

# 有心焼入れ用軸受鋼の開発

木澤克彦 後藤将夫

## Development of Bearing Steel for Cored Hardening

K. KIZAWA M. GOTOH

Bearings used under shock load conditions especially require toughness to prevent cracks. For these applications, carbonized steel is generally used. On the other hand cored hardening high carbon chromium bearing steels, SUJ2, SUJ3, SUJ5 etc., are also used. The cored hardening is the quenching method to get high surface hardness (60~64HRC) and low core hardness (30~45HRC) and rolling bearings treated with this method have high toughness performance and longer life.

This paper presents the concept of development of new bearing steel to get cored hardening easily and its new bearing steel KUJ3 for an example.

- |  |   |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>1. はじめに</li> <li>2. 有心焼入れ用軸受鋼開発の考え方           <ul style="list-style-type: none"> <li>2.1 有心焼入れの容易化</li> <li>2.2 鋼の焼入れ性の定量表示</li> <li>2.3 有心焼入れのための焼入れ性の設計</li> <li>2.4 材料の成分設計</li> </ul> </li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>3. 有心焼入れ用軸受鋼開発品の性能           <ul style="list-style-type: none"> <li>3.1 リング形状の試料での硬度分布</li> <li>3.2 転動疲労寿命</li> </ul> </li> <li>4. おわりに</li> </ul> |
|--|---|

## 1. はじめに

転がり軸受は回転しながら荷重を支持する機械要素の一つで、軌道輪と転動体の間で点または線接触の状態に荷重を繰返し受ける。このため、軌道輪、転動体に用いられる材料の必要特性には転がり疲れ寿命の他、硬さ、降伏強さ、耐摩耗性、靱性、寸法安定性等が挙げられる。

通常転がり軸受にはJISで規定されているSUJ2, SUJ3, SUJ5等の高炭素クロム軸受鋼が多く使われる。これらの材料は製品の寸法や形状により使い分けされ、一般にはそれぞれ内部まで硬度が入る焼入れ焼戻しを施し、硬度を57~64HRCにして用いられている。

しかしながら、大きな衝撃荷重が加わる環境で軸受が使用される場合には、靱性が特に重要な特性となるため、表面を高硬度に、内部を比較的硬度にすることが有効になる。そのような用途の場合、肌焼き鋼に浸炭焼入れを施すのが一般的であるが、一方で各種高炭素クロム軸受鋼を用いた有心焼入れ<sup>1)</sup>が実施されている。有心焼入れとは

表面を高硬度、内部を低硬度にする熱処理法であり、この方法により製造された有心焼入れ品は、表面部分に残留圧縮応力層が形成されることから転動疲労寿命に優れ、さらに内部硬度が比較的低下することから靱性に優れるなどの軸受特性が得られる。しかし、現状の軸受鋼での有心焼入れは焼入れ時の冷却条件の制御が複雑であり、また、その適用可能領域が狭いという問題がある。

以下に有心焼入れが容易にできる軸受鋼の開発にあたっての考え方、およびその開発結果を紹介する。

## 2. 有心焼入れ用軸受鋼開発の考え方

### 2.1 有心焼入れの容易化

オーステナイト状態にある鋼を上部臨界冷却速度以上で冷却し、マルテンサイト組織に変態させることを焼入れ(焼入れ硬化)という。ここで、上部臨界冷却速度とはパーライト変態が起らず全てマルテンサイト変態する下限の冷却速度のことであり、その速度が小さい鋼ほど遅く冷却しても焼

きが入る鋼，言い換えれば焼きの入りやすい鋼といえる。

製品の焼入れ硬化度合は，( )鋼の焼入れ性，( )製品の寸法や形状，( )焼入れ時の冷却条件に依存する。その関係を図1に示す。

( )は上部臨界冷却速度(連続冷却変態線図)を決定する。

( )，( )は製品のある部位における冷却速度を決定する。

例えば，焼入れ性の悪い鋼の場合，製品の寸法・肉厚が大きくなるとその体積の増加にともない熱容量が大きくなるため，製品内部の冷却速度が遅くなり，その結果製品内部が十分にマルテンサイト化せず，製品表面から内部に向かい焼入れ硬化度合いが低下する現象が起こる。

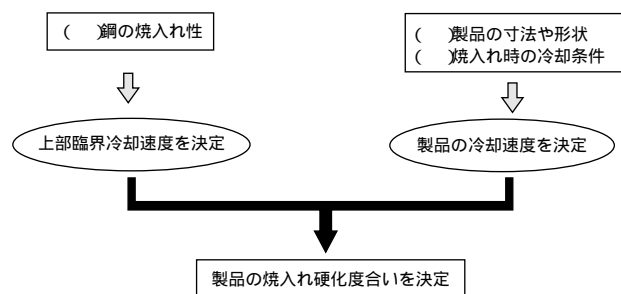


図1 焼入れ性について  
Outline of hardenability

有心焼入れは前述の現象を利用したものであるが，鋼の焼入れ性は材料成分によりほぼ決定されるため，同一鋼種で種々の形状・寸法のもを有心焼入れしようとする冷却条件を調整する必要がある。そのため，現状では，普通焼入れで製品内部まで高硬度になる焼入れ特性の軸受鋼を用い，製品形状や寸法に応じて冷却速度を調整することにより内部硬度を低下させるのが一般的である。しかし，これらの処理を行う場合，冷却条件の厳密な制御(焼入れ油の流速，方向，攪拌等の管理)が必要となる。

そこで，製品形状や寸法に応じて冷却条件を厳密に制御する必要がなく容易に有心焼入れができる材料の開発を行った。すなわち，図1の考え方に基づけば鋼の焼入れ性が重要となり，それを適正化すれば容易な有心焼入れが可能となる。なお，鋼の焼入れ性は合金元素の添加，オーステナイト粒径，炭素濃度で調整することが可能であるが，オーステナイト粒径あるいは炭素濃度を变化させた場合，炭化物量，マトリックスの炭素量等が変化し，軸受鋼としての必要特性を失う可能性があるため，本開発では合金元素の添加による鋼の焼入れ性の適正化に着目している。

## 2.2 鋼の焼入れ性の定量表示

図2にジョミニー試験(JIS G 0561)により得られた3種類の軸受鋼のジョミニー線図の一例を示す。ジョミニー線図は鋼の焼入れ性を定量的に表すものである。各焼入れ端からの距離における硬度は，その位置での冷却速度における硬度を意味する。すなわち，焼入れ端から離れた位置でも硬度の低下が少ない鋼は焼入れ性が良いといえる。

そして，製品の寸法や形状(図1( ))および焼入れ時の冷却条件(図1( ))をパラメータとしてジョミニー線図を活用することにより，リング形状の製品がある冷却能力で焼入れされた時の焼入れ硬化度合いを推定することが可能となる。

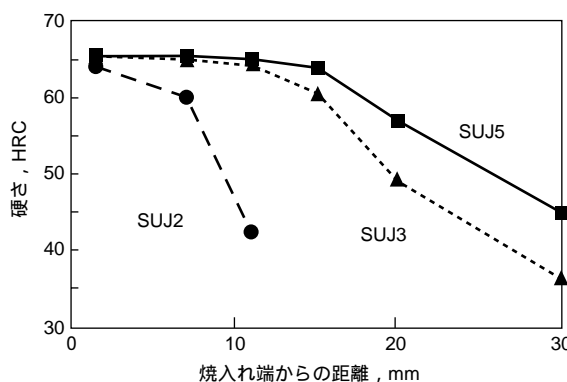


図2 ジョミニー線図の一例  
Examples of Jominy curves

## 2.3 有心焼入れのための焼入れ性の設計

### 2.3.1 リング形状の製品における内部硬度の推定方法

鋼の焼入れ性を調整することによって高靱性となる内部硬度を得るためには，特定の焼入れ性を持つ鋼から作られたリング形状の製品が任意の冷却条件で熱処理された時の内部硬度を推定できなければならない。

そこで，2.1で述べた焼入れ性の考え方に基づきジョミニー線図を用いて内部硬度の推定を行う。図3にその推定方法の手順を示す。本方法は，リング形状の製品が任意の冷却条件で熱処理された時の製品内部の冷却速度をジョミニー線図のある焼入れ端からの距離の冷却速度に等価変換することを意味する。ここで，等価直径とはリング形状の製品を焼入れした時と同じ内部硬度となる無限長の丸棒の直径のことであり<sup>2)</sup>，形状係数はその等価直径を決定するパラメータでリング形状の幅，内径，肉厚で決定される値<sup>2)</sup>である。また，冷却能力は熱処理の際の冷却条件によって定まる値であり，冷却能力が大きいほど冷却速度が速く，理想焼入れ(焼入れした瞬間に鋼が液温になるような焼入れのこと)の場合には無限大となる<sup>3)</sup>。

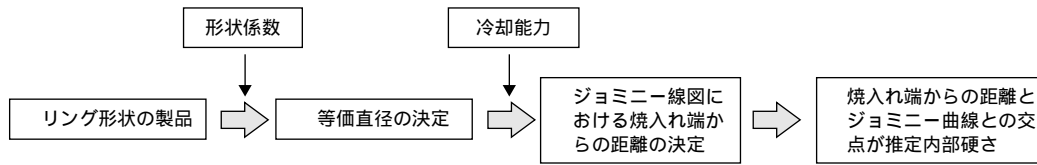


図3 内部硬度の推定手順  
Process to estimate core hardness

表1 リング試料の寸法および内部硬度推定のための各種パラメータ  
Size of ring test pieces and parameters to estimate core hardness

リング試料寸法			内部硬度推定のための各種パラメータ	
外径, mm	内径, mm	幅, mm	等価直径, mm	焼入れ端からの距離, mm
320	230	120	65	25
240	160	170	60	23
230	155	170	56	21
230	160	120	52	20
220	160	120	44	17

### 2.3.2 目標ジョミニー線図の決定

図4に表1のような等価直径44～65mmのリング形状の試料寸法の範囲における内部硬度を推定した領域(図4の )と有心焼入れ用軸受鋼の目標ジョミニー線図を示す。なお、同図には目標ジョミニー線図決定にあたり、基本鋼種としたSUJ2, SUJ3のジョミニー線図の一例も示した。

図より、SUJ2の場合、 $J_{1.5} \sim J_7$ ( $J_7$ : 焼入れ端からの距離が7mm)における焼入れ性が低いため、本等価直径範囲では表面近傍に十分焼きが入らず、軸受としての性能を満足するための硬度が得られない。一方、SUJ3は焼入れ性の良い材料のため表面硬度は満足するが、普通焼入れの能力で冷却すると内部は必要とされる硬度範囲を大きく外れてしまうことになる。そのため、本適用領域でSUJ3を用いる場合の有心焼入れは、前述のように冷却条件を厳密に制御することが必要となっている。

そこで、有心焼入れ用軸受鋼は冷却条件を厳密に制御しなくても広い軸受の寸法領域で容易に有心焼入れの硬度分布を得ることができるようにジョミニー線図を決定する。すなわち、リング試料の表面近傍に対応する $J_{1.5} \sim J_7$ の範囲はSUJ3と同等の焼入れ性を有し(図4の )、かつ、内部は高靱性を有するために必要と考えられる硬度範囲(図4の )を満足するように、推定内部硬度領域での焼入れ性をほぼ同一に設定することが有効である。

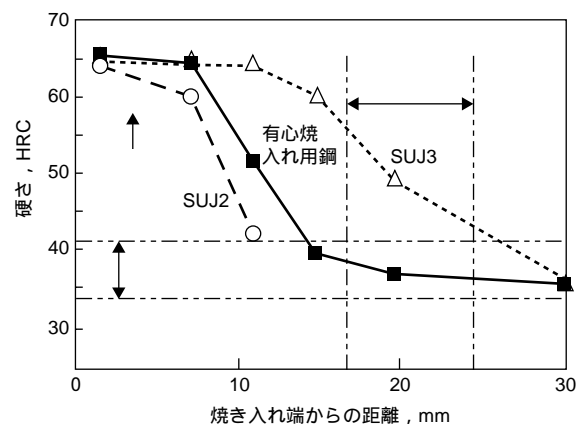


図4 等価直径44～65mmの時の目標ジョミニー線図  
Jominy curve of objective in equivalent diameter from 44 mm to 65 mm

### 2.4 材料の成分設計

2.3.2で目標とするジョミニー線図を示したが、本項ではそのジョミニー線図となるように材料の成分設計を行った考え方について述べる。成分設計にあたっては、軸受鋼としての性能を有すること、材料コストを極力抑えることを考慮に入れ、SUJ2の成分をベースとし合金元素Mn, Cr, Siの添加量を検討した。これら合金元素の鋼の特性に対する影響を表2に示す。



表2 合金元素の鋼に対する影響  
Influence of elements on steel quality

	CCT線図における焼入れ性		マトリックス強度
	パーライト変態	ベイナイト変態	
Mn			
Cr			
Si			

向上 やや向上 変化なし

(1) Mn量の設定

Mnは連続冷却変態(CCT)線図におけるパーライト変態およびベイナイト変態ともに長時間側に大きく移動させるので、上部臨界冷却速度が小さくなり鋼の焼入れ性を大きく向上させる元素である。図4の目標ジョミニ線図の場合、SUJ2より焼入れ性を向上させる必要があるため添加量を多くしなければならない。しかし、多すぎると被削性が著しく低下する。

(2) Cr量の設定

CrはMnと同様硬度低下への寄与が大きいパーライト変態を遅らせる効果を持つ。しかし、パーライト変態に比べ硬度低下への寄与が小さいベイナイト変態を遅らせる効果がMnに比べ小さいため、焼入れ時にベイナイト変態が優先的に発生しやすくなりジョミニ線図での硬度低下の勾配を緩やかにしてしまう。したがって、(1)の理由からMn量は増加する必要があるので、図4の目標ジョミニ線図に示したように $J_7$ 付近から内部への硬度低下の勾配を急にするためにはCr量はSUJ2より減少させる必要がある。ただし、炭化物形成元素のため少なすぎると転動疲労寿命が低下する。

(3) Si量の設定

SiはCrの減量によるマトリックス強度の低下を補うために添加しなければならない。ただし、多すぎると被削性が低下する。

上記(1),(2),(3)を考慮して、前述の図4に示した目標ジョミニ線図を得るべく合金元素の添加量の調整を行った。

3. 有心焼入れ用軸受鋼開発品の性能

本章では、有心焼入れ用軸受鋼として2.の考え方に基づき開発したKUJ3について紹介する。

3.1 リング形状の試料での硬度分布

図5に示す等価直径60mmに相当するリング形状の試料での熱処理後の硬度分布を測定した。図6にその硬度分布を示す。

図6より、KUJ3を焼入れ焼もどした結果、表面近傍は59HRC以上かつ内部は36HRC程度となり有心焼入れ品としての良好な硬度分布が得られたことが分かる。

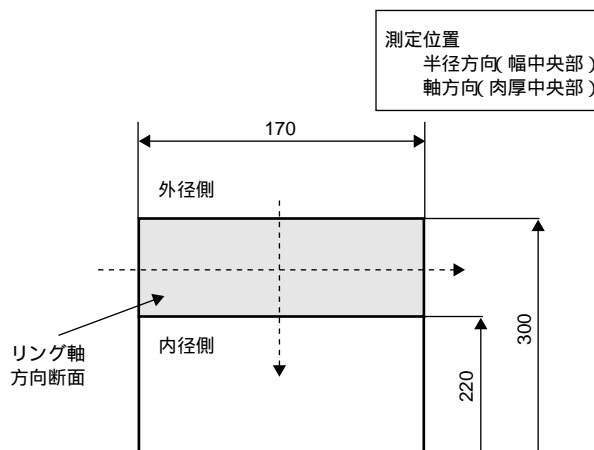
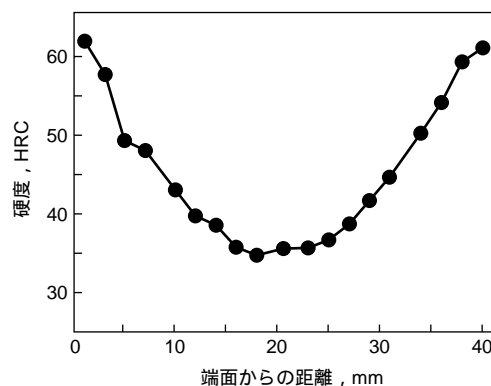
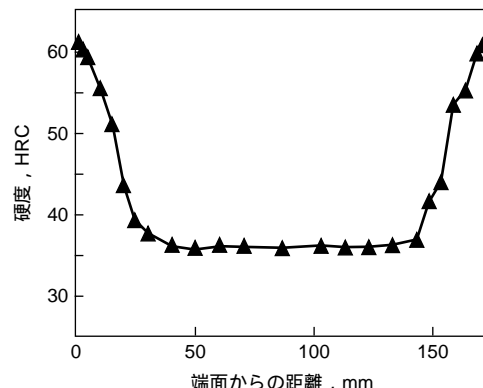


図5 リング試料の形状および硬度分布測定位置  
Size of ring test piece and measuring location of hardness distribution



半径方向(幅中央部)



軸方向(肉厚中央部)

図6 硬度分布測定結果  
Hardness distribution

### 3.2 転動疲労寿命

KUJ3の軸受用鋼としての転動疲労寿命をスラスト型転動疲労寿命試験機により試験をした。試験条件を表3に結果を図7に示す。

KUJ3は軸受用鋼として十分な寿命を有していることが確認できた。

表3 寿命試験条件  
Life test conditions

試験機	スラスト型転動疲労寿命試験機
最大接触応力	5 230MPa
応力繰返し速度	30Hz
潤滑	1号スピンドル油 油浴

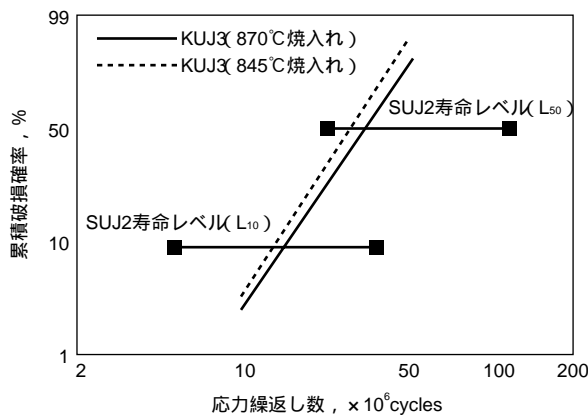


図7 寿命試験結果

Life test data of KUJ3 and SUJ2

### 4. おわりに

本報では、鋼の焼入れ性を調整することによって、設定された軸受の寸法領域で従来鋼以上に有心焼入れが容易にできる新しい有心焼入れ用軸受鋼の開発の考え方およびその開発鋼KUJ3について紹介した。

本開発鋼KUJ3は、適用軸受の寸法範囲における推定内部硬度領域の焼入れ性をほぼ同一になるような組成にした材料であり、軸受用鋼としての十分な転動疲労寿命を有している。

### 参考文献

- 1) 大和久重雄：鉄鋼材料を生かす熱処理技術，アグネ(1982)11.
- 2) British Standards Institution：Method for the estimation of equivalent diameters in heat treatment of steel，BS5046(1974)
- 3) 本橋嘉信，浅沼 博：金属材料基礎工学，日刊工業新聞社(1995)245.

### 筆 者



木澤克彦\*  
K. KIZAWA



後藤将夫\*  
M. GOTOH

\* 総合技術研究所 基礎技術研究所  
軸受技術開発部