所の位置でビッカース硬さを測定した。表2に全測定位置での平均硬さと標準偏差を示す。SUJ2製軸受の標準的な硬さはほとんどの場合HRC60~63 (HV696~772)である。また、製品内での硬さのばらつきはHRCで2ポイント (HVで約50ポイント) 以内である。本技術を使って処理した6206玉軸受内外輪の品質はこれらの範囲内であり、良好であった。

表1 試験片リスト

Heat condition for inner and outer rings of 6206 ball bearing

No	部位	焼入	焼戻
1	外輪	900°C IH加熱 炭化物面積率6~8% 室温ソリュブル水冷	180°C×2h 恒温槽加熱
2	内輪	↑	↑
3	外輪	830~860°C 霧田気炉加熱 90°Cセミホット油冷	230°C IH均熱 硬度HRC62
4	内輪	↑	↑
5	外輪	900°C IH加熱 炭化物面積率6~8% 室温ソリュブル水冷	230°C IH均熱 硬度HRC62
6	内輪	↑	↑
7	外輪	標準品 (霧田気炉による焼入焼戻)	
8	内輪		

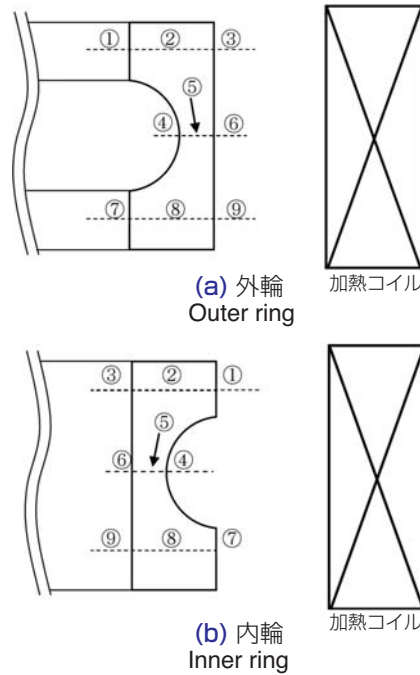


図8 ビッカース硬さの測定位置  
Measuring position of Vickers hardness

表2 硬さの測定結果

Vickers hardness for inner and outer rings of 6206 ball bearings

No	部位	焼入	焼戻	硬度 HV	
				平均	標準偏差
1	外輪	IH	炉加熱	763	7.5
2	内輪			734	24.8
3	外輪	炉加熱	IH	710	6.5
4	内輪			721	6.1
5	外輪	IH	IH	702	5.3
6	内輪			710	11.9
7	外輪	炉加熱	炉加熱	743	8.3
8	内輪			738	5.5

### 3. IHずぶ焼入・焼戻品の諸特性

#### 3.1 転動疲労試験

図9に示す6206玉軸受寿命試験機を使って表3に示す条件で転動疲労試験を行った。図10と図11に清浄油潤滑下と異物混入潤滑下での試験結果を示す。

清浄油潤滑下での転動疲労試験では、試験個数3個とも5984h未破損で試験を打切った。IHずぶ焼入・焼戻品の10%寿命はワイブルスロープを標準品と同じと仮定した場合、信頼率90%で2115hと計算でき<sup>6), 7)</sup>、標準的な軸受の寿命水準1624hと同等であった。

IHずぶ焼入・焼戻品の異物混入潤滑下での寿命も有意差検定<sup>6), 7)</sup>の結果、標準品と差はなかった。

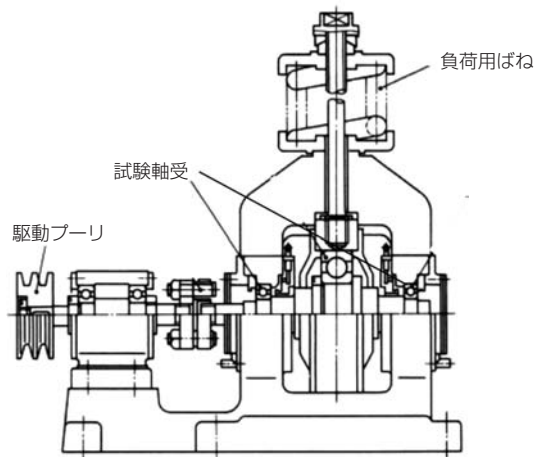


図9 6206玉軸受用転動受寿命試験機  
Rolling contact fatigue (RCF) test rig for 6206 ball bearing

表3 転動疲労試験条件  
Conditions of RCF life testing for 6206 ball bearing

項目	清浄油潤滑	異物混入潤滑
軸受	6206C3	
最大接触面圧	3.2GPa	
最大せん断応力深さ	$Z_{45^\circ}=0.16\text{mm}$	
回転速度	3000min <sup>-1</sup>	
潤滑	無添加タービン油 VG56循環給油	NTN標準異物 0.4g/L 無添加タービン油 VG56油浴
異物		KHA30 ガスアトマイズ粉
異物サイズ		100~181μm
異物硬さ		HV700~800
計算寿命	126h (異物無し)	

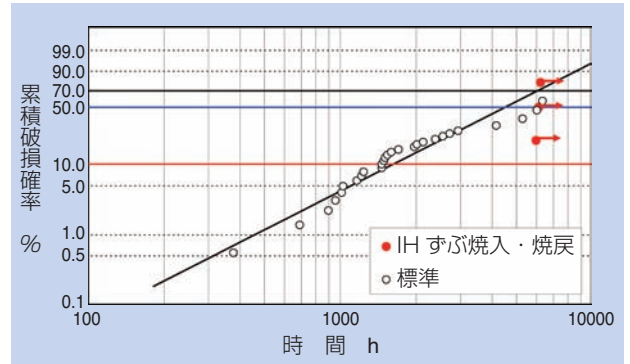


図10 清浄油潤滑下での転動疲労試験結果  
Comparison of RCF lives for 6206 ball bearing treated by induction heating and conventional heating (clean lubrication)

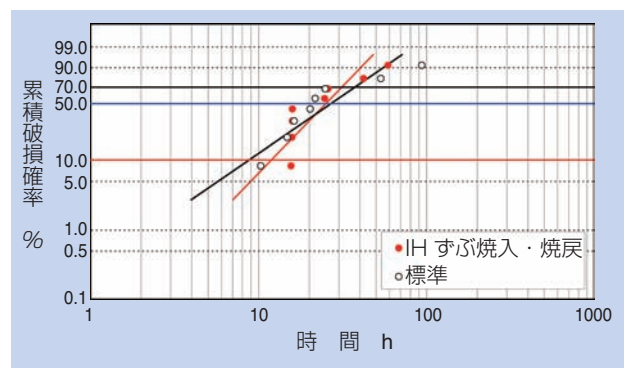


図11 異物混入潤滑下での転動疲労試験結果  
Comparison of RCF lives for 6206 ball bearing treated by induction heating and conventional heating (contaminated lubrication)

#### 3.2 静圧壊試験およびリング割れ疲労試験

表4に6812玉軸受外輪の静圧壊試験結果を示す。IHずぶ焼入・焼戻品の静圧壊強度は標準品と同等であった。

図12は外径37.8×内径29.8×幅15mmのリングを用いた割れ疲労試験結果である。なお、得られた疲労試験のデータを日本材料学会標準<sup>8)</sup>の連続降下型片対数曲線モデルにあてはめて解析した。IHずぶ焼入・焼戻品の10<sup>7</sup>回での10%疲労強度は標準品より50MPa程度低かったが、5%の危険率で標準品と有意差がなかったことから、両者は同等の強度であると考えられる。

表4 静圧壊試験結果  
Compressive strengths of SUJ2 rings treated by induction heating and conventional heating

形状	熱処理	強度(kN)	
		平均	標準偏差
6812玉軸受外輪 Φ78×Φ60×10	IHずぶ焼入・焼戻	1.50	0.13
	標準	1.48	0.02



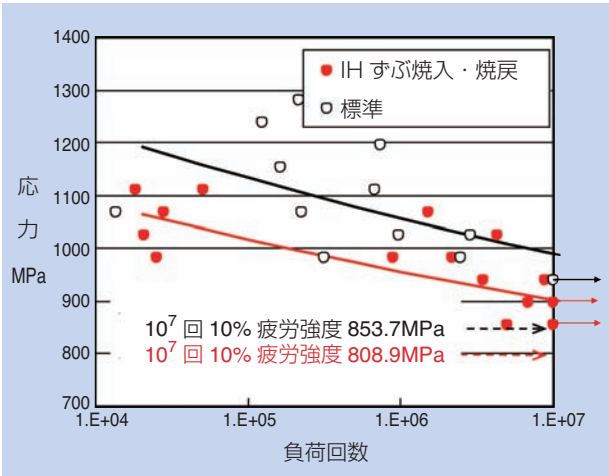


図12 リング割れ疲労試験結果（応力比R=0.1）  
SN Curves of SUJ2 rings treated by induction heating and conventional heating. The stress ratio is 0.1.

### 3.3 ピーリング試験およびスミアリング試験

希薄潤滑条件下では、転動体と軌道輪が直接接触し、ピーリングと呼ばれる微小なはく離とき裂が密集した表面損傷が生じる。また、すべりが発生する用途では、スミアリングと呼ばれる焼付きによる表面損傷が発生する。これらの表面損傷に関して図13に示す2円筒試験機を用いて評価した。

ピーリング試験条件を表5に示す。ピーリング試験は、駆動側の軸をモータ駆動し、従動側を駆動側に従動させる自由転がり条件で行う。耐ピーリング性は駆動側転走面3箇所のピーリング面積率の平均値で評価した。図14にピーリング試験結果を示す。IHずぶ焼入・焼戻品のピーリング面積率は標準品と同等であった。

スミアリング試験条件を表6に示す。スミアリング試験では、接触部に滑りを与えるため、駆動側および従動側は別々のモータで駆動する。両方の軸に固定した試験片に所定の荷重を負荷した状態で、両試験片を200min<sup>-1</sup>で3分間なじみ運転し、従動側の回転速度

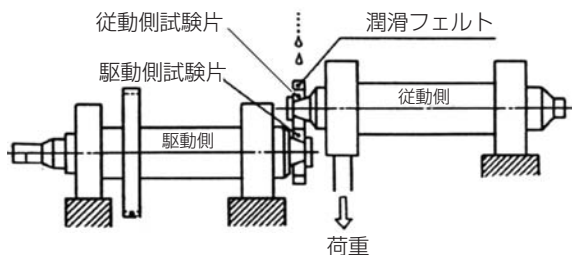


図13 2円筒試験機  
Ring to ring type test rig

を200min<sup>-1</sup>に保ち、駆動側の回転速度を200min<sup>-1</sup>から30秒ごとに100min<sup>-1</sup>増速する。スミアリングの発生は振動で感知し、耐スミアリング性はスミアリングの発生時間で評価した。図15にスミアリング試験結果を示す。IHずぶ焼入・焼戻品の耐スミアリング性は標準品と同等であった。

表5 ピーリング試験条件  
Condition of peering test

試験機	2円筒試験機
駆動側試験片	φ40×t12, 軸方向曲率R60
従動側試験片	φ40×t12, 軸方向ストレート
回転速度	2000 min <sup>-1</sup>
ラジアル荷重	1245N
最大接触面圧	2.3GPa
接触楕円	1.48×0.71 mm
負荷回数	4.8×10 <sup>5</sup>
雰囲気温度	常温
潤滑油	無添加タービン油VG46
給油方法	フェルト給油

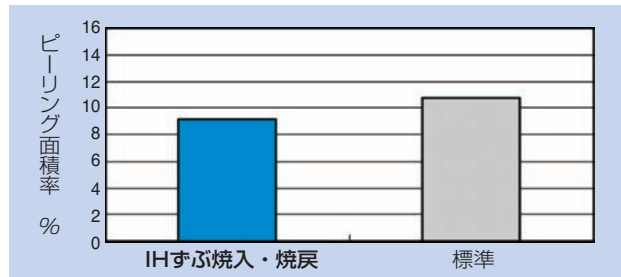


図14 ピーリング試験結果  
Results of peeling test for SUJ2 rings treated by induction heating and conventional heating

表6 スミアリング試験条件  
Condition of smearing test

試験機	2円筒試験機	
駆動側／従動側試験片	φ40×t12, 軸方向曲率R60	
ラジアル荷重	980N	
最大接触面圧	2.1GPa	
接触楕円	1.37×0.66 mm	
潤滑油	無添加タービン油VG46	
給油方法	フェルト給油	
回転速度	駆動側	200 min <sup>-1</sup> から100 min <sup>-1</sup> ずつ増速
	従動側	200 min <sup>-1</sup> 一定

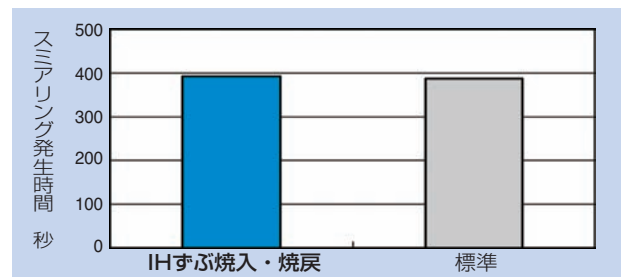


図15 スミアリング試験結果  
Results of smearing test for SUJ2 rings treated by induction heating and conventional heating

### 3.4 寸法安定性

転がり軸受の軌道輪には、高い寸法安定性が求められる。図16に230℃×2hの保持による経年寸法変化を示す。IHずぶ焼入・焼戻品の寸法変化率は標準品よりも小さく、良好であった。

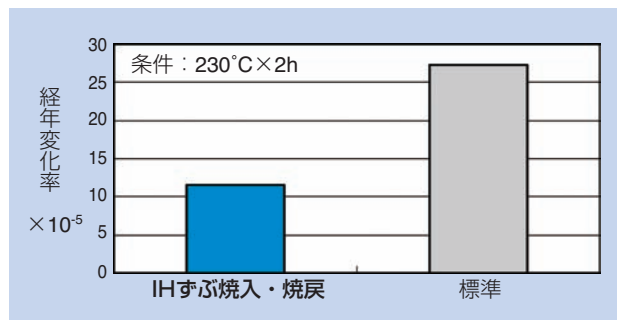


図16 経年寸法変化  
Dimensional change of SUJ2 rings treated by induction heating and conventional heating

## 4. 考察

### 4.1 生産におけるIHのメリットについて

表7に示すように、IHは雰囲気加熱にはない多くのメリットを有するが、特筆すべきは設備の停止と立上げ時間がほぼゼロである点、可燃性還元ガスを必要としない点である。これらは、従来の転がり軸受の熱処理工場では考えられなかった、24時間操業の廃止、可燃性還元ガスの使用廃止への可能性を示す。

表7のメリットは、生産量、設備コスト、設備スペースが雰囲気炉と同等であることを前提とする。IHは表面焼入のような短時間加熱で高い生産性を示し、雰囲気加熱と同等以上のメリットが生まれる。しかし、ずぶ焼入する場合、比較的長時間の加熱が必要なため、同量を生産するための設備台数は増加する。したがって、小型製品へ適用する場合には、サイクルタイム短縮、設備コスト低減、設備のコンパクト化が大きな課題になる。

製品が大きくなるにつれて、IHと雰囲気加熱の生産性の差は縮まるが、設備の大型化でいくつかのメリットが損なわれること、大気中での均熱時間増加による脱炭やスケールの発生、均熱が難しくなるなど、別の問題が発生することに留意すべきである。

表7 生産におけるIHのメリット  
Merits of induction heating on manufacturing

機能	<ul style="list-style-type: none"> <li>・他の設備のインライン化</li> <li>・製品1個1個の熱履歴トレース</li> <li>・小ロット品の効率的処理</li> <li>・停止と立上げ時間が短い</li> <li>・レイアウトの自由度が高い</li> </ul>
安全・環境	<ul style="list-style-type: none"> <li>・すすの発生が少ない</li> <li>・可燃性ガス関連設備が不要</li> </ul>

### 4.2 IHの環境負荷低減に対する効果

表8にIHの環境負荷低減に対する効果を省エネルギーとCO<sub>2</sub>削減の観点で見積もった結果を示す。製品1kgあたりの使用電力は電気炉と比べて74%に削減できる(当社比)。また、CO<sub>2</sub>排出量も都市ガスを使った加熱炉と比べて56%に削減できる。なお、本計算では、単位使用電力あたりのCO<sub>2</sub>排出量を2010年度中部地区での電力-CO<sub>2</sub>排出量換算0.341kg/kwhとした。

表8 IHの環境負荷低減に対する効果  
Reduction effect of using induction heating on negative environmental impact

加熱方法	IH	電気	都市ガス
雰囲気	窒素ガス	窒素ガス	RXガス
加熱用電力 kWh/kg	0.934	1.261	0
都市ガス Nm <sup>3</sup> /kg	0	0	0.185
RX ガス Nm <sup>3</sup> /kg	0	0	0.464
CO <sub>2</sub> 排出量 g/kg	318	430	566

## 5. おわりに

本報では、軸受軌道輪全体の品質を管理基準内に制御しながら、最短処理時間でIHずぶ焼入・焼戻を達成できる方法について述べた。本技術はIHの経験が浅い技術者でも処理条件を最適設計できるNTN独自のシステムで、転がり軸受の熱処理のIH化を加速し、生産現場での環境改善と省エネルギー化につながるものと考えられる。

参考文献

- 1) 山崎隆雄：高周波熱処理，熱処理，50，6 (2010) 580-588.
- 2) 川崎一博・三阪佳孝・生田文昭：高周波熱処理の高性能化，W-Ecoのさらなる進化を目指してすべり軸受の潤滑特性，熱処理，50，4 (2010) 368-376.
- 3) 仕幸三郎・岡本一生・渡辺 章三：軸受鋼の寿命に及ぼす熱処理組織の影響，鉄と鋼，54，13 (1968) 1355-1366.
- 4) 藤田工・鈴木伸幸：温度制御による軸受レースの高周波全体加熱焼入方法，第61回日本熱処理技術協会講演大会予稿集 (2005) 41-42.
- 5) 藤田工・鈴木伸幸：温度制御によるSUJ2製軸受レースの高周波全体加熱焼戻方法，第62回日本熱処理技術協会講演大会予稿集 (2006) 25-26.
- 6) 藤田工：速度と信頼性を両立する転動寿命試験の設計方法と試験結果の解釈の方法，NTN TECHNICAL REVIEW，76 (2008) 31-38.
- 7) T. Fujita: Rolling contact fatigue life test design and result interpretation methods maintaining compatibility of efficiency and reliability, J. ASTM international, 7, 6 (2010) Paper ID JAI102492.
- 8) 日本材料学会疲労部門委員会，日本材料学会信頼性工学部門委員会，金属材料疲労信頼性評価標準 JSMS-SD-6-02 -SN曲線回帰法-，日本材料学会，(2002).

執筆者近影 (所属は開発当時のもの)



藤田 工  
先端技術研究所



鈴木 伸幸  
先端技術研究所



## 超高温環境用転がり軸受 Rolling Bearing for Environments of Ultrahigh Temperatures



有鼻 美葵\* Miki ARIHANA  
川村 隆之\*\* Takayuki KAWAMURA

近年、フィルム延伸機や太陽電池パネル製造装置用途など400℃近くの超高温環境下で使用する転がり軸受の需要が増加傾向にある。通常、大気の超高温環境には滑り軸受を使用しているが、NTNでは低トルク化を実現し、より効率的な運転を可能にするULTAGE※(アルテージ)大気・超高温環境用深溝玉軸受を開発した。

また、真空中で超高温環境には300℃まで使用可能なウルトラクリーンWB軸受を採用しているが、現在ではさらに400℃まで長期耐久性に優れた軸受の開発に取り組んでいる。本稿では、大気および真空における超高温環境用転がり軸受の構造、性能および現在の取組みについて紹介する。

In recent years, the demand of bearings which are used at about 400 degree C for tenter clips, glassmaking facility for solar panels and so on, is increasing. Usually, plain bearings are used for such ultra-high temperature application in atmosphere.

NTN developed “ULTAGE Deep Groove Ball Bearings for Ultrahigh Temperature Environment” instead of plane bearings, which gets an advantage of low torque and efficient operation because of rolling bearing. On the other hand in vacuum environment, NTN adopts “Ultra-clean WB Bearing” by using under 300 degree C, and now NTN is developing new products to achieve 400 degree C for higher performance.

This report introduces the design, feature and performance of “ULTAGE Deep Groove Ball Bearings for Ultrahigh Temperature Environment” in atmosphere environment, “Ultra-clean WB Bearing” in vacuum environment and current further study of it.

### 1. はじめに

フィルム延伸機やガラス製造装置などに使用される軸受は、近年耐熱要求が高まっており、現在では400℃付近での使用が増加傾向にある。

従来、150～250℃で使用される軸受は、鉄板製シールド板やフッ素ゴム製シールの採用や耐熱性フッ素グリースの封入など耐熱性を考慮している。一方、400℃付近の高温環境下では主に滑り軸受が使用されているが、さらなる低トルク化を目的に転がり化の要求が増大している。

また、太陽電池のグローバルな市場拡大により、太陽電池パネル製造装置に用いられる真空超高温用軸受の需要が増えている。本用途の使用温度は400℃にまで上がる可能性があり、将来を見据え真空かつ

400℃で耐久性に優れた軸受仕様の確立に取り組んだ。

本稿では、既にシリーズ化している大気環境用のULTAGE(アルテージ)超高温環境用深溝玉軸受UTG(Ultrahigh Temperature Graphite)タイプ、真空環境用の超高温環境用ウルトラクリーンWB軸受の製品紹介と改良開発の状況を紹介する。

※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である。

\*産業機械事業本部 産業機械技術部  
\*\*先端技術研究所

## 2. ULTAGE大気・超高温環境用深溝玉軸受

### 2.1 特長

#### ① 大気・超高温環境下での長寿命化を実現

特殊組成配合の固体潤滑剤の採用と適量の固体潤滑剤を供給する内部構造により、高温用フッ素グリース仕様の約2倍の耐久性を実現。

#### ② 低トルクの実現

セラミックボールの採用と固体潤滑剤の安定供給により、フッ素グリースに対して約1/4の起動トルク、約1/2の動トルクを実現。

#### ③ 密封構造による取扱い性向上

軸受内部に設けたサイドリングおよび非接触シールド板の装着により、軸受内部からの固体潤滑剤の流出を減少。  
(クリーン環境では使用できない)

### 2.2 構造

ULTAGE大気・超高温環境用深溝玉軸受の構造を図1に示す。本軸受は、特殊組成配合のグラファイト固体潤滑剤を採用し、さらに潤滑剤量を最適化することで長寿命化を実現した。また、固体潤滑剤に「コ」の字状の金属カバーを装着することで、固体潤滑剤の摩耗が進行してもボールの片寄りを防止し、内外輪が分離しない構造となっている。さらに、固体潤滑剤形状の最適化とシールド板と固体潤滑剤のサイドリングで固体潤滑剤の回転を案内することにより、ボールと固体潤滑剤が理想的な接触状態となり円滑な回転が可能となる。

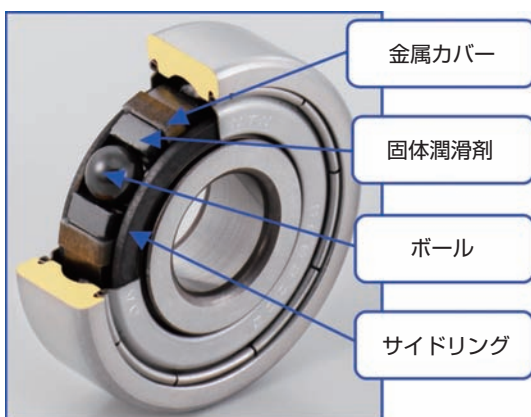


図1 ULTAGE大気・超高温環境用深溝玉軸受  
ULTAGE Deep groove ball bearings for the atmosphere and ultrahigh temperature environment

但し、グラファイト固体潤滑剤を採用しているため、軸受の落下や軸受に衝撃を与えることは避けるべきである。

### 2.3 固体潤滑メカニズム

表1に示す条件で固体潤滑剤の種類および配合量の基礎試験を実施し、最も長寿命の固体潤滑剤を採用した。本試験の寿命判定は軸受トルクの合計が147mN・mに達した時点としている。本試験結果を図2に示す。今回採用した潤滑剤は、WS<sub>2</sub> (二硫化タングステン) に比べ4倍以上の寿命が確認できた。

また、図3に固体潤滑剤の供給メカニズムを示す。軸受が回転することで、固体潤滑剤からボールへ、さらにボールから内外輪の軌道面へ転移した転移膜により潤滑を維持する<sup>1)</sup>。

表1 潤滑剤評価条件  
Evaluation test condition of lubricant

試験軸受	608 (φ8×φ22×7)
負荷荷重	196N
回転速度	1000min <sup>-1</sup>
温度	400°C

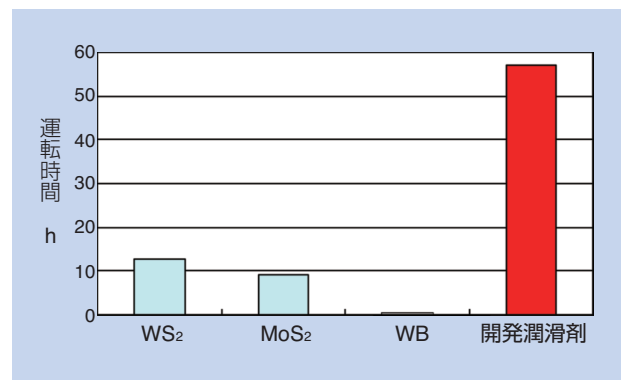


図2 固体潤滑剤評価結果  
Evaluation results of solid lubricants

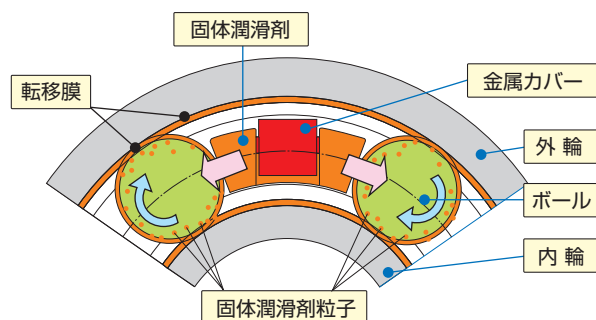


図3 固体潤滑剤の供給メカニズム  
The supply mechanism of solid lubricant

## 2.4 各種性能評価

### 2.4.1 高温耐久試験

表2および図4に示すようにULTAGE大気・超高温環境用深溝玉軸受の高温耐久性を評価した。その結果、図5に示すように、従来の高温用フッ素グリース仕様の使用限界相当の350℃と比較し、約2倍の寿命であることを確認した。

また、フッ素グリース仕様では適用できない雰囲気温度400℃においても、フッ素グリース仕様の350℃雰囲気相当の耐久性能があることを確認した。

表2 高温耐久試験条件  
Test condition of high temperature durability

試験軸受	6200 (φ10×φ30×9)
負荷荷重	49N
回転速度	530min <sup>-1</sup>
回転区分	外輪回転
温度	350, 400℃

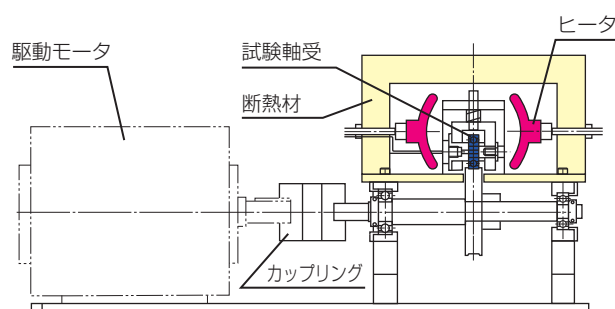


図4 高温軸受耐久試験機  
High temperature endurance testing machine

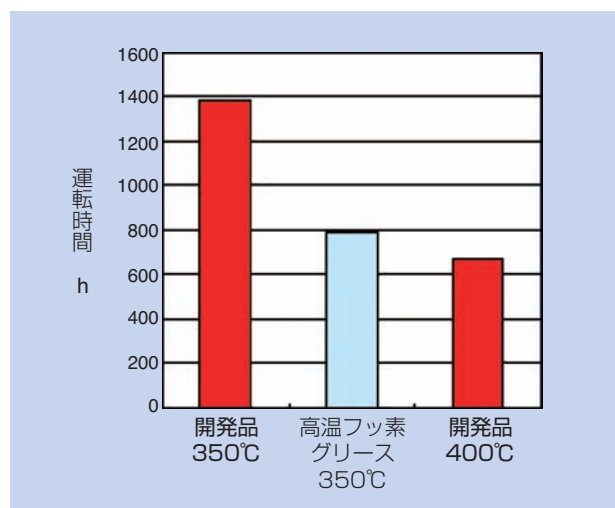


図5 高温耐久試験結果  
Test results of high temperature durability

### 2.4.2 回転トルク試験

表3に示す評価条件でULTAGE大気・超高温環境用深溝玉軸受の回転トルクを測定した。その結果、図6のトルクチャートに示すように従来の高温フッ素グリース仕様に比べ起動トルクは約1/4、動トルクは約1/2であることを確認した。

表3 回転トルク試験条件  
Measurement conditions of rotating torque

試験軸受	6200 (φ10×φ30×9)
負荷荷重	98N
回転速度	530min <sup>-1</sup>
回転区分	内輪回転
温度	室温

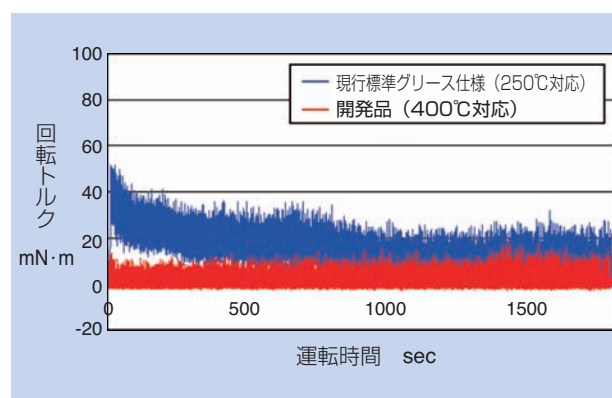


図6 回転トルク試験結果  
Results of rotating torque

## 3. 真空超高温用転がり軸受の紹介 (ウルトラクリーンWB軸受とその改良軸受)

高温真空下で使用される転がり軸受の潤滑は、油やグリースを使用できないため、固体潤滑剤を適用している。固体潤滑剤を転動部へ供給するために、スパッタリングなどにより直接軌道面に固体潤滑膜を成膜する方法がある。この方法は、軸受の回転初期から機能するため多用されているが、軌道面の被膜が摩滅すると急激に摩耗が進み、焼付きに至るので長寿命は期待できない。

NTNでは、固体潤滑剤を継続的に供給するために、鋼球1個を二硫化タングステン焼結球（以下WS<sub>2</sub>球）に置き換えた、『ウルトラクリーンWB軸受』（図7）を商品化している<sup>2)</sup>。



本項目では、ウルトラクリーンWB軸受の紹介と真空超高温（400℃）下で耐久性向上への改良開発の状況について紹介する。

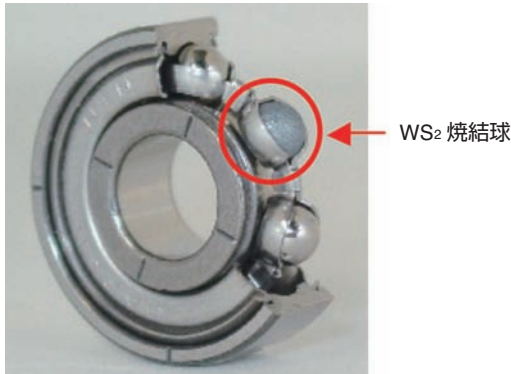


図7 ウルトラクリーンWB軸受  
Ultra-clean WB bearing

### 3.1 固体潤滑剤焼結球の高温耐久性

表4に示すように、固体潤滑剤焼結球を組み込んだ軸受について、固体潤滑剤の種類および配合量の検討を行った。その結果、図8に示すようにWS<sub>2</sub>球の高温耐久性は、MoS<sub>2</sub>球よりも優れ、WS<sub>2</sub>を95%配合したものが最も長寿命であった<sup>3)</sup>。

表4 固体潤滑剤焼結球の耐久性評価条件  
Test conditions of endurance test for solid lubricants

試験軸受	608 (φ8×φ22×7)
真空度	10 <sup>-5</sup> Pa
回転速度	1550min <sup>-1</sup>
温度	200℃
スラスト荷重	83.4N
寿命判定	急激なトルク上昇が発生した時点

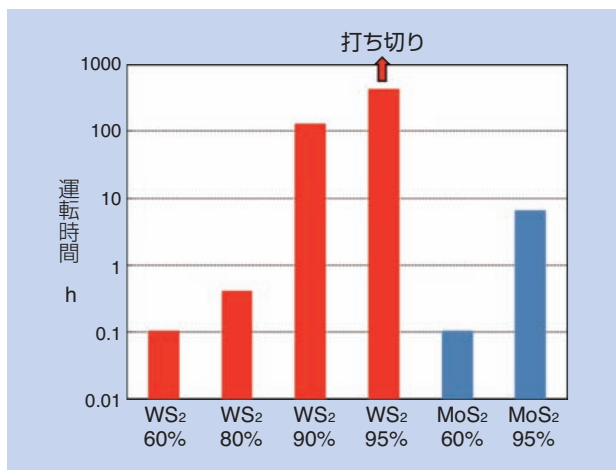


図8 固体潤滑剤焼結球の耐久性評価結果  
Test results of endurance test for solid lubricants

### 3.2 各種性能評価

WS<sub>2</sub>を最適量配合した焼結球を組み込んだウルトラクリーンWB軸受の各種性能評価結果を以下に示す。

#### 3.2.1 回転トルク

表5に示す評価条件で、真空中におけるウルトラクリーンWB軸受の回転トルクを測定した。その結果、図9に示すように従来の特殊PTFE被膜仕様より低トルクであることを確認した。

表5 回転トルクの評価条件  
Measurement conditions of rotating torque

試験軸受	608 (φ8×φ22×7)
真空度	10 <sup>-5</sup> Pa
回転速度	500min <sup>-1</sup>
温度	常温
スラスト荷重	196N

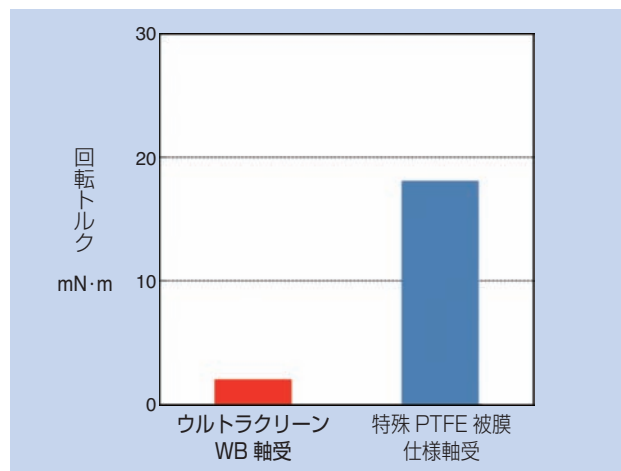


図9 回転トルク測定結果  
Results of rotating torque

#### 3.2.2 高温（300℃）耐久性

表6に示す評価条件でウルトラクリーンWB軸受の高温耐久性を評価した。その結果、図10に示すようにウルトラクリーンWB軸受の高温耐久性は、従来の特殊PTFE被膜仕様と比較して、約5倍以上の性能であった。

表6 高温耐久性評価条件  
High temperature endurance test conditions

試験軸受	608 (φ8×φ22×7)
真空度	10 <sup>-5</sup> Pa
回転速度	1550min <sup>-1</sup>
温度	300℃
スラスト荷重	9.8N
寿命判定	急激なトルク上昇が発生した時点

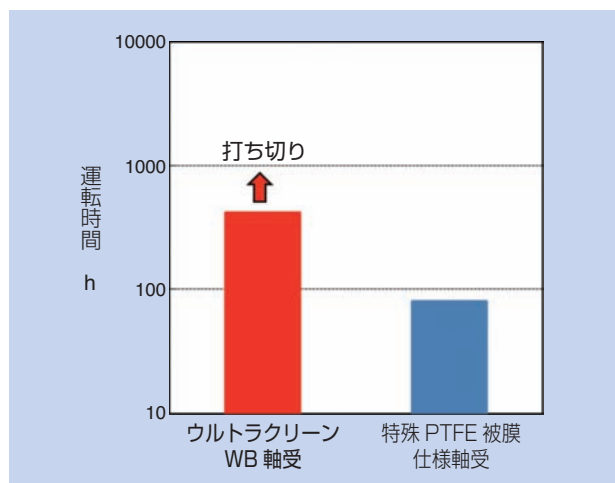


図10 高温耐久性評価結果  
Results of high temperature endurance tests

### 3.2.3 高荷重耐久性

表7に示す評価条件でウルトラクリーンWB軸受の高荷重耐久性を評価した。その結果、図11に示すようにウルトラクリーンWB軸受の高荷重耐久性は、従来の特殊PTFE被膜仕様と比較して約9倍以上の性能であった。

表7 高荷重耐久性評価条件  
Heavy load endurance test conditions

試験軸受	608 (φ8×φ22×7)
真空度	10 <sup>-5</sup> Pa
回転速度	500min <sup>-1</sup>
温度	常温
スラスト荷重	256N
寿命判定	急激なトルク上昇が発生した時点

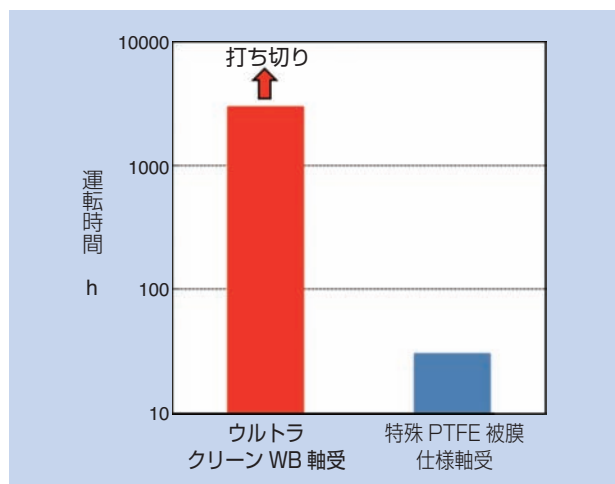


図11 高荷重耐久性評価結果  
Results of heavy load endurance tests

### 3.3 ウルトラクリーンWBの改良開発

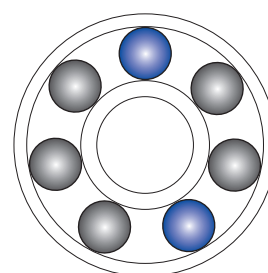
今後、太陽電池パネル製造装置に用いる真空超高温用軸受の使用温度は400℃まで上がると予測されている。NTNが開発、商品化したウルトラクリーンWB軸受(以下、従来品)の真空環境連続使用は、300℃が限界であるため、400℃に対応可能な軸受を開発している。

#### 3.3.1 軸受仕様

下記2つの仕様にて、耐久性を評価した。

仕様①：従来品のステンレス鋼球をセラミック球に変更 (WS<sub>2</sub>焼結球1個)

仕様②：仕様①のWS<sub>2</sub>焼結球を1個追加し、2個使用 (図12参照)



● セラミック球 ● WS<sub>2</sub> 焼結球

図12 開発軸受②の転動体と焼結球の配置  
Arrangement of ceramic balls and WS<sub>2</sub> balls of development bearing ②

#### 3.3.2 超高温 (400℃) 耐久性

表8に示す評価条件で開発品と従来品の超高温耐久性を評価した。その結果、図13に示すように従来品と比較して開発品の仕様①で約2倍以上、仕様②で約60倍以上となった。

表8 超高温耐久性評価条件  
Ultra-high temperature endurance test conditions

試験軸受	608 (φ8×φ22×7)
真空度	10 <sup>-5</sup> Pa
回転速度	1000min <sup>-1</sup>
温度	400℃
スラスト荷重	196N
寿命判定	急激なトルク上昇が発生した時点

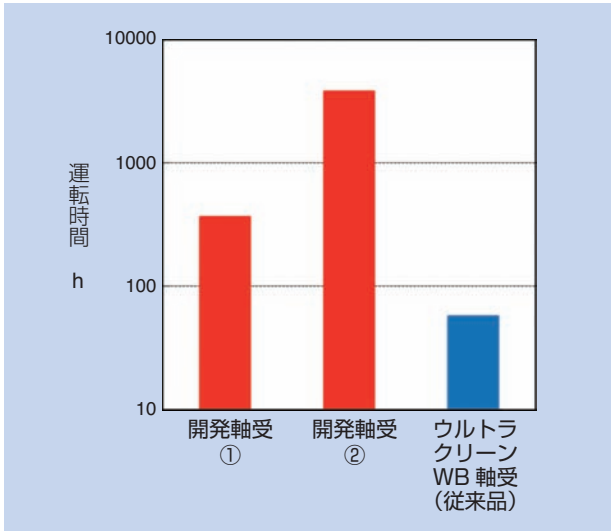


図13 超高温（400℃）耐久性  
Results of ultra-high temperature endurance test at 400°C

#### 4. まとめ

本稿では、大気で400℃超高温環境下で使用可能なULTAGE大気・超高温環境用深溝玉軸受を紹介した。今後、フィルム延伸機テンタクリップやガラス製造装置の用途をはじめ、さらなる適用用途の開拓に取り組んでいく。

また、グローバルな市場拡大が進む太陽電池用パネル製造装置に用いられる真空・超高温環境用軸受として、ウルトラクリーンWB軸受および、現在開発中の真空下400℃対応軸受を紹介した。

今後も市場ニーズに合致した新商品を開発し、各種超高温環境用装置のメンテナンス期間の延長や信頼性の向上、省エネルギー化に貢献する所存である。

#### 参考文献

- 1) 社団法人 日本トライボロジー学会 固体潤滑研究会, 新版 固体潤滑ハンドブック, 第一版, 養賢堂, P56, (2010)
- 2) 中島 良一, 本多 正明: クリーン環境用ウルトラクリーン軸受, NTN TECHNICAL REVIEW No.74 (2006) 76-81
- 3) 筒井 英之, 平田 正和: 二硫化タングステン焼結ボールを組み込んだ軸受の真空中での耐久性, 日本トライボロジー学会 トライボロジー会議2007-5予稿集 (2007) 173-174

#### 執筆者近影



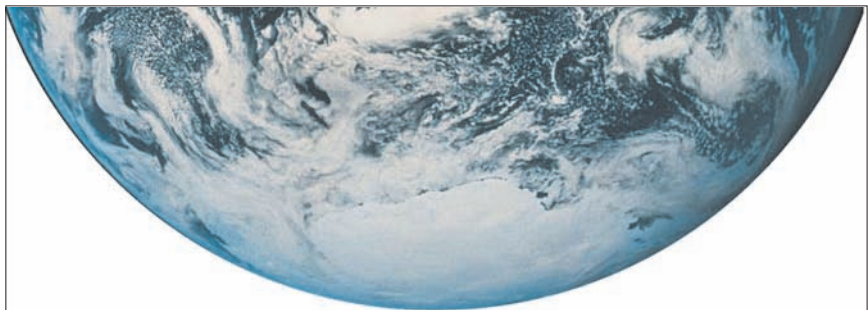
有鼻 美葵

産業機械事業本部  
産業機械技術部



川村 隆之

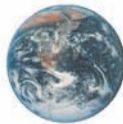
先端技術研究所



## 地球と向き合うベアリング。

家電製品・医療機器・工作機械から自動車・鉄道・航空機にいたるまで。  
ベアリングは、あらゆる機械内の回転部分において、そのエネルギー損失を低減する「エコ部品」です。  
さらにNTNではその製造過程においても、環境負荷物質の撤廃やクリーンな自然エネルギーの活用、  
グローバルレベルでのCO<sub>2</sub>削減と徹底したリサイクル化など、  
「エコ」な取り組みを積極的に導入しています。

地球環境との共生のために。私たちは未来に向けた「もの遣り」の可能性を追求しています。



「NTNブルー」は「エコロジーブルー」

**NTN**

[www.ntn.co.jp](http://www.ntn.co.jp)





## 工作機械主軸用空冷間座付き軸受 Machine Tool Main Spindle Bearings with “Air Cooling Spacer”

恩田 裕士\* Yuushi ONDA  
水谷 守\* Mamoru MIZUTANI  
森 正継\*\* Masatsugu MORI



工作機械主軸に用いられる精密転がり軸受は、高速・高剛性が常に求められている。しかし、高速と高剛性は共に軸受の発熱を増大させるため、両者を同時に達成することは難しかった。本稿では、内輪側の間座外径面にエアを供給することで、運転中の軸受温度を大幅に低減可能な、空冷間座技術を紹介する。

High speed and high rigidity performances are always required for high precision bearings for machine tool main spindles. However, since both high speed and high rigidity increase operating temperature, it has been very difficult to achieve high speed and high rigidity performance at the same time. In this paper new “air cooling spacer” technology, which will be able to decrease the operating temperature of bearings by applying cooling air onto the outside diameter of inner ring spacer located, is introduced.

### 1. はじめに

工作機械は自動車、航空機、建設機械の部品加工に使われる。それ故に工作機械は母なる機械“マザーマシン”と呼ばれ、加工効率や加工物の品質向上が常に要求される。

加工効率の向上には、主軸の回転速度を高めることが有効であるが、軸受を高速で回転すると転動体の遠心力が増大する。遠心力を低減する方策として、転動体に軽量のセラミックスを適用している<sup>1)</sup>。

また、加工物の品質向上には、軸受の回転精度向上と高剛性化が求められる。回転精度向上には、転動体数の増加や内外輪の寸法精度向上が有効である。一方、軸受の高剛性化は、転動体のサイズアップや予圧量を大きくすることが有効である。

これらの改善策は、軸受の発熱を増加させる傾向にあり、高速化や高剛性化を同時に達成することは難しい。しかし、近年マシニングセンタや複合加工機では、省スペース・工程集約を目的に、高速化と高剛性化の両立が望まれている。

高速化と高剛性化を両立する技術として、軸の中に冷却油を供給する軸芯冷却主軸および、運転中の軸受予圧を切替える装置を実用化しているが、いずれも主軸構造が複雑になることが課題であった<sup>2)</sup>。

これらの課題に対し、NTNは内輪の間座外径面にエアを供給することで、運転中の軸受温度を下げる空冷間座技術の適用に取り組んでいる。本技術は、主軸構造を複雑にすることなく、工作機械の高速化や高剛性化あるいはその両立にも貢献可能である。本稿では、この空冷間座の性能について紹介する。

### 2. 空冷間座付き軸受の構造

図1に空冷間座付き軸受の構造を示す。背面合せ(DB)配列の中央に設けた外輪間座には、環境対応型ノズルを適用し、軸受潤滑用エアオイル供給ノズルと独立した空冷ノズルを設置した。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箇所配している。空冷ノズルから噴射する常温の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

\*\*先端技術研究所

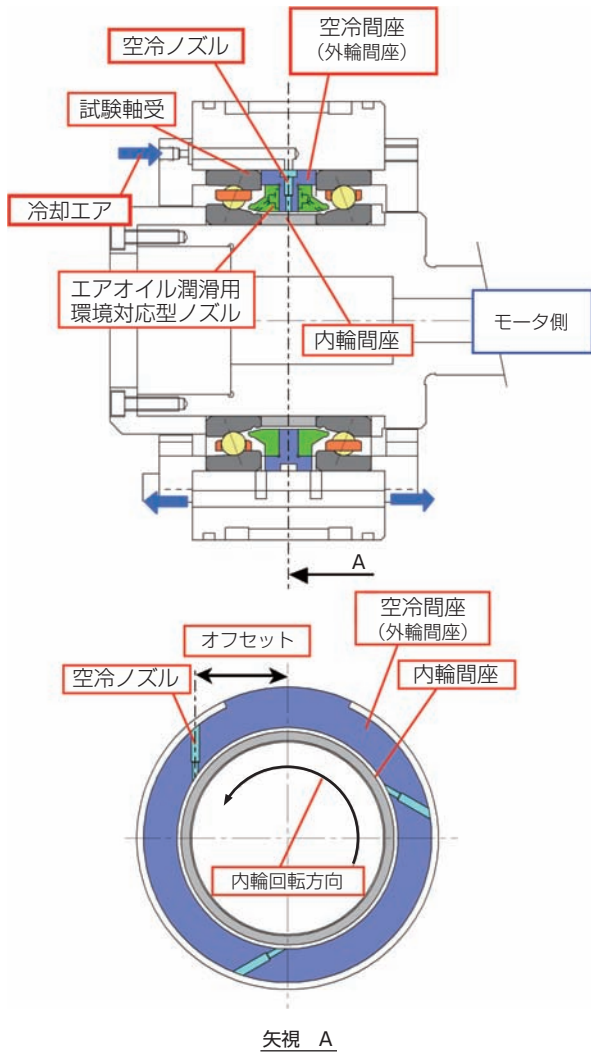


図1 空冷間座付き軸受構造  
Structure of the bearing with air cooling spacer

### 3. 空冷間座付き軸受の評価

#### 3.1 温度比較

##### 3.1.1 空冷間座の設定評価

今回の評価に用いた試験機の概略を図2に、試験条件を表1に示す。評価軸受は背面合せ（DB）配列としモータで駆動している。試験中は軸受の外輪およびモータの外筒部を、循環させている油で冷却している。

空冷間座の効果は、内外輪温度で確認した。

まず、空冷ノズルの噴射位置と冷却エア量が軸受温度に及ぼす影響について確認した。図3にノズルの噴射位置を示し、軸芯からのオフセット量（以下、オフセット量）を①～④の4通りを設定した。評価試験は17,000min<sup>-1</sup>まで冷却エア無しで増速した後、17,000min<sup>-1</sup>を保持した状態で冷却エアの圧力を順

次上げ、軸受温度との関係を調べた。この結果を図4に示す。冷却用のエア圧力が高いほど軸受温度は下がり、温度低下の傾きはオフセット量によって異なる。温度低下が最も小さい条件は、内輪間座に対して直角に噴射するオフセット量0であり、オフセット量が大きいほど温度が低下する。

また、オフセット量と温度低下の関係を確認するため、エア圧力を400kPaの一定条件で確認した。図4に示すように最適オフセット量は、25～34.5mmの間であると推定され、オフセット量33mmも併せて確認した。この結果を図5に示す。温度低下が最大となり、空冷効果が大きくなるのは、オフセット量を30mm程度とした時であり、内輪間座外径部の半径に対し、80%程度に相当する。

なお、空冷ノズルからのエア噴射方向を軸回転に対し逆方向にした場合、400kPaで冷却しても内輪の温度低下は3℃程度であり、冷却効果を高めるためには、回転方向と冷却エアの噴射方向を一致させ、エアを間座の回転表面に接するように噴射させることが重要である。

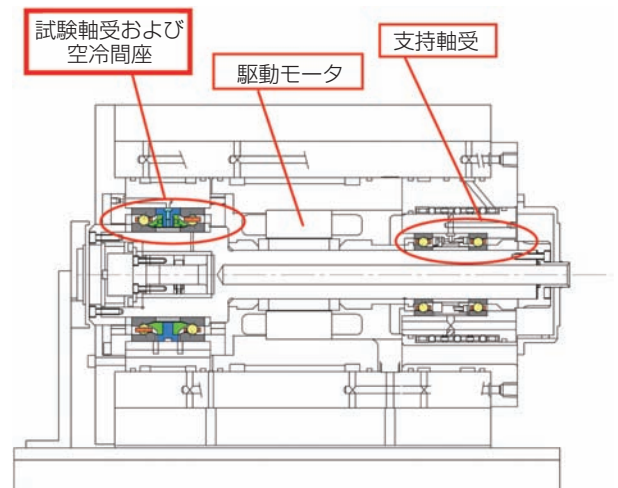


図2 試験機構造  
Structure of testing equipment

表1 試験条件  
Test conditions

試験軸受	φ70×φ110×20 5S-2LA-HSE014 相当品
予圧方式	定位置予圧(組み込み後ON)
潤滑	方式 エアオイル 給油量 0.03mL/5min 潤滑油 ISO VG32 エア流量 40NL/min
外筒冷却	有り、室温同調(21±1℃)

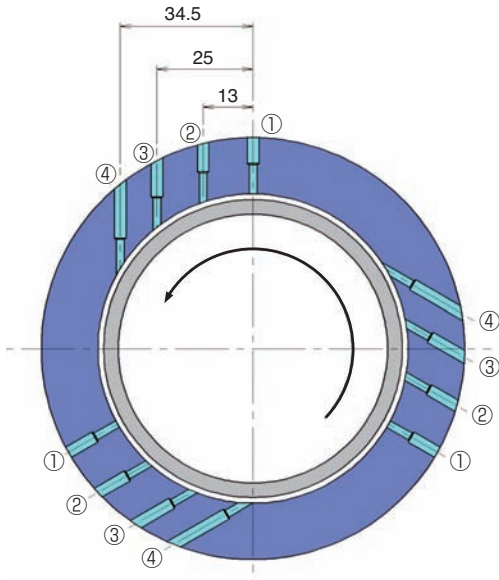


図3 軸芯からの空冷ノズルオフセット量  
Off set amount of cooling nozzles from the center

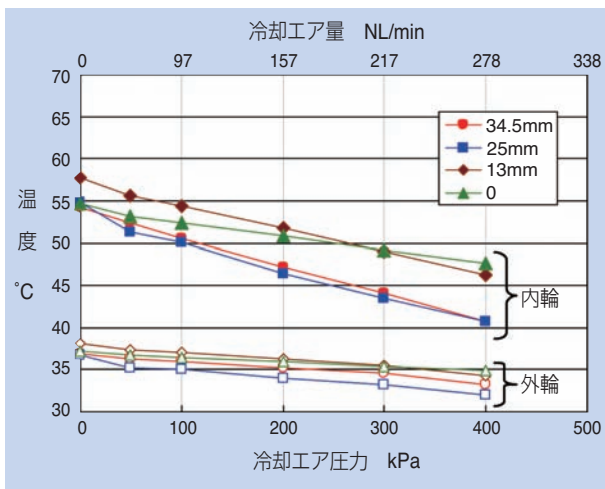


図4 各オフセット量での圧力(冷却エア量)と温度の関係  
Air pressure (amount of cooling air) vs. temperature by each offset amount

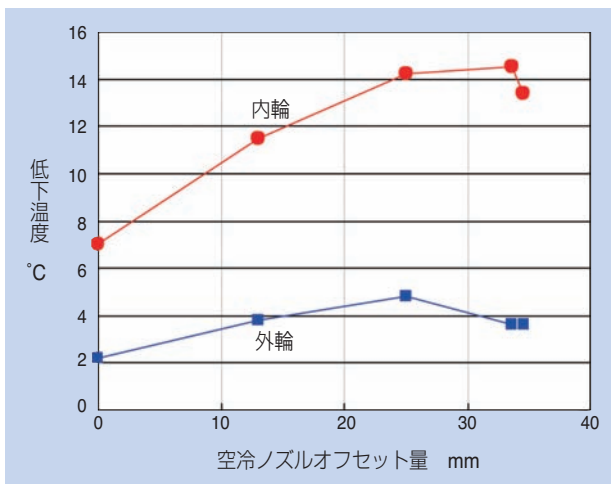


図5 空冷ノズルオフセット量と低下温度の関係  
Temperature decrease by cooling nozzle offset amount

### 3. 1. 2 エアオイル潤滑ノズルとの組み合わせ評価

次に、図6に示すエアオイル潤滑で一般的な標準ノズルにおいて、空冷効果を環境対応型ノズルの結果と比較した。この結果、図7に示すように標準ノズルにおいても環境対応型ノズルと同様に空冷効果を確認することができた。また、内輪温度が60°Cに達する回転速度は、冷却エア無しの16,000min<sup>-1</sup>に対し、冷却エアを噴射させた場合は20,500min<sup>-1</sup>であり、28%の高速化が達成できた。

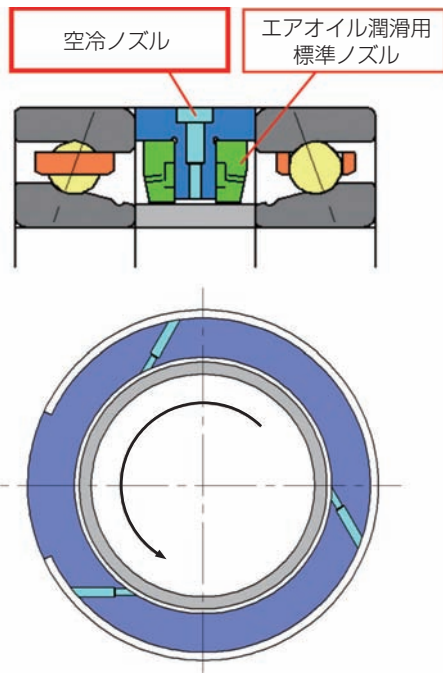


図6 標準ノズルとの組み合わせ  
Assembly with standard nozzles

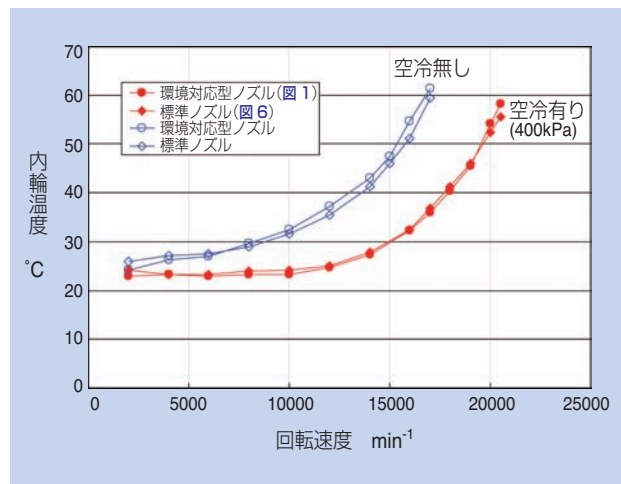


図7 内輪温度測定結果  
Test result of inner ring temperature

### 3.2 騒音比較

エアオイル潤滑の標準ノズルおよび環境対応型ノズル双方に対し、空冷ノズルからの冷却エア有無による騒音値を比較した。騒音値は、芯高さにおいて45°×1m位置に広帯域精密騒音計を固定して測定した。回転速度とA特性騒音値の測定結果を図8に示す。

空冷無しの場合、標準ノズルが82~86dBAに対し環境対応型ノズルが76~79dBAと環境対応型ノズルの方が低騒音であった。標準ノズルは高速で噴射されたエアが直接転動体と衝突するのにに対し、環境対応型ノズルは内輪に噴射するため、騒音を低減することは過去の実験で確認している<sup>3)</sup>。

一方、空冷有りの場合、標準ノズルが81~86dBAに対し、環境対応型ノズルは87~97dBAであった。大量の冷却エアを流したことで環境対応型ノズルは騒音値が大きくなったが、標準ノズルは空冷有りと無しで差が認められず、環境対応型ノズルの騒音値よりも小さくなった。

標準ノズルでの騒音値が大きくならなかった要因は、環境対応型ノズルよりもエアオイルノズル内径面と内輪間座外径のすきまが小さいこと、およびノズル先端位置の違いにより冷却エアが転動体から離れた位置で拡散されることが影響していると考えられる。

今後も、騒音低減に向けてさらに考察、評価を続ける。

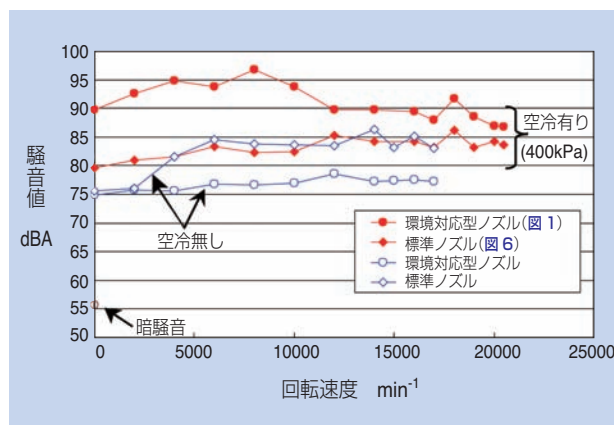


図8 各内輪間座による騒音値  
Noise level with inner ring spacers with different type

## 4. まとめ

工作機械主軸用軸受において、高速・高剛性の両立を可能とした空冷間座付き軸受を紹介した。空冷間座は、今回評価したアンギュラ玉軸受に限らず、円筒ころ軸受や、さらに改良を重ねればグリース潤滑の軸受にも適用可能であり、主軸全体の温度上昇の低減に貢献できる技術であると考えられる。

NTNは本空冷間座の評価を継続し、工作機械主軸の高速性と高剛性の両立に貢献する所存である。

### 参考文献

- 1) NTNカタログ 精密転がり軸受, CAT. No. 2260-IV/J 11.06.03
- 2) 藤井健次・森正継: 予圧切換ユニット, NTN TECHNICAL REVIEW No.60 (1992)
- 3) 藤井健次・森正継・大田好美: 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.

### 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



水谷 守  
産業機械事業本部  
工作機・航空宇宙技術部



森 正継  
先端技術研究所



## パラレルリンク型高速角度制御装置 Parallel Link High Speed Angle Control Equipment (PHACE)

磯部 浩\* Hiroshi ISOBE  
西尾 幸宏\* Yukihiro NISHIO



高速で広い作動範囲（最大折れ角：90 deg）を持つ2自由度の角度制御装置であるパラレルリンク型高速角度制御装置を開発した。独特のパラレルリンク機構を採用し、小型で広い可動角度範囲を実現したほか、駆動機構や制御方法の工夫により、位置決め精度を当社従来品と比較して10倍向上させ、高速な位置決め制御を実現した。また、生産ラインへの導入を想定し、操作性の高い専用ティーチングコンソールを開発した。

NTN has developed a Parallel link High speed Angle Control Equipment (PHACE) that can control the angle with two-degree-of-freedom fast and widely (bend angle : max 90 deg.). Adapting the unique parallel link mechanism, this equipment can be compact and move widely. In addition, devising the drive mechanism and the control method, we improved the positioning accuracy ten times more than our conventional equipment and realized faster positioning control. Furthermore, we has developed the teaching console that can operate on the production line easily.

### 1. まえがき

NTNは、高作動角を実現できる等速ジョイントのリンク機構を改良し、アクチュエータで先端部の2自由度の角度を制御する角度制御装置を開発してきた<sup>1)</sup>。今回開発したパラレルリンク型高速角度制御装置（以下、高速角度制御装置）は、2軸駆動から3軸駆動へ変更したことで、駆動機構のバックラッシュを打ち消し、位置決め精度を±0.05mm以下まで向上させた。また、生産ラインへの導入を想定し、操作性の高いティーチングコンソールを開発した。

本稿では、開発した高速角度制御装置の特長および繰り返し位置決め精度の測定方法、さらにグリース塗布装置への適用例について紹介する。

### 2. パラレルリンク機構について

一般に、パラレルリンク機構はベースとエンドエフェクタが複数のリンクで並列に連結された機構であり、代表的な機構として、Stewart-Gough型、回転型、直動固定型などが挙げられる<sup>2)</sup>。一方、高速角度制御装置に採用したパラレルリンク機構は、これらの代表的なものとは異なり、以下のような独特の構造を持つ。

本パラレルリンク機構は、図1に示すように、基端側リンクハブと先端側リンクハブとの間に、基端側アーム部材、中央リンク部材、先端側アーム部材から構成される3列のリンク系（第1リンク系、第2リンク系、第3リンク系）を並列に配置している。リンク系の各部材の連結部を回転対偶とし、各回転対偶部に深溝玉軸受やアンギュラ玉軸受などの転がり軸受を用い回転抵抗を低減した。さらに、軸受に予圧を付与し連結部のガタをなくした。また、図2に示すように、基端側および先端側のそれぞれにおいて、中央リンク部材とアーム部材との回転軸、および、リンクハブとアーム部材との回転軸を1点で交わるように配置したことで、図3に示すような2つの球面リンク機構（1点を中心にした球面上を各リンクが運動する機構）を組み合わせた構成を可能とした。その結果、基端側リンクハブと先端側リンクハブとの中心点間距離を常に一定に保ち、2つの球面リンクが交差する2等分面に対して、基端側と先端側が常に対称に動作するため、高速で広い作動範囲を実現できる。また、中央部の広い空間にケーブルやチューブなどを通すことが可能で、かつ、一定方向に旋回動作を繰り返してもケーブルなどが振れない。

\*商品開発研究所

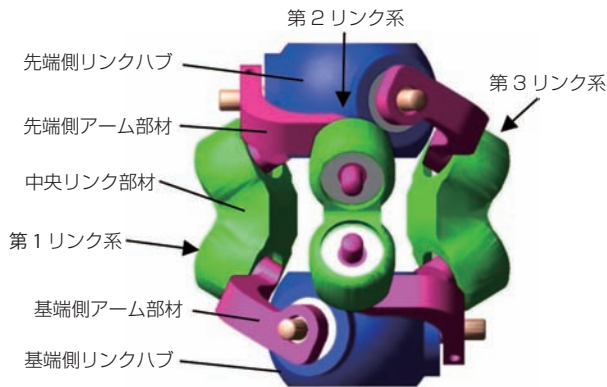


図1 パラレルリンク機構  
Unique parallel link mechanism

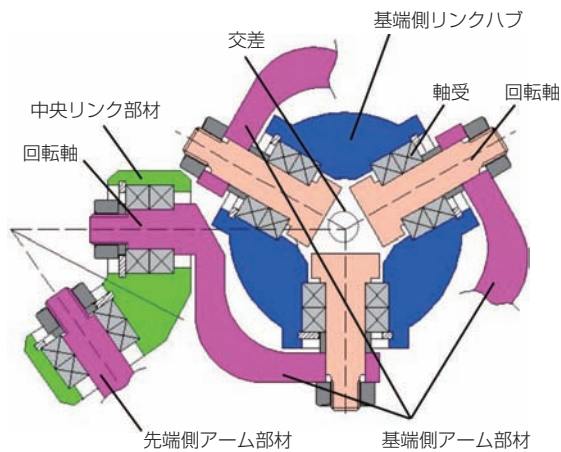


図2 各部品の間接部  
Connecting Section between each part

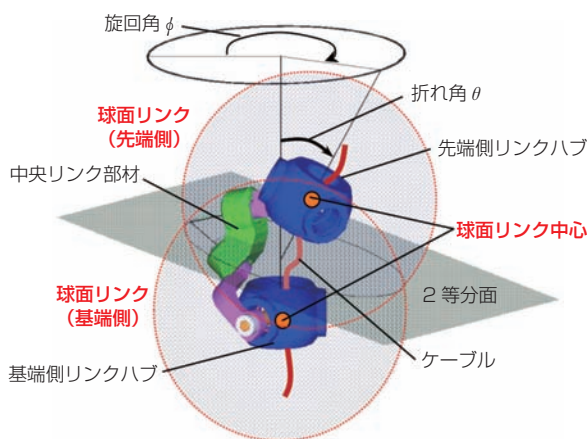


図3 球面リンク機構  
Spherical link mechanism

### 3. 開発品の構造と特長

開発した高速角度制御装置(以下、本開発品)を図4に示す。本開発品は、固定された駆動機構、および、可動するパラレルリンク型高速角度変位機構(以下、高速角度変位機構)から構成され、高速角度変位機構の先端側リンクハブを下側にして設置する。また、図5に示す専用ティーチングコンソールを用いてティーチング作業を行う。

本開発品はグリース塗布用として設計しているため、折れ角  $\theta$  (図3参照)を45 deg以下に制限しているが、最大90 degまでの実績がある。表1に本開発品の主な仕様を示す。

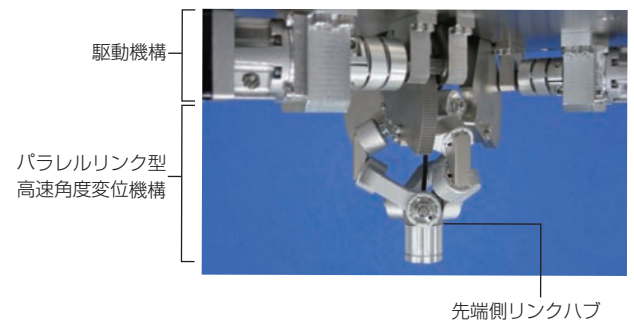


図4 パラレルリンク型高速角度制御装置  
PHACE



図5 専用ティーチングコンソール  
The dedicated teaching console

表1 パラレルリンク型高速角度制御装置の主な仕様  
PHACE specification

項目	仕様
質量	10kg
可載重量(慣性モーメント)	最大1.0kg (6300kg・mm <sup>2</sup> )
作動範囲	折れ角 $\theta$ : $\pm 45$ deg 旋回角 $\phi$ : 360deg (無限)
繰り返し位置決め精度	$\pm 0.05$ mm 以下
モータ出力	50W×3

### 3.1 パラレルリンク型高速角度変位機構

図6に高速角度変位機構を、表2にその主な仕様を示す。各回転対偶部にはアンギュラ玉軸受を設置し、予圧を付与することで連結部のガタをなくしている。

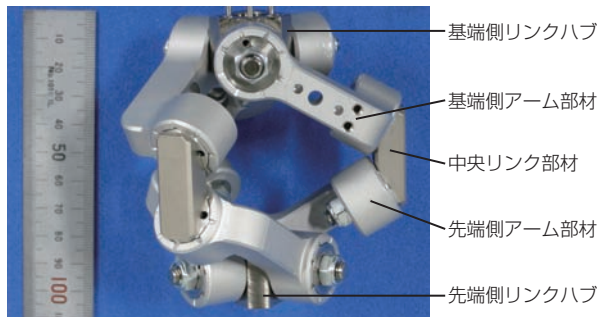


図6 パラレルリンク型高速角度変位機構  
Parallel link angle displacement mechanism

表2 パラレルリンク型高速角度変位機構の仕様  
Specification for the parallel link angle displacement mechanism

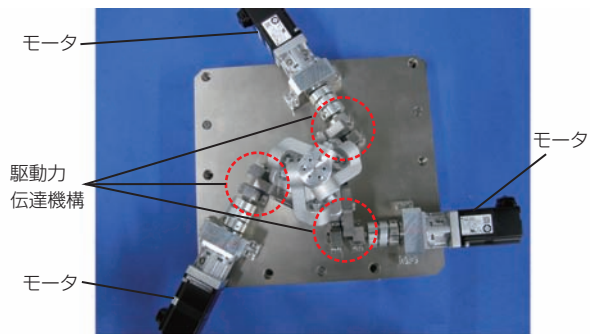
項目	仕様
サイズ (外径×高さ)	100×90mm
質量	560g
材料	アルミ材+鋼材

### 3.2 駆動機構

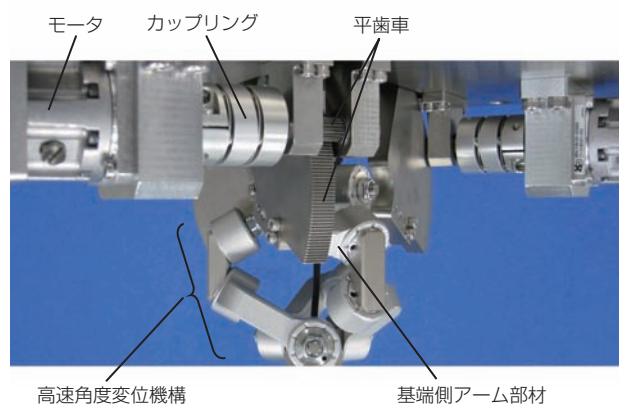
駆動機構を図7に示す。図7(a)に示すように、3つのリンク系すべてにモータを配置し、駆動機構部の大きさはモータを含め□450mm程度である。また、モータ横向き配置の扁平構造とし、高さ方向のコンパクト化を実現した。駆動力伝達機構は、図7(b)に示すように、基端側アーム部材に平歯車を固定し、平歯車を介してモータの駆動力を基端側アーム部材に伝達する。

### 3.3 制御方法

高速角度制御装置は、基端側アーム部材のアーム回転角  $\beta_{1\sim3}$  と先端側リンクハブの姿勢（折れ角  $\theta$ 、旋回角  $\phi$ ）との関係式を用いて姿勢制御を行う。図8に示すように、この関係式の逆変換により、指令値である先端側リンクハブの姿勢（折れ角  $\theta$  と旋回角  $\phi$ ）からアーム回転角  $\beta_{1\sim3}$  を求め、3つのモータで各アーム回転角  $\beta_{1\sim3}$  を制御する。その結果、小型モータでも位置決め動作を高速化できる。さらに、駆動機構のバックラッシュを打ち消すように、3つの基端側アーム部材を軽微に相互干渉させる制御手法を用いることで、位置決め精度を向上させた。



(a) 駆動機構の扁平構造  
Flat structure of the drive mechanism



(b) 駆動力伝達機構  
Driving force transmission mechanism

図7 駆動機構  
Drive mechanism

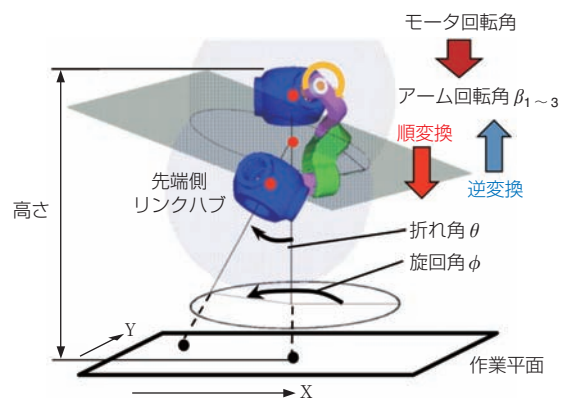


図8 制御方法  
Control method

### 3.4 専用ティーチングコンソール

生産ラインへの導入を想定した専用ティーチングコンソールを紹介する。主な仕様を表3に示す。本コンソールは、先端側リンクハブの姿勢を、折れ角  $\theta$  と旋回角  $\phi$  の極座標で指示することに加え、図8に示す実際の作業平面のXY座標上での位置入力によるティーチングも可能としている。さらに、図9に示すコンソール



ール上の操作ボタンにより、動作方向を微調整し、その位置を記憶させるティーチング機能も備え、作業現場での段取り替え作業の効率向上や誤操作防止にも役立っている。その他、モータゲインおよび登録パターンごとの条件設定、後述するXYステージ（5.用途例参照）のティーチングも可能である。

表3 専用ティーチングコンソールの仕様  
Console specification

項目	仕様
サイズ (W×L×H)	224×174×87.1mm
質量	1kg以下

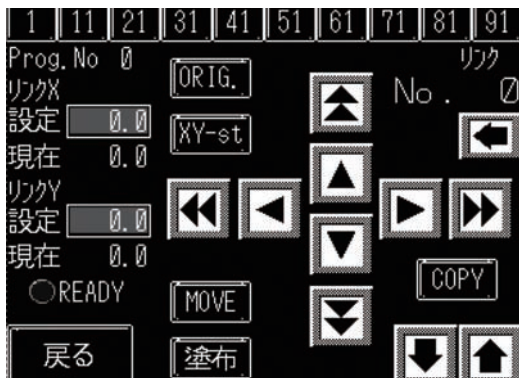


図9 ティーチングコンソールの操作画面  
Operation screen of the teaching console

#### 4. 傾斜角センサによる繰り返し位置決め精度の測定

図10に示すように高速角度制御装置の先端に2軸の傾斜角センサを搭載し、高速角度制御装置の先端位置の繰り返し位置決め精度を測定した。測定方法や測定条件は、「産業用マニピュレーティングロボット—性能項目及び試験方法」(JIS B 8432)を参考にした<sup>3)</sup>。

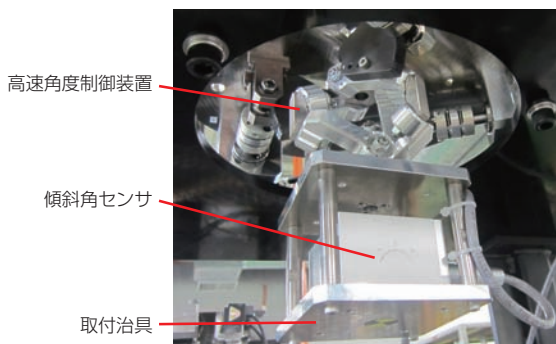


図10 位置決め精度測定装置  
Device for the measurement of the positioning accuracy

#### 4.1 測定方法

図11に示すように、任意の指令ポーズに対して16方向からの位置決めを各10サイクル行い、先端側リンクハブの先端部の繰り返し位置決め精度を計算した。

図12に示すように、先端側リンクハブの回転中心から距離D離れ（先端側リンクハブの先端位置に相当）、先端側リンクハブの中心軸（A矢視方向）と直交する仮想平面に対して、先端側リンクハブの中心軸が交差する位置を実現ポーズ  $(P_x, P_y)$  とし、図13に示すように、各実現ポーズ  $(P_x, P_y)$  と実現ポーズの平均値との最大距離の2倍（「±最大距離」と表記）を繰り返し位置決め精度と定義した。なお、実現ポーズ  $(P_x, P_y)$  は、式(1)により計算する。

$$(P_x, P_y) = (D \times \tan(\alpha_y - \bar{\alpha}_y), D \times \tan(\alpha_x - \bar{\alpha}_x)) \dots (1)$$

$\alpha_x, \alpha_y$  : X軸, Y軸周りの傾斜角

$\bar{\alpha}_x, \bar{\alpha}_y$  : 各指令ポーズの  $\alpha_x, \alpha_y$  の平均値

本傾斜角センサの出力信号は微小振動で変動するため、ローパスフィルタを通した出力信号をアナログ計測器に差動入力し、移動平均した値を計測した（測定値の揺らぎ：±0.01mm以下）。

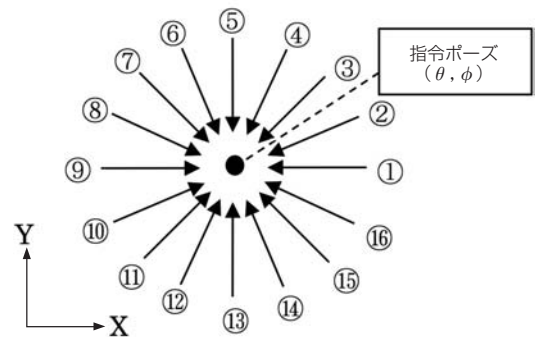


図11 位置決め方向  
Positioning direction

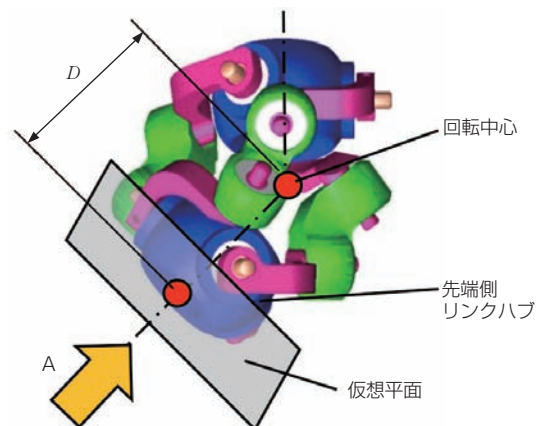


図12 測定方法  
Measuring method



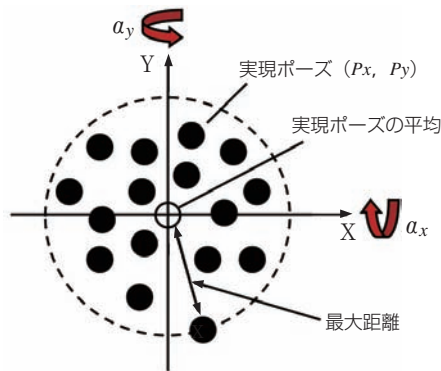


図13 繰り返し位置決め精度  
Repeat positioning accuracy

#### 4.2 測定条件

測定条件を表4に示す。搭載荷重および指令回転速度は、本装置の最大値で行った。

表4 測定条件  
Measurement condition

項目	条件	備考
搭載重量	1 kg	センサ+取付治具
指令回転速度	8min <sup>-1</sup>	基端側アーム部材の合成回転速度に相当
位置決め方向	16 (9)	( )内は $\theta = 45\text{deg}$ の値
測定ポイント	9	表5の指令ポーズ参照
測定回数	160 (90)	( )内は $\theta = 45\text{deg}$ の値

#### 4.3 測定結果

繰り返し位置決め精度の測定結果を表5に示す。繰り返し位置決め精度は最大±0.025mmである。

表5 測定結果  
Measurement result

指令ポーズ		繰り返し位置決め精度 [mm]
$\theta$ [deg]	$\phi$ [deg]	
0	0	±0.012
25	0	±0.017
25	90	±0.023
25	180	±0.019
25	270	±0.018
45	45	±0.014
45	135	±0.018
45	225	±0.025
45	315	±0.021

#### 4.4 考察

傾斜角センサによる本装置の繰り返し位置決め精度測定の妥当性について考察する。別途測定した1方向繰り返し精度<sup>3)</sup>は表5に示す多方向の繰り返し位置決め精度と比較して約2倍の精度である。従って、本装置の繰り返し位置決め精度は多方向の繰り返し位置決め精度で代表されると判断した。

次に、図14に示す画像処理による位置決め精度測定と比較検証する。画像処理による測定は、四半円形マーカを拡大撮像すること、および画素サイズ以下の分解能まで算出することで、高精度に測定できる。(測定値の揺らぎ：±0.005mm以下)。両測定方法による繰り返し位置決め精度を比較した結果、同等であることが確認できた。

今回報告の傾斜角センサによる測定は、指令ポーズごとの測定器の段取り替えが不要であり、トリガ信号などを用いてセンサ出力信号の記録タイミングを指定することで測定を自動化し、検査工数が短縮される。

従って、上記考察を踏まえ、本装置の繰り返し位置決め精度測定は傾斜角センサを適用することとした。

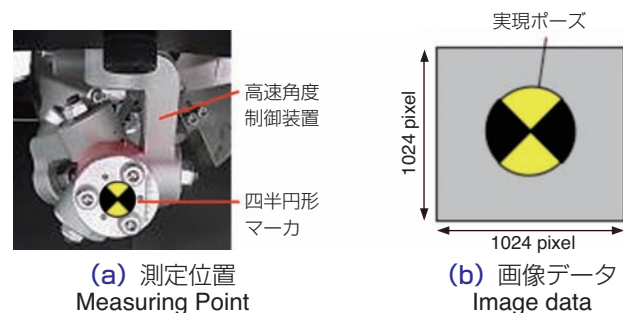


図14 画像処理による測定方法  
The measuring method using image processing

### 5. 用途例 (グリース塗布)

高速角度制御装置を使用したグリース塗布装置の構成例を図15、図16に示す。架台に対して高速角度制御装置の先端側リンクハブを下向きに取り付け、その先端にディスペンサ(液体定量吐出装置)を搭載し、XYステージ上のワークに対してグリースを塗布する構成である。ディスペンサには、高圧エアを電磁バルブで制御してグリースを遠方に飛ばす方式のものを使用する。高速角度制御装置に使用する3つのモータとXYステージに使用する2つのモータは、1つのコン

トローラで統合制御する。この構成により、1つの専用ティーチングコンソールにより、高速角度制御装置とXYステージの双方のティーチング作業やパラメータ設定が可能である。

本構成のグリース塗布装置のメリットを下記に示す。

① タクトタイムの短縮

1秒間に約10ポイントのグリース塗布を行うことができ、タクトタイムを短縮できる。

② 設備のコンパクト化

高速角度制御装置の可動部が小さいため、設備のコンパクト化を実現できる。

③ 複雑な形状の部品に対してグリース塗布が可能

高速角度制御装置でディスペンサの姿勢を制御することでグリースを斜め方向から塗布できるため、**図17 (a)**のように真上から塗布できない隠れた部位への塗布や、**図17 (b)**のように柱状部の垂直側面への塗布が可能である。

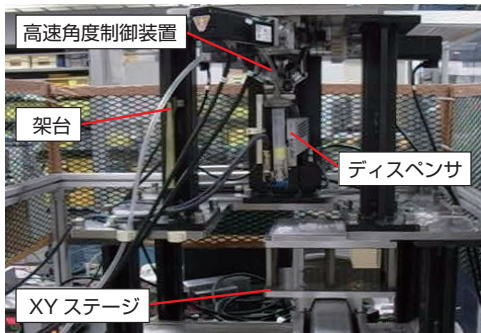


図15 グリース塗布装置の構成例  
System configuration example of grease dispensing

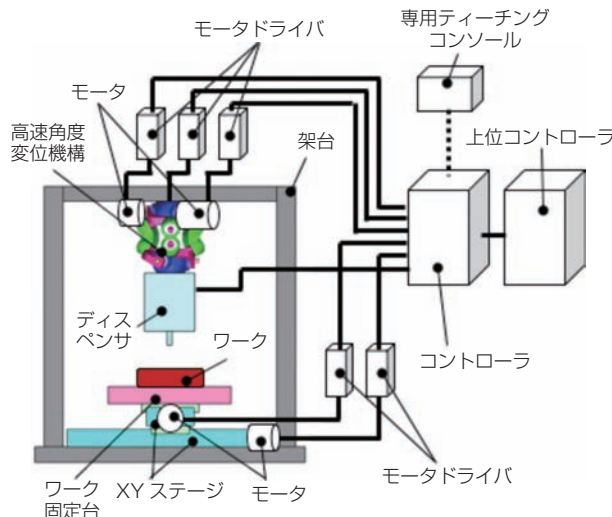


図16 システム構成  
System configuration

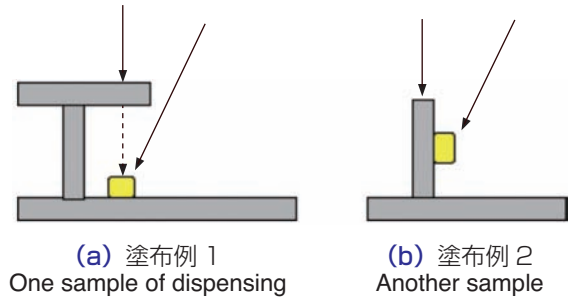


図17 塗布例  
Sample of dispensing

6. まとめ

本稿では、2自由度の角度制御装置であるパラレルリンク型高速角度制御装置について、その構造や位置決め精度の測定方法、用途例について紹介した。

今後は、グリース塗布装置以外にも、接着剤塗布装置、レーザやカメラを搭載した検査装置、雲台などへの応用も視野に入れ、機能拡張や低コスト化により市場の拡大を図る所存である。

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) 日本ロボット学会, ロボット工学ハンドブック, 新版, 株式会社コロナ社, 297, 2005
- 3) 財団法人日本規格協会, JISハンドブック14, 2011年版, 1585-1662, 2011

執筆者近影

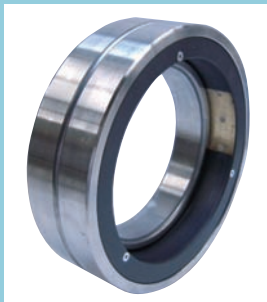


磯部 浩  
商品開発研究所



西尾 幸宏  
商品開発研究所

## 自己発電型潤滑油供給ユニットの開発 Development of the Lubricating Oil Supply Unit with Self-power Generator



大本 郁\* Kaoru OMOTO  
伊藤 浩義\* Hiroyoshi ITO

工作機械主軸用グリース封入軸受の高速化や長寿命化のため、軸受内部に長期間潤滑油を供給する、自己発電型潤滑油供給ユニットを開発した。

この潤滑油供給ユニットは外輪間座内に取り付け、内部に発電装置、ポンプおよび潤滑油などを内蔵する。本ユニット単独で潤滑油を軸受内部に供給することが可能で、アンギュラ玉軸受で給油動作を確認し、良好な潤滑環境を得た。

For the purpose of life time extension of the grease lubricated bearing for machine tool spindle, NTN developed lubricating oil supply unit with the self-power generator.

This lubricating oil supply unit is built in outer ring spacer, and self-power generator, pump and lubricating oil are included as a lubricating oil supply unit. We confirmed that is possible to supply lubricating oil into bearing on a stand-alone and good lubrication situation by testing of angular contact ball bearing.

### 1. まえがき

グリース潤滑用軸受で高速回転や長寿命化のために、必要最小限のグリース量で油膜を長期間維持することが課題で、グリース基油を微量供給する「MQGS (Minimum Quantity base oil Grease Supply lubrication) 新グリース潤滑システム」<sup>1)</sup>を開発してきた。

これまでの開発で培った微量給脂技術に電子応用技術を加え、軸受内に潤滑油を供給する自己発電型潤滑油供給ユニットを開発した。

本ユニットは、外部電源や外部制御なしで潤滑することが可能であり、本稿では、この自己発電型潤滑油供給ユニット（以下、潤滑油供給ユニット）について紹介する。

### 2. 構成

#### 2.1 全体構造

図1に自己発電型潤滑油供給ユニットの外観を示す。潤滑油供給ユニットは図2(a)に示すように、外輪固定間座内周面に取り付け、軸受から分離可能であ

る。また、図2(b)に示すように内部に発電装置（熱電変換器）、電源・制御装置、ポンプおよび潤滑油タンクなどを内蔵し、発電した電力を利用してポンプで潤滑油を吸引し、ノズルから軸受軌道面に供給する。

また、ノズルは図2(a)に示すように軸受外輪軌道面近傍に設ける。図3はノズル穴周辺部を示し、潤滑油吐出前後の状態を(a)、(b)に示す。

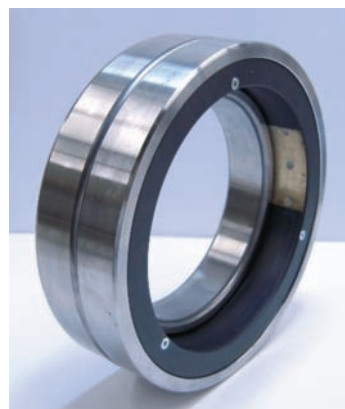
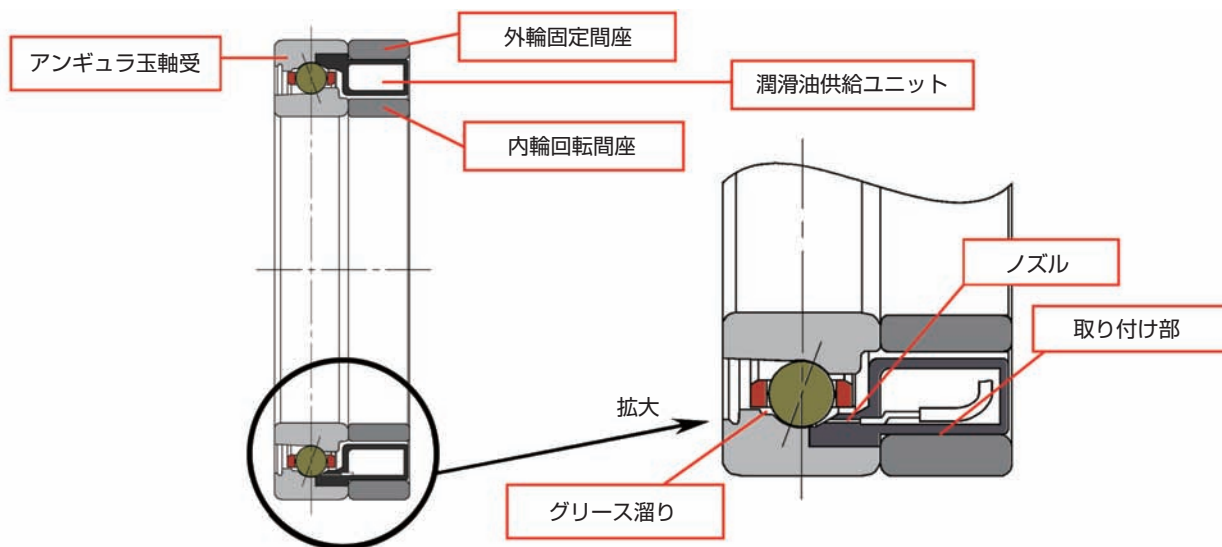
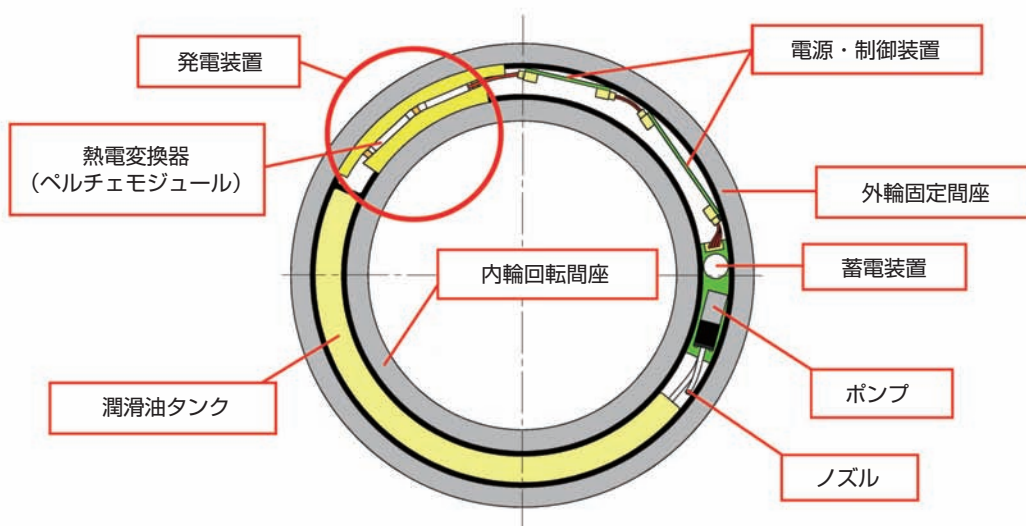


図1 自己発電型潤滑油供給ユニット  
Lubricating oil supply unit with self-power generator



(a) 軸受および潤滑油供給ユニットの断面  
Section view of lubricating oil supply unit and bearing



(b) 潤滑油供給ユニットの内部  
Inside of lubricating oil supply unit

図2 自己発電型潤滑油供給ユニットの構造  
Schematic structure of lubricating oil supply unit with self-power generator

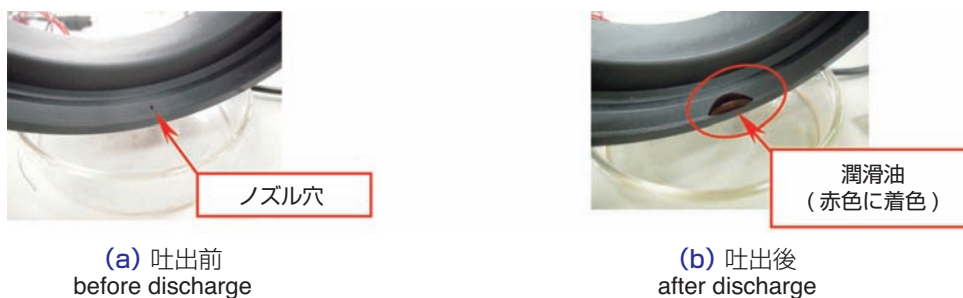


図3 潤滑油吐出状態  
Discharge of lubricating oil



## 2.2 発電装置および発電方法

図4に本ユニットの電気制御ブロック図を示す。制御装置の駆動や蓄電装置への蓄電に対して、十分な電力を得る発電方式が必要である。

一般的に、熱、振動および磁気（電磁誘導）などが発電エネルギーとして利用されるが、本潤滑油供給ユニットは、軸受の回転で発生する内外輪温度差（熱エネルギー）を、熱電変換器で電気エネルギーに変換する方式を採用した。

熱電変換器は、図5のA面とB面の間に温度差が生じると発電するペルチェモジュールを使用した。ペルチェモジュールは小型のため、軸受内輪間座と外輪間座間に取り付けることができる。

## 2.3 制御装置

軸受内部への潤滑油の供給量や供給間隔は、制御装置のプログラムで制御する。

## 2.4 蓄電装置

熱電変換器で得た電力を蓄電し、一定電圧を維持してポンプを安定駆動させる。

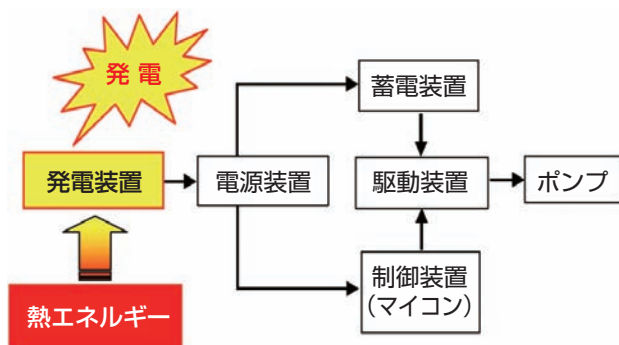


図4 電気制御ブロック図  
Block diagram of electrical control

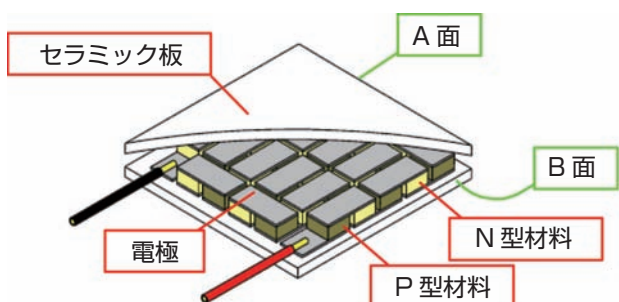


図5 ペルチェモジュールの構造  
Structure of peltier module

## 3. 特長

- ① 自己発電型電源や潤滑油タンクを内蔵するため、外部の電力や潤滑油の供給が不要。
- ② 軸受や間座の組み込みは従来と同等。
- ③ 潤滑油の供給量や供給間隔をマイコン制御し、微量で長期間安定した給油が可能。

## 4. 性能評価

### 4.1 発電特性

図6に示すスピンドルに組み込み、軸受内外輪温度差の違いによる、充電電圧と充電時間の関係を検証した。本試験の軸受仕様を表1に示し、発電試験の条件を表2に示す。また、蓄電装置は電気二重層キャパシタを用い、任意の充電目標電圧に達するまでの時間で評価した。

図7に発電特性を示す。軸受内外輪温度差が大きいほど、充電時間が短いことがわかる。

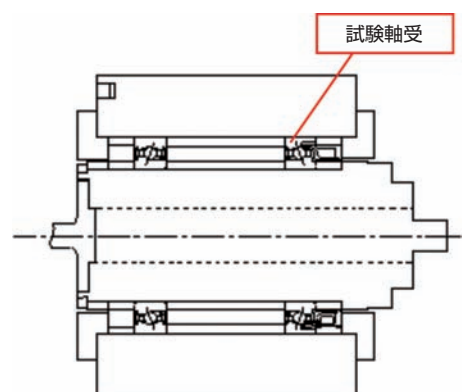


図6 試験用スピンドル  
Spindle for test

表1 試験軸受の仕様  
Specifications of test bearing

試験軸受	φ100×φ150×24
接触角	20°
転動体材質	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>
保持器材質	積層フェノール樹脂
軸受内部封入グリース	MP-1 (9g封入)

表2 発電試験の条件  
Conditions of power generator

軸姿勢	横軸
軸受組込時予圧量	100N (定位置予圧)
回転速度	10,000min <sup>-1</sup> , 15,000min <sup>-1</sup>
外筒冷却温度	室温±1°C
蓄電装置	電気二重層キャパシタ (定格0.1F)

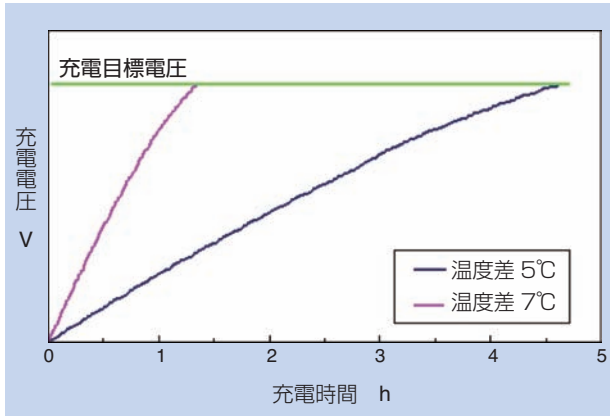


図7 発電特性  
Characteristic of power generation

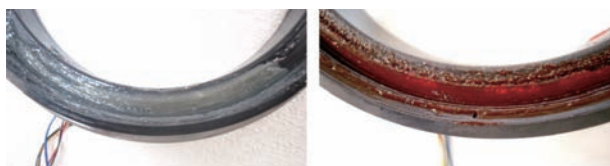
#### 4.2 吐出動作

潤滑油拡散状況を検証するため、潤滑油を赤色に着色し、図6に示すスピンドルに組み込み、表3に示す試験条件で評価した。

図8(a)は潤滑油吐出前のグリースの状態、(b)は潤滑油吐出後のグリースの状態を示す。潤滑油吐出後グリースは、全体に赤く変色したことを確認した。また、図2(a)に示す軸受軌道面近傍のグリース溜りに均一に拡散し、潤滑油供給ユニットは正常に作動することを確認した。

表3 吐出試験の条件  
Conditions of lubricating oil supply

軸姿勢	横軸
軸受組込時予圧量	100N (定位置予圧)
回転速度	15,000min <sup>-1</sup>
外筒冷却温度	室温±1°C
軸受内部封入グリース	MP-1 (9g封入)
供給潤滑油	MP-1基油
運転時間	約100時間



(a) 潤滑油吐出前のグリースの状態  
Before lubricating oil discharge  
(b) 潤滑油吐出後のグリースの状態  
After lubricating oil discharge

図8 吐出前後のグリースの状態  
State of grease before and after discharge

#### 4.3 耐久性評価

グリース潤滑で使用する工作機械主軸軸受は、20,000時間以上の耐久性が要求される。このため、表4や表5をもとに、最適な潤滑油供給量と供給間隔を設定し、現在耐久試験を継続している。

表4 試験軸受および潤滑油供給ユニットの仕様  
Specifications of test bearing and lubricating oil supply unit

試験軸受	φ100×φ150×24
接触角	20°
転動体材質	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>
保持器材質	積層フェノール樹脂
軸受内部封入グリース	MP-1 (9g封入)
供給潤滑油	MP-1基油
給油量・給油間隔	軸受状態により自動的に調整される

表5 耐久試験の条件  
Conditions of endurance test

軸姿勢	横軸
軸受組込時予圧量	100N (定位置予圧)
回転速度	15,000min <sup>-1</sup>
外筒冷却温度	室温±1°C

## 5. まとめ

本稿では、軸受内外輪温度差で作動する自己発電型潤滑油供給ユニットを紹介した。従来、グリース潤滑は、長期間最適な潤滑環境を維持することが困難であったが、本開発の潤滑油供給ユニットで課題を解決した。今後、本技術を一般産業機械に展開し、省エネルギーと環境負荷低減に貢献する所存である。

#### 参考文献

- 1) 李 璿雨, 前田 忠昭: 新グリース(MQGS)潤滑アンギュラ玉軸受 NTN TECHNICAL REVIEW No.76 (2008) 88-93

執筆者近影



大本 郁  
産業機械事業本部  
産業機械技術部

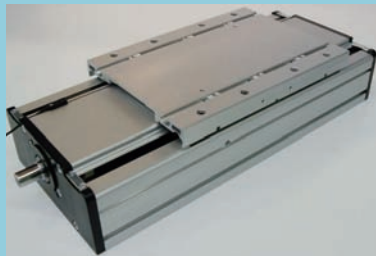


伊藤 浩義  
産業機械事業本部  
産業機械技術部

[ 製品紹介 ]

# NTNリニアモジュールの紹介

## NTN Linear Modules Series



Ulrich GIMPEL\*  
 Michael WILLE\*  
 小和田 智之\*\* Tomoyuki OWADA  
 利見 昌紀\*\* Masaki KAGAMI

NTNリニアモジュールは、多様化する自動化ニーズに対し、豊富なバリエーションの中から最適な商品を選択・提供することにより、欧州を中心にユーザの信頼を得てきた。NTNリニアモジュールの特長と応用例について紹介する。

NTN linear modules are establishing credibility from customers as supplying best suited products. In this document, the feature and applications of NTN linear module series are introduced.

### 1. まえがき

自動車、機械部品、半導体、フラットパネル、食品、医療などさまざまな分野で、生産効率向上およびコスト低減のため、設備の自動化と高速化が日々進められている。本稿では搬送機構、位置決めユニット、昇降装置などに適用可能なNTNリニアモジュールの特長と応用例を紹介する。

### 2. NTNリニアモジュールの製品群

表1にNTNリニアモジュールの概要を、表2に寸法表を示す。①小型タイプ、②パラレルタイプ、③大型タイプ、および④テーブルタイプの4シリーズを用意した。タイミングベルト駆動により最大速度10m/sまでの高速移動や、③大型タイプAXSシリーズでは最大10mの長ストロークが可能である。



表1 NTNリニアモジュールの概要  
 Outline of NTN linear modules

	①小型タイプ AXCシリーズ	②パラレルタイプ AXDLシリーズ	③大型タイプ AXSシリーズ	④テーブルタイプ AXLTシリーズ
特長	小型、コンパクト	小型、高負荷容量	重量物搬送に対応	高精度位置決め対応
組込直動ガイドの列数	単列	複列	複列	複列
直動ガイド	リニアガイド	適応可	適応可	適応可
	ローラガイド	適応可	適応可	—
駆動方式	送りねじ駆動	適応可	適応可	ボールねじ駆動のみ
	タイミングベルト駆動	適応可	適応可	—
	オメガ駆動	適応可	—	—
	ラック&ピニオン駆動	—	—	適応可
最大速度 m/s	10.0	10.0	10.0	2.5
最大全長 m	8.00	6.35	10.00	3.50
最大静的許容モーメント N・m	5.900 〔フレームサイズ 120×120mm〕	3.550 〔フレームサイズ 240×100mm〕	21.000 〔フレームサイズ 400×300mm〕	10.000 〔フレームサイズ 455×70mm〕

\*NTN-SNR ROULEMENTS Engineering Bielefeld

\*\*精機商品事業部 プロダクトエンジニアリング部

表2 NTNリニアモジュール 寸法表  
Lineup of NTN linear modules

タイプ	シリーズ・型式	フレームサイズ A×B mm		最大全長 m	
①小型タイプ	AXC	40	40×40		6.00
		60	60×60		8.00
		80	80×80		8.00
		120	120×120		8.00
②パラレルタイプ	AXDL	110	110×50		6.10
		160	160×66		6.10
		240	240×100		6.35
③大型タイプ	AXS	120	120×120		3.00
		200	200×100		6.00
		230	200×160		10.00
		280	280×170		10.00
		460	400×300		10.00
④テーブルタイプ	AXLT	155	155×30		3.50
		225	225×40		3.50
		325	325×50		3.20
		455	455×70		3.20

静的許容モーメントも大きく、大型部材や重量物の搬送、装置のコンパクト化に適している。また、モータカップリングを豊富に用意しており、様々なモータとの組み合わせが可能である。

NTNリニアモジュールは用途に適したシリーズやフレームサイズ、直動ガイドや駆動方式を組み合わせることで、求められる用途や荷重、取り付け姿勢などの使用条件に対応する。

### 2.1 小型タイプ AXCシリーズ

AXC80Zの外観を図1に示す。スリムで軽量なアルミフレームに単列の直動ガイドと駆動部を内蔵する。高剛性タイプの直動ガイドの採用により、一回り小さいサイズで他社品同等の負荷容量を確保しており、装置の小型化が可能である。

直動ガイドは、用途に合わせてボール循環型リニアガイド、もしくはシャフトと軸受で構成するローラガ

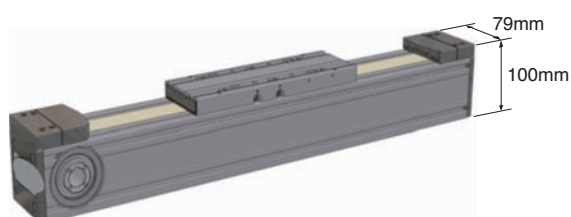


図1 AXC80Z  
AXC Series AXC80Z

イドの2種類から選択する。また、駆動方式は、送りねじ駆動、タイミングベルト駆動、オメガ駆動の3種類から選択する。なお、これらの詳細は3章で解説する。

外部からフレーム内への異物侵入を防止する防塵シールを標準装備し、さらにグリース給脂やタイミングベルトの交換作業を容易にする工夫を施し、メンテナンス性を高めた。

本シリーズは単軸での使用以外にも、AXCシリーズ同士や他シリーズを組み合わせ、多軸の複合システムを構築することが可能である。

### 2.2 パラレルタイプ AXDLシリーズ

AXDL110Sの外観を図2に示す。本シリーズは、駆動部両側に2本の直動ガイドを複列配置し、大きな負荷容量と剛性を確保している。特に、ピッチ、ヨー方向の剛性が高く、偏荷重などの厳しい条件でも長期使用が可能である。

AXCシリーズと同じ防塵性能とメンテナンス機能も備えている。直動ガイドは、リニアガイド、もしくはローラガイドの2種類から選択する。また、駆動方式は送りねじ駆動、もしくはタイミングベルト駆動の2種類から選択する。サイズ、負荷容量、剛性、精度面で最もバランスに優れたシリーズとして、ユーザから好評を得ている。

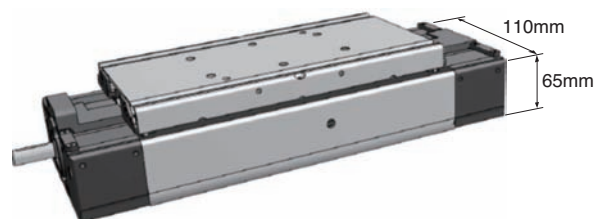


図2 AXDL110S  
AXDL Series AXDL110S

### 2.3 大型タイプ AXSシリーズ

AXS280Zを横軸とする組み合わせ例を図3に示す。大型アルミフレームと高性能リニアガイドにより高剛性、高負荷容量を実現した。主に、100kgを超える重量物の水平搬送、ビームと呼ばれるガントリ構造の上軸、あるいは縦軸姿勢の重量物の昇降機構などに用いられる。

本シリーズには他社にない超大型サイズがあり、AXS460のフレームサイズは、横400mm×高さ



300mmである。駆動方式はラック&ピニオン駆動、タイミングベルト駆動、オメガ駆動から選択し、最大ストローク10m、最大速度10m/s、最大搬送質量1000kgまで対応可能である。(5.2 工作機械への実用例 参照)

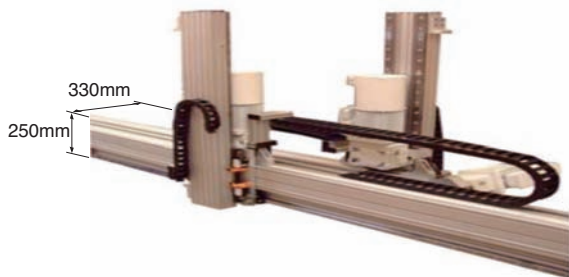


図3 AXS280Z組み合わせ例  
Application of AXS280Z

## 2.4 テーブルタイプ AXLTシリーズ

図4に示すAXLT155は、フレームに位置決めテーブルタイプのアルミ押し出し材料を使用する。他社リニアモジュール製品は、搬送用途に限定したものがほとんどであるが、本シリーズは精密ボールねじと複列の高性能リニアガイドを組み合わせ、高精度な位置決め装置としても利用可能である。

また、ジャバラにより外部からフレーム内への異物侵入を防止するが、ステージ部側面にグリース給脂口を設けたので、ジャバラを外さずにメンテナンスができる。

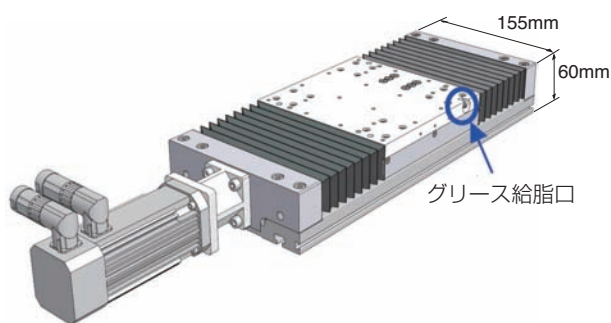


図4 AXLT155  
AXLT Series AXLT155

## 3. 直動ガイド

NTNリニアモジュールに組み込む直動ガイドは、荷重、速度、精度などの使用条件および要求コストに応じ、リニアガイドとローラガイドの2種類から選択できる。

### 3.1 リニアガイド

図5に、ボール循環方式のリニアガイドの内部構造を示す。リニアモジュールは長期間の安定した稼働が求められるが、図6に示すグリースだまりを設けたボール保持器の採用により低発熱、低騒音、長寿命および長期メンテナンスフリーを実現した。

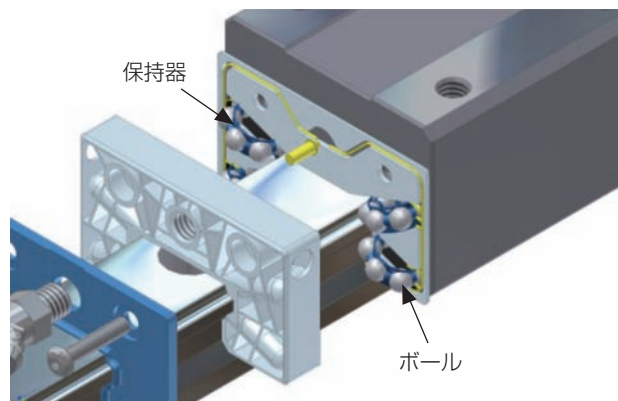


図5 リニアガイド  
Linear guide

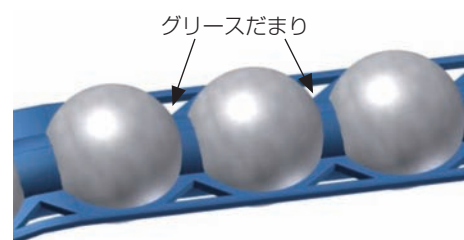


図6 グリースだまり付き保持器  
Retainer with grease pocket

### 3.2 ローラガイド

図7にローラガイドのAXCシリーズへの組み付け状態を透視図で示す。ローラガイドはAXDLシリーズでも選択可能である。

図8に示すようにアルミフレーム内に内蔵する2本の棒状案内シャフト間を外輪に溝を形成した転がり軸受が転走する簡単な構造ながら、負荷容量が高く、最大速度10m/sまで使用可能である。

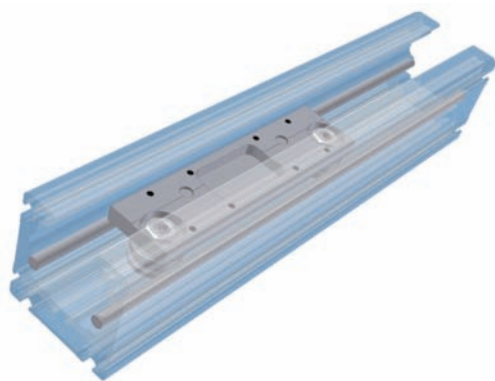


図7 ローラガイド  
Roller guide

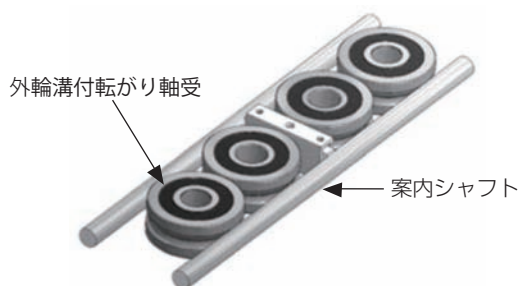


図8 ローラガイドの案内機構  
Guiding system of roller guide

## 4. 駆動方式

モジュールに組み合わせる駆動方式は、①ボールねじまたは台形ねじによる送りねじ駆動、②タイミングベルト駆動、③ラック&ピニオン駆動、④タイミングベルトを利用したオメガ駆動の計4種類がある。

### 4.1 送りねじ駆動

AXSシリーズを除くAXC, AXDL, AXLTシリーズに適用可能であり、荷重や速度、用途に応じボールねじ、もしくは台形ねじが選択できる。

ボールねじは、リード代表移動量誤差 $52\mu\text{m}$ 以下/ $300\text{mm}$ のJIS精度等級Ct7を標準仕様とし、さらに、高精度の要求に対しては、精密研削ボールねじも選択可能である。

台形ねじは、主にコストを重視する簡易位置決め装置で使用される。 $300\text{mm}$ あたりのリード代表移動量誤差は $100\mu\text{m}$ （サイズによっては $200\mu\text{m}$ ）とボールねじには劣るが、モジュール組み込み後の繰り返し位置決め精度は $\pm 0.100\text{mm}$ 以下、対応可能な最大速度は $115\text{mm/s}$ であり、コストパフォーマンスが高い。

### 4.2 タイミングベルト駆動

AXLTを除くAXC, AXDL, AXSシリーズで選択可能な、高速搬送に適した駆動方式である。図9にタイミングベルト駆動を採用したAXCシリーズを示す。長期間稼動しても伸びにくい高耐久タイミングベルトを採用し、モジュール組立調整の際にベルト張力を最適値に調整することで、応答性能を高めた。

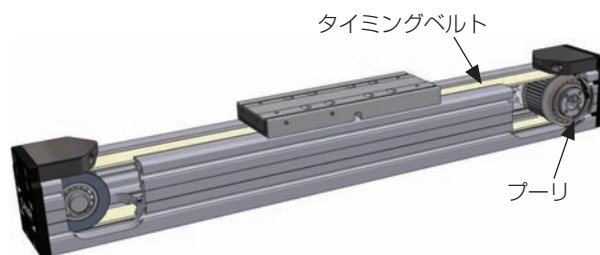


図9 タイミングベルト駆動  
Timing belt drive

### 4.3 オメガ駆動

AXC, AXSシリーズに適応可能なオメガ駆動とは、図10のようにタイミングベルト両端をフレーム側に固定し、ステージ（キャリッジ）上に駆動プーリとモータ（図省略）を設けた駆動方式である。駆動プーリにタイミングベルトを巻き付けた様子が、ギリシャ文字の $\Omega$ （オメガ）に似ていることからオメガ駆動と呼ぶ。例えば1軸のモジュールに複数のオメガ駆動ステージを搭載し、それぞれ別々の動作をさせたり、あるいはステージを固定しフレームを移動させる場合に使用する。

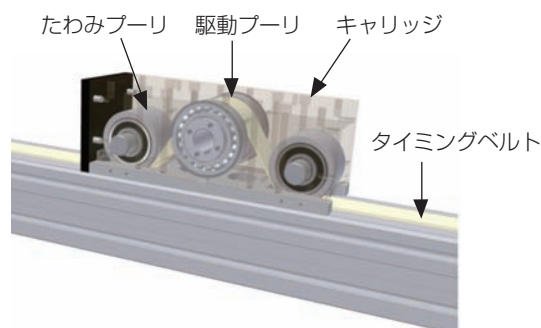


図10 オメガ駆動  
OMEGA drive

#### 4.4 ラック&ピニオン駆動

AXSシリーズのみに対応する図11に示すラック&ピニオン駆動は、簡素かつ軽量の構造でありながら動力伝達能力が高いため、最大1000kgの搬送が可能で、垂直方向の昇降駆動やガントリー構造のビーム軸として使用される。

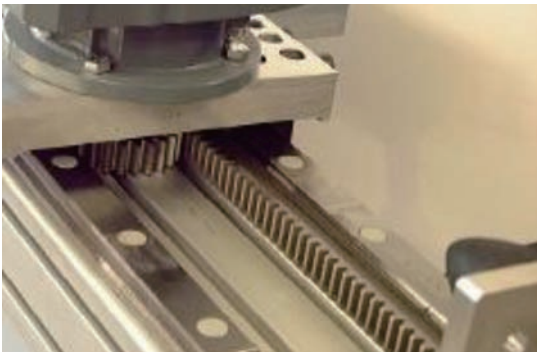


図11 ラック&ピニオン駆動  
Rack-and-pinion drive

### 5. NTNリニアモジュールの応用例

#### 5.1 組み合わせ例

NTNリニアモジュールを組み合わせ、ガントリー構成とした例を図12に示す。

下2軸には小型タイプのAXCシリーズを使用し装置をコンパクト化している。左右軸を同時に駆動するため、連結シャフトでモータ回転を伝える機構を採用している。またビーム軸には平行タイプAXDLシリーズを採用し、Z軸駆動モジュールのオーバーハングによるモーメント荷重に対応する構成とし、さらにZ

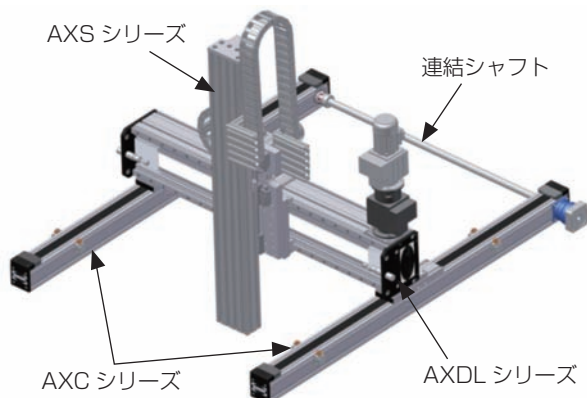


図12 組み合わせ参考例  
Combination reference example

軸には大型タイプのAXSシリーズを使用し昇降性能を高めている。

このように、各モジュールの特長を活かした構成が可能である。

#### 5.2 工作機械への実用例

ワーク自動脱着ローダに、タイミングベルト駆動のAXSシリーズを使用した例を図13に示す。吊り下げられた100kgを超えるロボットを位置決め動作後、短時間で正確にロボットがワークを脱着するには、ロボット動作や荷重移動に伴い生じるハンド先端の変位を要求精度以内に収めることが必要で、高い剛性を持つAXSシリーズにより実現した。

NTN リニアモジュール AXS シリーズ  
(全長 6000 ストローク 3000 幅 280mm)

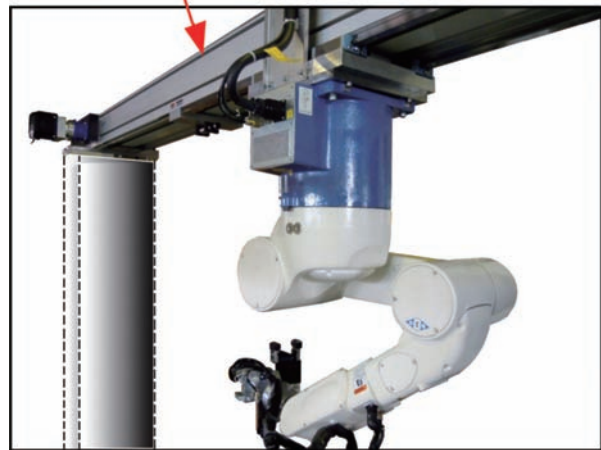


図13 ローダ使用例  
Example of use for loader

#### 5.3 特殊用途

道路舗装作業車の乗務室の左右スライド部に採用された例を図14に示す。

リニアモジュールの豊富なバリエーションにより、たとえば、植物ハウス内での農薬や水の自動散布装置、植え付け作業設備、また、建材(大型壁面パネル)運搬用のガントリー型クレーンなど超大型用途から、工業製品や食品・医療分野の小型用途まで様々な実績がある。



図14 作業車の適用例  
Example of use for service vehicle

## 6. まとめ

NTNリニアモジュールは、剛性と信頼性に優れた商品で、特に欧州で豊富な実績がある。

ユーザの新たな設備案件や開発課題に対して、NTNリニアモジュールによるコストパフォーマンスの高いソリューションを提案し、設備の自動化に貢献したい。

### 参考文献

Ulrich Gimpel, Michael Wille, NTN-SNR高性能・高機能直動モジュールAXDLシリーズ, NTN TECHNICAL REVIEW No.78 (2010) 64-69

### 執筆者近影



Ulrich GIMPEL  
NTN-SNR ROULEMENTS  
Engineering Bielefeld



Michael WILLE  
NTN-SNR ROULEMENTS  
Engineering Bielefeld



小和田 智之  
精機商品事業部  
プロダクトエンジニアリング部



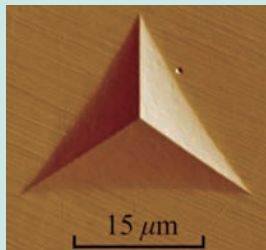
利見 昌紀  
精機商品事業部  
プロダクトエンジニアリング部



# インデンテーション法による高強度鋼の局所力学特性評価

## Evaluation of Local Mechanical Properties of High Strength Steels by Indentation Method

小川 武史\* Takeshi OGAWA  
 坂中 則暁\*\* Noriaki SAKANAKA  
 松原 幸生\*\* Yukio MATSUBARA



転がり軸受などの重要部品に高強度鋼が用いられており、強度が必要な部位にのみ高周波焼入や浸炭焼入などの表層硬化を施すものがある。表層硬化した部位は局所的に材料特性が変化しており、これらの部品の強度設計においては、局所的な材料特性が要求される。本研究の目的は、2圧子インデンテーション法を用いて、高強度鋼の局所力学特性評価を検討することである。有限要素法 (FEM) 解析を用いて、稜間角118°の三角錐圧子の無次元 $\Pi$ 関数が作られ、115°と118°の圧子を用いた2圧子インデンテーション法が軸受鋼JIS-SUJ2およびJIS-SUJ3について行われた。その結果、引張試験と良く一致した応力ひずみ特性を得ることができた。また、高周波焼入および浸炭焼入を施した部品の評価を行い、熱処理の相違が局所的に求めた応力ひずみ関係から確認できた。

High strength steels are used for important components such as rolling bearings, for which surface treatments such as induction and carburized hardenings are applied. Strength designs for these components require material properties at the local areas, since the material properties are different at the treated locations. The objective of the present study is to evaluate the local mechanical properties of high strength steels by the dual-indenter method. Non-dimensional  $\Pi$  function is developed for 118 degree trigonal pyramid indenter using finite-element method. Dual-indenter method is conducted by indenters with the apex angles of 115 and 118 degrees for JIS-SUJ2 and JIS-SUJ3. The results reveal that good agreements are achieved between stress-strain curves of tensile testing and those of the dual-indenter method. The local mechanical properties are evaluated by the dual-indenter method for induction-hardened and carburized components. There are some differences in stress-strain curves at the locations of the components by the influence of the heat treatments.

### 1. はじめに

転がり軸受などの重要部品には、強度を向上させるために全体焼入を施すものと、強度が必要な部位にのみ高周波焼入や浸炭焼入などの表層硬化を施すものがある。表層硬化した部位は局所的に材料特性が変化しており、力学特性評価を行うにあたり、熱処理部のみを対象とした局所的な評価を行うことが必要とされる。これまでにインデンテーション法を用いて局所的な力学特性を評価する手法として2圧子法<sup>1)</sup>が提案されている。著者の1人(小川)は様々な材料に対して2圧子法を適用することで力学特性評価を行ってきた<sup>2)</sup>。しかし、高強度な軸受鋼に対しての推定は、引張試験結果と一致しない場合のあることが明らかとなった。そこで、本研究ではインデンテーション法と有限要素法 (FEM) 解析を用いて高強度材料の力学特性を推定できる方法を検討した。

### 2. 供試材および試験片

供試材の高炭素クロム軸受鋼JIS-SUJ2およびJIS-SUJ3の化学成分を表1に示す。試験片は各材料に対して標準的な全体焼入を施した後、180~350°Cで焼戻をしたものを用いた。また、高周波焼入、浸炭焼入した部品も試料とした。試料表面はエメリペーパーで研磨後にバフ研磨、ダイヤモンドペーストでラッピングを行った。

表1 化学成分 (質量%)  
 Chemical compositions (mass %)

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu
SUJ2	1.02	0.27	0.43	0.014	0.007	0.05	1.48	0.09
SUJ3	0.99	0.47	1.06	0.014	0.006	0.07	1.06	0.14

\*青山学院大学 理工学部機械創造工学科教授

\*\*先端技術研究所

### 3. 試験機および試験条件

島津製作所製ダイナミック超微小硬度計DUH-W201を用い、各条件についてインデンテーション試験を6回ずつ行った。また、すべて室温大気中（約20℃）で試験を行い、負荷および除荷速度は10.1 mN/sec、最大試験力は1961 mNとした。なお、三角錐圧子の稜間角 $\phi$ は100°、115°および118°のものを用いた。

### 4. インデンテーション試験

#### 4.1 2圧子法

本研究では2圧子法を適用するにあたり<sup>2)</sup>、 $\phi=100^\circ$  および $115^\circ$  に加えて相対的に塑性変形量の小さい $118^\circ$ の三角錐圧子を用いる。ここで、圧子の投影面積と $h$ の比が等しい頂角 $\theta$ の円錐圧子により、以下の解析を行った。一般に、押し込み力 $F$ と押し込み深さ $h$ は $F = Ch^2$ の関係にあり、次元解析を行うことで次式の関数形で表される。

$$F = F(E^*, n, \sigma_r, \theta, h) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $E^*$ は複合ヤング率、 $n$ は加工硬化指数であり、圧子の弾性変形による影響を含んでいる。 $\sigma_r$ は代表応力と呼ばれ塑性変形領域を特徴付ける応力である。式(1)にII理論を適用すると、次式を得る<sup>3)</sup>。

$$\frac{F}{\sigma_r h^2} = \frac{C}{\sigma_r} = \Pi\left(\frac{E^*}{\sigma_r}, n, \theta\right) \dots\dots\dots (2)$$

この関数IIをそれぞれの稜間角 $\phi$ の圧子について求め、2種類の圧子で試験を行い、関数IIと実験結果の負荷過程の $F$ に対する $h^2$ の傾き $C$ を用いることによってそれぞれの圧子の代表応力-代表ひずみ関係が得られる。この2点の関係から $n$ が決定される。また、一般的に知られている応力-ひずみの関係より降伏応力 $\sigma_y$ および強さ係数 $K$ が次式より得られる。ここで、 $\epsilon_r$ は代表ひずみである。

$$\sigma_r = K\epsilon_r^n \quad \sigma_r = \sigma_y \left(1 + \frac{E}{\sigma_y} \epsilon_r\right)^n \dots\dots\dots (3)$$

#### 4.2 有限要素法解析

2圧子法を用いて力学特性評価を行うにあたり、新たに作成するII関数の解析には、汎用非線形構造用解析プログラムMSC. MARC Mentat 2005を使用した。これまでに、三角錐圧子によるインデンテーション試験を行う場合、圧子の深さ-投影面積比が同一の円錐圧子に置き換えた軸対称モデルによる解析と、三角錐圧子の3次元解析の結果が同等であることを確認している<sup>3)</sup>。FEM解析は $\phi=118^\circ$ の圧子に対して頂角 $\theta=77.37^\circ$ の円錐圧子を模擬した要素数2549、節点数2658の軸対称モデルとして解析を行った。解析モデルを図1に示す。新たにII関数を作成するにあたり、使用した材料パラメータはヤング率 $E = 50 \sim 300$  GPa、降伏応力 $\sigma_y = 0.1 \sim 5.0$  GPa、加工硬化指数 $n = 0.1 \sim 0.5$ の範囲で合計72通りの解析を行った。ポアソン比すべて $\nu = 0.3$ とした。

解析によって得られた $E^*/\sigma_r$ と $C/\sigma_r$ の関係を図2に示す。解析結果は解析条件の加工硬化指数 $n$ の値ごと

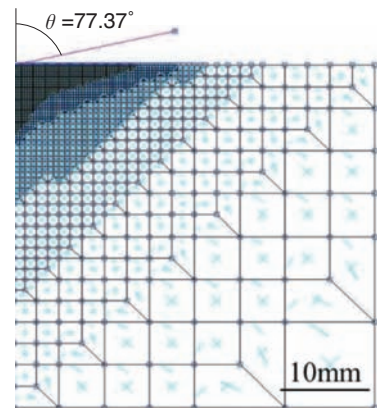


図1 有限要素法解析のモデル Model for FEM analysis

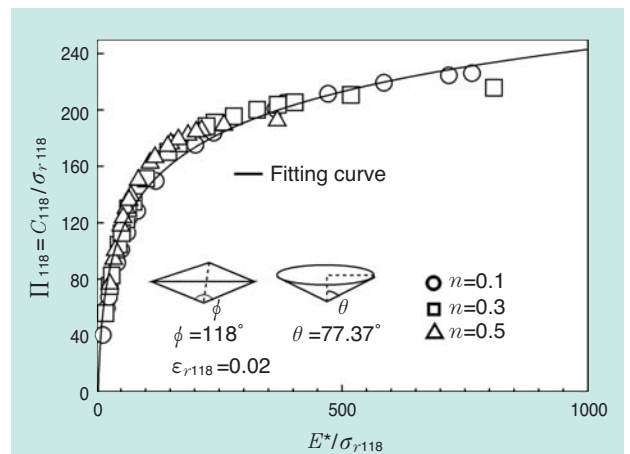


図2 118° 圧子の無次元関数 Dimensionless function of 118° indenter

に一本の曲線で示される。このとき、 $\epsilon_r$ の決定には  $\epsilon_r = 0.001$  ごとにフィッティングの良否を調べ、 $\phi = 118^\circ$  の圧子に対して  $\epsilon_r = 0.020$  を選んだ。この結果、図2のように  $E^*/\sigma_r$  と  $C/\sigma_r$  の関係は、加工硬化指数  $n$  の値に依存しない1つの曲線で表され、無次元関数  $\Pi_{118}$  が次式として得られた。

$$\Pi_{118} = \frac{C_{118}}{\sigma_{r118}} = 43.25 \ln \left( \frac{E^*}{\sigma_{r118}} \right) - 55.90 \quad \dots (4)$$

## 5. 実験結果および考察

### 5.1 軸受鋼の力学特性評価

新たに作成した  $118^\circ$  圧子の  $\Pi$  関数を使用して2圧子法による力学特性評価を行った。180°Cで焼戻したSUJ2およびSUJ3に対して  $\phi = 115^\circ$  と  $118^\circ$  および  $100^\circ$  と  $115^\circ$  圧子を用いた結果を図3に示す。115°と118°圧子を用いた試験では引張試験結果に近い結果が得られていることが確認できる。一方、100°と115°圧子を用いた2圧子法では引張試験が

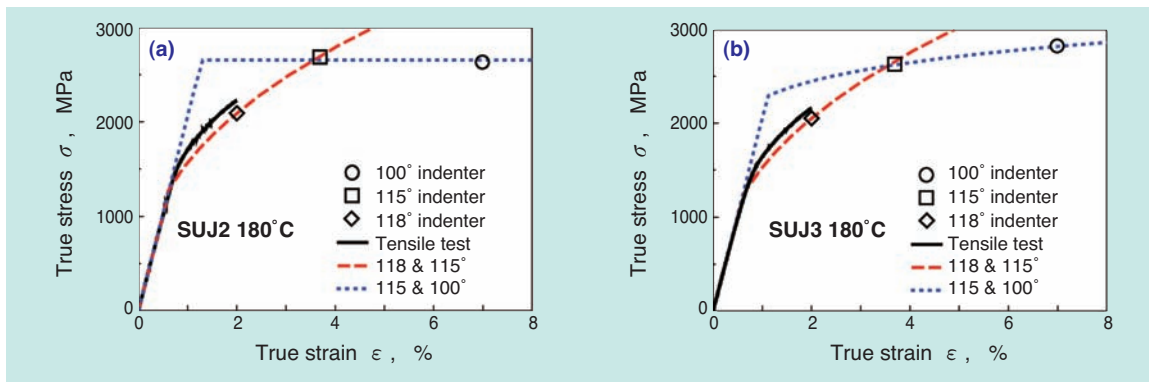


図3 引張試験および2圧子法で得られた応力ひずみ曲線 (a) SUJ2, (b) SUJ3  
Stress-strain curves obtained by tensile testing and dual-indenter method for SUJ2 (a) and SUJ3 (b)

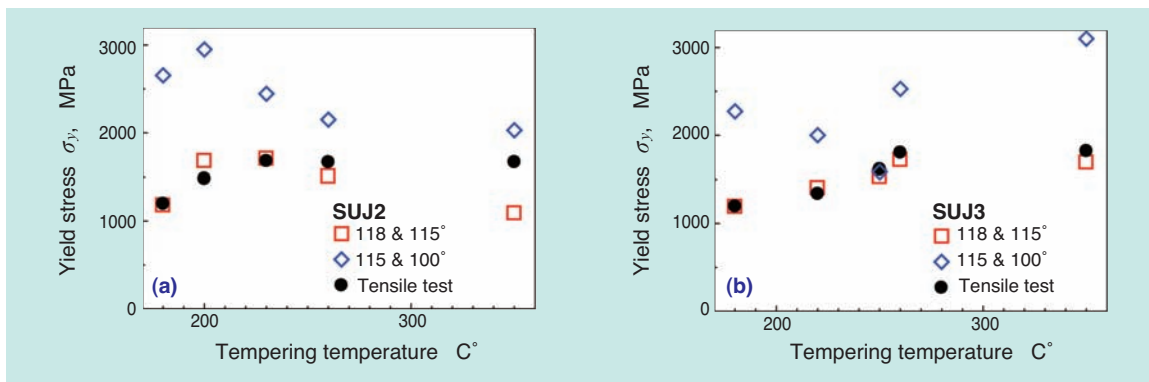


図4 降伏応力の結果 (a) SUJ2, (b) SUJ3  
Results of yield stresses for SUJ2 (a) and SUJ3 (b)

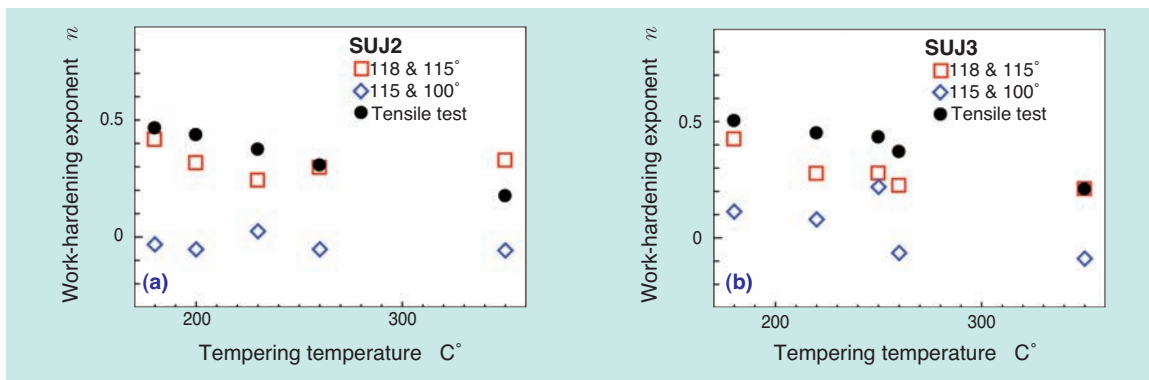


図5 加工硬化指数の結果 (a) SUJ2, (b) SUJ3  
Results of work hardening exponents for SUJ2 (a) and SUJ3 (b)

ら大きく離れた結果となった。図4および図5に2圧子法より求められた降伏応力  $\sigma_y$  および加工硬化指数  $n$  を示す。115° と118° 圧子での結果は引張試験結果と近い値が得られており、力学特性の焼戻温度依存性が評価できていることから、115° と118° 圧子での2圧子法の有効性が確認できる。

100° と115° 圧子を用いた試験結果が引張試験と大きく異なる結果となった原因を検討するため、圧痕の観察を行った。図6にそれぞれの  $\phi$  の圧痕写真とAFM観察結果を示す。稜間角  $\phi$  が小さくなるにつれて圧痕周辺のパイルアップ（盛り上がり）の量が増加していくことが確認できる。パイルアップは  $\Pi$  関数を

作成するFEM解析で十分にシミュレートできておらず、顕著なパイルアップの発生が100° 圧子を用いた2圧子法で有効な結果が得られなかった原因と考えられる。

### 5.2 表層硬化部品の力学特性評価

炭素鋼S53Cに高周波焼入、クロム鋼SCr420に浸炭焼入を施した部品から切り出した試料に対して、局所力学特性評価を行った。このような試験片に対して局所力学特性評価を行うにあたり、熱処理の影響が及んでいる範囲を特定する必要があるため、硬さ分布を調べた。ビッカース硬さHVの分布を図7および図8

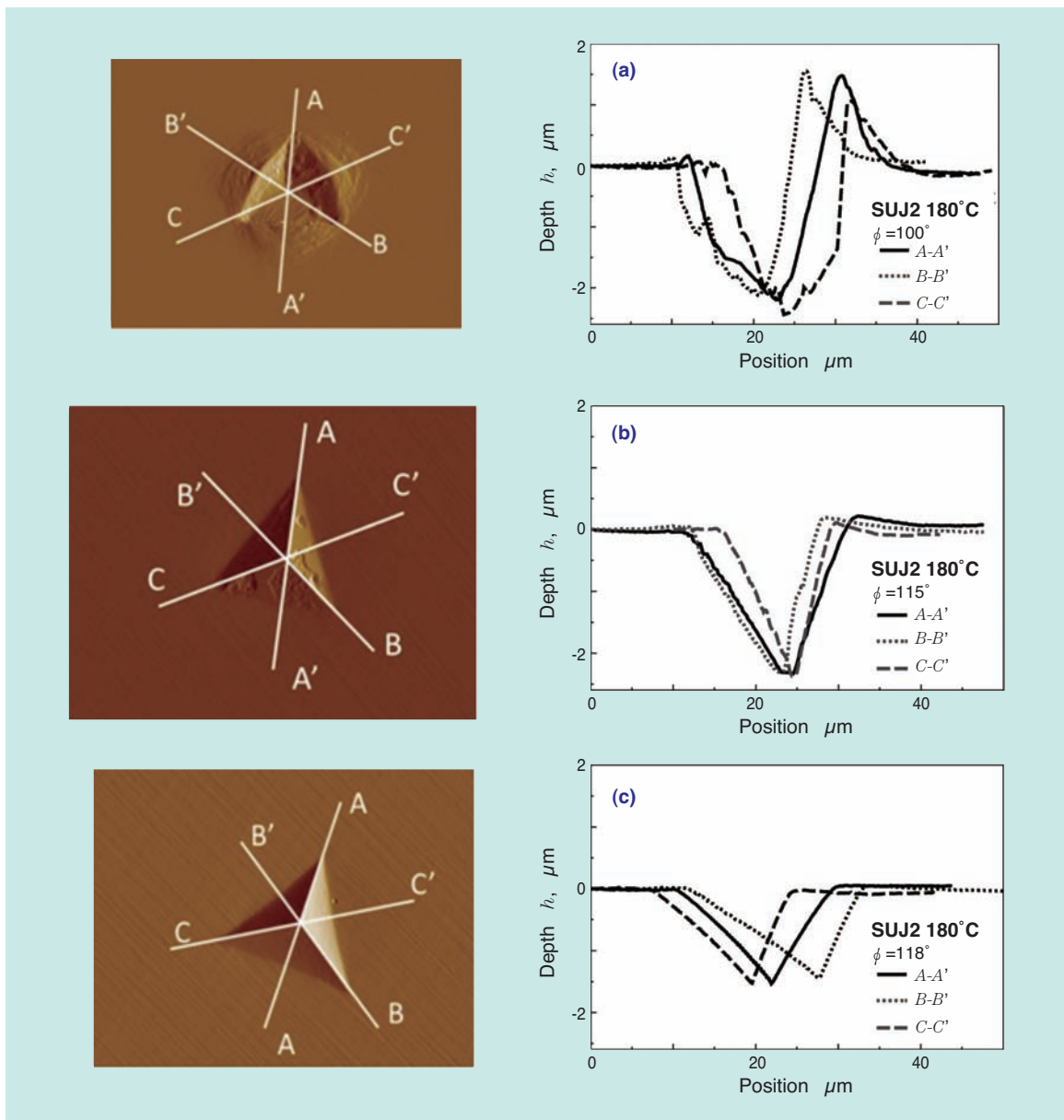


図6 異なる圧子で形成された圧痕のAFM観察された高さ形状 (a) 100°, (b) 115°, (c) 118° 圧子  
Shapes of impressions and height profiles measured by AFM formed by 100°(a), 115°(b) and 118°(c) indenters



に示す。測定にはAKASHI製マイクロビッカース硬度計MVK-G3を用いた。試験力は2940 mN (300gf)であり、各図の写真中に示した矢印の方向に等間隔で測定した。図7に示す高周波焼入部品のHVが304~746であるのに対し、図8の浸炭焼入部品のHVは383~744の分布となっており、熱処理方法によるHVの差異が確認できる。

HVが700以上の領域を「高硬度」、450以下の領域

を「低硬度」と定義して2圧子法により局所力学特性評価を行った。インデンテーション試験には115°および118°圧子を用いた。図9および図10にその結果を示す。高硬度領域での試験結果は降伏応力が大きく、硬さの大小と降伏応力の対応関係が確認できる。また、高周波焼入部品と浸炭焼入部品の高硬度領域を比較したところ高周波焼入部品の硬さが高く、降伏応力も大きくなった。低硬度領域では高硬度領域とは異

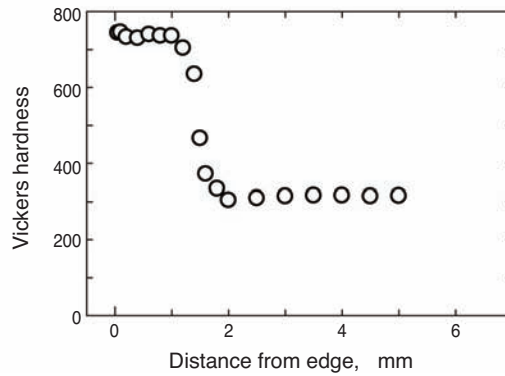
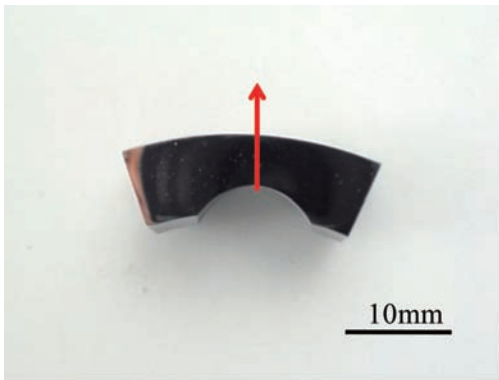


図7 高周波焼入試験片の形状と硬さ分布  
Shape and hardness distribution chart of induction-hardened specimen

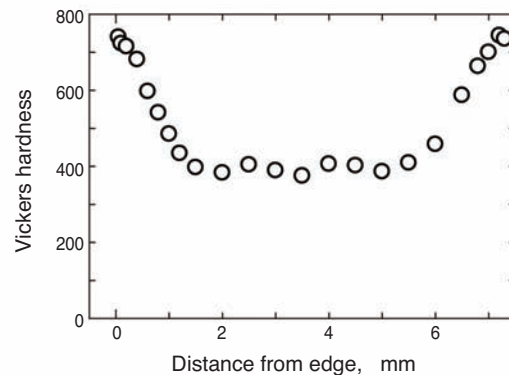
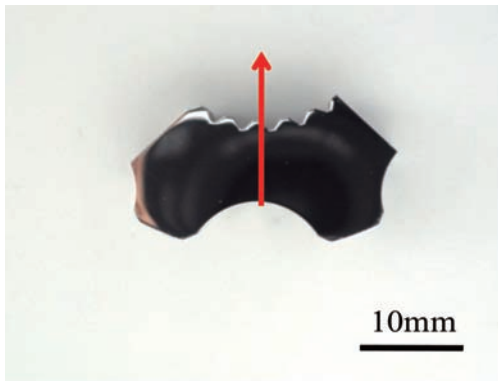


図8 浸炭焼入試験片の形状と硬さ分布  
Shape and hardness distribution chart of carburized specimen

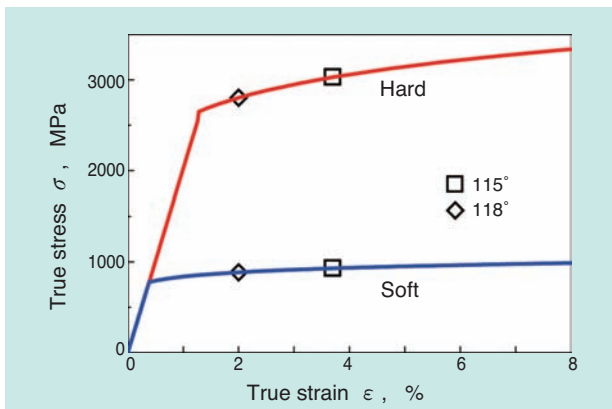


図9 高周波焼入試験片の応力ひずみ曲線  
Stress-strain curves of induction hardened specimen

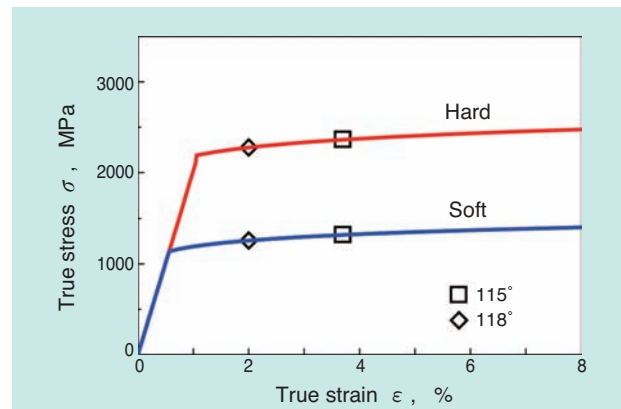


図10 浸炭焼入試験片の応力ひずみ曲線  
Stress-strain curves of carburized specimen

なり，浸炭焼入部品の方が硬さも降伏応力も大きくなっていることが確認できる。

高周波焼入は表面のみを硬化させ，内部はもとの組織のままである。一方，浸炭焼入は表面が硬化し，内部の硬度もやや高くなる。得られた試験結果はそれぞれの熱処理の特徴をよく示しており，熱処理の影響に応じて局所的な  $\sigma - \epsilon$  曲線の明確な差として示すことができた。

## 5. まとめ

様々な熱処理を施した高強度鋼の試験片に対して，稜間角が  $115^\circ$  と  $118^\circ$  の三角錐圧子での2圧子法により引張試験の結果とほぼ同等な応力ひずみ特性を得ることができた。

表層硬化部品の力学特性評価において，高周波焼入および浸炭焼入の熱処理の相違が局所的に求めた応力ひずみ特性から確認できた。

$100^\circ$  圧子の圧痕周辺にはパイルアップ（盛り上がり）が確認された。圧痕周辺にパイルアップがあると，押し込み力と押し込み深さの関係が影響を受け，2圧子法が適用できなくなる。

2圧子法により得られた応力ひずみ特性を実機の解析に使用することで，従来よりも詳細な弾塑性解析を行うことが可能になる。

## 参考文献

- 1) 小笠原永久，巻口和香子，千葉矩正，“複数の三角錐圧子押し込みによるべき乗硬化材の塑性特性評価法”，日本機械学会論文集A編，Vol. 70, No.698 (2004)，pp.1529-1534.
- 2) Akio Yonezu, Takeshi Ogawa and Mikio Takemoto, Key Engineering Materials, Vols. 353-358, pp.2223-2226 (2007).
- 3) 大野卓志，米津明生，小川武史，秋光 純，“インデンテーション法による微小領域の力学特性および強度評価”，材料試験技術，Vol.49, No.3(2004)，pp.149-156.

## 執筆者近影



小川 武史

青山学院大学  
理工学部機械創造工学科教授



坂中 則暁

先端技術研究所



松原 幸生

先端技術研究所

# TMR効果を利用した最先端磁気センシング

## TMR: A New Frontier for Magnetic Sensing

Christophe DURET\*  
上野 新太郎\* Shintarou UENO



トンネル磁気抵抗 (TMR) 効果を利用した新たな線形磁気センサ技術を紹介する。TMR 効果の原理は、2007年に初めてノーベル物理学賞で認められた新たな研究分野であるスピントロニクスに基づいている。電子を電荷として扱う従来の電子工学とは対照的に、磁気トンネル接合 (MTJ) 素子は、電子の量子スピン状態も利用する。NTN-SNRは2005年から2010年までフランス国立研究機構のCAMELプロジェクトに参画し、センサ用途のMTJ素子を開発、広い動作距離、高い設計自由度、厳しい環境に対するロバスト性、コストパフォーマンスなど、既存技術と比較して優れた性能を確認した。本稿では、TMR効果を利用したセンサの優れた特性を解説すると共に、新たな磁気センシングの可能性について述べる。

We present here a new linear magnetic sensing technology, based on Tunnel Magneto Resistance (TMR). The TMR principle derives from Spintronics, a new branch of Physics which received the 2007 Nobel Prize in Physics. Contrary to “traditional” electronics, a Magnetic Tunnel Junction (MTJ) uses not only the electric charge of the electron, but also its quantum spin value.

During the CAMEL project, we have designed MTJs for sensor applications, i.e. for having, compared to other existing technologies, greater performances, extended working ranges and design capabilities, the robustness needed for harsh mounting and working conditions and of course a cost compatible with a market introduction. The fascinating properties of the TMR sensing elements we have developed open the door to many new possibilities of magnetic sensing.

### 1. NTN-SNRの磁気センシング技術

#### 1.1 アクティブセンサ付軸受ASB®

NTN-SNRは、自動車のアンチロック・ブレーキ・システム (ABS) や横滑り防止装置 (ESP) に使用される車輪速の検出技術として、図1に示すアクティブセンサ付軸受ASB®を開発した。重量やスペースの削減、厳しい環境に対するロバスト性やゼロ速検出機能などを改善し、ASB®は自動車産業における車輪速の検出の事実上の世界標準技術となっている。以下にASB®の構成について示す。

- ターゲット磁石

軸受シールに一体化した多極リング磁石。車輪の回転速度に比例した周波数の交番磁界を発生する。

- 検出素子

磁気抵抗効果またはホール効果を利用した検出素

子。ターゲット磁石が発生する交番磁界を非接触で測定し、ABSやESPで利用する車輪回転速度を算出する。



図1 ASB®の構成例  
Example of ASB integration in a roller bearing unit

\*NTN-SNR ROULEMENTS Research & Innovation Mechatronics

## 1.2 高分解能回転センサMPS40Sの開発と応用

ASB®開発後、ステアリングの操舵角や電動モータの制御用に回転角度を高精度に検出する低コストなセンサの研究を継続し、**図2**に示すホール素子と信号処理回路を内蔵した特定用途向け集積回路MPS40S<sup>1)</sup>を開発した。MPS40Sは、高分解能パルス信号や、原点位置信号を出力する機能に加え、広範囲の磁極幅に適用可能な汎用性も備え<sup>2)</sup>、自動車用途向け電子部品としての品質規格AEC-Q100も満足する。

サーボモータの回転制御など、産業機械へのMPS40Sの展開も図っている。**図3**にMPS40Sと軸受をユニット化し、機器への組み付け性を向上させた「原点信号出力タイプ高分解能回転センサ付軸受<sup>3)</sup>」を示す。

MPS40Sを応用した事例として、**図4**にバーニヤ原理により絶対角度を検出する高精度磁気式角度センサ<sup>4)</sup>を紹介する。本センサは、既存の軸端配置のセンサでは難しかった中空軸への対応が可能である。軸受の回転輪に多極リング磁石を一体化し、固定輪に信号処理回路を内蔵した検出部を配置することで、組み込

み時の軸方向スキマ調整を不要とした。専用多極リング磁石には内側と外側で磁極数が異なる同心円状の2列の磁気パターンを着磁してパターンの相対位置ずれ量を磁気センサ信号から算出することで、高速回転中でも高精度に絶対角度を演算できる。

## 2. 各種磁気センサの特徴

幅広いアプリケーションに磁気センシング技術を適用するためには、出力精度・周波数帯域・消費電力などの磁気検出センサの基本性能、エアギャップ・温度に対する動作範囲、センサ寸法、取り付け公差、ロバスト性、コストなどを考慮する必要がある。自動車や産業機械用途の厳しい使用環境下では、ホール素子、異方性磁気抵抗 (AMR) 素子、巨大磁気抵抗 (GMR) 素子が代表的な磁界検出手段としてセンサに使用される<sup>5)</sup>。以下にそれぞれの特徴を示す。

### ●ホール素子

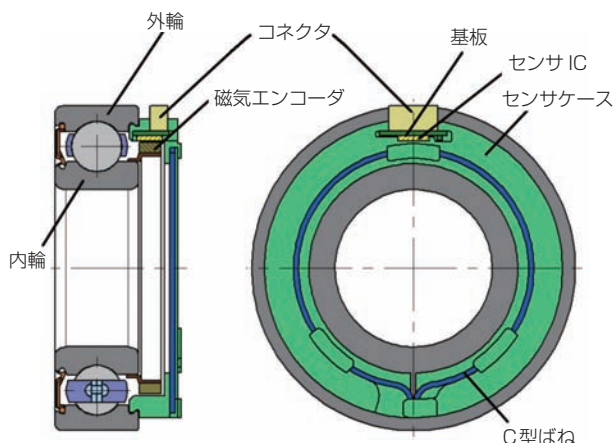
直線性が非常に良く安価である。一方、感度が限られており、消費電力およびオフセットドリフトが大きい。

### ●AMR素子

感度がホール素子より高くヒステリシスも少ない。更に、バーバーポール構造と呼ばれる特殊なセンサ



**図2** MPS40S外観  
Appearance of MPS40S



**図3** 高分解能回転センサ付軸受  
High resolution sensor bearing



**図4** 高精度磁気式角度センサ  
High precision magnetic angle sensor



構造やフリップ駆動方法、安定化用磁石を配することにより、直線性・オフセットフリー・高磁界検出の実現が可能。一方、高温環境下では感度低下・直線性の微小な劣化が見られる。

#### ● GMR素子

3つの素子の中で最も感度が高く、入力磁界強度の許容範囲も広い。ただし直線性などの性能は、温度や入力磁界強度が動作領域を超えた途端、著しく劣化する。

### 3. トンネル磁気抵抗(TMR)効果

MTJ素子\*1の基礎理論は、既存の電子工学に基づく電子の電気的性質に加え、電子の量子スピン状態を活用したスピントロニクスに基づいている。2007年にPr. A. FertとPr. P. Grünbergがノーベル物理学賞を受賞したことにより、スピントロニクスは一気に注目を集めた。

図5に示すように、MTJ素子は、一般的に酸化アルミニウム ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) や酸化マグネシウム ( $\text{MgO}$ ) で形成した絶縁体の薄膜層を、2つの強磁性体層で挟み込んだ構造であり、GMR素子と非常に似た積層構造を持っている。MTJ素子は、これらの層に対して垂直な方向に電流が流れ、一方の強磁性体層内の電子が

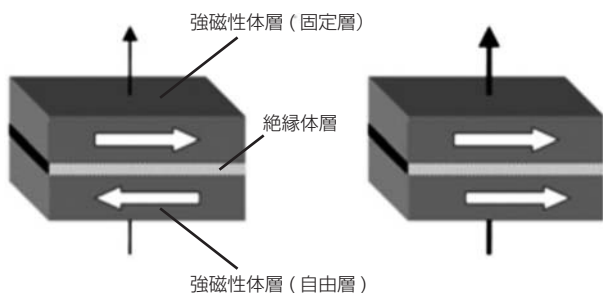


図5 異なる磁化方向の関係にあるMTJ素子  
(左：磁化方向が反平行，右：平行。  
黒矢印：電流の向き，白矢印：磁化方向)

Representation of a MTJ in an antiparallel magnetization configuration (left) and in a parallel magnetization configuration (right). The black arrow represents the current going through the junction

量子力学的効果によって絶縁体層を通過し、トンネル効果でもう一方の強磁性体層内に注入される。その際、2つの強磁性体層の磁化方向の相対角度差に応じ通過する電流に対する電気抵抗値が大きく変わり、2層の磁化方向が反平行の場合は高抵抗、平行の場合は低抵抗、つまり、2層の磁化方向の相対角度に応じて抵抗値が変化する。このような現象をトンネル磁気抵抗 (TMR) 効果\*2という。この効果を利用して外部磁界を検出するためには、外部磁界に対し一方の強磁性体層(固定層、ピン層とも呼ばれる)の磁化方向が固定されたままで、他方の強磁性体層(自由層、フリー層と呼ばれる)の磁化方向が外部磁界に応じて変化するよう構成する。

低温でのTMR効果は1975年に発見されたが<sup>6)</sup>、応用が困難として当時はほとんど注目されなかった。しかし、1995年、室温・低磁界で20%近い磁気抵抗変化(当時の最高値)を実現し、TMR効果は一躍脚光を浴びることになった<sup>7) 8)</sup>。

近年の研究では、絶縁体層の材料としてアモルファスの $\text{Al}_2\text{O}_3$ に代えて結晶性の $\text{MgO}$  (100) を用い、室温で約600%<sup>9)</sup> という非常に高い磁気抵抗変化を実現できることが報告されている<sup>10) 11)</sup>。TMR効果は、近年ハードディスクの読み込みヘッドに利用されているが、0と1の量子情報を読み書きする磁気抵抗メモリ(MRAM<sup>12)</sup>)や磁気センサとしての用途開発は始まったばかりである<sup>13) 14)</sup>。また、MTJ素子を磁気センサに適用するには、MRAMやハードディスクヘッドとは異なり、外部磁界の強さや方向に比例して抵抗値を変化させる必要がある。

### 4. CAMELプロジェクト

NTN-SNRは、2000年以降TMR効果の研究開発に注力し<sup>15) 16) 17)</sup>、MTJ素子の積層構造やセンサ構成など基礎的な研究成果の特許を出願している。また、2005年から2010年までCAMELプロジェクト(“CApteur Magnétique à effet tunnEL”の略)で技術開発・実用化の加速を図った。本プロジェクトは、フランス国立研究機構(ANR)の支援を受け、NTN-SNR社(エンドユーザー・プロジェクトリーダー)、Sensitec社(MTJ素子の作製)、および2つの公的研究機関の産学連携で進められた。

本プロジェクトは、センサ用途をターゲットとしたMTJ素子および線形磁気センシング技術の確立、

\*1 MTJ素子：Magnetic Tunnel Junction element。  
バリア層、トンネル障壁とも呼ばれる厚さ数nmの絶縁体層の両側を、強磁性金属極である2つの強磁性体層で挟み込んだ素子。

\*2 TMR効果：Tunnel Magnetoresistance Effect。  
MTJ素子によって抵抗変化が起こる現象。

Sensitec社が保有するAMR・GMR素子の既存製造ラインを活用した生産、量産への適応性を評価している<sup>18)</sup>。TMR効果を活用した線形磁気センシングの例は図6の右のグラフに示すように、測定結果は直線近似とほぼ一致し、ヒステリシスも十分小さいことが確かめられた。

なお、本プロジェクトは、優れた基礎技術を発展させ実用化に導いた功績が認められ、2010年フランス物理学会からイブ・ロカール賞（Yves Rocard）が授与された。

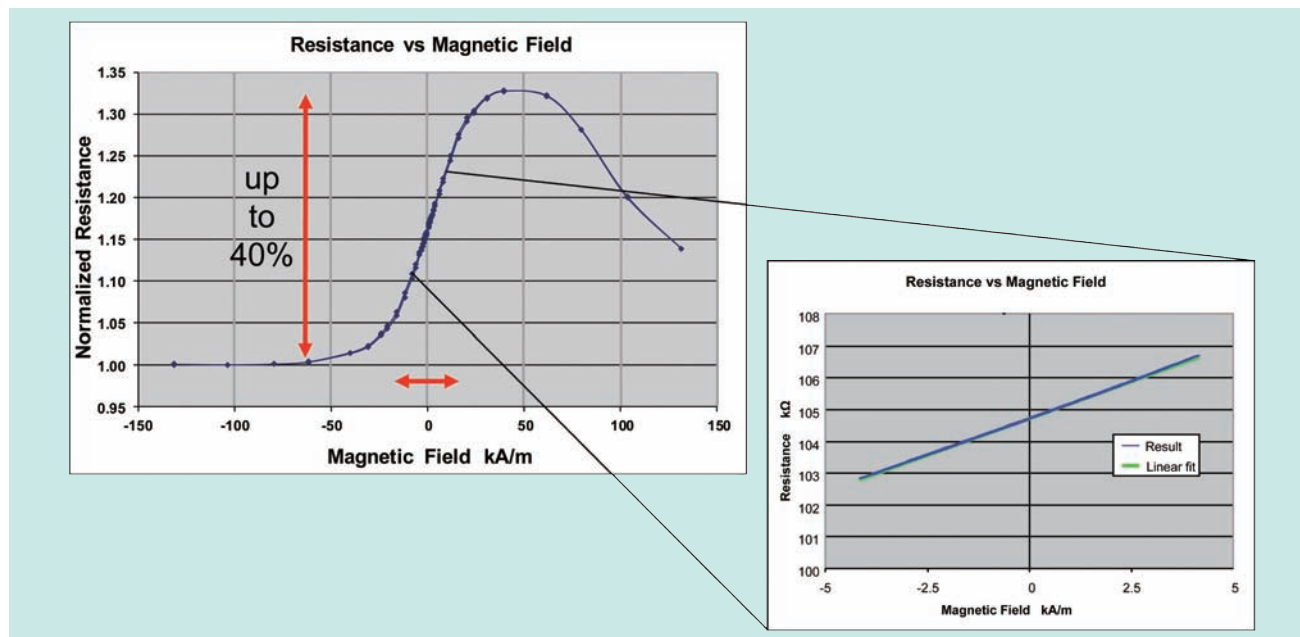


図6 TMR効果を活用した線形磁気センシングの例  
Example of transfer curve for a MTJ with the following structure

## 5. TMR効果の最先端磁気センシング 技術への適用

開発したTMR効果を利用したセンサ（以下、TMRセンサ）の重要な特性について述べる。TMRセンサの構造、実験結果の詳細については本稿では割愛する。詳しくは参考文献<sup>17)</sup> <sup>18)</sup> <sup>19)</sup>を参照されたい。

### 5.1 基本性能

#### 1) 低消費電力

MTJ素子は内部抵抗が高いため、TMRセンサの消費電力はAMRセンサの1/100、ホールセンサの1/1000程度である<sup>19)</sup>。周辺の信号処理回路を考慮しても消費電力は十分小さく、小型のバッテリーや環境発電素子でシステムの製品寿命を超える期間、動作させることが可能で、自律型ワイヤレスセンサへの展開が期待できる。一例として6ヶ月間の連続使用に必要なボタン電池数の比較イメージを図7に示す。

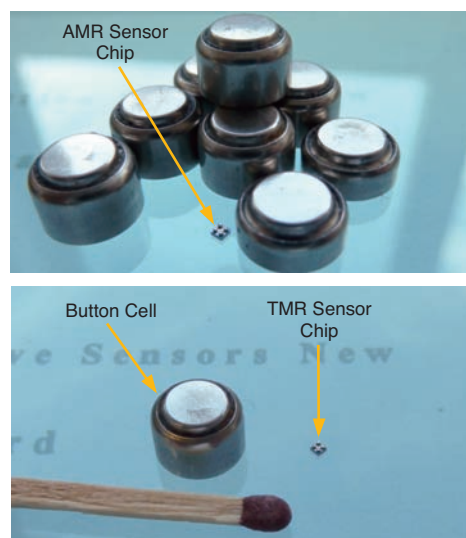


図7 低消費電力・コストパフォーマンスにおけるTMRセンサの優位性  
(6ヶ月連続使用に必要なボタン電池数の比較)  
Power and Cost comparison of an AMR and a TMR sensor after 6 months of continuous use

## 2) 高検出精度

センサの検出精度は、直線性・ヒステリシス特性・感度・SN比の組み合わせで評価される。開発したTMRセンサを既存のAMR・GMR・ホール素子を用いたセンサと比較すると以下のような特徴がある。

高磁界検出用ホールセンサの直線性や、低磁界検出用AMR・GMRセンサのヒステリシス特性は、どちらも極めて優れているが、一長一短があり全ての特性について優れているわけではない。一方、TMRセンサは他のセンサと比べ、あらゆる特性で高いレベルの性能を示しており、低磁界から高磁界まで広い範囲での検出用途として期待できる。なお、次章で紹介する評価キットにより位置検出精度の検証が可能である。

また、AMRセンサを絶対角度検出に用いた場合、外部磁界の角度に対して180度までの範囲しか検出できないが、TMRセンサの場合360度（1回転）を検出することが可能である。TMRセンサが持つ広範囲の入力磁界強度、優れた直線性、低ヒステリシスの特性を活用することで、軸端配置の角度検出アプリケーションへ応用できる。

磁気検出感度に関してはSQUID<sup>\*3</sup>の性能が優れているものの、MTJ素子の1/fノイズや熱雑音が1nT/Hz<sup>1/2</sup>レベルに抑えられることが実証されており、医療や非破壊検査用途として空間分解能の高度化、低コスト化を実現できることが示唆されている<sup>20)</sup>。

## 5.2 動作範囲

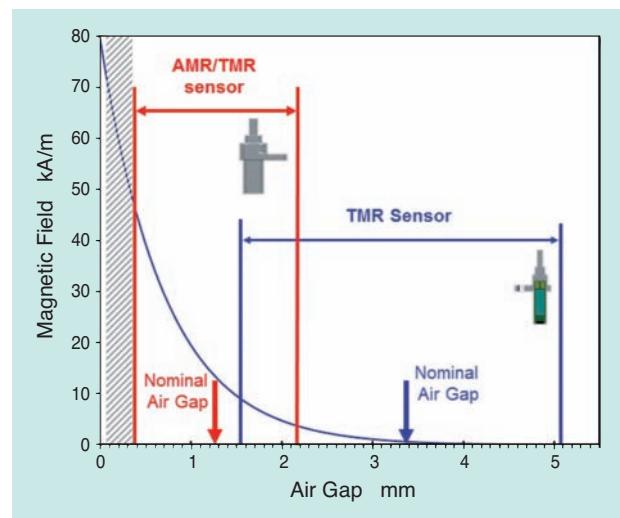
### 1) 広動作温度範囲

高温動作寿命試験では、150℃を超える高温状態においてもMTJ素子内の原子の拡散が起こらないことが確認されている。また、他のセンサとは異なり、温度上昇に伴い感度が増加するよう設計することで、温度上昇に伴う磁力の減少を補償することが可能である。したがって、高温領域でも、室温動作と同等のエアギャップ量での検出が可能である。

### 2) 広範囲エアギャップ<sup>\*4</sup>

ABSなどの車輪速の検出に用いられるAMRセンサでは、エアギャップの設定値は一般に2mm程度であり、特に、高分解能や高精度が要求される場合は1mm以下に設定する場合もある。

TMRセンサの感度はAMRセンサの10倍、GMRセンサの3倍程度で、地磁気のような $\mu$ Tオーダーの磁界測定にも対応できるほど内部ノイズが少ない。このため、**図8**に示すとおり最大5mmのエアギャップでの検出も可能であり、設計の自由度が飛躍的に向上する。例えば、防塵・耐油・耐熱特性の向上を目的として、センサとリング磁石の間にステンレス、アルミニウム、プラスチックなどの別の非磁性体壁を設ける構造が実現可能である。



**図8** TMRセンサのエアギャップ設定値  
Magnetic field generated by an elastoferrite pole ring as a function of the air gap

## 5.3 設計自由度

### 1) 小型サイズ

AMR素子やGMR素子とは異なり、MTJ素子は素子を構成する積層された各層に対し垂直方向に電流が流れるため、エッチング加工性能やサイドエッチング性能などの製造工程を工夫することで、センサの面積を非常に小さくすることが可能である。記録密度が最も重要なパラメータであるMRAMでは、MTJ素子1つ当たりの面積は $1\mu\text{m}^2$ 以下で構成可能である。一方、センサ用途では、ボンディングパッドに最低限の大きさを確保し、動作を保証する必要があるが、AMRセンサ比約30%減程度のサイズで実現可能である。

### 2) 取り付け公差の拡大

速度や位置検出用途の磁気センサは、センサおよび磁石の取り付け精度による影響を受けやすく、取り付けが適切でない場合、信号の検出ができないことや検出精度が劣化することがある。

<sup>\*3</sup> SQUID：超伝導量子干渉素子

<sup>\*4</sup> エアギャップ：センサと磁石ターゲット間の距離



一方、TMRセンサは、[図6](#)に示したように-0.5~0.5kA/mの低磁界から-15~15kA/mの高磁界まで広範囲で動作するため、用途に応じて最適設計がしやすく、取り付け公差を拡大することが可能である。

## 5.4 ロバスト性

### 1) 静電気放電 (ESD) 耐性

MTJ素子は、非常に薄いナノメートルスケールの絶縁体が挟み込まれたキャパシタと見なされ、絶縁破壊のリスクが高いが、以下によりリスクを軽減している。

- 絶縁体層の品質を向上し、絶縁耐圧を高める。
- 複数のMTJ素子を直列接続し、MTJ素子1つあたりのESD電圧を分散させる。
- ESDはセンサのパッケージ工程で発生する機会が多いため、TMRセンサと信号処理回路の接続工程を管理し、作業を速やかに行うことでリスクを軽減する。

上記対策を含め、プリント基板実装後のマシンモデルに基づいた試験では、絶縁破壊リスクが改善された。

### 2) 高磁界に対する耐性

[図6](#)に示すようにTMRの抵抗値は外部磁界に対し可逆特性を持つので、希土類磁石のような強い磁界をTMRセンサに与えても破壊することはない。

## 5.5 コスト

### 1) 設備投資コスト

先に述べたように、MTJ素子はSensitec社が現在保有するAMR・GMR素子の製造設備をそのまま利用して製作している。つまりTMRセンサの製造は、GMR素子の製造とほぼ同じプロセス・材料が使用され、量産のための特別な設備投資が不要である。

### 2) TMRセンサによるコスト削減効果

以下に、コスト削減効果を示す。

- センサチップの小型化が可能で、一枚のウェハからより多くのチップを製造可能。
- 極低磁界の検出が可能のため、高価な希土類磁石でなく、安価なフェライト磁石などの使用が可能。
- 素子自体の抵抗値が高いため増幅回路が不要で信号処理回路の簡素化による低消費電力駆動が可能。

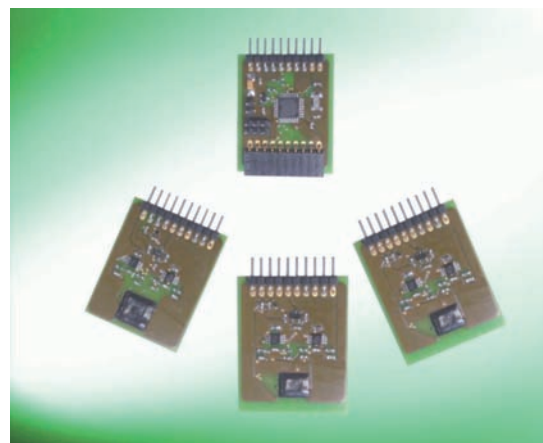
### 3) システム全体としてのコスト低減

電動モータやABSなどの用途では、センシング機能だけでなく、周辺部品を含んだシステムの構成を考慮し、製造や取り付け方法への配慮が求められる。

TMRセンサのように、エアギャップおよび取り付け公差が広いほど加工・取り付けへの要求が緩和されるとともに、組立工程の簡略化により最終的な製造コスト低減につながる。

## 6. TMRセンサ評価キット

NTN-SNRとSensitec社は、TMRセンサ技術の普及を図るため、3種類の回転・位置検出用評価キットを製作し、ユーザーへ提供している ([図9](#), [図10](#))。評価キットの構成を以下に示す。



**図9** TMRセンサ付きサンプル基板  
TMR Evaluation PCB



**図10** TMRセンサ評価キット  
The three TMR Evaluation Kits



## キット①

## 低消費電力駆動 デモセット

- ・軸端配置による360度の角度検出が可能な、TMRセンサ付きサンプル基板
- ・低消費電力マイコンによるSPI通信
- ・ソーラーセル
- ・軸端配置用磁石

## キット②

## アクティブセンシング\*5 デモセット

- ・TMRセンサ付きサンプル基板
- ・高分解能パルス出力 (AB相)
- ・アナログ出力
- ・多極磁石 (リニアおよびリング磁石)

## キット③

## パッシブセンシング\*6 デモセット

- ・TMRセンサ付きサンプル基板+バイアス磁石
- ・高分解能パルス出力 (AB相)
- ・アナログ出力
- ・リニアおよびリングギア

## 7. あとがき

TMRセンサは下記の極めて優れた特性を有しており、自動車や産業機械用の次世代磁気センサとして高い潜在能力を備えている。

- 基本性能 (低消費電力・高出力精度・高感度)
- 動作範囲 (高温対応・広範囲エアギャップ・360度の角度検出・極低磁界検出)
- 設計自由度 (センササイズの小型化・取り付け公差の拡大)
- ロバスト性 (ESD対策, 高磁界強度対応)
- 低コスト

上記を活用して、速度センサ・位置センサだけでなく、電子コンパス・スイッチ・非破壊検査・電流センサ・画像装置・医療分野など数多くの用途展開が期待できる。

NTN-SNRを含めたNTNグループでは、TMRセンサのさらなる改良と、新たな市場展開を積極的に図る所存である。

## 参考文献

- 1) P. Desbiolles, A. Friz: Development of High Resolution Sensor Element MPS40S and Dual Track Magnetic Encoder for Rotational Speed and Position Measurement, NTN TECHNICAL REVIEW, 75 (2007) 36-41.
- 2) [http://www.ntn-snr.com/industry/fr/en-en/file.cfm/MPS40S\\_datasheet\\_rev0.pdf?contentID=4826](http://www.ntn-snr.com/industry/fr/en-en/file.cfm/MPS40S_datasheet_rev0.pdf?contentID=4826)
- 3) H. Ito, T. Takahashi, P. Desbiolles, C. Peterschmitt, S. Ueno: High resolution sensor bearing with an index signal, NTN TECHNICAL REVIEW, 78 (2010)
- 4) [http://www.ntn.co.jp/english/news/news\\_files/new\\_products/news201000026.html](http://www.ntn.co.jp/english/news/news_files/new_products/news201000026.html)
- 5) C.P.O. Treutler: Magnetic sensors for automotive applications, Sensors and Actuators A91, 2-6 (2001)
- 6) M. Jullière: Tunneling between ferromagnetic films, Physics Letters, vol 54A, p225-226, 1975.
- 7) T. Miyazaki, N. Tezuka: Giant magnetic tunneling effect in Fe/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Fe junction, Journal of Magnetism and Magnetic Materials 139, L231-L234 (1995)
- 8) J.S. Moodera, L.R. Kinder, T.M. Wong and R. Meservey: Large Magnetoresistance at Room Temperature in Ferromagnetic Thin Film Tunnel Junctions, Physical Review Letters, vol. 74, p. 3273-3276, 1995.
- 9) S. Ikeda, J. Hayakawa, Y. Ashizawa, Y. M. Lee, K. Miura, H. Hasegawa, M. Tsunoda, F. Matsukura, H. Ohno: Tunnel magnetoresistance of 604% at 300K by suppression of Ta diffusion in CoFeB/MgO/CoFeB pseudo-spin-valves annealed at high temperature, Applied Physics Letters, 93, 082508 (2008)
- 10) S. Yuasa, T. Nagahama, A. Fukushima, Y. Suzuki, K. Ando: Giant room-temperature magnetoresistance in single-crystal Fe/MgO/Fe magnetic tunnel junctions, Nature Materials, 3, p868-871, (2004)
- 11) S. S. P. Parkin, C. Kaiser, A. Panchula, P. M. Rice, B. Hughes, M. Samant, S-H Yang: Giant tunnelling magnetoresistance at room temperature with MgO (100) tunnel barriers, Nature Materials,3, p862-867 (2004)
- 12) B. N. Engel and al.: A4-Mb Toggle MRAM Based on a Novel Bit and Switching Method, IEEE Transactions on Magnetics, VOL. 41, NO. 1, p132-136, JANUARY 2005
- 13) [www.nve.com/Downloads/AAT001.pdf](http://www.nve.com/Downloads/AAT001.pdf)
- 14) [http://cache.freescale.com/files/sensors/doc/data\\_sheet/MAG3110.pdf?pspll=1](http://cache.freescale.com/files/sensors/doc/data_sheet/MAG3110.pdf?pspll=1)
- 15) G. Malinowski, M. Hehn, S. Robert, O. Lenoble, and A. Schuhl: Magnetic origin of enhanced top exchange biasing in Py/IrMn/Py multilayers, Phys. Rev. B 68, 184404, 2003

\*5 アクティブセンシング：多極磁石を検出ターゲットとした検出方法

\*6 パッシブセンシング：センサの背面に磁石を配置し、磁性体の通過による磁気抵抗の変化を検出する方法

- 16) G. Malinowski, M. Hehn, F. Montaigne, E. Jouguelet, and A. Schuhl: Intrinsic thermally compensated field sensor based on single magnetic tunnel junctions, *Applied Physics Letters*, 84, 1204, 2004
- 17) G. Malinowski, M. Hehn, F. Montaigne, A. Schuhl, C. Duret, R. Nantua, G. Chaumontet: Angular magnetic field sensor for automotive applications based on magnetic tunnel junctions using a current loop layout configuration, *Sensors and Actuators A*, 144, p263–266 (2008)
- 18) B. Negulescu, M. Hehn, A. Gerken, J. Paul, C. Duret: Magnetic tunnel junction linear field sensor for industrial applications, *Proc. of 10th MR Symposium*, Wetzlar, 2009
- 19) J. Paul, R. Lehndorff and C. Duret: Ressourceneffizienz am Beispiel magnetoresistiver Sensoren, *Proc. of MikroSystemTechnik Kongress*, 2011
- 20) R. Guerrero, M. Pannetier-Lecoeur, C. Fermon, S. Cardoso, R. Ferreira and P.P. Freitas: Low frequency noise in arrays of magnetic tunnel junctions connected in series and parallel, *Journal of Applied Physics*, 105, 113922 (2009)

## 執筆者近影



**Christophe DURET**  
NTN-SNR  
Research & Innovation  
Mechatronics



**上野 新太郎**  
NTN-SNR  
Research & Innovation  
Mechatronics

## 鉄道車両車軸軸受用グリースの長寿命化 Long Life Technology of Grease for Journal Bearing

田中 崇剛\* Takamasa TANAKA  
三上 英信\*\* Hidenobu MIKAMI



鉄道車両用軸受は、車両の走行に直接影響する重要部品であることから、高い信頼性が要求される。その中で車体を支える車軸軸受は、グリース潤滑の密封形複列円すいころ軸受が主流である。密封形複列円すいころ軸受はころと軌道面が線接触するため、点接触する玉軸受と比べ潤滑により多くの油を必要とする。車軸軸受用長寿命グリースの開発を目的とし、油分離性の異なる試作グリースを封入した円すいころ軸受の耐久試験を行った結果、適度に油分離するグリースが長寿命であることがわかった。

Journal bearings are very important components of railway vehicles due to that they directly affects vehicles' running stability. Sealed type double row tapered roller bearings with grease packed are mainly used as journal bearings. The grease packed in the bearing has a tendency to move out from contact surface of raceways, and it can be said good oil providing capability of the grease to raceways is the important factor for the grease life.

Grease packed double row tapered roller bearings had been tested to investigate the relationship between oil separation of grease and metal contact of bearings. As a result, it was observed that bearings would be kept in good lubrication conditions by using the greases which had proper oil separation performance. In this paper, we report about the effect on lubrication condition of rolling bearing due to oil separation of grease.

### 1. はじめに

代表的な鉄道車両用軸受には、車両の動力部に使用される主電動機用軸受、動力伝達部に使用される駆動装置用軸受、輪軸を支える車軸軸受の3種類がある。いずれも車両の走行に直接影響する重要部品であるため、高い信頼性が要求される。メンテナンス周期延伸の要求も高く、信頼性を維持しつつ如何に長寿命化を実現するかが、鉄道車両用軸受の課題である<sup>1)</sup>。

鉄道車両用軸受のうち、車軸軸受はグリース潤滑の密封形複列円すいころ軸受が主流であり、メンテナンス周期延伸にはグリースの長寿命化が必要である。

これまで、軸受部品である保持器やシールの改良によりグリース劣化を抑制する技術が確立されてきた。密封形複列円すいころ軸受はころと軌道面が線接触するため、点接触する玉軸受と比べ潤滑により多くの油を必要とする。そのため、グリースそのものの改良による潤滑寿命の延伸が重要である。

本稿では、鉄道車両車軸軸受用グリースの長寿命化を目的に、油分離性の異なるグリースを封入した円す

いころ軸受の耐久試験を行い、グリースの油分離性が軸受の潤滑状態に及ぼす影響を比較したので結果を報告する。

### 2. 車軸軸受

車軸軸受は、軸箱体の内部に取り付けられ、輪軸を支持する。運転中の軸受には、車両重量によるラジアル荷重、走行中に生じるアキシアル荷重や振動が作用する。軸受形式は様々なものが採用されてきたが、現在では図1に示す密封形複列円すいころ軸受(RCT: Rotating end Cap Tapered roller bearing)が一般的である。

密封形複列円すいころ軸受の構成部品は、内輪、外輪、ころ、保持器、オイルシール、油切り、後ぶたなどである<sup>2)</sup>。潤滑剤には、増ちょう剤がLi石けん、基油が鉱油であるグリースを用いることが一般的である。グリースはころと保持器の間に封入するが、軸受の回転にともなって、一部グリースは軌道面から⑤オイルシール付近まで移動する。密封形複列円すいころ軸受

\*産業機械事業本部 建機・鉄道技術部

\*\*先端技術研究所

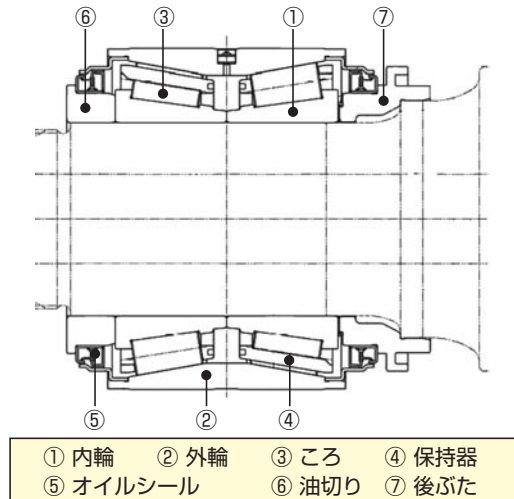


図1 鉄道車両車軸軸受(RCT)  
RCT bearing for axleboxes

は、深溝玉軸受などの他の形式の転がり軸受と比較して、③ころと⑤オイルシール間の空間が大きいため、封入グリースの選定には流動性への配慮が必要である。

車軸軸受のグリース劣化度は、車両のメンテナンス周期を決定する重要な要素の1つである。軸受は定期メンテナンスで分解され、内部状態の確認やグリースの交換が行なわれる。

メンテナンス周期延伸に対しこれまでに様々な対策を行ってきた。例えば、鋼板製保持器を樹脂製保持器で代替し、グリース劣化の原因のひとつである金属摩耗粉発生を抑制した。また、低発熱シールを採用し、グリースの熱劣化を抑制してきた<sup>3)</sup>。これらによりメンテナンス周期を徐々に延伸したが、更なる延伸に対する要求は高く<sup>4)</sup>、グリース自体の長寿命化が求められている。

### 3. グリース潤滑

グリースの長寿命化のため改良すべき特性は、使用箇所や条件によって異なる。

転がり軸受内では、運転初期はグリース自体が転がり面に介入し潤滑を行うが、中期以降は基油が潤滑の主体となる。後期は、油分の不足や劣化により焼き付きに至るといわれている<sup>5)</sup>。

また、円筒ころ軸受においては、軸受の潤滑寿命と充填グリースの油分離性の関係が研究され、長寿命をもたらす適正な油分離性が存在することなどが報告されている<sup>6)</sup>。

本報では、グリースの油分離性が円すいころ軸受の潤滑状態にどのような影響を及ぼすか調査した。

## 4. グリースの油分離性

グリースの油分離性は、基油や、増ちょう剤の種類と量、グリースの製造方法によって変化する。基油、増ちょう剤の種類、量を変えて合計44種類のグリースを試作し、グリース組成と油分離性の関係を調査した。油分離性の測定には、軸受保持器に付着したグリースが遠心力で油分離することを想定し、下記の遠心油分離試験法を用いた。

### 4.1 供試グリース

表1に試作したグリース組成を示す。増ちょう剤にはウレア化合物を3種類、Li石けん増ちょう剤を1種類選択し、それぞれの配合量を変化させた。基油には鉱油と合成炭化水素油を用いた。

表1 試作グリース組成  
Composition of test grease

グループ	M1	M2	M3	M4	S1	S2	S3	S4
増ちょう剤	脂肪族 ウレア	脂環式 ウレア	芳香族 ウレア	Li 石けん	脂肪族 ウレア	脂環式 ウレア	芳香族 ウレア	Li 石けん
増ちょう剤量 wt%	7~13 6通り	7~10 4通り	18~30 6通り	9~13 6通り	11~24 6通り	17~28 6通り	22~41 6通り	16~34 4通り
基油	鉱油			合成炭化水素油				
基油粘度 mm <sup>2</sup> /s (40°C)	100			46				

### 4.2 遠心油分離試験

遠心分離器を用いて供試グリースの油分離性を調査した。1.0±0.1gの供試グリースを詰めた遠心管を遠心加速度3.9×10<sup>4</sup>G下で1時間回転させ、図2のように遠心管内で分離した油分の重量を測定した。初期グリース重量に対する分離油分の割合として遠心油分離率を式(1)により算出した。

$$\text{遠心油分離率(\%)} = \frac{\text{試験により分離した油分重量(g)}}{\text{初期のグリース重量(g)}} \times 100 \dots (1)$$

遠心油分離率の測定結果を図3、図4に示す。いずれのグリースも、増ちょう剤量が増加すると遠心油分離率が低下する。また、同じ増ちょう剤量で比較すると、増ちょう剤や基油の種類によって遠心油分離率に差が見られる。

図3の鉱油を基油とした場合、増ちょう剤に芳香族ウレア(M3)を使用すると、遠心油分離率が高い傾向があるが、それ以外の増ちょう剤間では顕著な差は見



られなかった。図4の合成炭化水素油を基油に用いた場合には、鉱油を基油に用いた場合と比較して遠心油分離率が全体的に高い傾向がある。増ちょう剤に芳香族ウレアを使用すると遠心油分離率が高い傾向は、ここでも見られた。

増ちょう剤の種類や配合割合、基油の種類が、グリースの遠心油分離率に影響することが分かる。

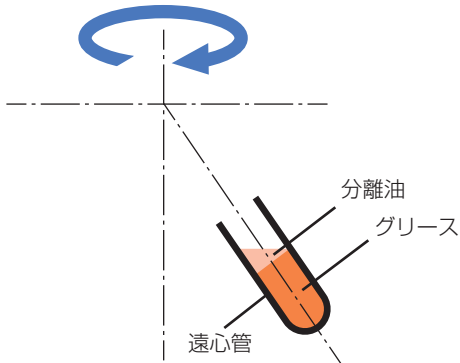


図2 遠心油分離試験概略図

Schematic diagram of centrifugal oil separation test

## 5. 転がり軸受を用いたグリース耐久試験

### 5.1 試験方法

遠心油分離率の異なる5種類のグリースM1-12% (表記は、グループ増ちょう剤量), S2-17%, S3-22%, S4-16%およびS4-31%を転がり軸受の保持器と内輪の間に20g封入して耐久試験した。図5に試験機の概略図を、表2に試験条件を示す。試験軸受には、円すいころ軸受 ( $\phi 70 \times \phi 110 \times 31$ ) を2個使用した。ラジアル荷重を10.78kN負荷し、回転

表2 耐久試験条件  
Endurance test condition

軸受	円すいころ軸受 ( $\phi 70 \times \phi 110 \times 31$ )
軸受個数	2個 (背面合せ)
ラジアル荷重 (軸受2個当たり)	10.78kN
回転速度	3000min <sup>-1</sup>
温度	室温
試験時間	2000~10000時間

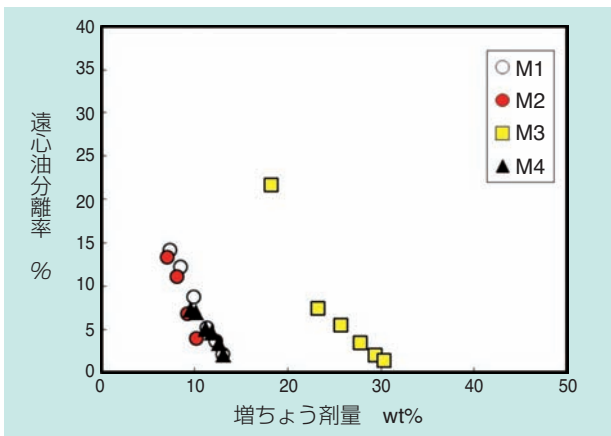


図3 供試グリースの油分離性 (M1-M4)  
Oil separation of test grease (M1 to M4)

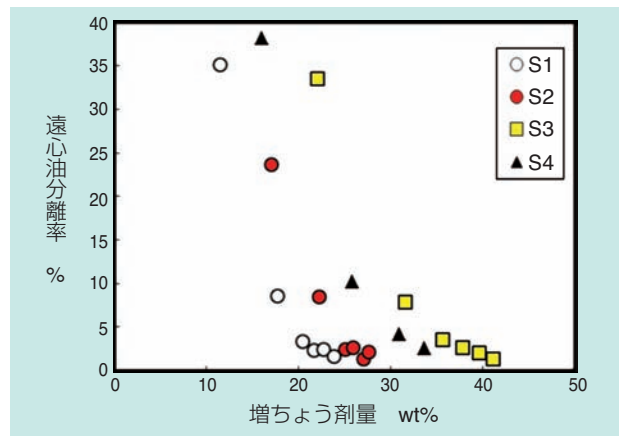


図4 供試グリースの油分離性 (S1-S4)  
Oil separation of test grease (S1 to S4)

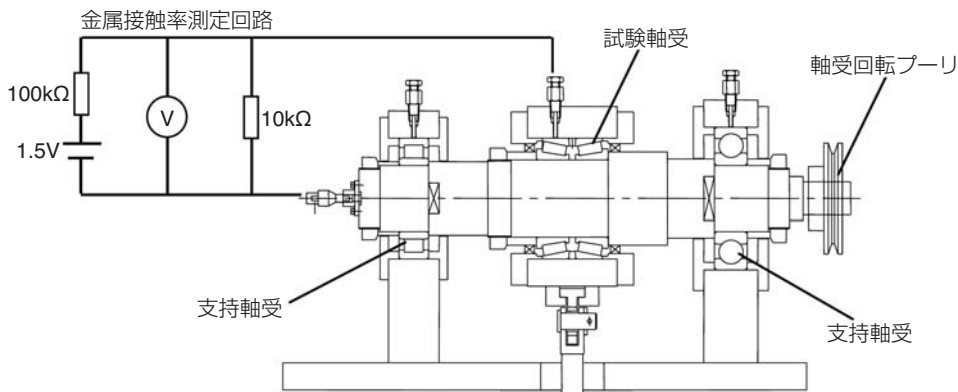


図5 耐久試験機概略図  
Endurance test equipment

速度3000min<sup>-1</sup>で軸受を回転させた。運転中、電気抵抗法により転がり軸受の内-外輪間の金属接触率を測定した。一定時間運転後に停止し、グリースの油分減少率を測定した。金属接触率の算出方法を式(2)に、油分減少率の算出方法を式(3)に示す。

$$\text{金属接触率 (\%)} = \frac{\text{絶縁時の電圧 (V)} - \text{運転時の電圧 (V)}}{\text{絶縁時の電圧 (V)}} \times 100 \dots (2)$$

$$\text{油分減少率 (\%)} = \left(1 - \frac{\text{使用后グリースの増ちょう剤量 (\%)}}{\text{初期グリースの増ちょう剤量 (\%)}}\right) \times 100 \dots (3)$$

### 5.2 試験後グリースの状態変化

図6に耐久試験中のS4-16%グリースの挙動を示す。グリースは、運転初期には軸受内部に全量が存在

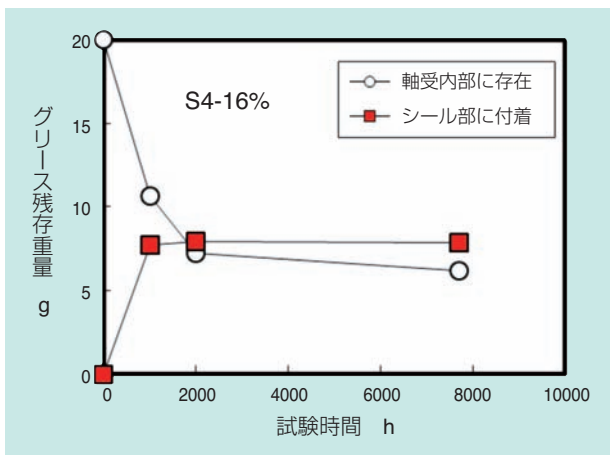


図6 耐久試験中のS4-16%グリースの挙動  
Change of grease amount by test duration

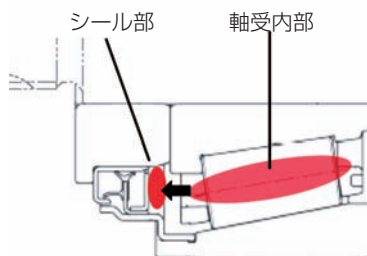


図7 軸受運転時のグリース移動状態  
Transfer state of grease in operation

しているが、軸受を回転させると、図7のように、シール部に移動する。また、運転後2000時間以降、グリースはほとんど移動しないことがわかる。

図8に軸受内部に残存したグリースとシール部に付着したグリースの油分減少率を示す。軸受内部に残存したグリースの油分減少率は2000時間後も増加し続けていることから、本試験において、これ以降は軸受内部に残存したグリースから分離した油分で軌道面の潤滑が維持されていると考える。

図9に耐久試験後の軸受内部グリースの油分減少率と遠心油分離率の関係を示す。両者には指数関数的な相関があり、本試験における軸受内部グリースの油分離は、遠心力的作用によると考えられる。

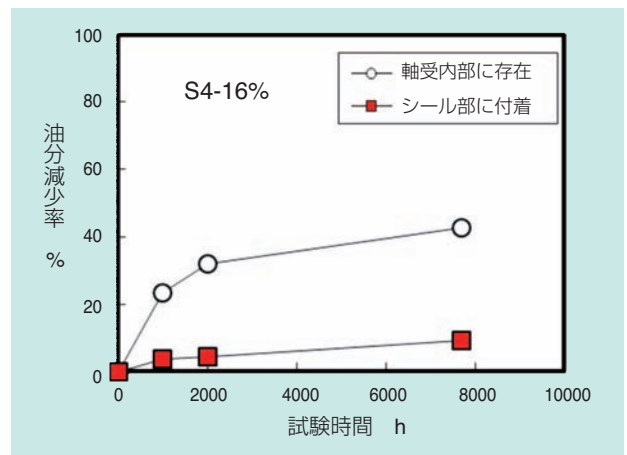


図8 耐久試験時間と油分減少率の関係  
Relationship between test duration and oil reduction

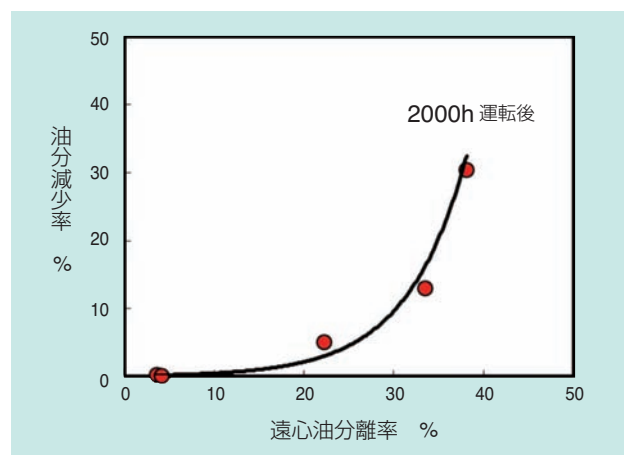


図9 耐久試験後の軸受内部グリース油分減少率  
Reduction rate of bearing inside grease after test

### 5.3 試験後グリースの油分減少率

図10～14に5種類のグリース封入軸受の軸受外輪温度と内-外輪間の金属接触率を示す。図10に示すS4-16%グリースは、3000時間経過後、金属接触率、軸受温度とも不安定となった。図11に示すM1-12%グリースおよび図14に示すS4-31%グリースは、初期より金属接触率、軸受温度とも高かったため、それぞれ2000時間、5000時間で試験を打ち切った。これに対して、図12に示すS2-17%グリースおよび図13に示すS3-22%グリースは7500時間以上安定して運転可能であった。

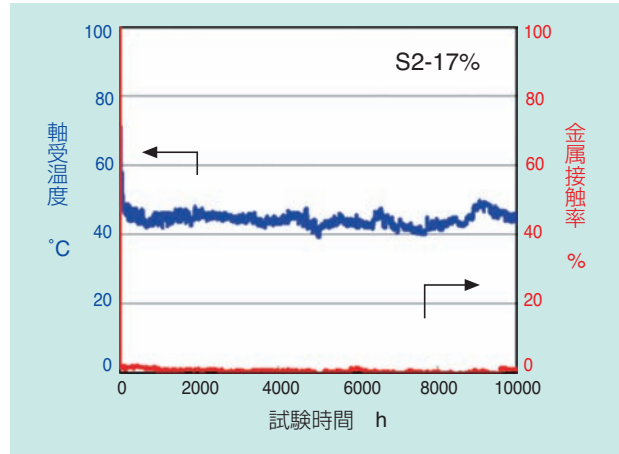


図12 試験軸受の温度，金属接触率 (S2-17%)  
Bearing temperature and metal contact ratio (S2-17%)

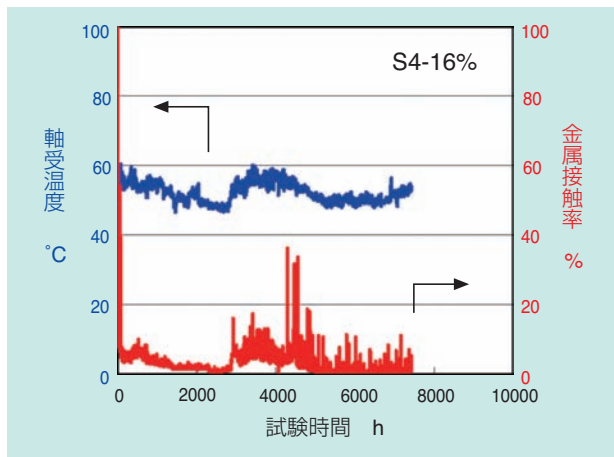


図10 試験軸受の温度，金属接触率 (S4-16%)  
Bearing temperature and metal contact ratio (S4-16%)

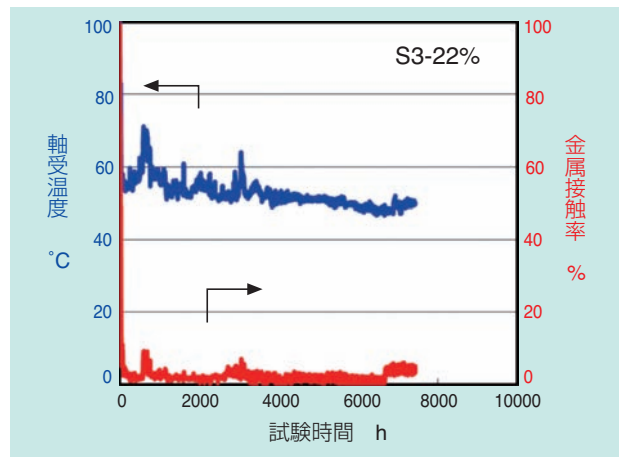


図13 試験軸受の温度，金属接触率 (S3-22%)  
Bearing temperature and metal contact ratio (S3-22%)

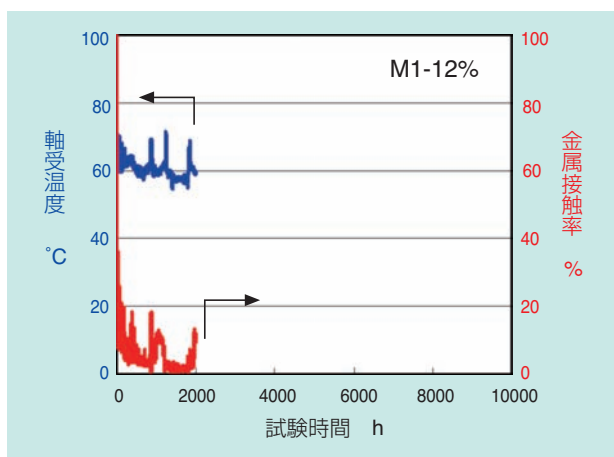


図11 試験軸受の温度，金属接触率 (M1-12%)  
Bearing temperature and metal contact ratio (M1-12%)

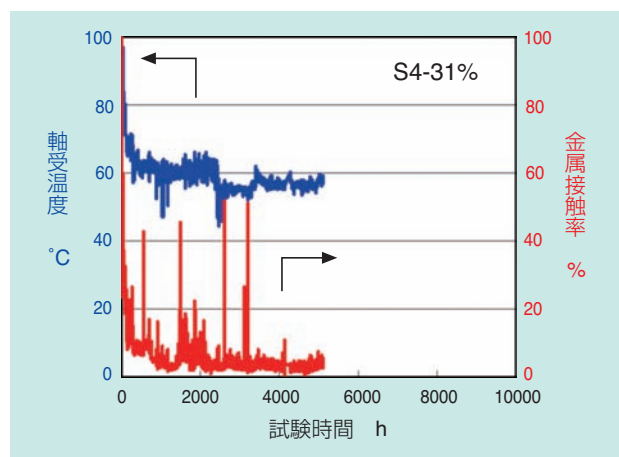


図14 試験軸受の温度，金属接触率 (S4-31%)  
Bearing temperature and metal contact ratio (S4-31%)

軸受耐久試験時の金属接触率から推測した潤滑状態と遠心油分離率の関係を表3にまとめた。本条件で円すいころ軸受を運転した場合、遠心油分離率が高いグリースであっても極端に低いグリースであっても、軸受の潤滑状態は不安定であることがわかる。

遠心油分離率が高いグリースでは、運転初期から多量の潤滑油が転走面に供給されやすい。そのため、長時間の運転では、潤滑油が枯渇して潤滑状態が悪化すると推測される。遠心油分離率が極端に小さいグリースは、転走面に潤滑油が供給されにくいいため、運転初期から潤滑が悪いと考えられる。

一方、適度な遠心油分離率を示すグリースでは、運転中、潤滑油が転走面に供給され続けるため、枯渇が起こりにくく、長時間良好な潤滑状態が維持されると考える。

表3 グリースの遠心油分離率と金属接触率  
Centrifugal separation ratio and metal contact ratio of grease

グリース記号	遠心油分離率 wt%	軸受運転時の金属接触率
S4-16	38.0	△
S3-22	34.0	○
S2-17	22.0	◎
S4-31	4.2	×
M1-12	3.6	×

◎ ○ △ ×  
良 ← → 悪  
判定 (金属接触率)

遠心油分離性が車軸軸受グリースの長寿命化に重要なファクターと考え、鉄道車両車軸軸受の長寿命化に適するグリース組成を検討した。今回得た知見を基に、今後は、より実車の使用条件に近い条件で試験して、適切な油分離を有するグリース組成の有効性を確認し、鉄道車両車軸軸受の長寿命化と信頼性向上に寄与したいと考える。

参考文献

- 1) 一木剛：技術基準と保全技術 JR東日本の新しい車両保全体系，鉄道車両と技術 No.79(2002) 6-11
- 2) 高速車両用輪軸研究委員会編：鉄道輪軸，丸善，175-179.
- 3) 岡竜太郎：鉄道車両用新RCT軸受とシール付き絶縁軸受，NTN TECHNICAL REVIEW No.74 (2006) 80-85.
- 4) (社)日本鉄道技術協会：20年後の鉄道システム，213-221.
- 5) 日本トライボロジー学会 グリース研究会編：潤滑グリースの基礎と応用，養賢堂，82-83.
- 6) 小松崎茂樹：第48回トライボロジー先端講座，潤滑剤とトライボロジー，(1993)

6. おわりに

鉄道車両車軸軸受用グリースの長寿命化を目的に、油分離性の異なるグリースを封入した円すいころ軸受の耐久試験を行い、グリースの油分離性が軸受の潤滑状態に及ぼす影響を調査し、以下の結果を得た。

- 1) 遠心油分離率が40%に近いグリースは、初期は良好な潤滑状態を示すが、長時間運転するとしだいに潤滑性能が低下する。
- 2) 遠心油分離率が5%以下と極端に小さいグリースは、油の供給性能が低いいため、初期より潤滑状態が悪い。
- 3) 遠心油分離率が20~35%のグリースは、長時間良好な潤滑状態を示す。
- 4) 車軸用円すいころ軸受のグリース寿命改良には、グリースの油分離性の制御が重要な要素の1つであるといえる。

執筆者近影



田中 崇剛

産業機械事業本部  
建機・鉄道技術部



三上 英信

先端技術研究所



[ 製品紹介 ]

# 超大型ダンプトラック・ホイール軸受の動向と高機能化 Market Trend and High-Functionality of Wheel Bearings for Off-Highway Truck



内藤 健一郎\* Kenichiro NAITO  
山本 直太\* Naota YAMAMOTO  
曾根 克典\*\* Katsunori SONE

超大型ダンプトラック（Off-Highway Truck）は、砂塵や粉塵の多い自然環境に加え、非常に過酷な24時間連続稼働の鉱山で使用される。このような市場ニーズに対応するため、NTNでは重要部品の一つである、ホイール軸受の高機能化開発を行い、積極的に市場へ提案している。本稿ではNTN開発商品について、その特長と仕様を紹介する。

Off-Highway Truck is generally used in the mine of very severe conditions with continuous duties for 24 hours, in addition to natural environment with dust or particles. In order to satisfy such market needs, NTN developed high functionality of wheel bearing which is one of the major parts of the truck. In this paper, feature and specification are introduced about NTN new products.

## 1. はじめに

鉱山で使用される超大型ダンプトラック（Off-Highway Truck）は、砂塵や粉塵の多い自然環境に加え24時間連続稼働と非常に過酷な条件で使用される。さらに、時間当たりの運搬量で評価される“生産性・高効率”，またその生産性を長期間維持するための“耐久性・信頼性”，作業員への“安全性・快適性”などが求められる。

これらの市場ニーズに対応するため、NTNでは重要部品の一つであるホイール軸受の高機能化に向け図1に示す新商品を開発し、積極的に市場へ提案している。本稿ではNTN開発商品である（1）フィルタシール付大形軸受、（2）ICタグ内蔵軸受、（3）回転センサ付大形軸受について、その特長と仕様を紹介する。

## 2. フィルタシール付大形軸受

超大型ダンプトラック・ホイール軸受には、長寿命化やメンテナンスフリーはもとより、過酷な使用環境への対応、信頼性の向上が求められる。しかし、潤滑油中への砂塵、粉塵の侵入や、軸受周辺のギアなどからの金属摩耗粉が侵入することで、軸受軌道面上に噛み込み圧痕が生じ、これを起点とする短時間での損傷が少なくない。

この損傷に対してNTNが開発したフィルタシール付大形軸受（図2）は、潤滑油中の異物を軸受内部へ侵入させないため、長寿命化による軸受交換周期の延長が期待できる。以下に本軸受の特長と試験結果を紹介する。

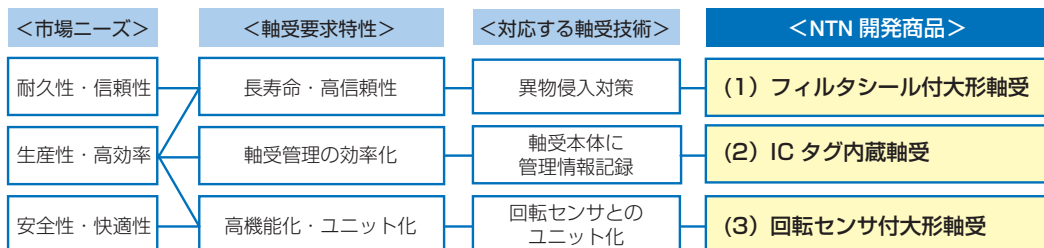


図1 ホイール軸受の市場ニーズとNTN開発商品  
Market needs for wheel bearings and NTN new products

\*産業機械事業本部 建機・鉄道技術部

\*\*産業機械事業本部 新エネルギー技術部

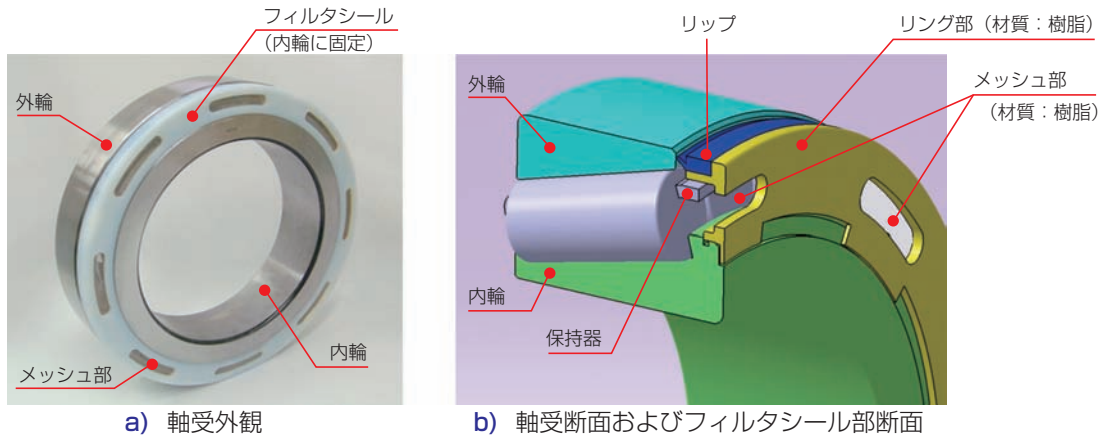


図2 フィルタシール付大形軸受（円すいころ軸受）  
Filter seal integrated large size bearing (Tapered roller bearing)

## 2.1 特長

### ① 軸受交換周期の延長

潤滑油の通過を妨げることなく、油中の異物が軸受内部へ侵入することを抑制するメッシュを備えたフィルタシールにより、軸受軌道面の圧痕発生を防止。

### ② コンパクト設計

軸受の主要寸法（内径・外径・幅）を変更せずに、フィルタシールを付帯しているため既存の軸受との置き換えが可能。

### ③ 振動環境で使用可能

振動加速度10Gでの使用が可能。

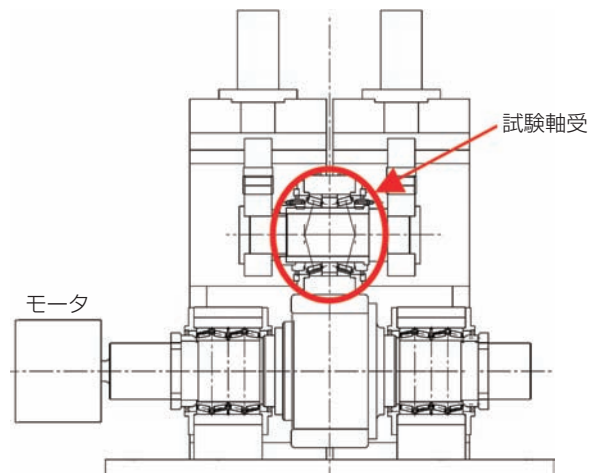


図3 NTN大形軸受外輪回転試験機  
NTN outer ring rotational test machine for large size bearings

## 2.2 異物混入潤滑条件での回転試験

### 《試験条件》

- 試験機：NTN大形軸受外輪回転試験機（図3）  
 試験軸受：インチ系円すいころ軸受，背面組合せ  
 （φ368.249×φ523.875×101.6）  
 回転速度：50 min<sup>-1</sup>  
 潤滑油：ディーゼルエンジン油 ISO VG100  
 混入異物（図4）> サイズ：最大 0.7 mm  
 > 硬さ：HRC 56~60  
 > 量：2000 mg/L

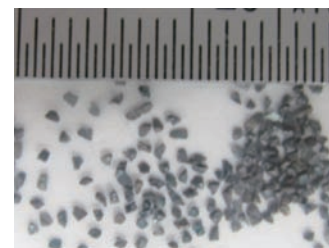


図4 異物  
Metal particle

### 《試験結果》

フィルタシールによる圧痕の抑制効果は、図5に示すように試験後の内輪軌道面の圧痕発生状況で確認した。この結果、フィルタシールを付帯した内輪軌道面に圧痕は認められず、異物侵入を防ぐことが確認できた。

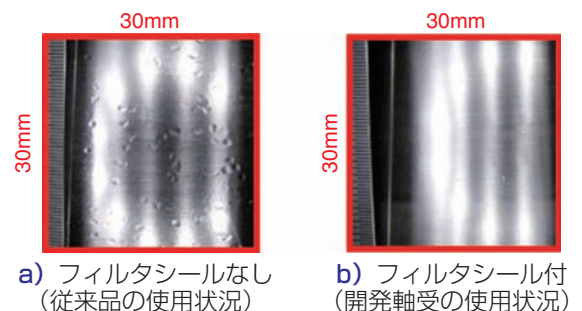


図5 試験後内輪軌道面  
Inner ring raceway after rotation test with metal particle

### 2.3 まとめ

フィルタシール付大形軸受は、潤滑油中の異物が軸受内部へ侵入することを防止し、軸受実寿命の延長が期待できる。

## 3. ICタグ内蔵軸受

超大型ダンプトラックは、定期的に補修や点検が行われ、重要部品である軸受は、検査日、稼働時間などが管理、記録される。長期間使用される軸受では、点検情報の紛失、管理の煩雑さなどが課題で、ICタグ〔RFID：Radio Frequency Identification（電波方式による認識技術）〕による管理が注目されてきた。しかし、従来のICタグは金属に埋め込んだ状態では原理上読み書きができない点や、非磁性材を付与して読み書き可能とすると、タグのサイズが大きくなる点から実用化は進んでいなかった。

NTNは、軸受の品質情報、使用履歴情報を軸受本体に直接記録可能なICタグ内蔵軸受を開発した（図6）。専用の装置を使用して、軸受に直接埋め込まれたICタグの情報を読み書きし、管理情報はユーザ毎に設定することが可能である。さらに点検記録を含め、軸受品質情報の確認を行うことができる。以下にICタグ内蔵軸受の特長、仕様、および使用例を紹介する。



図6 ICタグ内蔵軸受  
IC Tag integrated bearing

### 3.1 特長

- ① 軸受現物から品質情報の読み取りが可能  
内径、外径、幅の寸法精度やすきま情報、シリアルNo.など出荷時の軸受品質情報を読み取り可能。
- ② ユーザによる軸受への使用履歴の書き込みおよび、読み取りが可能  
点検情報を軸受本体に直接読み書き可能。
- ③ 管理項目は自由に設定可能  
ユーザの要望に合わせた管理項目の設定が可能。

### 3.2 仕様

ICタグおよび読み書き装置の仕様を表1、2に示し、その外観を図7、8に示す。

表1 ICタグの仕様  
Specification of IC Tag

項目	仕様
メモリ容量	112 バイト
搬送周波数	13.56 MHz
準拠規格	ISO 15693
通信可能距離	2mm以内
最高使用温度	120°C
寸法	φ4.5 × 4 mm

表2 読み書き装置（PDA<sup>\*1</sup>タイプ）の仕様  
Specification of reader and writer (PDA type)

項目	仕様
搬送周波数	13.56 MHz
準拠規格	ISO 15693
使用温度範囲	-10~50°C
寸法	79 × 164 × 25 mm
重量	320 g

\*1: PDA, Personal Digital Assistant (携帯情報端末)の略

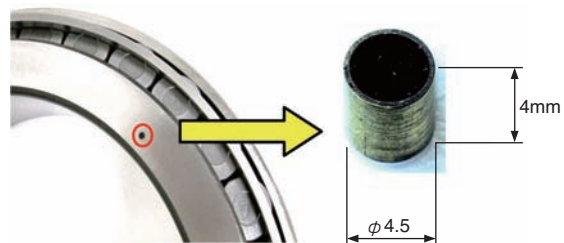


図7 ICタグ内蔵例（軸受端面に埋め込み）  
IC Tag (Embed in bearing side face)



図8 読み書き装置（PDAタイプ）  
Reader and Writer (PDA Type)

- ① PDA
- ② ペン型アンテナ

### 3.3 使用例

- ① 軸受出荷時のデータを読み取り、定期点検時にユーザでデータを比較。
- ② 定期的に軸受管理情報を書き込み、記録したデータの変化を把握。
- ③ 軸受履歴データを電子情報としてPCに保存し、機械全体の軸受情報を一括管理。

#### ■管理項目例

1. 軸受品質情報  
軸受出荷時にNTNが記録するデータ例を図9に示す。
2. ユーザ管理情報  
メンテナンスのためにユーザが追加書き込みするデータ例を図10に示す。

### 3.4 まとめ

ICタグ内蔵軸受は、直接軸受本体から必要情報を読み書きするため、長期間信頼性が要求される使用条件においても情報管理を簡素化することができる。

図9 軸受品質情報入力例  
Example of input bearing quality information

図10 ユーザ管理情報入力例  
Example of input user management information

## 4. 回転センサ付大形軸受

超大型ダンプトラックは、鉱山内で非舗装路を走行するため車輪が滑りやすく、転落事故につながる事がある。対策として、車輪の滑り防止のアンチロック・ブレーキ・システムやトラクション・コントロール・システムなどが装備されている。これらは車輪の回転数を検出し制御するもので、車輪回転数検出センサはホイール軸受とは別体に取り付けられるのが通常で、正確な回転数を検出するため、回転センサ関連部品の位置決め調整などが必要である。

NTNでは、静止輪である内輪上にパルス検出用センサ、回転輪である外輪上にパルサーリングを設けた、回転センサ付大形軸受を開発した(図11)。

回転センサと軸受を一体化し、センサ位置決め調整を不要としたことで、部品点数を削減した。また、センサ配線類の断線防止機構を採用して、万一、軸と軸受内輪間にクリープと呼ばれる滑りが発生した場合でも、センサに破損や誤差を生じさせることなく回転数や回転方向の検出を可能とした。以下に回転センサ付大形軸受の特長および仕様を紹介する。

### 4.1 特長

- ① 回転センサと軸受の一体化  
回転センサの取り付け工数削減、部品点数削減と周辺のコンパクト化が可能。
- ② 軸と内輪間にクリープ(滑り現象)が発生しても配線の断線を防止する機構を採用  
内輪にクリープが発生しても、回転数の検出が可能。
- ③ 油中で使用可能  
エンジンオイル浸漬環境(油温120℃×2000時間)で回転数検出に異常なし<sup>※2</sup>。  
※2: 油の種類や添加剤によっては影響を受ける場合もある。
- ④ 振動条件で使用可能  
振動加速度10Gで、回転数検出に異常なし。

### 4.2 構造

外輪回転で使用する円すいころ軸受の構造例を図11に示す。



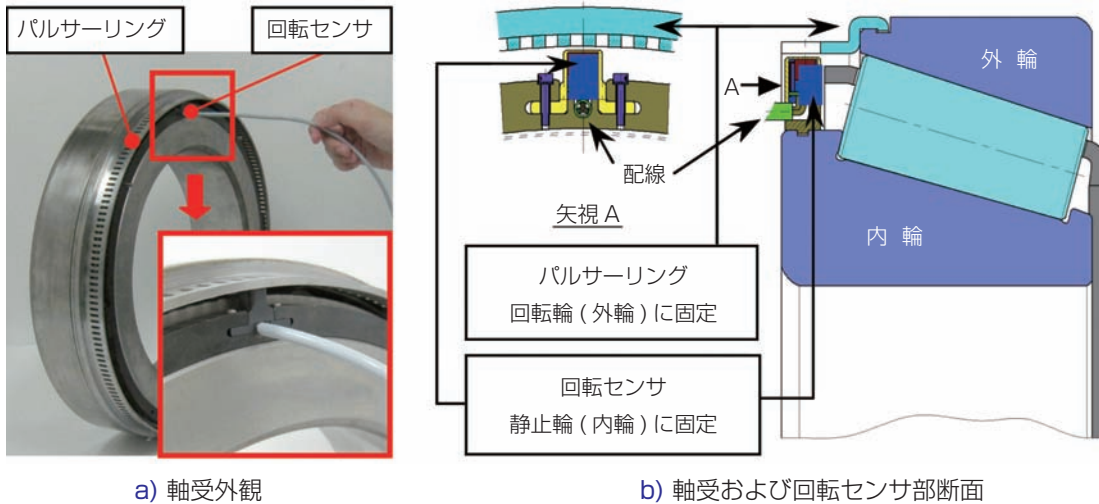


図11 回転センサ付大形軸受  
Integrated rotation sensor large size bearing

### 4.3 回転センサの仕様と出力例

回転センサの仕様を表3に示し、出力波形例を図12に示す。

表3 回転センサの仕様  
Specification of rotation sensor

項目	仕様
センサ型式	バックマグネット式ホールIC
分解能	192パルス/回転 <sup>※3</sup>
出力相数	1相 <sup>※4</sup>
供給電圧	4~24V (DC)
出力形態	オープンコレクタ (矩形波出力)
応答周波数	12 kHz
吸い込み電流	25 mA以下
最高使用温度	120 °C

※3：軸受外径φ420の場合の分解能。

※4：回転方向検出仕様の場合は2相出力。

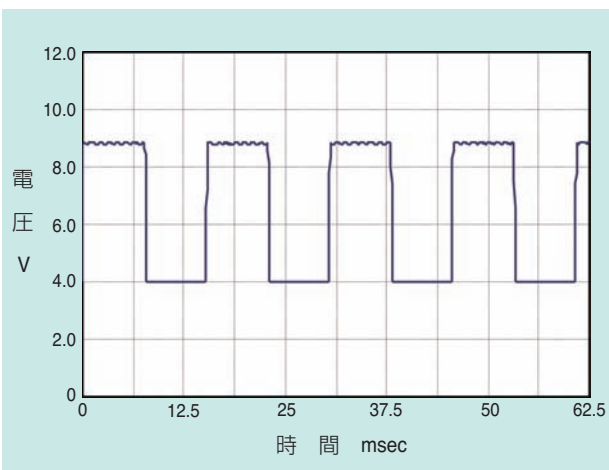


図12 出力波形例  
Example of output style

### 4.4 まとめ

回転センサ付大形軸受は、軸受とセンサの一体化により、組み込み時のセンサ関連部品の位置決め調整が不要である。また部品点数削減にもつながら、コスト低減が期待できる。

## 5. おわりに

本稿では鉱山で使用される超大型ダンプトラック・ホイール軸受の高機能化として、NTNが開発した3つの新商品を紹介した。

新興国での人口増と都市化を背景とした鉱物資源の需要は拡大を続けており、鉱山開発は今後も継続すると見られている。

NTNは引き続き超大型ダンプトラックをはじめとする鉱山機械に求められる生産性、信頼性、安全性に配慮する商品の開発を進める。

### 執筆者近影



内藤 健一郎

産業機械事業本部  
建機・鉄道技術部



山本 直太

産業機械事業本部  
建機・鉄道技術部



曾根 克典

産業機械事業本部  
新エネルギー技術部

## 複層焼結含油軸受 Multi Layer BEARPHITE



須貝 洋介\* Yosuke SUGAI  
毛利 敏彦\* Toshihiko MOURI

油圧ショベルの関節部に使用される軸受は、振動や衝撃など大きな負荷を受けるため高強度、耐摩耗性および耐久性が求められる。このため、高価な合金成分を配合した鉄製のブッシュや焼結含油軸受などが使用されている。本用途を主なターゲットとして、内外層を異なる材料で構成し、機能と低コストを両立させた「複層焼結含油軸受」を開発した。

Bearing for the joints of hydraulic excavator, are used under heavy load condition cases as vibration and shock. Therefore it is necessary to keep wear-resistant and endurance for the bearing and it is generally used the high cost bearing, which made from iron metal bush or oil-impregnated sintered.

NTN developed the “Multi-layer oil-impregnated sintered bearing (Multi Layer BEARPHITE)” by using of developed production method, that is located different materials on the inner and outer side for the ensuring compatibility between performance and cost.

### 1. はじめに

焼結含油軸受は、一般的に小型モータなどの軽負荷用途で使用されるが、特殊な用途では図1に示す油圧ショベルの関節部で高負荷滑り軸受として使われる。この軸受は、高硬度で耐摩耗性に優れた材料を用い、浸炭焼入れなどの熱処理で強度を高めた後、寸法精度確保のため切削加工して製造する。軽負荷用途向けの軸受がプレス成形、焼結およびサイジング加工で製造するのに比べて高価である。

これを解決するため、円環の内層と外層を異なる材料で一体に成形する「二色成形法」を開発し、軸受内層部に高硬度で耐摩耗性に優れた材料を用い、外層部に一般の高強度構造材を配置した「複層焼結含油軸受」を商品化した。

しているため、軸受全体が硬くなり、焼結軸受の寸法矯正に用いるサイジング加工を適用することができない。このため、熱処理後に切削加工して寸法精度を確保している。

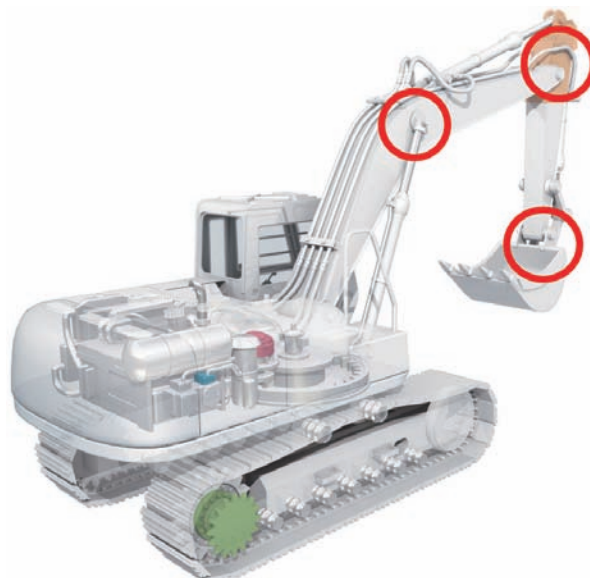


図1 油圧ショベルへの適用例  
Oil-impregnated sintered bearing for hydraulic excavator

### 2. 従来軸受

従来軸受材料は、軸とのかじりを防止するためCuを15~20%配合し、熱処理で強度を得るためMo, Niを配合している。図2の左列に示すように、従来軸受は浸炭焼入れで軸受の表面を硬化させて強度を確保

\*NTN特殊合金(株)技術部

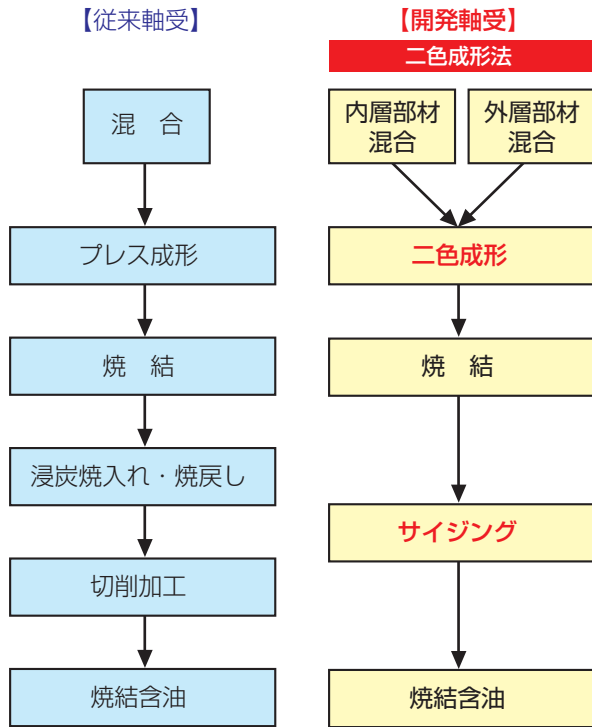
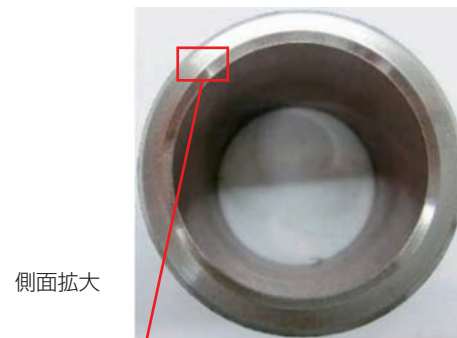


図2 製造工程  
Manufacturing process



図3 軸受外観  
View of bearing



側面拡大

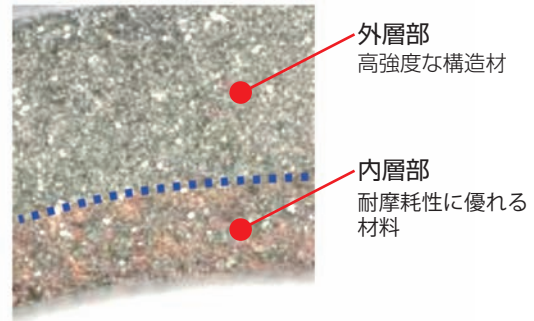


図4 開発軸受の複層状態外観  
View of multi-layer area

### 3. 開発軸受

#### 3.1 構造と特長

「複層焼結含油軸受」の外観を図3に、内層と外層境界部の拡大を図4に、化学成分を表1に示す。内径面を構成する内層部材には、強度のほか、耐摩耗性や耐久性を満足するため、Cu, Mo, Niを配合した従来材を使用した。また外層部材には、高強度でサイジング性に優れた機械構造部品用JIS-SMF4030相当材を使用した。

製造工程を図2右列に示す。外層に高強度構造材を採用したため、浸炭焼入れが不要で、サイジング加工による寸法矯正を採用した。

特長は以下のとおりである。

#### 【特長】

- ・外層部に低硬度の材料を使用し、サイジングによる寸法矯正を可能とした
- ・内層部は従来軸受と同材料を使用し、高い摺動性能を確保した

表1 化学成分  
Chemical composition

	成分	配合比率 wt%
内層部 (内径面)	Cu	15~20
	Fe	残
	C	0.3~0.8
	Ni	1.5~3.5
	Mo	0.5~1.5
外層部 (外径側)	Cu	2~5
	Fe	残
	C	0.2~0.8

### 3.2 内, 外層界面の接合状態

二色成形法で製作した軸受の内外層界面における, FeおよびNiの濃度分布を図5および図6に示す.

Feは内層部, 外層部共に均一に分布し, 偏析はない. 内層部だけに配合したNiは, 図6赤枠内のように界面から外層内部に向けて緩やかに濃度変化しており, Niが外層部にも拡散し, 界面接合していることがわかる.

### 3.3 寸法精度

開発軸受のサイジング加工による寸法矯正効果を確認するため, サイジング前後の焼結品の寸法を測定した. 結果を表2, 3に示す.

サイジング後の径不同は, 内・外径共にサイジング前より小さく, 寸法精度が向上したことがわかる. 一方, 従来軸受は寸法矯正ができなかった.

#### [測定条件]

軸受寸法 内径35×外径45×長さ35  
測定値 内・外径径不同 (径の最大値-最小値)

### 3.4 強度・硬度

開発軸受の圧環強さと硬度を表4に示す. 硬度は軸受の内径面と, 外径面を測定した.

圧環強さは従来軸受と同等であり, 内径面の硬度は

従来軸受と同等であった. 一方, 外径面は低く, サイジング加工による寸法矯正に適する硬度である.

#### [測定条件]

軸受寸法 内径35×外径45×長さ35  
圧環強さ測定 リング圧縮速度10mm/min  
硬度測定 軸受内径・外径面 HRA

表2 内径の径差  
Diameter difference of inner diameter

試料	径不同 mm	
	サイジング前	サイジング後
開発軸受	0.025	0.015
従来軸受	0.200	サイジング不可

表3 外径の径差  
Diameter difference of outer diameter

試料	径不同 mm	
	サイジング前	サイジング後
開発軸受	0.060	0.030
従来軸受	0.200	サイジング不可

表4 強度・硬度測定結果  
Strength and hardness measurements

試料	測定項目	圧環強さ MPa	硬度 HRA
開発軸受		540	内層部 54
			外層部 46
従来軸受		550	54

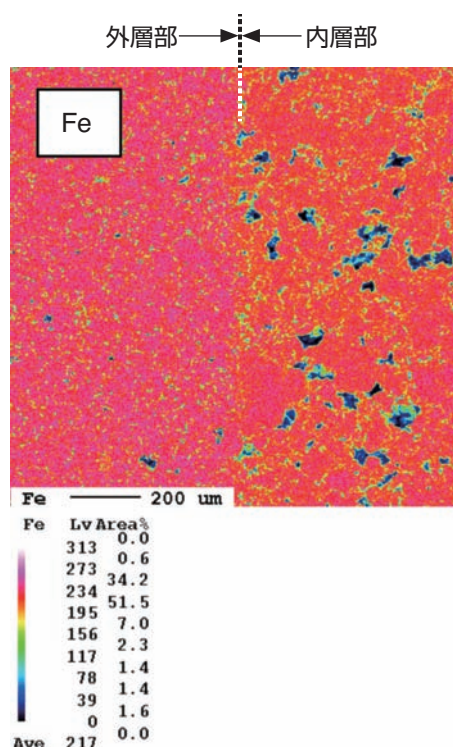


図5 界面のFe濃度分布  
Fe concentration distribution of surfactant

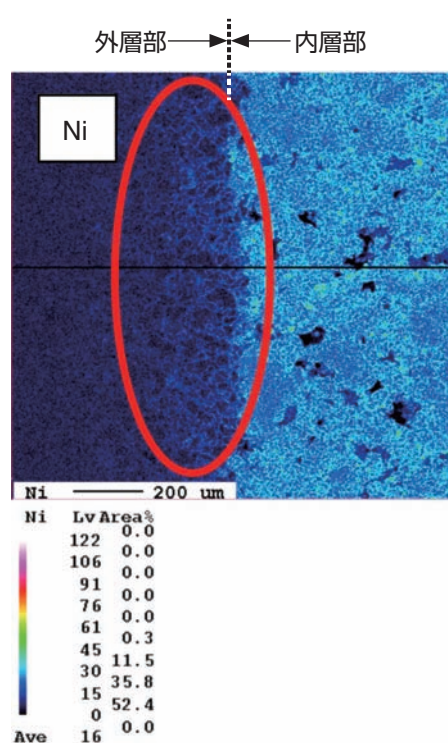


図6 界面のNi濃度分布  
Ni concentration distribution of surfactant



### 3.5 摩擦特性

開発軸受の摩擦係数は従来軸受と同等であった (図7).

[測定条件]

- 摩擦面圧 100MPa
- 雰囲気温度 70℃
- すべり速度 0.014m/s
- 軸受寸法 内径6×外径12×長さ4
- 相手軸材質 S45C高周波焼入れ品

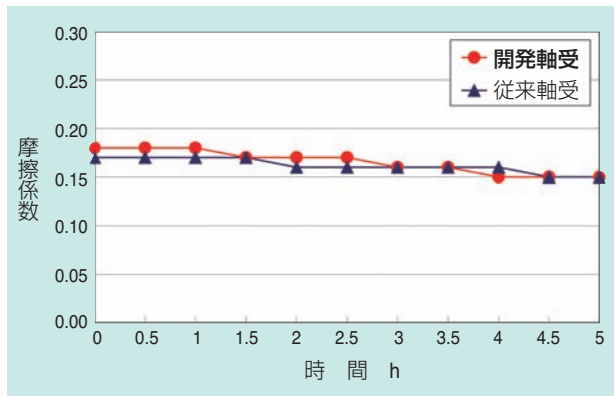


図7 摩擦係数測定結果  
Friction coefficient measurements

### 4. まとめ

異なる材料を一体に成形する「二色成形法」を用いた「複層焼結含油軸受」を紹介した。

一つの軸受内で異なる特性を有することから、本成形技術は油圧シヨベル関節部だけでなく、産業機械・自動車関連の様々な分野の軸受や機械部品の高機能化、低コスト化に貢献するものと考える。

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

## 磁性材料商品の紹介

### Introduction of Magnetic Material Products



原野 拓治\* Takuji HARANO  
宮崎 真二\* Shinji MIYAZAKI  
勝浦 肇\* Hajime KATSUURA

NTNのグループ会社である日本科学冶金株式会社は、高飽和磁束密度、低鉄損で周波数特性が良好なアモルファス磁性材料を中心に、要求特性に合わせた各種磁性材商品を開発しており、これらの特性と応用例を紹介する。

Nippon Kagaku Yakin Co.,Ltd., as one of the NTN group companies, develops various types of magnetic material products that meet customer demand for characteristics.

The major product is the Amorphous core which has characteristics of high saturated magnetic flux-density, low core loss and superior frequency characteristics.

This article introduces the features and applications of these products.

### 1. はじめに

近年、電気自動車(EV)やハイブリッド車(HEV)に搭載するリアクトルには大電流、高周波数など、厳しい環境で高い信頼性が求められ、従来のフェライトコアでは対応が厳しくなっている。

NTNのグループ会社である日本科学冶金株式会社は、これまで各種磁性材商品を開発しており、本稿では、高飽和磁束密度かつ、低鉄損で良好な周波数特性を有する磁性材料商品と、その応用例を紹介する。

### 2. 日本科学冶金の磁性材料商品の分類

磁性材料商品は、軟質磁性材料と硬質磁性材料に大別される。

軟質磁性材料は、保磁力が小さく透磁率が大きいことが特徴で、高飽和磁束密度、低鉄損で周波数特性が良好なアモルファス磁性材料を用いた各種磁性材商品がある。特にこの材料を射出成形したインジェクションコアは形状の自由度が高く、優れた直流重畳特性を示す。

硬質磁性材料は、保磁力が大きく永久磁石として用いられ、磁気記録用の磁性体などがこれに分類される。

### 3. 軟質磁性材料

#### (1) 高特性インジェクションコア

##### ① 材料物性

アモルファス系インジェクション材料(AS10)は、結晶構造を持たない鉄系アモルファス微粒子を樹脂材料で複合化した材料である。

AS10の材料物性を表1に示す。

表1 AS10の材料物性  
Material properties of AS10

材料名	密度 g/cm <sup>3</sup>	圧環強さ MPa
AS10	4.65	80

##### ② 特長

AS10と従来のフェライトおよび鉄-シリコン(Fe-6.5Si)の磁性材料について、印加電流をスweep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1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2に示す。これらの特性から、以下の特長が挙げられる。

\*日本科学冶金(株)技術部

- 従来の磁性材料フェライトおよび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。
  - 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く、特性が安定している。
- 以上から、AS10は大電流かつ安定した高周波特性が要求される用途に適用される。

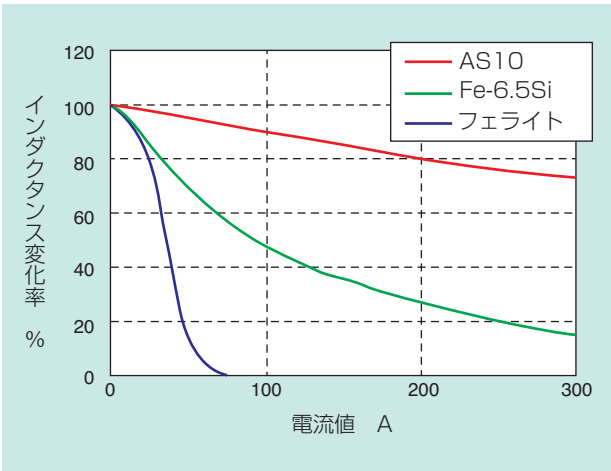


図1 直流重畳特性  
DC bias characteristics

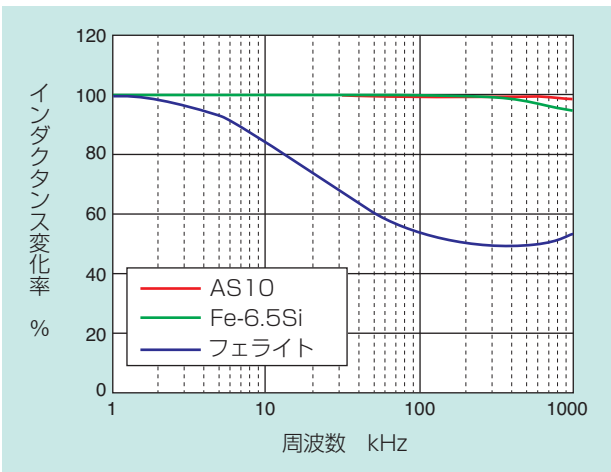


図2 周波数特性  
Frequency characteristics

③ 応用例

● チョークコイル

大電流の印加が可能で、かつ高周波特性が安定していることからチョークコイルに応用される。具体的には医療用MRIをはじめ、産業機器の電源へチョークコイルを適用している (図3~6)。この用途では、従来のフェライト品に比べ容積と重量をそれぞれ約1/8に小型・軽量化できた。



図3 医療用MRI  
Medical magnetic resonance imaging

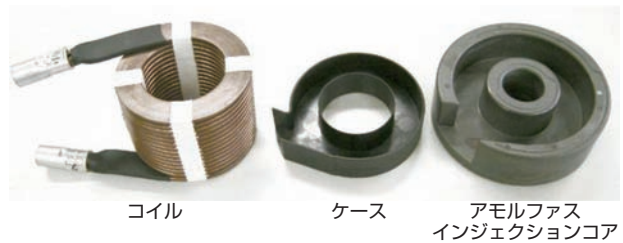


図4 チョークコイル部品  
Parts of choke coil



図5 MRI電源用チョークコイル  
Choke coil for MRI power supply



チョークコイル



アモルファスコア（チョークコイル構成部品）

図6 産業機器の電源回路に搭載されるチョークコイル  
Power supply circuit of industrial equipment

## (2) アモルファス系ダストコア

### ① 材料物性

アモルファス系ダストコア材料（AL60）は、結晶構造を持たない鉄系アモルファス微粒子と1～2 vol%の添加剤で複合化した材料である。

表2にAL60の材料物性を示し、AL60とAS10の比透磁率を表3に示す。

AL60は、AS10に比べ樹脂を含む添加剤の配合分が1/40～1/20と少ないため射出成形はできない。なお、AL60の圧縮成形は、鉄系アモルファス微粒子が硬いため、特別な成形金型と大きな成形圧力が必要である。

### ② 特長

AL60とフェライトの直流重畳特性を図7に示し、周波数特性を図8に示す。これらの特性と表2、3から、以下の特長が挙げられる。

- アモルファス系ダストコア材料（AL60）の比透磁率は、アモルファス系インジェクション材料（AS10）の6倍である（表3）。

表2 AL60の材料物性  
Material properties of AL60

材料名	密度 g/cm <sup>3</sup>	圧環強さ MPa
AL60	5.5	40

表3 AL60とAS10の比透磁率  
Relative permeability of AL60 and AS10

材料名	AL60	AS10
比透磁率	60	10

- 一方、AS10に比べインダクタンス変化率は大きい。これは鉄系アモルファス微粒子の含有量が多いため金属粒子同士の接触割合が増大したことに起因する。
- AL60の周波数特性は、フェライトに比べ高周波領域におけるインダクタンスの変化率は小さく、特性が安定している。

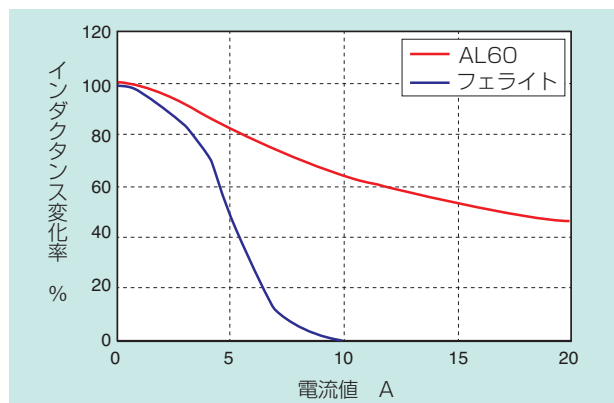


図7 直流重畳特性  
DC bias characteristics

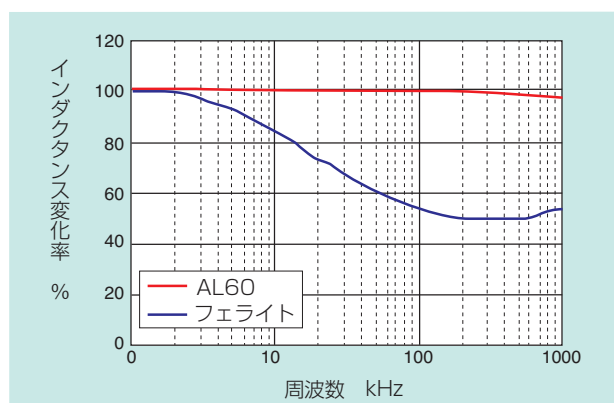


図8 周波数特性  
Frequency characteristics

### ③ 応用例

#### ●HEV昇圧装置用リアクトルコア材料

バッテリー電圧を昇圧し、モータトルクを上げるため昇圧回路中に、リアクトルが組み込まれている。この場合、図9に示すリアクトルのコア材は、比透磁率が大きくコアロスの小さなAL60が適用される。

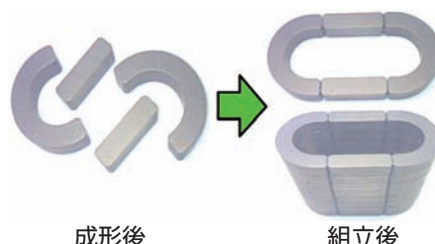


図9 HEV用リアクトルコア  
Reactive coil core for HEV



## 4. 硬質磁性材料

図10に硬質磁性材料のマップを示す。日本科学冶金は、硬質磁性材料の圧縮成形および射出成形によるボンド磁石製品をラインナップしている。

### (1) 圧縮ボンド磁石

#### ① 材料物性

圧縮ボンド磁石は、フェライト磁石などの磁石粉と、樹脂材料を混練して圧縮成形した複合材料である。Nd-Fe-B系磁粉を造粒あるいは、使用した等方性圧縮ボンド磁石 (ME12M) の材料物性を表4に示す。

表4 ME12Mの材料物性  
Material properties of ME12M

材料名	密度 g/cm <sup>3</sup>	圧環強さ MPa
ME12M	6.4	110

#### ② 特長

- 最大エネルギー積 8~12MGOe
- 良好な角形性を有しており広い範囲での磁気回路設計が可能

### (2) 射出ボンド磁石

#### ① 材料物性

Nd-Fe-B系磁粉を使用した等方性射出ボンド磁石 (AS4M) の材料物性を表5に示す。

表5 AS4Mの材料物性  
Material properties of AS4M

材料名	密度 g/cm <sup>3</sup>	圧環強さ MPa
AS4M	4.6	80

#### ② 特長

- 最大エネルギー積 4~6MGOe
- 射出ボンド磁石は表面が樹脂のスキン層に覆われるため耐食性に優れる
- 耐腐食性向上を目的とした塗装が不要
- 射出成形により形状の自由度が高く複雑形状も可能

#### ③ 応用例

図11に硬質磁性材料である圧縮ボンド磁石および、射出ボンド磁石の自動車への適用例を示す。

#### ● 圧縮ボンド磁石

舵角センサ、排気センサ

#### ● 射出ボンド磁石

キーレスエントリー用センサ

磁束密度の変化や磁極の切り替わりを利用して、対象部品の位置・角度・回転速度などを検知する。

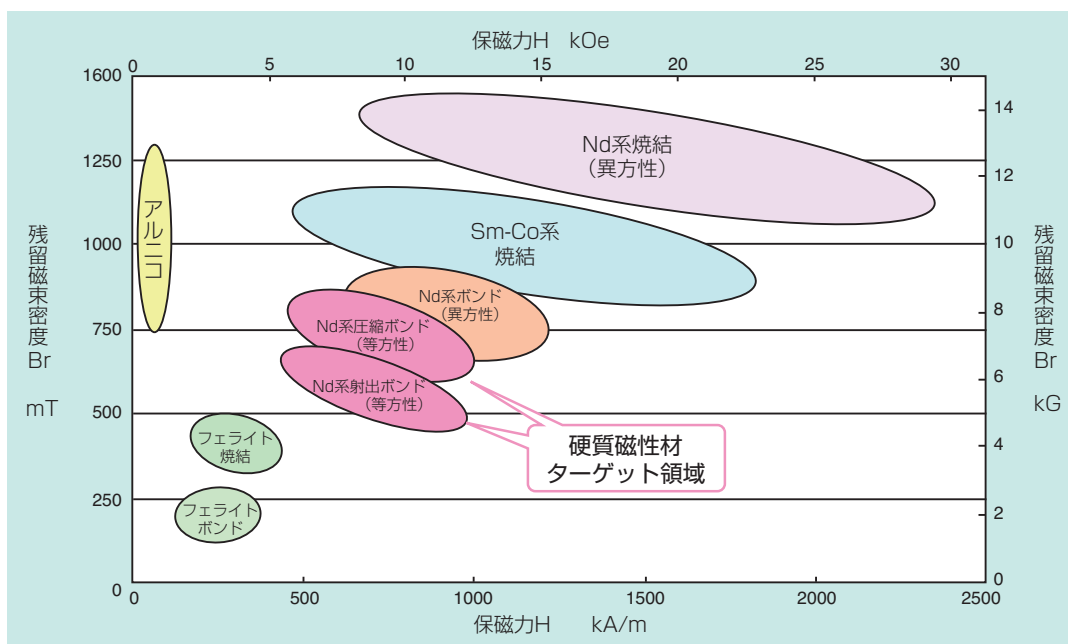
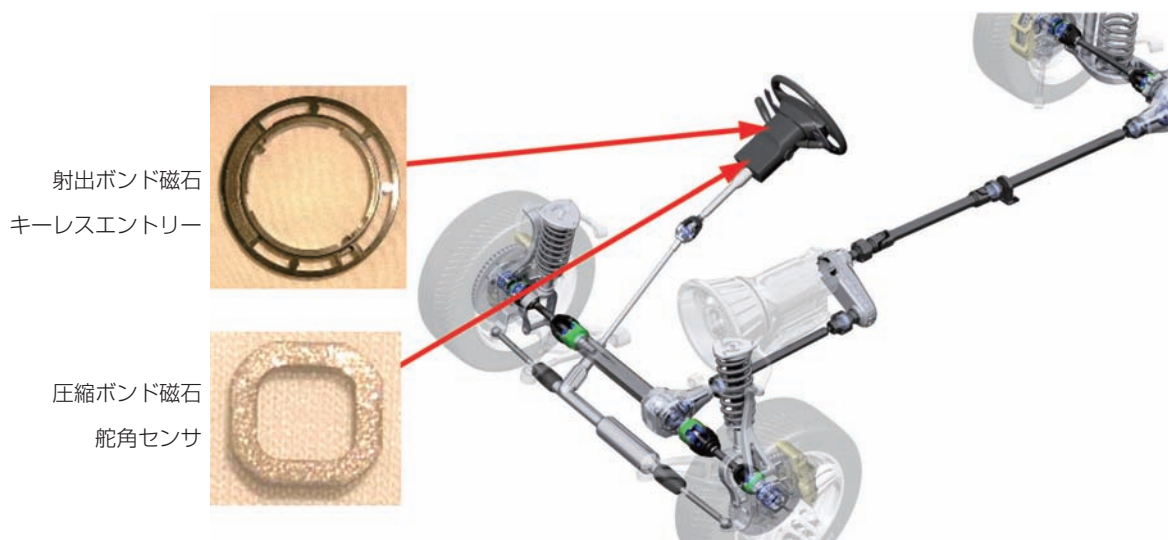


図10 硬質磁性材料のマップ  
Map of hard magnetic materials



<p>キーレス エントリー</p>		<p>キーレスエントリー磁石磁束密度分布</p> 	<p>磁束密度の変化 によるスイッチの ON/OFF</p>
<p>舵角センサ</p>	<p>S極側</p>  <p>N極側</p>	<p>ハンドルを切った 角度に合わせて 磁石が回転</p>	<p>磁極の切り替わり回数 による回転角度の 読み取り</p>

図11 硬質磁性材料(圧縮ボンド磁石, 射出ボンド磁石)の自動車への応用  
Application for automobile

## 5. まとめ

今回紹介した磁性材料商品は、電気自動車の電子回路部品への適用および産業機器の小型化、エネルギー損失低減に貢献できると考える。今後も新エネルギーの普及にともなう市場ニーズに適合した磁性材料商品の開発に注力する。

執筆者近影



原野 拓治

日本科学冶金(株) 技術部



宮崎 真二

日本科学冶金(株) 技術部



勝浦 肇

日本科学冶金(株) 技術部

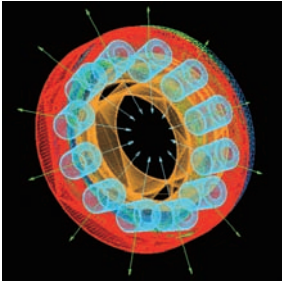
2011年度 トライボロジー学会 技術賞受賞

転がり軸受の保持器応力の解析技術の高度化  
Advancement of Cage Stress Analysis of Rolling Bearings

坂口 智也,  
Tomoya SAKAGUCHI,

原田 和慶,  
Kazuyoshi HARADA,

風間 貞経  
Sadatsune KAZAMA



1. 概要

軸受の負荷容量の向上には転動体の個数や大きさを増やすことが有効なため、転動体の占有空間の最大化が保持器設計に求められる。ただし、特殊な使用条件下では保持器に過大な応力が生じる場合があるため、保持器に適切な強度を与える必要がある。そこで、保持器に生じる応力（保持器応力）を求めめる技術を開発してきた<sup>1)~4)</sup>。

この度、本技術は、トライボロジーに関する優れた新技術に対し与えられる『日本トライボロジー学会 2011年度技術賞』を受賞した。本報では、その解析技術の概要を記す。

2. 解析システムの特徴

本技術は、CAEシステムとして構築され<sup>3)</sup>、遊星運動やクランク回転などの種々の運転条件下で、主要な軸受形式を扱うことができ（図1）、転動体と保持器の運動および保持器の弾性変形の連成解析により、運動中の保持器応力を算出できる<sup>1), 2)</sup>。転動体と軌道面の接触部では、接触状態や油膜の力学的影響を精密にモデル化し、さらに、有限要素法に比べ計算速度に優れるモード合成法<sup>5)</sup>を用いて保持器の弾性変形をモデル化した。また、モード合成法の保持器への適用方法を工夫することで、応力の計算精度も向上させた。対象は3次元を基本とするが、計算速度で有利な2次元も可能である<sup>3)</sup>。

3. 解析例

遊星減速機の遊星歯車を支持する針状ころ軸受において、ころ本数(Z)が11本と10本の場合での保持器応力を2次元解析した例を図2に示す。保持器材の疲労限に対する保持器

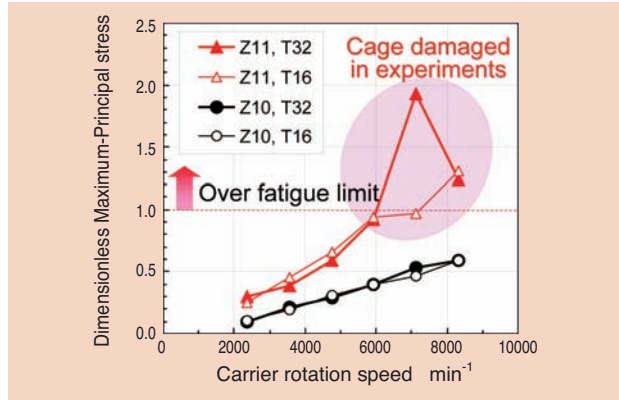


図2 遊星減速機の針状ころ軸受の保持器応力<sup>1)</sup>  
Cage stress vs. carrier rotation speed<sup>1)</sup>

の最大主応力の比を、キャリアの回転速度で整理した。疲労限を超える応力が算出されたZが11本でかつ6000 min<sup>-1</sup>以上の回転速度域では、実験でも保持器破損が高い頻度で発生し、疲労破壊と推定された。このことから、本解析の有効性が確認された。

参考文献

- 1) T. Sakaguchi, et al.: Dynamic Analysis of Cage Stress in Needle Roller Bearings Under Planetary Motions, IJTC2007, 44189.
- 2) T. Sakaguchi, et al.: Dynamic Analysis of Cage Stress in Tapered Roller Bearings Using Component-Mode- Synthesis Method, ASME J. Tribol., 131(2009)011102.
- 3) 関屋：転がり軸受の統合動力学解析システムIBDASの紹介, NTN TECHNICAL REVIEW, 79(2011)119.
- 4) 坂口、他：転がり軸受の保持器応力の解析技術の高度化, トライボロジー会議2012春 東京 (2012) 233.
- 5) R. R. Craig, et al.: Coupling of Substructuring for Dynamic Analysis, AIAA J., 6, 7 (1968) 1313.

執筆者近影 (所属は学会発表当時のもの)

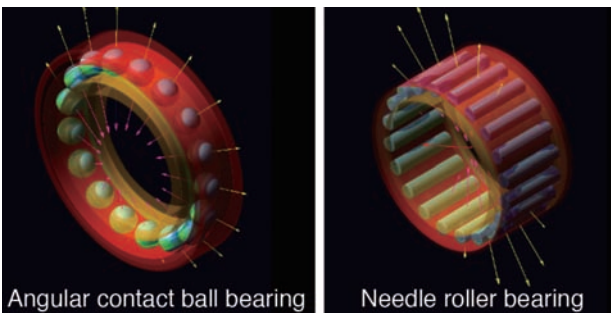
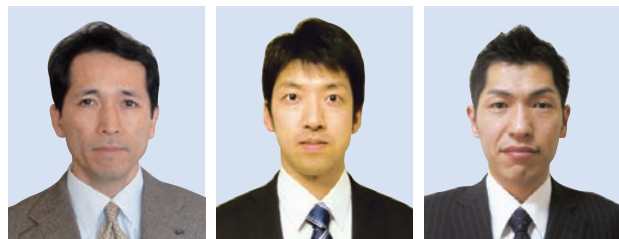


図1 転がり軸受の解析例  
Analyzed rolling bearings



坂口 智也  
先端技術研究所

原田 和慶  
先端技術研究所

風間 貞経  
自動車事業本部  
ニードル軸受技術部

2011年度 “超”モノづくり部品大賞 機械部品賞受賞

## 卓上型微細塗布装置 Desktop Type Microscopic Coating Applicator

内山 元広  
Motohiro UCHIYAMA

### 1. はじめに

「卓上型微細塗布装置」は、数ピコリットルの微量液滴を塗布する機能を持ち、そのコンパクト性と操作性、塗布性能の高さが評価され、2011年度“超”モノづくり部品大賞機械部品賞を受賞した。本装置は、従来は手作業だった特殊センサの材料塗布工程や小型光学部品への接着剤塗布、あるいは電子デバイスへの材料塗布やバイオ分野で試料を一定量に少量ずつつける作業など、先端研究機関での超微量塗布用途への適用検討をはじめており、多くの商談が寄せられている。

### 2. 背景

NTNでは、液晶パネル用カラーフィルタの色抜けや混色欠陥の修正を目的とした修正装置で、業界トップの販売実績を持つ。昨今の液晶パネルの大型化に伴い、製造ラインで使用される修正装置は4m角以上の大きなサイズとなっている。

本装置は、同大型修正装置の修正インク塗布機構を卓上サイズまで小型化し、液晶パネル製造分野以外の少量試作用途や研究開発用途への展開を狙った商品である。

### 3. 特長

一定量の液体材料を塗布する方法としては、ディスペンサ方式やインクジェット方式が知られているが、これらは微細な管路や穴を通して液体を塗布する機構のため、目詰まりを生じやすいという問題があった。本装置は、先端に極微量液滴を付着させた塗布針を対象物に軽く接触させて転写する、独自の塗布方式を採用する。そのため、広範囲な粘度帯の塗布液体に対し、ノズルなどの目詰まりを発生させることなく塗布することができる。

また、取扱い易さを追及し、卓上で手軽に塗布できるよう、マウスによる簡単操作で指定ポイントへの正確な位置決めと微細塗布を可能にした。

本商品により、日本が得意とする電子機器や医療・バイオなどの分野における研究開発が促進され、新技術・新材料のさらなる発展に寄与することに期待している。



図1 卓上型微細塗布装置  
Desktop type microscopic coating applicator

### 参考文献

- 1) 山中昭浩, 卓上型微細塗布装置の技術と特長, 月刊JETI, Vol.58, No.11, 101-102, 2010
- 2) 鈴木克義, 卓上型微細塗布装置の開発と適用, 月刊トライボロジー, No.294, 34-36, 2012

### 執筆者近影



内山 元広  
精機商品事業部  
プロダクトエンジニアリング部



## パーキング機能付き電動ブレーキシステム

電動ブレーキシステムにパーキングブレーキ機能を一体化し  
**軽量・コンパクトで利便性・安全性も向上!**



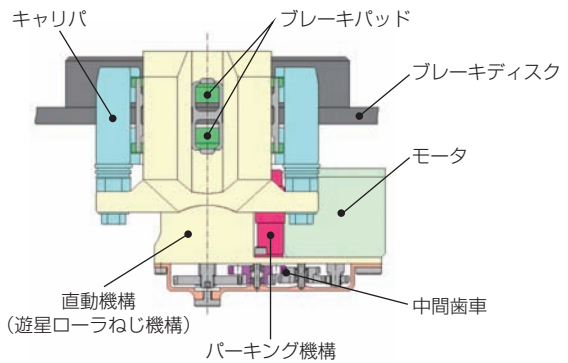
### 特長

- ① 利便性, 安全性の向上
  - ・パーキングブレーキの電子制御化により  
 パーキング操作の簡略化が可能  
 (自動パーキング機能, 解除忘れ防止機能)
- ② 軽量・コンパクト
  - ・直動機構とモータ間の空間にパーキング  
 ブレーキユニット (ソレノイド) を配置

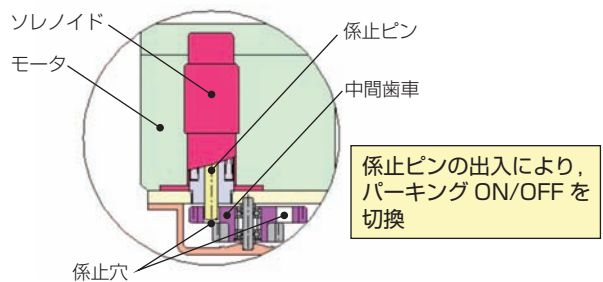
### 用途

- 電気自動車, ハイブリッド車  
 (サービス用電動ブレーキ)

### 構造

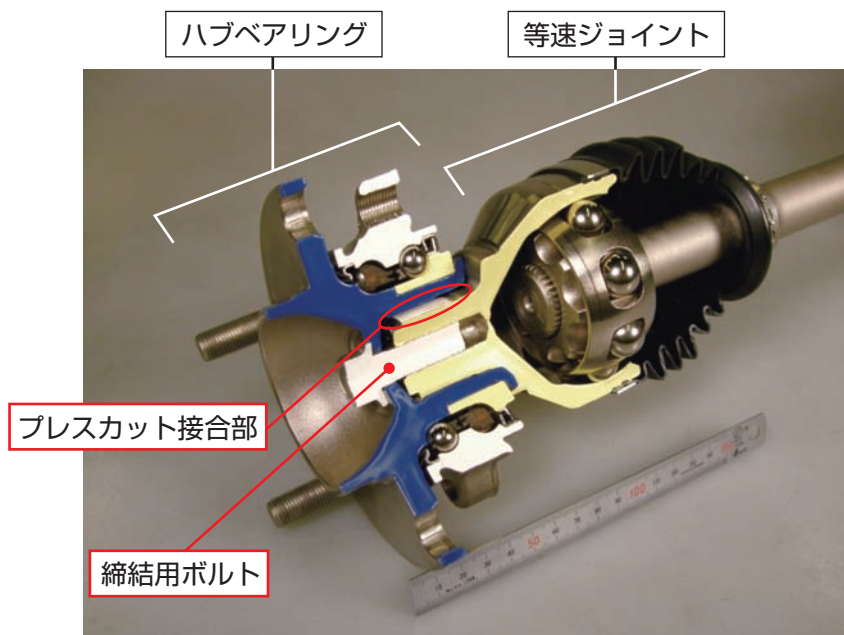


#### パーキング機構部詳細図



# プレスカットスプライン・ハブジョイント「PCS-H/J」

ハブベアリングと等速ジョイントの独自接合方式により  
**大幅な軽量化と高性能化を実現！**



## 特長

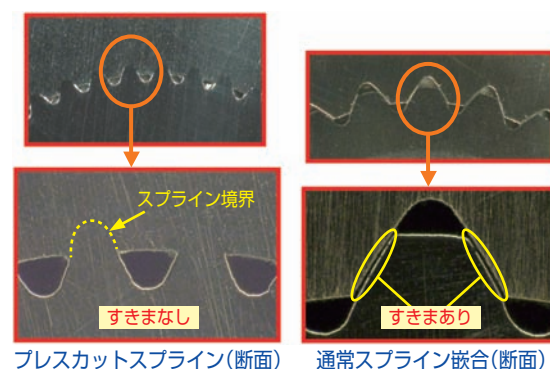
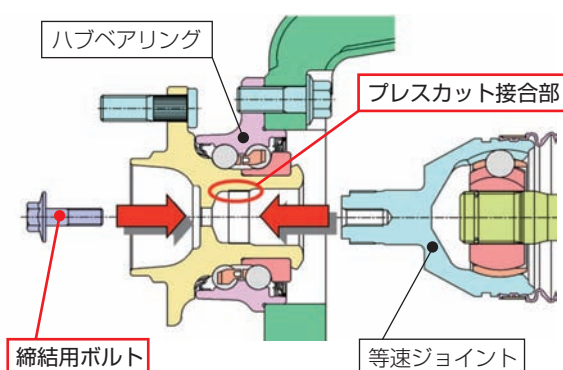
- ① 軽量化
  - ・ 現行の3世代ハブベアリング+等速ジョイント比  
12%の軽量化
- ② 高性能
  - ・ ハブ輪内径側に小サイズのスプラインを設けた  
独自のプレスカット接合技術により
  - ・ ハブベアリングと等速ジョイント間のガタ "ゼロ"
  - ・ スティックスリップ音の抑制

## 用途

- 乗用車用アクスル部



## 構造



# 次世代高効率固定式等速ジョイント「CFJ」

CFJ : Cross groove Fixed Joint

スフェリカル・クロスグループ構造の採用により  
世界最高水準の伝達効率で自動車の低燃費化に貢献！

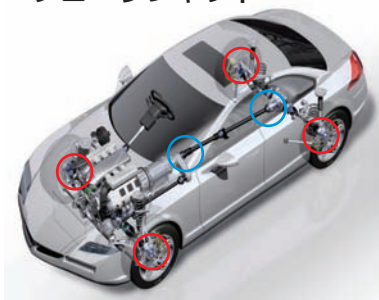


## 特長

- ① 世界最高水準の伝達効率
  - ・トルク損失率 従来品EBJ比 50%低減
- ② 低発熱
  - ・温度上昇量 従来品EBJ比 50%低減
- ③ 作動角度最大
  - ・47°

## 用途

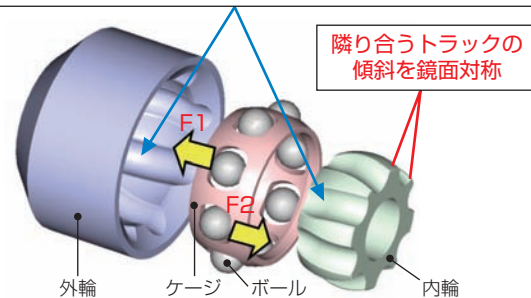
- SUV, ECOカーなどのドライブシャフト, プロペラシャフト



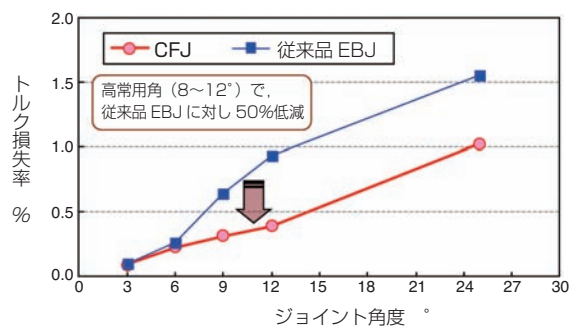
○ ドライブシャフト  
○ プロペラシャフト

## 構造

スフェリカル・クロスグループ  
円弧状の内・外輪ボールを回転溝軸方向に互い違いに傾斜

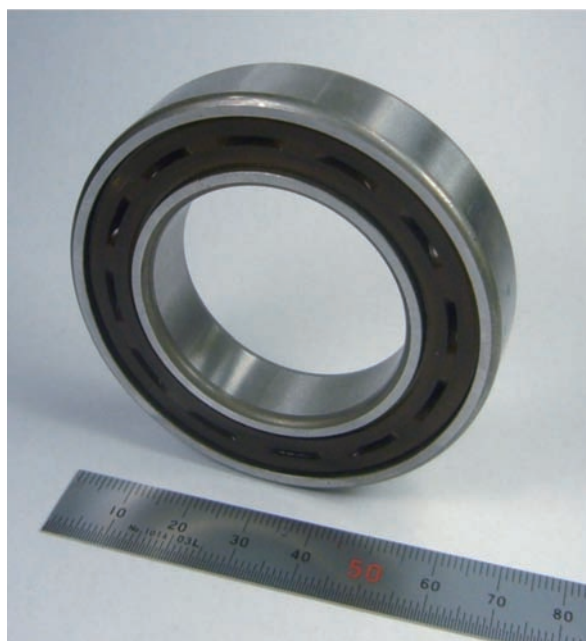


内部力 F1, F2 が隣合う  
トラックで逆向きに発生  
(従来品は全て同じ向き) → 内部力が相殺され  
トルク損失低減



# EV・HEV用高速・低トルク深溝玉軸受

新型樹脂保持器の採用により  
**高速回転と回転トルク50%以上低減を実現！**

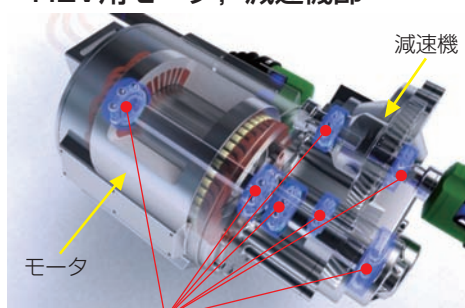


## 特長

- ① 高速回転
  - ・ dn値 120万
  - 軸受内径40mmの場合、
  - 回転速度30,000min<sup>-1</sup>
- ② 低トルク
  - ・ 油潤滑の当社標準深溝玉軸受比
  - 50%以上低減

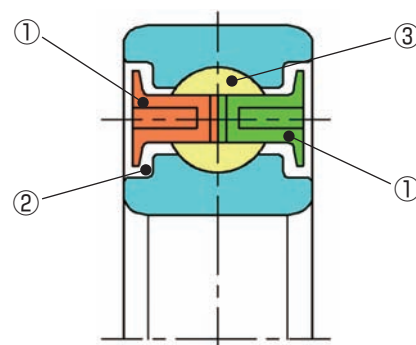
## 用途

- EV・HEV用モータ，減速機部

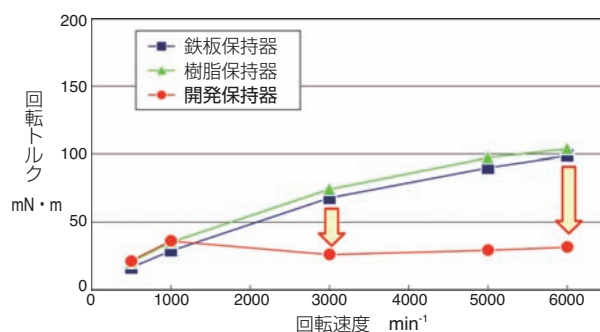


開発品（油潤滑に適用）

## 構造



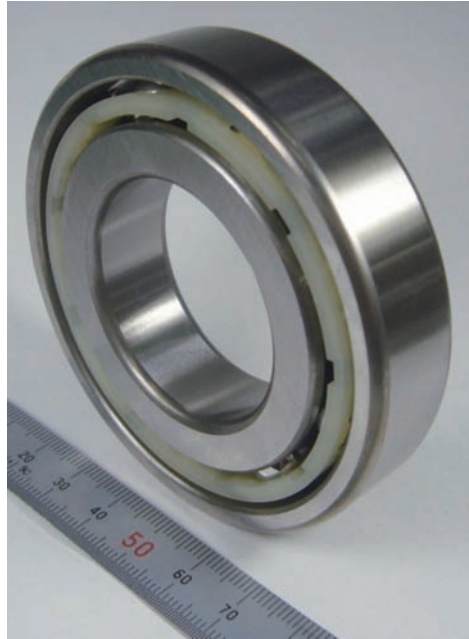
- ① 同型 2 個の新型樹脂保持器を採用
- ② 軸受内部への油の流入を抑制
- ③ 軸受内部諸元を最適化





## 高スラスト負荷用深溝玉軸受

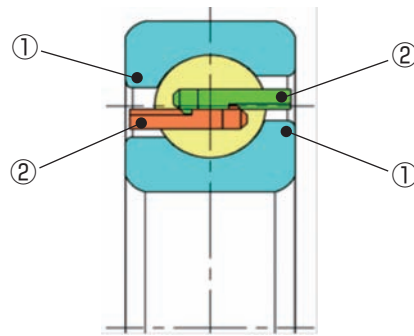
深溝玉軸受のスラスト負荷能力を大幅向上！  
 円すいころ軸受の置き換えも可能！



### 特長

- ① スラスト負荷能力
  - ・従来標準深溝玉軸受比 3倍
- ② 軸受回転トルク
  - ・円すいころ軸受比 60%低減
- ③ 組み立て工数削減
  - ・軸受組み込み時の予圧調整不要

### 構造

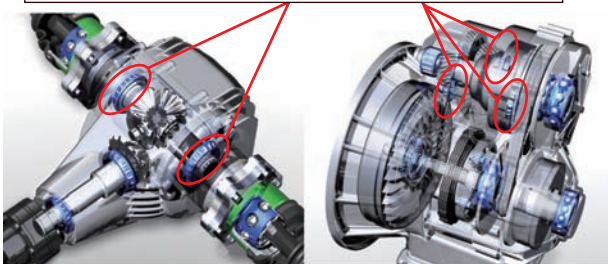


- ① 標準深溝玉軸受ベースにスラスト負荷側の肩高さをアップ
- ② 小径側と大径側を組み合わせる新型組み合わせ樹脂保持器を採用

### 用途

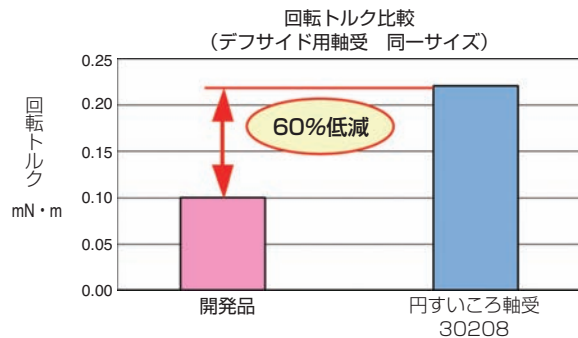
- 自動車用トランスミッション

円すいころ軸受→開発品（深溝玉軸受）への置き換え



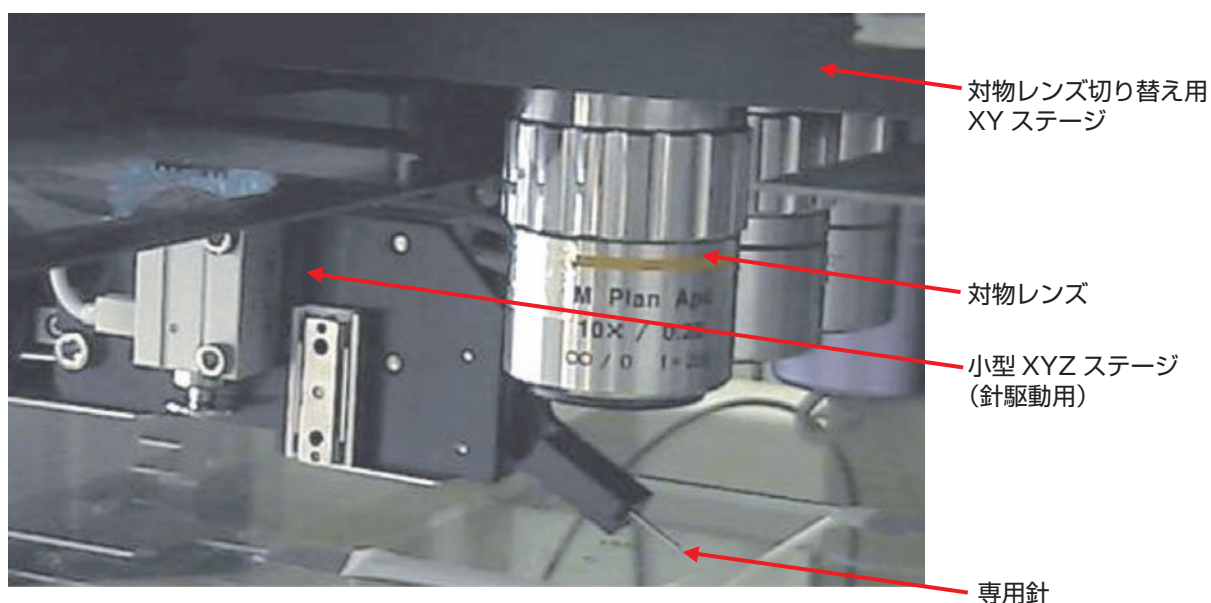
リアデフ

CVT



## 微細異物除去装置

新たな修正技術によりFPD基板製造工程の生産性向上に貢献！



### 特長

- ① 先端をマイナスドライバ状に加工した専用針により異物を除去  
⇒ レーザカット、研磨など従来の除去方法では難しかったマイクロメートルサイズの異物除去が可能
- ② モニタ画面のマウスポインタにより異物修正範囲を指示  
⇒ 周辺部損傷を最小限に抑えて異物を除去
- ③ 除去した異物や針に付着した異物残査を吸引や粘着ローラで確実に回収  
⇒ 修正後の洗浄工程を省略・簡素化可能

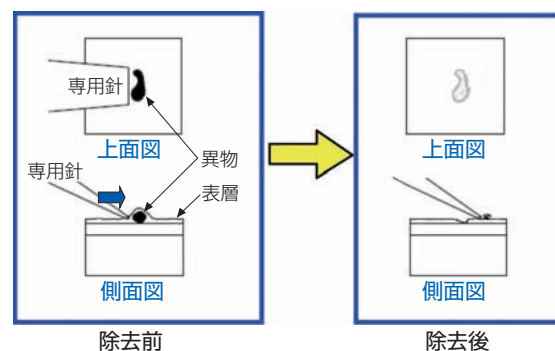
### 用途

- フラットパネルディスプレイ (FPD) 基板上の異物除去
- 露光用フォトマスク基板上の異物除去

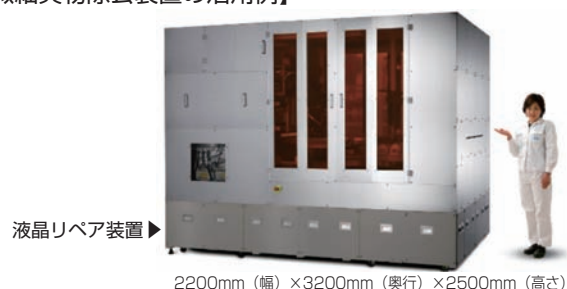
### 構造

#### 専用針による異物除去

針先で異物を押し除去  
(針は XYZ 方向に移動するステージに搭載)



#### 【微細異物除去装置の活用例】



## 楕円振動フィーダ

水平型楕円振動により**高速搬送・低騒音を実現!**



### 特長

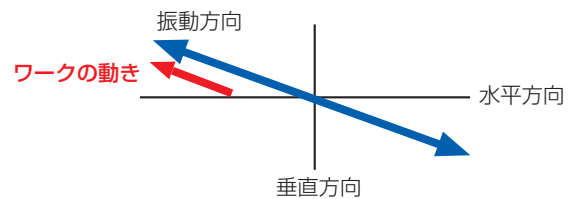
- ① 高速搬送により供給能力向上
  - ・ボウル型：12m/分  
従来品比150%
  - ・直進型：10m/分  
従来品比160%
- ② 整列供給の低騒音化を実現
  - ・楕円振動による滑らかな動きで静粛性を向上  
従来品比10%低減
- ③ 直進タイプの課題であったピッチング問題を解消

### 用途

- 自動車、電子、医療機器などの薄型・軽量部品を整列供給

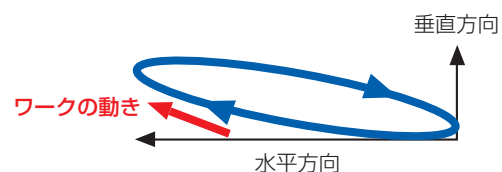
### 構造

#### 従来型



水平方向の電磁石による吸引力と傾斜させて取り付けられた板ばねの反力との組み合わせにより斜めの振動を発生させ、ワークを投げ上げる（単純な往復振動）。

#### 開発品（楕円振動型）



水平方向と垂直方向に独立して設けた2つの電磁石を組み合わせ、楕円振動を発生させる。2つの方向の駆動力を自由に制御することにより、ワークの特性に合わせた搬送が可能となる。

青い地球と、ベアリング。

ベアリングは、あらゆる機械の回転部分において、エネルギー損失を低減する「エコ部品」。

地球環境との共生のために。

私たちは未来に向けた「もの造り」の可能性を追求し続けます。

長寿命  
高性能

発電効率の  
向上

クリーンエネルギーの  
利用拡大

環境保護

「NTNブルー」は「エコロジー・ブルー」

**NTN**®

ベアリングのことなら

主軸用超大形軸受  
外径:900~2500mm



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。

●技術相談は下記営業技術へ

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)3336 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(571)6581 FAX. 093(571)6180

## NTN 株式会社

### 【自動車事業本部】

関東自動車支社 TEL 03(6713)3605 FAX 03(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)	西関東支社 TEL 042(757)1011 FAX 042(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)
宇都宮自動車支社 TEL 028(632)0511 FAX 028(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)	沼津営業所 TEL 055(962)7573 FAX 055(951)6427 〒410-0861 静岡県沼津市真砂町4丁目6番地
北関東自動車支社 TEL 0276(22)4231 FAX 0276(25)5379 〒373-0026 群馬県太田市東本町22番31号	名古屋支社 TEL 052(222)3301 FAX 052(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)
東海自動車支社 TEL 0566(72)2030 FAX 0566(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)	大阪支社 TEL 06(6449)6712 FAX 06(6448)7296 〒550-0003 大阪市西区京町堀1丁目3番17号
浜松自動車支社 TEL 053(454)2586 FAX 053(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)	神戸営業所 TEL 078(917)1201 FAX 078(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)
大阪自動車支社 TEL 06(6449)6711 FAX 06(6443)1578 〒550-0003 大阪市西区京町堀1丁目3番17号	北陸営業所 TEL 076(263)8673 FAX 076(263)8628 〒920-0024 石川県金沢市西念2丁目37番18号
広島自動車支社 TEL 082(568)5912 FAX 082(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)	広島支社 TEL 082(568)1470 FAX 082(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)
	福山営業所 TEL 084(925)2202 FAX 084(926)2593 〒720-0811 広島県福山市紅葉町2番35号 (福山DSビル11階)

### 【産業機械事業本部】

東北支社 TEL 022(262)6201 FAX 022(262)6205 〒980-0014 宮城県仙台市青葉区本町1丁目5番28号 (カーニープレイス仙台駅前通9階)	水島営業所 TEL 086(425)6311 FAX 086(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)
東京支社 TEL 03(6713)3606 FAX 03(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)	九州支社 TEL 093(571)6581 FAX 093(571)6180 〒803-0845 北九州市小倉北区上到津2丁目4番19号
北海道駐在 TEL 011(822)8788 FAX 011(822)8835 〒003-0809 札幌市白石区菊水九条2丁目2番37号	【精機商品事業部】セールスエンジニアリング部
茨城営業所 TEL 029(823)3528 FAX 029(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)	東日本地区 TEL 03(6713)3652 FAX 03(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)
宇都宮営業所 TEL 028(632)0553 FAX 028(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)	西日本地区 TEL 06(6449)6716 FAX 06(6443)1578 〒550-0003 大阪市西区京町堀1丁目3番17号
甲府営業所 TEL 055(232)2301 FAX 055(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)	中部地区 TEL 052(222)3291 FAX 052(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)

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

### 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觀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。

無断転載を禁ずる ©NTN株式会社 2012

**NTN TECHNICAL REVIEW No.80**

印刷・発行 2012年 10月25日

編集人 安田 喜信  
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