

寿命向上と省資源化を実現する軸受用中炭素鋼の開発

Development of Medium Carbon Bearing Steel Achieving Life Improvement and Resource Saving

金谷康平 K. KANETANI 三上 剛 T. MIKAMI 佐田 隆 T. SADA

In recent years, the growing interest in protecting the global environment has given rise to a demand for saving resources in bearing manufacturing. In particular, a large amount of rare metals are added to the NiCrMo steel used to manufacture rolling bearings for industrial machinery and the like. If less rare metals were used, resource-saving could be achieved. Furthermore, if the replacement frequency could be decreased by extending the life of the bearing, even greater resources-saving could be achieved. Increasing the amount of retained austenite on the surface is known to be an effective method of extending bearing life and, in this study, we concluded that life can be further improved by controlling the stability of retained austenite. We have developed a new rolling bearing steel which enables both reduced rare metal usage and longer bearing life by controlling the quantity and stability of retained austenite.

Key Words: rolling bearing, rolling contact fatigue, retained austenite, precipitate, resource-saving

1. はじめに

転がり軸受の主要な構成要素である軌道輪や転動体は、数 GPa の高い面圧で接触を繰り返すため、高強度の鉄鋼材料が使用されている。その代表が高炭素クロム軸受鋼であり、焼入れ処理によって部品全体を硬化して用いられる。一方、高い耐衝撃性が要求される用途に対しては、じん性を高めるために肌焼き鋼が用いられ、浸炭焼入れや浸炭窒化焼入れなどの表面硬化処理を施し、内部は低硬度の状態 で用いられる。肌焼き鋼を大形の軸受に適用する場合、焼入れ性を確保するために、ニッケル、クロム、モリブデンなどのレアメタルが多く添加された鋼材（ニッケルクロムモリブデン鋼）が用いられる。近年、地球環境の保護に対する関心が世界的に高まってきており、鉄鋼産業においては、材料の特性を向上させるために多用していたレアメタルを、地球上に豊富に存在し、精錬が容易な金属で代替する動きが盛んになってきている。軸受用鋼においても、ニッケルクロムモリブデン鋼をレアメタルの添加量が少ない材料に置き換えることができれば、省資源化が実現できる。また、軸受を長寿命化することによって、交換サイクルを延長できれば、さらに省資源化に貢献できる。

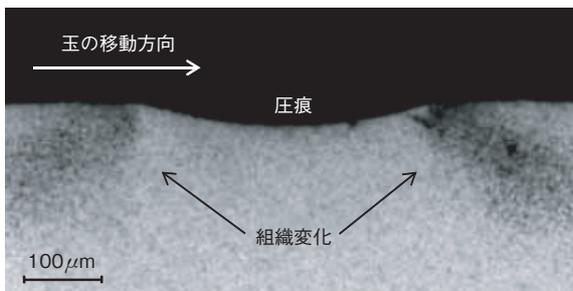
本報では、環境調和型社会への転換に対応するため、従来よりもレアメタルの添加量を低減し、なおかつ優

れた寿命性能を発揮する軸受用鋼を開発した結果について報告する。

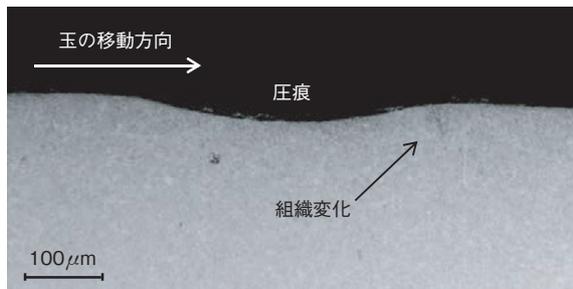
2. 寿命向上のアプローチ

軸受の転動疲労による損傷は、鋼中に存在する非金属介在物を起点とする内部起点剥離と、潤滑剤への異物の混入や潤滑不良に起因する表面起点剥離に大別される。ニッケルクロムモリブデン鋼を表面硬化処理した軸受は、建設機械や鉄鋼設備などの産業機械に使用されることが多い。そのため、内部起点剥離はもちろんのこと、摩耗粉などをかみこむことで生じる圧痕を起点とした表面起点剥離（圧痕起点剥離）に対する耐久性を向上させることが、軸受の長寿命化に有効である。このうち、圧痕起点剥離は、軌道面に圧痕が形成され、転動体が通過するときに圧痕縁に応力が集中し、組織が疲労することで発生する。したがって、圧痕起点剥離寿命を向上するためには、組織の疲労強度を高める必要があり、表面の残留オーステナイト (γ) 量を増加することが有効である¹⁾。図 1 は、材料と熱処理を調整して製作した、硬さが同等で、残留 γ 量が異なる 2 種類の玉軸受の内輪に、人為的に圧痕を付与し、同一の条件で一定時間転動させた後の断面組織である。表面の残留 γ が多い内輪は、圧痕縁の応力集中部において、残留 γ がマルテンサイ

トに加工誘起変態することで組織の疲労が抑制されている。このように、残留 γ 量を増加することで、圧痕起点剥離寿命を向上させることが可能である(図2)。また、この技術を応用することで、内部起点剥離寿命を向上させる取り組みも行われている²⁾。図3は、材料と熱処理を変更することで残留 γ 量を意図的に変えた試料を用いて、内部起点剥離寿命を評価した結果である。このように、き裂発生の起点となる、転動面直下のせん断応力が作用する領域の残留 γ 量を増加することで、転動中の加工誘起変態を促し、寿命を向上させることが可能である。軸受用鋼には、内部起点剥離の起点となる非金属介在物が不可避免的に含まれるため、清浄度が高い鋼材の内部起点剥離寿命をさらに向上させる方策として、残留 γ を利用することは有効であると考えられる。



(a) 硬さ 65HRC, 残留 γ =14%, 20h 運転



(b) 硬さ 64HRC, 残留 γ =46%, 20h 運転

図1 圧痕近傍の組織変化 (ナイトル腐食)¹⁾
Microstructural changes in the vicinity of the dent (Nital etching)

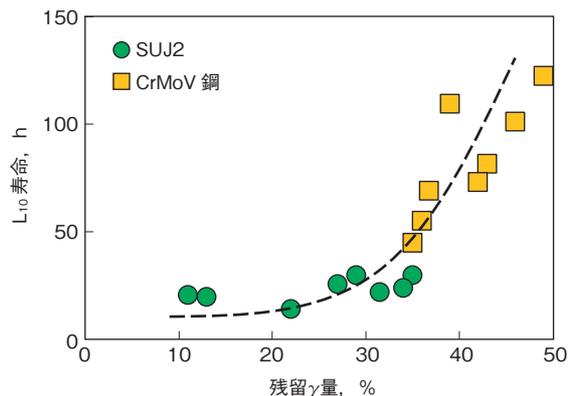


図2 残留 γ 量と圧痕起点剥離寿命の関係¹⁾
Relationship between volume fraction of retained γ and dent-initiated spalling life

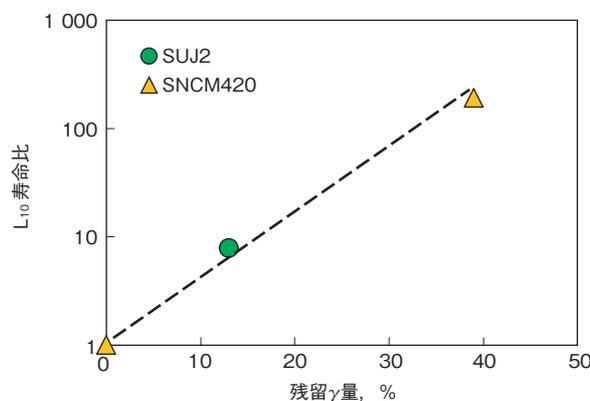


図3 残留 γ 量と内部起点剥離寿命の関係²⁾
Relationship between volume fraction of retained γ and sub-surface initiated spalling life

以上のように、残留 γ の加工誘起変態を活用することで、軸受の寿命を向上させることが可能であり、この観点から鋼材開発を行った。本開発では、従来よりも優れた寿命性能を達成するため、残留 γ の量に加え、残留 γ の安定性にも着目し、転動中に加工誘起変態が発現しやすい合金成分を明らかにし、開発鋼の成分を調整した。また、軟質な残留 γ は、増量することによって硬度の低下を招くため、ナノ・スケールの合金析出物による強化機構を取り入れ、残留 γ の増量と高硬度を両立した。これらを、代表的なニッケルクロムモリブデン鋼である JIS-SNCM420 よりも、レアメタルの総添加量が少ない鋼材で実現した。

3. 合金元素の調整による残留 γ の安定性制御

3.1 考え方

残留 γ の安定性は合金元素の含有量と密接に関係しており、その評価指標として M_s 点（マルテンサイト変態開始温度）がある。各合金元素の含有量を % で表すと、 M_s 点と合金元素の関係として、例えば式(1)の実験式が提案されている³⁾。

$$M_s = 550 - 361 \times (\%C) - 39 \times (\%Mn) - 35 \times (\%V) - 20 \times (\%Cr) - 17 \times (\%Ni) - 10 \times (\%Cu) - 5 \times (\%Mo + \%W) + 15 \times (\%Co) + 30 \times (\%Al) \quad (1)$$

M_s 点が高いほど残留 γ の安定性は低く、マルテンサイトに変態しやすい。鉄鋼材料では、ほとんど全ての合金元素に M_s 点を下げる効果がある。したがって、残留 γ の安定性を下げ、転動中の加工誘起変態を促すには、十分な残留 γ 量を確保するために必要最低限の合金元素を添加し、可能な限り M_s 点を下げないことが望ましい。

3.2 評価材

残留 γ の安定性に及ぼす合金元素の影響を明らかにするため、表1に示す5種類の評価材を溶製した。評価対象には、軸受用鋼の主たる合金元素である Si, Cr, Mo と、ナノ・スケールの合金析出物を形成する V を選定し、評価材はこれらの添加量を変更している。表に記載していない合金元素の種類と添加量は、すべての評価材で同等である。

表1 評価材の合金成分 (mass%)
Nominal composition of evaluated steel

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

3.3 評価方法

負荷に対する残留 γ の安定性を評価するため、二円筒転動試験を実施した。試験円筒は、各評価材を切削加工し、熱処理を施した後、研削により外径 30mm、幅

8mm の円筒形状に仕上げた。熱処理は、ナノ・スケールの合金析出物を多量に分散させる浸炭窒化焼入れ焼戻しとし、残留 γ の量が安定性に影響を及ぼさないように、いずれの試験円筒も残留 γ 量を 30% 程度に揃えた。表2に、X線回折で測定した各試験円筒表面の残留 γ 量を示す。図4に示すように、各試験円筒を高炭素クロム軸受鋼 (JIS-SUJ2) に焼入れ焼戻しを施して製作した駆動円筒 (表面硬度 750HV) と接触させ、表3の条件で転動させた。転動後の表面の残留 γ 量を測定し、その減少率を式(2)で算出することで、残留 γ の安定性を評価した。

$$\text{残留 } \gamma \text{ 減少率} = \left[1 - \frac{\text{転動後の残留 } \gamma \text{ 量}}{\text{転動前の残留 } \gamma \text{ 量}} \right] \times 100, \% \quad (2)$$

表2 試験円筒の表面残留 γ 量
Volume fraction of retained γ in each steel type

A	37%
B	32%
C	30%
D	27%
E	27%

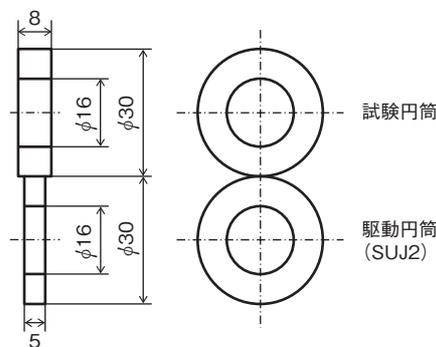


図4 二円筒転動試験概略図
Schematic of twin-disc test

表3 二円筒転動試験条件
Twin-disc test conditions

接触応力	1.5GPa
回転速度	100min ⁻¹ (駆動円筒)
すべり率	9.1%
潤滑油	ISO-VG8
潤滑方法	2mL/min (滴下)
転動時間	8h

3.4 評価結果

試験によって得られた各評価材の残留 γ の減少率を **図5** に示す。A 鋼と B 鋼では、減少率に明確な差がないものの、他の評価材において減少率の違いが認められることから、合金元素の種類が、残留 γ の安定性に影響を及ぼしていることがわかる。ここで、合金元素の影響について整理すると **表4** のようになる。残留 γ の安定性を高める元素を“↑”，低下させる元素を“↓”，影響を及ぼさない元素を“—”で示している。A 鋼と B 鋼の比較から、Mo は残留 γ の安定性に影響を及ぼさず、A 鋼と C 鋼、D 鋼の比較から、V および Cr は残留 γ の安定性を高め、B 鋼と E 鋼の比較から、Si は残留 γ の安定性を低下させることがわかる。

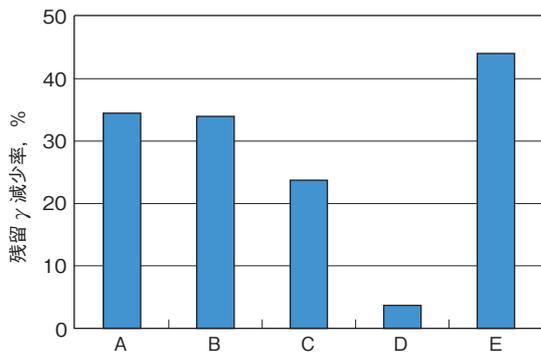


図5 各評価材の残留 γ 減少率
Reduction rate of retained γ in each steel type

表4 合金元素が残留 γ の安定性に及ぼす影響
Influence of alloy elements on retained γ stability

	比較に用いた評価材	残留 γ の安定性に及ぼす影響
Si	B 鋼, E 鋼	↓
Cr	A 鋼, D 鋼	↑
Mo	A 鋼, B 鋼	—
V	A 鋼, C 鋼	↑

Cr, Mo, V の影響は、 M_s 点の式(1)より説明できる。すなわち、Cr と V は、 M_s 点を下げる効果が大きい元素であるため、添加することによって残留 γ が安定化したと考えられる。V の係数が Cr より大きいにも関わらず、V の添加量を増した C 鋼の安定性が、Cr の添加量を増した D 鋼よりも低いのは、V は浸炭窒化により容易に炭窒化物を形成するため、残留 γ 中の固溶量が

少なくなっているためであると推測する。また、式(1)より Mo は M_s 点を下げる効果が小さく、残留 γ の安定性に及ぼす影響が現れなかったと考えられる。

Si は、式(1)に現れてこないため、 M_s 点に及ぼす影響は不明である。しかしながら、Si は Cr, Mo, V と異なり、炭素活量を上昇させる元素として知られており⁴⁾、浸炭窒化によって炭素を鋼中に侵入させる際、他の評価材の場合に比べてマトリックス中への炭素の固溶量が少なくなると考えられる。すなわち、Si 自体の影響は不明であるが、Si の添加によって、浸炭窒化後の炭素固溶量を他の評価材に対して低減することができ、これが M_s 点の低下を抑制するため、残留 γ の安定性を低下させたと考えられる。

以上の結果より、転動中に残留 γ の加工誘起変態を促し、寿命を向上させるためには、残留 γ の安定性を低下させる Si の増量が有効であることがわかった。

4. 長寿命・省資源軸受用開発鋼

4.1 開発鋼の特長

前節の結果をもとに、開発鋼の成分を決定した。 **図6** に開発鋼に添加した主要な合金元素とそれぞれの役割を示す。開発鋼を軸受に適用する場合は浸炭窒化焼入れ焼戻しを施し、ナノ・スケールの炭窒化物を析出させている。析出物を透過型電子顕微鏡 (TEM) で観察した結果を **図7** に示す。主として V と Cr からなる炭窒化物が均一に分散しており、その粒子の大きさは数 10nm 程度である。この微細炭窒化物の分散によって析出強化を実現し、残留 γ の増量と高硬度を両立した。また、既存の SNCM420 には、大形の軸受に必要な焼入れ性を確保するために、クロムとモリブデンに加え、多量のニッケルが添加されている。開発鋼では、ニッケルを添加せず、他の元素で焼入れ性を補填することで、レアメタルの総添加量を 2 割以上削減し、鋼材の省資源化を達成した。母材炭素量は、耐衝撃性を損ねない範囲で SNCM420 よりも増量し、中炭素鋼とすることで、浸炭窒化に要する時間を短縮し、熱処理の省エネルギー化にも貢献している。

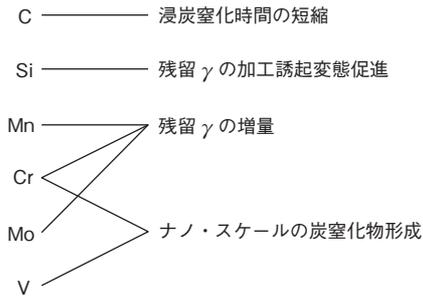
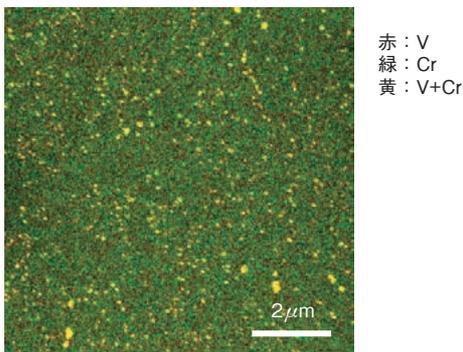
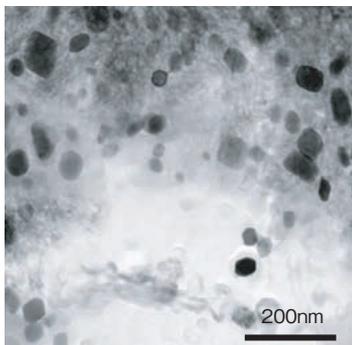


図6 開発鋼の添加元素と役割
Effects of alloy elements in the developed steel



(a) エネルギー分散型 X 線分光器 (EDS) による元素分析結果



(b) 抽出レプリカ法による観察結果

図7 析出物観察結果
Precipitate observation results

4.2 開発鋼を適用した軸受の寿命性能

開発鋼を適用した軸受の圧痕起点剥離寿命を表5の条件で評価した。得られた結果を図8に示す。本軸受は、残留 γ の増量と高硬度を両立し、さらに残留 γ の安定性を制御することによって、SNCM420 製浸炭軸受の2倍以上の長寿命を達成している。

表5 寿命試験条件
Life test conditions

試験軸受	30306D (外径 72mm, 内径 30mm, 組立幅 20.75mm)
アキシアル荷重	25.9kN
回転速度	2 000min ⁻¹ (内輪回転)
潤滑油	85W - 90 ギア油
潤滑方法	油浴
異物	高速度鋼アトマイズ粉 (730HV, 100 ~ 150 μ m)
異物混入量	0.02mass% (0.1g/500mL)

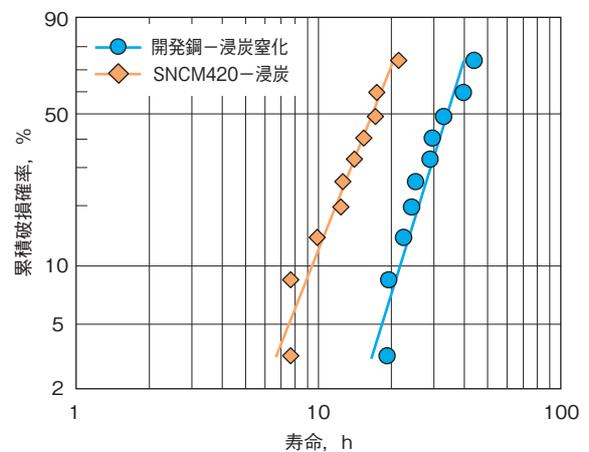


図8 圧痕起点剥離寿命
Dent-initiated spalling life

4.3 開発鋼を適用した軸受の基礎特性

開発鋼を軸受に適用するためには、寿命性能以外にも要求される特性がある。特に、表面残留 γ の増量に伴って低下することが懸念された、耐ブリネル圧痕性および寸法安定性を評価した。

耐ブリネル圧痕性は、平板の試料に、所定の荷重で3/8 インチの鋼球を押し付け、生じた圧痕の深さを測定することで評価した。評価結果を図9に示す。開発鋼は浸炭窒化焼入れによって残留 γ を増量しているが、同時にナノ・スケールの炭窒化物による析出強化を実現しているため、従来鋼の浸炭焼入れと同等の耐ブリネル圧痕性が得られていることがわかる。

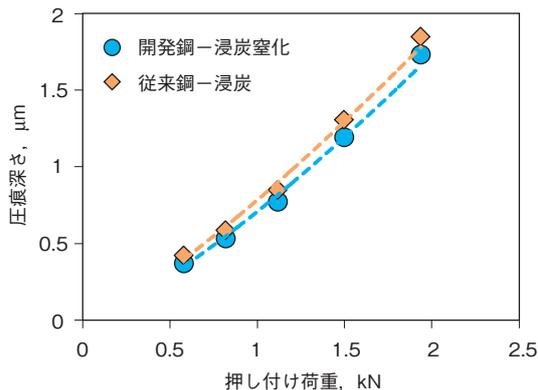


図9 耐ブリネル圧痕性評価結果
Anti-brinelling test results

寸法安定性は、軸受の内輪にはめあい応力が 90MPa となる寸法の丸棒を圧入し、雰囲気温度 120℃ で所定の時間保持した後、丸棒を取り外し、初期からの内径の寸法変化率を測定することで評価した。評価結果を図 10 に示す。浸炭窒化焼入れした開発鋼の表層には、熱的に不安定な残留 γ が多く存在するが、中炭素鋼とすることで内部の残留 γ 量を低減し、従来鋼の浸炭焼入れと同等の寸法安定性が得られている。

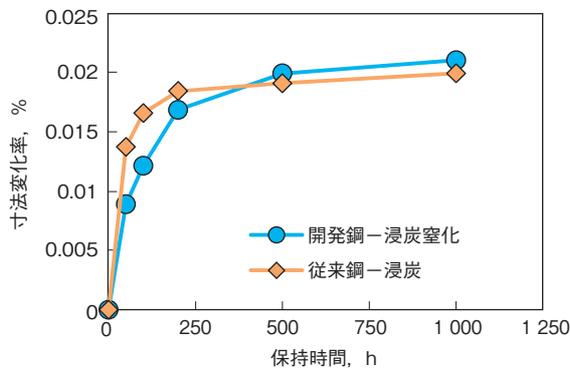


図10 寸法安定性評価結果
Dimensional stability test results

5. おわりに

ナノ・スケールの炭窒化物による析出強化と、新たに着目した残留 γ の安定性制御を取り入れることによって、従来よりも寿命性能に優れた軸受用鋼を開発した。本開発鋼は、寿命性能以外の特性も、標準的な浸炭軸受と同等の性能を有するため、用途によらず適用可能であるが、特に SNCM420 などのニッケルクロムモリブデン鋼が適用されてきた産業機械用などの軸受に適用することで、省資源化に貢献できる。

6. 謝辞

本開発は、新日鐵住金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。

参考文献

- 1) K. KIZAWA, T. MIKAMI : Effect of Retained Austenite on Microstructural Change in Surface-Initiated Flaking Process of Rolling Bearings, Proc. World Tribology Congress, Kyoto(2009)351.
- 2) 金谷康平, 三上 剛, 佐田 隆, 木澤克彦 : 内部起点はく離寿命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(東京 2016-5)296.
- 3) 須藤 一, 田村今男, 西澤泰二 : 金属組織学, 丸善出版(1972)166.
- 4) 西澤泰二 : 鉄合金の熱力学, 日本金属学会会報, 12(1973) 401.

筆者



金谷康平*
K. KANETANI



三上 剛*
T. MIKAMI



佐田 隆*
T. SADA

* 研究開発本部 材料研究部