ころがり摩擦の研究 (第3報)*

—軸受鋼の焼もどしによる組織変化と純ころがり摩擦力の関係—

渡部 紘一** 川口 格***

A Study on Rolling Friction (3rd Report)

—The Effect of Tempered Structure on the Pure Rolling Friction of Ball Bearing Steel—

Kouichi WATANABE, Itaru KAWAGUCHI

In order to examine whether the hysteresis loss hypothesis can be applied to the rolling friction of the tempered ball bearing steel, the effect of the tempered structure of SUJ 2 on the pure rolling friction and the yield behavior at low strain values are experimentally studied. The pure rolling friction varies with the tempered structure and corresponds with the yield behavior, and it is nearly proportional to the amount of retained austenite if the property of martensite remains constant. From these results, it is confirmed that the pure rolling friction results from the hysteresis loss of the material even if its metallurgical structure is varied by tempering. On tempering at the temperature lower than 300°C, the pure rolling friction is caused by micro-plasticity of the mixed phase structure consisting of martensite with high yield stress and retained austenite with low yield stress, while it is caused by the plastic flow of martensite with low yield stress on tempering at the temperature higher than 300°C.

1. 緒 言

前二報¹⁾²⁾では弾性履歴損失説に立脚して、力学的見地から金属のころがり摩擦の発生機構について考察してきたが、本報では金属組織の変化に従うころがり摩擦力の挙動に履歴損失説が適合するか否かを調べるために、焼入れ軸受鋼 (SUJ 2) の焼もどし条件の変化に伴う組織変化と純ころがり摩擦力の挙動の関係を調べた。

金属組織の変化によるころがり摩擦力の挙動については吉田³⁾が焼入れ炭素工具鋼 (SK 7) の焼もどし温度変化でころがり摩擦力が変化することを指摘しており、また Drutowski ら⁴⁾は軸受鋼 (SAE 52100) について焼入れ、焼もどし両方の条件を変えて4種の組織を作り、それについてころがり摩擦力を調べ、純ころがり摩擦力は試料の残留オーステナイト量と一定の関係を持つが、弾性限度とは相関のないことを述べている。

本研究の焼もどし条件変化の実験でも残留オーステナイト量と純ころがり摩擦力の間に相関関係を認めたが、これらの実験結果では基地マルテンサイトの影響と残留

オーステナイトの影響の2因子が共存して現れ、残留オーステナイト量のみの影響が明らかでない。そのために同じ焼入れ処理をした材料を種々の条件でサブゼロ処理を行って、基地マルテンサイトの性質を一定に保ち残留オーステナイト量のみを変えた場合の純ころがり摩擦力の挙動を調べた。一方、ころがり摩擦力の起因が履歴損失であるかぎり、組織変化の純ころがり摩擦力に及ぼす影響に対応する現象が引張試験でも現れるはずであると考へて、上記の実験と同じ組織の試料について引張試験を行って低ひずみ領域における非弾性挙動を調べた。

2. 焼もどし温度と純ころがり摩擦力の関係

一定温度で焼入れした後、種々の温度で焼もどした試料について、かたさ、残留オーステナイト量および純ころがり摩擦力を測定し、焼もどし温度とそれらの関係を調べた。

2.1 実 験

2.1.1 試 料

使用した平板試料は球状化処理をした SUJ 2 の材料を平面研削、応力除去処理の後、表1に示すような熱処理を行い、更にラッピング、バフ仕上を行ったもので、表面は表面粗さが約 $R_a = 0.03 \mu\text{m}$ 程度の鏡面であり、かたさも表に示したような値を持っている。

なお、焼入れ前の球状化炭化物の大きさが異なると、

* 原稿受付 昭和52年5月11日。昭和47年度精機学会秋季大会学術講演会 (昭和47年10月9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 平板試料の熱処理条件

焼入れ条件	焼もどし条件	かたさ Hv200
840°C	150°C, 1 h	825
45 min	200°C	753
油焼入れ	250°C	710
	300°C	665
	350°C	615
	400°C	555
	450°C	515
	500°C	459

同じ焼入れをした試料でも基底への炭素の溶け込み量が異なり、純ころがり摩擦力がわずかに異なることが確認されたので、球状化処理条件は炭化物の平均粒径が約 $0.4 \mu\text{m}$ となるように定めた。また、焼入れ後の残存炭化物量は5000倍の電子顕微鏡写真から約6.3%と求められた。

鋼球試料は全実験を通じて市販精密級のSUJ2鋼球の直径10mmのものを用いた。

2.1.2 実験方法

1) 純ころがり摩擦力の測定

純ころがり摩擦力 f の測定は第1報¹⁾で詳しく述べているように、上中下3個の平板試料の間に2個の鋼球試料をセットし垂直荷重を加えた後、中間平板試料を往復運動させて往復時のころがり抵抗 F_{fore} , F_{back} を求め

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

より1接触点当たりの純ころがり摩擦力 f を分離する。

実験は一定荷重で10往復ころがした後、荷重を順次追加していくという方法でHertz接触圧力が150~250 kg/mm²の範囲で25 kg/mm²おきになるような荷重段階とし、ころがり速度は0.05 mm/sで4mmの距離をころがして測定した。試料はベンゼンとアセトンで洗浄したものを乾燥したのみで潤滑は行っていない。このようにして各荷重に対して10往復目の値を、別に入手した素材で作成した2組の同一熱処理条件の試料について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。

なお、式(1)で求められた f は平板試料の純ころがり摩擦力 f_p と鋼球試料の純ころがり摩擦力 f_b の和の1/2であるから、各温度で焼もどされた平板試料の純ころがり摩擦力 $f_{p(t)}$ は

$$f_{p(t)} = 2 \left(f - \frac{1}{2} f_b \right) \quad (2)$$

で求められる。ここで鋼球は150°C焼もどしと考えられるので、 f_b の値は150°C焼もどし平板試料の純ころ

図1 残留オーステナイト量の分布

図2 純ころがり摩擦力と焼もどし温度の関係

がり摩擦力を用いる。以下で示される純ころがり摩擦力はすべて式(2)で得られた $f_{p(t)}$ である。

2) 残留オーステナイト量の測定

残留オーステナイト量はX線回折法により定量した³⁾。なお、予備実験として電解研磨で表面を除去しながら残留オーステナイト量の変化の様子を調べたところ、図1のように変化していることがわかったので、以後の残留オーステナイト量はすべて平板試料表面から約50 μm 程度除去した後測定した値を用いた。

2.2 実験結果および考察

図2は焼もどし温度による純ころがり摩擦力の変化の様子を示すために、横軸に焼もどし温度をとって各Hertz接触圧力ごとに示したものである。図3は同様に焼もどし温度を横軸にとって各試料の焼もどし温度とかたさ、残留オーステナイト量の関係を示したものである。図2で示したように試料のオーステナイト化温度が同一であ

図3 かたさおよび残留オーステナイト量と焼もどし温度の関係

る場合、純ころがり摩擦力は焼もどし条件によって大きく変わり、焼もどし温度を150°Cから増加させると純ころがり摩擦力は減少し300°C焼もどし付近で極小を示し、常用されている150°C焼もどし材の値の約1/3の値となる。更に焼もどし温度を増加していくと今度は逆に純ころがり摩擦力は増加に転ずる。また、球状化処理時の炭化物粒度の大きさの影響がでるのは250°C以下の焼もどしの場合であり、300°C以上の焼もどしの場合には炭化物粒度の大きさの影響がほとんどなくなることも確かめられたが、前述のように炭化物粒度の大きさをできるだけそろえたので、どの焼もどし温度でも素材が異なることで純ころがり摩擦力が大きく異なることはなかった。

図2から300°Cを境として、それ以下の温度で焼もどした低温焼もどし材とそれ以上の温度で焼もどした高温焼もどし材では焼もどしによる組織変化のため純ころがり摩擦力の発生機構が異なっていることが推察できる。このことは次に述べる2事実からも明らかである。すなわち、図2に示した純ころがり摩擦力のうち300°Cと両端の150°Cおよび500°Cでの焼もどし試料について純ころがり摩擦力と荷重の関係を両対数グラフに示してみると図4のごとくなる。これよりわかるように150°Cおよび300°C焼もどし試料のグラフの勾配は大体11/6であるのに対し、500°C焼もどし試料の勾配は4以上であり、グラフの傾向がはっきり異なっている。

このような差異は鋼球が転動した後の平板上の軌道溝でも認められ、Hertz 接触圧力が250 kg/mm²以下において焼もどし温度が350°C以下の試料ではまだ軌道溝が認められないのに対し、400°C、450°Cおよび500°C焼も

図4 純ころがり摩擦力と垂直荷重の関係
(f の値は式(1)による)

どし試料ではそれぞれHertz 接触圧力が250 kg/mm²、225 kg/mm²および200 kg/mm²で肉視できる軌道溝が形成される。このことは、Hertz 接触圧力が定まるとそれに従ってあるかたさ以下の組織では塑性流れを起こし、これに要する仕事は純ころがり摩擦力となっていると考えられる。

上記したような事実、焼もどし温度300°C以上では図2のかたさ減少と純ころがり摩擦力の上昇が対応することおよび300°C以上では残留オーステナイトが分解消失してしまっていることなどを総合すると、高温焼もどし材の純ころがり摩擦力の増加はマルテンサイト基地中の固溶炭素の析出による降伏点の降下によるものと考えればよく理解できる、しかし300°C以下の低温焼もどし材については、焼もどし温度の上昇と共にかたさが下降することにもかかわらず純ころがり摩擦力が減少していることから上記の考え方では説明がつかず、図3に示したような低温焼もどし材のみに存在する残留オーステナイト量に支配されることが明らかである。焼もどし温度を150°Cより上げてゆくと、残留オーステナイトがフェライトと炭化物に分解してゆくと同時に基地の固溶炭素濃度が減少してゆき析出炭化物の状態も異なっている。それ故、図2の300°C以下の焼もどし温度における純ころがり摩擦力の挙動は上記のような2因子の影響を受けており、図2からは残留オーステナイト単体の量と純ころがり摩擦力の大きさの関係が明りょうでなく、この関係を知るためには何らかの方法で残留オーステナイト量のみを変化させた実験を行う必要がある。

表2 平板試料のサブゼロ処理条件

焼入れ条件	放置時間	サブゼロ処理 (-78°C)	焼もどし条件	i_R 量 (%)
840 $^{\circ}\text{C}$, 1 h	15 min	1 h $\times$ 3 回		5.5
↓	1 h	1 h $\times$ 1 回	150 $^{\circ}\text{C}$	7.0
200 $^{\circ}\text{C}$, 30 s	2 h	30 min $\times$ 1 回	1 h	10.5
↓	—	—		15.0
AC

図5 純ころがり摩擦力と残留オーステナイト量の関係

3. 残留オーステナイト量と純ころがり摩擦力の関係

前節での考察に従って、焼入れマルテンサイト基地中の固溶炭素量、残存炭化物量を一定に保って残留オーステナイト量のみを変化させた試料を得るには、一定オーステナイト化温度から焼入れた後種々の条件でサブゼロ処理を行う方法が適している。そこでこの方法により残留オーステナイト量を変えた試料を作成して、残留オーステナイト単体量と純ころがり摩擦力の関係を調べた。

3.1 実験

用いた平板試料のサブゼロ処理条件を表2に示す。サブゼロ処理はメチルアルコールとドライアイスを用いて -78°C の温度で行った。表2に示した残留オーステナイト量および純ころがり摩擦力の測定法は2.1.2節に述べた方法と同じである。

3.2 実験結果および考察

図5に残留オーステナイト量と純ころがり摩擦力の関係を示す。これより純ころがり摩擦力は残留オーステナイト量に大体比例して値が大きくなることがわかる。残留オーステナイトは塑性変形しやすく、この量が多いということは機械的強度を支配するマルテンサイトの量が少ないことであるので、上記の挙動は良く理解できる。

4. 引張試験における低ひずみ耐力との対応

ころがり摩擦力の起因が材料の変形履歴損失であると考え、以上、上述してきた組織変化と純ころがり摩擦力の間に相当する関係が組織変化と引張試験結果の間にも現れるはずである。これを実証するために、前節までの実験に用いられたとほぼ同様な組織の試料に対して引張試験を行い、ごく微小な永久ひずみに対する耐力を測定し、それと試料の焼もどし温度、残留オーステナイト量などの関係を調べた。

なお、この実験に先だてころがり実験の各平板試料の表面の残留応力を調べ、それと純ころがり摩擦力の関係について考察すると共に、比較的表面に近いところの現象である純ころがり摩擦力の挙動と母材全体の現象である引張試験における挙動を比較的に論ずることの可否を検討した。

4.1 実験

4.1.1 残留応力の測定

ころがり実験用の各平板試料の残留応力はX線回折法により測定した⁶⁾。また、試料内部の残留応力は測定面を順次電解研磨により削り取って測定した。

4.1.2 引張試験

純ころがり摩擦力の測定に供した各試料の非弾性的特性を確認するために、平板試料とほぼ同じ熱処理を行った引張試験試料を作成し、万能材料試験機による引張試験を行った。仕上は切欠効果による応力集中を避けるため特に注意し、研削した試料を熱処理の後#800のエメリーペーパーで研磨仕上とした。また、熱処理ひずみによる試料の曲がりの影響を少なくするために、試料の両端を鎖で保持して引張荷重をかけ、曲がりの内側と外側にひずみゲージをはりつけてアクティブゲージとしひずみを検出した。測定は引張応力が 10 kg/mm^2 おきになるように順次引張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、同一熱処理試料2個の値の平均値を測定値とした。

4.2 実験結果および考察

4.2.1 平板試料の残留応力

平板試料の表面を順次電解研磨により削り取った場合にその面に存在する残留応力の値を 150°C 焼もどし試料を例にとって図6に示す。ごく表層部にはラッピング応力が認められ、やや深層部には熱処理応力が認められる。表面および $50 \mu\text{m}$ 内部の残留応力が焼もどし温度で変化する様子を図7に示す。焼もどし温度による残留応力の変化は内部より表面の方が大きく、ラッピングによって生ずる応力は焼もどし温度の低い試料で急に大き

図6 残留応力分布

図7 残留応力と焼もどし温度の関係

図8 接触点下深さ方向の応力分布

くなっている。

純ころがり摩擦力は第2報²⁾の結果から、接触円半径を a とすると接触面下 $0.48a$ 付近の要素が最大の損失を起こし、大体深さ $2.4a$ あたりまでの要素の損失が支配的であることがわかっている。今 Hertz 接触圧力が $150 \sim 250 \text{ kg/mm}^2$ の場合のころがりを考えてみると、接触円半径 a は $102 \sim 170 \mu\text{m}$ となるので深さ $48 \sim 80 \mu\text{m}$

図9 低ひずみ耐力と焼もどし温度の関係

図10 低ひずみ耐力と残留オーステナイト量の関係

付近の材料で最大の損失を発生し、深さ $245 \sim 408 \mu\text{m}$ あたりまでの材料の損失が支配的となることになる。したがって、極低荷重域以外では表面の効果は小さくかなり深層部の影響が大であるので、もし残留応力の影響があるとなれば熱処理応力の影響が主となる。図7より熱処理応力は低温焼もどし試料で大きく高温焼もどしではほとんど0であるので、熱処理応力が低温焼もどし材の純ころがり摩擦力に影響を及ぼす可能性が考えられるが、接触点下深さ方向の応力分布⁷⁾は、例えば Hertz 接触圧力が 200 kg/mm^2 の場合、図8となり、残留応力を考慮したときの最大せん断応力の値に与える残留応力 $\sigma'_x = \sigma'_y \approx 12 \text{ kg/mm}^2$, $\sigma'_z \approx 0$ の影響は上述の位置では大きく

4.2.2 引張試験結果

ここで、ころがり変形を受けているときの応力状態と引張試験における応力とを比較するために、ある Hertz 接触圧力で球を平面に押付けたとき平面内部に生ずる最大せん断応力の値⁹⁾と単軸引張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せん断 Hertz 接触圧力を図 9 に示す。そうすると、ある Hertz 接触圧力でころ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引張応力状態に置き換えて考えるこ

ふ ま と め

以上述べたことから次のことが結論づけられる.

- (1) 焼もどし温度を変えた試料に対する純ころがり摩擦力の挙動と引張試験の低ひずみ耐力の挙動がよく対応し、組織的な面からも純ころがり摩擦力が材料の変形履歴に起因することが裏づけられた。
- (2) SUJ 2 鋼の熱処理において焼入れ条件を一定に保ち焼もどし温度を上昇させていくと、純ころがり摩擦力は焼もどし温度 300℃ までは減少し、それ以上の温度では増加する。
- (3) 上記の高温焼もどし材の現象は、純ころがり摩擦力が基地の降伏による巨視的な塑性変形に起因すると考えればよく説明できる。

- (4) 低温焼もどし材に対する純ころがり摩擦力の挙動は, 降伏点の高い基地マルテンサイトと微量含まれる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よく説明できる.
- (5) したがって, 低温焼もどし材の純ころがり摩擦力の挙動は基地マルテンサイトの強度と残留オーステナイト量に支配されるが, 一定オーステナイト化温度から焼入れて前者を一定に保つと, 純ころがり摩擦力はほぼ後者, すなわち残留オーステナイト量に比例して変化する.

おわりに平板試料の熱処理 および X 線回折装置で協力していただいた日立金属(株)安来工場・奥野利夫氏ならびに実験に協力された 松江工業高専の 昭和 47 年度卒 研 生, 岩崎竜夫, 辻勝義, 藤原正治および昭和 51 年度 卒 研 生, 周藤精一, 高野義人, 宮口文夫の各氏にお礼を 申し上げます.

文 献

- 1) 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.
- 2) 渡部紘一, 川口 格: ころがり摩擦の研究 (第 2 報), 精 密機械, **43**, 7 (1977) 843.
- 3) 吉田 享: 自由転がり摩擦, 精密機械, **27**, 7 (1961) 468.
- 4) 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.
- 5) B. L. Averbach and M. Cohen: X-Ray Determination of Retained Austenite by Integrated Intensities, Trans. AIME, **176**, (1948) 401.
- 6) D. P. Koistinen and R. E. Marburger: A Simplified Procedure for Calculating Measurements on Hardened Steel, Trans. ASM, **51**, (1959) 537.
- 7) M. T. Huber: Zur Theorie der Berührung Fester elastischer Körper, Ann. Phys., **14**, (1904) 153.
- 8) 例えば, S. Timoshenko and J. N. Goodier: Theory of Elasticity, 2nd ed., McGraw-Hill, New York, (1951) 372.
- 9) 矢島悦次郎, 宮崎 享, 杉山敏彦, 寺島博夫: 軸受鋼の疲労寿命に対する組織学的考察および残留オーステナイトの影響, 日本金属学会誌, **36**, 7 (1972) 711.

情 報

文部省科学研究費交付先決定 (前号よりのつづき)
〔試験研究〕(単位: 万円)

▽突風相似気流を風洞内に発生 (九大・河島佑男) 230, ▽鋼材の破壊靱性試験法 (東北大・川崎正) 270, ▽摩擦試験方式と耐摩耗性評価 (京大・遠藤吉郎) 290, ▽実働荷重下の疲れき裂伝播寿命予測のためのシミュレーションプログラム (阪大・城野政弘) 250, ▽三次元立体構造の汎用非弾性解析プログラム (東大生研・山田嘉昭) 290, ▽マイコン利用実働荷重試験システムの開発とデータ集積 (同工・岡村弘之) 50, ▽圧力容器の保守基準 (東工大・中沢一) 290, ▽自由曲面の形状・および表面の自動測定 (北大・斉藤 勝政) 290, ▽ロール・スリッタ (東大・前田禎三) 250, ▽と石面性状測定器 (東工大・臼井英治) 250, ▽超音波式骨ざい内釘打込器 (同・黒崎 晏夫) 200, ▽精密円筒形状部品の総合精度評価システム (同・阿武芳朗) 260, ▽金属粉末と焼結体の成形条件の最適化 (京大・大矢根守哉) 260, ▽冷間鍛造金型の自動設計 (神戸大・小坂田宏造) 230, ▽四球式ころがり疲労試験機 (東工大・益子正巳) 270, ▽機械の構造, 運動記述言語を認識する機械頭脳 (同総理工・林 国一) 290, ▽焼入ひずみを考慮した歯車形状・寸法 (京大・会田俊夫) 100, ▽トライボロジー現象の観察 (阪大・築添正)

230, ▽粒子弁別レーザードップラー速度計 (北大応電研・三品博達) 290, ▽磁性流体の管内高速流動試験装置 (東北大高力研・神山新一) 230, ▽流れの大きさ・方向・変動周波数が同時計測できる多次元熱線流速計 (九大・生井武文) 280, ▽濃度差エネルギー機関 (東工大・一色尚次) 180, ▽熱定数迅速測定装置 (静大・小林清志) 270, ▽低騒音内燃機関 (山口大・福田基一) 290, ▽電磁ブレーキを具えた風力発電装置, 温風発生装置 (日大理工・栗野誠一) 200, ▽超微動・微小変動検出のためのレーザヘテロダイン干渉計 (北大・大塚喜弘) 280, ▽体外循環用拍動流人工心臓ポンプの制御システム (京大・明石一) 280, ▽自己周期を利用した振動エレベータ (九大・井上順吉) 205, ▽重度身障者を対象とした日常動作制御装置 (九工大・米沢洋) 170, ▽空間電荷制御の複合高分子材料 (名大・家田正之) 250, ▽植込形機能的生体作用装置 (東大医・斉藤正男) 250, ▽医学計測用超小形トランスジューサ (東工大・安田力) 180, ▽レーザードップラ速度計 (名大・梅野正義) 250, ▽PTP 形産業用ロボットで CP 制御 (同・上田実) 250, ▽溶接時の過渡応力と変形 (九大・辻勇) 200, ▽超音波流量計 (熊大・柏木潤) 160, ▽面形状を測定する精密画像解析装置 (千葉大・磯部孝) 220, (服部 敏夫)