

Fe-Al系金属間化合物の2元アブレシブ摩耗

八高 隆雄*・佐々木 朋裕*²・小林 重昭*

Two Body Abrasive Wear of Fe-Al Intermetallic Compounds

Takao YAKOU, Tomohiro SASAKI and Shigeaki KOBAYASHI

Synopsis : The abrasive wear behavior of specimens of Fe-Al intermetallic compounds (Fe_3Al , FeAl , FeAl_2 , Fe_2Al_5 and FeAl_3) on SiC abrasive papers having an abrasive grain diameter ranging from 10 to 48 μm were investigated. The relationship between the wear rate and the material hardness is classified into two cases. In the first case, the wear rate increases with decreasing specimen hardness when the specimen is worn using an applied force of less than 0.31 MPa and an abrasive grain diameter finer than 30 μm . In this case, ductile wear is observed in all specimens. In the second case, the wear rate increases with increasing specimen hardness when the specimens are worn using an abrasive grain diameter coarser than 30 μm . In this case, brittle wear is observed in the FeAl_2 , Fe_2Al_5 and FeAl_3 specimens.

Key words : brittle fracture; hardness; Fe-Al intermetallic compound; two-body abrasive wear; worn surface topography.

1. はじめに

アルミナイズ処理した鋼材を900°C以上で拡散処理すると、 Fe_3Al や FeAl などのFeリッチなFe-Al系金属間化合物が形成されることが明らかにされてきた¹⁻³⁾。特に鋼材表面にAl箔を利用してAl層の厚さを抑制した場合には、その後の900°C以上の拡散処理によって、Feリッチな金属間化合物層が初期Al層の厚い材料に比べて厚く形成されることが明らかとされている⁴⁾。さらに、このようにして得られたFeリッチな金属間化合物層を有するアルミナイズ処理材は、3元アブレシブ摩耗においては、被膜層の硬さが低いにもかかわらず、Alリッチな金属間化合物(Fe_2Al_5)層をより厚く有するアルミナイズ処理材より耐摩耗性が良いことが分かってきた⁴⁾。

そこで本研究では、 Fe_3Al や FeAl 被膜を有するアルミナイズ処理材の耐摩耗性が、それより硬い Fe_2Al_5 に比べて優れている原因を解明する目的で、Fe-Al系の各種金属間化合物を作製し、その2元アブレシブ摩耗特性を調べた。

2. 実験方法

実験には、アトマイズ純Fe粉末(純度99.6 mass%, 平均粉末粒直径60 μm)とアトマイズ純Al粉末(純度99.5 mass%, 平均粉末粒直径80 μm)を用いた。先ず、Fig. 1に示すFe-Al系の平衡状態図⁵⁾を参考にして、Table 1に示す混合割合を決定した。さらに、両粉末をボールミルでAr雰囲気中、2hの混合を行い、冷間プレスで圧粉体を作製した。得られた圧粉体をAr雰囲気中でアーク溶解し、

金属間化合物の試料を得た。アーク溶解後の室温までの冷却の間で、 FeAl_2 および FeAl_3 では試料内にクラックの発生が認められた。しかし最終的な摩耗試験片はクラックのない部分から作製可能であった。その後、各試料に対して真空中で950°C、48hの均質化焼鈍を行い供試材とした。得られた供試材をX線回折および既知の硬さを参考にして構造を確認した。この様なプロセスによって得られた直径20 mm×長さ60 mmの試料から、放電加工により4 mm×

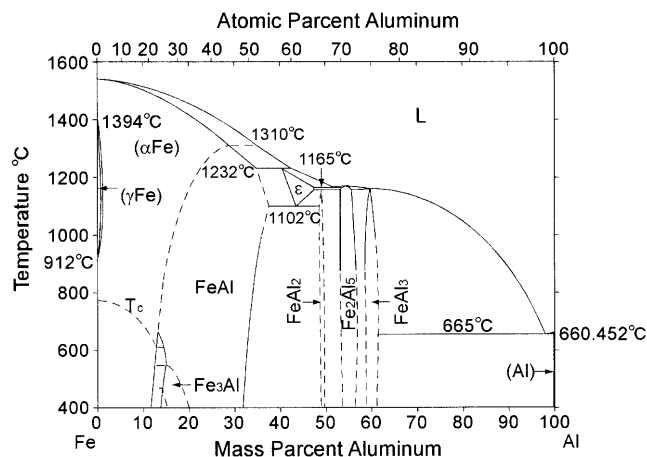


Fig. 1. Fe-Al phase diagram⁵⁾.

Table 1. Chemical composition of Fe-Al alloy specimens.

Alloys	Composition(mass%Al)
Fe_3Al	16.0
FeAl	25.0
FeAl_2	48.5
Fe_2Al_5	55.0
FeAl_3	60.0

平成15年6月16日受付 平成15年8月6日受理 (Received on June 16, 2003; Accepted on Aug. 6, 2003)

* 横浜国立大学工学研究院 (Graduate School of Engineering, Yokohama National University)

* 2 横浜国立大学大学院生 (Graduate Student, Yokohama National University, 79-5 Tokiwadai Hodogaya-ku Yokohama 240-8501)

4mm×3mmの角柱状の摩耗試験片を切り出した。摩耗試験には、直線運動するテーブル上の研磨紙に対して試料を一定力で押し付ける方式のPin-abrasion test⁶⁾を用いた。研磨紙にはSiC系砥粒が#320(平均砥粒直径 $d=48\mu\text{m}$), #500($d=32\mu\text{m}$), #800($d=24\mu\text{m}$), #1000($d=16\mu\text{m}$)および#1500($d=10\mu\text{m}$)のものを用いた。この時の押し付け圧力は、最も低い Fe_3Al の降伏応力308MPa⁶⁾よりも十分小さい0.06MPa, 0.31MPaおよび0.61MPaの3種類とし、摩耗速度は $1.5\times 10^{-2}\text{m/s}$ とした。また、実験は試験片が研磨紙の新しい面と接触するような処女面アブレシブ摩耗試験であり、一定速度で96mm摩耗させた後、テーブルを戻し、さらに、研磨紙上の新しい面に移動させ、再度摩耗する操作を40回繰り返し、合計摩擦距離が3.8mになるようにした。さらに硬さの測定にはマイクロビッカース硬さ計を用い、圧子への押し付け力はいずれの金属間化合物においても測定的に圧痕近傍にクラックが発生しない0.3Nであった。摩耗率 W_R は、摩擦距離 $l=3.8\text{m}$ での質量変化 Δm とその材料の密度 ρ から

$$W_R = \frac{\Delta m}{\rho l} \dots\dots\dots (1)$$

として求めた。ここで、材料の密度 ρ は密度計を用いて、アルキメデス法⁷⁾で測定した。それらは Mg/m^3 の単位で、 Fe_3Al : 6.1, FeAl : 5.8, FeAl_2 : 4.4, Fe_2Al_5 : 4.1, FeAl_3 : 3.8であった。

3. 結果および考察

3.1 Fe-Al系金属間化合物の同定

Fig. 2に得られた5種類のFe-Al系金属間化合物試料をX線ディフラクトメーターによって解析した結果を示す。 Fe_3Al ⁸⁾, FeAl ⁹⁾, FeAl_2 ¹⁰⁾, Fe_2Al_5 ¹¹⁾および FeAl_3 ¹²⁾の既知のデータを引用して指数付けを行った。その結果、 FeAl_2 および FeAl_3 の未解明の領域を除き、いずれも既知の面指数と正確に一致した。

さらに、Table 2に本実験で得られたFe-Al系金属間化合物のビッカース硬さHVと他の研究者による結果を示す。用いたいずれの試料においてもダイヤモンド圧子への押し付け力が0.3Nまではクラックの発生は認められず、硬さは Fe_3Al : HV343~HV347, FeAl : HV354~HV394, FeAl_2 : HV900~HV1100, Fe_2Al_5 : HV960~HV1100, FeAl_3 : HV900~HV1050であった。これに対して他の研究者による結果は Fe_3Al : HV285~HV350^{2,6,13)}, FeAl : HV300~HV640^{2,14,15)}, FeAl_2 : HV1030²⁾, Fe_2Al_5 : HV800~HV1000^{2,14,16)}, FeAl_3 : HV990^{2,16)}であり、両者はほぼ一致している。これらの硬さの値はアルミナ処理被膜層から引用したのも含まれるが、今回作製したバルク材と硬さの結果とほぼ一致した。

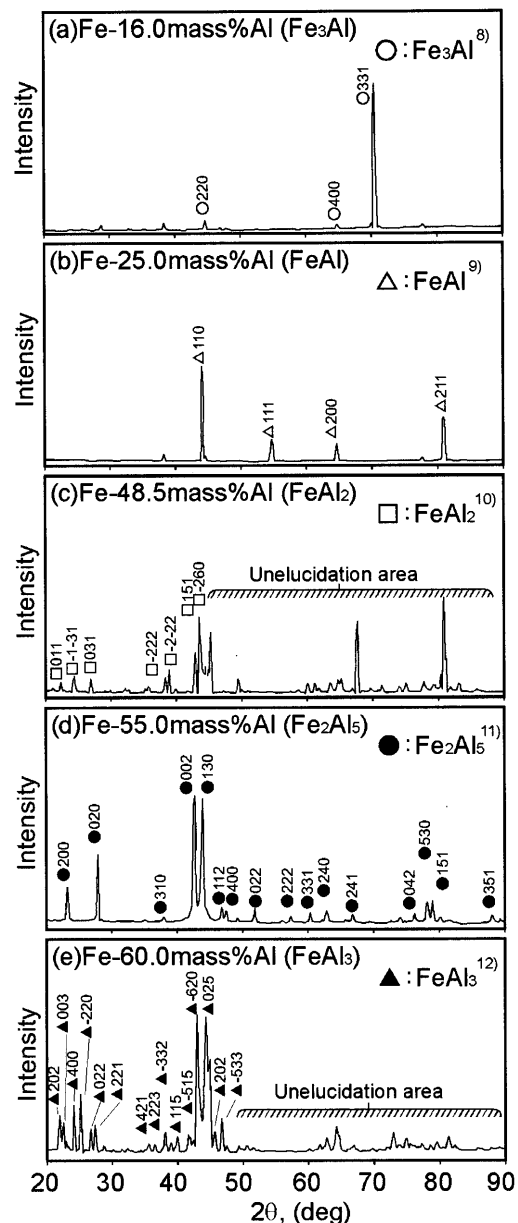


Fig. 2. X-Ray diffraction patterns in Fe-Al alloys with various Al contents.

Table 2. Vickers hardness of Fe-Al intermetallic compounds.

Alloys	Present result (HV)	Referenses (HV)
Fe_3Al	343~347	285~350 ^{2,6,13)}
FeAl	354~394	300~640 ^{2,14,15)}
FeAl_2	793~1055	1030 ²⁾
Fe_2Al_5	950~1050	880~1000 ^{2,14,16)}
FeAl_3	830~1010	990 ^{2,16)}

3.2 アブレシブ摩耗率と研磨紙砥粒直径の関係

Fig. 3, Fig. 4およびFig. 5に Fe_3Al , FeAl , FeAl_2 , Fe_2Al_5 および FeAl_3 の5種類の金属間化合物を研磨紙上の平均砥粒直径 $d=10\sim 48\mu\text{m}$ までの研磨紙上でアブレシブ摩耗させた時の摩耗率 W_R と d との関係を示す。

Fig. 3は押し付け圧力 $P=0.06\text{MPa}$ の時の結果である。用い

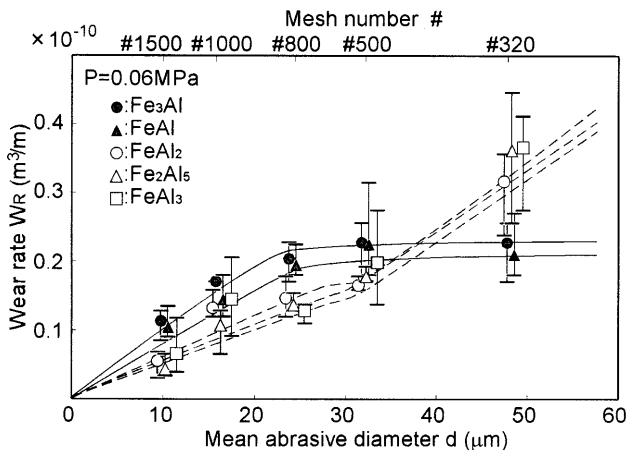


Fig. 3. Wear rate of Fe–Al intermetallic compounds, W_R as a function of mean abrasive grain diameter, d , at an applied force of 0.06 MPa.

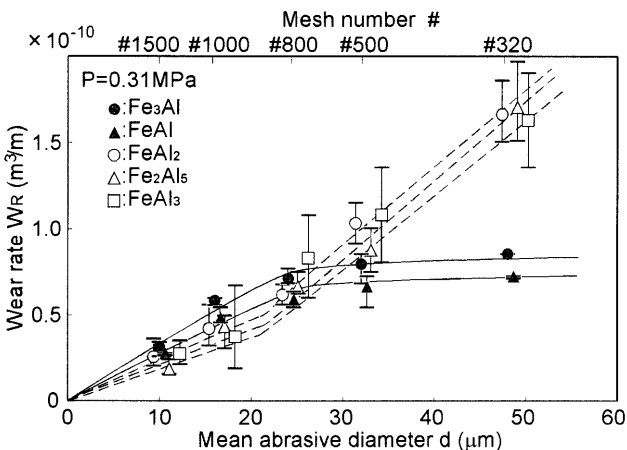


Fig. 4. Wear rate of Fe–Al intermetallic compounds, W_R as a function of mean abrasive grain diameter, d , at an applied force of 0.31 MPa.

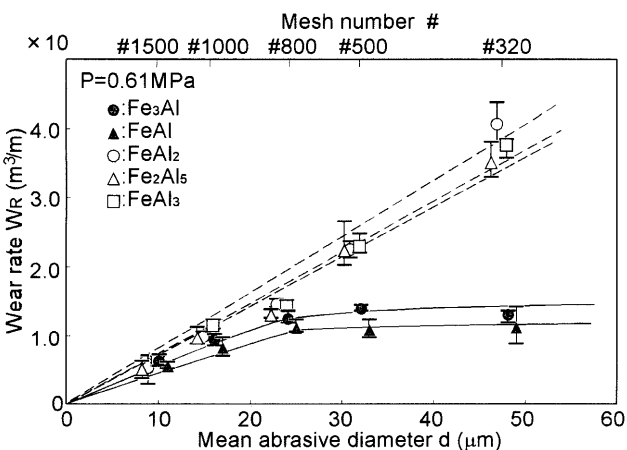


Fig. 5. Wear rate of Fe–Al intermetallic compounds, W_R as a function of mean abrasive grain diameter, d , at an applied force of 0.61 MPa.

た研磨紙上の平均砥粒直径 d が $25 \mu\text{m}$ 以下の場合には、5種類の金属間化合物とともに、 W_R は d が大きくなるに従って大きくなる。ところが、 Fe_3Al および FeAl では、 $d =$

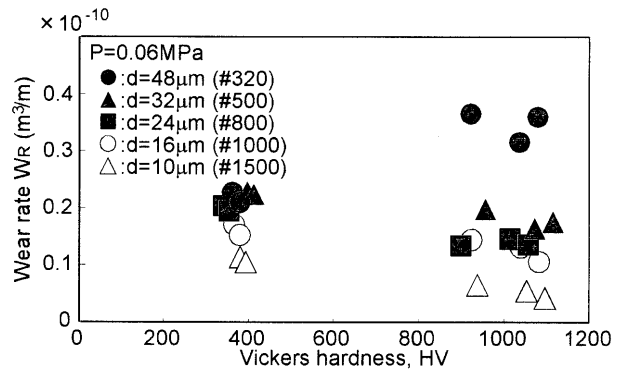


Fig. 6. Relationship between wear rate, W_R , and Vickers hardness of Fe–Al intermetallic compounds, HV, at an applied force of 0.06 MPa.

$25 \mu\text{m}$ 以上で、 W_R が d に対して変化せずほぼ一定となる「臨界砥粒直径効果」が認められる。この効果は金属¹⁷⁻¹⁹⁾で広く認められている現象である。また、 Fe_3Al および FeAl で摩耗量が一定となり始める時の d は $25 \mu\text{m}$ である。しかし、 FeAl_2 、 Fe_2Al_5 および FeAl_3 では、臨界砥粒直径効果は認められず W_R は d に対して増加し続けている。この傾向は押付け圧力 $P=0.31 \text{ MPa}$ の Fig. 4 および $P=0.61 \text{ MPa}$ の Fig. 5 においても同様である。

Fig. 3 および Fig. 4 において、実線で示した Fe リッチな Fe_3Al や FeAl と、点線で示した Al リッチな FeAl_2 、 Fe_2Al_5 および FeAl_3 の結果とでは、 $d=30 \mu\text{m}$ 前後を境に摩耗率 W_R の大小関係が入れ替わっている。すなわち、 $d=30 \mu\text{m}$ 以下では Fe_3Al や FeAl の方が FeAl_2 、 Fe_2Al_5 および FeAl_3 より W_R が大きい。ところが、 $d=30 \mu\text{m}$ 以上では FeAl_2 、 Fe_2Al_5 および FeAl_3 の方が Fe_3Al や FeAl より W_R が大きくなっている。この傾向は押付け圧力 P が 0.06 MPa の場合 (Fig. 3) および $P=0.31 \text{ MPa}$ の場合 (Fig. 4) には認められるが、Fig. 5 の $P=0.61 \text{ MPa}$ では認められず、いずれの平均砥粒直径においても Fe_3Al や FeAl の方が FeAl_2 、 Fe_2Al_5 および FeAl_3 より W_R が大きい。これらの詳細については 3・3 で論ずることにする。

以上の結果から、いずれの押付け圧力においても、 Fe_3Al および FeAl では臨界砥粒直径効果が存在するが、 FeAl_2 、 Fe_2Al_5 および FeAl_3 ではこの効果が現れず、押付け圧力によって材料の硬さに対する耐摩耗性の大小関係が入れ替わる場合があることが明らかとなった。

3・3 アブレイブ摩耗と材料硬さとの関係

材料が硬いほどアブレイブ摩耗し難くなることは多くの金属材料に対して確認されている²⁰⁻²³⁾。ところが、Fig. 3~Fig. 5 において、研磨紙上の平均砥粒直径 d が $30 \mu\text{m}$ 以上の範囲では、押付け圧力によって摩耗率の金属間化合物に対する大小関係が逆転する現象が認められた。そこで、このことを詳細に調べるために、Fig. 3~Fig. 5 の結果を摩耗率 W_R と硬さ HV との関係で再整理した。その結果を Fig. 6~Fig. 8 に示す。

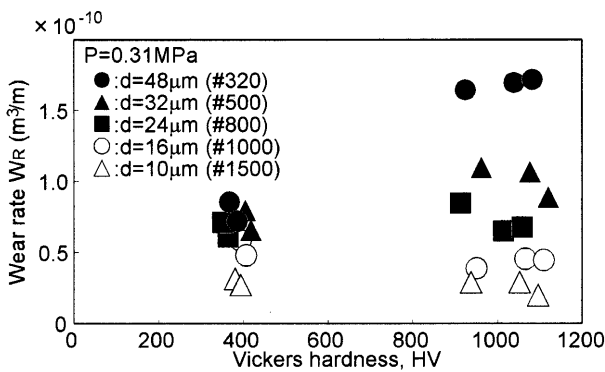


Fig. 7. Relationship between wear rate, W_R , and Vickers hardness of Fe-Al intermetallic compounds, HV, at an applied force of 0.31 MPa.

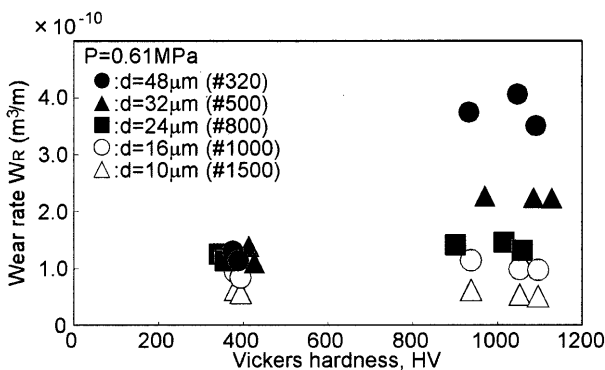


Fig. 8. Relationship between wear rate, W_R , and Vickers hardness of Fe-Al intermetallic compounds, HV, at an applied force of 0.61 MPa.

Fig. 6は押付け圧力 $P=0.06$ MPaでの結果である。結果は、最も粗い研磨紙上の平均砥粒直径 $d=48$ μm の研磨紙に対するもの以外は、HVが高いほど摩耗率は小さくなっている。この傾向は金属材料に対するアブレシブ摩耗のKhruschovの結果²⁰⁾とも一致する。Fig. 7の $d=16$ μm 以下の場合およびFig. 8の $d=10$ μm 以下の場合においても、HVが高いほど摩耗率 W_R は小さくなっている。すなわち、これらの条件下では硬い金属間化合物ほど摩耗し難いことを示している。

一方、Fig. 6の研磨紙上の平均砥粒直径 $d=48$ μm 以上の場合、Fig. 7の $d=24$ μm 以上の場合およびFig. 8の $d=16$ μm 以上の場合には、AlリッチなHV900以上の金属間化合物では、HVが高いほど摩耗率 W_R が増加している。

以上の結果は、Fe-Al系の金属間化合物においては、平均砥粒直径が 30 μm 以下の研磨紙上を、 0.31 MPa以下の押付け圧力で摩耗させた場合には材料が硬いほど摩耗し難くなる。ところが、平均砥粒直径が 30 μm 以上の研磨紙上を摩耗させた場合には、逆に、材料が硬い方が摩耗しやすくなり、その傾向は押付け圧力が大きい場合ほど著しくなることが分かる。

3.4 硬い材料の摩耗量が増加する原因

前節では、研磨紙上の平均砥粒直径が 30 μm 以上では、

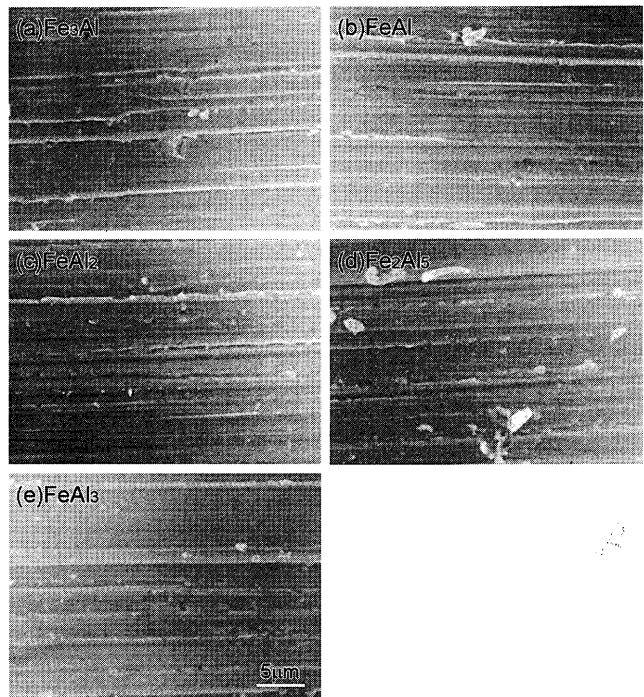


Fig. 9. SEM micrographs of worn surface of Fe-Al intermetallic compounds at $P=0.06$ MPa and $d=10$ μm .

いずれの条件においても、材料が硬い方が摩耗率が大きくなる傾向が認められた。この結果は「材料が硬いほど摩耗し難い」という金属材料で認められている結果²⁰⁻²³⁾とは異なる。そこでこの原因を調べるために、材料が硬いほど摩耗率が小さくなる条件と、材料が硬いほど摩耗率が大きくなる条件で摩耗させた後の、 Fe_3Al 、 FeAl 、 FeAl_2 、 Fe_2Al_3 および FeAl_3 の5種類の金属間化合物の摩耗面を観察した。

Fig. 9は、材料が硬いほど摩耗率が小さくなる条件の例として研磨紙上の平均砥粒直径 $d=10$ μm の研磨紙上で押付け圧力 $P=0.06$ MPaで摩耗させた時のSEM写真である。いずれの金属間化合物の場合にも延性的な材料のアブレシブ摩耗で認められるような^{18,24)}、滑らかな流れ型の研磨溝が認められ、5種類の金属間化合物での差は認められない。このような条件下では、試験片の硬さによって、砥粒の切り込み深さが単純に決まるため、硬い材料ほど摩耗率が小さくなる。

一方Fig.10は材料が硬いほど摩耗率が大きくなる条件の例として研磨紙上の平均砥粒直径 $d=48$ μm の研磨紙上で 0.31 MPaで摩耗させた時のSEM写真である。(a)の Fe_3Al や(b)の FeAl では、延性的な材料で認められるなめらかに掘り起こされた溝が確認できる。これに対して、(c)の FeAl_2 、(d)の Fe_2Al_3 、(e)の FeAl_3 の場合には脆性的に割れている様子が認められる。このことから、粗い研磨紙上ではAlリッチな硬い材料ほど摩耗率が大きくなった原因は、この条件下ではこれらの金属間化合物が脆性的に割れやすいためと思われる。

Alめっき後の 900°C 以上の拡散処理によって、Feリッチ

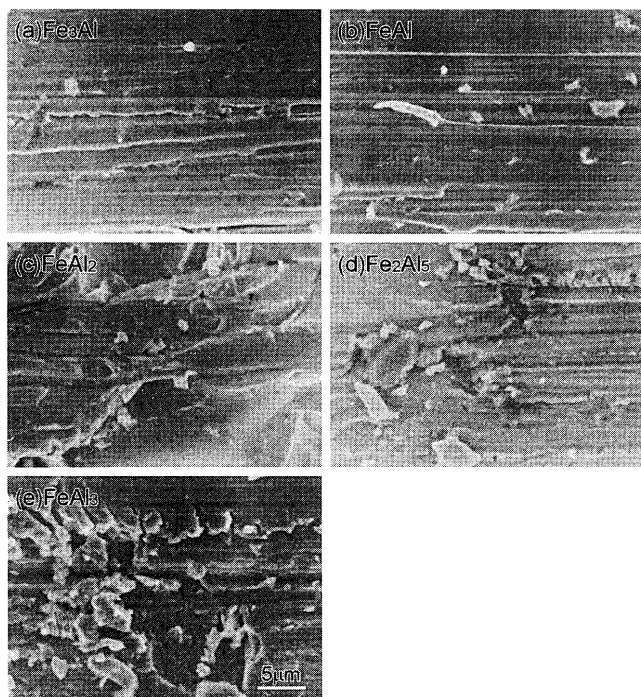


Fig. 10. SEM micrographs of worn surface of Fe-Al intermetallic compounds at $P=0.31$ MPa and $d=48$ μm .

な Fe_3Al や FeAl の層が形成される⁴⁾。このようなアルミナイズ処理材は、Alリッチな Fe_2Al_5 層のみを有する材料よりも3元アブレシブ摩耗特性に優れることが明らかにされているが⁴⁾、この結果も上述の砥粒直径が 30 μm 以上で押付け圧力が高い条件下にあったためと結論できよう。

4. まとめ

Fe-Al系の5種類の金属間化合物 Fe_3Al , FeAl , FeAl_2 , Fe_2Al_5 および FeAl_3 を作製し、これらの金属間化合物と SiC 系研磨紙との間で、押付け圧力 $0.06\sim 0.61$ MPa の範囲で、2元アブレシブ摩耗試験を行い、以下の結果を得た。

(1) Feリッチな Fe_3Al および FeAl は、臨界砥粒直径効果が存在し、摩耗面はいずれの条件下でも滑らかに掘り起こされ、延性的であった。

(2) 押付け圧力が 0.3 MPa 以下で、研磨紙の平均砥粒直径が 30 μm 以下の場合には、硬い材料ほど摩耗率が小さく、いずれの Fe-Al 金属間化合物においても、摩耗面は延性的であった。

(3) 研磨紙上の砥粒直径が 30 μm 以上では、Alリッチな FeAl_2 , Fe_2Al_5 および FeAl_3 では、摩耗面が脆性的な割れを含み、臨界砥粒直径効果が現れず、これより軟らかい Feリッチな金属間化合物より摩耗率が大きくなった。

文 献

- 1) H.Okamoto and A.B.Paul: *Metall. Mater. Trans.*, **2** (1971), 569.
- 2) Y.Li, Y.Zhang and Y.Liou: *J. Mater. Sci.*, **30** (1995), 2635.
- 3) S.Kobayashi and T.Yakou: *Mater. Sci. Eng.*, **A338** (2002), 44.
- 4) T.Sasaki and T.Yakou: *Tetsu-to-Hagané*, to be submitted.
- 5) Binary Alloy Phase Diagrams, ed. by U.R.Kattner and T.B.Massalski, ASM International, Material Park, OH, (1990), 147.
- 6) Y.S.Kim and Y.-H.Kim: *Mater. Sci. Eng.*, **A258** (1998), 319.
- 7) 鮫島実三郎: 物理学実験法, 裳華房, 東京, (1999), 154.
- 8) J.Bradley: *Proc. R. Soc. (London)*, **A**, **136** (1932), 210.
- 9) *Natl. Bur. Stand. Monogr.*, **25** (1981) 18, 5.
- 10) G.Bastin, F.J.J.V.Loo, J.W.G.A.Vrolika and L.R.Wolff: *J. Cryst. Growth*, **43** (1978), 745.
- 11) J.D.Hanawalt, H.W.Rinn and L.K.Frevel: *Anal. Chem.*, **10** (1938), 475.
- 12) Powder Diffraction File Sets 29-30, JCPDS International Centre for Diffraction Data, PA, (1987), 18.
- 13) J.R.Knibloe, R.N.Wright, C.L.Trybus and V.K.Sikka: *J. Mater. Sci.*, **38** (1993), 2040.
- 14) Y.Li, J.Wang, Y.Yin and H.Wu: *Scr. Mater.*, **47** (2002), 851.
- 15) J.Bystrzycki, J.Paszula and R.A.Varin: *Mater. Sci. Eng.*, **A239-240** (1997), 546.
- 16) S.Tomida and K.Nakata: *Surf. Coat. Technol.*, **174-175** (2003), 559.
- 17) R.Gahlin and S.Jacobson: *Wear*, **224** (1999), 118.
- 18) A.Misra and I.Finnie: *Wear*, **65** (1981), 359.
- 19) E.Rabinowicz and A.Mutis: *Wear*, **8** (1965), 381.
- 20) M.M.Khrushov: *Wear*, **28** (1974), 69.
- 21) A.Misra and I.Finnie: *Wear*, **68** (1981), 41.
- 22) R.T.Spurr: *Wear*, **65** (1981), 315.
- 23) J.H.Tylczak: *Wear*, **135** (1990), 305.
- 24) K.-H.Z.Gahr: *Wear*, **74** (1981-1982), 353.