

農建機車両のライフサイクルコスト低減への貢献技術

Technologies Contributing to Reduced Life Cycle Cost of Agricultural and Construction Machinery

廣中哲也 T. HIRONAKA 山田雅康 M. YAMADA 金谷康平 K. KANETANI 三尾巧美 T. MIO

Reducing the life cycle cost of agricultural and construction machinery is the issue of highest concern for machinery manufacturers. This report discusses JTEKT's various technologies contributing to the reduction of life cycle cost for agricultural and construction machinery, such as the long life bearing and low friction bearing.

Key Words: construction, agricultural, reliability, robustness, bearing, driveshaft, life cycle cost, LCC

1. はじめに

ダンプトラックやトラクタなどの農建機車両は、インフラ事業、資源事業および農業事業において作業の効率化に重要な役割を果たしてきた。そのような農建機車両に最も必要とされるのは運用コストが低いことである。運用コストは、一般的にライフサイクルコスト（LCC：Life Cycle Cost）と呼ばれお客様が農建機車両を選定する重要な指標であり、車両メーカーはLCCを低減するための開発や提案、サービスにしのぎを削っている。

LCCに含まれるものには「車両価格」と「運用費用（燃料費、人件費、メンテナンス費）」の2種類があり、一般的に「運用費用」は「車両価格」の数倍にも及ぶため、LCC低減の取り組みは重要かつさまざまなアプローチが考えられる。

図1は農建機車両に求められる駆動系部品へのニーズと当社の開発キーワードであり、この六つの開発キーワードを軸にLCC低減に貢献できる技術やサービスの開発を行っている。

本報では、当社における農建機車両のLCC低減への取り組みと実用化商品について紹介する。

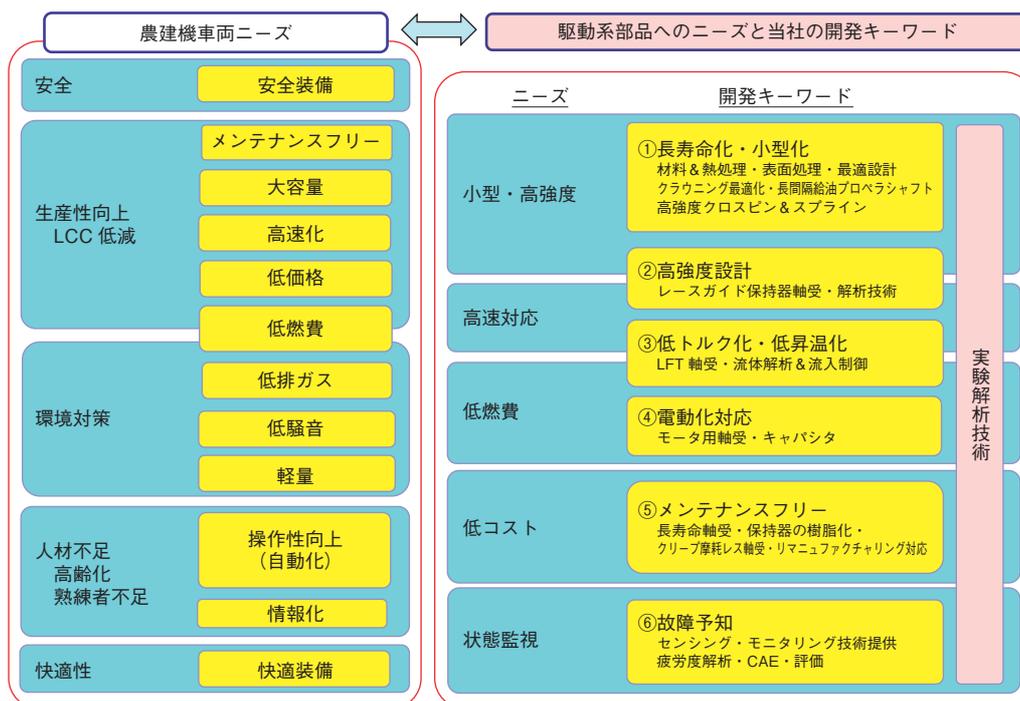


図1 農建機車両のニーズと当社の開発キーワード

Agricultural and construction machinery needs and JTEKT's development keywords

2. 長寿命化・小型化技術

2.1 軸受長寿命化の方策

農建機用軸受の故障モードの分析結果（当社に返却された軸受を分析）を図2に示すが、応力集中（エッジ応力）や潤滑不適に起因した不具合への対応技術の開発が課題で、その技術開発による軸受のロバスト性向上はコンポーネントの小型化やメンテナンス費用削減に大きく貢献する。

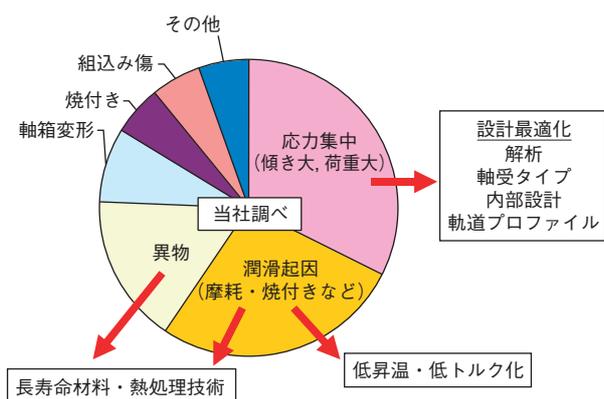


図2 農建機用軸受の破損モード（当社調べ）と軸受対応技術

Failure mode analysis (as investigated by JTEKT) of agricultural and construction machinery bearings and bearing support technology

当社は過去の研究開発により、傾き大や荷重大による応力集中（エッジ応力）など設計要因による剥離に対しては自社開発の軸系解析ソフト（S.S.A.P.：Shaft System Analysis Program）を活用した内部設計の最適化により長寿命化・小型化に貢献してきた。

例えば、図3はS.S.A.P.を活用しピニオンギヤ用軸受のエッジ応力を解析したものである。この結果により円すいころ軸受に発生するエッジ応力を低減させる内部設計を行い、軸受の長寿命化を実現した。

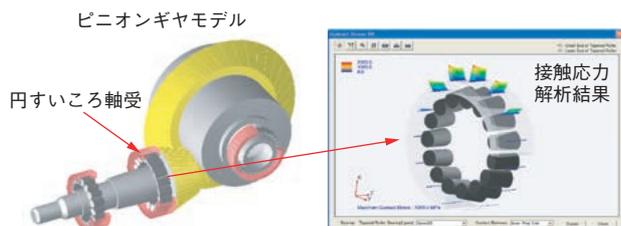


図3 S.S.A.P. 解析イメージ

Example of an S.S.A.P. analysis model

次に、潤滑不適による昇温や焼付きに起因する不具合に対しては、低トルク・低昇温軸受の開発で軸受の低昇温化や焼付きの抑制に貢献している。（低トルク軸受の詳細は本報4項に述べる。）

そして、異物起因の剥離に対しては図4に示すように、“軌道表面の高硬化化”と“残留オーステナイト（残留 γ ）の適正量確保”が有効であることを確認しており、これらの最適熱処理技術を適用したSH軸受（軸受鋼に特殊熱処理を適用。主に、玉軸受に適用）とKE軸受（肌焼鋼に特殊熱処理を適用。主に、円すいころ軸受に適用）を商品化している^{1)~3)}。

KE軸受とSH軸受の異物混入油中での寿命評価結果を図5に示すが、本条件では従来品に対して2倍以上の寿命を確認できた。

ただし、農建機車両メーカーからのさらなる軸受長寿命化への期待は高く、当社も次世代長寿命軸受の開発を継続的に推進している。

2.2 次世代長寿命軸受「NK軸受」

農建機車両メーカーのさらなる軸受長寿命化の要望に対応するため、当社は材料成分と熱処理条件の最適化により規格鋼では達成困難な長寿命領域を達成できる「NK軸受」の開発に成功した。

本開発品は、「寿命向上と省資源化を実現する軸受用中炭素鋼の開発」（本報22ページ）で詳細を解説しているが、図6に示した開発コンセプトの「フェーズII」の領域を当社独自の材料・熱処理技術で達成したものである。NK軸受とKE軸受の異物混入油中での寿命評価結果を図7に示すが、本条件ではKE軸受に対して1.5倍以上の寿命を確認できた。

本軸受は、アクスルやトランスミッションなど過酷な異物油条件が想定されるアプリケーションにおいて、車両の信頼性向上やメンテナンス時期延長への効果が期待できる。

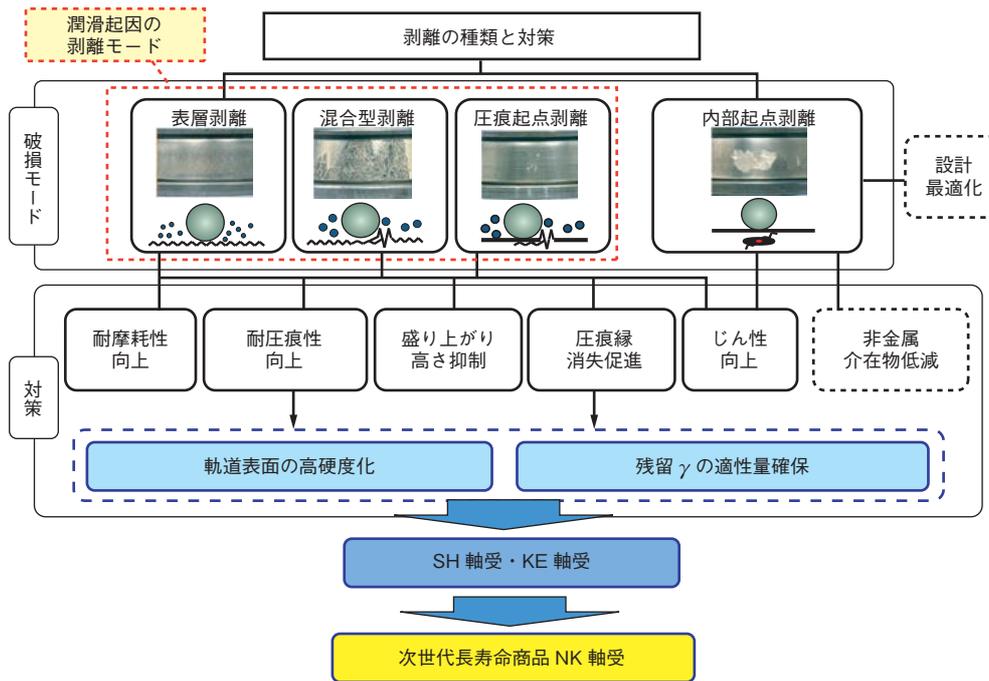


図4 剥離の種類と対策⁽³⁾
Flaking types and countermeasure⁽³⁾

試験装置	合成荷重寿命試験機
軸受	円すいころ軸受 $\phi 85 \times \phi 150 \times 49$
荷重	Fr=70kN, Fa=70kN
回転速度	1 000 min ⁻¹
潤滑	異物油中

試験装置	合成荷重寿命試験機
軸受	深溝玉軸受 $\phi 30 \times \phi 62 \times 16$
荷重	Fr=9kN
回転速度	2 500 min ⁻¹
潤滑	異物油中

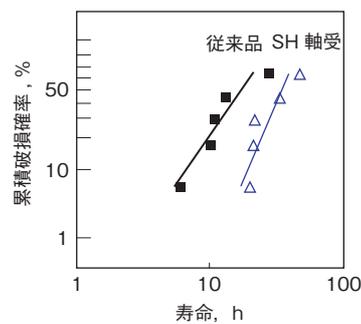
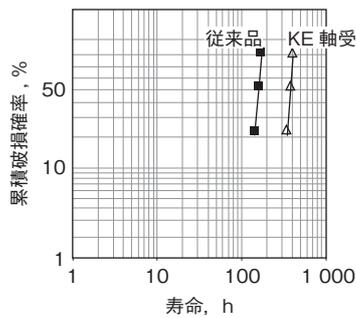


図5 KE軸受とSH軸受の異物油中での寿命評価結果⁽²⁾
Life test result of KE and SH bearings in contaminated oil⁽²⁾

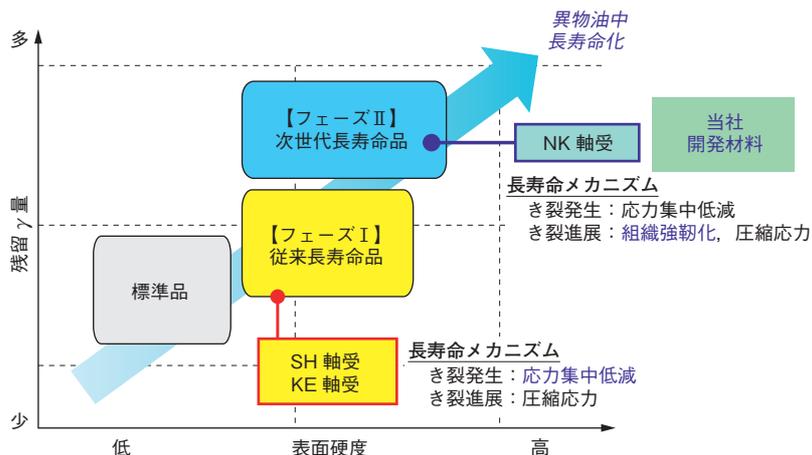


図6 長寿命軸受用材料の開発コンセプト
Development concept of long life bearing material

試験装置	スラスト荷重寿命試験機
試験軸受	円すいころ軸受 φ30×φ72×20.75
荷重	Fa=25.89kN
回転速度	2 000 min ⁻¹
潤滑	ギヤ油 85W-90 (油浴) 異物油中

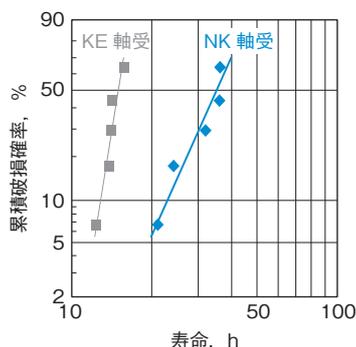


図7 NK 軸受の異物油中での寿命評価結果
Life test result of NK bearing in contaminated oil

3. 高強度設計技術

生産効率向上を目的とした車速の高速化や駆動の電動モータ化による変速機の多段化で、車両の駆動系は高速化しており、軸受や駆動軸などの駆動系部品は従来よりも高速で過酷な環境になっている。そして駆動系の高速化により特に課題となるのが、保持器付き転がり軸受を使用する場合である。軸受の保持器は転動体の自転や公転の影響を受けて回転しているが、高速化の影響で保持器に働く力が増大し保持器の変形が限度を超えて大きくなると、軸受内部に異常な接触が発生する。そして、異常な保持器接触は発熱や保持器破損の原因となる。よっ

て従来保持器の限度を超えた条件で使用される場合には、図8、図9に示すような保持器変形を抑制する高強度（高剛性）保持器設計が必要となる。

図10は、自社開発の保持器動解析ソフトを活用し深溝玉軸受保持器への負荷を計算し保持器強度を確認した事例である。当社では、このような動解析ソフトを図8や図9のような保持器設計にも活用し、保持器形状の最適化を図り駆動系部品的高速化に対応している。

4. 低トルク化・低昇温化技術

車両の低燃費化には駆動系の伝達効率向上が必要である。当社は長寿命化・小型化の開発と同様に低トルク化の開発にも注力しており、低トルクタイプ（LFT: Low Friction Torque）の円すいころ軸受を30年以上前から市場に提供してきた^{5)~8)}。図11に当社LFT円すいころ軸受の開発の歴史を示すが、2015年に開発完了した第4世代（LFT-IV）は設計自由度の高い耐熱樹脂保持器（従来品は鋼板保持器）を採用、流体解析や流体実測技術を駆使し内部設計を最適化することにより、かっはん抵抗を大幅に低減、最大65%の低トルク化を達成した。また、図12にLFT円すいころ軸受の油温測定結果を示すが、低トルク化技術は低昇温化にも有効でありオーバーヒートの抑制など、信頼性向上にも貢献が可能である。



図8 高強度樹脂保持器付き深溝玉軸受⁴⁾
Ball bearing with high-strength resin cage⁴⁾

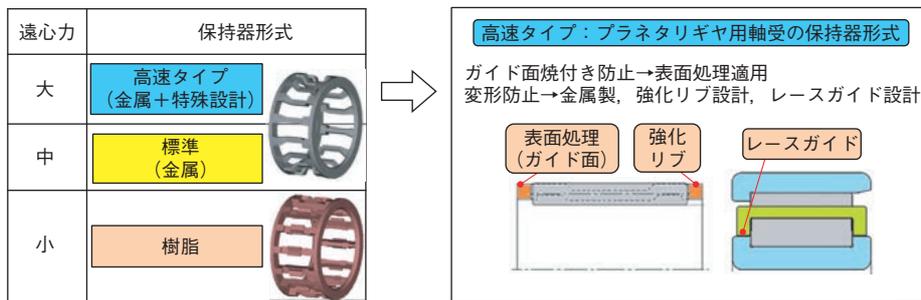


図9 高速タイプの保持器形式
Cage type for planetary gear

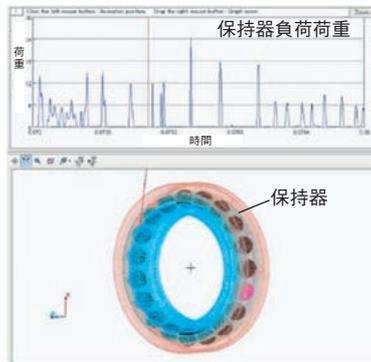


図10 軸受保持器動解析結果
Bearing cage dynamic analysis

	LFT-I	LFT-II	LFT-III	LFT-IV
TRB-LFTの進化				
特長	つばーころ接触部の形状・粗さ最適化	内外輪軌道に特殊クラウニング形状	流入油量制御／内部諸元最適化	樹脂保持器で流入油量を最適制御
トルク低減効果(標準品比)	▲10%	▲20%	▲50%	▲65%
主な低減抵抗	すべり摩擦抵抗	転がり粘性抵抗	かくはん抵抗	かくはん抵抗
開発時期	1983年	1994年	2005年	2015年

図11 LFT円すいころ軸受の歴史⁸⁾
History of LFT Tapered Roller Bearings⁸⁾

試験装置	合成荷重寿命試験機
軸受	円すいころ軸受 φ50×φ110×29.25mm
ラジアル荷重	20.35kN
アキシアル荷重	20.35kN
回転速度	500～2 500min ⁻¹
潤滑油	5W-30 軸芯油浴

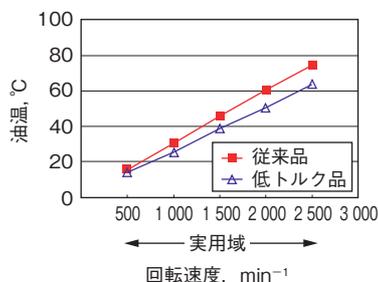


図12 LFT 円すいころ軸受の油温測定結果 (LFT-II)
Oil temperature measurement results of LFT tapered roller bearings (LFT-II)

また農機車両のアタッチメントでは耐泥水性の向上を目的とした高密封シール付き軸受が多く使用されている。当社では自動車ホイール用技術を応用した低トルク高密封パックシール付き軸受を商品化し、低トルク化と高い耐泥水性に貢献している。図13に低トルク高密封パックシール付き軸受の代表的な形状とトルク評価結果

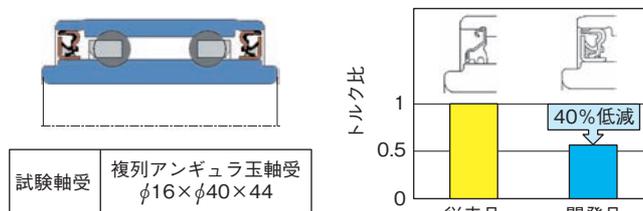


図13 アタッチメント用低トルク高密封パックシール付き軸受
Bearings with low friction pack seal for attachment

	TRB-LFT	BB-LFT	HUB-LFT	NRB-LFT
LFTシリーズ 織り込み技術				
潤滑剤 かくはん抵抗低減	○	○	○	○
転がり粘性抵抗低減 (軌道輪～転動体)	○	○	○	○
すべり摩擦抵抗低減 (ころ～内輪つば)	○	-	-	-
すべり摩擦抵抗低減 (ころ～保持器)	-	-	-	○
シール 摩擦抵抗低減	-	-	○	-

図14 低トルク軸受のラインアップ⁸⁾
Series of Low Friction Torque Bearings⁸⁾

を示す。従来品と比べ開発品は40%の低トルク化を達成しており、農機車両の低燃費化に貢献している。

なお、図14に当社の代表的な低トルク軸受のラインアップを示すが、使用用途に応じた低トルク軸受を開発し、自動車や産業機械の低燃費化に貢献している。

5. 電動化対応

近年、農建機車両も自動車と同様に低燃費化を目的とした電動化 (EV化) の開発が活発であり、当社も図15に示すようなEV車両の開発に対応した各種分野での商品開発を推進している。

5.1 電動モータ用電食防止軸受

車両のEV化により駆動はエンジンから電動モータ (モータ) へ今後さらに移行していく。ただし、モータで使用される軸受には、電食という軸受内部を損傷させる現象をいかに防ぐかという課題がある。電食とは軸受内部で放電が起き、図16のように転走面が損傷する現象のことで、進行すると異音や寿命低下の原因となるため、モータに使用される軸受には絶縁対策が必要となる。

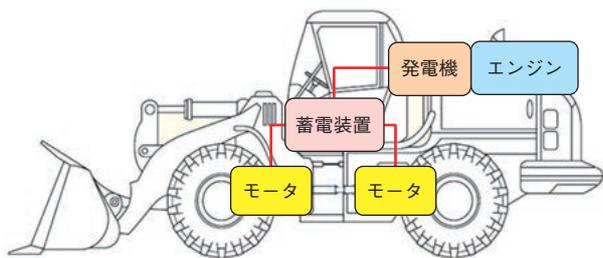


図15 ハイブリッド系EV車両構成 (イメージ)
Structure of hybrid-type EV machinery

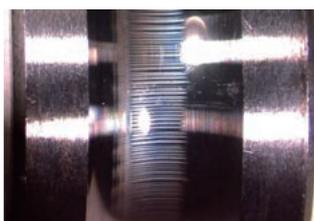


図16 電食の事例
Example of electrolytic corrosion

最も信頼性の高い電食対策（絶縁対策）は、通常金属製の転動体（玉）を絶縁性に優れたセラミック化にすることである。当社は1984年、世界で初めてセラミック軸受の量産化に成功、モータ用軸受の電食対策に貢献している。図17にセラミック軸受の構成例を示す。

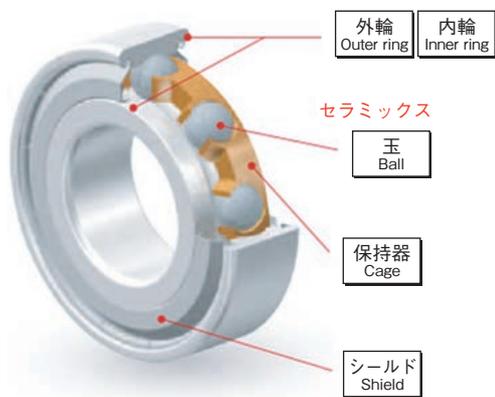


図17 セラミック軸受の構成例⁹⁾
Example of ceramic bearing structure⁹⁾

図18はセラミック軸受とセラミックと同様に電食対策として使用されている通電グリースの使用時間と電気抵抗の変化を比較した結果である。セラミック軸受は安定した絶縁性能を有していることが分かる。

試験軸受	深溝玉軸受 6004 φ20×φ42×12
ラジアル荷重	98N
回転速度	81min ⁻¹
測定方法	軸とハウジング間の電気抵抗を絶縁抵抗計で測定

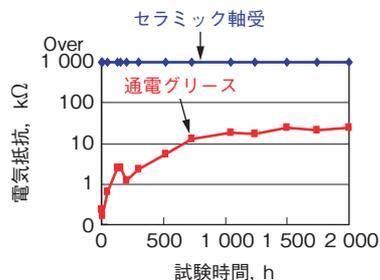


図18 セラミック軸受の絶縁性能（通電グリースの通電性との比較）

Insulation performance of ceramic bearing compared with conductivity of conductive grease

5.2 高耐熱リチウムイオンキャパシタ¹⁰⁾

農建機車両のEV化も自動車と同様の高性能な蓄電デバイスが必要不可欠である。その車両の稼働時には大電力が必要であり、蓄電デバイスには高い出力特性が求められることから、一度に高いエネルギーを放出する瞬発力が特長であるキャパシタが採用されるケースが多い。

ただし、従来品は使用温度範囲に課題があり適用範囲が限られるため、搭載時には冷却システムが必要になるなどの課題があった。

そこで当社は独自開発によりリチウムイオンキャパシタの温度範囲を拡大し、世界初となる-40～85℃（電圧制限により、最大105℃まで使用可能）を達成した。温度範囲の拡大により冷却システムを廃止・簡素化することができるため、EV化アプリケーションの拡大を可能とした。

また、電動パワーステアリング用補助電源システム開発¹¹⁾で培った、蓄電デバイスの充放電制御技術を農建機車両にも展開することで、お客様のさまざまなニーズに対応していく（図19）。



電極片側だしタイプ (左) および電極両側だしタイプ (右)

図19 リチウムイオンキャパシタ (製品イメージ)
Lithium ion capacitor (product conceptual image)

6. メンテナンスフリー

大型の農建機車両は使用年数が長いため、定期的に主要コンポーネントのオーバーホールが実施される。

その際に、コンポーネント内部の部品が損傷していると、部品の交換や修理が必要となり高価なオーバーホール費用が発生する。したがって部品の損傷を防ぎ、オーバーホール費用を低減する技術も LCC 低減に有効である。

6.1 はめあい面の損傷と対策

オーバーホール時に軸受周りで特に問題となるのが、はめあい面の損傷である。

軸受は動的荷重を受けて使用されるので、はめあい面は振動や軌道輪クリープの影響でフレットング摩耗やクリープ摩耗の損傷を受ける。このような はめあい面の損傷は農建機車両だけではなく自動車のアルミニウムハウジングでも同様であり、摩耗対策がメンテナンスフリーの大きな課題となっている。

一般に、このような はめあい面の損傷を防ぐもっとも有効な対策は、はめあい面のしめしろを増やすことである。ただし、しめしろ増加は軸受の取付け性や取外し性が困難となるため、大形軸受では適用が難しい。またアルミニウムなど線膨張係数が軸受材料と大きく異なる場合、すべての温度領域でしめしろを保持するような設計は成立困難である。

したがって、車両メーカーからは、しめしろを増やす以外で摩耗を抑制できる技術が期待されている。

なお、はめあい面の摩耗対策にはクリープ自体を抑制（動きを抑制）する設計側面でのアプローチと摩耗を低減するトライボロジー側面でのアプローチがある。

6.2 アンチクリープ玉軸受¹²⁾ (設計側面でのアプローチ)

図 20 に外輪ひずみにより発生するクリープの発生メカニズムを示す。軸受の軌道輪は転動体の通過に伴い連続的にひずみが発生し、それがクリープの原因となる。本メカニズムで発生するクリープは軌道輪の厚肉化によるひずみの低減が効果的である。ただし、寸法大径化による、取り扱い性の悪化ならびに寸法制約がある場合には、動定格荷重の低下により期待寿命が低下するという背反があった。

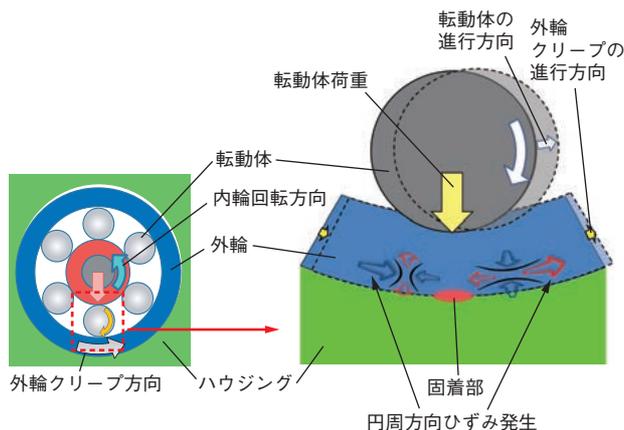


図20 外輪ひずみによるクリープ発生メカニズム¹²⁾
Mechanism of creep occurrence due to outer ring strain

そこで当社は軌道輪の形状に着目し、図 21 に示す特殊形状を施すことで厚肉化することなく厚肉化品と同等のクリープ対策効果が得られるアンチクリープ玉軸受¹²⁾を開発した。図 22 に開発品の評価結果を示す。

開発品はラジアル荷重の増加とともに、クリープ量の低減効果が認められた。

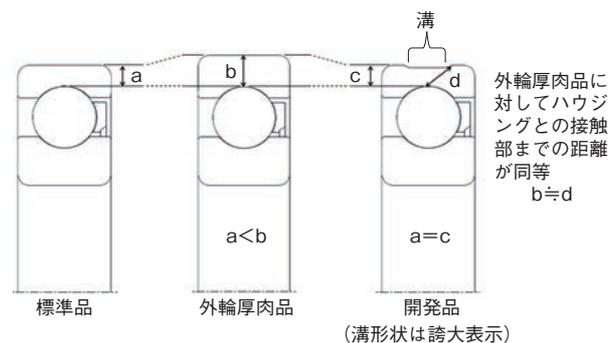


図21 アンチクリープ玉軸受¹²⁾
Anti creep ball bearings

試験軸受サイズ (深溝玉軸受)	現行品 $\phi 33 \times \phi 70 \times 19$ 外輪厚肉品 $\phi 33 \times \phi 72 \times 19$ 開発品 $\phi 33 \times \phi 70 \times 19$
ラジアル荷重	1kN, 2kN, 4kN
回転速度	10 000min ⁻¹
潤滑	オイル塗布

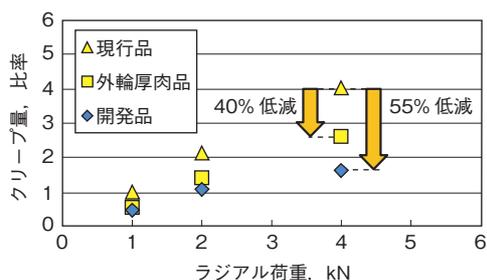


図22 ラジアル荷重とクリープ量の関係¹²⁾
Relationship of radial load and creep amount

6.3 特殊表面処理軸受 (トライボロジー側面でのアプローチ)

6.2 項に示した厚肉化と同様に従来より自動車用として適用されているのが特殊表面処理軸受である。図 23 に示したように、はめあい面に特殊表面処理を施し、はめあい面の摩擦係数を低くすることにより、フレットングやクリープによる摩耗を抑制する。



図 23 特殊表面処理軸受 (イメージ)
Special surface treatment bearings

図 24 は特殊表面処理と無処理の摩擦係数を比較した結果であるが、本条件で特殊表面処理品は無処理品の 1/4 以下の低摩擦であった。

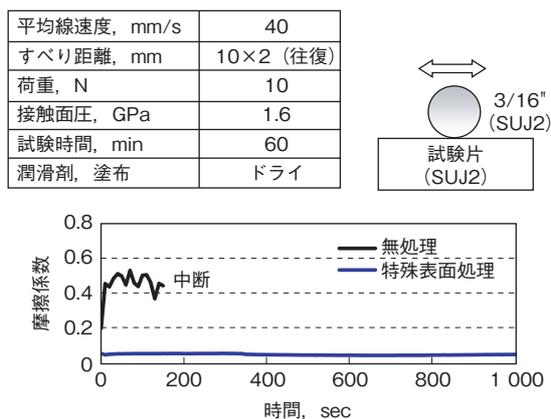


図 24 摩擦係数評価結果
Test results of friction coefficient

図 25 は図 24 の評価と同じ表面処理を円すいころ軸受の内径面に施して耐摩耗性を評価した結果であるが、特殊表面処理品は処理なし品に対して軸の摩耗を抑制する効果があることを確認した。

ここで紹介した特殊表面処理の施工は自動車分野において、アルミニウムハウジングの摩耗抑制技術として一定の評価を得ていることから、今後、農建機車両分野でも摩耗抑制技術としての適用が期待できる。

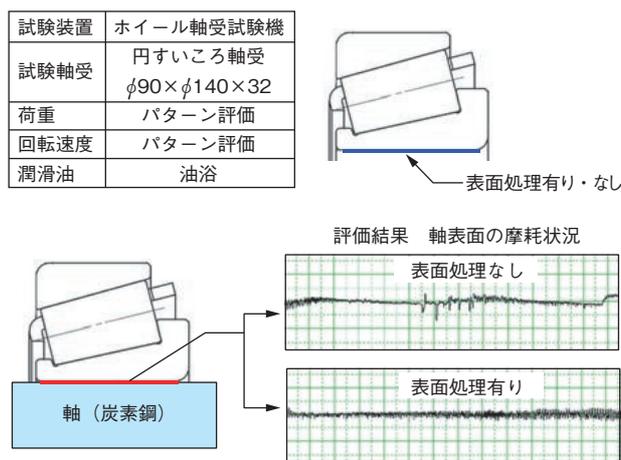


図 25 クリープ摩耗比較結果
Test results of surface condition by creeping

7. 故障予知

当社は各種センサと解析装置を駆使し図 26 に示すような軸受センシング技術を開発している。

この取り組みを農建機車両の状態モニタリングに展開することにより、オーバーホール時期の把握による稼働率向上、さらに故障予知によるメンテナンス費用の削減などによるライフサイクルコストの低減、ならびに設計最適化による車両の開発期間の短縮などへの貢献が可能と考えている。

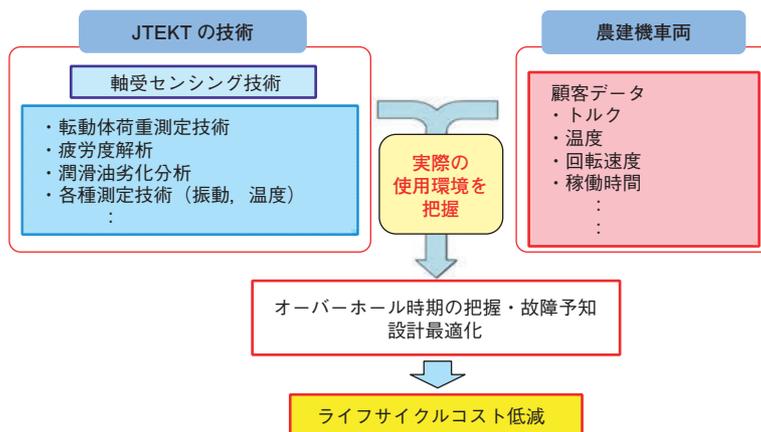


図26 車両状態モニタリングのイメージ図
Conceptual image for vehicle status monitoring

8. おわりに

農建機車両メーカーの収益性向上に対応するライフサイクルコスト低減への取り組みは、今後一層加速することが予想される。こうした車両メーカーの取り組みに迅速に対応していくため、今後も継続してお客様のニーズを基にした提案型技術開発を行い、農建機車両のライフサイクルコスト低減に貢献していきたい。

* 1 LFT は株式会社ジェイテクトの登録商標です。

参考文献

- 1) 戸田一寿, 三上 剛 : Koyo Engineering Journal, No. 143(1993)15.
- 2) 戸田一寿, 柴田正道 : Koyo Engineering Journal, No. 145(1994)138.
- 3) 星野照男 : Koyo Engineering Journal, No. 159(2001)107.
- 4) 谷口 陽三, 梅野 剛 : JTEKT ENGINEERING JOURNAL, No. 1015(2017)49.
- 5) 浅井康夫, 大島宏之 : Koyo Engineering Journal, No. 143(1993)23.
- 6) 松山博樹, 百々路博文, 荻野 清, 大島宏之, 千葉博行, 戸田一寿 : Koyo Engineering Journal, No. 167(2005)24.
- 7) 松山博樹, 川口幸志, 上村篤司, 益田直樹 : JTEKT ENGINEERING JOURNAL, No. 1007(2009)48.
- 8) 株式会社ジェイテクト : LFT-Series, CAT. NO. B1023.
- 9) 株式会社ジェイテクト : セラミック軸受, CAT. NO. B1013.

- 10) 株式会社ジェイテクト : 高耐熱リチウムイオンキャパシタ, CAT. NO. NA002JAEN-1CH.
- 11) 佐藤文彦, 東 真康, 杉山豊湯樹 : JTEKT ENGINEERING JOURNAL, No. 1013(2015)41.
- 12) 石井康彦, 神保友彦 : JTEKT ENGINEERING JOURNAL, No. 1014(2016)59.

筆者



廣中哲也*
T. HIRONAKA



山田雅康**
M. YAMADA



金谷康平***
K. KANETANI



三尾巧美****
T. MIO

- * 軸受事業本部 産業機器技術部
- ** 軸受事業本部 実験解析部
- *** 研究開発本部 材料研究部
- **** BR 蓄電デバイス事業室