

JSPE2019春季大会キーノートスピーチ

# 転がり機械要素の技術動向

東京理科大学  
野口 昭治

2019.3.14(木)

# 1. 転がり軸受

## 転がり軸受の重要性

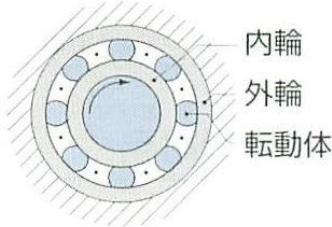
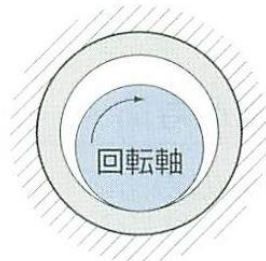
“**機械の米**”と言われるほど

- (1) 用途が多岐にわたり  
(回転部にはほとんど使われている)
- (2) 安価で大量に使われている  
(日本だけでも数十億個／年生産)



転がり軸受なくして、機械を構成できない  
(日本人の食生活における米と同じ?)

# すべり軸受と転がり軸受の特徴と違いのまとめ

特 性	転がり軸受	滑り軸受
構 造	<p>一般に内輪と外輪を有し、この間に玉又はころの転動体が介在し、この転がりによって回転荷重を支える。</p> 	<p>回転荷重は面で支持され、直に滑り接触する場合と、流体を媒体として膜厚で滑りを保持する場合がある。</p> 
寸 法	転動体が介在するため断面積が大きい。	断面積が非常に小さい。
摩 擦	起動時、回転中とも摩擦トルクは非常に小さい。	起動時の摩擦トルク大、回転中は条件によっては、小さいものもある。
内部すきま・剛性	内部すきまを負にして軸受として剛性をもたせて使用することができる。	すきま有の状態で使用。したがってすきま分だけは動く。
潤 滑	原則として潤滑剤が必要、グリース使用等で保守が容易、ごみに対しては敏感。	無潤滑で使用できるものあり、一般にはごみに対しては比較的鈍感。油潤滑条件に十分な注意が必要。
温 度	高温から低温まで使用可、潤滑剤により冷却効果が期待できる。	一般に高温及び低温に限界あり。

なお、転がり軸受は寸法が国際的に規格化されており、互換性、入手性にすぐれ、安価なため広く使用されています。

# 各種軸受の性能別評価

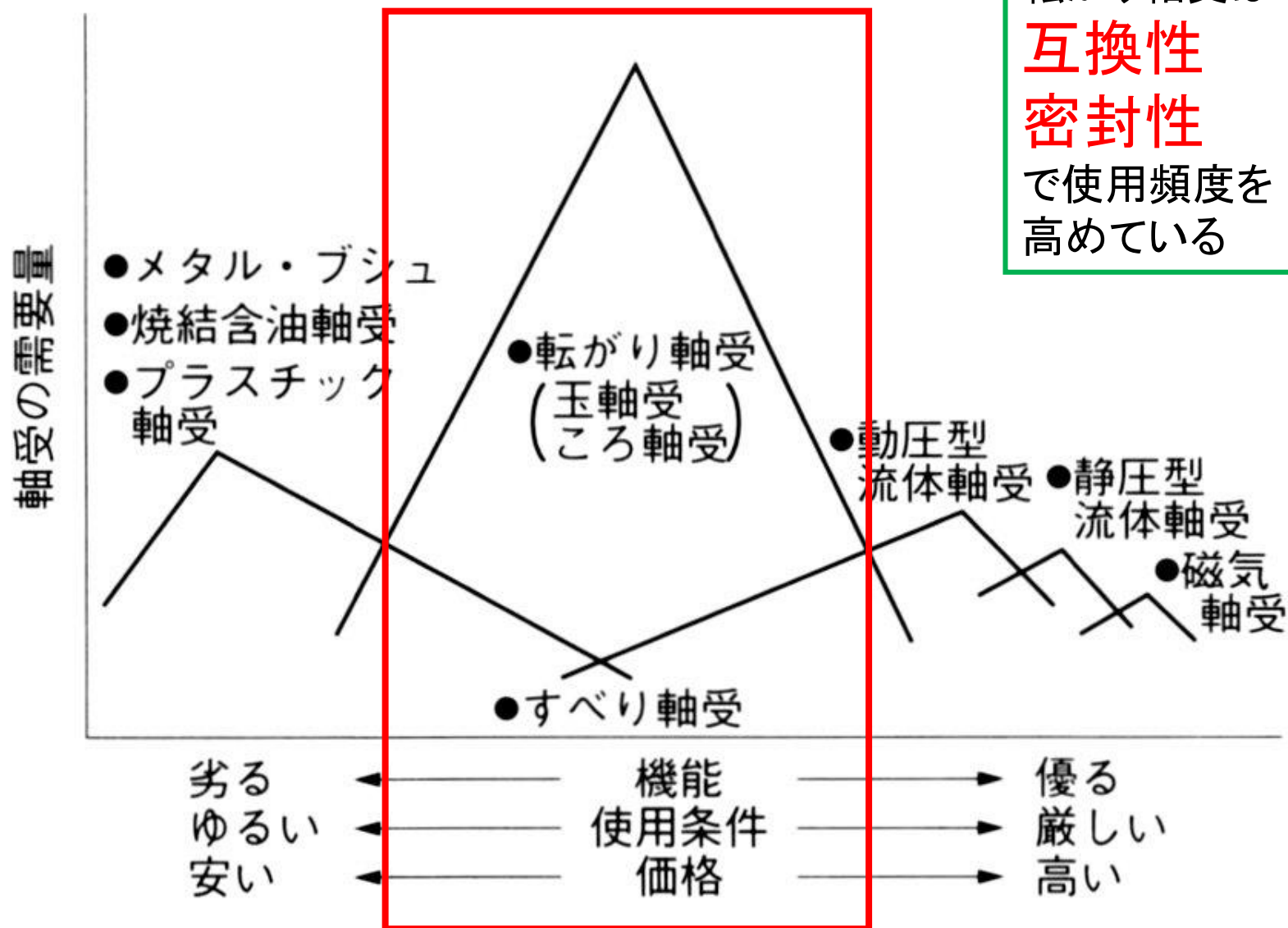
	転り軸受	油 潤 滑		気 体 潤 滑		磁気軸受
		動圧軸受	静圧軸受	動圧軸受	静圧軸受	
運動精度	○	○	◎	○	◎	○
負荷容量	◎	○	◎	×	○	×
静 剛 性	◎	○	◎	×	○	×
減 衰 性	×	◎	◎	△	△	△
高速回転	△	×	△	○	◎	◎
温度上昇	○	×	△	◎	◎	◎
保 守 性	◎	○	△	○	△	○
寿 命	△	△	◎	△	◎	◎
コ ス ト	◎	○	×	△	×	×

◎：特に優れる    ○：優れる    △：普通    ×：劣る

軸受としての性能は、すべり軸受が勝っている<sub>4</sub>

# 転がり軸受の需要と要求機能

転がり軸受は  
**互換性**  
**密封性**  
で使用頻度を  
高めている



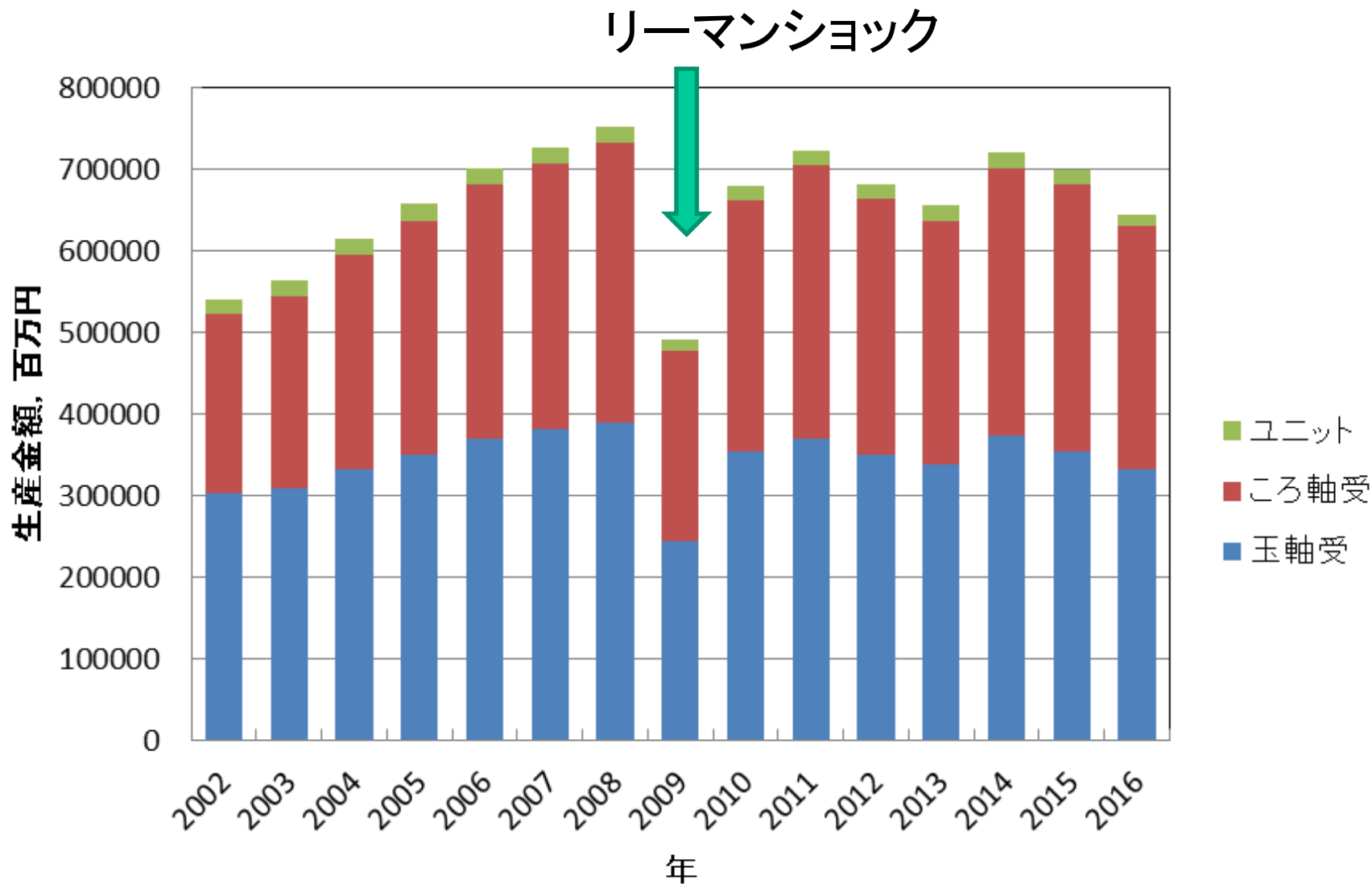


# 転がり軸受の形式と構成部品

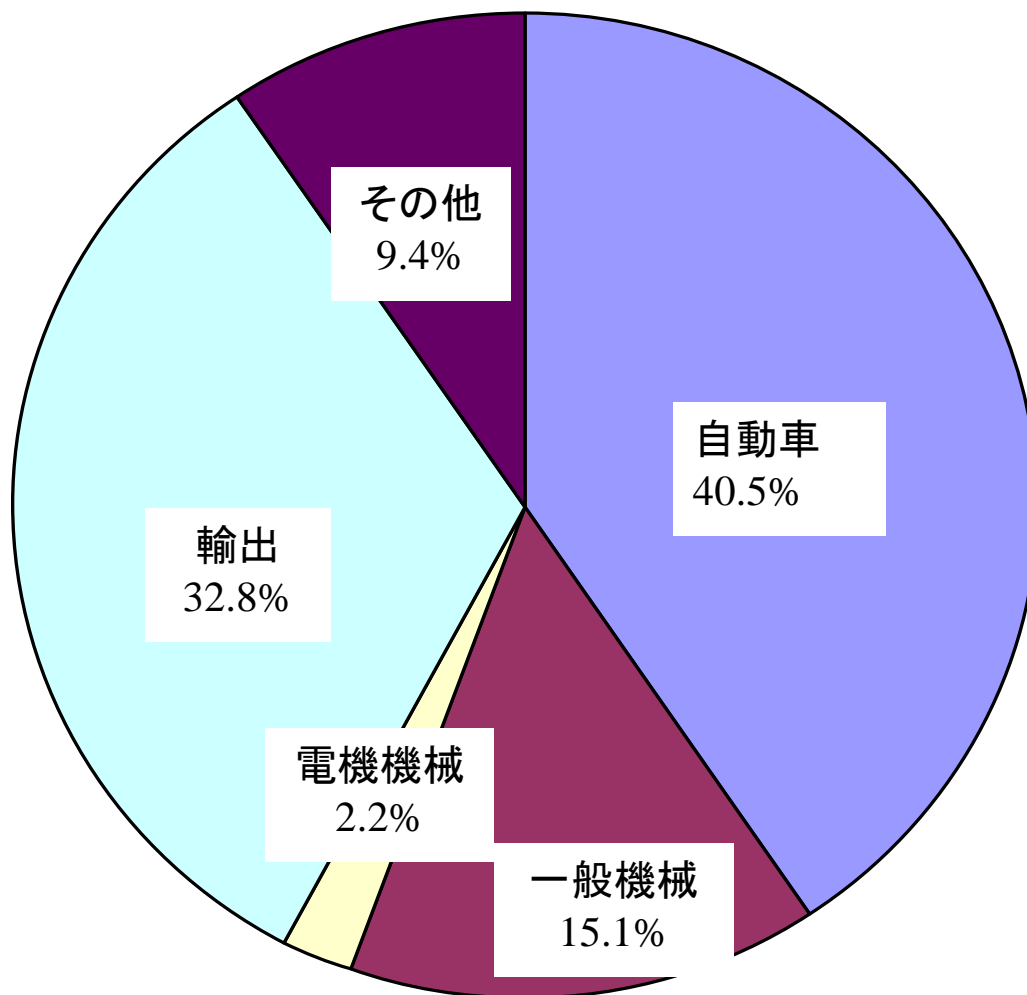
軸受形式	完成品	部 品			
		外 輪	内 輪	転 動 体	保 持 器
深溝玉軸受					
円筒ころ軸受					
円すいころ軸受					
自動調心ころ軸受					
針状ころ軸受					

図2.1 代表的な転がり軸受の比較

# 転がり軸受の現状

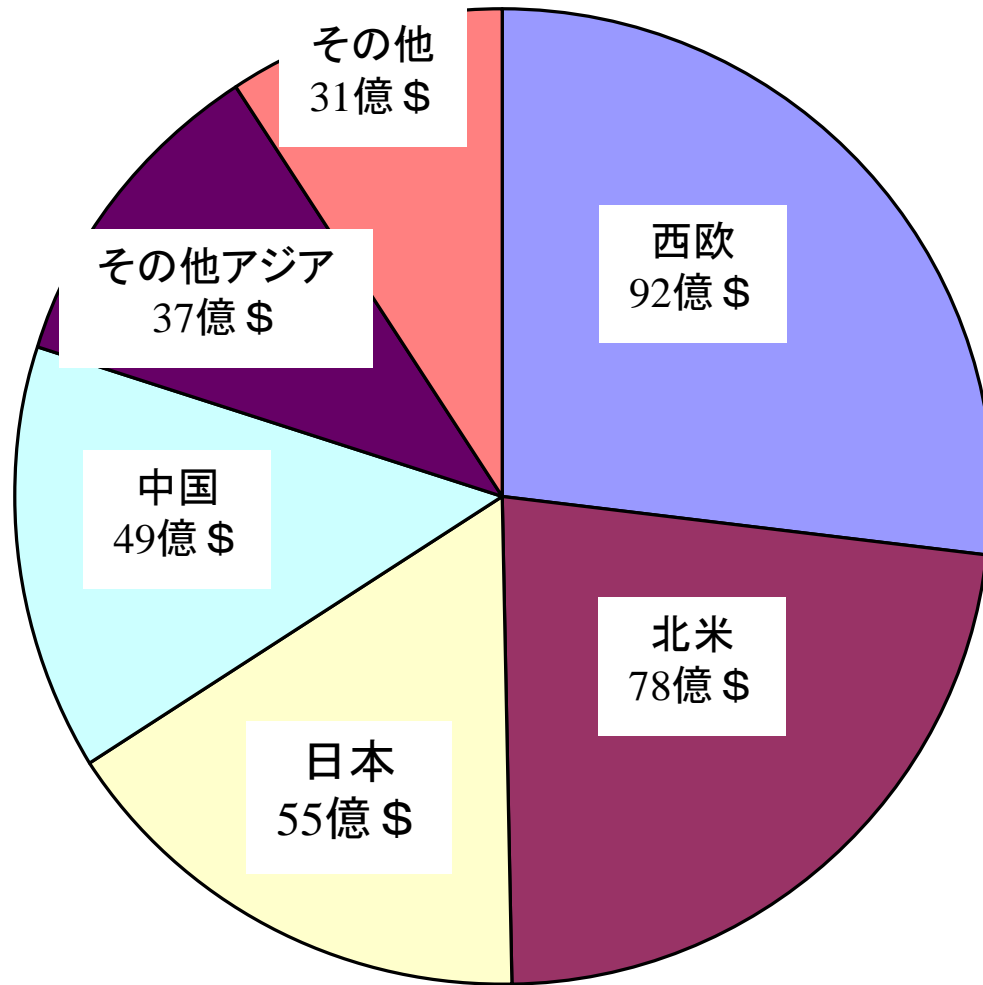


転がり軸受国内生産金額の推移

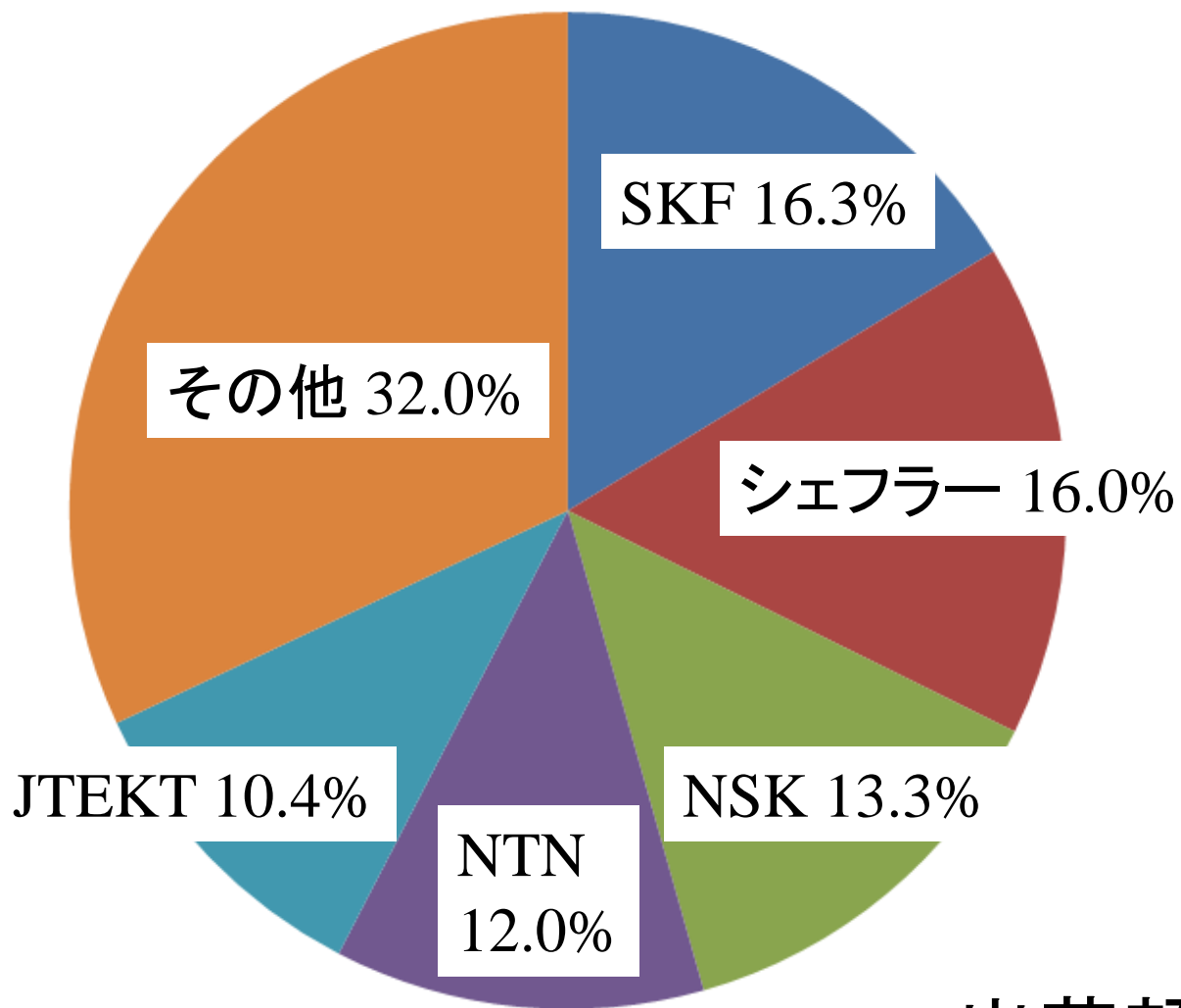


転がり軸受の産業別売上比率(2008)





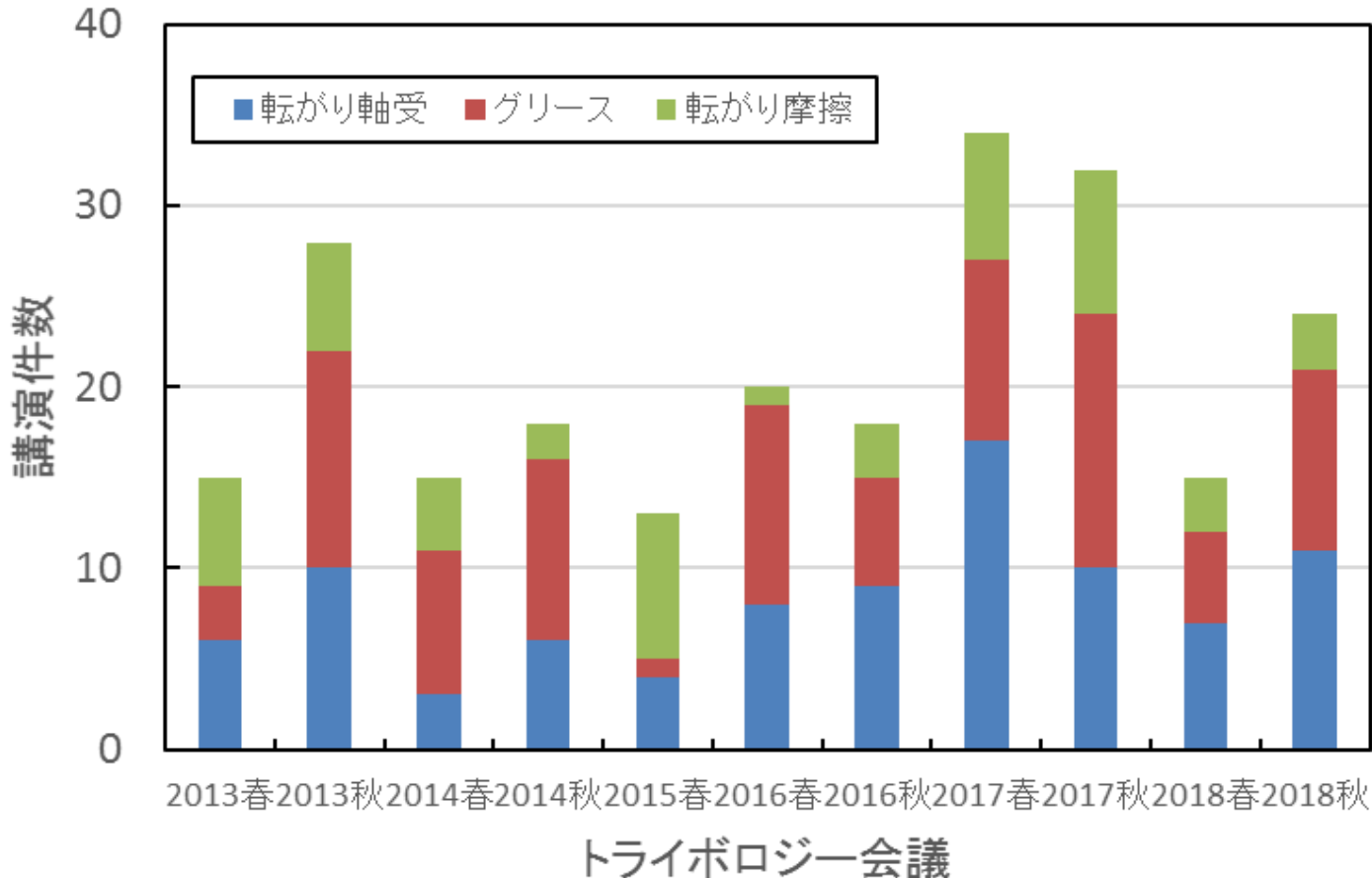
転がり軸受の地域別販売金額(2006)



出荷額: 3.8兆円

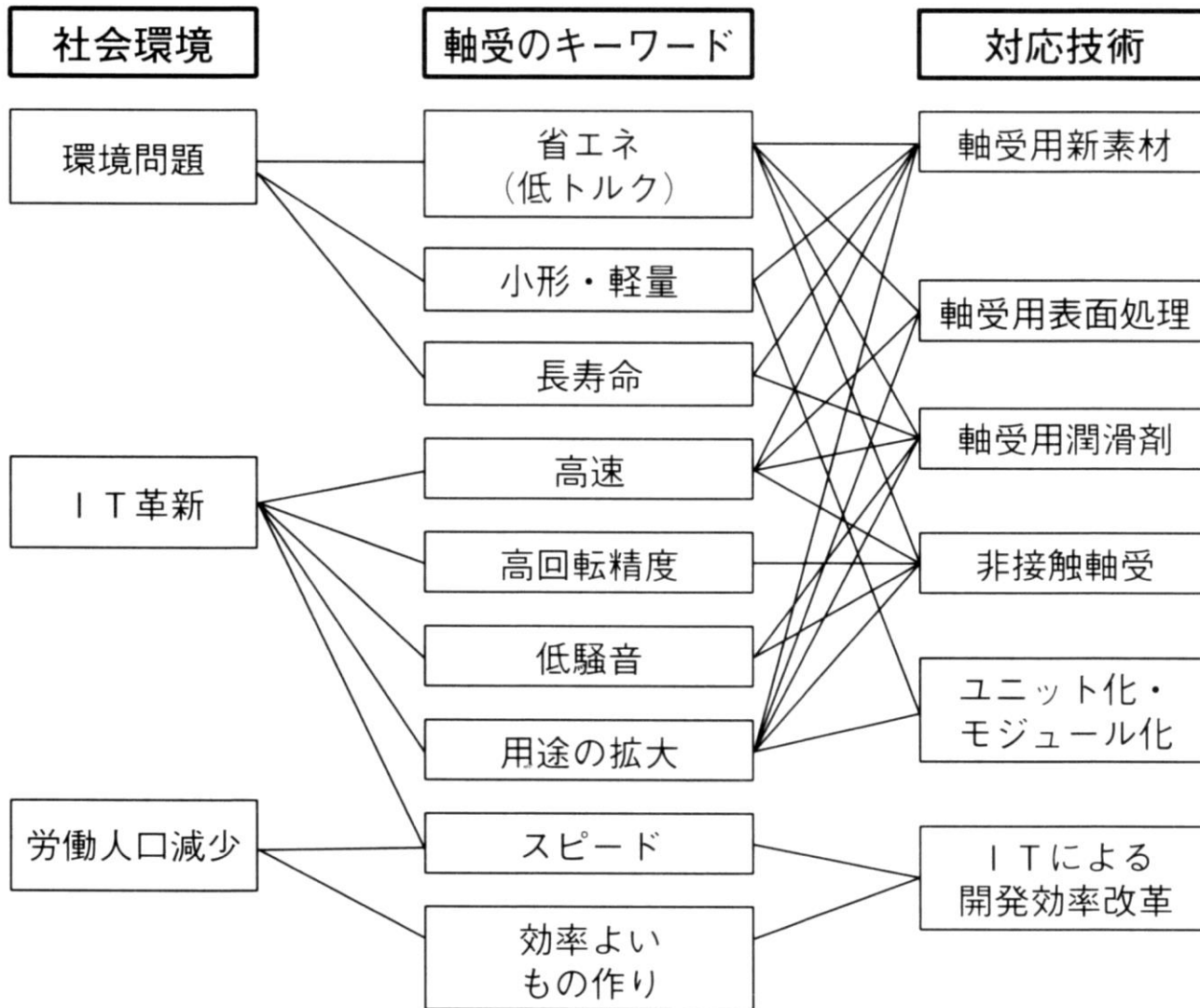
軸受各社の世界シェア (2017.6.26日経産業新聞掲載)<sub>10</sub>

# 日本における転がり軸受研究は・・・



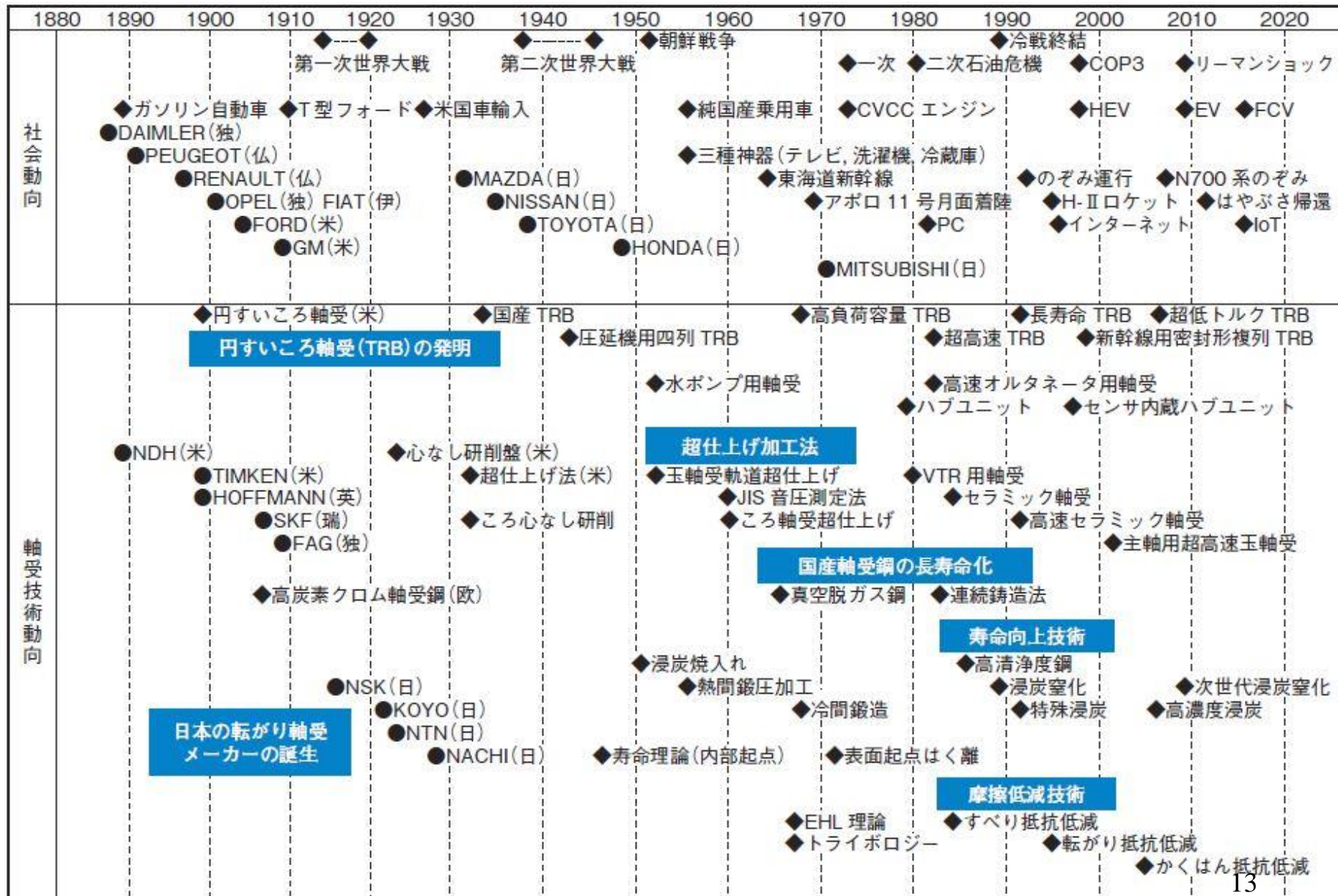
転がりの  
基礎研究は  
行われて  
いるが  
転がり軸受  
を直接対象  
にした研究  
は減少傾向

日本トライボロジー学会トライボロジー会議における  
転がり軸受関係講演数



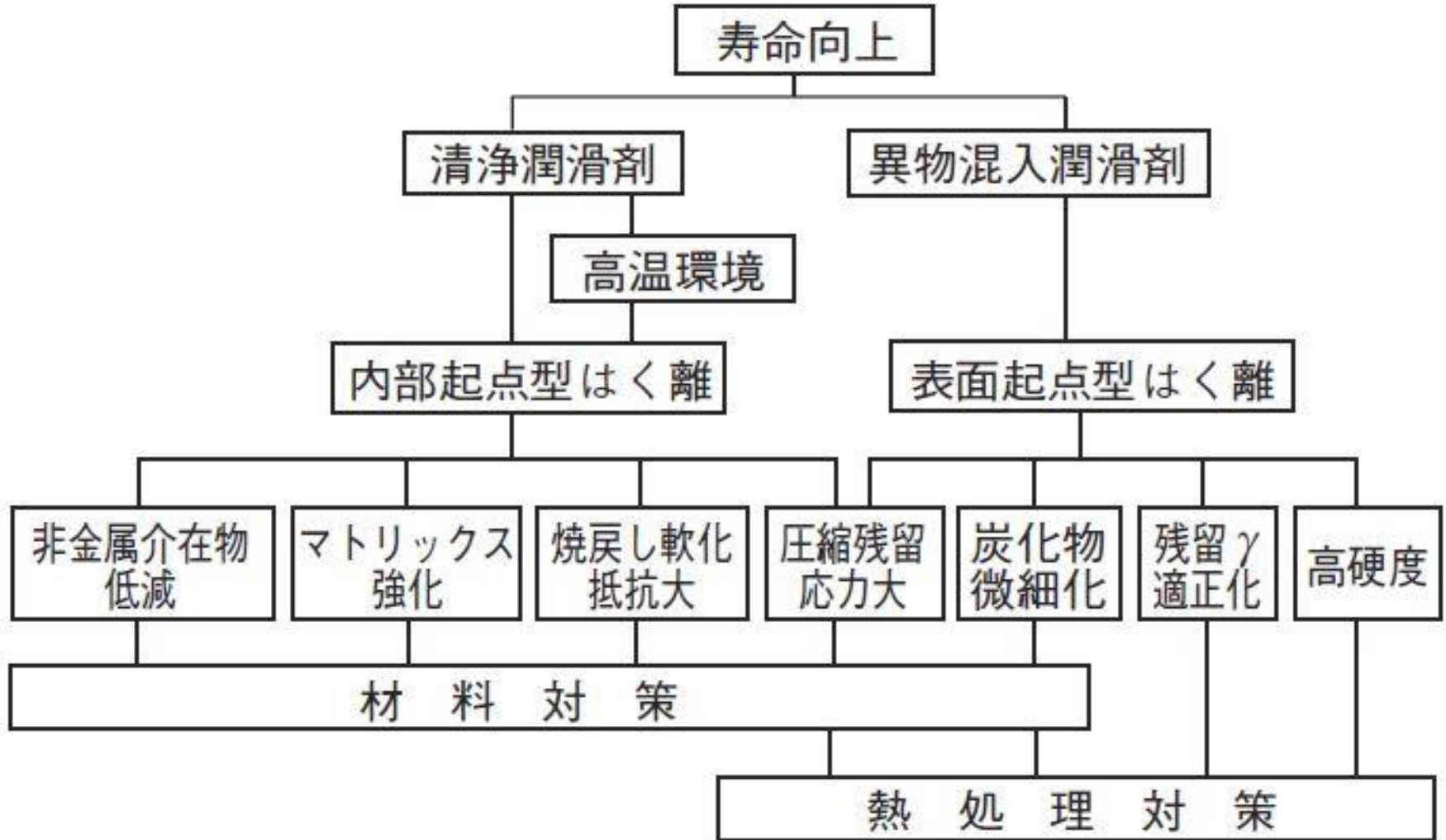
## 社会環境と転がり軸受の技術ニーズ

# 転がり軸受開発の歴史





# 寿命の要因と長寿命化技術

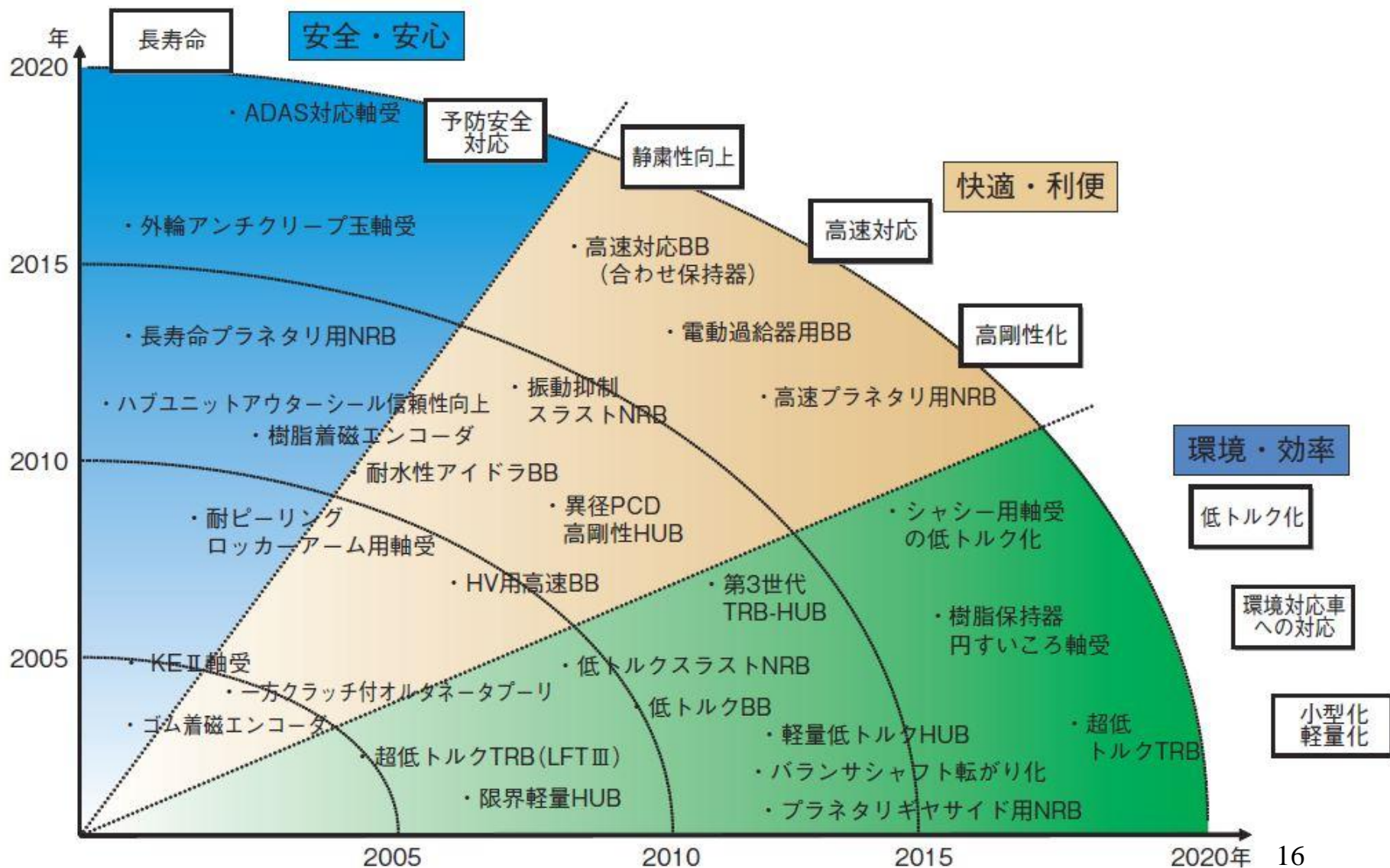


# 長寿命化に対する材料技術の変遷

開発・提案技術	特長 (材料組織的特徴)	開発対象		寿命比 (標準軸受比)	
		材料	熱処理	清浄油中	異物油中
高清浄度鋼 <sup>22)</sup> (1985)	特殊溶解鋼に匹敵する長寿命 介在物形態制御	軸受鋼	普通焼入れ	3倍以上	同等
浸炭窒化 <sup>23)</sup> (1989)	高硬度, 圧縮応力付与 残留 $\gamma$ 増量	軸受鋼	浸炭窒化	3倍以上	6倍以上
特殊浸炭 <sup>24)</sup> (1992)	高硬度 残留 $\gamma$ 量適正化	肌焼鋼	特殊浸炭	2倍以上	10倍以上
高濃度浸炭 <sup>25)</sup> (2004)	高硬度, 残留 $\gamma$ 増量 微細析出物増量	肌焼鋼	高濃度浸炭	4倍以上	15倍以上
次世代浸炭窒化 <sup>26)</sup> (2009)	高硬度, 圧縮応力付与 残留 $\gamma$ 超増量 微細合金析出物増量	軸受鋼	浸炭窒化	4倍以上	8倍以上

内部起点型、表面起点型の両方に対応する技術

# 自動車用軸受の技術動向





# CO<sub>2</sub>削減への具体的貢献事例

トータル燃費向上 (CO<sub>2</sub>削減) 10.7%\*

※★アイテムの%数値の合計

2.5L クラス車両例 (4WD 車ベース)

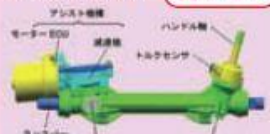
EPS : 電動パワーステアリング

油圧 PS 比 2.5%



コラムアシストタイプ  
EPS (C-EPS®)

油圧 PS 比 ★2.5%



デュアルピニオンタイプ  
EPS (DP-EPS®)

★1.5%



超低トルク円すいころ  
軸受 (LFT®-III)

★0.6%



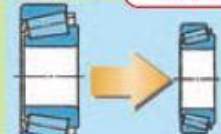
油潤滑用  
低トルク玉軸受

1.6%



デファレンシャル  
ピニオン用低トルク軸受

▲803g/台 0.03%



小型軽量化円すい  
ころ軸受 (KE-II)

★0.8%



低トルク・低コスト・  
軽量ハブユニット

★0.6%



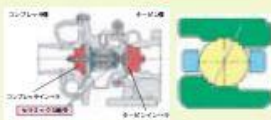
ホイール軸受用  
超低トルク仕様シール

★0.01%



ローラフィンガ  
フォロア

★0.5%



ターボチャージャ用  
セラミック玉軸受

★0.1%



低トルク  
オイルシール

4.0%



アイドルストップ用  
電動ポンプ (EOP®)

★0.02%



小型軽量 CVJ

★4.0%

フルタイム4WD→  
ITCC オンデマンド  
4WD 時



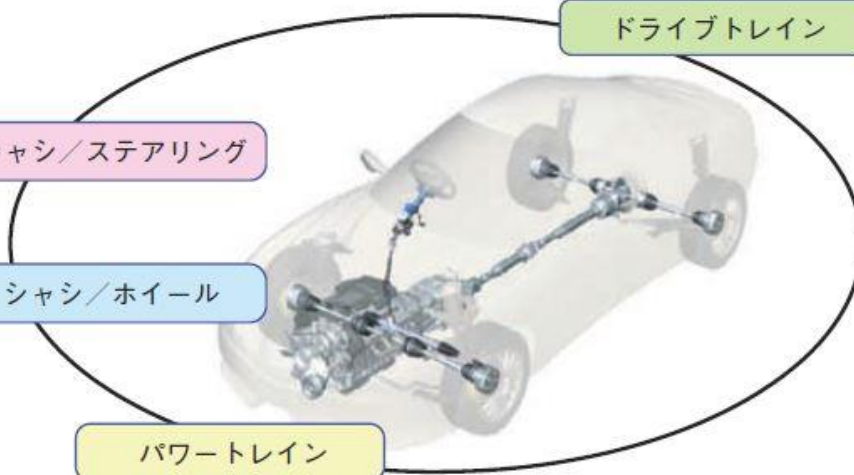
ITCC®  
(電子制御式4WDカップリング)

ドライブトレイン

シャシ/ステアリング

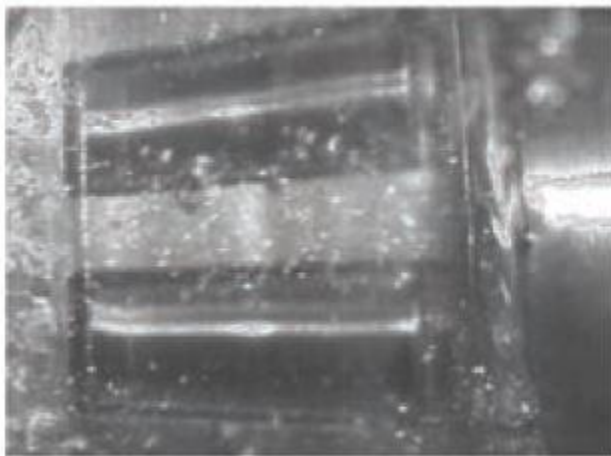
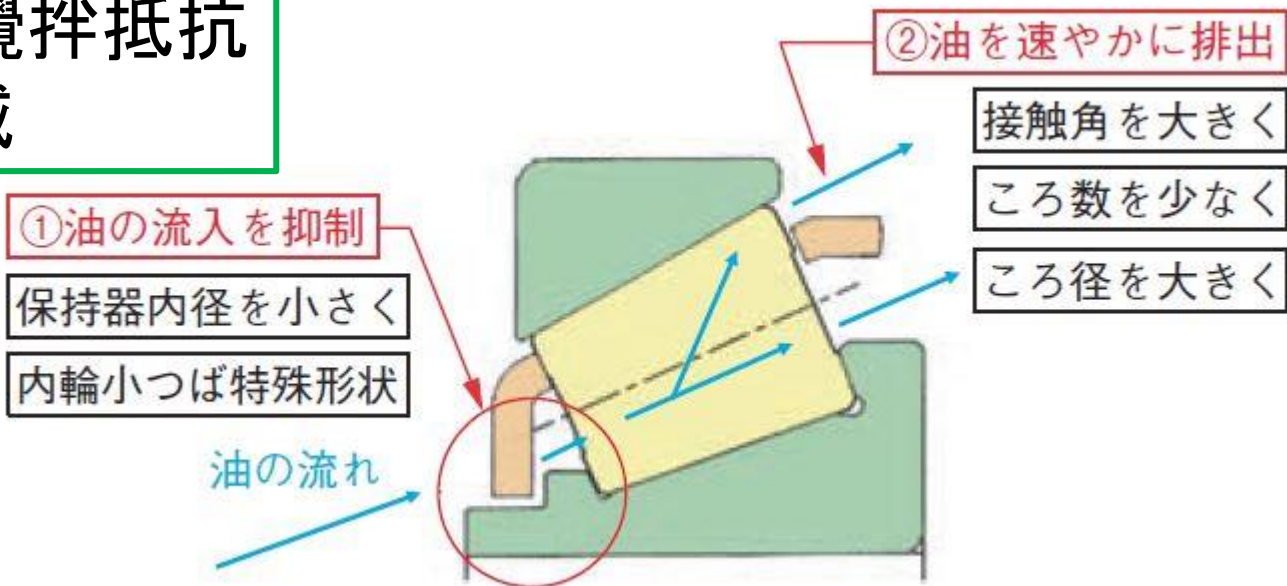
シャシ/ホイール

パワートレイン

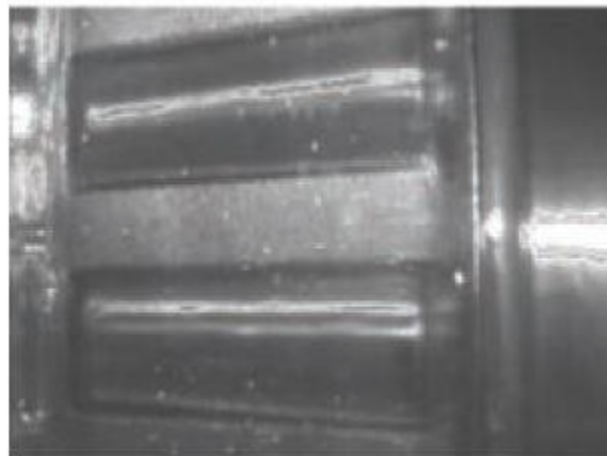


# 円すいころ軸受の低トルク化技術

潤滑油の攪拌抵抗  
を大幅低減



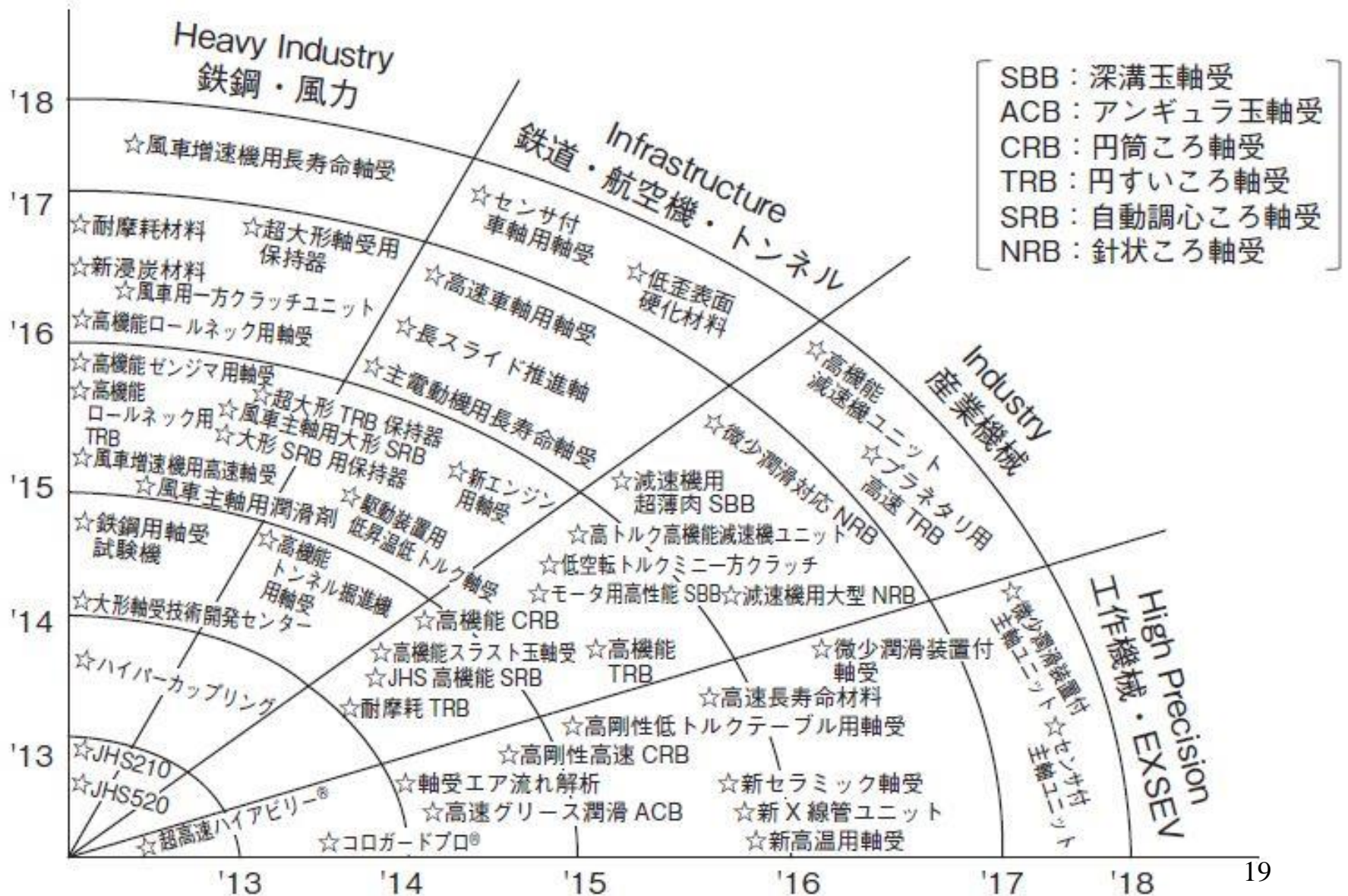
(a) 従来軸受



(b) 開発軸受



# 産業機械用軸受の技術動向



# 鉄鋼圧延機用自動調心ころ軸受の新技術



開発品



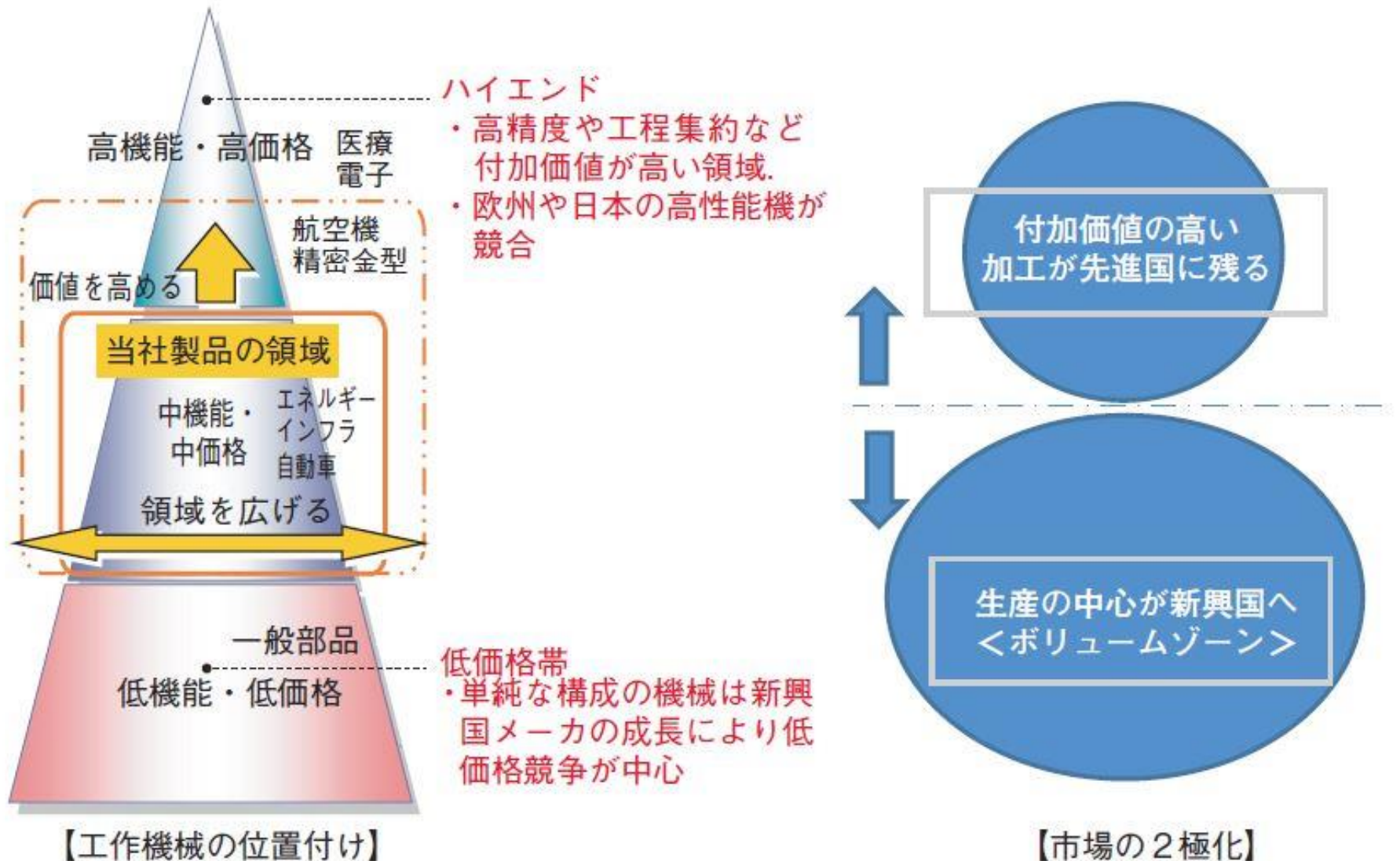
開発品-断面図



従来品-断面図

左右のころ接触角を非対称として一方方向の  
アキシアル負荷能力を向上

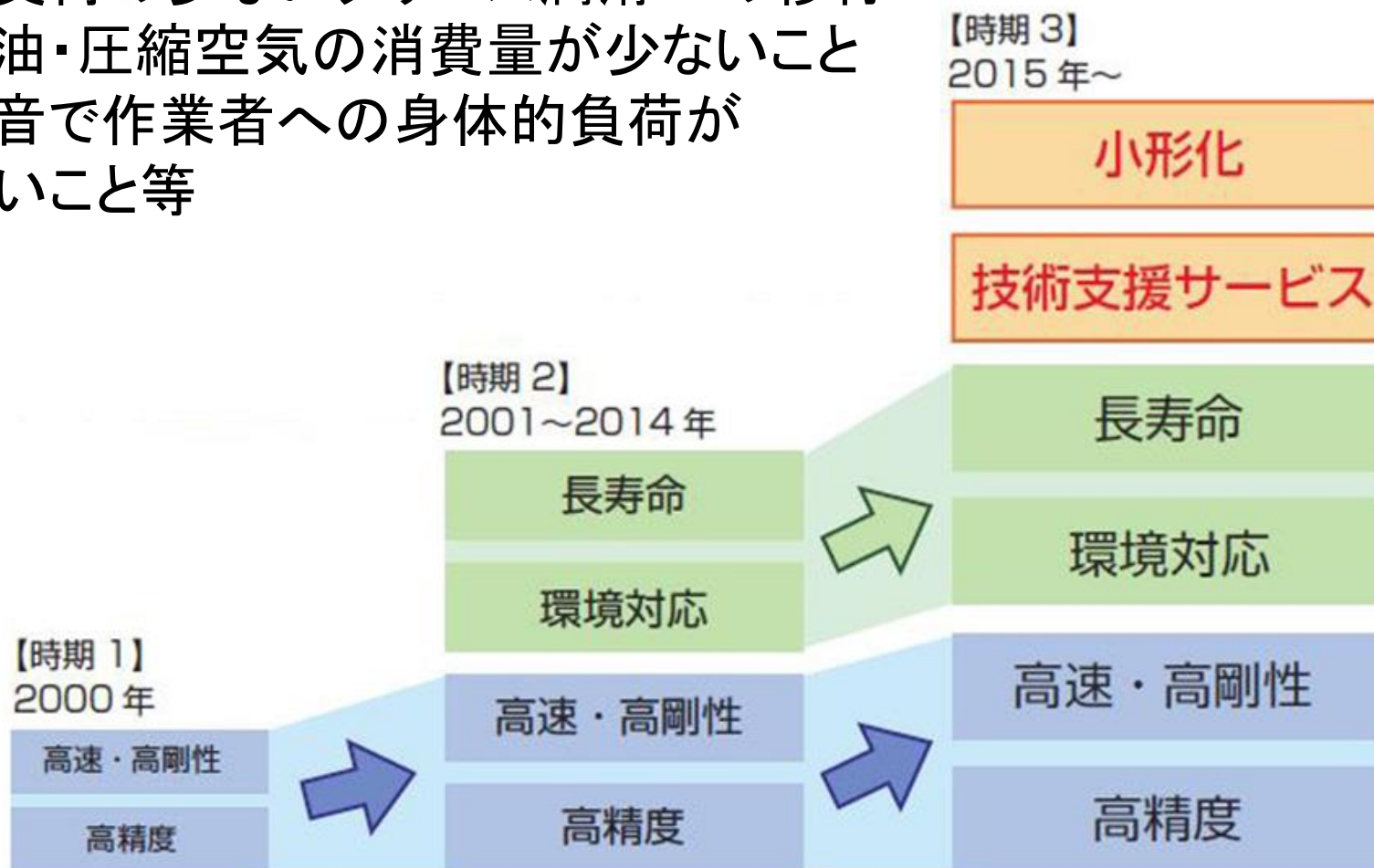
# 工作機械市場の変遷





# 環境対応とは？

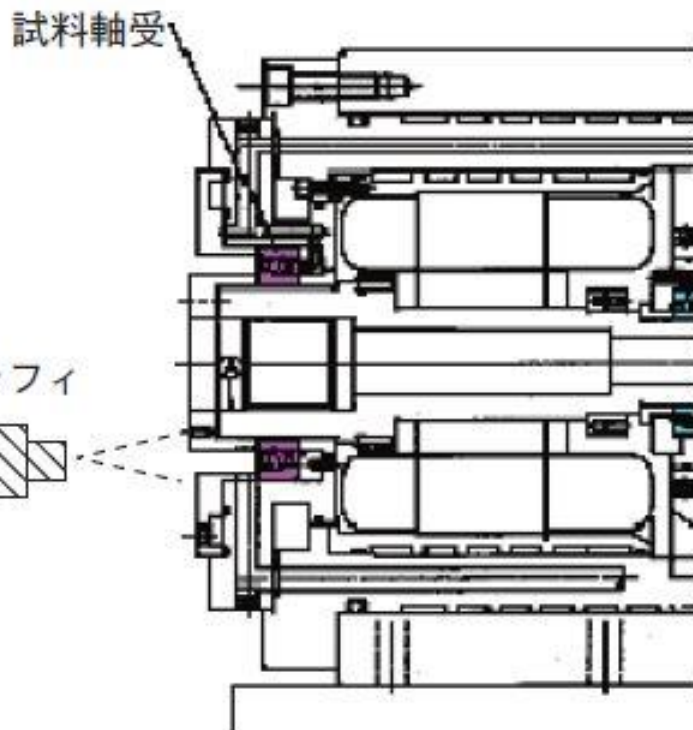
- ・環境負荷の少ないグリース潤滑への移行
- ・潤滑油・圧縮空気の消費量が少ないこと
- ・低騒音で作業者への身体的負荷が少ないこと等



工作機械用転がり軸受に対するニーズの変遷

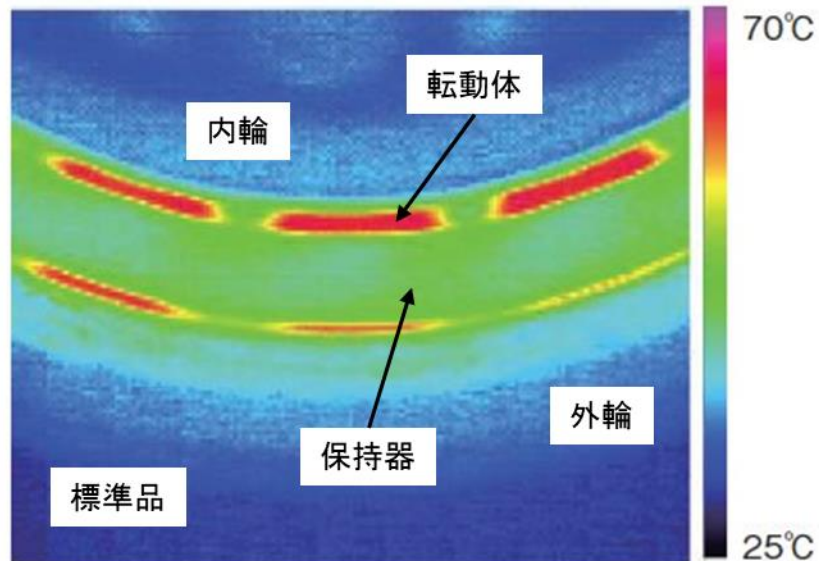
# 低昇温化技術

回転中の軸受温度を測定  
できる技術の開発

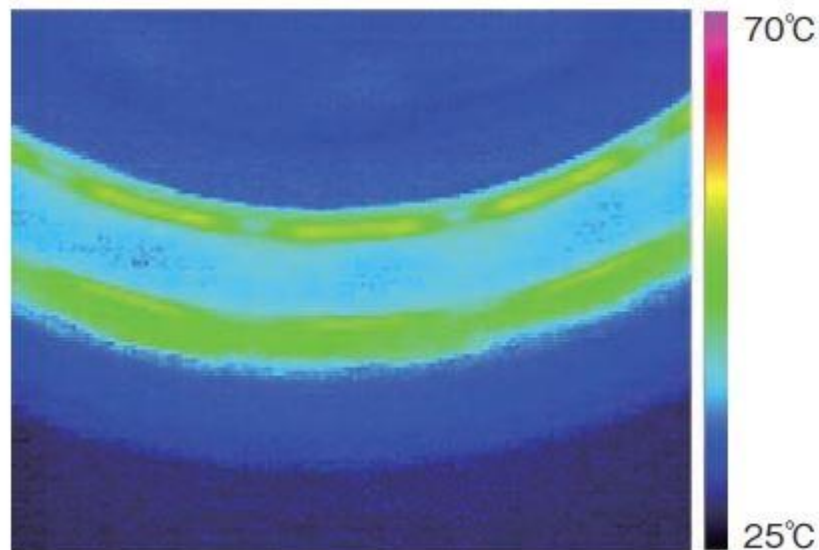


特殊サーモグラフィ装置

(軸受の回転と同期させて  
静止状態のように撮影)



低昇温対策前の温度分布

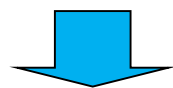


低昇温対策後の温度分布

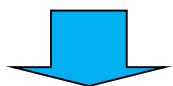


# 海外廉価玉軸受の寿命評価

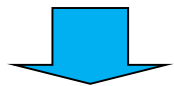
海外製小径玉軸受は日本製軸受と比較すると約**半額から2/3**と非常に安価である



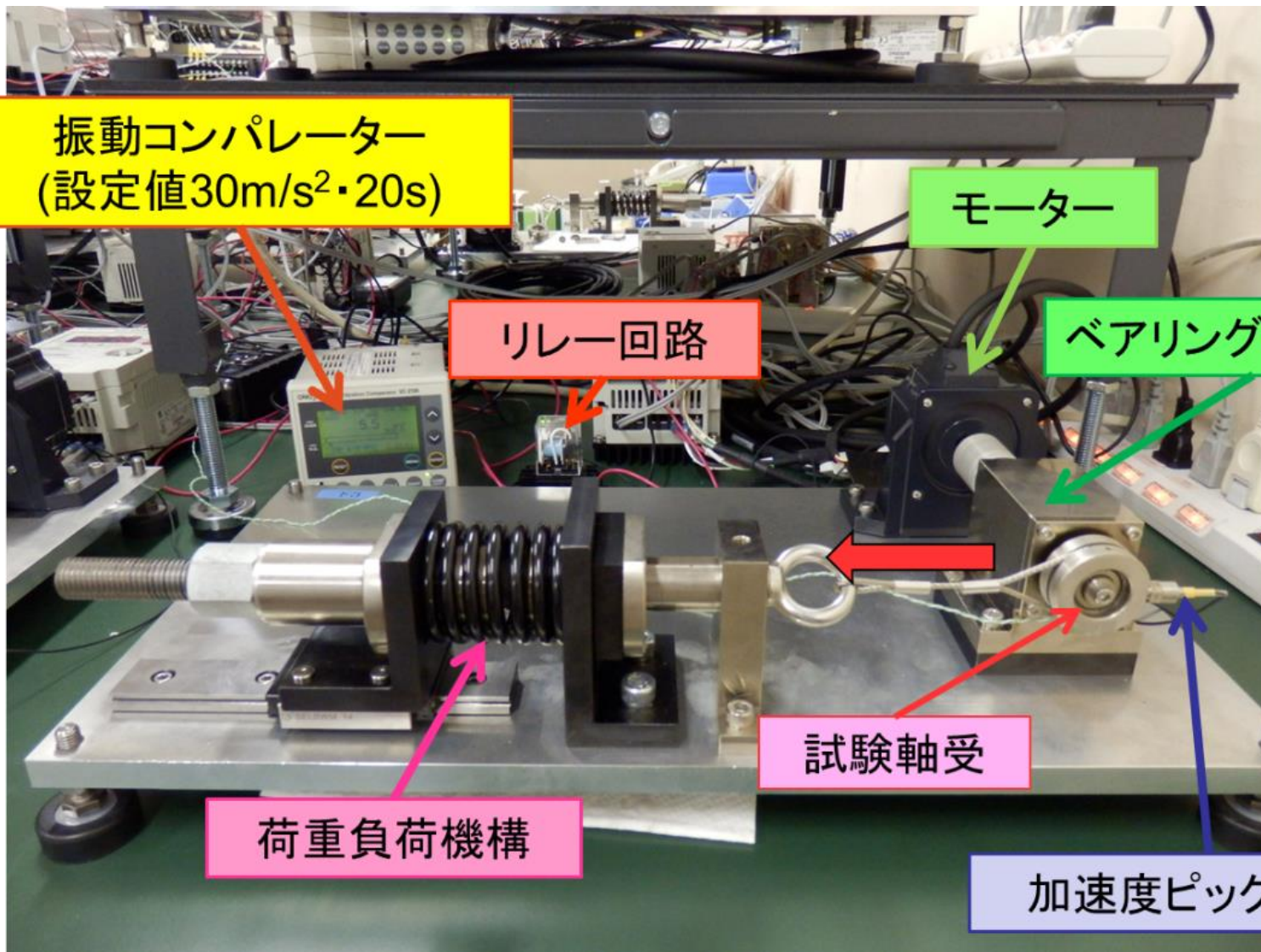
日本製を海外廉価品に置き換えるだけで**コスト削減が可能**である



品質(**特に疲労寿命**)に不安があり、現状ではあまり普及していない(脅威ではない)



業界としては海外廉価小径玉軸受の**実力を把握**しておく必要があると思われるが、**ベアリング工業会は消極的。**



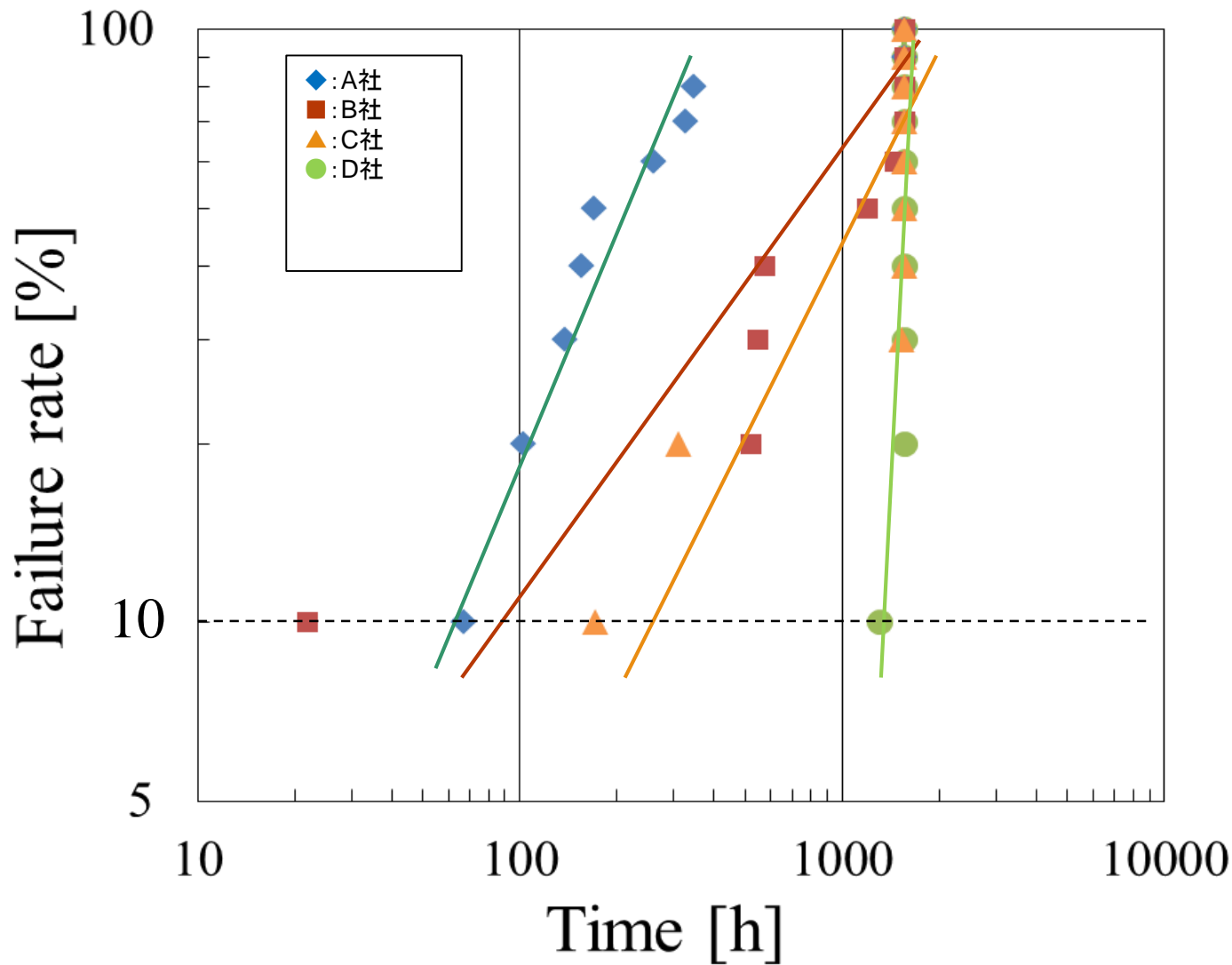
小型玉軸受耐久試験装置

# 実験条件

試験軸受	海外製3社の608各10個 (会社はインターネットから任意に選択)
回転速度	4000 min <sup>-1</sup>
ラジアル荷重	660N(国内軸受の基本動定格荷重の20%)
室温	23~27°C
定格寿命	521時間(21日と17時間)
測定項目	振動加速度、軸受温度

小径深溝玉軸受608  
(内径8mm、外径22mm、  
厚さ7mm、基本動定格荷重3300N)  
転動体数7





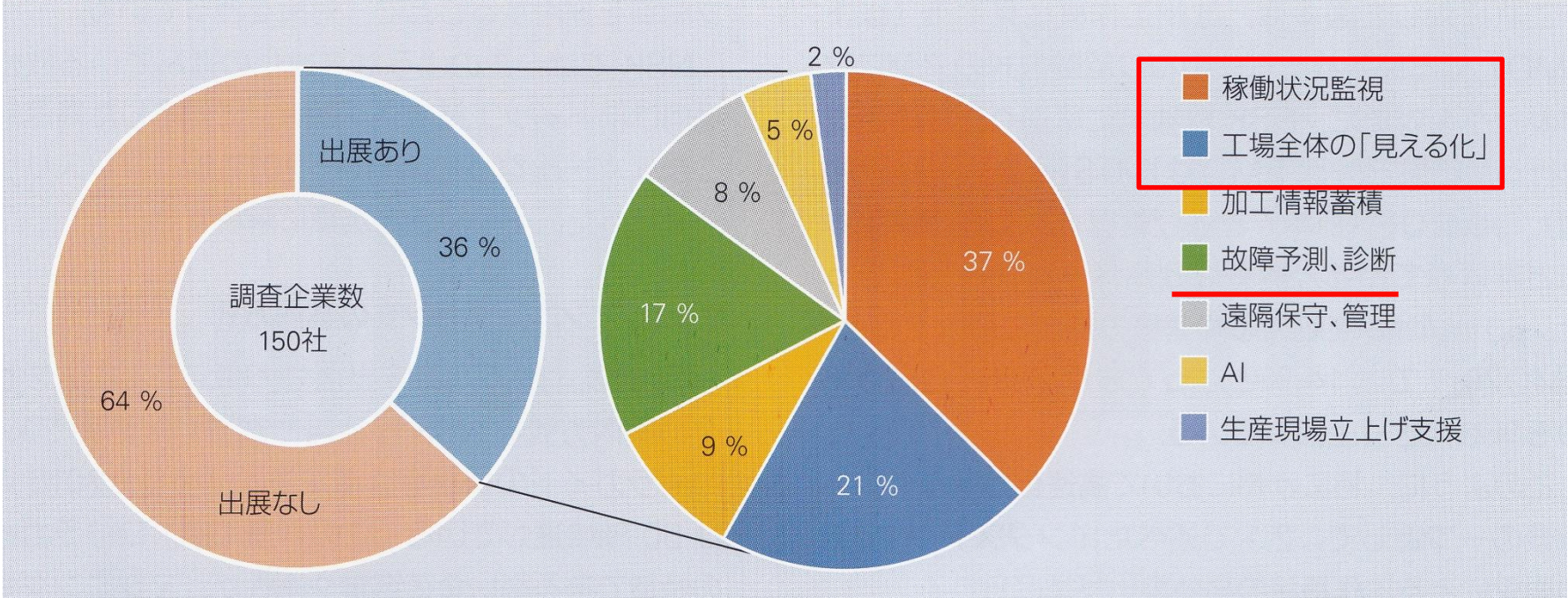
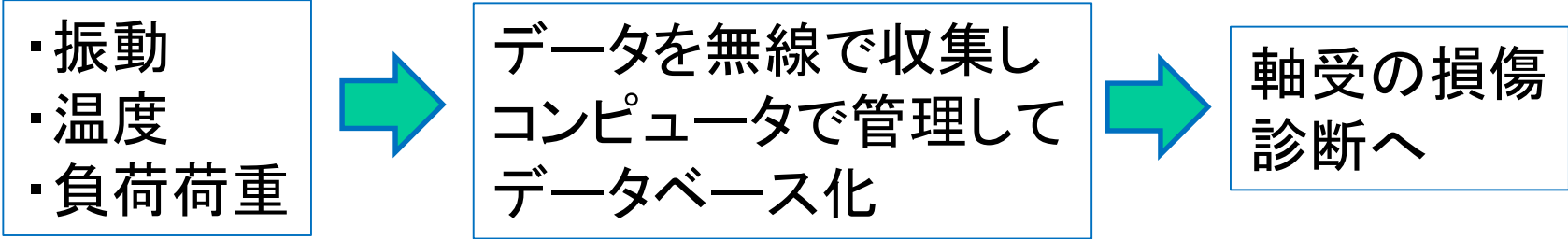
メーカー毎に寿命にはばらつきがある

耐久試験から得られたワイブルプロット



# IoT/インダストリ4.0 対応技術

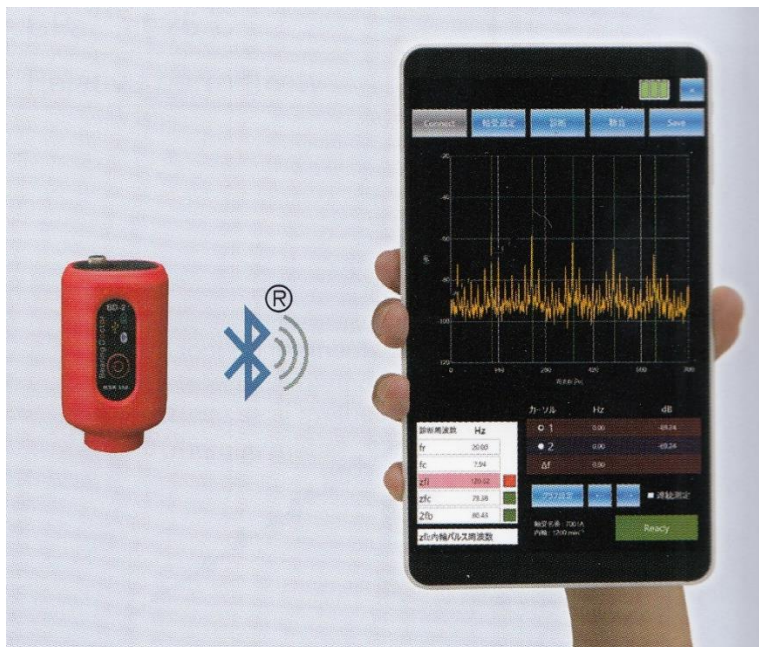
## 機械状態監視の一元化 → 転がり軸受の状態監視



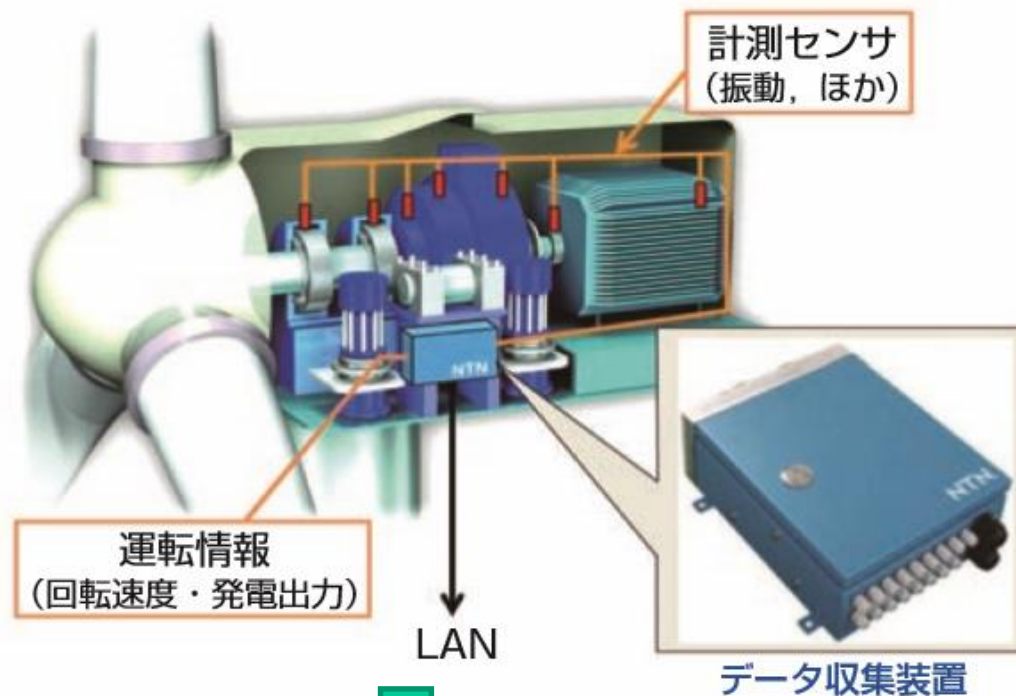
JIMTOF2016におけるIoT関連出展企業数



# 転がり軸受メーカーにおけるIoT機器の例

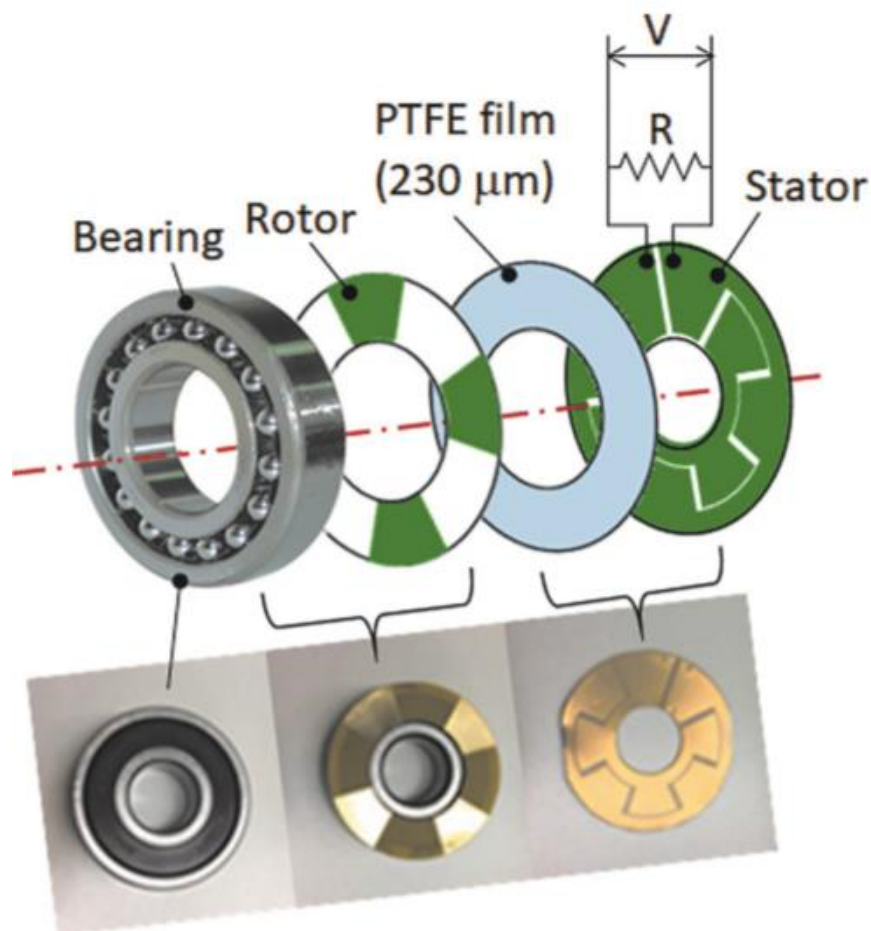


NSK Technical journal No,691

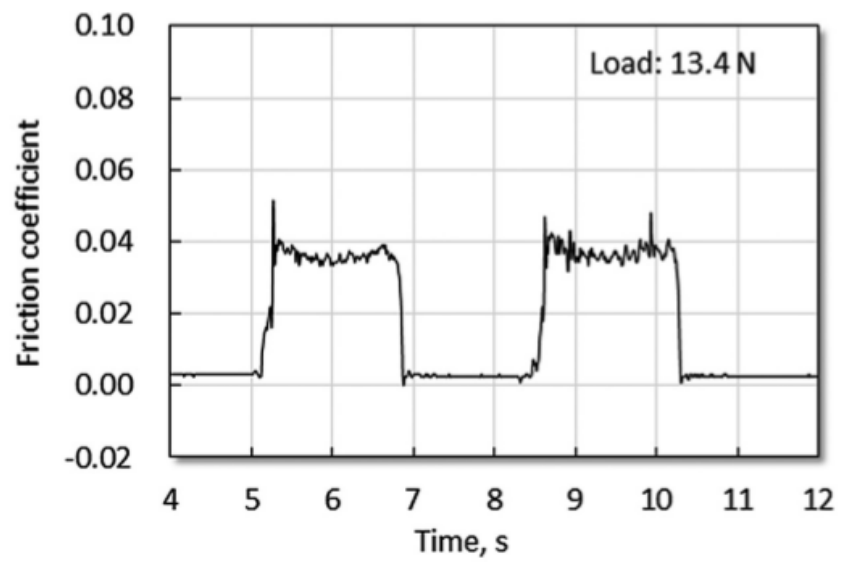
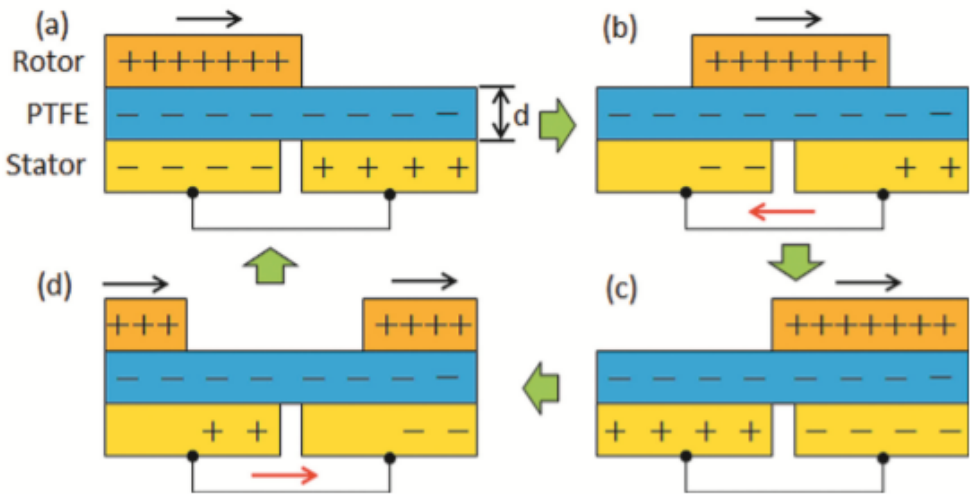


# 摩擦帯電を利用したコンパクト発電システム

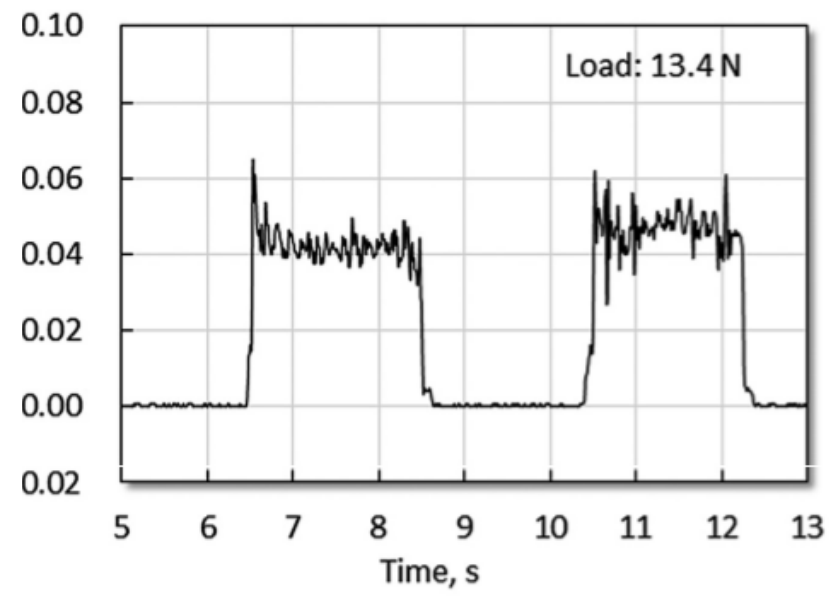
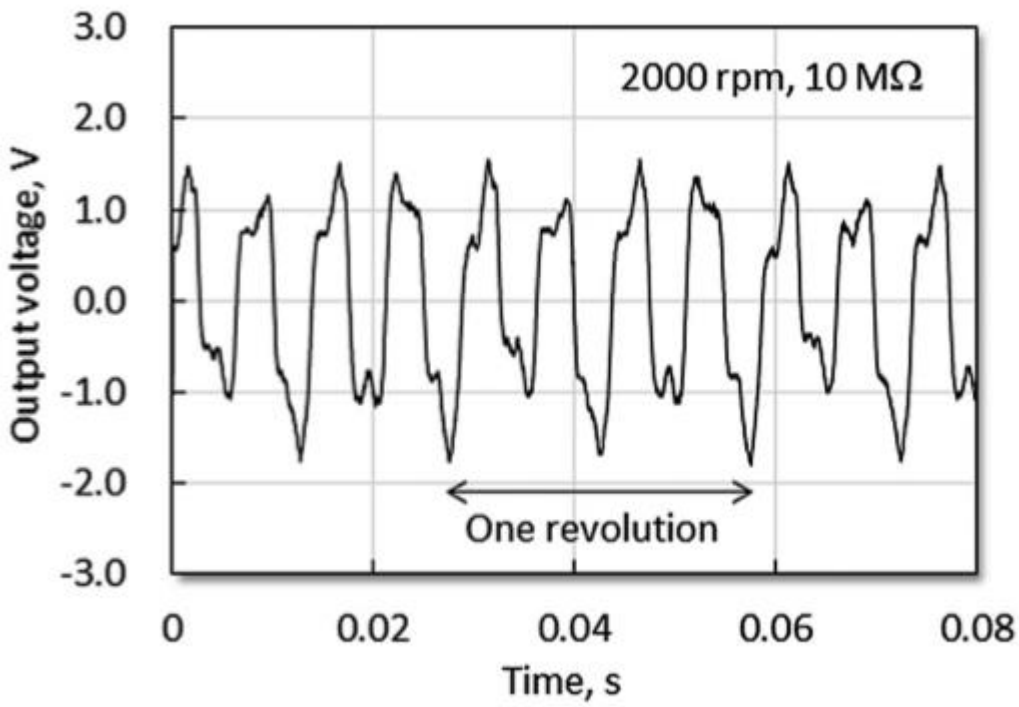
転がり軸受側面に取り付けることができる摩擦帯電センサで発電することにより、**電力自己供給**の可能性



- ・玉軸受6201DDU  
（内径12×外径32）  
の側面に装着できるように製作。
- ・量産を考慮し、FPC  
（Flexible Printed Circuit）基板  
を用いて作成を



(a) Without tribocharge sensor



(b) With tribocharge sensor

# 発電原理と発電電圧

軸受トルクは10%上昇

## 2.ボールねじ

### 射出成形機用が増加

→ 高負荷突発ボールねじの開発が急務

・耐荷重対策

① 許容ア:

② 限界ア:

しない)

・負荷分布の

① ボール径

② ナット内



$\frac{B}{S}$ )

:超えて接触

重バランス)

ねじ溝形状は左右対象のまま、改善を試みている(耐荷重対策は深溝玉軸受と同じ内容)

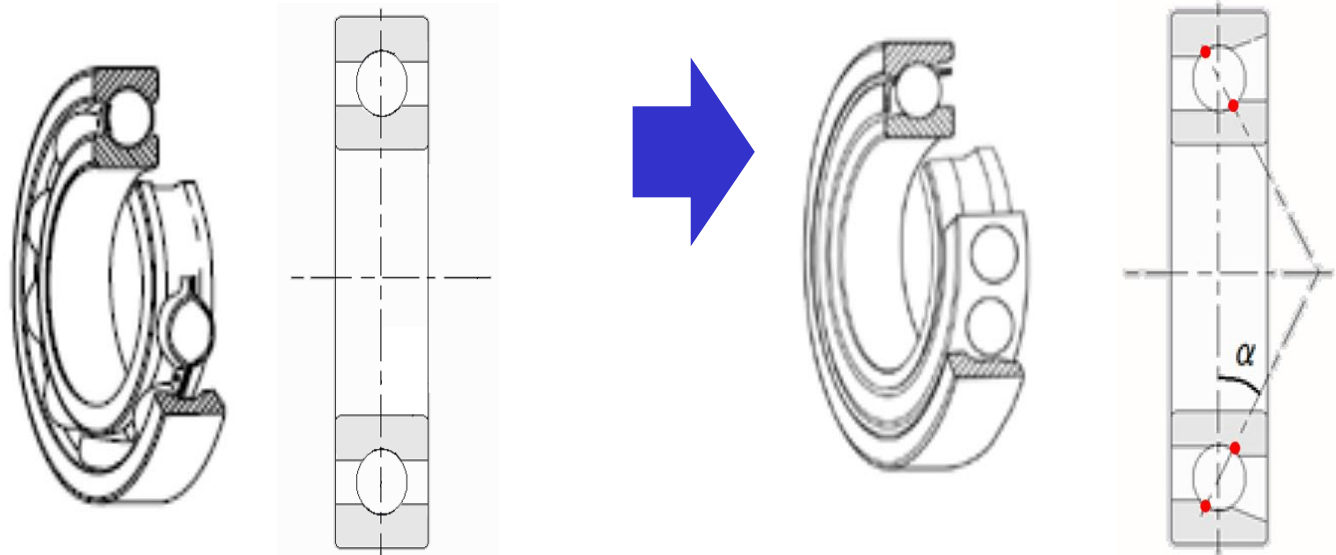


# 新たな改善手法の提案

## 一方向の剛性を高めた機械要素に

### 注目

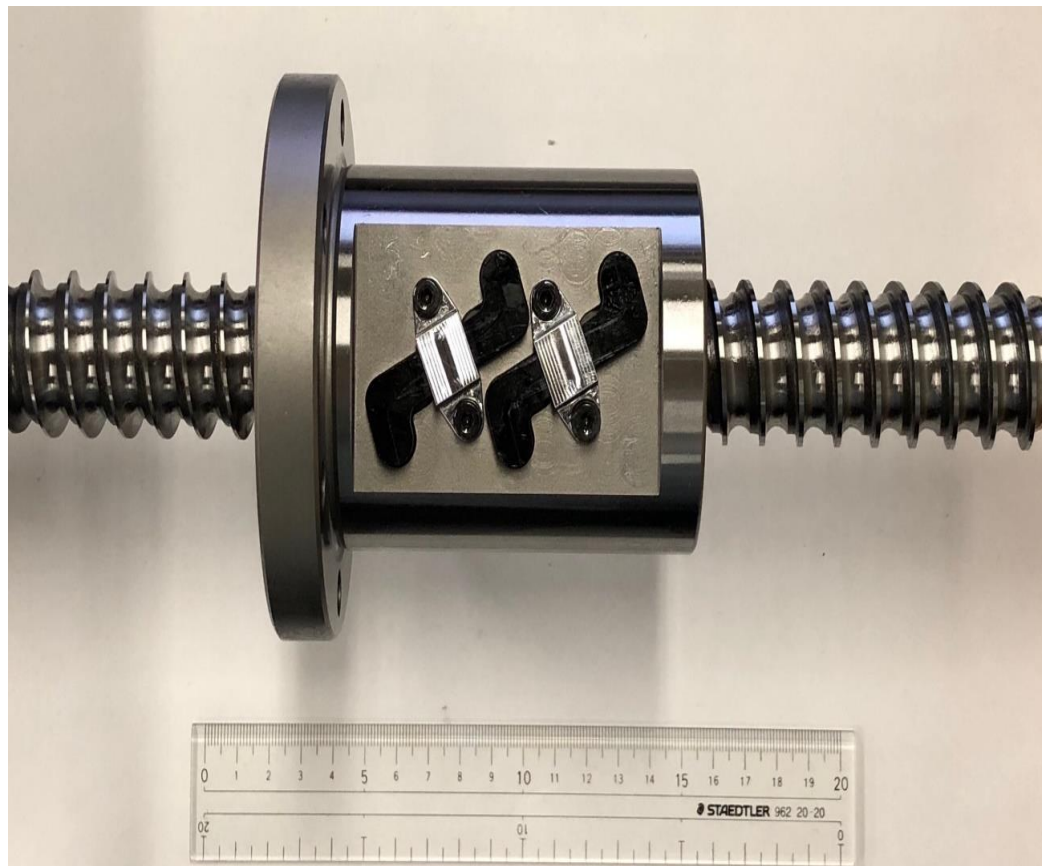
アンギュラ玉軸受は、ボール溝を非対称にして、接触角を大きくすることで高剛性を実現している。



深溝玉軸受

アンギュラ玉軸受

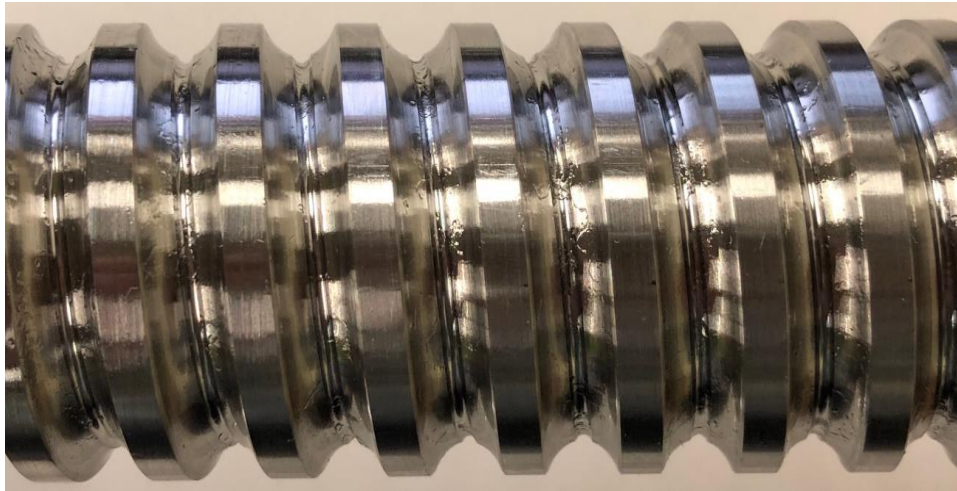
# 非対称溝ボールねじの試作



	Symbol	Unit	Asymmetry groove	
			Anti-load side	Load side
Ball diameter	$D_w$	mm	6.35	6.35
Ball central diameter	$D_{pw}$	mm	30.75	30.75
Number of Balls(1 turns)	$Z_1$	□	15	15
Contact angle	$a$	°	30	60
Lead	$Lh$	mm	10	10
Turns	$i$	□	5	5
Nut diameter	$D_1$	mm	74	74

接触角以外の仕様は現行品 (BNF3210) と同じにした

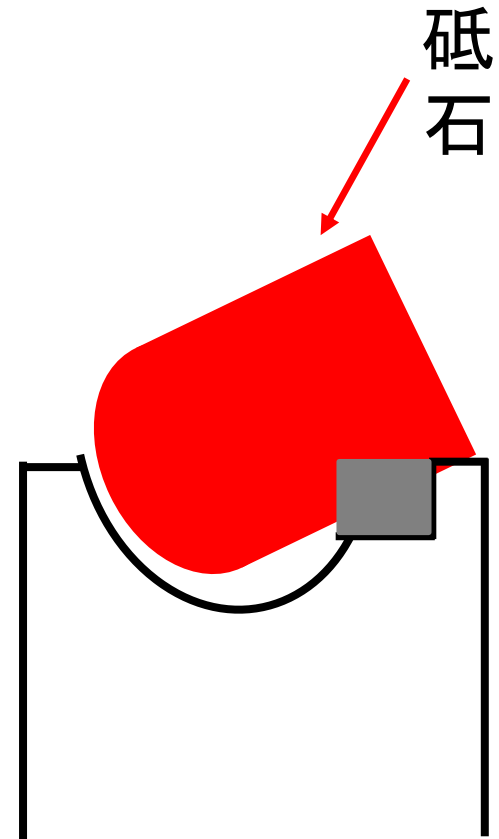
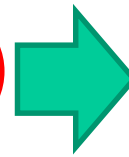
# ねじ溝形状の比較



標準ボールねじ (BNF3210)

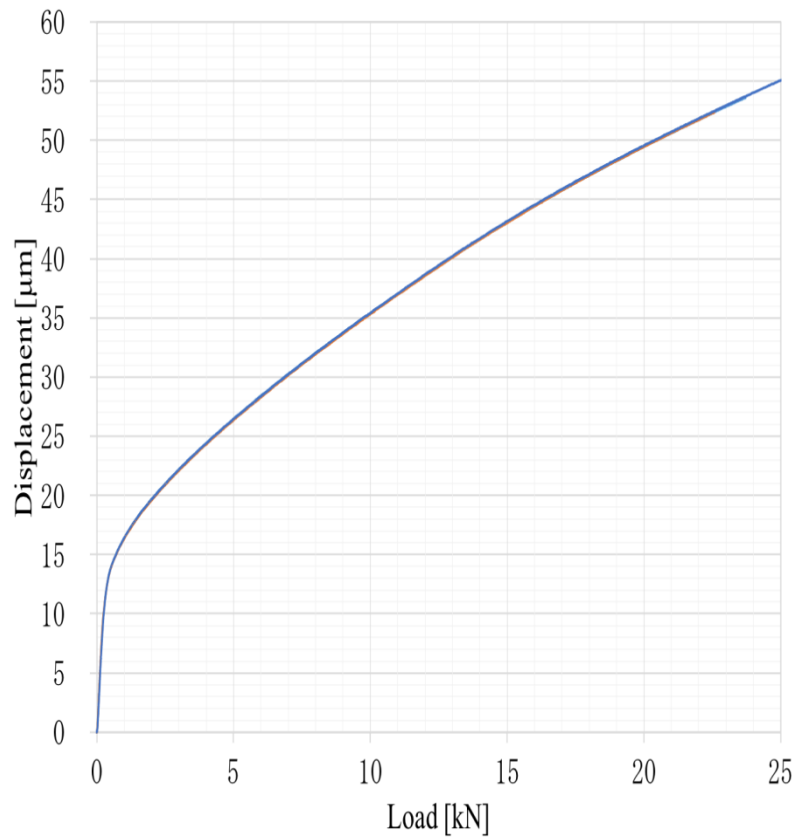


今回試作した非対称溝ボールねじ

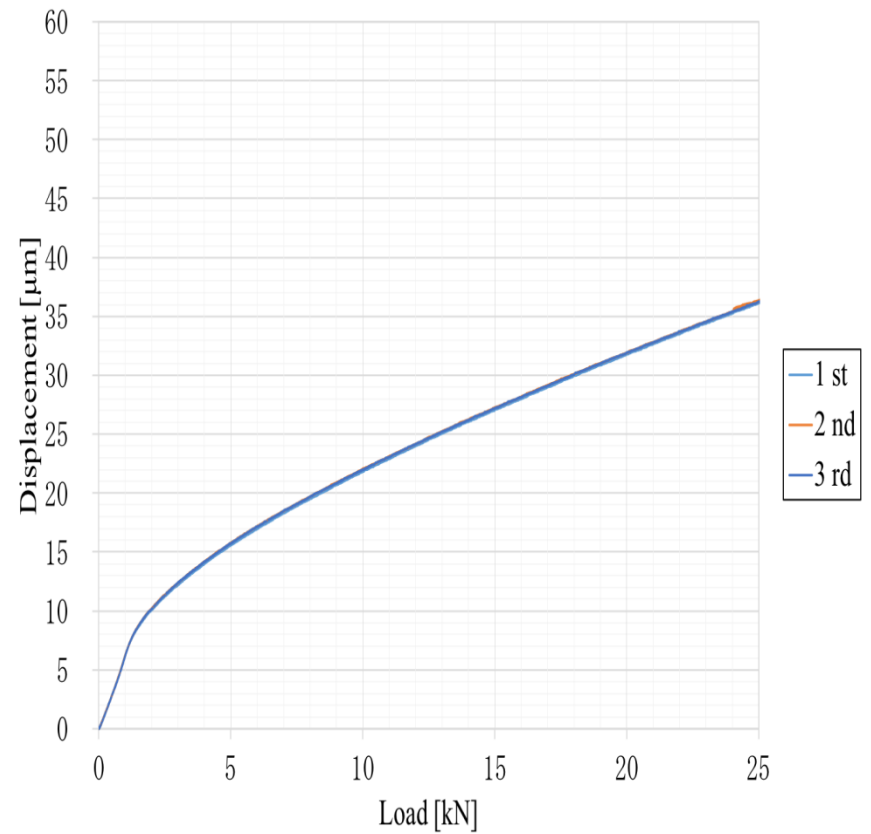


研削加工イメージ図

# アキシアル荷重とアキシアル変位の関係



ボールねじBNF3210



非対称溝ボールねじ



# 試作品のアキシャル剛性

BNF3210

接触角:  $41^\circ$

荷重: 10 kN

実験値:  $287 \text{ N}/\mu\text{m}$



非対称溝ボールねじ

接触角:  $60^\circ$

荷重: 10 kN

実験値:  $455 \text{ N}/\mu\text{m}$

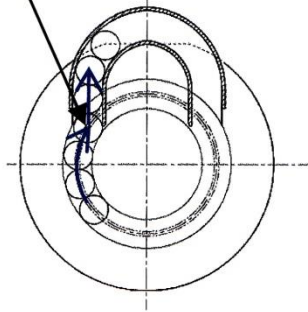
剛性が同じスペックのボールねじの **159%** となった。  
量産工程で製造されたため、ねじ溝の精度も満たしている。



射出成形機専用のボールねじとして、適用  
できる可能性が示唆された

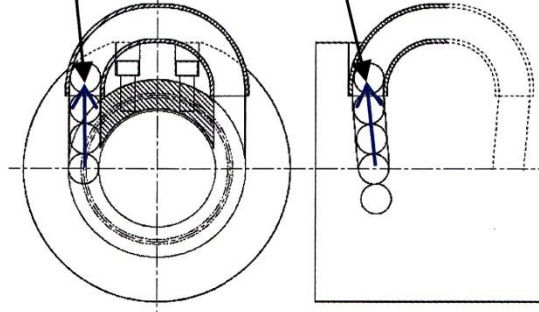
# ボールねじの静音化

すくい上げ部に角度がある



(a) 従来のチューブ循環方式

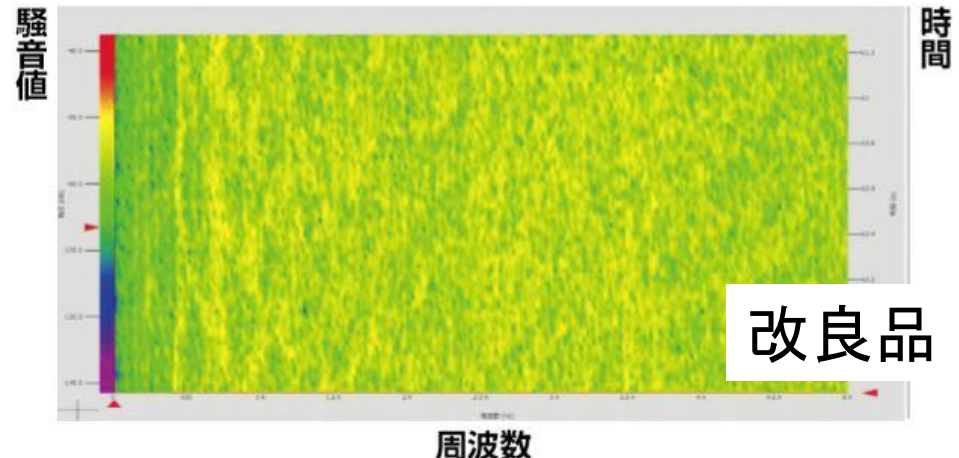
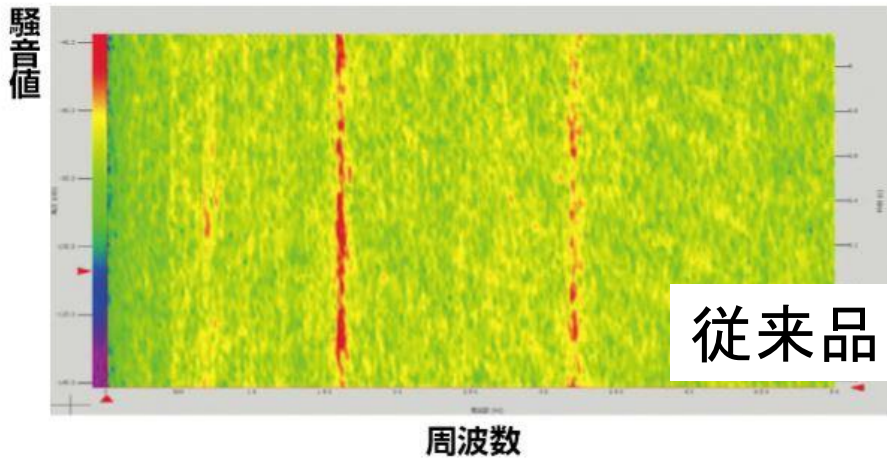
ねじ螺旋方向への滑らかなボールのすくい上げ



(b) デフレクタによるリード方向接線すくい上げ循環方式

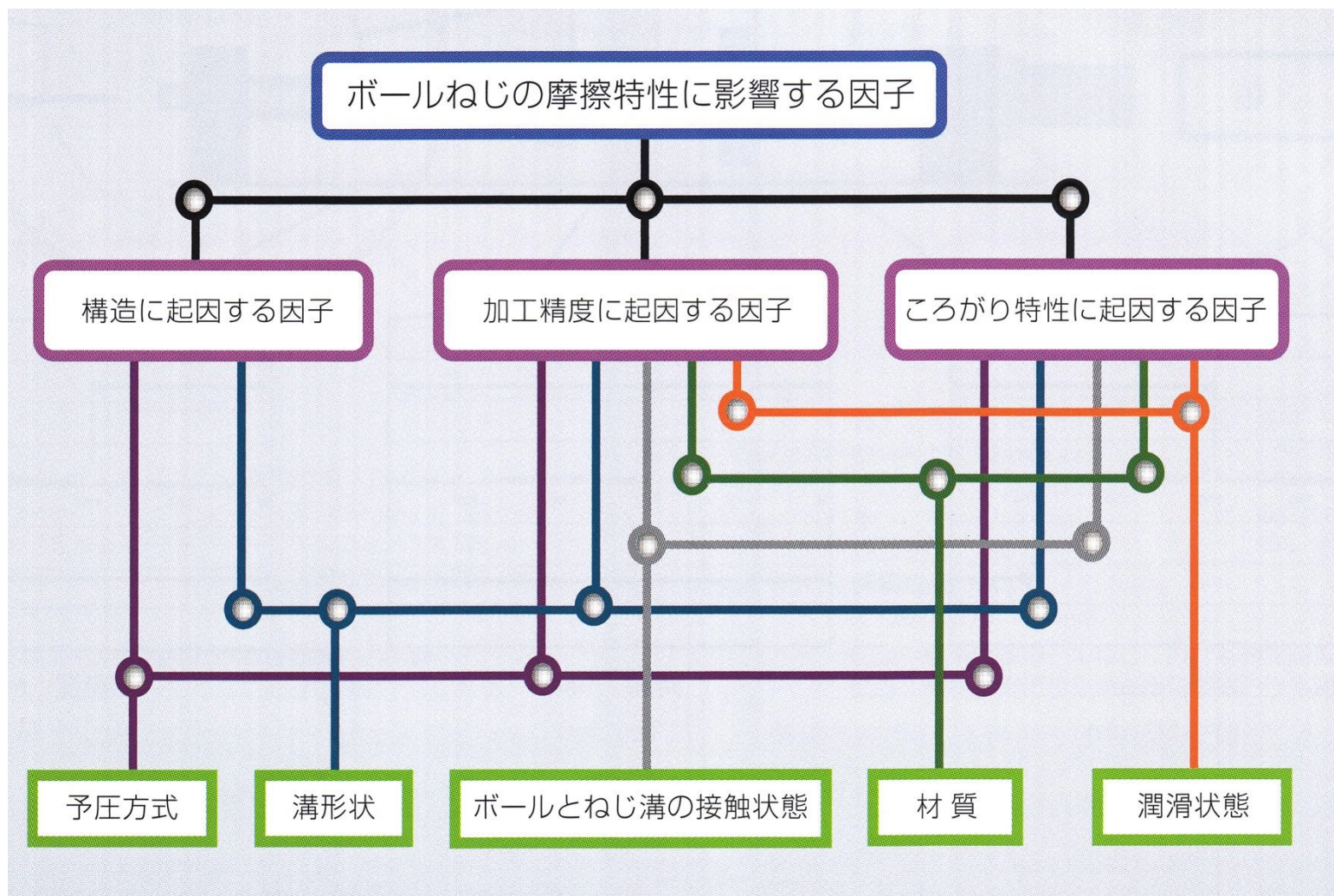
接線すくい上げ

## 転走音低減、共鳴・共振低減





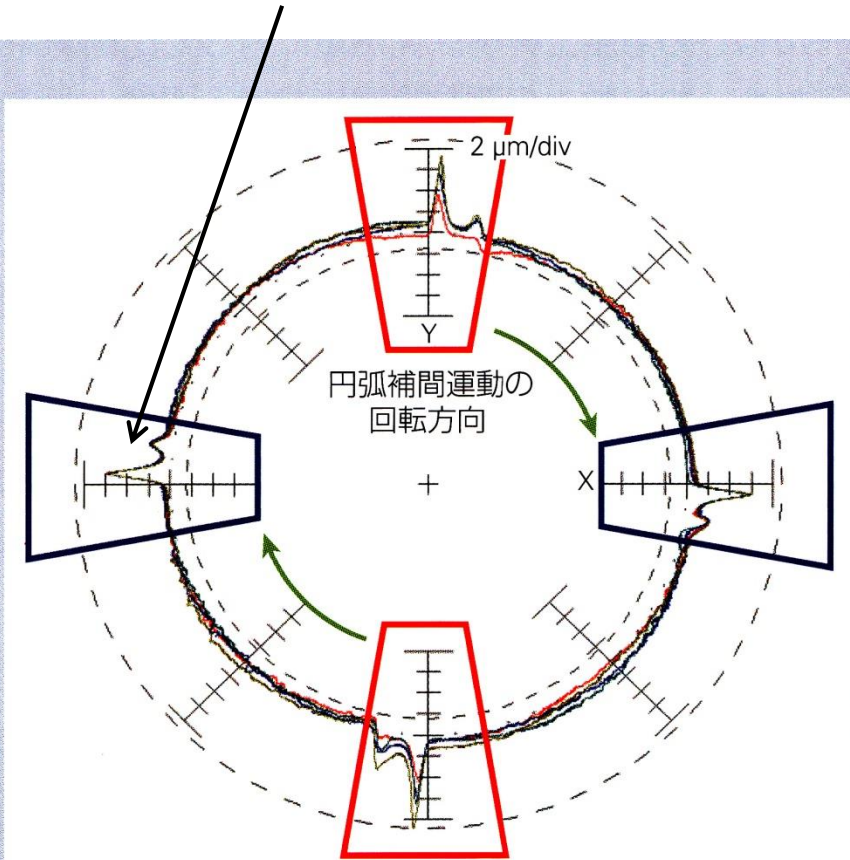
# ボールねじの摩擦安定化 → 高精度化



摩擦特性因子を分析して、摩擦安定化対策を実施



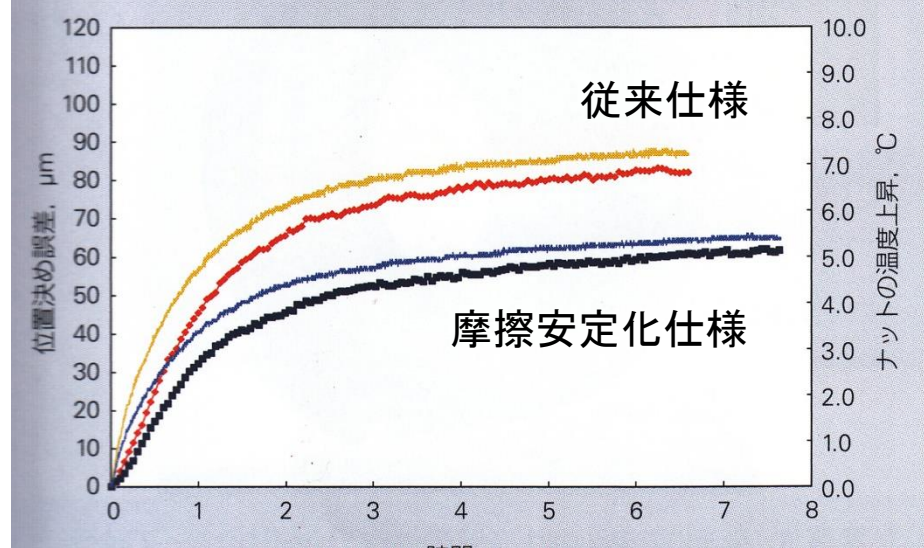
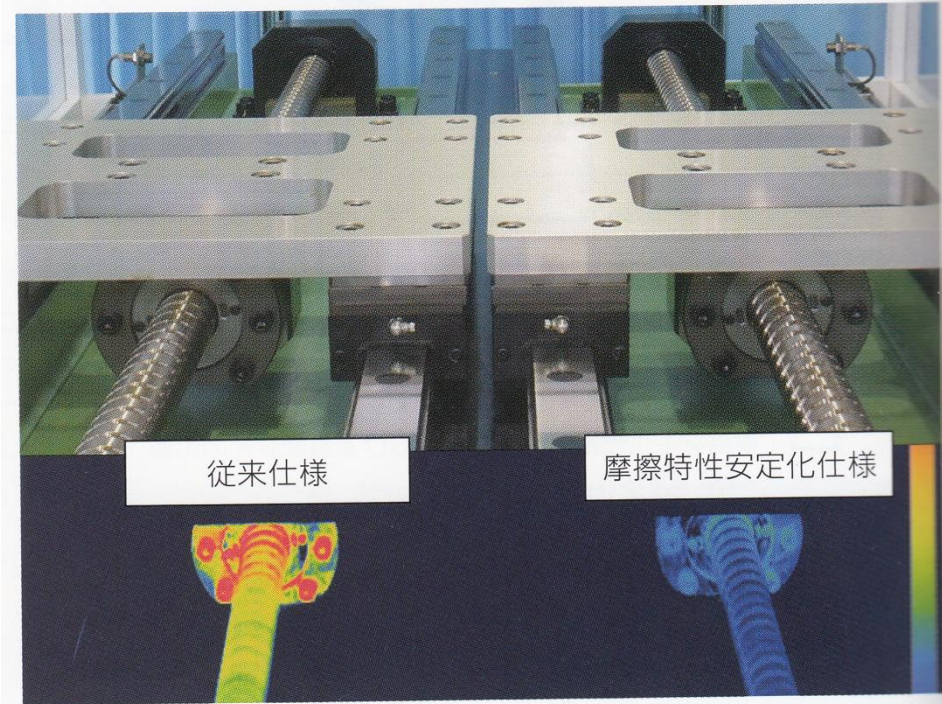
# 再現性が顕著に向上している



軸 径：φ 40 mm      評価位置：(X/Y)  
 リード：12 mm      - : X 40 mm / Y 20 mm  
 予圧方式：オフセットリード      - : X 440 mm / Y 120 mm  
 半 径：R 10 mm      - : X 580 mm / Y 220 mm  
 送り速度：480 mm/min      - : X 850 mm / Y 20 mm

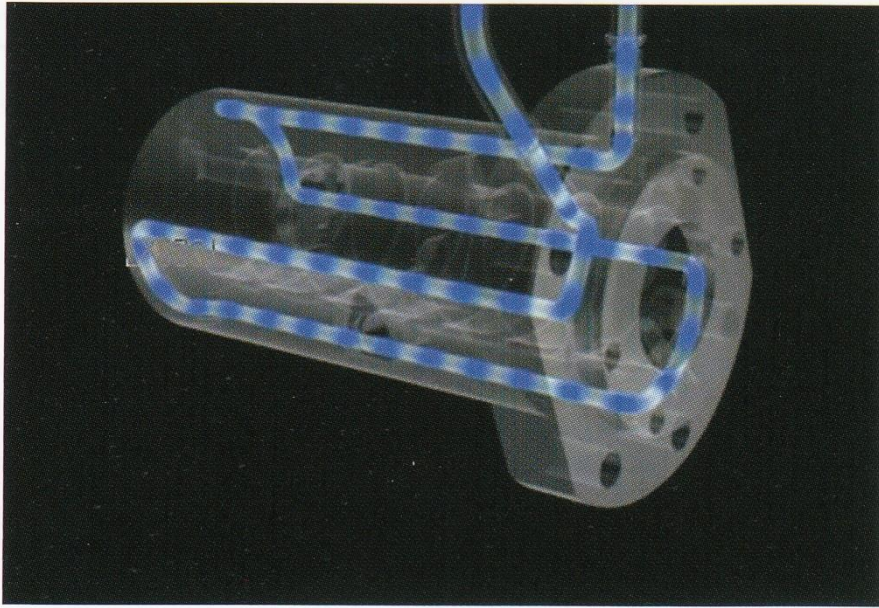
▭ : 従来仕様ボールねじにおける運動誤差の影響  
▭ : 摩擦安定化仕様ボールねじにおける運動誤差の影響

# 低昇温化も実現





# 冷却の効率化



## 従来は軸芯冷却

- ・大型に対応できない
- ・大量の流体が必要
- ・関係ない場所も冷却

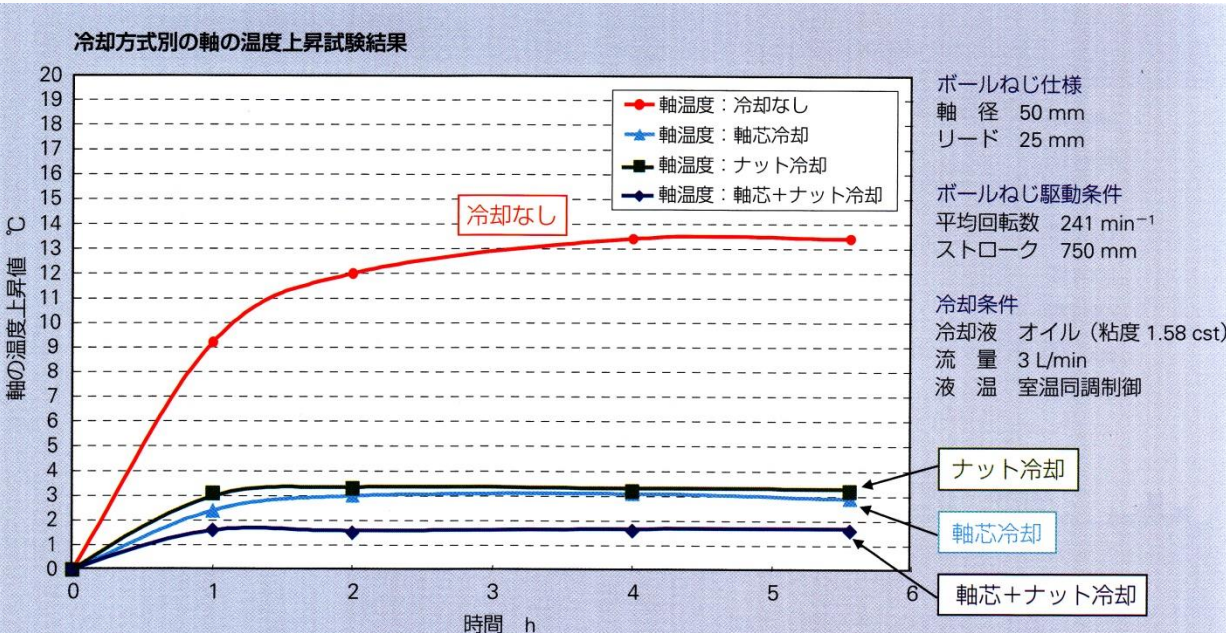


発熱部を直接冷却した方が効率的




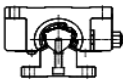
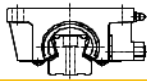










## ナット冷却

ナット内部に流体循環路を設けた













# 3.リニアガイド

## 開発の歴史

1971	LBS アンギュラコンタクト ボールスプライン	
1972	LSR ナット+ハウジング、軸+固定台	
1975	NSR 軸と固定台一体化	
総ボールタイプ 1981	HSR 4方向等荷重	
1982	RSR ミニチュア	
1982	HR セパレート	
1986	SR ラジアル形	
1989	HRW 幅広レール	
1991	JR 構造部材レール	
1992	HCR 曲線レール	
1994	NR/NRS 工作機械用	
2015	HDR DB構造	
2016	NR-X/NRS-X 工作機械用・防塵性能UP	

### リテーナタイプ

1996	SSR ラジアル形	
1998	SHS 4方向等荷重	
1998	SNR/SNS 工作機械用	
1999	SRS ミニチュア	
2000	SHW 幅広タイプ	
2001	SRG ローラー	
2002	SRN ローラー・低重心	
2003	SRW ローラー・幅広タイプ	
2009	SVR/SVS 工作機械用・防塵性能UP	
2010	SPR/SPS 8溝タイプ・高精度	
2010	SSR-WA 中空レール・軽量ブロック	
2014	SHS-N 中空レール	

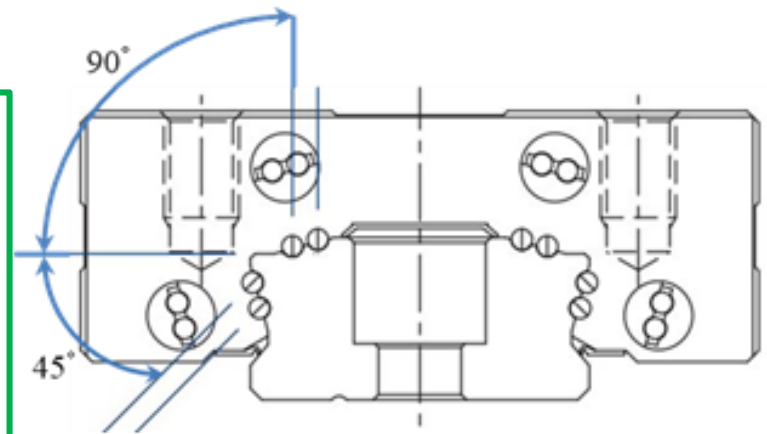
# 走行性能の向上

## (1) 低ウェービング技術

- ・ 転動体の小径化・高精度化
- ・ 多条化(8条まで実用化)
- ・ ベアリングボール出入り口のクラウニング最適化

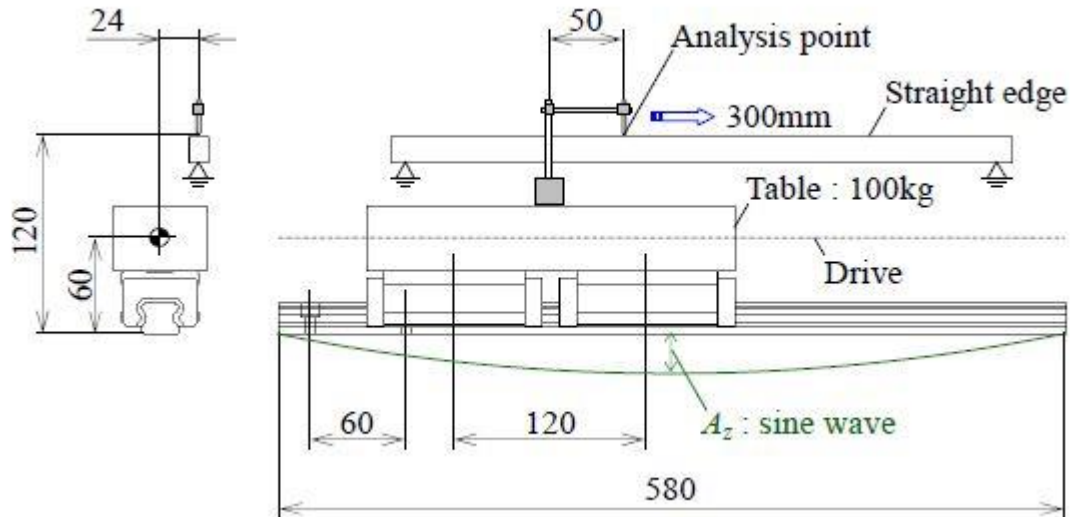
## (2) ロングレール化

- ・ 継ぎ目での段差が問題  
→ 7000mmのロングレール

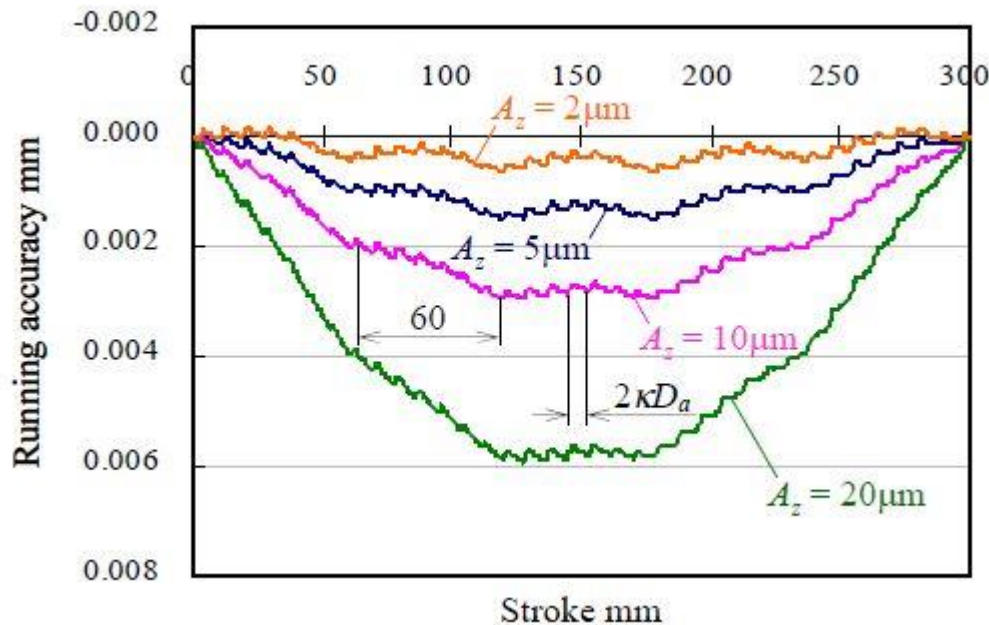


更なる走行性能の向上：  
解析による検討が必要





100kgの重り  
#25相当のガイド

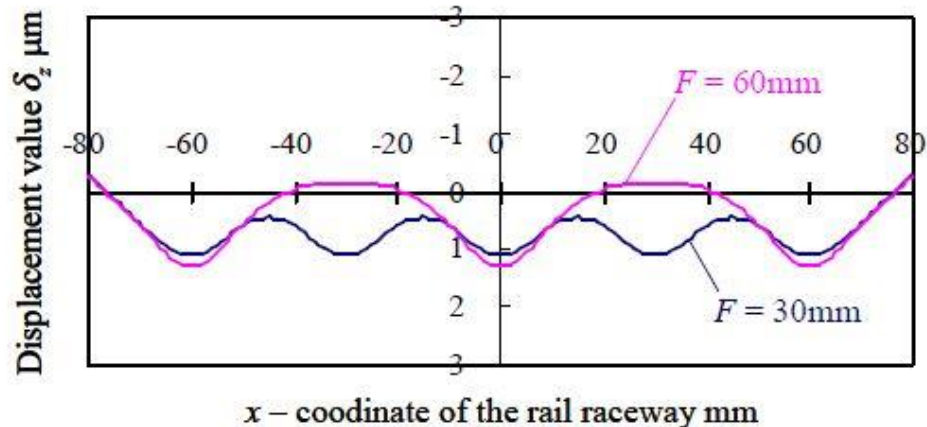
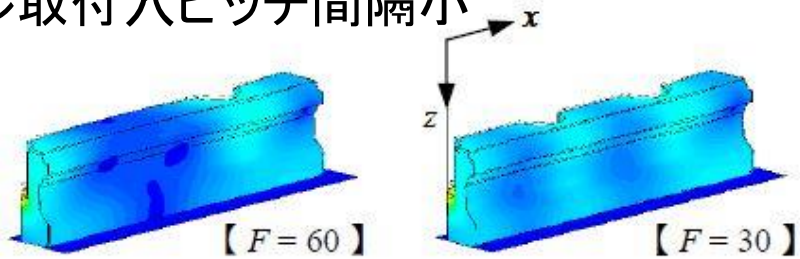


- ・誤差量 $A_z$ に応じた走行精度
- ・平均化効果
- ・レール取付穴ピッチ(60mm)のうねり
- ・ウェービングのうねり

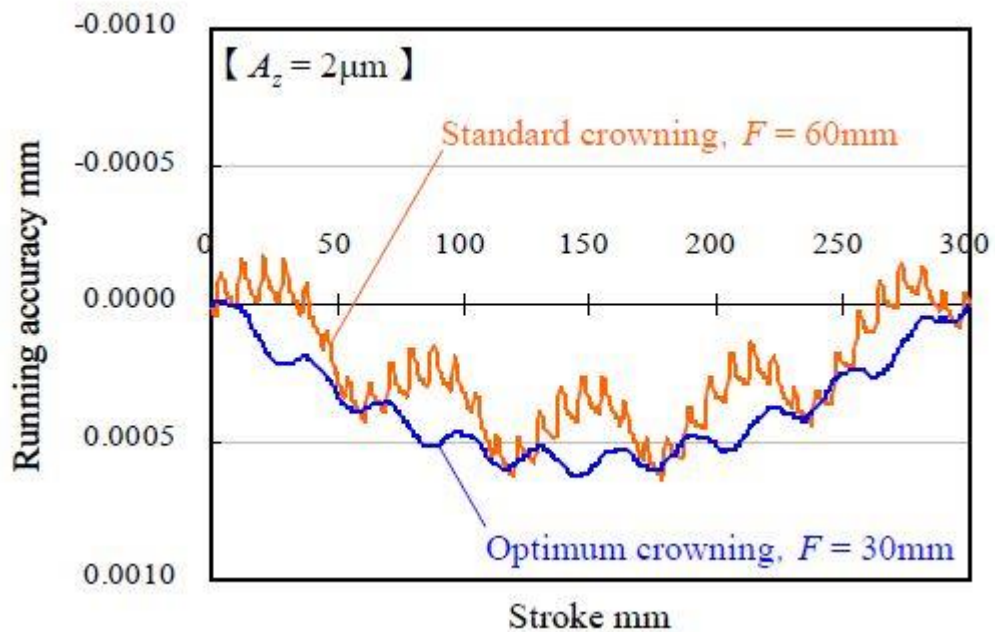
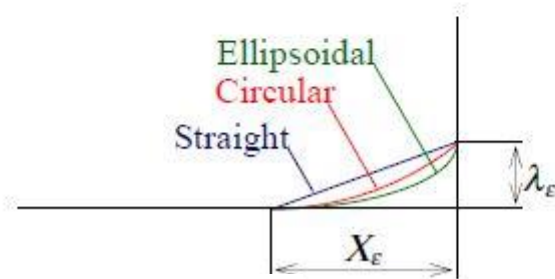
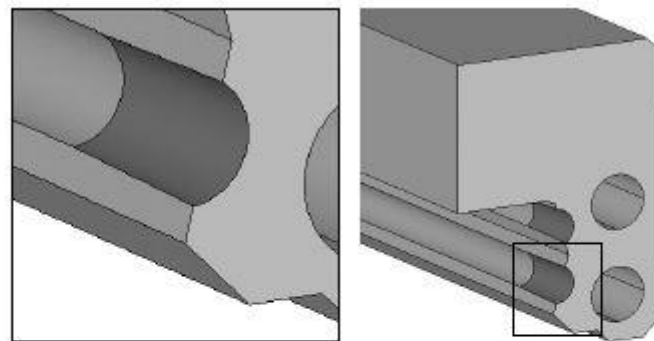
が観察される



# レール取付穴ピッチ間隔小



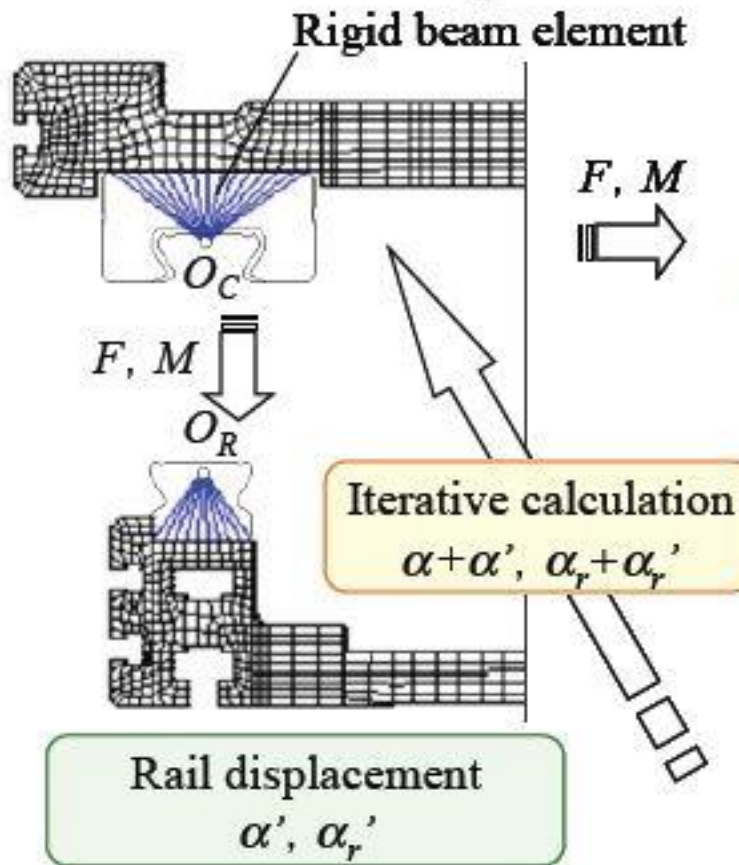
# クラウニング形状の最適化



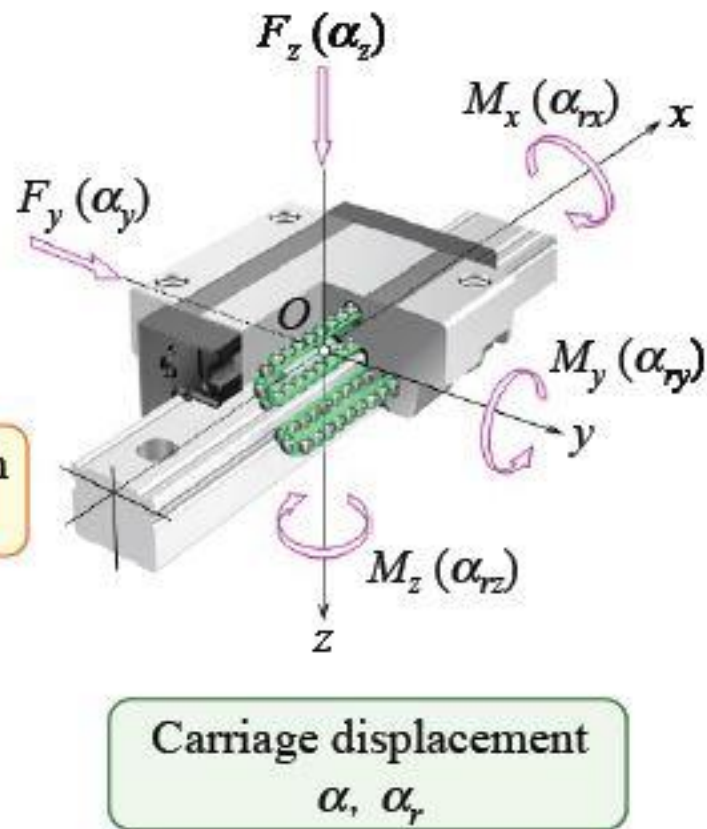
# 負荷分布と変形解析

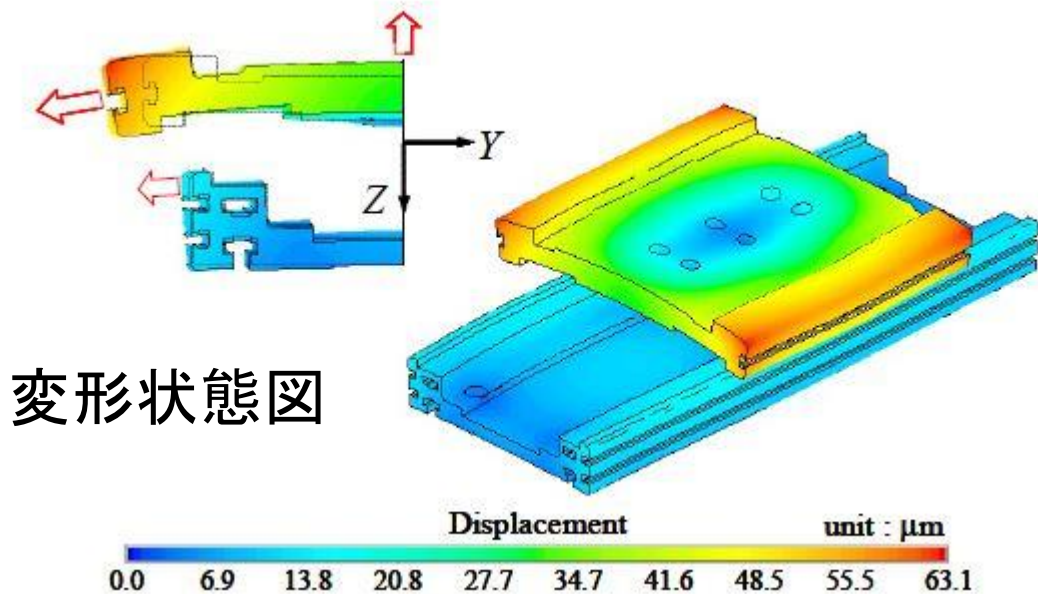
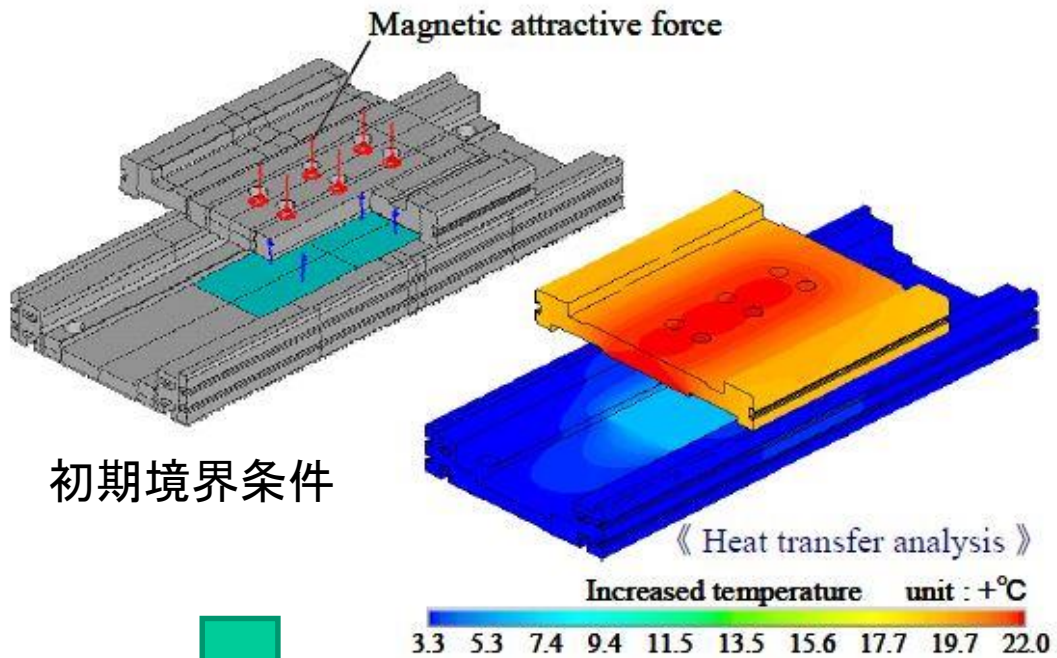
リニアガイド単体ではなく、テーブルやベースを含めた  
負荷分布計算と変形を解析

《 Table·Base FEM analysis 》

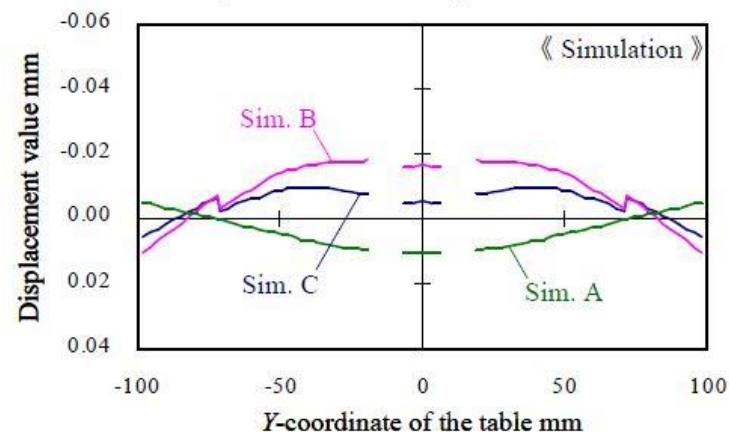
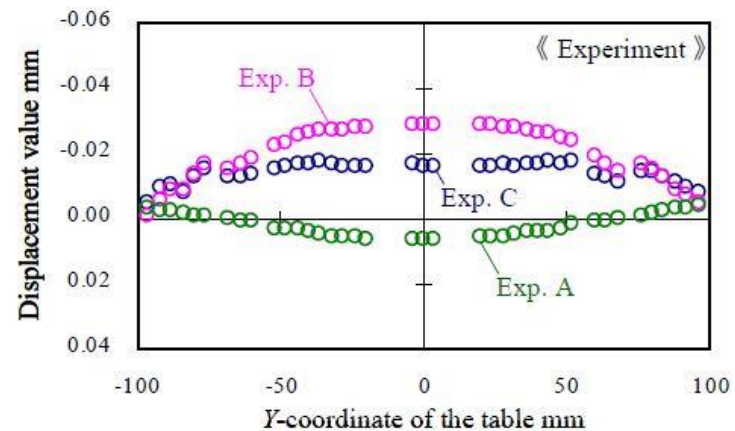


《 Load distribution analysis 》





リニアモータ駆動  
#20相当リニアガイド  
1232Nの吸引力  
(熱源はリニアモータ)



# おわりに

この度は、基調講演の機会をもうけていただきまして、ありがとうございました。しばらく前まで、JSPEに**転がり機械要素専門委員会**がありまして、転がり軸受、ボールねじ、リニアガイドなどの研究発表OSを運営しておりました。主査の定年と共に閉会となりましたが、転がり機械要素は、精密位置決めや工作機械にとっては、非常に重要な要素であると思います。

今回は、転がり機械要素の技術動向、先端技術について、**講演者のフィルタを通して**ですが紹介させていただきました。精密に関係する技術者、研究者の知識拡大の一助になれば幸いです。