

農建機車両用高性能転がり軸受の鉄鋼材料・熱処理技術

Advanced Steel Materials and Heat Treatment Technologies

Applied to High-Performance Rolling Bearings for Agricultural and Construction Machinery

金谷康平 K. KANETANI 山田奈侑 N. YAMADA

This article reports on the development of long-life rolling bearings for agricultural and construction machinery used in harsh environments. An integrated steel design and carbonitriding heat treatment were applied to simultaneously address dent-initiated spalling, white structure flaking, and surface peeling. The developed approach achieves high surface hardness, optimized retained austenite stability, enhanced hydrogen trapping, and improved temper softening resistance. Bearings using the new steel exhibited rolling contact fatigue lives three to five times longer than conventional products, contributing to higher reliability and reduced maintenance.

Key Words: rolling bearing, dent-initiated spalling, white structure flaking, surface peeling

1. はじめに

近年、世界では急激な人口増加や気候変動による食糧危機、インフラ破壊が顕在化している。これらの課題に対応するため、作業効率の高い農業機械・建設機械（以下、農建機）の開発が行われている。農建機は主に農地や建設現場などの制限された環境で使用されるため、乗用車に先行して自動運転化が進められている。

農建機の自動運転化は、労働人口不足の緩和、作業者の安全性向上、運用コストの低減などに寄与する。しかし、これらの恩恵を最大限に受けるためには、車両の長期稼働が不可欠である。一般的に、農建機は整備されていない路面を走行する。このような使用環境では路面からの過大入力や、周辺部品から発生する摩耗粉の侵入が生じる。その結果、駆動装置などに使用される転がり軸受が想定よりも早期に破損し、利用者に経済的損失を与える場合がある。農建機メーカーから返却された軸受の破損要因を分析した結果を図1に示す¹⁾。真因が特定されていない事例も含まれるが、潤滑不足（Poor lubrication）と異物混入（Contamination）が破損要因の約45%を占めている。

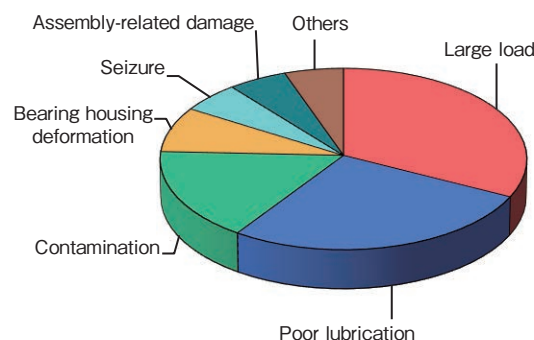


図1 農建機用軸受の破損要因（文献1を改変）
Failure causes of bearings for agricultural and construction machinery (modified from Ref. 1)

過酷な環境で使用される軸受には図2に示すような（a）圧痕起点剥離、（b）白色組織剥離、（c）表層剥離などが短時間で発生する。したがって、これらの剥離を抑制し、農建機の安定的な稼働に寄与することが軸受に求められている。

本報では、農建機用軸受の長寿命化を目的として開発した鉄鋼材料・熱処理技術について述べる。さらに、本技術を適用した農建機用の長寿命軸受を紹介する^{2), 3), 4)}。

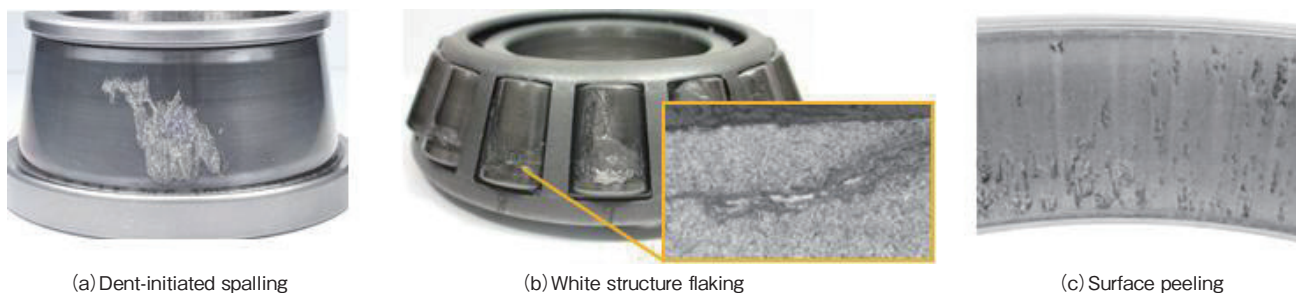


図2 破損品の外観・組織写真

Macroscopic appearance and microstructures of failed bearings

2. 開発指針

従来、圧痕起点剥離、白色組織剥離、表層剥離に対しては、それぞれ個別の材料・熱処理技術によって長寿命化が図られてきた。しかし、これらの損傷が複合して発生する場合があります。単一の対策では不十分である。したがって、本開発においてはこれらの剥離寿命を同時に向上させるため、剥離発生メカニズムを整理し、剥離の抑制に有効な合金成分・熱処理方法を検討した。

圧痕起点剥離は、歯車の摩耗粉や車両外部から侵入した硬質異物が軸受の軌道輪と転動体の間に入り込み、軌道や転動面に圧痕が形成されることで生じる。圧痕が形成された状態で転動すると圧痕周縁の応力集中によって亀裂が生じ、最終的に剥離へ進展する。したがって、硬質異物のかみ込みによる圧痕の形成を抑制する高い表面硬さと、組織の疲労強度を高める軟質な残留オーステナイト (γ) の増量が有効である⁵⁾。

白色組織剥離は、発生メカニズムが未解明な点が多い。発生要因の一つとして、転がり接触部に滑りや振動が加わることで潤滑剤が分解し、発生した水素が鋼中に侵入することで形成される特殊な白色組織を起点として生じることが報告されている⁶⁾。したがって、鋼中に侵入した水素の応力集中部への集積を抑制するには、微細な合金炭化物（炭窒化物）を用いた水素トラップが有効と考えられる⁷⁾。

表層剥離は、潤滑油の低粘度化に伴う潤滑性能の低下にくわえ、軸受への過大荷重および軸のたわみやハウジングの変形に起因する応力分布の不均一化により発生する。これにより、転がり接触部に大きな接線力が作用し、局所的な温度上昇と材料強度の低下を誘発するため、表層剥離が促進される。したがって、材料の耐熱性（焼戻し軟化抵抗）を高めることが表層剥離の抑制に寄与すると考えられる⁸⁾。

以上の観点から本研究では、浸炭窒化焼入れによる焼戻し軟化抵抗の向上、微細な合金炭窒化物による水素トラップ効果の付与および析出強化を活用した硬さと高残留 γ 量の両立に着目した。長寿命軸受としての実用化を見据え、表1に示す評価材を溶製し、最適な材料組成を検討した。なお、表1に示す以外の合金成分は各評価材で共通である。

表1 評価材の合金成分 (mass%)

Chemical compositions of evaluated steels (mass%)

Steel	Si	Cr	Mo	V
Base	0.1	1.2	add.	add.
A	0.1	1.2	0	add.
B	0.1	1.2	0	much
C	0.1	1.5	0	add.
D	0.3	1.2	add.	add.

3. 熱処理性状の評価結果

3.1 析出状態

まず、所望の微細炭窒化物の析出を確認するため、浸炭窒化焼入れ焼戻しを行った各評価材の試験片を透過型電子顕微鏡 (Transmission Electron Microscopy : TEM) で観察した。いずれの評価材においても図3に示すとおり、数十 nm 程度の微細な粒子の析出が確認された。これらの析出物は電子回折と元素分析の結果、主としてバナジウムとクロムが複合した炭窒化物であることを確認している。

3.2 硬さと残留オーステナイト量

つぎに、寿命向上に必要な材料特性が得られることを確認するため、各評価材に対して、浸炭窒化雰囲気、処理温度および焼入れ温度を変化させて浸炭窒化焼入れ焼戻しを行った。その結果、材料によって最適な熱処理条

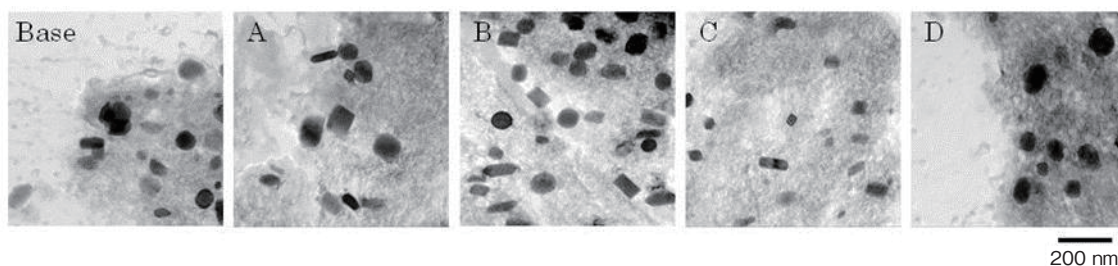
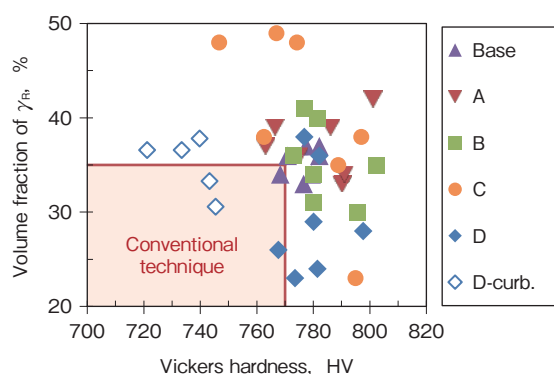


図3 各評価材の析出物観察結果

Observation results of precipitates in each evaluated steel

図4 各評価材の表面のビッカース硬さと残留γ(γ_R)量
Surface Vickers hardness and retained austenite (γ_R) content of each evaluated steel

件は異なるものの図4に示すように、いずれの材料においても熱処理条件の適正化により、従来技術（はだ焼鋼の浸炭焼入れ焼戻し）では両立が不可能であった硬さの向上と残留γの増量が可能となった。なお、図4中に示すD鋼の浸炭焼入れ焼戻し材（D-curb.）では、同様の硬さと残留γの増量は不可能であった。これは、浸炭処理の場合には図3に示した微細炭窒化物が析出せず、析出強化の効果が得られないためと考えられる。

4. 残留オーステナイトの性質の最適化

残留γは転動中にマルテンサイトに加工誘起変態することで組織を強化し、圧痕起点剥離寿命の向上に寄与することが報告されている⁵⁾。したがって、残留γの増量にくわえ、機械的安定性を最適化し、加工誘起変態の発現を促進することにより、圧痕起点剥離寿命のさらなる向上が見込まれる。そこで、残留γの機械的安定性に及ぼす合金元素の影響を明らかにするため、二円筒転動試験によって各評価材の転動に伴う残留γの変化を確認した。各評価材から作製した試験円筒は、表面の残留γ量が30%程度となる条件で浸炭窒化焼入れ焼戻し

を行った後、研削仕上げした。作製した試験円筒を高炭素クロム軸受鋼（JIS-SUJ2）製の駆動円筒（750 HV）と接触させ、ヘルツの接触面圧1.5 GPa、駆動円筒の回転速度100 min⁻¹、滑り率9.1%の油潤滑条件で8時間転動させた。転動試験前と後の転動面の残留γ量をX線回折で測定し、式(1)に表す残留γ減少率で整理することで各評価材の転動における残留γの安定性を評価した。

残留γ減少率

$$= \left(1 - \frac{\text{転動後の残留}\gamma\text{量}}{\text{転動前の残留}\gamma\text{量}} \right) \times 100 \quad (1)$$

転動試験後の残留γの減少率を図5に示す。材料によって転動に伴う残留γの減少率が異なり、バナジウムおよびクロムを増量したB鋼とC鋼の減少率が小さく、シリコンを増量したD鋼の減少率が大きい。すなわち、バナジウムとクロムは残留γの安定性を上昇させる一方、シリコンは残留γの安定性を低下させると解釈される。以上より、シリコンは残留γの加工誘起変態を促進させる元素であると考察される。

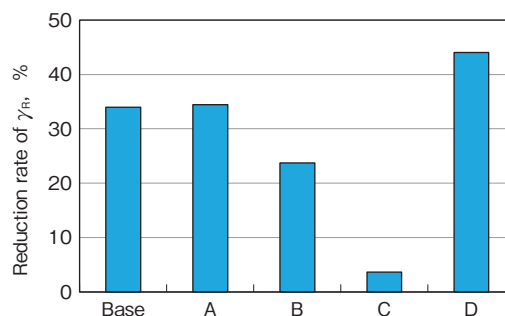


図5 転動試験後の残留γの減少率

Reduction rate of retained austenite due to rolling contact test

5. 転動に伴う鋼中への水素侵入挙動

軸受に白色組織剥離を発生させる転動試験を実施し、転動に伴う水素侵入挙動を把握した。通常の転動試験では白色組織が発生しないため、本研究では、市場で白色組織の発生事例があるオルタネーターを模擬した試験機を構築した。この試験機を用いて実機に近い条件で軸受を回転させ、白色組織剥離を再現した。水素侵入挙動に及ぼす微細炭窒化物の影響を明らかにするため、供試材は軸受に広く用いられている JIS-SUJ2 の焼入れ焼戻し材（以下、SUJ2）と SAE-AISI 5120 の浸炭焼入れ焼戻し材（以下、5120）および D 鋼の浸炭窒化焼入れ焼戻し材（以下、D 鋼）を用いた。試験軸受には、グリースを封入した深溝玉軸受 6202 を使用し、白色組織剥離が発生する外輪に前述の供試材を適用した。転動試験を所定時間実施した後、試験機を停止し、外輪に含まれる水素を昇温脱離法により分析した。

昇温脱離法によって得られた水素脱離プロファイルを図 6 に示す。同程度の転動時間における供試材（SUJ2：99 時間、5120 および D 鋼：138 時間）について、試験前後の脱離プロファイルを重ねて示している。SUJ2 および 5120 では、試験前から存在する 200～250℃ にピークを有する拡散性水素（拡散しやすい水素）が転動後に増加した。一方、D 鋼では、200～250℃ 付近の水素は増加せず、高温で脱離する非拡散性水素（拡散しにくい水素）の増加が確認された。このことは、想定していた微細炭窒化物による強い水素トラップ効果が発現した結果であると考えられる。

6. 焼戻し軟化抵抗の向上

第 5 章で使用した 3 種類の供試材について、各温度で 2 時間保持した後の表面のビッカース硬さの低下量を測定し、焼戻し軟化抵抗を評価した結果を図 7 に示す。SUJ2 および 5120 は、温度上昇に伴い硬さが 280℃ まで徐々に低下する。一方、D 鋼では硬さ低下が小さく、280℃ でも硬さを維持している。このように、D 鋼はクロム、モリブデン、バナジウムの複合添加と浸炭窒化処理により、焼戻し軟化抵抗が向上したと考察される。

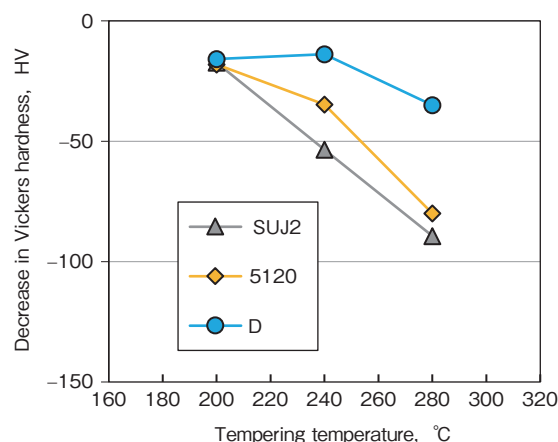


図 7 焼戻し軟化抵抗
Temper softening resistance

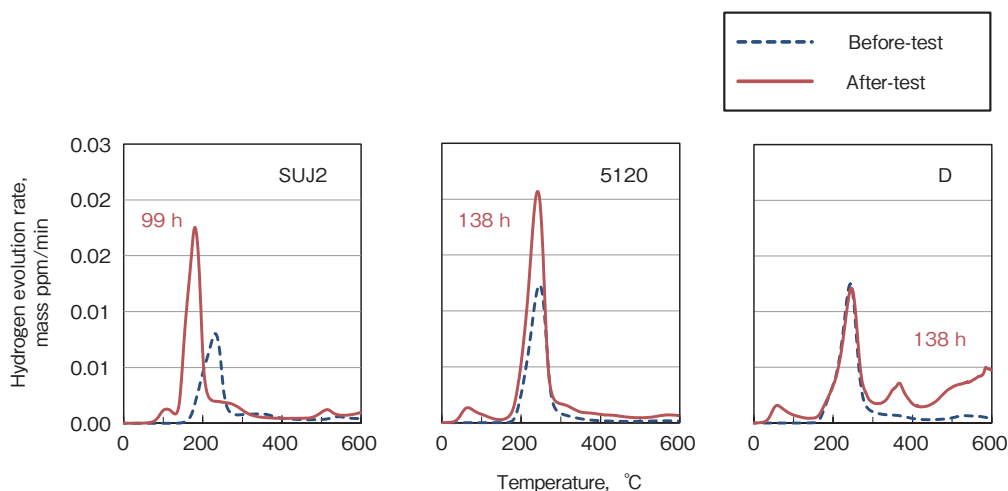


図 6 水素脱離プロファイル
Hydrogen desorption profile

7. 材料成分と熱処理の決定

以上の検討結果から圧痕起点剥離、白色組織剥離、表層剥離のすべての寿命を向上するには、各合金元素の役割に基づく以下の設計指針が有効である。浸炭窒化焼入れを前提に添加バランスを適正化することにより、加工性やコストと両立しながら、農建機用軸受に求められる過酷環境下での寿命向上を達成する軸受用鋼を開発した。

具体的な設計指針を以下に示す。

- ・クロムとバナジウムの添加と浸炭窒化焼入れによる微細炭窒化物の多量析出
- ・マンガン、クロム、モリブデンの添加と浸炭窒化焼入れによる残留 γ の増量
- ・シリコンの添加量適正化による残留 γ の変態特性制御（加工誘起変態の促進）
- ・クロム、モリブデン、バナジウムの添加と浸炭窒化焼入れによる焼戻し軟化抵抗の向上

8. 開発鋼を適用した軸受の特長

開発鋼に浸炭窒化焼入れ焼戻しを行って製作した軸受（開発軸受）の寿命試験を行い、その性能を確認した。

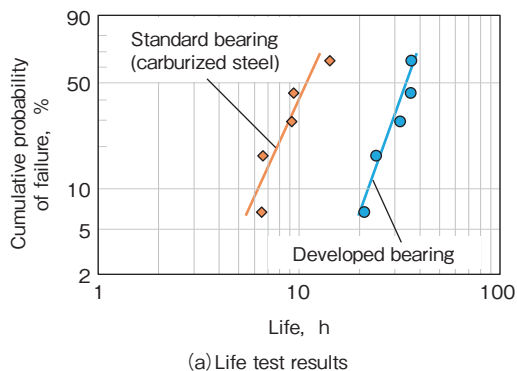


図8 圧痕起点剥離寿命
Dent-initiated spalling life

まず、硬質異物（高速度工具鋼アトマイズ粉：硬さ730 HV，サイズ100～150 μm ）を混入した潤滑油中で寿命試験を実施し、圧痕起点剥離寿命を評価した結果を図8に示す。表面の硬さと残留 γ の増量および残留 γ の安定性制御により、開発軸受はクロム鋼製の標準浸炭軸受に比べて圧痕起点剥離寿命が約3倍に向上した。

つぎに、第5章で述べたオルタネーターを模擬した試験機で寿命試験を実施し、白色組織剥離寿命を評価した結果を図9に示す。微細炭窒化物を多量に析出させた開発軸受の白色組織剥離寿命は、軸受鋼製の標準浸炭軸受に比べて5倍以上、クロム鋼製の標準浸炭軸受に比べて3倍以上に向上した。

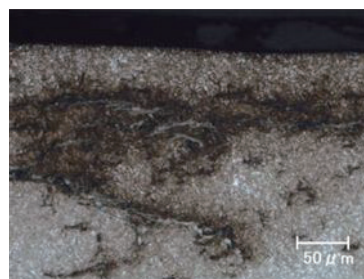
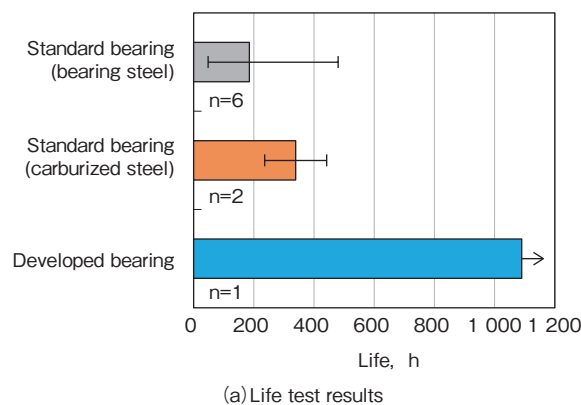
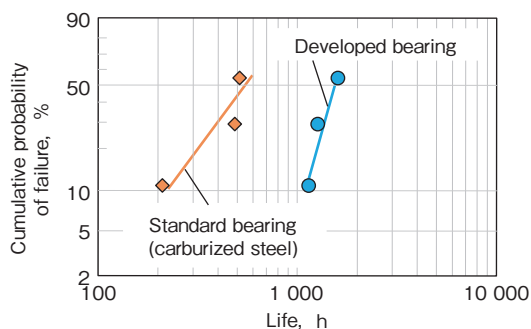


図9 白色組織剥離寿命
White structure flaking life

さらに、油膜パラメーターが0.14となる希薄潤滑条件下で寿命試験を実施し、表層剥離寿命を評価した結果を図10に示す。焼戻し軟化抵抗を向上させた開発軸受は、クロム鋼製の標準浸炭軸受に比べて表層剥離寿命が約5倍に向上した。

以上の結果より、開発軸受は圧痕起点剥離寿命、白色組織剥離寿命および表層剥離寿命が向上しており、農建機の安定稼働にくわえ、小型・軽量化や軸受交換頻度の低減による省資源・省エネルギーに貢献できる。



(a) Life test results



(b) Example of observed damage

図10 表層剥離寿命
Surface peeling life

9. おわりに

本研究では、農建機用軸受の長寿命化を目的として、鋼材設計と浸炭窒化熱処理を統合した材料・プロセス技術を提案し、各種損傷モードに対する軸受寿命を評価した。その結果、圧痕起点剥離、白色組織剥離および表層剥離に対して、標準軸受と比較して3～5倍の寿命向上を達成した。

本技術は農建機用軸受に限定されず、同様の過酷環境下で使用される軸受への適用が可能である。今後も幅広く市場動向を踏まえながら、本開発軸受の適用を拡大することで社会に貢献していく。

謝辞

本開発は、日本製鉄株式会社との共同研究による成果であり、ここに深謝の意を表する。

参考文献

- 1) 廣中哲也, 山田雅康, 金谷康平, 三尾巧美: 農建機車両のライフサイクルコスト低減への貢献技術, JTEKT ENGINEERING JOURNAL, No. 1016(2018)38-47.
- 2) 金谷康平, 佐田 隆, 三上 剛, 木澤克彦, 山下朋広, 平上大輔, 鈴木崇久, 根石 豊: ナノ析出による転がり軸受の省資源化と長寿命化, トライボロジー会議予稿集(高松 2017-11)C36.
- 3) 佐田 隆, 子安隼人, 尾野健太郎, 高橋 譲: ナノ析出による転がり軸受の白色組織剥離抑制, トライボロジー会議予稿集(伊勢 2018-11)B1.
- 4) 金谷康平, 佐田 隆, 大町真輝, 根石 豊, 鈴木崇久, 山下朋広: 転がり軸受の革新的な寿命向上を実現する材料・熱処理技術, トライボロジー会議予稿集(東京 2021-5) A20.
- 5) 木澤克彦, 三上 剛: 表面起点型はく離発生過程に及ぼす残留オーステナイトの影響, トライボロジー会議予稿集(名古屋 2008-9)345.
- 6) 平岡和彦: 転がり疲れによる白色型組織変化, Sanyo Technical Report, Vol. 15, No.1(2008)43-52.
- 7) 久保田 学, 樽井敏三, 山崎真吾, 越智達朗: 高強度ボルト用鋼の開発, 新日鉄技報, 381号(2004)57-60.
- 8) 中島碩一, 前田喜久男, 柏村 博: 表面改質による軸受の長寿命化, NTN TECHNICAL REVIEW, No. 63(1994)13-20.

筆者



金谷康平*

K. KANETANI



山田奈侑**

N. YAMADA

* イノベーション本部 材料研究部 博士(工学)

** 産機・軸受事業本部 産機ソリューション技術部