FRM の固体粒子衝突エロージョン特性[†]

宮 崎 則 幸* 船 倉 成 二** 宗 像 健***

Solid Particle Erosion Behavior of FRMs

by

Noriyuki MIYAZAKI*, Seiji FUNAKURA** and Tsuyoshi MUNAKATA***

Experiments were carried out to study the effects of fiber volume contents, type of reinforcement fibers, and impact angle on the solid particle erosion behavior of fiber reinforced metals (FRMs). Three kinds of FRMs were used for the erosion experiments. They were the aluminum 6061 alloy reinforced by β -Si₃N₄ whiskers, the aluminum 1070 alloy unidirectionally reinforced by Si-Ti-C-O fibers and the aluminum reinforced by SiC plain-woven cloths. The erodent particles used in the experiments were SiC abrasives with the diameters of 100 μ m to 150 μ m.

The results obtained are summarized as follows:

- (1) In general, the erosion rate is larger in FRMs than in the corresponding matrix materials.
- (2) In the case where the size of reinforcement fibers is much smaller than that of the particles impacted, almost all the fibers removed from FRM are included in the matrix material removed by the impact of particles. In this case, the difference in erosion rate is small between FRM and the corresponding matrix material.
- (3) In the case where the reinforcement fibers exist in the form of unidirectionally long fibers or cloths, a lot of fibers are removed from the eroded surface of FRM. In this case, FRM has much larger erosion rate than the corresponding matrix material.

Key words: Erosion, FRM, Aluminum, Whisker, Unidirectionally long fiber, Plain-woven cloth

1 緒 言

近年、力学的特性の優れている繊維強化プラスチック (FRP)、繊維強化金属 (FRM) といった先端複合材料が開発されており、各種の分野で多様な形で使用される可能性がある。したがって、これらの材料の破壊・破損形態について多方面から研究を行う必要がある。しかし、気流に同伴された高速微粒子の衝突による複合材料のエロージョンに関する研究は比較的少なく、FRP に関するものがほとんどであり^{1)~11)}、FRM に関する研究は著者の知る限りでは皆無である。FRM のエロージョン特性は、FRP の場合と類似であることが予想されるが、これについても確認されているわけではない。

そこで本研究では、繊維強化複合材料のエロージョンに関する研究の一環として FRM をとりあげ、これまでの FRP についての研究と同様に、固体粒子衝突によるエロージョンにおいて、繊維含有率、繊維の形体、粒子衝突角度などがどのような影響を及ぼすかを明らかにするため、アルミニウム系 FRM についてエロージョン実験を行った。

2 実験方法

2.1 実験装置

エロージョン実験は、エゼクターを通して空気噴流とともに固体粒子を試験片に衝突させるサンドブラスタ

イブの装置を用いた。Fig. 1 に装置の概略図を示す。装置は空気源のエアーコンプレッサー、粒子を定量的に供給するための電磁式フィーダー、粒子を加速し所定の速度で試験片に衝突させるための空気エゼクター、試験片を固定し定められた角度に設定できるホルダーからなる。また、コンプレッサーより発生するオイルミストを除去するためにフィルターを設置してある。

使用した粒子は、市販の SiC 研磨剤 120 メッシュをメッシュ 100 のふるいを上、メッシュ 150 のふるいを下にしてふるいをかけ、粒径をおおむね 100 μ m~150 μ m

Fig. 1. Schematic diagram of erosion test apparatus.

[†] 本報を「複合材料のエロージョン挙動(第4報)」(Erosion Behavior of Composite Materials, IV)とする。また、前報は材料44巻497号175頁(1995年)に掲載済である。

原稿受理 平成6年11月1日 Received Nov. 1, 1994

* 正 会 員 九州大学工学部化学機械工学科 〒812 福岡市東区箱崎, Dept. of Chem. Eng., Kyushu Univ., Higashi-ku, Fukuoka, 812

** 九州大学大学院 〒812 福岡市東区箱崎, Graduate Student, Kyushu Univ., Higashi-ku, Fukuoka, 812

*** 九州大学工学部化学機械工学科 〒812 福岡市東区箱崎, Dept. of Chem. Eng., Kyushu Univ., Higashi-ku, Fukuoka, 812

Table I. Material properties of FRMs.

	Fiber volume content (%)	Fiber length (μm)	Average fiber diameter (μm)	Density (g/cm^3)
$\beta\text{Si}_3\text{N}_4/6061\text{Al}$ A	12	10~30	0.5~1.5	2.75
$\beta\text{Si}_3\text{N}_4/6061\text{Al}$ B	30	10~30	0.5~1.5	2.86
6061Al	—	—	—	2.70
Si-Ti-C-O/1070Al	55	n. a.	8~12	2.51
1070Al	—	—	—	2.71
SiC/Al	33	n. a.	10~15	2.53
Al	—	—	—	2.63

にそろえたものを用いた。空気に対する粒子の混合比はエロージョン速度測定実験で $0.44 \text{ g}/\ell$ になるように電磁式フィーダーからの粒子供給量を調節した。

また、二重回転円盤型測定装置を用いて粒子速度 V_p を測定し、ピトー管により測定される空気速度 V_a との較正曲線を事前に求めておいた。各実験における粒子速度は、空気速度を測定することによりこの較正曲線から決定した。

2・2 実験材料

実験に使用した FRM は、アルミニウム 6061 合金をマトリックス材とし $\beta\text{Si}_3\text{N}_4$ ウィスカーにより強化されたもの ($\beta\text{Si}_3\text{N}_4/6061\text{Al}$)、アルミニウム 1070 合金をマトリックス材とし Si-Ti-C-O 繊維により一方向強化されたもの (Si-Ti-C-O/1070Al) および純アルミニウムをマトリックス材とし平織クロス SiC によって二直交方向に強化されたもの (SiC/Al) の三種類である。 $\beta\text{Si}_3\text{N}_4/6061\text{Al}$ についてはウィスカーの体積分率 V_f が 12% および 30% の二種類を実験に用いた (それぞれ A, B と呼称する)。また、Si-Ti-C-O/1070Al および SiC/Al の繊維体積分率は、それぞれ 55% および 33% である。また、FRM のエロージョン特性と比較対照するため、アルミニウム 6061 合金 (6061Al)、アルミニウム 1070 合金 (1070Al) および純アルミニウム (Al) についても、それぞれエロージョン実験を行った。Table I に使用した材料の特性を示す。

2・3 エロージョン量の測定

固体粒子衝突による試験片のエロージョン量は、試験片の質量減を精密天秤により測定して求めた。実験で得られた質量減 ΔW (mg) と衝突粒子質量 M (g) との関係、すなわち損傷曲線の一例を SiC/Al (粒子速度 $V_p=48.9 \text{ m/s}$, 衝突角度 $\alpha=30^\circ$) の場合について Fig. 2 に示す。損傷曲線は、照射開始から一定の期間は質量損失が負と

Fig. 2. Typical erosion curve for SiC/Al ($V_p=48.9 \text{ m/s}$, $\alpha=30^\circ$).

なったり、質量変化が小さく質量減の一定でない潜伏期と、質量減が粒子衝突質量に対して直線的に増加していく定常期とから成る。この定常期の質量変化 ΔW を衝突粒子質量 M に対して最小二乗近似により傾きを求め、各試料の密度 ρ を用いて体積減になおしたものをエロージョン速度 R (mm^3/g) と定義した。また、FRM のエロージョン速度 R_{FRM} をマトリックスのみの材料のエロージョン速度 R_{Matrix} で除したものを比エロージョン速度 $R_{\text{FRM}}/R_{\text{Matrix}}$ と定義した。

3 実験結果

実験は、適当な粒子速度 $V_p=33.1 \text{ m/s}$, 54.5 m/s に対して衝突粒子と試験片とのなす角 $\alpha=15^\circ$, 30° , 45° , 60° , 90° について行った。また、一方向強化 FRM (Si-Ti-C-O/1070Al) については、衝突粒子と繊維配向方向とのなす角度 $\beta=0^\circ$ (粒子が繊維配向方向に平行に衝突), $\beta=90^\circ$ (粒子が繊維配向方向に直角に衝突) の条件で実験を行った。

$\beta\text{Si}_3\text{N}_4/6061\text{Al}$ のエロージョン速度 R の衝突角度依存性を、マトリックス材 6061Al の結果とともに粒子速度 $V_p=54.5 \text{ m/s}$ の場合について Fig. 3 に示す。また、比エロージョン速度 $R_{\text{FRM}}/R_{\text{Matrix}}$ を Fig. 4 に示す。Fig. 3 より FRM, マトリックス材ともに $\alpha=30^\circ$ 付近でエロージョン速度のピークとなり、高角度になるに従ってエロージョン速度が小さくなるという延性的な性質を示している。また、 $V_f=12\%$ の場合、 $\alpha=30^\circ$ 付近を除いてマトリックス材のみの場合とさほど変わらない値を示し

Fig. 3. Relation between erosion rate and impact angle α for $\beta\text{Si}_3\text{N}_4/6061\text{Al}$ ($V_p=54.5 \text{ m/s}$).

Fig. 4. Relation between $R_{\text{FRM}}/R_{\text{Matrix}}$ and impact angle α for $\beta\text{Si}_3\text{N}_4/6061\text{Al}$ ($V_p=54.5 \text{ m/s}$).

Fig. 5. Relation between erosion rate and impact angle α for Si-Ti-C-O/1070Al ($V_p = 54.5 \text{ m/s}$).

Fig. 6. Relation between $R_{\text{FRM}}/R_{\text{Matrix}}$ and impact angle α for Si-Ti-C-O/1070Al ($V_p = 54.5 \text{ m/s}$).

たが, $V_f = 30\%$ の場合になると全体的にマトリックス材のみの場合より大きな値を示している。しかし, Fig. 4 をみると $V_f = 30\%$ の場合も比エロージョン速度は 1 に近く, また衝突角度による違いもみられない。

Si-Ti-C-O/1070Al のエロージョン速度 R の衝突角度依存性を, マトリックス材 1070Al の結果とともに粒子速度 $V_p = 54.5 \text{ m/s}$ の場合について, 衝突粒子に対する繊維配向角度 β 別に Fig. 5 に示す。また, 比エロージョン速度 $R_{\text{FRM}}/R_{\text{Matrix}}$ を Fig. 6 に示す。Fig. 5 よりマトリックス材のみの場合はエロージョン速度のピークが $\alpha = 30^\circ$ 付近にあるのに対して, FRM の場合はピークが $\alpha = 45^\circ$ 付近にあり高角度側にシフトしている。これは, 繊維の体積含有率が 55% と大きいため, 繊維のぜい性的な性質の影響が現れたと考えられる。また, Fig. 6 をみても高角度になるに従って比エロージョン速度が大きくなっており, 繊維のぜい性的な性質の影響が大きいことがわかる。衝突粒子と繊維配向方向のなす角度 $\beta = 0^\circ, 90^\circ$ の比較については FRP と同様に, $\beta = 0^\circ$ の場合より $\beta = 90^\circ$ の場合の方が全体的にエロージョン速度が大きい。

SiC/Al のエロージョン速度 R の衝突角度依存性をマトリックス材 Al の結果とともに粒子速度 $V_p = 33.1 \text{ m/s}$ の場合について Fig. 7 に示す。また, 比エロージョ

Fig. 7. Relation between erosion rate and impact angle α for SiC/Al ($V_p = 33.1 \text{ m/s}$).

Fig. 8. Relation between $R_{\text{FRM}}/R_{\text{Matrix}}$ and impact angle α for SiC/Al ($V_p = 33.1 \text{ m/s}$).

ン速度 $R_{\text{FRM}}/R_{\text{Matrix}}$ を Fig. 8 に示す。Fig. 7 より FRM, マトリックス材ともに $\alpha = 30^\circ$ 付近でエロージョン速度のピークとなり, 高角度になるに従ってエロージョン速度が小さくなるという延性的な性質を示している。また, FRM の方が全体的にエロージョン速度が大きく, ピークについてはわずかに高角度側にシフトしている。しかし, Si-Ti-C-O/1070Al と比べると, 繊維の体積含有率が小さいために比エロージョン速度, エロージョン速度の高角度側へのシフト量はともに小さい。

エロージョン実験終了後に, 走査型電子顕微鏡 (SEM) によりエロージョン面の写真を, また光学式金属顕微鏡により試験片断面の写真を撮影した。

Fig. 9 に $\beta\text{Si}_3\text{N}_4/6061\text{Al B}$ の $V_p = 54.5 \text{ m/s}$, $\alpha = 30^\circ$

Fig. 9. Eroded surface of $\beta\text{Si}_3\text{N}_4/6061\text{Al B}$ ($V_p = 54.5 \text{ m/s}$, $\alpha = 30^\circ$).

の条件で実験を行った試験片のエロージョン面の SEM 写真を示す。粒子の衝突に伴う切削効果による大きな表面変形は多数みられるが、強化繊維が離脱したような痕跡は認められない。したがって、この場合には強化繊維が損傷表面から優先的に離脱することは少なく、強化繊維の寸法が衝突粒子のそれに比べて非常に小さいので、表面からはく離するマトリックス材の中に含まれる形で強化繊維が離脱していくと考えられる。Fig. 4 に示すような $\beta\text{Si}_3\text{N}_4/6061\text{Al}$ の場合に比エロージョン速度が 1 に近い、すなわち FRM のエロージョン速度がマトリックス材のそれに近いのは、このような理由によるものと考えられる。しかし、繊維の体積含有率が高くなると、比エロージョン速度が 1 より大きくなるのは、ある程度損傷表面から繊維が離脱するメカニズムが存在していることを示唆している。

Fig. 10 に一方向強化 FRM である Si-Ti-C-O/1070Al の $V_p=54.5\text{ m/s}$, $\alpha=30^\circ$, $\beta=90^\circ$ の条件におけるエロージョン面の SEM 写真を示す。この場合には、エロージョンによる損傷表面から強化繊維が離脱した痕跡として、ほぼ縦方向に直線状の模様がみられる。このようなメカニズムが存在することにより、Fig. 6 に示すように FRM の比エロージョン速度が 1 よりかなり大きくなる。すなわち、FRM のエロージョン速度はマトリックス材のそれより大きくなると考えられる。

Fig. 11 (a), (b) に平織クロス SiC により強化された FRM SiC/Al の $V_p=48.9\text{ m/s}$, $\alpha=30^\circ$ の条件におけるエロージョン面の SEM 写真を示す。Fig. 11 (b) は、

Fig. 10. Eroded surface of Si-Ti-C-O/1070Al ($V_p=54.5\text{ m/s}$, $\alpha=30^\circ$, $\beta=90^\circ$).

Fig. 11 (a) 中の縦に直線状の模様が入っている部分を拡大した写真である。Fig. 11 (b) より、明らかに繊維が離脱した痕跡が認められる。したがって、Fig. 11 (a) に見られる縦、横に入っている直線状の模様は繊維が離脱した跡を示しているが、この部分は他の部分よりもくぼんでいることがわかる。このことは、マトリックスの部分よりも強化繊維の部分が大きくエロージョンを受けていることを示している。したがって、この FRM の場合にも Fig. 8 に示すように、比エロージョン速度が 1 より大きくなっている。なお、繊維部分がマトリックス部分よりも大きなダメージを受けて大きくくぼむという現象は $\alpha=90^\circ$ の場合により顕著に見られる。Fig. 12 (a), (b) に $V_p=48.9\text{ m/s}$, $\alpha=90^\circ$ の条件でのエロージョン面の SEM 写真と、試験片断面の光学顕微鏡写真をそれぞれ

(a) 50×

(b) 500×

Fig. 11. Eroded surface of SiC/Al ($V_p=48.9\text{ m/s}$, $\alpha=30^\circ$).

(a) Surface view.

(b) Cross-sectional view.

Fig. 12. Eroded surface of SiC/Al ($V_p=48.9\text{ m/s}$, $\alpha=90^\circ$).

示す。Fig. 12 (a)に見られる大きなクレーター状の部分は、Fig. 12 (b)からわかるように強化繊維がマトリックス部分よりも優先的にダメージを受けて離脱した部分である。強化繊維 SiC はぜい性的な性質を示すため、 $\alpha=90^\circ$ で SiC 繊維のエロージョン速度が最大となり、このような大きなクレーターが $\alpha=90^\circ$ で生じたものと考えられる。

4 考 察

上記の各 FRM について、同じ程度の繊維の体積含有率 V_f を持った FRM あるいは FRP の比エロージョン速度を比較し、繊維の形体あるいは繊維とマトリックス間の界面結合が比エロージョン速度に及ぼす影響について考察する。なお、できるだけ粒子速度 V_p が近いものを比較の対照とする。

Fig. 13 に繊維の体積含有率 V_f が同じ程度の $\beta\text{Si}_3\text{N}_4$ ウィスカーで強化された FRM $\beta\text{Si}_3\text{N}_4/6061\text{Al B}$ ($V_f=30\%$, $V_p=54.5\text{ m/s}$)と平織 SiC クロスで強化された FRM SiC/Al ($V_f=33\%$, $V_p=48.9\text{ m/s}$)について比エロージョン速度の比較を示す。この結果は、繊維の形体の差を表していると考えられる。すなわち、 $\beta\text{Si}_3\text{N}_4/6061\text{Al}$ は衝突粒子に比べてかなり小さいウィスカーがマトリックス中に分散している形体であるので、強化材部分が優先的に損傷を受けて固まりとなってマトリックス材から離脱するという現象は起こらないと考えられる。しかし、平織クロスの形で強化材が入っている SiC/Al の場合は、Fig. 12 に示した写真からわかるように、強化材部分が優先的にマトリックス材から離脱している。エロージョン特性の観点からは、衝突粒子に比べて小

Fig. 13. Comparison between $\beta\text{Si}_3\text{N}_4/6061\text{Al}$ and SiC/Al.

Fig. 14. Comprison between SiC/Al and GF/UP.

な寸法の強化材をマトリックス材中に分散させることが有効であることがわかる。

Fig. 14 に繊維の体積含有率 V_f が同じ程度の平織 SiC クロスで強化された FRM SiC/Al ($V_f=33\%$, $V_p=33.1\text{ m/s}$)と、8 枚朱子織ガラスクロスで強化した不飽和ポリエステル系 FRP GF/UP⁷⁾ ($V_f=32\%$, $V_p=35.0\text{ m/s}$)について、比エロージョン速度の比較を示す。この図より SiC/Al FRMの方が GF/UP FRPよりも比エロージョン速度が大きいことがわかる。著者らによるこれまでの研究により、界面結合が強いほど耐エロージョン性が良いことがわかっている。したがって、両者ともクロスの形で強化材が入っていることを考えると、両者の差異は界面結合の強さの程度を反映したものと考えられている。すなわち、すべての場合に一般化することはできないが、本論文で比較した FRM と FRP では、後者の FRPの方が前者の FRMより相対的にマトリックス材と強化材との界面結合が強いと断定できる。

5 結 言

アルミニウムをマトリックス材とする三種類の FRM について、固体粒子衝突によるエロージョン実験を行い、以下の結果を得た。

(1) いずれの場合も、マトリックス材のみの場合よりも FRMの方がエロージョン速度が大きい。これは、これまで行ってきた FRPの場合と同じである。

(2) 強化繊維の寸法が衝突粒子の寸法に比べて小さい場合には、エロージョン表面から繊維が離脱するメカニズムよりも、表面からはく離するマトリックス材中に含まれる形で強化繊維が離脱するメカニズムが支配的であり、FRMのエロージョン速度とマトリックス材のそれとの差は小さい。

(3) 一方向強化長繊維、あるいはクロスの形で強化繊維が含有している場合には、エロージョン表面からの繊維の優先的な離脱が生じ、FRMの方がマトリックス材のみの場合より著しくエロージョン速度は大きい。

参 考 文 献

- 1) G. T. Tilly, Wear, **14**, 63 (1969).
- 2) G. T. Tilly and W. Sage, Wear, **16**, 447 (1970).
- 3) J. Zahavi and G. W. Schmitt, Wear, **71**, 179 (1981).
- 4) K. V. Pool, C. K. H. Dharan and I. Finnie, Wear, **107**, 1 (1986).
- 5) P. J. Mathias, W. Wu, K. C. Goretta, J. L. Routbort, D. P. Groppi and K. R. Karasek, Wear, **135**, 161 (1989).
- 6) T. H. Tsiang, Testing Methods for Design Allowables for Fibrous Composites; 2nd Volume, ASTM STP 1003, 55 (1989).
- 7) 宮崎則幸, 重國智文, 宗像 健, 武田展雄, 材料, **40**, 205 (1991).
- 8) K. R. Karasek, K. C. Goretta, D. A. Helberg and J. L. Routbort, J. Mat. Sci. Let., **11**, 1143 (1992).
- 9) M. Roy, B. Vishwannathan and G. Sundararajan, Wear, **171**, 149 (1994).
- 10) 宮崎則幸, 濱尾聡和, 宗像 健, 材料, **43**, 457 (1994).
- 11) 宮崎則幸, 濱尾聡和, 宗像 健, 材料, **44**, 175 (1995).
- 12) G. Zambelli and A. V. Levy, Proc. Corrosion/Erosion of Coal Conversion System Materials Conference, 480 (1979).