

論 文

UDC 669.14-408.2 : 669.781 : 539.538

ほう化処理鋼すべり摩耗痕の観察について*

渋谷 佳男**・今沢 好明**・桑名 一利**

Observation of the Sliding Wear Trace of Borided Steel

Yoshio SHIBUYA, Yoshiaki IMAZAWA, and Kazutoshi KUWANA

Synopsis:

The sliding wear tests were carried out under the condition of constant surface pressure without lubricant at room temperature, using the stationary test pieces of S45C borided steel and the rotary test pieces of low carbon steel. Those tests were carried out with constant sliding distance under various sliding velocity. The scanning electron microscopy and X-ray microanalysis were employed to investigate the wear surface trace of borided steel. The experimental results indicated that the morphology of the wear surface trace largely depended upon the wear mechanism such as oxidative wear, mechanical wear or melting wear. It was concluded that the wear mechanism or the wear life of borided steel could be estimated to some extent with the observation of wear surface trace.

1. 緒 言

ほう化処理鋼は表面硬さが非常に高く耐摩耗性である。ほう化処理鋼-低炭素鋼すべり(すべり率 100%)におけるほう化処理鋼の摩耗量は、すべり速度が 1.0 m/s 以下の低速度域で極めて少なく、1.4 あるいは 2.0 m/s で最大を示し、それ以上の速度では減少した¹⁾。このように摩耗量に差が現れる主原因は酸化摩耗、輝面摩耗、溶融溶着摩耗などの摩耗機構の相違にあり、一般に摩耗寿命を推察する場合、どのような摩耗機構で摩耗が進行しているか調べることは重要である。固定試験片(平板)と回転試験片(円板)とのすべり摩耗である大越式迅速摩耗試験によつて材料間の摩耗機構を調べる場合、摩耗機構は種々のすべり速度における摩耗量を求め、すべり速度-摩耗量線図の形状から推察するのが一般である。しかし摩耗痕観察のみを行うことにより、その速度における摩耗機構がある程度推察できればより簡便である。本研究はほう化処理と低炭素鋼の組み合わせにおけるすべり摩耗機構の異なる種々のほう化処理鋼摩耗痕を走査型電子顕微鏡、X線マイクロアナライザーで観察した。その結果、摩耗機構の違いにより摩耗痕はおののおの異なつた特徴ある様相を示すことがわかつた。この結果からほう化処理鋼については、すべり摩耗痕の観察により摩耗機構をある程度推察することができるであろうと考え

られる。

2. 実 験 方 法

摩耗痕観察は前報¹⁾にて行つた摩耗試片の摩耗痕部を観察した。摩耗試験はすべり率 100% である大越式迅速摩耗試験機で行つた。回転試験片(外径 ϕ 29 mm, 厚さ 3 mm の円板)は 0.07% C の低炭素鋼を用い、固定試験片(50×25 mm, 厚さ 8 mm の平板)の S45C ほう化処理鋼は、ほう化物層が FeB+Fe₂B 層、および Fe₂B 層の 2 種類である。また後者の Fe₂B 層は高温で処理後、空冷(以下 AC と記す)および油冷(以下 OQ と記す)の操作を行つた。ほう化物層は試料表面に対して直角に杭状に浸入している。ほう化物層の浸入深さは FeB+Fe₂B 層材、Fe₂B 層 AC 材、Fe₂B 層 OQ 材ともに約 80 μ である。摩耗試験条件は最終荷重、すべり距離は一定であり、2.1 kgf, 387 m とした。またすべり速度は 0.1~4.5 m/s の範囲で行つた。なお、摩耗試験は無潤滑、常温、面圧一定状態で行い、種々のすべり速度で一定距離摺動後、ほう化処理鋼摩耗痕を観察した。Fig. 1¹⁾ はほう化処理鋼と低炭素鋼の組み合わせにおけるすべり速度-比摩耗量線図である。ほう化処理鋼すべり摩耗痕の観察は走査型電子顕微鏡(以下電顕と記す)にて行い、FeB-Fe₂B 層材、および Fe₂B 層 AC 材は、すべり速度 0.1, 0.6, 1.4, 4.5 m/s について、Fe₂B 層 OQ 材は

* 昭和 54 年 5 月 30 日受付 (Received May 30, 1979)

** 静岡県工業試験場 (Prefectural Industrial Research Institute, Shizuoka, 5-9-3 Komagatadori Shizuoka 420)

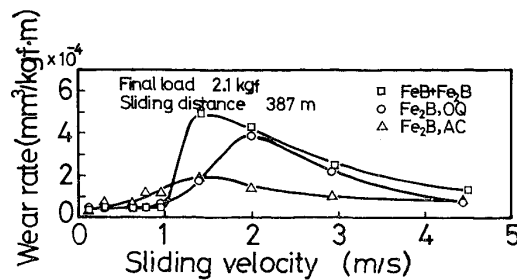


Fig. 1. Sliding velocity-wear rate diagram on 100% sliding wear of the borided steel-low carbon steel.

前者に加え 2.0 m/s についても観察した。また摩耗痕表面の酸素（以下Oと記す）の有無を確認するためにX線マイクロアナライザー（以下EPMAと記す）による線分析を行った。これは摩耗痕中心部をすべり方向に対して直角方向に、摩耗痕幅3 mmについて鉄（以下Feと記す）、ほう素（以下Bと記す）およびOの分析を行った。EPMA分析条件は電圧15 kV、電流0.1 μ A、X線ビーム径約 ϕ 3 μ である。なお試料面はあらかじめカーボン蒸着を行った後、電顕観察、EPMA分析を行った。

Fig. 2はFeB+Fe₂B層-低炭素鋼すべり摩耗で生じた摩耗粉のEPMA線分析結果である。すべり速度0.6 m/sでは金属片のほかにOのピークが認められ、酸化物が存在することを示している。また1.4および3.0 m/sでは金属片のみでOピーク強度は極めて低く、バックグラウンドと同程度であり酸化物はほとんど認められない。Bは極めてわずかに検出されたが、その組成はFe-B

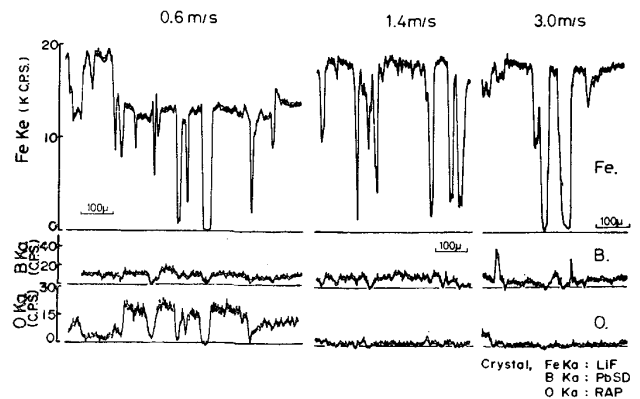


Fig. 2. EPMA line analysis results of wear debris produced by FeB+Fe₂B layer-low carbon steel sliding wear at various sliding velocity.

系、あるいは酸化物かは明白でない。摩耗粉と後述の摩耗痕の線分析結果を比較するとおおまかには類似している。このことは摩耗機構を検討する場合、摩耗粉あるいは摩耗痕のどちらか一方を検討すればよいことを示している。本研究では摩耗痕について検討した。

3. 実験結果および考察

3.1 FeB+Fe₂B層摩耗痕の観察

Photo. 1, および Fig. 3 に種々のすべり速度におけるFeB+Fe₂B層摩耗痕の電顕写真, およびEPMA線分析結果を示す。摩耗痕のEPMA線分析箇所は摩耗痕中心部で、線分析図に示した摩耗痕深さの箇所である。Photo. 1a, bはすべり速度0.1 m/s, cは0.6 m/s, d

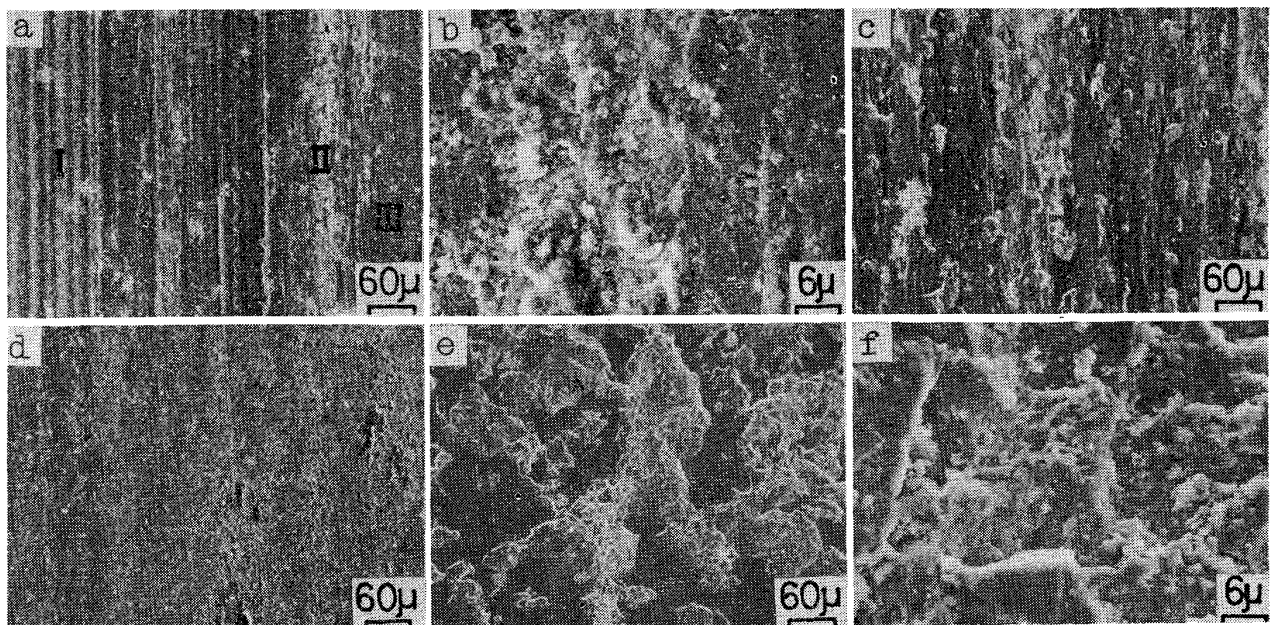


Photo. 1. Scanning electron micrographs of sliding wear trace of FeB+Fe₂B layer at various sliding velocity. Tilting angle 15° (Final load 2.1 kgf, Sliding distance 387m).

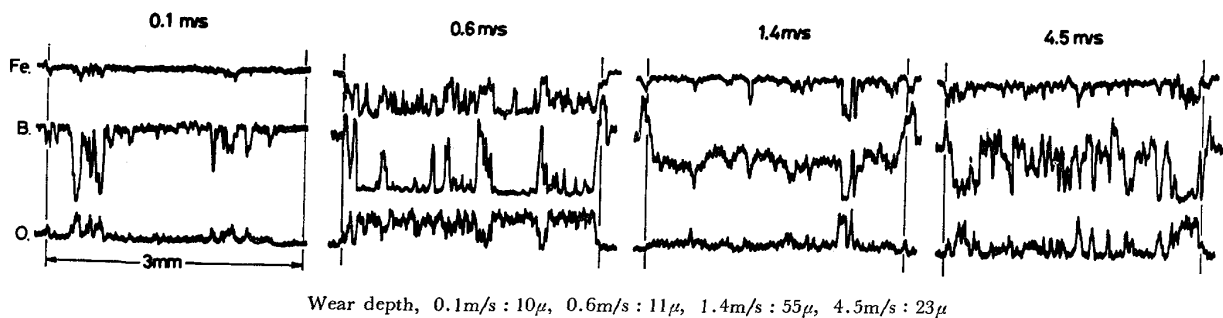


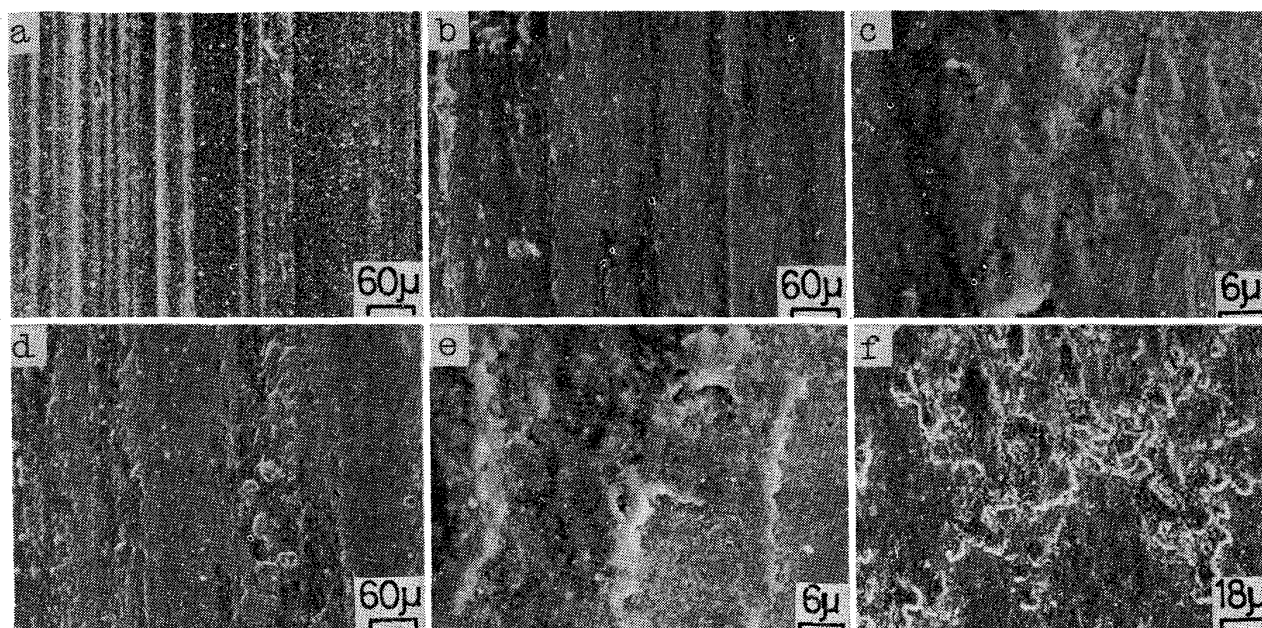
Fig. 3. EPMA line analysis results of sliding wear trace of FeB+Fe₂B layer at various sliding velocity.

は 1.4 m/s, e, f は 4.5 m/s での摩耗痕である。a, b の 0.1 m/s の摩耗痕は肉眼観察ではおおまかには輝面で酸化はあまり激しくない。しかし生じた摩耗粉の観察¹⁾では酸化物が多量に認められた。Photo. 1a の摩耗痕は整然とした直線のすべり痕Ⅰ, 比較的幅の広いあれたすべり痕Ⅱ, および平坦な箇所Ⅲからなる。Ⅰ, Ⅱ, Ⅲの線分析よりⅡからOが強く検出されⅠは比較的少なく, Ⅲでは極めて少ない。これはすべり痕は摩擦により高温となり酸化されたことを示している。bはⅡの部分の高倍率写真である。このように摩耗痕形状が雲状の微細な凹凸を示すのは酸化摩耗の特徴であり, 後述の輝面摩耗の刃物で削り取ったような摩耗痕とは明らかに異なる。酸化摩耗領域では摩耗痕を 830 倍程度で観察すると Photo. 1b, Photo. 2c, e のような雲状の微細な凹凸が摩耗痕の全面, あるいは一部に認められた。線分析より 0.1 m/s では Fe と B はほぼ同じ位置でピークが認められ, O は Fe および B の少ない位置でピークが認められた。これは摩擦面は FeB 層あるいは Fe₂B 層であり, 一部 O 富化の箇所は線分析および前報の摩耗粉の解析¹⁾より Fe 系酸化物が主体に付着していると考えられる。

Photo. 1c に示した すべり速度 0.6 m/s での摩耗痕は肉眼観察でも酸化しているのがはつきり認められた。Photo. 1c は平均的な箇所である。すべり痕は両試片の真実接触部の跡, あるいは, 摩耗粉が摩擦面に転移, 脱落の過程で損傷した跡と考えられる。Photo. 1c の白い部分を高倍率で観察すると b と同様であつた。すなわちこのような形状は酸化摩耗領域での摩耗痕の特徴である。線分析では摩耗痕のほぼ全面にOが検出され, この速度では酸化摩耗領域であることを示している。摩耗痕に認められる酸化物は摩耗試験によりほう化物が摩耗損失している事実よりほう化物層が酸化したと考えられる。しかし一方, ほう化物層の摩耗量に比べ脱落した摩耗粉量が目算であるが比較的多いことより, 摩耗粉は回転試片からの酸化物が主体であり, これが固定試片の摩耗痕に付着したことも十分考えられる。Fig. 3, 0.6 m/s

では 0.1 m/s の場合に比べ B の強度が低い箇所が多いが, これは FeB 層あるいは Fe₂B 層が酸化物で覆われているからである。Photo. 1d は最大摩耗量を示した 1.4 m/s での摩耗痕である。全体の約 9 割が平坦であり 0.1, 0.6 m/s の摩耗痕とはまったく異なる。この速度域では両試片の凝着が主体に摩耗が進行していると考えられ²⁾, 摩耗痕の凹凸が少ないのは固定試片の表面部を回転試片が少しずつ持ち去つたと考えられる。摩耗痕の O の強度はすべり速度 0.6 m/s の場合より全体に低い。このことはすべり速度 1.4 m/s では摩耗痕の酸化は極めて少なく輝面摩耗領域であることが容易に推察できる。これは摩耗粉の解析¹⁾でも確認された。また線分析より 0.1 と 1.4 m/s を比較すると O のピークは類似しているが B は 1.4 m/s の方が全体に低い。これは 1.4 m/s では摩耗が激しいため FeB 層でなく, Fe₂B 層が主体に分析されたためであろう。0.1 と 1.4 m/s を比べると生じた摩耗粉の種類はまったく異なり前者は酸化物, 後者は金属粉が主体であつた¹⁾。Fig. 3, 1.4 m/s ではほう化物浸入深さが 80 μ であるのに対し, 摩耗痕深さは 55 μ であつた。このことは, ほとんどがほう化物層内の摩耗であるがほう化物が杭状であるため, 摩耗痕表面に下地の鉄がわずかに露出している可能性もある。Photo. 1d あるいは後述の Photo. 3d および e の刃物で削りとつた, あるいは相手材にむしり取られたような板状, 塊状の摩耗痕形状は輝面摩耗の場合の特徴である。

Photo. 1e, f はすべり速度 4.5 m/s での摩耗痕の一部である。すべり速度の増加とともに凝着がさらに進み, 摩擦面温度が上昇した結果, 回転試片からの転移, 再転移が生じている。すなわち Photo. 1e および f の白い部分はこのような転移による溶着物が主体であると考えられる。しかし一方, ほう化処理鋼摩擦面が摩耗損失している事実よりほう化物も溶融により転移が生じていると考えられる。すべり速度の増加により摩擦面温度が上昇し溶融した結果, 溶着や転移が容易に生じた。すなわち Photo. 1e, f のように摩耗痕に溶着物が認められるのは



a : 0.1m/s, b, c : 0.6m/s, d, e : 1.4m/s, f : 4.5m/s

Photo. 2. Scanning electron micrographs of sliding wear trace of Fe_2B layer AC sample at various sliding velocity. Tilting angle 15° (Final load 2.1kgf, Sliding distance 387m)

Wear depth, 0.1m/s : 9μ , 0.6m/s : 14μ , 1.4m/s : 28μ , 4.5m/s : 15μ

Fig. 4. EPMA line analysis results of sliding wear trace of Fe_2B layer AC sample at various sliding velocity.

溶融溶着摩耗領域での特徴である。酸化摩耗、輝面摩耗でも金属転移は生じていると考えるが摩耗痕形状は各々、明らかに異なつた様相を示した。Photo. 1e は溶着が比較的激しい箇所であり、摩耗痕面積の5割以上がこのような形状であつた。他の箇所はすべり痕は極めて少なく平坦である。f は溶着部の高倍率写真であるが線分析より Fe, B, O が検出された。摩耗痕は高温になるため酸化されるが酸化摩耗領域の摩耗痕ほど酸化は激しくない。また酸化摩耗領域と溶融溶着摩耗領域の摩耗痕は電顕観察、および線分析では類似し、はつきり区別しにくい場合もある。しかし肉眼観察では比較的容易に区別できた。すなわち酸化した摩耗痕は比較的平坦であるが、溶融溶着した摩耗痕は転移などのために凹凸が激しい。

3.2 Fe_2B 層摩耗痕の観察

3.2.1 Fe_2B 層 AC 材

Photo. 2 および Fig. 4 に種々のすべり速度における Fe_2B 層 AC 材摩耗痕の電顕写真、および EPMA 線分析結果を示す。Photo. 2a はすべり速度 0.1m/s, b, c は 0.6m/s, d, e は 1.4m/s, f は 4.5m/s の摩耗痕である。すべり速度 0.1 m/s では摩耗痕は $\text{FeB} + \text{Fe}_2\text{B}$ 層の場合と同様、おおまかには輝面であり、生じた摩耗粉も酸化物が主体であつた。a はすべり痕が比較的多い箇所であり、すべり痕は整然とした直線として認められる。0.1m/s では両試片間の凝着、および金属転移は極めて少ない。線分析では摩耗痕の O のピーク強度は極めて低くバックグラウンドと同程度であり、B のピークも大きな変化はない。これらは摩耗量が極めて少ないこと

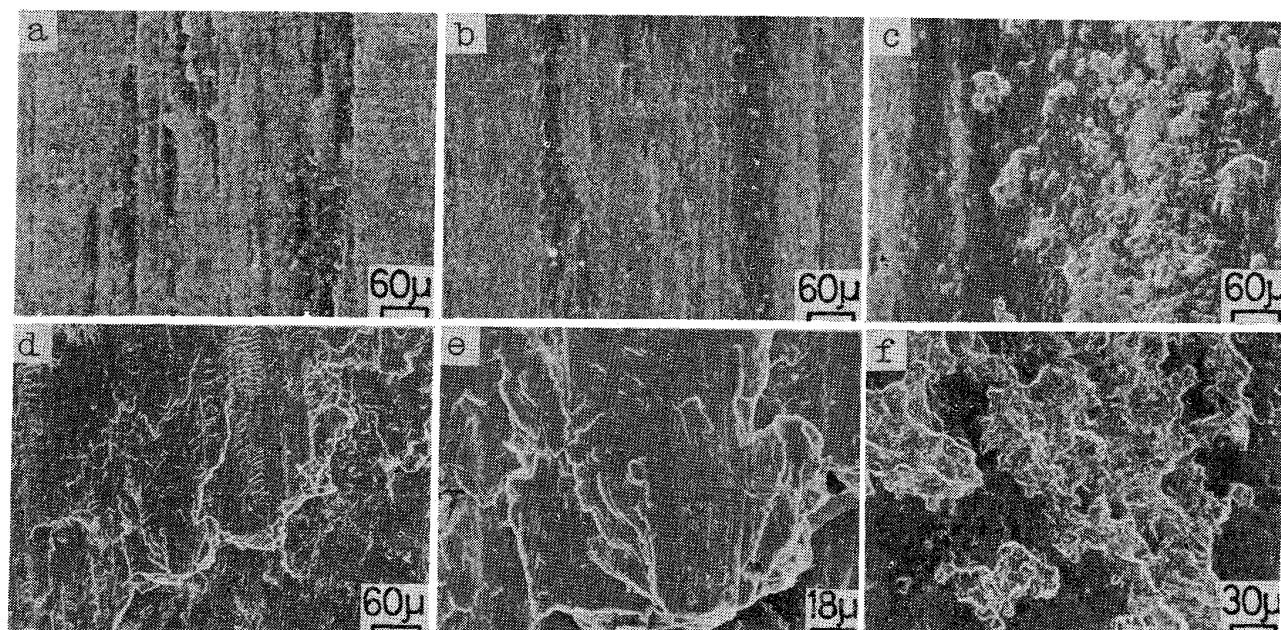
を示している。Photo. 2b および c はすべり速度 0.6m/s の場合の摩耗痕であり、摩耗痕深さは 14μ である。すべり速度 0.6m/s になると 0.1m/s の場合よりも摩耗痕はあれてくる。すべり痕は不連続となり摩耗粉の付着も一部認められた。c は b の一部の高倍率写真であり酸化された箇所である。線分析では摩耗痕のほぼ全面が酸化され、酸化物で覆われているため B のピークは全体に低い。Fe および B ピークの高い箇所は O が低く、この部分だけ酸化物がなく Fe_2B 層が露出しているためであろう。Photo. 2d および e は最大摩耗量を示した 1.4m/s での摩耗痕であり、摩耗痕深さは 28μ である。b, c の 0.6m/s の場合よりさらに摩耗痕の凹凸が激しい。e は d の一部の高倍率写真であり、c および Photo. 1b に類似している。輝面摩耗痕というより酸化摩耗痕である。これは線分析結果からも認められ、Fig. 3, 0.6m/s, Fig. 4, 0.6m/s および 1.4m/s はほぼ同様な傾向を示した。すなわち摩耗痕のほぼ全面が酸化されている。このような摩耗痕形状の場合 Fig. 1 に示したように摩耗量が共通に少ない結果を得た。前報¹⁾で述べたように酸化物摩耗粉、あるいは摩擦面上の酸化物が両試片の凝着を抑制する役目をして、摩耗量を少なくしているためであろう。Photo. 2b~e の摩耗痕形状は酸化摩耗領域で認められる形状である。

Photo. 2f はすべり速度 4.5m/s での摩耗痕の一部であり溶着が認められる。f は比較的溶着の激しい箇所であり、摩耗痕面積の 7 割程度はすべり痕が極めて少なく

平坦なであった。f を高倍率で観察すると Photo. 1f と同様な形状が認められ、線分析より溶着部より O が検出された。しかし $\text{FeB} + \text{Fe}_2\text{B}$ 層のすべり速度 4.5m/s の摩耗痕ほど溶着は激しくない。前報¹⁾で述べたように Fe_2B 層 AC 材、すべり速度 4.5m/s では、生じた摩耗粉は一部酸化物も認められ、これらが溶融、溶着を抑制していることも考えられる。溶融溶着摩耗での摩耗痕は Photo. 1, 2, 3 の f で認められるような溶着部とすべり痕がほとんどない極めて平坦な箇所からなるのが特徴である。

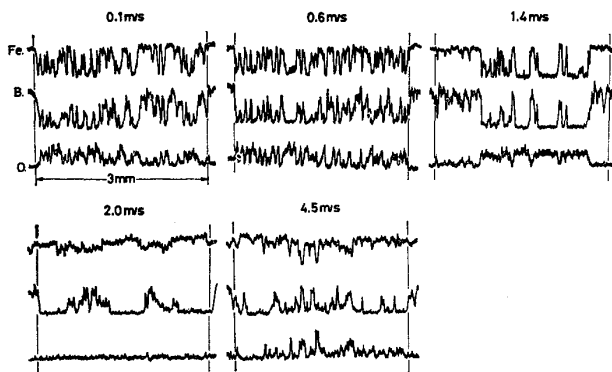
3.2.2 Fe_2B 層 OQ 材

Photo. 3 および Fig. 5 に種々のすべり速度における Fe_2B 層 OQ 材摩耗痕の電顕写真、および EPMA 線分析結果を示す。すべり速度 0.1m/s では摩耗痕のほぼ全面が酸化され、摩耗痕形状はおおまかには $\text{FeB} + \text{Fe}_2\text{B}$ 層および Fe_2B 層 AC 材の 0.6m/s の場合に類似している。しかし摩耗痕の電顕観察および線分析結果より酸化された面積は前述のほう化処理鋼の場合より少ないと考えられる。すべり速度 0.6m/s では 0.1m/s の場合と比べ摩耗痕形状、線分析結果ともにほとんど同様であった。両方とも酸化摩耗領域での摩耗痕である。Photo. 4 は Fe_2B 層 OQ 材すべり速度 0.6m/s での摩耗痕の電顕写真、および EPMA 線分析結果である。I, II, III のすべり痕は光顕観察では黒色として認められる。電顕写真中心部黒線の部分を Fe, B および O について線分析を行つた。I, II, III 部は Fe, B のピークが



a: 0.1m/s, b: 0.6m/s, c: 1.4m/s, d, e: 2.0m/s, f: 4.5m/s

Photo. 3. Scanning electron micrographs of sliding wear trace of Fe_2B layer OQ sample at various sliding velocity. Tilting angle 15° (Final load 2.1kgf, Sliding distance 387m)



Wear depth, 0.1m/s: 12 μ , 0.6m/s: 11 μ , 1.4m/s: 27 μ ,
2.0m/s: 45 μ , 4.5m/s: 16 μ

Fig. 5. EPMA line analysis results of sliding wear trace of Fe_2B layer OQ sample at various sliding velocity.

低くなり逆にOが高くなっている。I, II, IIIはおののほぼ同一組成であり, Fe系主体の酸化物であろうと思われる。他の部分のOピーク強度はほぼバックグラウンドと同程度であり, すべり痕だけが酸化されていることを示している。

すべり速度 1.4m/s では摩耗痕は一部酸化摩耗であり, 一部は輝面摩耗の様相を呈した。Photo. 3c は酸化摩耗部であり, $\text{FeB} + \text{Fe}_2\text{B}$ 層 0.6m/s (Photo. 1c) および Fe_2B 層 AC 材 1.4m/s (Photo. 2d, e) の摩耗痕に類似している。線分析結果からも同様なことが言える。すなわち酸化摩耗領域での種々の摩耗痕形状はおおまかには類似な様相を示した。Photo. 3d および e はすべり速度 2.0m/s での摩耗痕であり, e は d の一部の高倍率写真である。摩耗痕は凹凸が激しく, 摩耗痕の電顕観察, 線分析結果からは酸化している箇所はほとんど認められず, この速度では輝面摩耗であることを示している。また生じた摩耗粉を観察すると e と類似の形状が認められた。Photo. 3f はすべり速度 4.5m/s の摩耗痕の一部であるが比較的溶着が激しい箇所であり, 他はすべり痕が極めて少なく平坦である。これは $\text{FeB} + \text{Fe}_2\text{B}$ 層, Fe_2B 層 AC 材の溶融溶着摩耗領域の摩耗痕とほとんど同様である。すなわちほう化処理鋼の溶融溶着摩耗領域での摩耗痕は前述したようにすべり痕が極めて少ない平坦な箇所と溶融溶着部からなるのが特徴である。

総括すると, $\text{FeB} + \text{Fe}_2\text{B}$ の2層の場合と Fe_2B 単層の場合の摩耗痕形状は摩耗痕部の写真および線分析の観察からは顕著な差はなかつた。また酸化摩耗領域における種々の摩耗痕はほぼ類似の形状を示すことがわかつた。すなわち酸化摩耗領域における摩耗痕形状は全面, あるいは一部に雲状をしている微細な凹凸が認められるのが特徴である。そしてこのような形状を示す場合は共通に

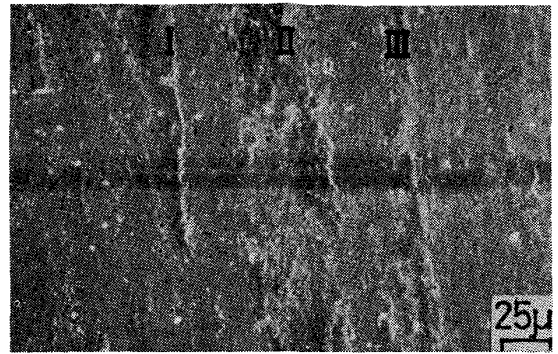


Photo. 4. Scanning electron micrograph and EPMA line analysis result of sliding wear trace of Fe_2B layer OQ sample at 0.6m/s sliding velocity.

摩耗量が少ない結果を得た。酸化摩耗領域における代表的な摩耗痕形状は低倍率(83倍)では Photo. 1c, Photo. 2b および Photo. 3a, b, c などであり, 高倍率(830倍)では Photo. 1b, Photo. 2e などである。換言すればこのような摩耗痕形状を示した場合, 摩耗機構は酸化摩耗が支配的に摩耗が進行していて, 摩耗量は輝面摩耗の場合よりはるかに少ないであろう。

輝面摩耗領域における摩耗痕形状は酸化摩耗における微細な凹凸ではなく, 両試片の凝着による表面部の破壊, すなわち表面を刃物で削り取つた, あるいは相手材にむしり取られたような板状, 塊状をしている。そして酸化物の存在は極めて少ないのが特徴である。溶融溶着摩耗領域における典型的な摩耗痕は摩擦面温度が上昇し軟らかくなり金属転移, 再転移などが生じる結果, 摩耗痕に溶着物が認められる箇所(溶融溶着部)とすべり痕が少ない平坦な箇所からなるのが特徴である。溶融溶着摩耗領域における代表的な摩耗痕形状は Photo. 1e および Photo. 3f などである。このように摩耗機構の違いにより摩耗痕形状に明確な差が認められた。このことは摩耗痕を観察するだけで摩耗機構がある程度推定でき, ひいては材料の摩耗寿命をおおまかに推察することができるであろうと考えられる。また, 摩耗痕に加え摩耗粉についても観察すればより確かなものになるであろう。

4. 結 言

ほう化処理鋼-低炭素鋼の無潤滑すべり摩擦における

ほう化処理鋼すべり摩耗痕, すなわち酸化摩耗, 輝面摩耗, 溶融溶着摩耗などの摩耗機構の異なる摩耗痕形状を観察した結果, 摩耗機構の違いにより摩耗痕形状はおのおの異なつた特徴ある様相を示すことがわかつた. このことは逆にほう化処理鋼摩耗痕を観察することにより摩耗機構, ひいては摩耗寿命をある程度推察することがで

きるであろうと考えられる.

文 献

- 1) 渋谷佳男, 今沢好明, 桑名一利: 鉄と鋼, 65 (1979), p. 2057
- 2) 葉山房夫: 機械学会誌, 66 (1963) 539, p. 1652