転がり摩擦の研究 (第4報)*

—軸受鋼の純転がり摩擦力に及ぼす焼入温度の影響—

渡 部 紘 ** 川 口 格***

A Study on Rolling Friction (4th Report)
—The Effect of Austenitizing Temperature on
the Pure Rolling Friction of Ball Bearing
Steel—

Kouichi WATANABE and Itaru KAWAGUCHI

The effects of the quenched structure of ball bearing steel on the pure rolling friction and on the yield behavior at low strain values in the compression test are experimentally studied. The specimens are austenitized at six temperatures from 790°C to 890°C and they are tempered at 150°C and 300°C. The specimens tempered at 150°C contain more retained austenite as the austenitizing temperature becomes higher, but the specimens tempered at 300°C do not contain retained austenite. On the former specimens, the pure rolling friction decreases when the austenitizing temperature rises from 790°C to 810°C, but above 810°C it increases monotonously with the rise of the austenitizing temperature. On the latter specimens, the pure rolling friction remains the smallest and constant value regardless of the austenitizing temperature.

In order to examine the effect of dissolved carbon content in martensite, the pure rolling friction is measured by using the specially prepared specimens with carbon contents from 0.32 to 0.71%, which are quenched avoiding the precipitation of undissolved carbides and subjected to the sub-zero treatment to hold the retained austenite content. On tempering at 150°C, the pure rolling friction decreases with the increase of carbon contents from 0.32 to 0.42%, but it remains constant when carbon contents are more than 0.42%. From these results, the behavior of the pure rolling friction of the specimens tempered at 150°C is well interpreted by the two effects: (i) the more retained austenite the specimens contain, the larger the pure rolling friction becomes, (ii) the more dissolved carbon martensite contains, the smaller the pure rolling friction becomes up to 0.42% carbon contents and it remains constant more than 0.42%. These effects are also found in the yield behavior in the compression test.

Key words: rolling friction, ball bearing steel, quenched structure, retained austenite, yield stress.

1. 緒 言

第3報¹⁾において、一定焼入条件で焼入れた軸受鋼の焼戻し温度を150°Cから500°Cまで変化させた場合、純転がり摩擦力は焼戻し温度300°Cまでは温度の増加と共に減少し、それ以上の温度では増加することを示した。そして、高温焼戻し材での増加は基地マルテンサイトの降伏による巨視的な塑性変形により、また低温焼戻し材の挙動は高降伏点の基地マルテンサイトと低降伏点の残留オーステナイトの複合材の微視的非弾性変形の履歴損失を考えれば説明できること、およびサブゼロ処理後150°Cで焼戻しをした材料での実験から、基地マルテンサイトの性質を一定に保てば純転がり摩擦力の大きさは

ほぼ残留オーステナイト量に比例して増加することを示した。

上記のような考え方によれば、焼入温度を変化させた場合、残留オーステナイト量が変わるだけでなく基地マルテンサイトの固溶炭素量が変化するのでその機械的性質が変化し、転がり摩擦力にも影響が現れるはずである。これを調べるために、本報では軸受鋼(SUJ2)について焼入温度を790~890°Cで20°Cおきに变えた場合の純転がり摩擦力の変化を測定した。それと同時に、基地マルテンサイトへの固溶炭素量の影響を調べるために、素材の炭素量以外はSUJ2と同じで炭素量のみを変えた試料を特別に作製し、含有する炭素をすべて固溶させた、いわゆる基地鋼で固溶炭素量と純転がり摩擦力の関係を調べた。

一方、転がり摩擦力の起因が材料の履歴損失であるかぎり、組織変化の純転がり摩擦力に及ぼす影響に対応する現象が引張りおよび圧縮試験でも現れるはずである。そこで、上記の実験と同じ組織の材料について圧縮試験を行って低ひずみ域における非弾性挙動を調べ、両者の

* 原稿受付 昭和55年12月30日。昭和48年度精機学会秋季大会学術講演会(昭和48年10月9日)および昭和54年度精機学会秋季大会学術講演会(昭和54年10月11日)にて発表。

** 正 会 員 松江工業高等専門学校(松江市西生馬町14-4)

*** 正 会 員 大阪府立大学工学部(堺市百舌鳥梅町4丁804)

表1 平板試料の化学成分 (wt%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Al	Sn
0.98	0.29	0.33	0.011	0.019	0.05	1.43	0.07	0.008	0.016

表2 平板試料の熱処理条件

焼入条件 (油焼入れ)	硬さ Hv200	
	150°C, 1 h 焼戻し	300°C, 1 h 焼戻し
790°C, 45 min	730	620
810°C	770	630
830°C	820	650
850°C	825	660
870°C	820	660
890°C	810	660

関連についても考察した。なお、焼入温度の変化による純転がり摩擦力の挙動についてはあまり報告が見受けられず、2種類の温度で焼入れた軸受鋼 (SAE 52100) の純転がり摩擦力の違いの原因を残留オーステナイト量のみに帰せしめた Drutowski ら²⁾ の研究が見受けられる程度である。

2. 焼入温度と純転がり摩擦力の関係

840°Cで焼入れた場合の第3報の結果¹⁾を参考にし、焼戻し温度を硬さが大きいにもかかわらず純転がり摩擦力が比較的大きい150°Cと純転がり摩擦力が最小になる300°Cの2種類に選び、790~890°Cの温度で焼入れた試料について、硬さ、残留オーステナイト量および純転がり摩擦力を測定し、焼入温度とそれらの関係を調べた。

2.1 実験

2.1.1 試料

平板試料は市販のSUJ2丸棒素材から削り出し、上中下3個の平板試料を2組作製して実験に供した。それらの化学成分を表1に示す。球状化焼きなまし処理と表面仕上は第3報と同じ方法で行い、熱処理条件および硬さは表2に示す。

鋼球試料は市販の精密級SUJ2鋼球の直径10mmのものを用いた。

2.1.2 実験方法

純転がり摩擦力 f の測定は第1報³⁾で詳しく述べているように、往復時の転がり抵抗 F_{fore} , F_{back} を求め、

$$f = \frac{1}{4} |F_{back} - F_{fore}| \quad (1)$$

より1接触点の純転がり摩擦力 f を求める。

垂直荷重の負荷方法、転がり速度および潤滑は第3報

図1 純転がり摩擦力と焼入温度の関係 (150°C 焼戻し)

図2 硬さ、残留オーステナイト量および残存炭化物量と焼入温度の関係 (150°C 焼戻し)

と同様である。各荷重に対する10往復目の値を同一熱処理の2組について3か所ずつ6か所測定し、それらの平均値を測定値とした。各温度で焼入れた平板試料の純転がり摩擦力 $f_{p(t)}$ は、鋼球試料のそれを f_0 として

$$f_{p(t)} = 2f - f_0 \quad (2)$$

で求められる。ここで、 f_0 の値は840°C焼入れ、150°C焼戻しをした試料の実験値¹⁾を用いる。以下で示される純転がり摩擦力はすべて式(2)で得られた $f_{p(t)}$ である。

平板試料中の残留オーステナイト量はX線回折法により定量⁴⁾し、第3報で述べたように表面から約50μm内部での値を用いた。また、残存炭化物量は表面について5000倍のレプリカ電顕写真より求めた。

2.2 実験結果および考察

図1は焼入温度による純転がり摩擦力の変化の様子を示すために、横軸に焼入温度をとってHertz接触圧力 q_0 をパラメータとして、150°C焼戻し試料について純転がり摩擦力を示したものである。また、図2は同じ試料の硬さ、残留オーステナイト量および残存炭化物量と焼入温度の関係を示したものである。図1で示したように150°C焼戻しの場合、焼入温度が790°Cより高くなる

図3 純転がり摩擦力と焼入温度の関係 (300°C 焼戻し)

に従って純転がり摩擦力は一度減少して810°C焼入れで最小値となり、810°C以上になると焼入温度と共に単調に増加する。

この810°C以上の純転がり摩擦力の増加は、図2で残留オーステナイト量が焼入温度と共に増加していることから、第3報で述べた高降伏点の基地マルテンサイト間に低降伏点の残留オーステナイトが混在している複合材の微視的非弾性変形によるエネルギー損失*によって、残留オーステナイト量の増加と共に純転がり摩擦力が増加しているように思われる。

しかし、この考え方では790°C焼入れのものは810°Cのものに比べて残留オーステナイト量が少ないにかかわらず純転がり摩擦力が大きいことを説明できない。したがって、これを説明するには、焼入鋼の性質を大きく支配すると思われるマルテンサイト中の固溶炭素量と純転がり摩擦力の関係を調べる必要がある。そこで、上述の現象については次節でマルテンサイト中の固溶炭素量の純転がり摩擦力に対する影響を知った上で考察する。

図3に300°C焼戻し材の焼入温度と純転がり摩擦力の関係を示す。この場合には、純転がり摩擦力が焼入温度にかかわらず大体一定値となり、値も830°C焼入れ、150°C焼戻しの場合の1/3以下となる。

このような現象が生じる原因については現在まだ明確に心得ていないが、300°Cで焼戻しをすると、残留オーステナイトはすべて分解消失し、基地マルテンサイト中の固溶炭素も析出成長して羽毛状のセメンタイト⁵⁾になった焼戻しトルースタイトに近い状態になっている。そして、そのセメンタイトの大きさおよび分布は転位を固着するのに適したものになっているため、非常に小さい

* 臨界応力の低い残留オーステナイト中では転位は容易に移動するが、すぐにマルテンサイトとの境界で阻止され、全体としての変形はほぼマルテンサイトの弾性変形に支配されながら、残留オーステナイト内では転位の移動により微小な塑性変形が生じてエネルギー損失が起こる。

表3 炭素量調整平板試料の化学成分 (wt%)

試料記号	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu
C1	0.32	0.20	0.49	0.016	0.007	0.05	1.35	0.19
C2	0.42	0.25	0.49	0.017	0.008	0.05	1.35	0.19
C3	0.49	0.20	0.41	0.016	0.007	0.05	1.33	0.19
C4	0.59	0.22	0.49	0.016	0.007	0.05	1.33	0.18
C5	0.71	0.26	0.46	0.018	0.009	0.05	1.37	0.18

表4 炭素量調整平板試料の熱処理条件

試料記号	焼入条件 (水焼入れ→油冷)	放置時間 (min)	サブゼロ処理 (-78°C)	焼戻し条件	硬さ Hv200
C1	890°C, 30 min	—	—	150°C 1 h	560
C2	870°C, 30 min	—	—		650
C3	870°C, 30 min	30	1 h × 1 回		710
C4	880°C, 30 min	30	1 h × 2 回		770
C5	900°C, 30 min	15	1 h × 3 回		830

純転がり摩擦力を示し、しかも、この組織が焼入温度により余り変化しないので図3のような現象を示すものと推察される。

3. 固溶炭素量と純転がり摩擦力の関係

マルテンサイト中の固溶炭素量と純転がり摩擦力の関係をみるために、炭素量以外はSUJ2と同じで炭素量のみを変えた試料を特別に作製し、炭素をすべて固溶させた基地鋼にサブゼロ処理を施すことによって残留オーステナイト量を大体一定に調整した試料について純転がり摩擦力を測定した。この方法により残存炭化物の影響がない状態での固溶炭素量と純転がり摩擦力の関係を調べることができる。

3.1 実験

用いた平板試料の化学成分を表3に、熱処理条件を表4に示す。各試料のオーステナイト化温度は予備実験で残存炭化物が完全に消え始める温度を確認して決定した。残留オーステナイト量および純転がり摩擦力の測定法は2.1.2項で述べた方法と同じである。

3.2 実験結果および考察

図4は固溶炭素量による硬さおよび残留オーステナイト量の変化を示したものである。サブゼロ処理をせず焼入れしたままの場合は、破線で示すように炭素量が多くなると急激に残留オーステナイト量が多くなるが、サブゼロ処理により炭素量によるその変動がかなり小さく押さえられている。図5は固溶炭素量による純転がり摩擦力の変化の様子をHertz接触圧力 q_0 をパラメータとして示したものである。炭素量0.42~0.59%材の純転がり摩擦力は大体同じ値を示すのに対して、炭素量0.32%材のそれは跳び抜けて大きく、炭素量0.71%材のそれ

図4 硬さおよび残留オーステナイト量と固溶炭素量の関係

図5 純転がり摩擦力と固溶炭素量の関係

はわずかに大きくなっている。炭素量 0.32% 材は残留オーステナイト量が最少であるにもかかわらず純転がり摩擦力が最大となっているが、これは硬さが小さいことから分かるように基地マルテンサイトの降伏点の低下によることは明らかである。炭素量 0.71% 材での増加は残留オーステナイト量が炭素量 0.59% 材のそれより約 3% 多くなっていることによるものと思われる。そこで、残留オーステナイト量が炭素量 0.59% 材のそれと同量になった場合の純転がり摩擦力を第 3 報¹⁾で述べた純転がり摩擦力と残留オーステナイト量の関係を使って $q_0 = 2.45 \text{ GPa}$ の場合の値を推定してみると約 2.5 mN となり、炭素量 0.59% 材の値とほとんど同じ値となる*。したがって、本実験の場合基地マルテンサイト中の炭素濃度が 0.42% 以上になれば、その弾性的性質は大体一定になるものと考えられる。

仕率⁹⁾の分析結果⁹⁾(焼入温度 810°C で固溶炭素量 0.39%, 830°C で 0.54%) を参考にして図 2 の残存炭化

物量を用いて推定すると、図 1 の焼入温度 790°C の場合の基地マルテンサイト中の炭素濃度は約 0.33% となる。このことから、図 1 において 790°C 焼入れの場合残留オーステナイト量が減少しているにもかかわらず純転がり摩擦力が大きくなるのは、図 5 の場合と同様残留オーステナイト量の減少による効果よりも基地中の炭素量の減少による非弾性効果の方が大きいことによると考えられる。すなわち、この場合基地はほぼ低炭素マルテンサイトと炭化物になっており⁶⁾⁷⁾、固溶炭素量の多い材料程炭化物が密に析出している。したがって、固溶炭素量が減少して炭化物の分布が疎になれば転位の平均移動距離が長くなり、微視的非弾性ひいては純転がり摩擦力が増加することは容易に推察できる。また、図 5 で固溶炭素量が 0.42% 以上になると純転がり摩擦力がほぼ一定になる——この原因については本研究では明確にし得なかったが——ことから、図 1 の焼入温度が 810°C 以上になると純転がり摩擦力が単調に増加する現象がほとんど残留オーステナイト量の増加のみに対応づけられることもうなずける。

ここで一つの問題が提起される。それは SUJ 2 の 790°C 焼入れの場合硬さが Hv 730 であるが、ほぼ同じ 0.3% の炭素濃度であると思われる炭素量調整基地鋼の場合硬さが Hv 560 で、両者の間にかなり差があることである。

これは SUJ 2 の場合、多量に分布している残存炭化物が巨視的な塑性流れ、すなわち広範囲にわたる転位の移動を阻止するので、大きな塑性ひずみを与えた時の抵抗を表す Hv が大きくなるものと思われる。これに対して純転がり摩擦力は低ひずみ域での微視的非弾性の現象であり、基地マルテンサイト中の狭い範囲の転位の移動が問題になる。したがって、純転がり摩擦力について論ずる上では基地中の固溶炭素量が等しければ残存炭化物を含む SUJ 2 と炭素量調整基地鋼とはほぼ同等の性質を持つものと考えてよい。

上記の理由から、図 2 において焼入温度が 790~830°C の範囲では硬さが焼入温度と共に単調に増加しているにもかかわらず図 1 の純転がり摩擦力が 810°C で極小値を持つ非単調な変化を示すが、これは結局 SUJ 2 の一定ひずみを生ずる応力、すなわち耐力の焼入温度に対する変化の様相が、問題にするひずみの大きさによって異なることに起因すると思われるので、材料試験をして種々なひずみに対する耐力を調べることによって上記の所論を確かめることができる。

4. 圧縮試験における低ひずみ域耐力との対応

上述の所論を確かめ、また転がり摩擦現象の非弾性挙

* 第 3 報の図 5 の純転がり摩擦力の値は式 (1) による。

図6 圧縮試験片

図7 圧縮試験ジグ

動と材料試験における非弾性挙動の関連性を調べるために、前節までの実験に用いたのとはほぼ同様な組織の材料について、ごく微小な永久ひずみに対する耐力を測定した。なお、この実験は材料が低温焼戻し材であるため、引張試験で行うとぜい性破壊をして十分な情報が得られないので圧縮試験で行った。

4.1 実験

万能材料試験機((株)東京衡機製造所製, RU型, 30 tf)を用いて非常に高硬度の試料の圧縮試験を行うために、試験機の横方向剛性、試験機の上座、下座の平行度、試験片の両端部平行度、座の局部的変形等を考慮して、図6、図7に示すような試験片形状およびジグを用いた。試験片は旋盤加工、熱処理の後研削して所定の寸法に仕上げた。特に両端部の平行度およびR部の加工には留意した。熱処理は表2と大体同じであるが、寸法の関係からオーステナイト化保持時間を30 minとした。ひずみの検出は長さ2 mmのひずみゲージ2個をアクティブゲージとして用いて行い、実験は圧縮応力が98 MPa {10 kgf/mm²}おきになるように順次圧縮荷重を増加してゆき、荷重を除荷したときの残留ひずみを測定した。そして、同一熱処理試料3個の平均値を測定値とした。

4.2 実験結果および考察

加えた圧縮応力とこれを除荷したときに生ずる残留永久ひずみの関係を各試料について求め、この結果から一定永久ひずみを生ずる応力値曲線を作成し、横軸に焼戻し温度をとって150°C焼戻しの場合を図8に、300°C焼戻しの場合を図9に示す。これらの図には、転がり変形を受けているときの応力状態と圧縮試験における応力を比較するために、あるHertz接触圧力で球を平面に押し付けたとき平面内部に生ずる最大せん断応力の値⁶⁾と単

図8 低ひずみ域耐力と焼戻し温度の関係(150°C焼戻し)

図9 低ひずみ域耐力と焼戻し温度の関係(300°C焼戻し)

軸圧縮応力における最大せん断応力の値が等しくなるような等価Hertz圧力も縦軸に示してある。

図8をみると、前節で予想した通り150°C焼戻し材ではひずみ量によって耐力の焼戻し温度に対する傾向がかなり異なり、本研究で問題にしている荷重条件(Hertz接触圧力 ≤ 2.45 GPa)に対応する低ひずみ域では810°C焼入れ材が優れた弾性の性質を示し、焼戻し温度が850°C以上になると耐力が低下する。また、永久ひずみ量が大きくなるに従って高温側での耐力が大きくなっており、更に永久ひずみ量が大きくなるとグラフの形は硬さ曲線に順次近づく。

等価Hertz圧力を用いると、あるHertz接触圧力で転がっているときに最大せん断応力の作用している場所の応力状態を単軸圧縮応力状態に置き換えて考えることができ、その応力状態でどれだけの塑性ひずみを生ずるか、すなわち非弾性の性質の大きさがどの程度であるかが読み取れる。例えば、図8において等価Hertz圧力が2.45 GPaに対する圧縮応力は1.54 GPaであり、この時の等価永久ひずみ量 ϵ_p は790°C焼入れ材で約 $\epsilon_p=130$

図10 一定応力に対する永久ひずみ量 (150°C 焼戻し)

$\times 10^{-6}$ のように概算できる。このようにして求めた等価永久ひずみ量を片対数グラフの対数軸に、焼入温度を横軸にとって 150°C 焼戻しの場合について示したのが図10である。この図の曲線と図1の Hertz 接触圧力 2.45 GPa の場合の曲線が定性的によく対応しており、低ひずみ域の圧縮試験の非弾性と純転がり摩擦力の間に密接な関係があることを示している。しかし、非常に大きなひずみに対する耐力に相当する硬さと Hertz 接触圧力 2.45 GPa までの純転がり摩擦力とは何ら関係がなく、硬さが純転がり摩擦力と関係を持ち始めるのは、図8から推定すると Hertz 接触圧力が 4.5 GPa 以上の初期転がりですぐ塑性薄のできるような大きな接触圧力の時であると思われる。ちなみに Hertz 接触圧力 2.45 GPa の場合、顕微干涉計を用いても検出困難な程度にしか転がり薄は生じない。

焼戻し温度が 300°C の場合、図9に示すように図3に対応して低ひずみ域耐力は高い値を示し、しかも大体一定となる。

5. 結 論

軸受鋼 SUJ2 は主として寿命上の観点から、一般に 830~840°C で焼入れし、150°C 付近で焼戻しをして用いられている。しかしこの熱処理組織では純転がり摩擦力は比較的大きく、同じ焼入温度の場合 300°C で焼戻すと純転がり摩擦力が極小になる。本研究では SUJ2 の焼戻し温度を上記 150°C と 300°C に定め、焼入温度を 790~890°C の範囲で変え、それに対する純転がり摩擦力の変化を調べた。そして、その変化の生じる原因について、炭素量を調整した基地鋼での固溶炭素量の変化に対する純転がり摩擦力の挙動および焼入れした SUJ2 の圧縮試験から得た焼入温度変化に対する低ひずみ域耐力の実験結果などを参考にして考察した。

- (1) 150°C 焼戻し材の場合、Hertz 接触圧力が 2.5 GPa 程度以下の負荷範囲では純転がり摩擦力は材料の硬さに無関係に 810°C 焼入れの場合最小になり、それ以上の焼入温度の場合は焼入温度と共に単調に増加

する。

- (2) 150°C 焼戻し材の場合、焼入温度に対する定ひずみ耐力の挙動はその定ひずみの大きさによりかなり大きく変化し、Hertz 接触圧力が 2.5 GPa 程度までの負荷範囲での焼入温度に対する純転がり摩擦力の変化の傾向は 1000×10^{-6} 程度までの低ひずみ域耐力の焼入温度に対する変化の傾向と定性的によく対応する。

- (3) 上記 (1), (2) の現象は、(i) 高降伏点のマルテンサイトの中に少量混在する低降伏点の残留オーステナイトの微視的非弾性効果、(ii) 基地マルテンサイト中の固溶炭素量とその弾性的性質に及ぼす効果、(iii) 残存炭化物の巨視的塑性変形を抑制する効果、などを考えればよく説明できる。

- (4) 300°C 焼戻し材の場合、純転がり摩擦力は焼入温度にかかわらずほぼ一定で、その大きさは 830°C 焼入れ、150°C 焼戻し材のその 1/3 以下である。このことは、300°C で焼戻しをすると焼入温度にかかわらず残留オーステナイトは分解消失して、基地マルテンサイト中の固溶炭素も析出成長し羽毛状のセメントナイトになっており、この組織が良好な弾性的性質を持つことによるとと思われる。

おわりに炭素量を変えた試料を提供していただいた愛知製鋼(株)・山本俊郎氏ならびに試料の熱処理で協力していただいた日立金属(株)安来工場・奥野利夫氏にお礼を申し上げます。また、実験に協力された松江工業高専の昭和48年度卒業生、加藤幸雄、原田厚己、福田正人および昭和52年度卒業生、岡良美、小島律昭、佐渡晃敏の各氏に謝意を表する。

文 献

- 1) 渡部紘一, 川口 格: ころがり摩擦の研究 (第3報), 精密機械, **43**, 10 (1977) 1218.
- 2) R.C. Drutowski and E.B. Mikus: The Effect of Ball Bearing Steel Structure on Rolling Friction and Contact Plastic Deformation, Trans. ASME, Ser.D, **82**, (1960) 302.
- 3) 渡部紘一, 川口 格: ころがり摩擦の研究 (第1報), 精密機械, **42**, 11 (1976) 1056.
- 4) B.L. Averbach and M. Cohen: X-Ray Determination of Retained Austenite by Integrated Intensities, Trans. AIME, **176**, (1948) 401.
- 5) 仕幸三郎, 岡本一生, 渡辺章三: 軸受鋼の寿命におよぼす熱処理組織の影響, 鉄と鋼, **54** (1968) 1353.
- 6) G. Kurdjumov and L. Lyssak: The Application of Single Crystals to the Study of Tempered Martensite, J. Iron Steel Inst., **156**, (1947) 29.
- 7) A.S. Kenneford and T. Williams: Effect of Some Common Alloying Elements on the Breakdown of Martensite in a W.Q. 0.35% Carbon Steel, J. Iron Steel Inst., **185**, (1957) 467.
- 8) 例えば, S. Timoshenko and J.N. Goodier: Theory of Elasticity, 2nd ed., McGraw-Hill, New York, N.Y., (1951) 372.