

## セラミックス粒子複合配管部材のエロージョン

技術報告

森田 喜保\*・河嶋 寿一\*・瀬口 学\*<sup>2</sup>

## Erosion of Ceramic Particle Composite Products for Pipe Transportation

Yoshiyasu MORITA, Hisakazu KAWASHIMA and Manabu SEGUCHI

## Synopsis :

The erosion of the metal-ceramic particles dispersion composite materials was experimented for the purpose of improving the erosion resistance of the elbow for the transportation line of solid particles. The composite flat plates were made by casting method adding the alumina particles of 3 mm diameter into each matrix. The effects of the impingement particle and the impingement angle on the erosion of the composite were investigated. It was made clear that the erosion ratio of the composite was decreased to a half of the average value of the matrix only. Then, the improvement of the erosion resistance of the trial composite elbow was confirmed.

Key words : composite material ; ceramics ; erosion ; maintenance ; mechanical testing ; wear.

## 1. 緒 言

鉄鋼業、鋁業、窯業等における設備は、大型化、効率化に対する要求から、苛酷な条件下で使用されている。設備の耐久性は、疲労、腐食、摩耗等の種々の要因により決定される。これらの要因のうち、摩耗については、石炭の粉碎設備、焼結鋁粉を用いる高炉溶鉄の脱珪処理設備等における固体粒子の輸送管路において、流れの方向が変わる曲管や分岐管の内面が固体粒子の衝突により激しいエロージョンを受けることが多い。これらの部分の寿命は直管部分に比べて短いため、耐摩耗性に優れた高 Cr 鋳鉄やセラミックスが用いられている。しかし、これらの材料を用いても、固体粒子の種類や衝突角度によっては、かならずしも十分な耐エロージョン性が得られていない。金属やセラミックス単体のエロージョンの検討は従来より多く行われてきたが<sup>1)~11)</sup>、それらの複合材のエロージョンに関する報告は少ない<sup>12)13)</sup>。

本報では、セラミックスの耐摩耗性に着目して、マトリックス中にセラミックス粒子を複合<sup>14)</sup>した平板について固体粒子の衝突によるエロージョンの基本特性を調査した。更に、セラミックス粒子複合配管エルボを試作し、その耐エロージョン性を明らかにした。

## 2. 実験方法

## 2.1 実験装置

Fig. 1 に示す装置において、高速の空気流により衝突固体粒子に速度を与えた。ノズルから噴射された粒子は衝突角度  $\theta$  で平板の供試料に衝突した後、回収タンクに導かれ、再びノズルに供給される。衝突角度は、供試料の固定台を傾斜させることにより調節した。配管エルボの摩耗実験では、Fig. 2 に示すように、エルボに接続した垂直鋼管内に粒子を噴射した。

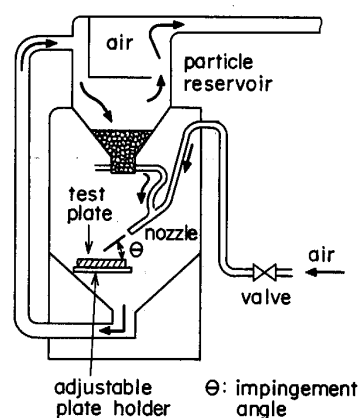


Fig. 1. Test apparatus for flat plate specimens.

平成元年 4 月本会講演大会にて発表 昭和 63 年 12 月 5 日受付 (Received Dec. 5, 1988)

\* 住友金属工業(株)鉄鋼技術研究所 工博 (Iron & Steel Research Laboratory, Sumitomo Metal Industries, Ltd., 1-3 Nishinagahondori Amagasaki 660)

\*2 住金テクノリサーチ(株) (Sumikin Techno Research, Ltd.)

## 2.2 供試料

本実験で用いたマトリックスおよびセラミックス粒子の成分と硬度を Table 1 に示した。これらのマトリックスの単体およびセラミックス粒子との複合材は、すべて鑄造により製造した。マトリックス A, B, C はそれぞれ、普通鋼鑄鋼、普通鑄鉄、27% Cr 鑄鉄に相当する化学成分を有し、セラミックス粒子は直径 3 mm のアルミナ粒子を用いた。

平板状供試料の寸法は、マトリックス単体および複合材ともに幅 40 mm、長さ 50 mm、厚さ 10 mm とし、表面は鑄放し状態で実験に用いた。平板状複合材の表面は、セラミックス粒子の一部がわずかに露出するだけで、ほぼ全面がマトリックスで覆われていた。

管状複合材エルボの概略を Fig. 3 に示した。内径 25 mm、肉厚 8 mm、曲率半径 60 mm の 90° エルボである。エルボはロストワックス法を用いて製造した。鑄造時には、鑄型に充てんされたセラミックス粒子間に、溶湯が十分に浸透する必要があるため、粒子を含む鑄型を 1200°C まで加熱した。エルボの端面にはフランジを溶

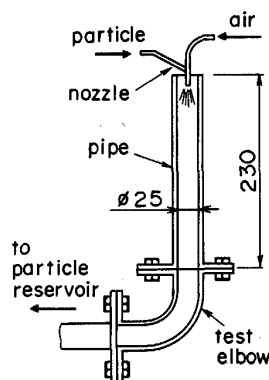


Fig. 2. Test method for elbow specimens.

接またはねじにより取り付けた。なお、セラミックス粒子の体積率は、平板状複合材で約 60%、管状複合材エルボで約 58% であった。

実験に用いた衝突固体粒子は、市販の珪砂、スチールグリット、および高炉溶銑の脱珪処理に用いられる焼結鉍粉の 3 種類である。これらの粒子の特性を Table 2 に示した。

## 2.3 実験条件

平板状供試料の摩耗実験は、ノズル径 7 mm、空気圧 0.294 MPa、ノズル先端から供試料までの距離 50 mm の条件で行った。粒子の衝突角度は、配管エルボにおける衝突角度を想定して、30°、45°、60° の 3 種類とした。ノズルから噴射されて拡がった粒子が、平板状供試料の表面に衝突する領域の形状はだ円で、その面積は、30°、45°、60° の衝突角度に対して、それぞれ 700、460、370 mm<sup>2</sup> となった。1 回の連続噴射時間は 15 min とし、噴射前後の供試料の重量変化を測定した。粒子は 15 min ごとに新しい粒子に交換した。合計 60 min の噴射後には、供試料の重量変化に加えて最大摩耗深さを測定した。

エルボ供試料の摩耗実験では、ノズル径 7 mm、空気圧 0.294 MPa で、2.1 節で述べたように直管内に珪砂を噴射した。Fig. 2 において、直管部の長さを管内径の

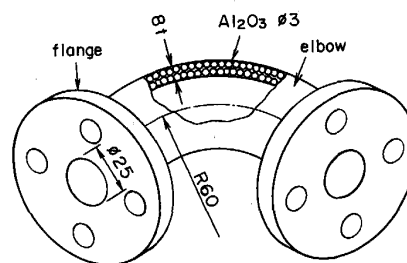


Fig. 3. Elbow specimen.

Table 1. Chemical composition and Vickers hardness of materials.

Materials	Chemical composition (wt%)											Vickers hardness (HV)	
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Fe	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>		
Matrix	A	0.21	0.45	0.51	0.02	0.02	—	—	—	Bal.	—	—	182
	B	2.80	2.57	0.71	0.02	0.02	—	—	—	Bal.	—	—	261
	C	3.21	1.21	0.69	0.01	0.01	1.03	26.23	0.49	Bal.	—	—	591
Particle	—	—	—	—	—	—	—	—	—	91	7	970	

Table 2. Experimental condition and properties of impingement particles.

	Material	Vickers hardness (HV)	Median particle diameter (μm)	Fed weight* (g/min)
a	Silica sand	1 100	0.65	660
b	Sintered steel grit	842	0.20	630
c	Steel grit	790	0.30	1 700

\* Air pressure : 0.294 MPa Nozzle diameter : 7 mm

約9倍とし、ノズルより噴射されて拡がった粒子の管断面内での分布がほぼ一様となった状態で、粒子がエルボに衝突するようにした。一回の連続噴射時間は、最初は1h、その後は2hとし、各噴射時間後にはエルボの重量変化の測定と珪砂の交換を行った。なお、連続噴射中にも15minごとに新しい珪砂を追加して、粒度を一定に保つように努めた。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 平板状複合材の摩耗特性

実験結果の一例として、マトリックスAの単体およびセラミックス粒子との平板状複合材に、珪砂、焼結鉍粉、スチールグリットを衝突させたときに得られた、摩耗重量と噴射時間との関係を、それぞれFig. 4, 5, 6

に示した。マトリックス単体の摩耗重量は衝突粒子の種類によらず、噴射時間にほぼ比例して増加している。平板状複合材については、最初の15minは供試料の表面を履っているマトリックスの摩耗により、摩耗重量が比較的多い。しかし、セラミックス粒子が平板状複合材の表面から深さで約1mm現れた後には、セラミックスの優れた耐摩耗性の影響により、摩耗重量の時間的増加率は低下する。

衝突角度の影響については、マトリックスA単体の摩耗重量は、衝突角度が減少するにつれて増加する。これは、マトリックスAが衝突角度の小さい場合の切削摩耗<sup>11)</sup>に弱いことを示している。一方、平板状複合材の摩耗重量は、衝突角度が小さい30°の場合には、15min噴射後の摩耗重量の時間的増加率が低下するため、

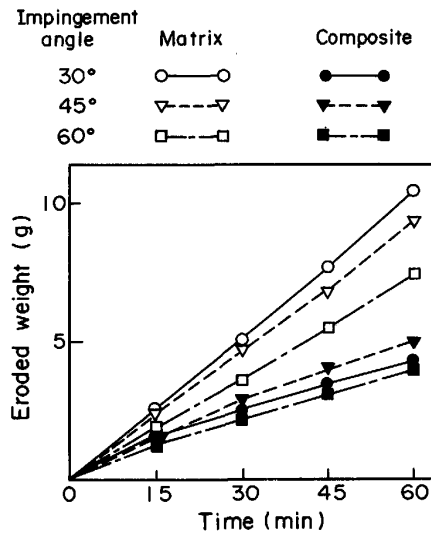


Fig. 4. Eroded weight of the matrix A and its composite by silica sand.

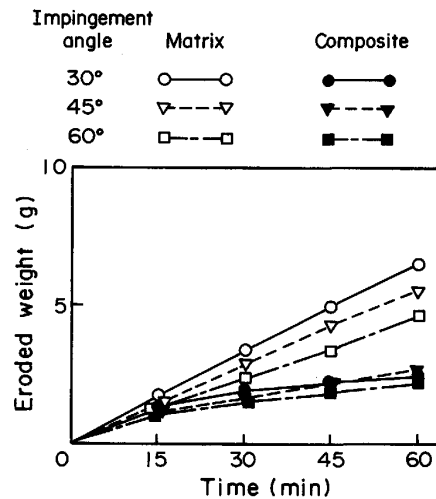


Fig. 6. Eroded weight of the matrix A and its composite by steel grit.

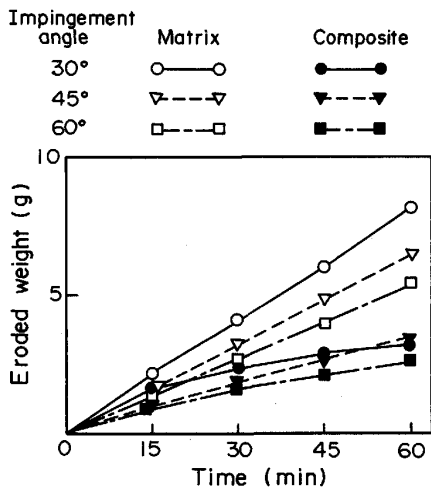


Fig. 5. Eroded weight of the matrix A and its composite by sintered steel grit.

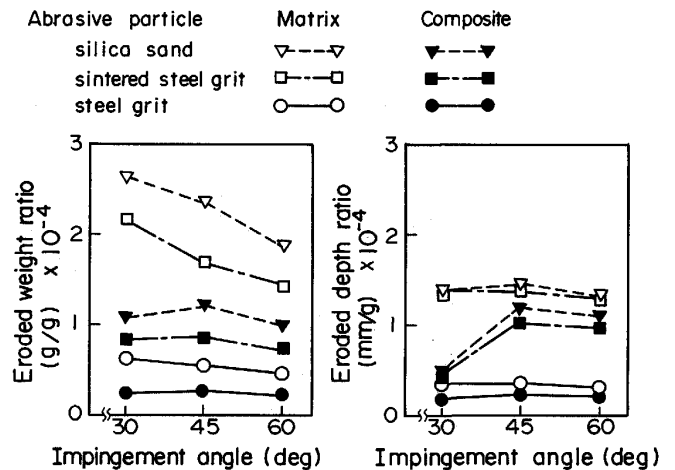


Fig. 7. Effect of the impingement angle on the erosion of the matrix A and its composite.

60 min 後には衝突角度が 60°, 30°, 45° の順に多くなる。平板状複合材の摩耗重量の時間的变化は、45~60 min の噴射時間後には、ほぼ一定となり、その後の摩耗重量と衝突角度との関係は変化しないと判断される。そこで、噴射時間 60 min 後における平板状供試料の摩耗重量および最大摩耗深さをを用いて、摩耗重量率および最大摩耗深さ率をそれぞれ式 (1), (2) で定義し、これらと衝突角度との関係を Fig. 7 に示した。

$$\text{摩耗重量率} = \text{供試料の摩耗重量} / \text{衝突粒子の全噴射重量} \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{最大摩耗深さ率} = \text{供試料の最大摩耗深さ} / \text{衝突粒子の全噴射重量} \dots\dots\dots (2)$$

平板状複合材の摩耗重量率がマトリックス単体の摩耗重量率から減少する割合は、衝突角度の小さい 30° の場合が大きい。この理由としては、平板状複合材中のセラミックス粒子の耐切削摩耗性がマトリックス単体より優れていることがあげられる。一方、マトリックス単体の最大摩耗深さ率は、衝突角度の影響を受けにくく、ほぼ一定の値を示している。この理由としては、衝突角度が大きくなるにつれて、平板状マトリックス単体に水平な粒子の運動エネルギーによる切削摩耗深さは減少するが、平板状マトリックス単体に垂直な粒子の運動エネルギーによる変形摩耗<sup>11)</sup> 深さが増加するためと考えられる。平板状複合材の最大摩耗深さ率は、衝突角度が小さくなるにつれて低下している。これは、前述のようにセ

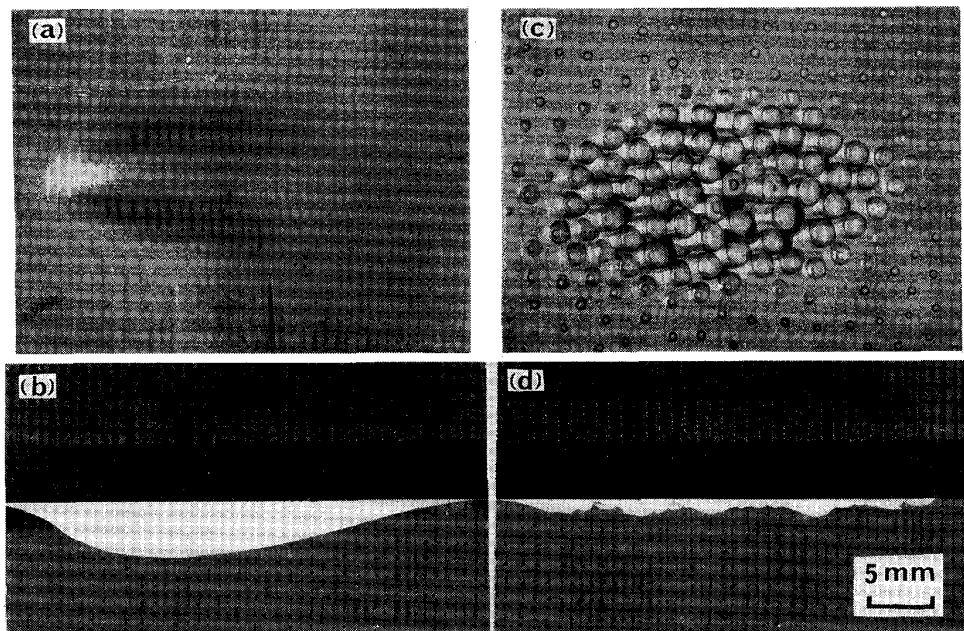
ラミックス粒子による平板状複合材の耐切削摩耗性が向上するとともに、衝突粒子の平板状複合材に垂直な運動エネルギーが減少するためと考えることができる。

摩耗状況の一例を Photo. 1 に示した。平板状複合材の最大摩耗深さは、セラミックス粒子の影響により、マトリックス単体に比べて大きく減少していることがわかる。

3.2 摩耗量に及ぼす諸因子の影響

3.2.1 マトリックス単体の摩耗量

複合材の摩耗量に及ぼすマトリックスの影響を検討するため、衝突粒子ごとに、60 min 噴射後のマトリックス単体の摩耗重量率および最大摩耗深さ率と衝突角度との関係を求め、Fig. 8~10 に示した。マトリックス単体の摩耗重量率は全般的にマトリックス B, A, C の順に減少する。マトリックス B はマトリックス A よりも硬度は Table 1 のように約 1.5 倍と大きい、衝撃値は Table 3 に示すようにマトリックス A の約 1/30 と非常に小さい。したがって、衝撃破壊による摩耗の影響により、マトリックス B 単体の摩耗重量率はマトリックス A 単体の値より大きくなったものと考えられる。マトリックス C の硬度はマトリックス A, B のみならず、焼結鉍粉およびスチールグリットの硬度より高いため、これらの衝突粒子に対して、マトリックス C 単体は優れた耐摩耗性を示す。しかし、Fig. 8 において珪砂を角度 45~60° で衝突させた場合には、マトリッ



(a) Surface of the matrix A (b) Cross section of the matrix A (c) Surface of the composite A (d) Cross section of the composite A

Photo. 1. Eroded plates by silica sand with 30° impingement angle after 1 h test.

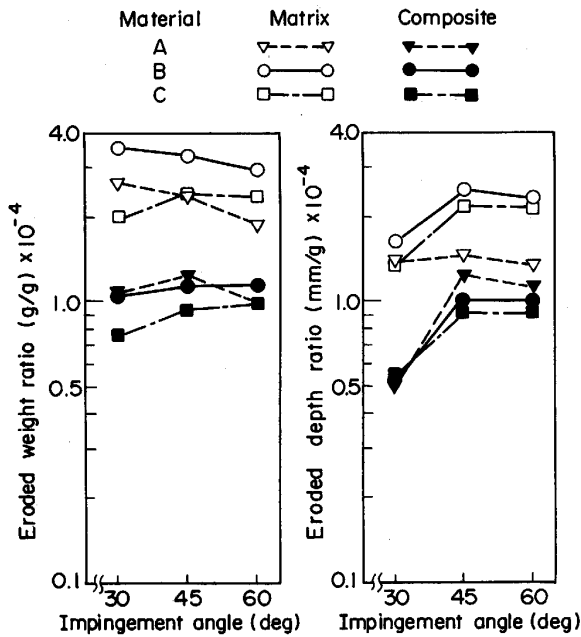


Fig. 8. Effect of target materials on erosion by silica sand.

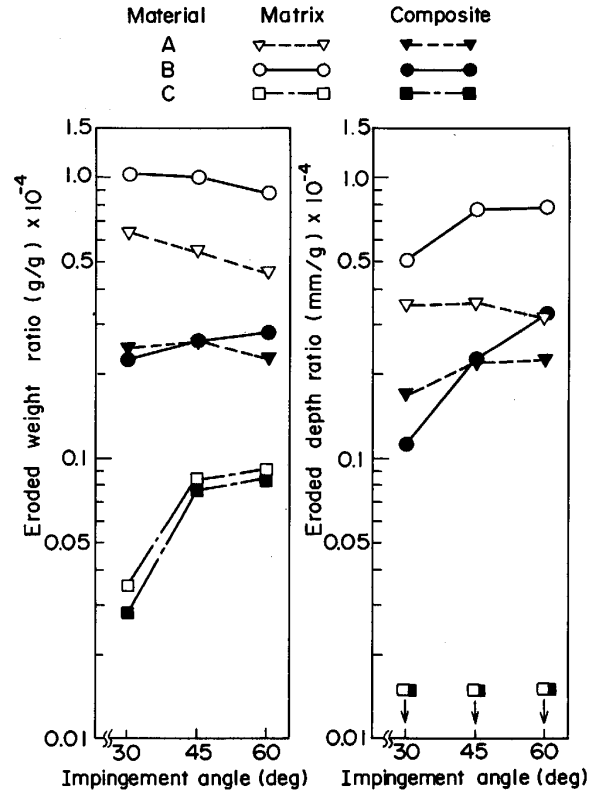


Fig. 10. Effect of target materials on erosion by steel grit.

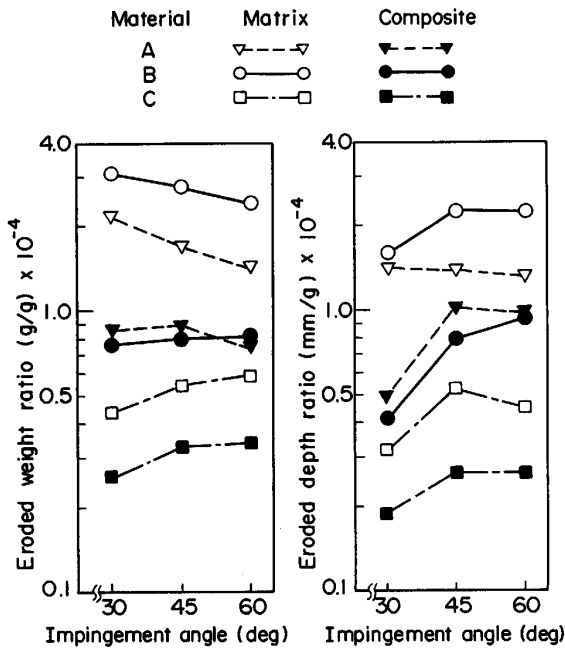


Fig. 9. Effect target materials on erosion by sintered steel grit.

Table 3. Charpy test results.

Specimen		Impact value (J/m <sup>2</sup> )
Matrix	A	$19.9 \times 10^{-5}$
	B	$0.60 \times 10^{-5}$
	C	$0.18 \times 10^{-5}$
Composite	A	$2.28 \times 10^{-5}$
	B	$0.11 \times 10^{-5}$
	C	$0.16 \times 10^{-5}$

クス C 単体の摩耗重量率は増加し、マトリックス A 単体の値よりも大きくなる。マトリックス C はマトリックス B と同じく鋳鉄で、衝撃値が Table 3 のように小さいため、衝突角度が大きい場合における、硬度の高い珪砂の運動エネルギーに耐えきれずに、衝撃破壊を生じたと考えることができる。

マトリックス単体の最大摩耗深さ率とマトリックス材質との関係についても、摩耗重量率の場合と同様の傾向がみられる。すなわち、全般的にはマトリックス B, A, C の順に最大摩耗深さ率は減少するが、Fig. 8 に示すように、マトリックス C 単体に珪砂を角度 45~60° で衝突させた場合の最大摩耗深さ率は、マトリックス A 単体の値よりも大きくなっている。

### 3.2.2 複合材の摩耗量

セラミックス粒子がマトリックスの耐摩耗性を向上させる効果を検討するために、マトリックス単体の摩耗量と複合材の摩耗量との関係を Fig. 11, 12 にまとめた。以下ではマトリックス A, B, C とセラミックス粒子とを複合化して得られた供試料を、それぞれ複合材 A, B, C と呼ぶ。Fig. 11 に示すように、複合材の摩耗重量率は、複合材 A, C, B の順に、マトリックス単体の値の 50~25% に低下している。3.2.1 項で述べたように、

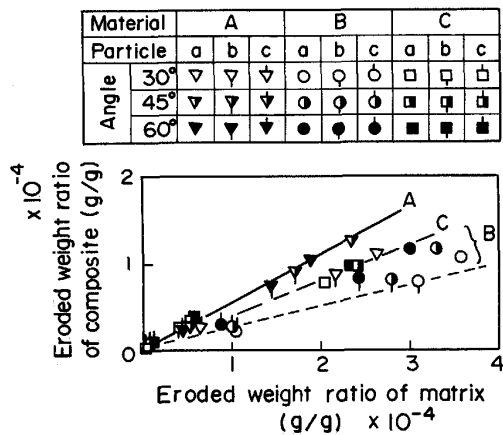


Fig. 11. Relationship between the eroded weight ratio of the matrix and that of the composite.

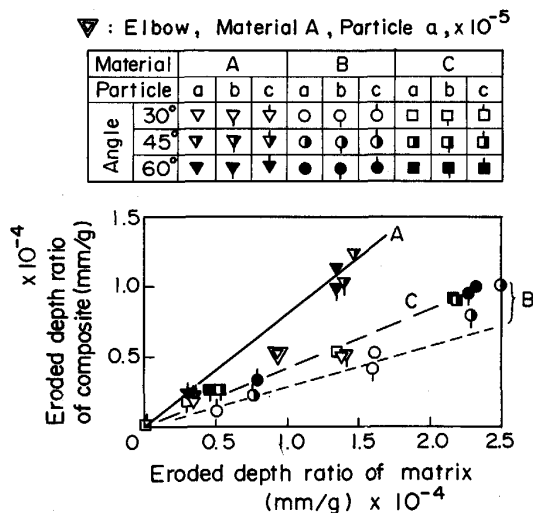


Fig. 12. Relationship between the eroded depth ratio of the matrix and that of the composite.

マトリックス B 単体の摩耗重量率が最も大きいため、セラミックス粒子の複合化により、複合材 B の耐摩耗性は、他の複合材に比べて向上している。複合材 C の摩耗重量率は、衝突粒子が珪砂 a の場合に、マトリックス C 単体の 40% の値となる。他の衝突粒子による複合材 C の摩耗重量率は、マトリックス C 単体の摩耗重量率そのものが小さいために、平板状複合材の表面がわずかに摩耗するだけで、複合化の効果が見れるまでには至っていない。30° の衝突角度における複合材 A の摩耗重量率が、マトリックス A 単体の値に対して減少する割合は、複合材 C の減少割合とほぼ同じである。一方、衝突角度が 45~60° における複合材 A の摩耗重量率が、マトリックス A 単体に対して減少する割合は、30° の場合に比べて小さい。

Fig. 12 には最大摩耗深さ率について、マトリックス

単体と複合材との比較を示した。複合材の最大摩耗深さ率は、摩耗重量率の場合と同様に、複合材 A, C, B の順にマトリックス単体の値より小さくなっている。衝突角度が 45~60° における複合材 A の最大摩耗深さ率が、マトリックス単体の値に対して減少する割合は、30° の衝突角度の場合より小さく、摩耗重量率と同様の傾向を示している。この理由については、3.2.4 項で検討を加える。

### 3.2.3 衝突粒子の影響

マトリックス単体および複合材の摩耗重量率および最大摩耗深さ率は、Fig. 8~10 の比較より、スチールグリット、焼結鉾粉、珪石の順に大きくなる。衝突粒子の硬度は Table 1 に示すように、上記粒子の順に高くなっている。Table 1 中の粒子径の範囲内では、摩耗は粒子硬度に大きく影響されているといえることができる。

### 3.2.4 衝突角度の影響

マトリックス単体の摩耗重量率は、Fig. 8~10 に示すように、固体粒子の衝突角度が小さくなるにつれて、マトリックス A, B 単体では増加し、マトリックス C 単体では減少する。この理由としては、マトリックス A は硬度が低いために衝突角度が小さい場合の耐切削摩耗性（供試料の面に水平な衝突粒子の運動エネルギーにより生じる引っかき傷に耐えることのできる能力）が小さいこと、マトリックス C は硬度が高い反面衝撃強さが低いために、衝突角度が大きい場合の耐変形摩耗性（供試料の面に垂直な衝突粒子の運動エネルギーにより生じる押し込み傷に耐えることのできる能力）が小さいことがあげられる。マトリックス B は硬度が低いことに加えて衝撃強さも小さいために、マトリックス B 単体の摩耗重量率がマトリックス A, C 単体より増加している。最大摩耗深さ率は、マトリックス B, C 単体では、衝突角度が 45~60° の場合の値が大きいが、マトリックス A 単体では衝突角度によらずほぼ同じ値を示している。マトリックス B, C は衝撃強さが小さいために、マトリックス B, C 単体の最大摩耗深さ率は平板状供試料に垂直方向の固体粒子の運動エネルギーに支配され、このエネルギーが増加する大きい衝突角度の場合に、最大摩耗深さ率が増加すると考えられる。一方、マトリックス A は衝撃強さが大きいために、衝突角度が大きくなってもマトリックス A 単体の摩耗深さがそれほど増加しなかったと考えることができる。

複合材の摩耗重量率について、複合材 A, B の摩耗重量率は、衝突角度が小さい場合に、マトリックス A, B 単体の値に対して大きく減少する。これは、マトリックス単体の耐切削摩耗性が、セラミックス粒子の高い耐

切削摩耗性により向上されたためである。複合材 C の摩耗重量率は、マトリックス C 単体の値に対して、複合材 A, B ほどには減少していない。これは、マトリックス C 単体の耐摩耗性もともと良好であるためである。最大摩耗深さ率について、複合材 B, C の最大摩耗深さ率は、マトリックス B, C 単体とほぼ同様の傾向を示し、衝突角度が小さくなるにつれて減少する。複合材 A の最大摩耗深さ率は、3.2.2 項で述べたように、衝突角度が 30° の場合に、マトリックス A 単体の値に対して大きく減少する。すなわち、衝突角度が 30° と小さい場合には、平板状マトリックス A 単体の面に水平な衝突粒子の運動エネルギーが大きいため、切削摩耗が支配的となる。マトリックス A 単体の最大摩耗深さ率は  $1.39 \times 10^{-4} \text{ mm/g}$  であり、セラミックス粒子を複合化することによって切削摩耗が減少し、衝突角度 30° における複合材 A の最大摩耗深さ率は  $0.49 \times 10^{-4} \text{ mm/g}$  に低下する。一方、衝突角度が 60° と大きい場合には、平板状マトリックス A 単体の面に垂直な衝突粒子の運動エネルギーが大きいため、変形摩耗が支配的となる。マトリックス A 単体の最大摩耗深さ率は衝突角度が 30° の場合とほぼ同じ  $1.34 \times 10^{-4} \text{ mm/g}$  となり、マトリックス A 単体の耐変形摩耗性は耐切削摩耗性と同程度と考えられ、マトリックス B, C 単体とは異なった傾向を示す。すなわち、マトリックス A 単体の耐切削摩耗性に対する耐変形摩耗性の比は、マトリックス B, C 単体に比べて大きいため、セラミックス粒子を複合化することによる変形摩耗の減少は比較的小さく、衝突角度 60° における複合材 A の最大摩耗深さ率は  $1.12 \times 10^{-4} \text{ mm/g}$  まで低下するにとどまった。

### 3.2.5 摩耗重量率と最大摩耗深さ率

摩耗重量率と最大摩耗深さ率との関係を Fig. 13, 14 にまとめた。マトリックス単体についての結果を示した Fig. 13 において、摩耗重量率に対する最大摩耗深さ率の増加量は、マトリックス A 単体では少ないが、マトリックス C 単体では摩耗重量率の増加量にほぼ等しい。一方、マトリックス B 単体では、摩耗重量率の増加に対して最大摩耗深さ率が減少する傾向を示した。

複合材についての結果を示した Fig. 14 において、複合材 C はマトリックス C 単体と同様に、最大摩耗深さ率は摩耗重量率にほぼ比例して増加する。一方、複合材 A, B では、最大摩耗深さ率が増加しても摩耗重量率の増加量は少なく、マトリックス単体とは異なった傾向を示した。

### 3.3 管状複合材エルボの摩耗特性

マトリックス単体および複合材の平板状供試料につい

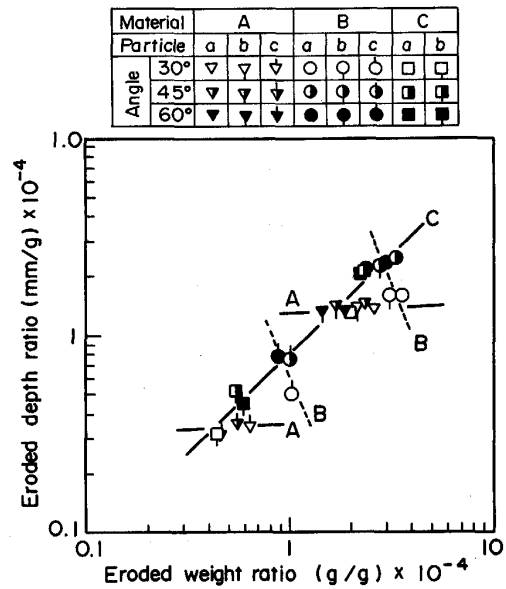


Fig. 13. Relationship between the eroded weight ratio and the eroded depth ratio of the matrix.

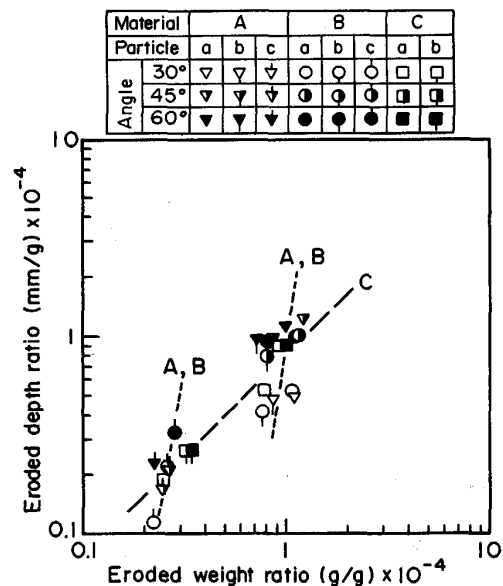


Fig. 14. Relationship between the eroded weight ratio and the eroded depth ratio of the composite.

での摩耗試験結果に基づいて、耐摩耗性、衝撃強さが良好で材料費が比較的安価なマトリックス A を用いて管状複合材エルボを試作した。硬度の高い珪砂に対する上記エルボの耐摩耗性を求め、マトリックス A 単体および C 単体を鋳造して製作したエルボの摩耗試験結果と比較した。マトリックス A 単体のエルボは 21.7 h の試験後に、Fig. 15(a) に示すように、8 mm の肉厚に貫通孔が生じた。珪砂の噴射重量は 860 kg であった。そこで、21.7 h 後の肉厚方向の最大摩耗深さを他のエル

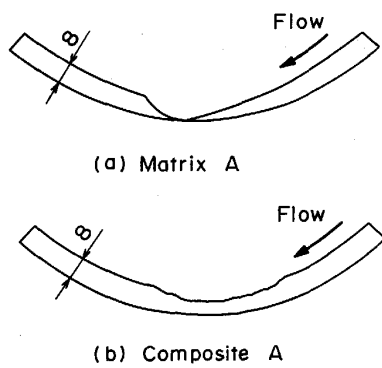


Fig. 15. Erosion of elbows.

ポについて求めると、マトリックス C 単体エルボで 7.5 mm, マトリックス A の管状複合材エルボで Fig. 15 (b) のように 4.5 mm となった。マトリックス A について、マトリックス A 単体エルボと複合材エルボの最大摩耗深さ率を比較すると Fig. 12 中の  $\nabla$  印のようになる。同図より、セラミックス粒子の複合化による耐摩耗性の向上効果は、平板状複合材のみならず管状複合材エルボにおいても同様に現れていることが明らかになった。

#### 4. 結 論

鋳鉄系マトリックスとセラミックス粒子との複合材の固体粒子によるエロージョン特性を求めた。得られた結果をまとめると次のようになる。

(1) マトリックス単体の摩耗重量率 (供試料の摩耗重量/衝突粒子の全噴射重量), 最大摩耗深さ率 (供試料の最大摩耗深さ/衝突粒子の全噴射重量) は, 27% Cr 鋳鉄, 普通鋼鋳鋼, 普通鋳鉄の順に大きくなる。ただし, 珪砂を角度 45~60° で衝突させた場合には, 27% Cr 鋳鉄の摩耗重量率は, 普通鋼鋳鋼より多くなる。

(2) マトリックスにアルミナ粒子を複合することにより, 複合材の摩耗重量率, 最大摩耗深さ率はそれぞれ, マトリックス単体の 25~50%, 25~80% に低下する。

(3) マトリックス単体および複合材の摩耗重量率, 最大摩耗深さ率は, 衝突粒子の硬度が高くなるにつれて増加する。

(4) 粒子の衝突角度が大きくなるにつれて, マトリックス単体の摩耗重量率は, 普通鋼鋳鋼, 普通鋳鉄では減少し, 27% Cr 鋳鉄では増加する。一方, マトリックス単体の最大摩耗深さ率は, 衝突角度が大きくなるにつれて, 普通鋳鉄, 27% Cr 鋳鉄では増加傾向を示すが, 普通鋼鋳鋼では変化が小さい。

(5) 粒子の衝突角度が複合材の摩耗重量率に及ぼす影響は比較的小さい。一方, 複合材の最大摩耗深さ率は, 衝突角度が小さくなるにつれて減少する。

(6) アルミナ粒子複合配管エルボの耐摩耗性は, 平板状複合材と同様に改善されることが確認された。

最後に本研究を行うにあたり, ご助言とご協力をいただいた方々に厚くお礼申し上げます。

#### 文 献

- 1) J. G. A. BITTER: *Wear*, 6 (1963), p. 5
- 2) J. G. A. BITTER: *Wear*, 6 (1963), p. 169
- 3) J. H. NEILSON and A. GILCHRIST: *Wear*, 11 (1968), p. 111
- 4) G. L. SHELDON and A. KANHERE: *Wear*, 21 (1972), p. 195
- 5) J. L. ROUTBORT, R. O. SCATTERGOOD and E. W. KAY: *J. Am. Ceram. Soc.*, 63 (1980), p. 635
- 6) 本間寛臣, 伊藤研志: 日本機械学会論文集 A, 50 (1984), p. 966
- 7) 和田重孝, 渡辺直義: 窯業協会誌, 94 (1986), p. 1157
- 8) S. WADA and N. WATANABE: *Yogyo-Kyokai-Shi*, 95 (1987), p. 573
- 9) 和田重孝, 渡辺直義: 窯業協会誌, 95 (1987), p. 976
- 10) 下田 潔, 北條英光: 日本機械学会論文集 A, 54 (1988), p. 1937
- 11) 橋本建次: 粉体摩耗の対策 (1981), p. 180 [日刊工業新聞社]
- 12) 坂爪克行, 花井圭介: 小松技報, 27 (1981), p. 8
- 13) S. WADA, N. WATANABE and T. TANI: *Nippon-Seramikkusu-Kyokai-Gakujutsu-Ronbunshi*, 96 (1988), p. 111
- 14) 森田喜保, 岡村一男, 河嶋寿一, 瀬口 学: 鉄と鋼, 75 (1989), p. 1596