

## 焼入れした 0.4% C 鋼の乾燥摩擦で生じた摩擦面応力について

佐々木敏美\* 山田俊宏\* 波多野和好\*

Toshimi Sasaki, Toshihiro Yamada and Kazuyoshi Hatano : A Study on the Stress Induced in the Sliding Surface of Hardened 0.4% C Steels under a Dry Condition.

A study has been made on the effect of residual stress on wear of the hardened steels as well as the change of the stress induced in the sliding surface under a metal-to-metal dry condition in air using a Pin-and-Disk type wear machine. In the present experimental condition, the wear rate was found to remain almost constant regardless of the extent of stress retained in the steels before the sliding test. The stress thus induced reached a maximum value of  $-110 \text{ kg/mm}^2$ . The rise surface temperature with increasing sliding speed gave rise to a decrease in the stress induced in the surface layer. This change was found to be determined only by the sliding condition, being almost independent of the retained stress in the steels before sliding. It was found that the wear rate decreases with increasing compressive stress in the sliding surface. Therefore, there seems to exist a certain correlation between the stress in the sliding surface and the wear rate in the steels.

(Received December 24, 1973)

### I. 緒 言

金属材料の多くは機械加工あるいは熱処理を行なって使用されるが、その際表面に応力が残留すれば材料の諸特性に影響を与えることが考えられる。このような残留応力と

諸特性との関係については種々検討されており、とりわけ疲れ強さにおよぼす影響については多くの報告がある。しかし、摩擦あるいは摩耗と応力の関係を論じた報告は少なく、その結果も研究者によって異なる場合がある<sup>(1)(2)</sup>。こ

\* 株式会社日立製作所機械研究所 (Mechanical Engineering Research Laboratory, Hitachi Ltd., Tokyo)

れは残留応力の変化のみならず組織変化や加工硬化と重複し、そのために残留応力のみについて論じることが困難であるためと考えられる。

一方、摩擦、摩耗を受けた金属はその表面層に塑性変形を生じたり、あるいは、摩擦熱が発生することが考えられ、その表面層になんらかの影響をもたらし、ひいては摩擦後の表面に摩擦前とは異なった応力が発生するようになる<sup>(3)(4)</sup>。この摩擦後の応力と摩耗の間にはある一定の関係が存在する場合があります<sup>(5)(6)</sup>、摩擦後の応力と摩耗の関係を検討することにより摩耗機構の解明の一助となることが期待された。そのため、まず、摩擦前の応力と摩擦後の応力の関係、および摩耗特性の変化を知る必要がある。

そこで本報告では、硬さおよび組織の変化を伴うことなく応力を変化させることを目的として、市販の S40C 鋼に比較的容易に応力を与えることのできる高周波焼入れを行なった。その後、応力を変えるために非硬化部の除去あるいは一部の試料については全体焼入れにより、3段階の圧縮応力を与えた。これらの試料を用いて乾燥摩擦を行ない、摩擦前および摩擦後の応力の関係を知り、あわせて、これらの摩耗におよぼす影響について検討した。

## II. 実験方法

本実験に用いた試験機は 12.3 mmφ × 30 mm のピン試片 (摩耗試片) を、回転する外径 46 mmφ、内径 21.4 mmφ のディスク試片 (相手材) に押付けてすべり摩擦を行なわせる方式のピン/ディスク型試験機である。その概略は Fig. 1 に示すようで、実験対象にする試料はすべてピン試片に用いた。

試料は Table 1 に示す化学組成をもつ市販の S40C 鋼を用いた。これらの試料は前処理として 850°C 水焼入れ、600°C 焼もどしを行なった。次いで機械加工により 12.3 mmφ × 30 mm および 35 mm の 2 種のピン試片、ならびに、所定の寸法をもつディスク試片を作製した。その後、

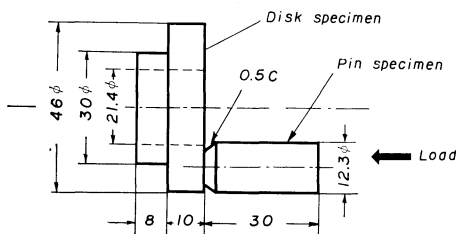


Fig. 1 Schematic diagram of essential parts of the apparatus.

Table 1 Chemical composition of the specimens (%).

C	Si	Mn	P	S
0.42	0.25	0.80	0.024	0.014

430 KHz 高周波焼入れ装置により最高加熱温度 900°C、加熱時間 10~45 sec の条件で高周波焼入れを行なった。なお本実験では、試料が高周波焼入れ時に酸化することを防止するためアルゴンガスを吹きかけ非酸化性雰囲気で行なった。また応力を変化させる一手段として 12.3 mmφ × 30 mm のピン試片の一部には全体焼入れを用い、860°C より水冷した。次に 12.3 mmφ × 35 mm のピン試片は焼入部とは反対側の非焼入部を切削し、応力の変化を計った。

応力の測定は X 線法によった。X 線源としては Cr ターゲットを用い、V フィルターによって得られる Cr-K $\alpha$  線を用いた。その時の管電圧、および管電流は 30 kV、6 mA である。X 線の入射角 ( $\phi$ ) は 0~45° に変化させ、ピーク位置の決定は半価幅法によった。測定方向は摩擦方向と直角方向の 2 方向について行なった。なお、応力を測定する際には、表面に生成した酸化膜による誤差を除くため、電解研磨により酸化膜の除去を行なっている。

Table 2 は試料表面の応力および硬さを示したもので、応力は段階的に変化している。これらの試料を切断することなく表面の硬さを測定すると、Hs 75~77 程度で試料による相違は認められなかった。Table 2 の硬さは試料を切断して測定した結果で、Hv 600~620 とすべての試料でほぼ同程度になっている。したがって、本実験試料では組織硬さの変化を伴うことなく、応力のみが変化している。

Table 2 Surface stress and hardness of the specimens.

Specimen	Treatment	Surface stress (kg/mm <sup>2</sup> )	Surface hardness Hv (100 g)
Pin	Surface hardening	- 3*	610~620
	Hardening	- 34	600~610
	Surface hardening	- 58	610~620
Disk	Surface hardening	- 76	610~620

\* Removal of edged face

摩擦条件は荷重を 30 kg 一定とし、摩擦速度を 0.1~1.0 m/sec に変化させた。雰囲気はすべて大気中の乾燥摩擦とした。摩擦面となる表面はなんらかの手段で仕上げを行なうのが普通であるが、本実験では表面の仕上げ工程で新たな応力の発生をなくすために熱処理のままとした。その時の面粗さは  $R_{ms}$  7~10  $\mu$  である。

## III. 実験結果および考察

### 1. 摩耗特性

前述した諸条件により、まず摩擦距離に対する摩耗量の変化を観察した。それによると、摩擦初期に摩耗が急増するいわゆる初期摩耗とその後比較的ゆるやかな勾配で摩耗が増加する定常摩耗が認められた。初期摩耗は 300~500 m の摩擦距離で終了するが、その時の摩耗量には従来報告されているように良好な再現性を得ることができなかった。

これに対して、定常状態における摩耗量は摩擦距離に対して相関係数 0.96~0.99 とほぼ直線的に増加しており、その時の誤差は ±10% 以内であることを確認した。そこで本報告では、初期摩耗を除外して定常摩耗について検討することにした。

**Fig. 2** に定常状態における単位摩擦距離当りの摩耗量、すなわち、摩耗率と摩擦速度の関係を示す。摩耗率は摩擦速度の増加により指数関数的に増加するのが認められ、本実験条件範囲ではいわゆる機械的破壊摩耗は認められない。

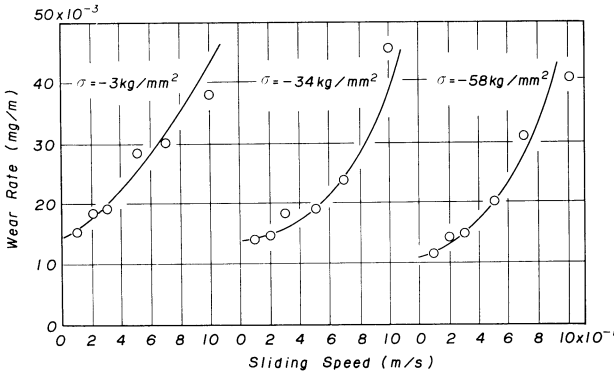


Fig. 2 Variation of wear rate with sliding speed.

これは従来の報告と一致しており<sup>(7)</sup>、硬さが増加したために機械的破壊摩耗になりにくくなったものと考えられる。

前述したように、摩擦前の試験片表面にはそれぞれ異なった圧縮応力が残留しているが、定常状態における摩耗率には変化は認められず、本実験条件の範囲では摩擦前の試験片に残留する圧縮応力は摩耗には影響を与えないことが推定される。

摩擦面を観察すると、ピン、ディスク試片とも赤褐色の酸化膜で覆われており、摩擦速度の上昇とともに赤褐色から黒色へ変化する様相が観察された。

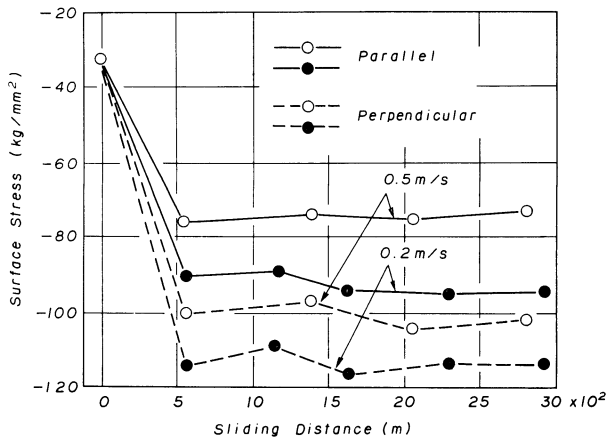


Fig. 3 Variation of surface stress with sliding distance.

## 2. 摩擦による表面応力の変化

まず、摩擦面応力の経時変化を知るために摩擦距離に対する表面応力の変化を測定した。

**Fig. 3** に全体焼入試験片を用いた場合の一例を示す。前述のように初期摩耗は 300~500 m で終了するために、本測定結果は定常状態における応力を示している。摩擦表面の応力は摩擦に伴う塑性変形、あるいは局部発熱により摩擦前とは全く異なっている。その値は摩擦条件によって決定されるが、いずれも直角方向に大きな圧縮応力が残留しており、定常状態ではほぼ一定値を保っている。

以上のように、定常状態での摩擦表面応力が摩擦距離に対してほぼ一定値を示すことを確認した後、ついで電解研摩により表面から内部に至る応力分布の測定を行なった。

**Fig. 4** に全体焼入試験片に関する結果の数例を示す。

摩擦前の試験片には約 30 kg/mm<sup>2</sup> の圧縮応力が存在しており、それは表面下約 0.3 mm までおよんでいる。それ以上の内部では圧縮応力は減少する傾向が認められる。このような試験片で乾燥摩擦を行なうと、応力分布は著しく変化し内部にむかって急激な勾配を示すようになる。その時の最大値は -110 kg/mm<sup>2</sup> 程度あり、摩擦前の 4 倍弱となっている。さらに内部では急激に減少している。

いずれにしても、摩擦による局部変形の影響はかなり深部にまでおよぶことは明らかである。

このように、摩擦に伴い応力あるいは応力分布が摩擦前とは全く異なった状態になるから、摩擦前の表面応力が定常状態の摩耗率に影響を与えるとは考えにくく、むしろ、摩擦後の応力を考慮すべきであろう。

そこで、摩擦後のピン試片の表面応力と摩擦速度の関係を検討することにした。その結果(**Fig. 5**)によると 2~3 の

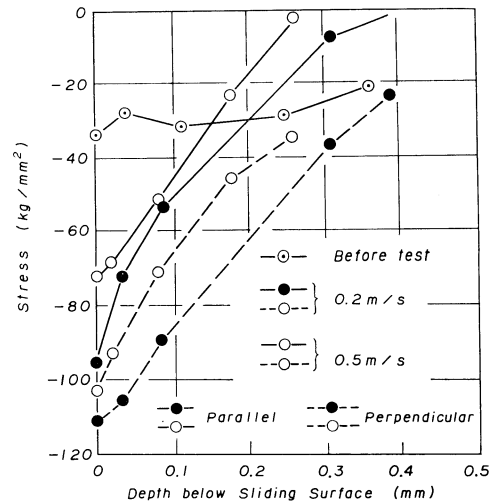


Fig. 4 Stress distribution of pin specimen.

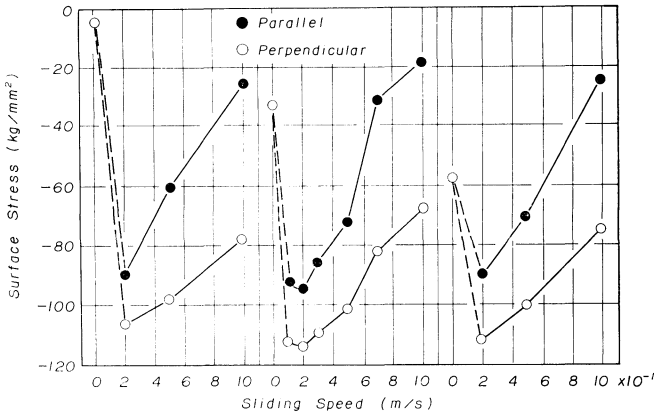


Fig.5 Correlation between surface stress and sliding speed.

特徴が明らかとなっている。まず、本実験条件下では、すべての摩擦速度において直角方向に大きな圧縮応力が認められることである。ついで、これら摩擦後の表面応力は測定方向に関係なくいずれも摩擦速度に強く影響されていることである。

すなわち、摩擦速度の影響をとりあげてみると、いずれの試験片においても  $0.1 \sim 0.2$  m/sec で最大の圧縮応力を示し、摩擦速度の増加とともに圧縮応力は減少する。ここで注目すべきは、各々の摩擦速度における応力は摩擦前の応力および測定方向に関係なく一定になっていることである。

Schallamach ら<sup>(8)</sup>の光弾性を用いた実験によると、2物体AおよびBを接触させてすべらせる時、Fig.6に示すようにすべり方向の後部に引張応力が集中する。したがって接触部の破壊はすべり方向の後部においてすべり方向に直角に起ると考えられている。

したがって、応力の集中により破壊が生じる場合この応力が材料の強さの限界値に到達するかどうかは材料の変形能に依存することになるであろう。本実験に用いたような高硬度材では軟鋼などに比べて伸びは著しく小さいために、集中した応力は比較的容易に材料の限界値、たとえば降伏剪断応力などに到達しうる。その結果、接触部の一部に破壊が生じて摩擦粉が生成すると同時に直角方向に大き

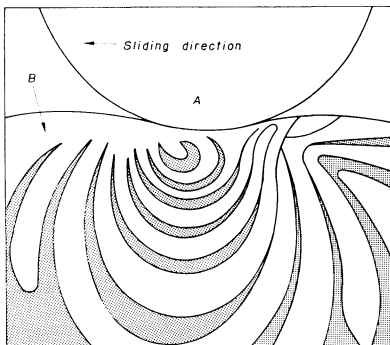


Fig.6 Example of stress distribution.

な圧縮応力が残留することが推定される。

このように考えるならば、摩擦前の表面応力が摩擦に影響を与えない原因の説明が可能である。すなわち、Fig.3から明らかなように、摩擦前に存在する応力はいわゆる初期摩擦の状態で消滅し、その後の定常状態では摩擦前とは全く異なった新しい応力が発生する。そして、定常状態で新しく生成した応力は、摩擦条件あるいは材料によって決定されるので、定常状態における摩擦は摩擦前の試料に存在する応力によって変化しないことになる。事実、上記 Fig.5からも明らかなように、摩擦後の表面応力は摩擦前の応力には関係なく、各々の摩擦速度でほぼ一定の値を示している。同時にその時の摩擦率もまたほぼ一定である

事実は、上記の考察を裏付けているものと考えられる。

そこで、本実験条件において摩擦前の試料に存在する応力が摩擦に影響を与える条件としては、初期摩擦が考えられる。しかし、本実験試料のようになじみ性の悪い材料では、再現性のある初期摩擦量を定量的に把握することは困難であったので、初期摩擦に関する検討は省略した。

したがって、摩擦前の応力が摩擦に影響するのは、潤滑摩擦などの軽負荷条件の場合に限られることが考えられる。

Fig.2および Fig.5の比較からも明らかなように、摩擦の少ない条件における表面には大きな圧縮応力が存在している。この結果は中島<sup>(5)</sup>あるいは室<sup>(6)</sup>らの結果と定性的に一致しており、摩擦後の応力を測定することにより摩擦状況を知ることが可能になるものと思われる。

### 3. 硬さ測定

摩擦速度が増加すると表面の応力は急激に減少する。これは、摩擦熱による温度上昇が材料の固体粘性を低下させ、集中した応力の一部が塑性変形に消費されるためと仮

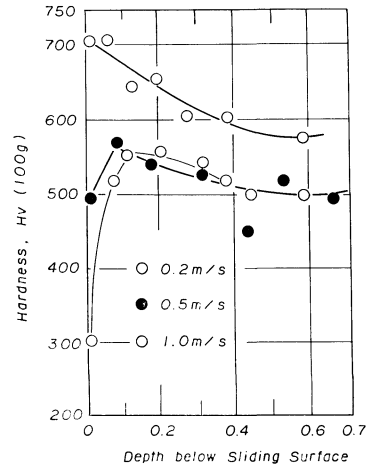


Fig.7 Microhardness survey of the surface layer.

定すると理解しやすい。温度上昇による固体粘性の低下を知る一方法として、摩擦後のピン試片の断面硬さ測定を行った。全体焼入試料に関する硬さ分布の数例(Fig.7)からも明らかなように、低摩擦速度では加工硬化によると考えられる硬さの増加が認められるのに反して、高摩擦速度領域では表面の硬さは著しく低下している。Fig.8 に全体焼入試験片の表面部硬さと摩擦速度の関係の数例を示す。同図から明らかなように、0.1~0.2 m/sec までは硬さの上昇が認められるが、それ以上の摩擦速度では表面附近の硬さは急激に低下する。

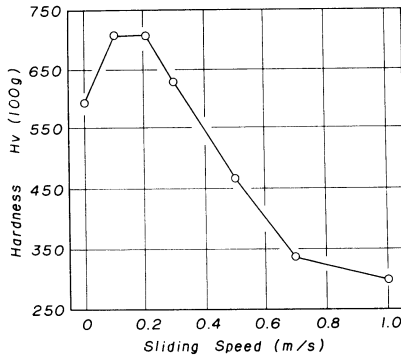


Fig.8 Correlation between the hardness of surface layer and the sliding speed.

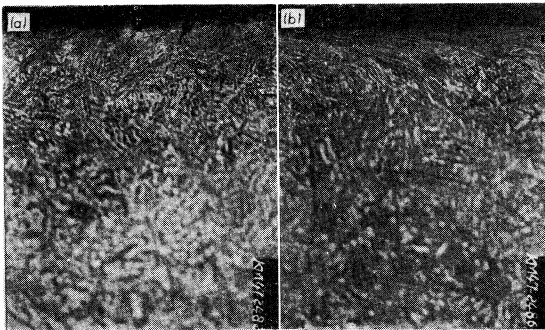


Photo.1 Microstructure of pin specimens. ( $\times 400 \times \frac{2}{3}$ )  
(a) 0.2 m/s, (b) 0.7 m/s

摩擦後の基底組織の一例を Photo.1 に示す。低摩擦速度の場合の摩擦表面には顕著な変化はないが、このような状態で 20% 程度の硬化が認められている。摩擦速度が増加すると基底には流動層が存在するようになる。流動層は 0.5 m/sec 以上の摩擦速度で生成し、摩擦速度の増加によ

り厚くなるとともに硬さも低下する。このような流動層の生成および硬さの低下は摩擦面温度の上昇による材料の固体粘性の低下を意味している。そこで、摩擦に伴い集中した応力の一部は塑性変形に消費されやすくなり、同時に摩擦熱による応力の解放がすすめられるであろう。これらの作用は温度上昇が著しくなればさらに促進されることは容易に推測できる。その結果、Fig.8 に示すように、摩擦速度の増加とともに表面の硬さ低下が生じるものと思われる。

#### IV. 結 論

S40C 鋼に熱処理を行ない端面除去などの機械的手段により残留応力を変化させ、残留応力と乾燥摩擦特性および摩擦後の表面応力について検討した。以下に結果を要約する。

- (1) 硬さの上昇はいわゆる機械的破壊摩擦に効果を示すが、摩擦前の試料に存在する残留応力は摩擦に影響を与えない。
- (2) 摩擦後の応力分布は摩擦前の状態とは著しく異なり、それはすべりを与えた転がり摩擦試片に認められるものと類似の傾向にある。
- (3) 摩擦後の表面には最高  $110 \text{ kg/mm}^2$  程度の圧縮応力が残留し、摩擦速度の上昇とともに急激に減少する。
- (4) 摩擦後の表面に残留する応力は摩擦条件によってのみ決定され、摩擦前の表面応力には関係しない。
- (5) 摩擦後の表面応力と摩擦率の間には一定の関係が認められ、摩擦表面に圧縮応力が存在する条件下の摩擦は少ない。

#### 文 献

- (1) 小川喜代一：精密機械, **21** (1955), 294; **34** (1968), 92.
- (2) 遠藤吉郎, 福田嘉雄, 井上源之助, 高宮修武：精密機械, **37** (1971), 496.
- (3) 遠藤吉郎, 福田嘉雄, 豊田洋民：機械学会論文集, **34** (1968), 1769.
- (4) 西岡邦夫, 邦武立郎, 西村誠一, 時政勝一：住友金属, **23** (1971), 302.
- (5) 永谷嘉之, 中島耕一：金属学会誌, **33** (1969), 1202.
- (6) 室 博, 徳田昌敏：材料, **17** (1968), 1094.
- (7) 朝倉希一編：金属の摩擦, 丸善, (1948), 145.
- (8) A.Schallamach：Wear, **1** (1957/58), 384.