

諸材料の耐固体粒子衝突エロージョン性評価法の確立

平成 11 年

矢 吹 彰 広

目次

第1章 緒論	1
1.1 緒言	1
1.2 既往の研究	2
1.2.1 損傷過程と機構	2
1.2.2 損傷に及ぼす諸因子の影響	8
1.3 既往の研究の問題点	16
1.4 本研究の目的と構成	17
第2章 試験装置および粒子衝突条件	18
2.1 緒言	18
2.2 すき間噴流法試験装置	18
2.2.1 試験装置と試験条件	18
2.2.2 試験結果の再現性	19
2.2.3 粒子衝突条件	20
2.2.4 損傷の衝突角度依存性の算出方法	27
2.3 噴流型試験装置（ブロー型）	30
2.3.1 試験装置と試験条件	30
2.3.2 粒子衝突条件	31
2.4 噴流型試験装置（コンプレッサー型）	34
2.4.1 試験装置と試験条件	34
2.4.2 粒子衝突条件	34
2.5 結言	36
第3章 セラミック材料の損傷特性	37
3.1 緒言	37
3.2 既往の研究とセラミック材料の工業的利用	37
3.2.1 セラミック材料の損傷	37
3.2.2 セラミック材料の工業的利用	38
3.3 試験材料	40
3.4 試験方法	40
3.5 試験結果および考察	41
3.5.1 損傷速度の粒子衝突角度依存性	41
3.5.2 低・高衝突角度における損傷速度の比較	45
3.5.3 損傷特性と材料物性との相関	47
3.6 セラミック材料の耐エロージョン性の予測	49

3.7 結言	49
第4章 高分子材料の損傷特性	50
4.1 緒言	50
4.2 既往の研究と高分子材料の工業的利用	50
4.2.1 高分子材料の損傷	50
4.2.2 高分子材料の工業的利用	51
4.3 試験材料	52
4.4 試験方法	55
4.5 試験結果および考察	56
4.5.1 損傷速度の粒子衝突角度依存性	56
4.5.2 損傷の粒子衝突角度依存性に及ぼす衝突速度の影響	58
4.5.3 損傷特性と材料物性との相関	61
4.6 高分子材料の耐エロージョン性の予測	63
4.7 結言	63
第5章 金属材料の損傷特性	64
5.1 緒言	64
5.2 既往の研究と金属材料の工業的利用	64
5.2.1 金属材料の損傷と臨界衝突速度	64
5.2.2 金属材料の工業的利用	66
5.3 試験材料および試験方法	67
5.4 試験結果および考察	67
5.4.1 損傷速度の粒子衝突角度依存性	67
5.4.2 損傷の粒子衝突角度依存性に及ぼす衝突速度の影響	69
5.4.3 損傷特性と材料物性との相関	70
5.5 金属材料の耐エロージョン性の予測	73
5.6 結言	74
第6章 損傷機構判定の指標（臨界衝突速度）	75
6.1 緒言	75
6.2 損傷の衝突角度依存性と臨界衝突速度	75
6.3 測定装置と測定原理	76
6.3.1 摩擦係数	76
6.3.2 臨界衝突速度	78
6.4 測定方法	78
6.4.1 摩擦係数	78
6.4.2 測定装置の検証	81

6.5	金属材料における測定結果および考察	83
6.5.1	臨界衝突速度の測定	83
6.5.2	臨界衝突速度と材料物性との相関	86
6.6	理論式の導出	87
6.6.1	臨界衝突速度の境界条件	87
6.6.2	粒子衝突時の材料の引張歪み	88
6.6.3	材料の限界歪み	91
6.6.4	臨界衝突速度の理論式	91
6.7	理論式に用いる物性値の推算	91
6.7.1	摩擦係数の推算	91
6.7.2	反発係数の推算	94
6.7.3	粒子の形状係数の測定	96
6.8	理論式の検定	97
6.9	セラミック材料の臨界衝突速度	100
6.10	高分子材料の臨界衝突速度	100
6.11	臨界衝突速度の意義	103
6.12	結言	104
第7章	諸材料の耐エロージョン性評価法	105
7.1	緒言	105
7.2	実験室と現場での粒子衝突条件の比較における問題点	105
7.3	耐エロージョン性評価における問題点	106
7.3.1	衝突角度の違いによる損傷の逆転現象	106
7.3.2	衝突速度の違いによる損傷の逆転現象	107
7.4	臨界衝突速度以下での損傷	108
7.5	耐エロージョン性の評価の方法	110
7.6	耐エロージョン性評価法の精度	112
7.7	結言	113
第8章	総括	114
	謝辞	117
	引用文献	118
	公表論文	123
	参考論文	124
	公開特許	125

第1章 緒論

1.1 緒言

流体中に含まれる固体粒子の衝突によって、機械・装置の構成材料表面が変形したり脱離したりする現象を固体粒子衝突エロージョンまたはサンドエロージョンと言う。サンドエロージョンは、狭い意味では固体粒子が特に気流中に含まれる場合を指し、液体中に含まれる場合、すなわちスラリーによる損傷の場合をスラリーエロージョンと区別されることが多い。

固体粒子衝突エロージョンに関する研究は、1940年頃からドイツにおいて、主として空気輸送を念頭において始められた。その後、1960年代に入り、石油の接触分解に流動触媒が導入されるとともに、反応器の激しい損傷が問題となり、アメリカを中心に実験的にも理論的にも、詳細な研究が行われるようになった。これら工業用途における粒子速度は最大でも100 m/s以下であったが、その後、ヘリコプターのエンジンプレードや回転翼、あるいはロケットのノズルなど、軍事、宇宙産業等での損傷も問題となった。これらの場合の粒子速度は1000 m/s程度と非常に大きな値となっている。

従来の研究は、ほとんどが金属材料を対象としているが、無機材料でも、特にキャストブール、レンガ等の耐火物では、製鉄プラントの予熱炉等、高温にさらされる装置の内張りに古くから用いられているため、1950年代から、これらを対象にした研究が見られるが、詳細な研究が行われるようになったのは、最近になってからである。すなわち、最近の急速なセラミック材料の開発、およびそれに伴う適用事例の増大のために、セラミック材料を対象とした研究が多くなっている。

さらに、高分子材料に関しては、従来ほとんど研究がないが、最近の使用分野拡大には目ざましいものがあり、耐食性に加えて耐エロージョン性が要求される環境にさらされるケースも出始め、これらに関する研究も見られるようになってきている。

このように、固体粒子衝突エロージョンは、固体粒子を扱う機器においては、すべての材料に生じると言ってもよい。例えば、空気輸送におけるパイプやバルブ、流動層反応装置、ベンチュリースクラバー、サイクロン、ガスタービンプレード、ショットピーニングあるいはサンドブラスターのノズル等である。さらに、特種な例としては、ヘリコプターの回転翼やガスタービンのブレード、ロケットエンジン部のノズル等があり、その損傷は局部的であり、しかも損傷速度が極めて大きいのが特徴である。例えば、ヘリコプターのエンジンの寿命は、固体粒子の吸引により、最大で通常寿命のわずか10%にまで減少するとされている。事実、エンジンプレードの寿命がわずか10時間であったという報告が

ある。

本研究の目的は諸材料の固体粒子衝突エロージョンにおける耐エロージョン性評価法の確立であるが、この目的を達成するためには、固体粒子衝突エロージョン現象を支配する粒子の衝突角度、衝突速度、材料の機械的性質等の数多くの因子と損傷機構との関連を解明することが不可欠である。

1.2 既往の研究

1.2.1 損傷過程と機構

(1) 基礎的損傷機構（金属の損傷機構）

固体粒子衝突によるエロージョンでは、粒子の衝突角度によって損傷機構および損傷量が大きく変化することは既に多くの研究者によって確認された。すなわち、Fig. 1.1 に示すように延性材料では固体粒子が低い角度で衝突する場合の切削による損傷、それに対して、脆性材料では高い角度で衝突する場合のクラックによる損傷が顕著である。注目すべきは、延性材料は 90° でも損傷が生じている点である。この損傷は脆性材料のようなクラックの進展によるものではなく、主に塑性変形の繰り返しによって生じる。

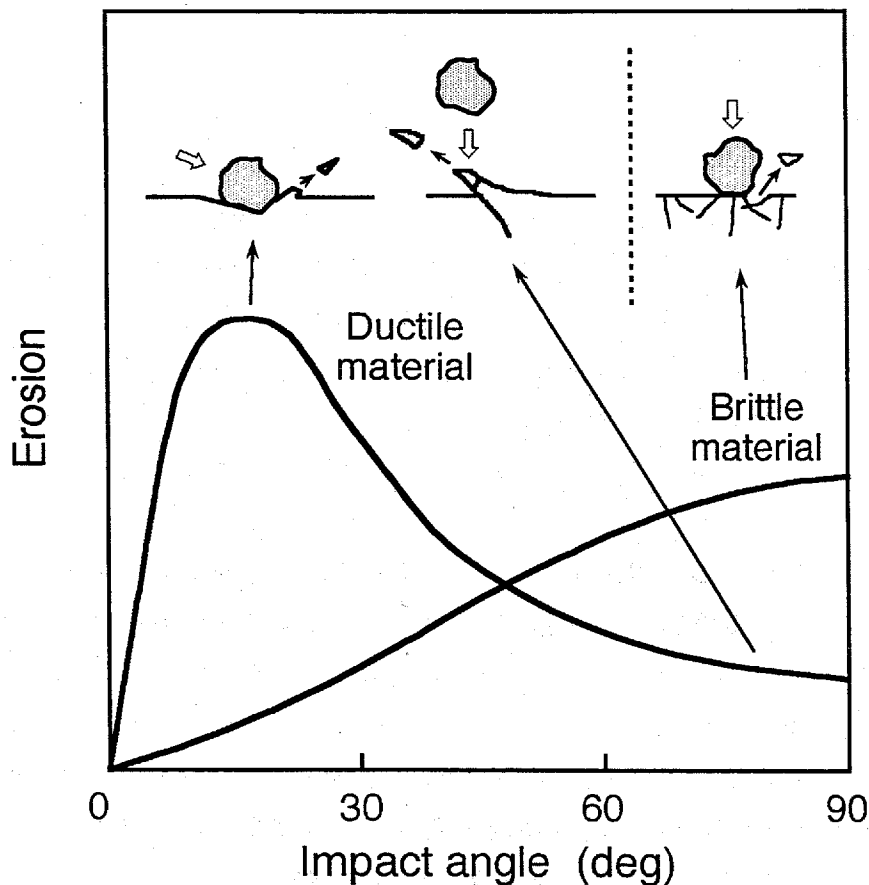


Fig. 1.1 Effect of impact angle on erosion of metallic material.

これらの機構に対して最初に理論的な取り扱いを行ったのは Finnie¹⁾および Bitter^{2,3)}である。Finnie は延性材料において固体粒子衝突による材料の脱離を切削バイトを用いた材料の切削と同一視して、Fig. 1.2 に示すように粒子の運動エネルギーから切削量 W を求めた。

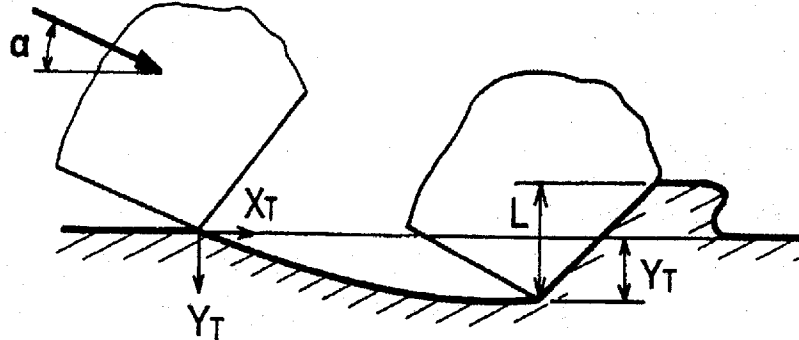


Fig. 1.2 Idealized two-dimensional model of a rigid grain cutting into a ductile metal.

$$W \propto \frac{MV^2}{P} f(\alpha) \quad (1.1)$$

$$W = \frac{MV^2}{P\psi K} \left(\sin 2\alpha - \frac{6}{K} \sin^2 \alpha \right) \quad (\text{但し } \tan \alpha \leq \frac{K}{6}) \quad (1.2)$$

$$W = \frac{MV^2}{P\psi K} \left(\frac{K \cos^2 \alpha}{6} \right) \quad (\text{但し } \tan \alpha \geq \frac{K}{6}) \quad (1.3)$$

ここで、 M は衝突粒子質量、 V は衝突速度、 P は塑性変形開始応力、 ψ は Fig. 1.2 に示すように L/Y_T 、 K は粒子が材料と接触している間の水平方向の力に対する垂直方向の力の比、 α は衝突角度である。この式に従えば、比較的低い衝突角度における損傷量は実験値と良く一致するが、 $\alpha = 90^\circ$ における損傷量は 0 となり実験値と一致しない。また、Finnie は脆性材料については理論的解析を行っていない。すなわち、低い角度における切削による損傷を考慮しているが、高い角度におけるクラックによる損傷は論じていない。その後、上記理論式の改良が行われた^{4,5)}。

Bitter はこれらの 3 つの損傷機構についてそれぞれ理論的な解を得た。まず、クラックによる損傷量 W_D は衝突粒子の運動エネルギーが固体表面部の弾性および塑性変形に費やされると仮定し、変形に要するエネルギー量を Hertz の理論式⁶⁾から求めた。

$$W_D = (1/2)M(V \sin \alpha - Ve)^2 / \varepsilon \quad (1.4)$$

ここで、 ε は単位体積の材料を脱離させるのに必要なエネルギー、 Ve は固体表面が塑性変形を起こし始める衝突速度での材料および粒子のヤング率、ポアソン比などの物性から求められる。次に切削による損傷量 W_C は粒子の水平方向の運動エネルギーに着目し、Hertz の理論式から求めた。

$$W_{C_1} = \frac{2MC(V \sin \alpha - Ve)^2}{V \sin \alpha} \times \left[V \cos \alpha - \frac{C(V \sin \alpha - Ve)^2}{V \sin \alpha} \rho \right] \quad (1.5)$$

$$W_{C_2} = (1/2)M \left[V^2 \cos^2 \alpha - K_1(V \sin \alpha - Ve)^{3/2} \right] / \rho \quad (1.6)$$

ここで、 ρ は ε と同意義である。 C 、 K_1 は材料および粒子の物性から計算される定数である。 W_{C_1} は衝突後の粒子がまだ表面と平行な速度成分を持っている場合に適用され、 W_{C_2} はそれがない場合である。この表面に平行な速度成分を持つか否かは衝突角度 α_0 に依存する(Fig. 1.3)。従って、全損傷量 W は

$$W = W_D + W_{C_1} \quad \text{または} \quad W = W_D + W_{C_2} \quad (1.7)$$

これらの理論解は、アルミニウム、炭素鋼に炭化珪素粒子を衝突させた実験結果(Fig. 1.3)と良く一致している。ところが、これらの式はエネルギー収支から衝突角度の影響を表しただけの式であり、これらの式を使用して実際に損傷量を求めようとすると、材料および粒子の特性値を実験により求める必要があるために、実用的ではない。

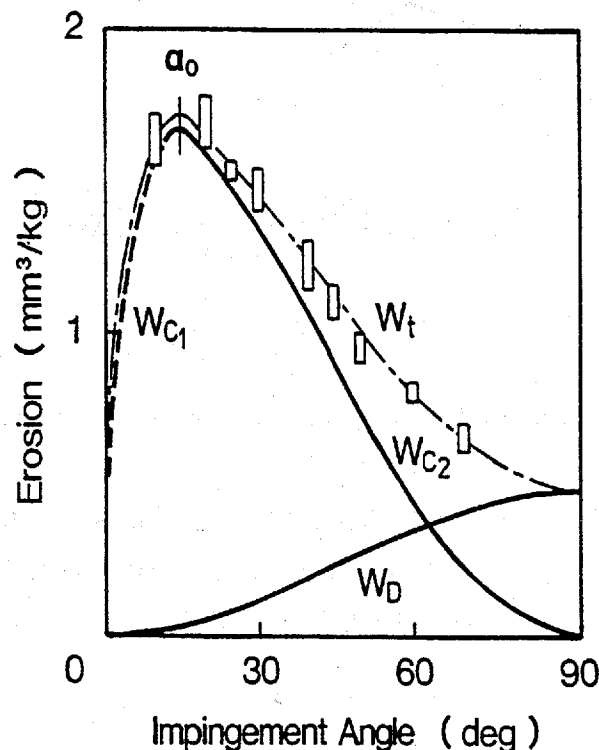


Fig. 1.3 Comparison between calculated curves and test results in eroded aluminium.

単一粒子を試片に衝突させて、生じた変形を観察することは損傷機構を解明する上で重要である。Hutchings と Winter は単一の球形および四角形粒子を延性材料に衝突させて衝突前後の粒子の運動および軌跡、さらに変形を受けた試片断面を観察した⁷⁻⁹⁾。Hutchingsらは衝突粒子が試片表面に接触するとき、試片表面の法線と衝突物体の前面とがなす角

度，すなわち傾斜角度が正である場合は切削(cutting)が生じ，負である場合は掘り起こし(ploughing)が生じることを示した(Fig. 1.4)。また，衝突物体の回転により断面形状は異なることも指摘している。衝突物体および被衝突物体が異なる場合の，同様な試片表面に生じた衝突痕の観察はかなり行われている¹⁰⁻¹⁵⁾。

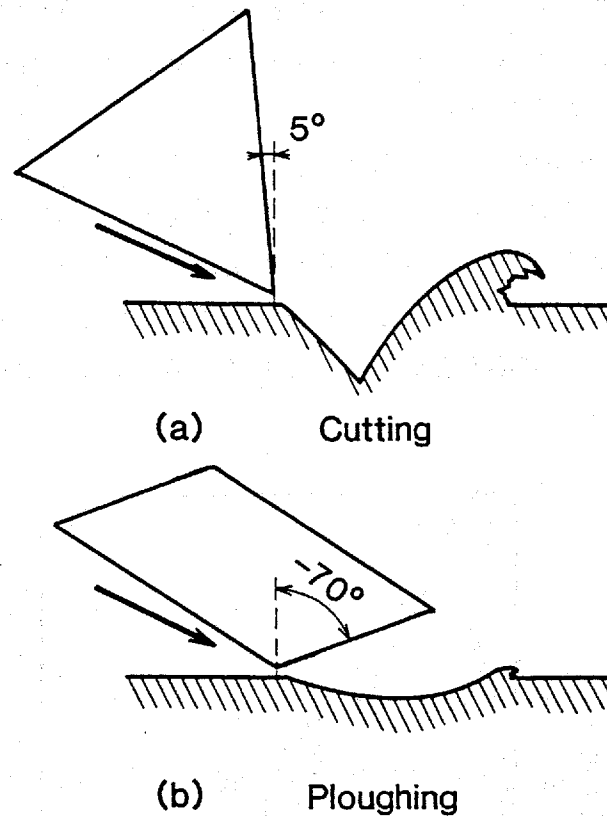


Fig. 1.4 Effect of rake angle on sectional geometry of impact craters.

一方，脆性材料においては延性材料に見られたような損傷はなく，粒子衝突によって材料にクラックが発生する^{16,17)}。その他，繰り返し粒子を衝突させて，多粒子衝突による材料の基礎的エロージョン機構，および波状形成機構^{18,19)}についての研究も行われている。

(2) セラミック材料（無機材料）の損傷機構

セラミック材料やガラス等の無機材料は金属材料に比べ一般に脆いため、先に述べたクラック発生に基づく機構が支配的となる。すなわち、Fig. 1.5²⁰⁾ に示すように高角度あるいは $\alpha=90^\circ$ で最大損傷速度を示す。

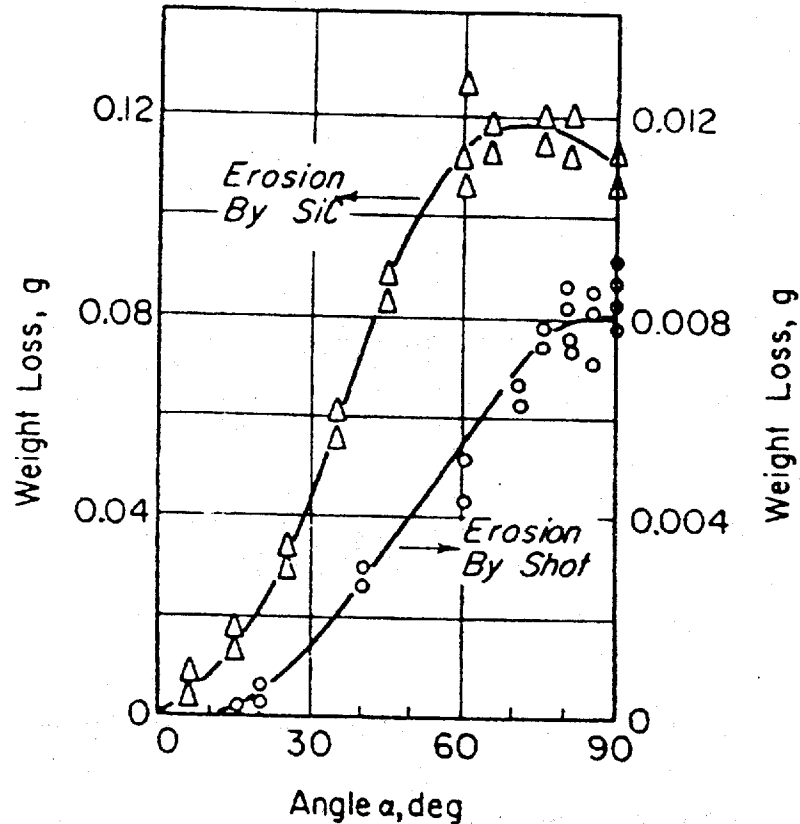


Fig. 1.5 Effect of impact angle on erosion of glass.

クラック発生の挙動は、材料によって異なるのは言うまでもないが、衝突粒子の曲率に大きく影響される。球およびシャープな粒子が衝突した場合のクラックの様子を Fig. 1.6 に示す²¹⁾。

球形粒子が衝突した場合は、円錐状のクラック (A)、表面に垂直なクラック (B)、さらに表面に平行なクラック (C) の三つを生じる。このように、複雑なクラックを生じる結果、主として、“チップング”(Chipping)により重量減少を生じていくのが特徴である。

高温になると、たとえ脆性材料と言われているセラミック材料でも、塑性変形を生じるようになる。もし、完全な脆性機構により損傷を生じるとすれば、衝突速度の垂直成分 ($V \sin \alpha$) のみに依存すると考えられるが、 1000°C においては、低衝突角度側の損傷が高角度側のそれに比べ相対的に大きくなっている²¹⁾。このことは、低衝突角度側では衝突速度の水平方向成分の影響が重要であること、あるいは、延性機構による損傷も同時に生じていることを示唆している。

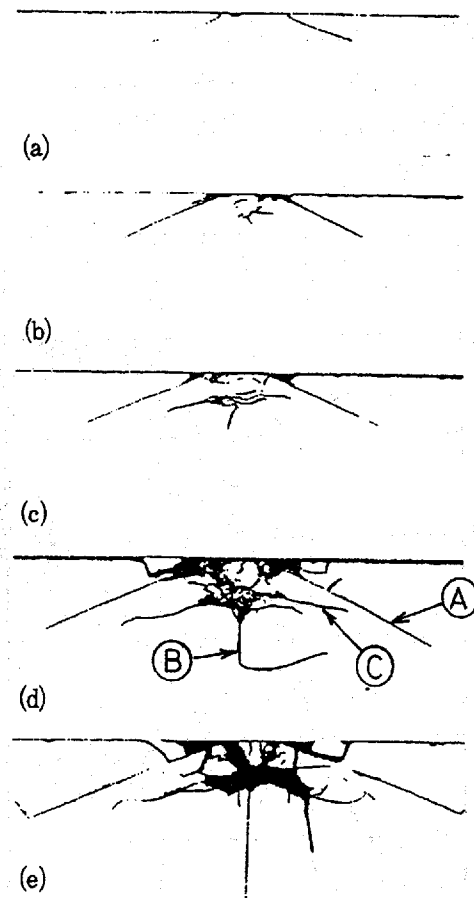


Fig. 1.6 Crack occurred due to impact of a spherical particle.

(3) 高分子材料（有機材料）の損傷機構

高分子材料には、多くの種類があり、エポキシ樹脂のように脆いものから、ゴム等のように非常に弾性に富むものまで、その性質は材料により大きく異なっている。従って、エロージョン損傷に対しても、金属材料やセラミック材料等とほぼ同じ挙動を示すもの、さらには両者の中間の挙動を示すものがあるのが第一の特徴である。この様子を示しているのが Fig. 1.7 である²²⁾。すなわち、PP（ポリプロピレン）、PVC（ポリ塩化ビニル）や SBR（スチレン・ブタジエンゴム）等のいわゆる延性材料に属するものは、金属における場合と同様、低衝突角度で損傷速度が最大となり、PMMA（ポリメチルメタクリレート）ではセラミックスと同様高角度側で最大損傷速度を示し、PS（ポリスチレン）や EP（エポキシ）では中間の角度で最大となっている。

高分子材料における第二の特徴は、損傷速度が高角度と低角度の二つで極大となる材料があることである。この現象は、衝突速度の影響を大きく受ける。低衝突速度においては、低角度側のピークの方が大きく、速度が高くなると高角度の損傷の方が大きくなり、さらに速度が高くなると、高角度側にのみピークが現われるようになる。このように、二つのピークが現われる原因は、低角度および高角度で支配的となる損傷機構が、高分子材料において、ほぼ同程度で存在するためと考えられる。

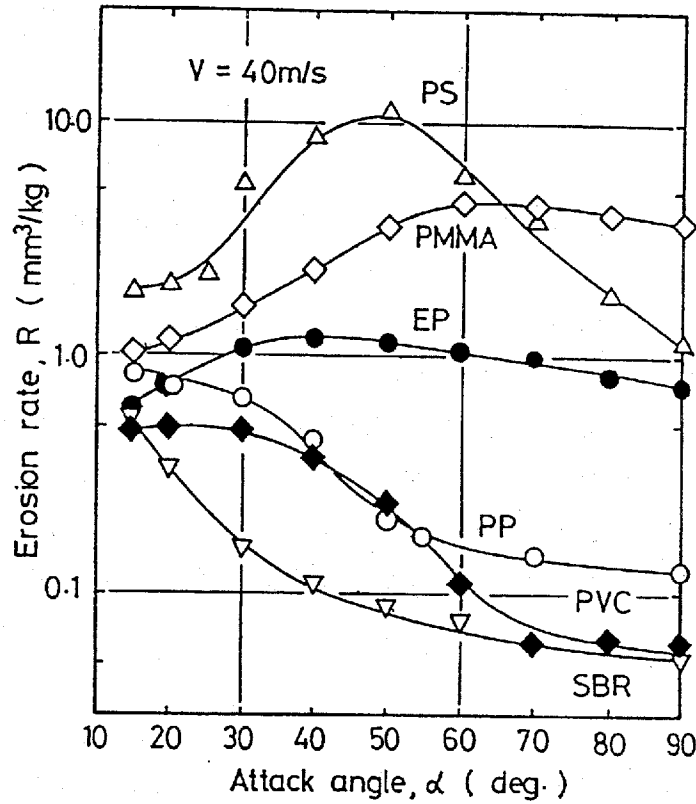


Fig. 1.7 Effect of impact angle on erosion of various polymers.

1.2.2 損傷に及ぼす諸因子の影響

固体粒子衝突エロージョンでは、エロージョンに関与する因子を Fig. 1.8 に示すように衝突する粒子の条件、粒子が衝突する条件、衝突される材料の条件の3つに分けることができる。

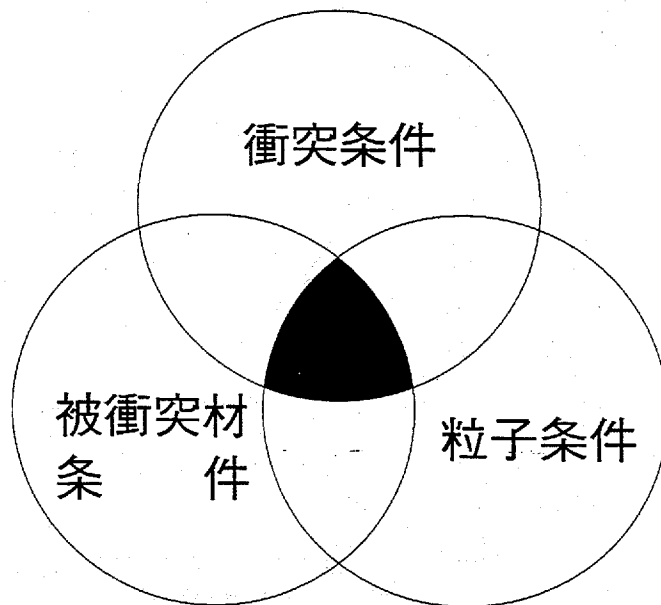


Fig. 1.8 Factors of solid particle impact erosion.

粒子が衝突する条件については、粒子が衝突するときの幾何学的因子として次の因子が考えられる。

① 衝突速度、② 衝突角度、③ 粒子の回転など、およびこれらの分布

次に、衝突される材料の条件では、材料の物性に関する次の因子が考えられる。

① 脆性、延性、② 硬さ、③ 結晶粒径、④ 変態、⑤ 組織、⑥ 伝熱特性、⑦ 弾性率
⑧ ポアソン比など

衝突する粒子の条件については、粒子の物性に関する因子および粒子を群として取り扱った時の因子が考えられる。それらを次に示す。

① 粒径、② 形状、③ 硬さ、④ 衝突頻度など、およびこれらの分布

これらの因子はそれぞれ独立したものではなく、お互いに関連し合っているため、ある因子の影響についての報告がそのまま他の条件について適用できるようなものではない。そのため、これらの因子がエロージョンに及ぼす影響については数多くの研究がなされている。

(1) 衝突角度

金属材料においては、JenningsらはアルミニウムとTi-6Al-4Vに対して4種類の粉体を衝突速度 189 m/s で衝突させ、衝突角度とエロージョン量の関係について調べ、衝突角度 20°~30° の時にエロージョン量が最も大きいことを示した²³⁾。また、Headらは302ステンレス鋼と6061-T6アルミニウムにアルミナ粒子を約 300 m/s の速度で衝突させ、ほとんどの金属材料において衝突角度 20°~30° で最大のエロージョン損傷が生じることを示した²⁴⁾。

セラミック材料について、Fig. 1.9 はアルミナとアルミニウムの比較を行ったものである²⁵⁾。この図より、セラミック材料においては衝突角度が 90° 近傍で最もエロージョン損傷が大きいことが分かる。

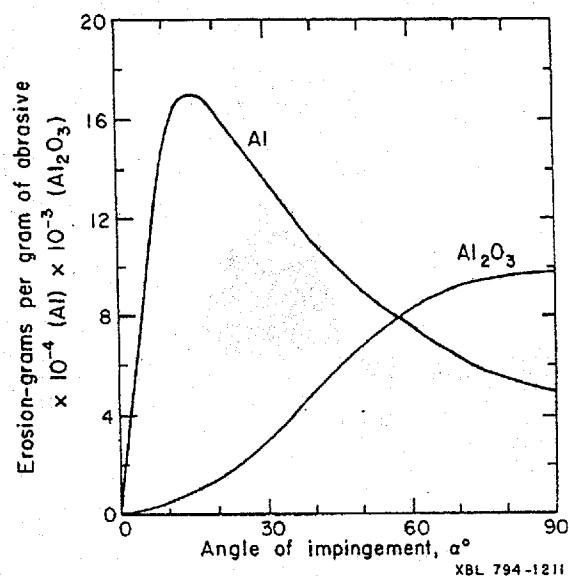


Fig. 1.9 Relationship between erosion and impact angle for alumina and aluminium.

高分子材料の損傷速度に及ぼす衝突角度の影響については、衝突角度による損傷機構の違いに起因し、衝突速度が最大となる衝突角度が異なる。高分子材料においては、先に述べたように粒子の衝突条件によって二つの衝突角度で損傷速度が極大となる場合がある²⁶⁾。

(2) 衝突速度

粒子運動エネルギー理論から導き出される損傷量は衝突速度の2乗に比例すべきであるが、実際の損傷量に対する衝突速度の依存性は衝突粒子の性状および試片材料の性質、あるいはその他の試験条件によってかなりの違いが見られる。

TillyとSage²⁷⁾は粒径125~150 μm の石英砂を用いた場合、アルミニウム、炭素鋼などの延性材料から、ガラス、プラスチックなどの脆性材料に至るまで、損傷量は衝突速度の約2.3乗になり、簡単な速度指数式で表せることを示した。

$$W = cV^a \quad (1.8)$$

上記の速度指数が2よりも大きい原因として、衝突粒子が衝突時に破碎し、その破片が2次的に材料を損傷させるためであり、粒径25 μm の粒子を用いた場合の速度指数は2.0に減少したと述べている。Sheldonら²⁸⁻³⁰⁾はガラスビーズおよび鋼球を用いて、衝突角度20°におけるアルミニウム、銅および炭素鋼材料の場合の速度指数が2.3~3の範囲となることを示した。Hutchings³¹⁾は炭素鋼に単一球形状粒子(粒径9.5 mm)を衝突させて、損傷量に対する速度指数2.9を得た。しかし、クレーター体積に対する速度指数は2.4であることを示した。Sheldon²⁹⁾は衝突角度20°および90°についてアルミニウム合金の場合の速度指数が材料を焼鈍することにより僅かに低い値となることを示している。また、焼鈍を施した同一鋼球を繰り返しアルミニウムに衝突させても、損傷量に対する速度指数は変化しないが、硬化熱処理を施した鋼球を繰り返し衝突させた場合に、その速度指数は2.4~2.2に減少し、Tillyによって示された粒子破碎による材料の2次損傷を肯定している³²⁾。一方、ガラスに鋼球を衝突角度90°で衝突させた場合、速度指数はおおよそ5となることが報告された²⁸⁾。北條ら²⁶⁾はPMMA材にガラスビーズを衝突させたところ、衝突角度によって速度指数が2~5に変化すると述べており、衝突角度によって損傷機構が異なるため、衝突速度の影響も衝突角度によって異なる結果を得ている(Fig. 1.10)。Williamsら³³⁾は珪砂をグラファイト強化プラスチック材に衝突させて速度指数3.4を得ている。損傷量の衝突速度に対する依存性に関する研究は多く行われている³⁴⁻³⁷⁾。

上記の報告をまとめると、損傷量に対する速度指数は、延性材料では2~3乗、脆性材料では3~5乗ということになる。

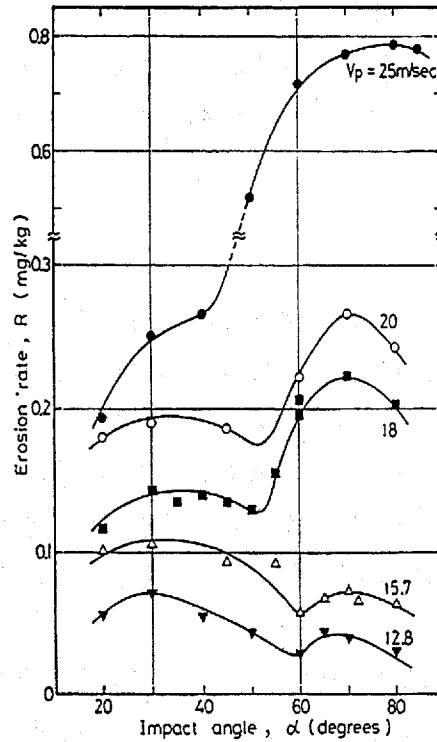


Fig. 1.10 Effect of impact velocity on erosion of PMMA.

(3) 衝突粒子の大きさ, 形状, 濃度

Tilly^{27, 38)}は石英砂を用いて多種の材料の損傷量を測定したところ, いずれの場合でも衝突粒子径が約 $100 \mu\text{m}$ 以下では粒子径の増加とともに損傷量も増加するが, それ以上では粒子径に依存せず一定の損傷量となることを示した (Fig. 1.11)。

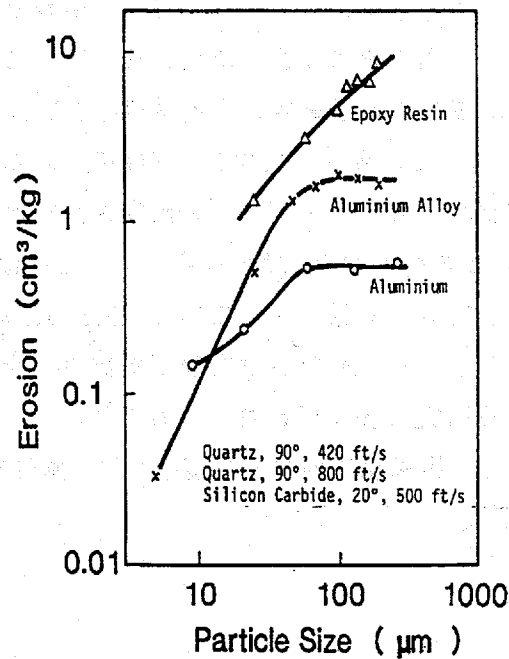


Fig. 1.11 Effect of particle size on erosion.

また、損傷量の粒子径に対する依存性について理論的な解析も行っている³⁹⁾。SheldonとFinnie^{28, 30)}は200 μm 以下の炭化珪素粒子を用いて、延性材料または脆性材料の損傷量が粒子径の3乗に比例することを示し、次式を提案した。

$$W = KV^a D^b \quad (1.9)$$

ここで、 D は衝突粒子径、 K 、 a 、 b は衝突粒子および材料の性質によって決まる定数で、Weibull³⁷⁾の理論に基づいている。ところが、種々の脆性材料の粒径の異なる炭化珪素粒子(127 μm および9 μm)を衝突させた場合、粒径によって同一材料でありながら損傷のピーク位置が90°付近から20°付近へとドラスティックに移動した(Fig. 1.12)⁴¹⁾。このことは、脆性材料の損傷がBitterらによって示されたような単純なクラックによるものではないことを示唆している。Gulden⁴²⁾は比較的広範囲(8~940 μm)の炭化珪素粒子を用いて、 Si_2N_4 材料の損傷量に及ぼす粒径指数が3~4の範囲にあると述べている。

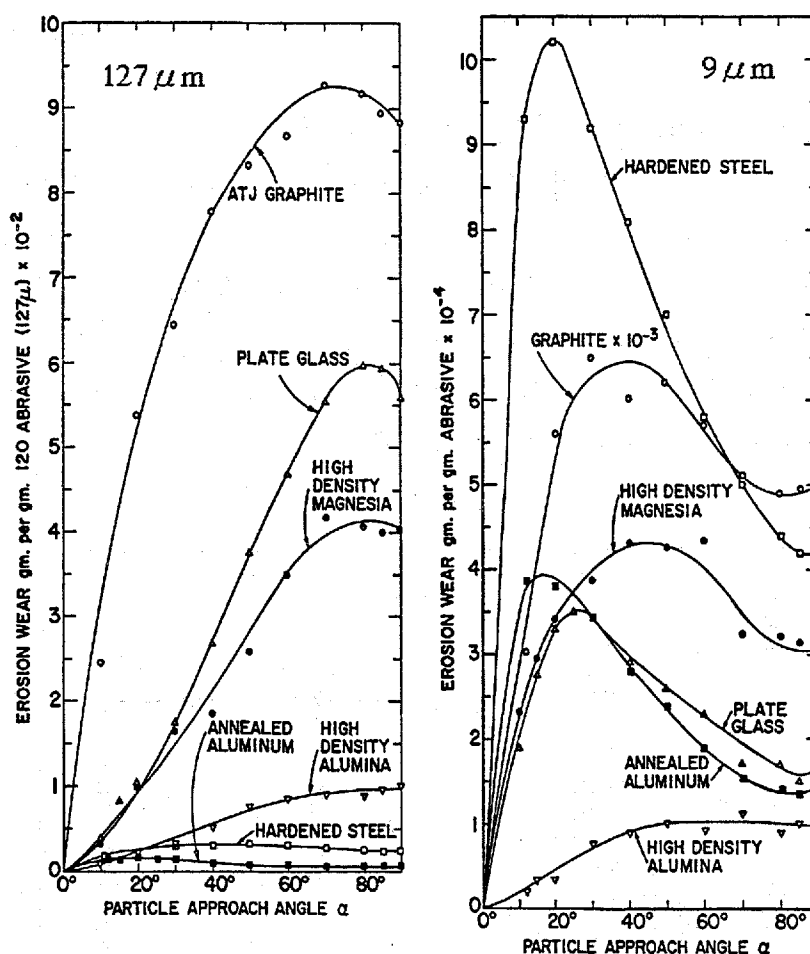


Fig. 1.12 Influence of impinging particle size on erosion behavior of various materials.

Marshallら⁴³⁾は衝突粒子の粒径分布が広がるほど損傷量は大きくなることを示して、実験による損傷量の推定が過小評価される可能性があることを指摘している。また、松村ら⁴⁴⁾は大きさの異なる2種類の粒子を混合して材料の衝突させたところ、それぞれの粒子

が引き起こす損傷量の和より大きい損傷量を生じたと報告している。

粒径が同一であっても粒子の形状が異なれば材料の損傷は異なってくる^{9,38)}。松村ら⁴⁴⁾は粒子径が同一のガラスビーズおよび破碎ガラスを用いてステンレス鋼を損傷させたところ、両者で得られた損傷量の間で100倍以上の差が見られたとしている。このように、粒子の形状は損傷量に大きな影響を与える。

Uuemôisら⁴⁵⁾は衝突粒子濃度の影響を調べており、粒子濃度の増加につれて単位粒子質量当たりの損傷量が減少することが分かっている。これは粒子濃度の増加とともに粒子相互の干渉も増加するためと考えられている。これはTabakoffら⁴⁶⁾の結果と一致している。

(4) 材料の機械的性質

材料の硬さあるいは縦弾性係数を用いた損傷量の相関式は多くの研究者によって報告されているが、それらはアブレイシブ摩耗に関するものが大半を占めている⁴⁷⁻⁵²⁾。しかし、固体粒子衝突エロージョンに関してもいくつかの報告がなされ、両者の間には共通性が見られる。

材料の損傷量は材料の硬さおよび固体粒子の硬さに大きく依存する。Rabinowicz⁵³⁾は6種類の固体粒子を用いて同一材料の摩耗量と粒子硬さとの関係を求めた(Fig. 1.13)。その結果、粒子の硬さが材料のそれよりも小さい場合には材料の摩耗量は極端に小さく、材料の硬さと同等な場合、摩耗量は粒子の硬さに強く依存して増加する。粒子の硬さがさらに大きくなると、摩耗量は粒子の硬さと関係なく一定となる。粒子の硬さが材料のそれより小さくても損傷を生じるのは、粒子および材料が表面上でそれぞれ硬さの分布を持ち、粒子が材料の硬さの小さい部分を摩耗するためである。

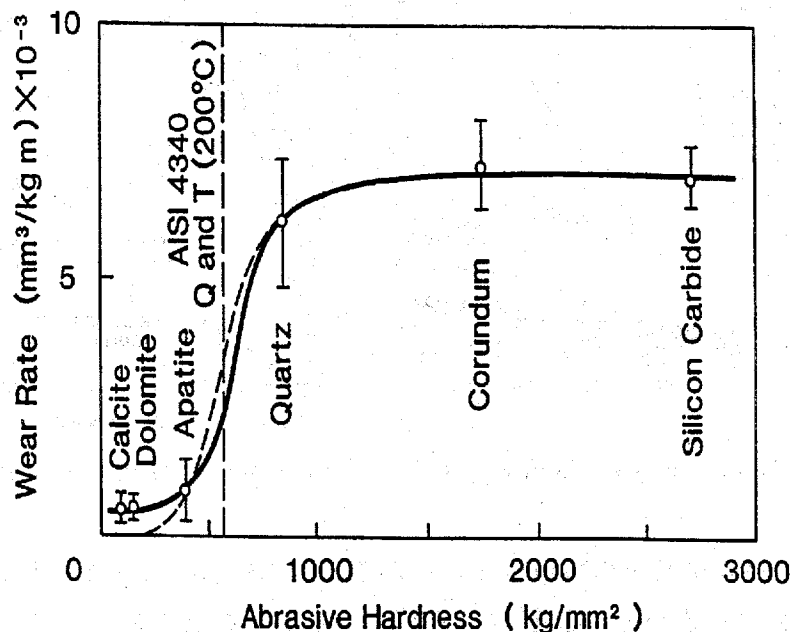


Fig. 1.13 Effect of abrasive hardness on wear rate.

Finnie^{54, 55)}および Sheldon⁵⁶⁾は純金属材料の耐エロージョン性（損傷量の逆数）は材料の硬さに比例するが、炭素鋼を熱処理することによりそのピッカース硬さを200~800に変えた場合、耐エロージョン性は材料の硬さに依存しないことを示した(Fig. 1.14)。Uetzら⁵⁷⁾も同様な結果を得ている。しかし、FoleyとLevy⁵⁸⁾は炭素鋼、ステンレス合金の損傷が熱処理方法の違いにより変化することを示した。Finnie⁵⁴⁾は(1.1)式における塑性変形開始応力 P が硬さに対応していることから、材料の硬さの逆数が損傷量に比例すると説明している。さらに、SheldonとKanherは粒子運動エネルギーと材料への粒子押し込み理論から損傷量を粒子径と材料の硬さの関数として表した²⁹⁾。

$$W = \frac{D^3 V^3 (\rho_p)^{3/2}}{H_v^{3/2}} \quad (1.10)$$

ここで、 H_v はピッカース硬さ、 D は粒径、 ρ_p は粒子密度である。脆性材料についてはその硬さの増加とともに耐エロージョン性が減少するという報告⁵⁸⁾がある。材料の硬さはその機械的性質を十分に表し得ていない場合が多く、これを用いて損傷量の相関式を得ることは難しい。

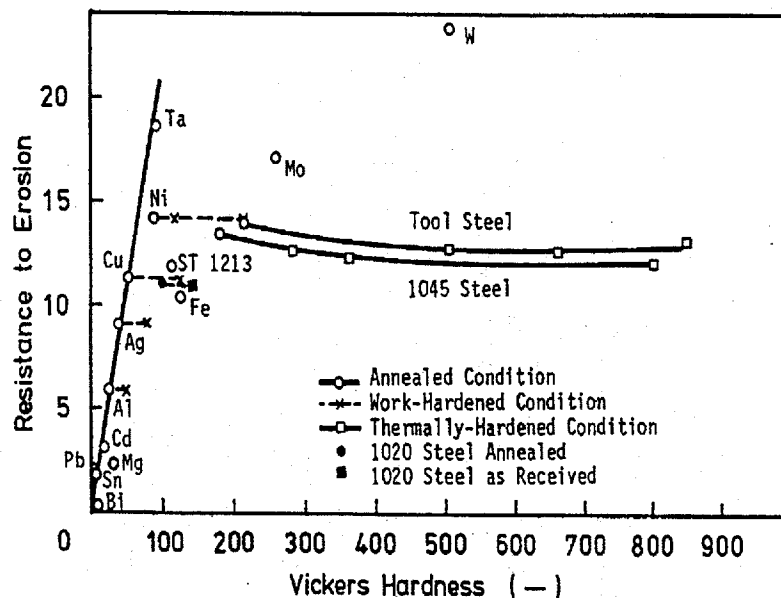


Fig. 1.14 Resistance to erosion as a function of Vickers hardness.

次に、損傷量と縦弾性係数の相関性については Kriegel⁵⁹⁾によって検討されているが、延性材料あるいは脆性材料でその様相が異なる。Headら⁶⁰⁾は次元解析により次式を得ている。

$$W = \frac{V^2}{E} f\left(R, \alpha, \frac{H}{E}, \frac{B}{E}\right) \quad (1.11)$$

ここで R は無次元で表される粒子の球形度、 H は粒子硬さ、 B は材料の硬さ、 E は材料単位体積当たりのエロージョン抵抗であり、縦弾性係数の関数となる。その他、Hutchings⁶¹⁾

は材料の歪みを損傷量の関数として理論的に取り扱っている。また、磯本らは金属材料の損傷が塑性変形による因子と切削による因子の積で表されるとし、種々の材料において良い相関があると報告している^{62, 63}。このように、材料の損傷量はその機械的性質に大きく依存するが、それらの因子が多いため理論式として少々煩雑になる。

セラミック材料の内、キャストブル耐火物については、古くから比較的多くの報告があるが^{64~70}、構造が複雑なため、かなり特異な挙動を示す。衝突角度の影響は今までの材料とはかなり様子が異なるため、材料の耐エロージョン性にも modulus of rupture⁶⁶、圧縮強さ(crushing strength)⁶⁷、残留水分^{66, 68}、curing condition⁶⁷等の種々の因子が影響を及ぼし、見掛け上同じ材料のものが同一条件下で実験を行っても、損傷速度が数十倍も異なる結果となった報告さえある⁷⁰。また、セラミック材料においては、先に述べたように、クラックの発生、進展が顕著であるため、損傷速度を予測するためには、破壊靱性値を導入する考えがある⁷¹。

高分子材料について、Brauerらは各種の高分子材料の試験を行い、降伏応力、伸び、破壊エネルギー、弾性歪み、弾性エネルギー等との相関を調べ、弾性歪みと弾性エネルギーと最も関連があると報告している⁷² (Fig. 1.15)。

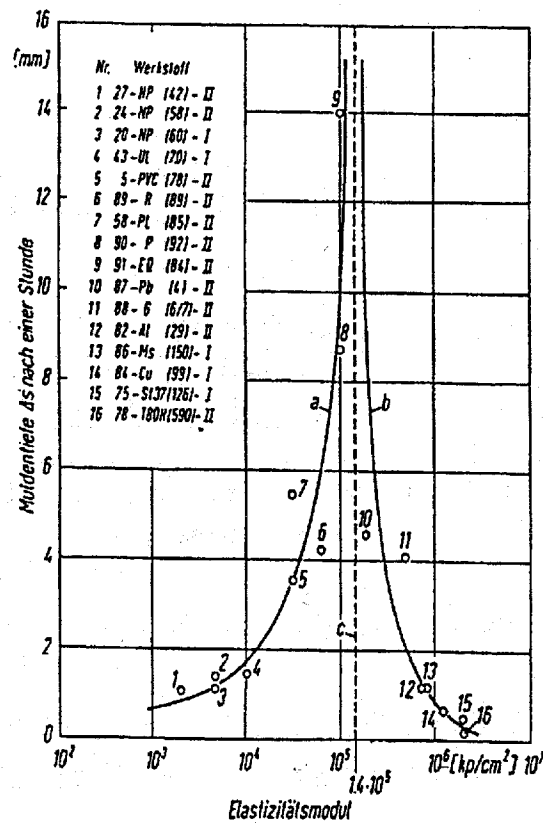


Fig. 1.15 Relationship between erosion and elastic modulus.

1.3 既往の研究の問題点

固体粒子衝突エロージョン研究の最終目的は、材料の寿命予測、すなわち損傷量の予測であるが、材料開発者の立場から考えると、定性的、定量的には以下の2つが挙げられる。

- (1) 諸材料の耐久性の比較
- (2) 材料の寿命推定

(1)は材料開発および品質管理のための材料の耐久性の相対的評価、すなわち A 材料と B 材料とではどちらが耐エロージョン性に優れているかを調べることが目的である。この場合、(2)で要求される絶対値を求める必要がないので、比較的簡単なように思われる。すなわち、実機の条件と多少違っていても、むしろ試験時間を短縮するためにそれより厳しい条件を選んで加速試験を行い、エロージョンの大小によって材料の耐久性の順位付けを行えば目的が達成できるように考えられている。

ところが、エロージョン試験では、エロージョン量の大小を比較する以前に、再現性のあるデータを得ることすら困難であることがまず最初の問題点として挙げられる。すなわち測定される試片減量にばらつきが多い。これは一人の試験者が試験を行った場合にも起こることであり、この原因は本章で述べたようにこのエロージョン過程には極めて多くの因子が関与しており (Fig. 1.8)、さらに Fig. 1.10 や Fig. 1.12 に示した通り、これらの条件が僅かに変化しただけで、損傷の大小ばかりでなく損傷機構が変わってしまうからである。また、既往の研究の中にはこれらの条件を全く考慮していないものもある。このように一つの試験装置においてでさえ十分な再現性が得られない原因を考えると、他の研究者すなわち試験装置が変われば全く一致しないのも当然である。エロージョン研究においては、材料評価を行う以前に試験装置の評価が必要となる。

さらに、たとえ上記の諸点を改善して、再現性のあるデータが得られるようになっても、次の深刻な問題が存在する。それは、そのようにして選定された材料が実際の装置構成材料に用いられたとき、その寿命が実験室で得られた結果と一致することはほとんどないことである⁷³⁾。これは、現場の技術者によって度々指摘されている問題であり、エロージョン試験が前述の試験目的のうち、易しい方の目的さえ達成できないことに他ならない。この原因は、明らかに現場での粒子衝突条件と実験室での条件とが異なるからであると考えられる。試験装置におけるこれらの条件が実際の装置におけるそれらと少しでも異なれば、試験結果が実機における成績と定性的にさえ一致しなくなるのは当然である。しかし、試験条件と実機のそれとを完全に一致させると加速試験の意味がなくなる。そこで、試験装置における粒子衝突条件を完全に把握し、その条件下における材料の損傷挙動から実装置の損傷挙動を推定するという方法を採らざるをえない。

以上述べたように、諸材料の耐エロージョン性評価のためには、再現性の点からも、まず試験装置内の粒子の衝突条件を把握することが必要となる。

1.4 本研究の目的と構成

これまで述べたきたように一般に固体粒子衝突エロージョンにおいて現場での成績を予測するための実験室の加速試験法は未だ確立されていない。このことは、今後新たに加工性、耐食性、耐摩耗性、柔軟性等の材料特性が改善された材料が開発されたとしても、その材料の耐エロージョン性が従来の材料と比較してどの程度優れているかを判定することができないことを意味している。そこで、本研究では従来から多くの工業分野で用いられている金属材料、セラミック材料、高分子材料だけでなく、最近注目されているセラミックコーティング材料および下水道管用ポリエチレンの耐エロージョン性について調べ、これらの材料が現場に用いられる際の加速試験法、すなわち耐エロージョン性の評価法の確立をすることを目的とした。

本論文は8章からなる。第2章以下の構成は以下の通りである。

第2章では固体粒子衝突エロージョン試験に用いる試験装置、すき間噴流法試験装置および2種の噴流型試験装置についての概略、試験方法、試験条件および粒子の衝突条件を述べる。すき間噴流法試験装置については装置内の粒子の衝突挙動を数値解析から解析し、それを用いた損傷の衝突角度依存性の算出方法を述べる。

第3章ではセラミック材料の損傷と粒子衝突条件との関係を述べ、セラミック材料の短所を改善した減圧プラズマ溶射したセラミックコーティング材料の耐エロージョン性をセラミックバルク材および金属材料のそれと比較する。最後にセラミック材料の耐エロージョン性評価について検討する。

第4章では高分子材料の損傷と粒子衝突条件との関係を述べ、最近現場での溶接技術の発達によって下水道管材料として有望なポリエチレンの耐エロージョン性を他の材料と比較する。また、その損傷と材料の機械的性質との相関を調べる。最後に高分子材料の耐エロージョン性評価の問題点を述べる。

第5章では金属材料の損傷機構と粒子衝突条件との関係を述べ、耐エロージョン性評価の上で重要となる臨界衝突速度を説明する。次に、金属材料の耐エロージョン性に対する材料の硬さの影響、粒子の衝突速度の影響について検討する。最後に金属材料の耐エロージョン性評価の問題点を述べる。

第6章では第3章から第5章までで得られた諸材料における損傷特性と材料の硬さ、粒子衝突速度との関係を述べ、臨界衝突速度の意義を述べる。次に、金属材料について粒子一試片間の摩擦係数から臨界衝突速度を測定する方法を述べる。さらに、粒子衝突時の材料挙動から臨界衝突速度の理論式を導出して理論値と実測値の比較を行った後にセラミック材料、高分子材料の臨界衝突速度について述べる。

第7章では諸材料において実験室での試験結果と現場での成績が一致しない理由を粒子の衝突条件と損傷の衝突角度依存性から論じ、臨界衝突速度を用いた諸材料の耐エロージョン性を評価する方法について提案する。

第8章では本論文の総括を行う。

第2章 試験装置および粒子衝突条件

2.1 緒言

本章ではエロージョン試験に用いるすき間噴流法試験装置および粒子衝突速度域の異なる2種の噴流型試験装置の概略、試験方法、試験条件および粒子の衝突条件について述べる。第1章で述べたように、諸材料の耐エロージョン性を評価するためにも、再現性のあるデータを得るためにも、まず試験装置内の粒子の衝突条件を十分に把握することが必要である。そこで、すき間噴流法試験装置においては試片表面における粒子の衝突頻度、衝突速度、衝突角度の数値解析を行い、その結果と衝突痕の観察から、装置内の粒子衝突条件について把握する。さらに、それに基づいた損傷の衝突角度依存性の算出方法を述べる。2種の噴流型試験装置においては、粒子の衝突速度の測定法を述べ、衝突角度を加速管出口での噴流の広がりから検討する。

2.2 すき間噴流法試験装置

2.2.1 試験装置と試験条件

Fig. 2.1 に松村らによって開発された4連式すき間噴流法試験装置¹⁾の概略図を示す。本試験装置における粒子の衝突速度は、後述するように約2 m/sである。透明塩化ビニール製の液槽は、固体粒子が液の上昇流中に均一に浮遊している槽下部の流動層と、固体粒子と液とを分離する槽上部の沈降層から成っている。流動層部に沈められた試験部のノズル

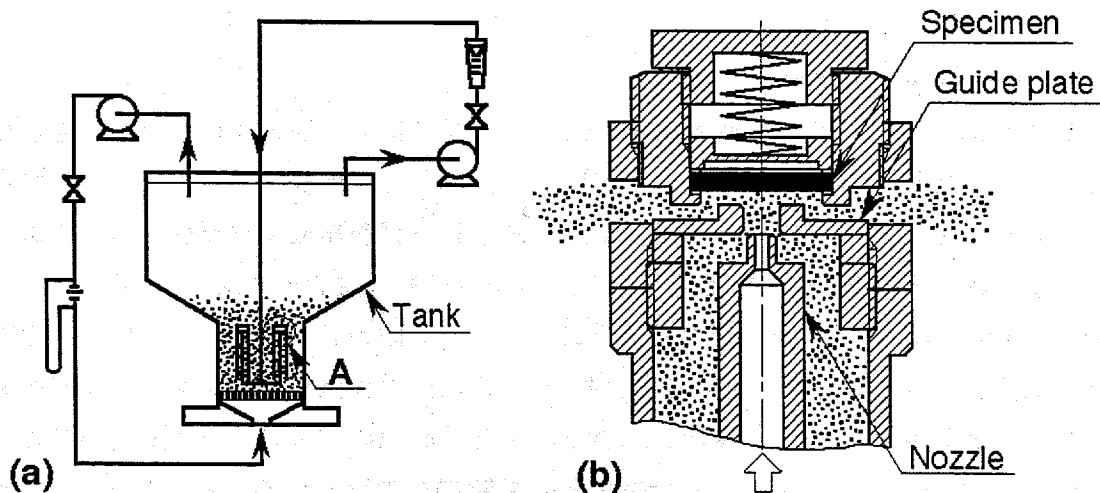


Fig. 2.1 Schematic diagrams of the testing apparatus; (a)jet-in-slit type apparatus, (b)test section (part A in figure (a)).

から清澄液が噴出されると、周囲からスラリーが引き込まれる。噴出された清澄液とスラリーは混合されて試片（ $20\phi \times 3t$ あるいは $14\Box \times 3t$ ）に衝突し、その後、試片とガイドプレートのすき間（2 mm）を放射状に流出する。試験部から流出されたスラリーは沈降層部で密度の違いにより固体粒子と清澄液に分離される。試験面に衝突するスラリー濃度、すなわちスラリー中の固体粒子の占める割合は流動層部へ送る液流量を調整することにより容易に変化させることができる。

固体粒子には、Fig. 2.2 に示す粒径分布を持つコニカル珪砂（密度 2.63 g/cm^3 ）を用いた。この分布は粒子径による衝突条件の解析、および実機の条件により近づけるため、通常より広いものを用いた。スラリー（濃度 25 wt%）はこれらの粒子を水道水（ $\text{pH}=6.85$ ）に加えて作成した。試験部ノズル（孔径 1.8 mm）に送られる清澄液流量はノズル1基につき 1.5 l/min、周囲から吸い込まれるスラリー流量は 1.92 l/min に調整した。

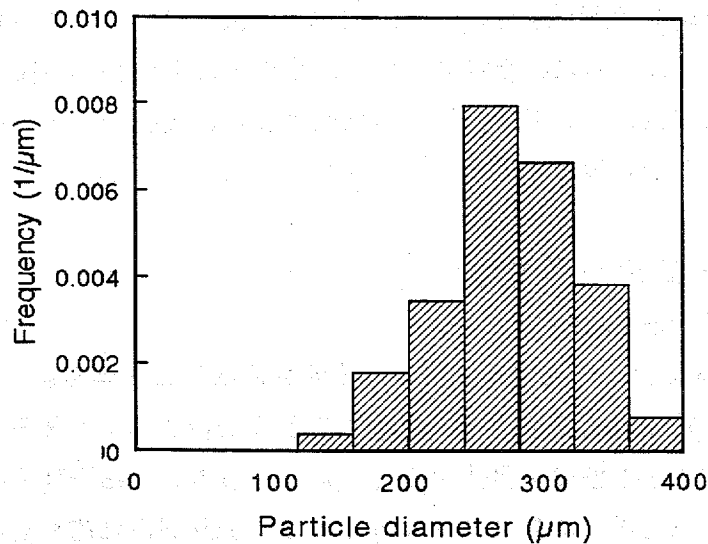


Fig. 2.2 Frequency distribution of solid particles (SiO_2).

2.2.2 試験結果の再現性

すき間噴流法試験装置における試験結果の再現性には、試験部での噴流の状態、流動層でのスラリー粒子の浮遊状態、スラリー粒子の性状などが関係する。そこで、これらの諸点について十分に配慮した後、本試験装置で得られる試験結果の再現性について調べた。試片として炭素鋼鋼管（SGP）を用いた。試片減量の経時変化を Fig. 2.3 に示す。本試験装置では流動層部に 4 基の試験部が設けてあるので、4 個の試片について同時に測定することができる。1 個の試片に注目すると、15 min ごとの試片減量の測定値は 1 本の直線上に乗っていて再現性が良いことを示している。また、4 個の試片における測定値のばらつきは ±7% 以内であった。さらに、試片減量と試験時間の関係が直線であること、すなわち損傷速度が一定であることから、この試験条件ではスラリー粒子の疲労（粒子の破壊による損傷速度の低下）はないことが明らかである。

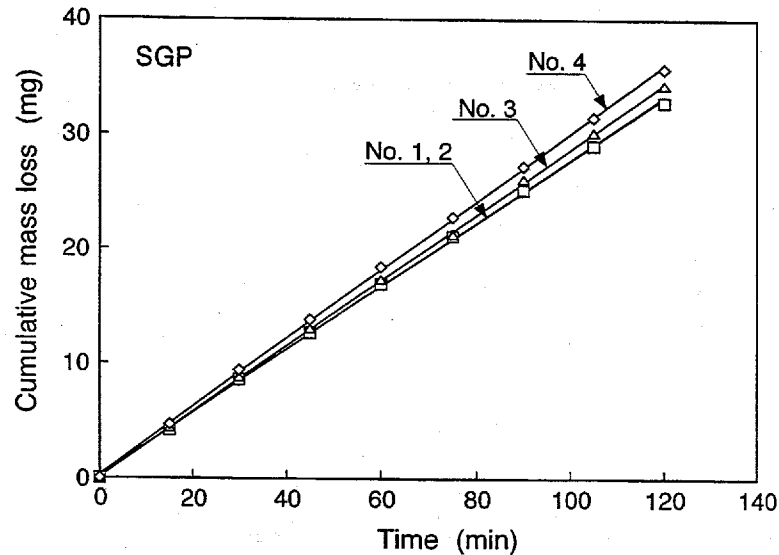


Fig. 2.3 Relationship between cumulative mass loss and testing time for carbon steel pipe (SGP).

2.2.3 粒子衝突条件

(1) 数値解析

① 粒子の運動軌道

すき間噴流法試験装置においては粒子は場所によって異なった衝突角度、衝突速度で試片表面に衝突している。そこで、数値解析より粒子衝突挙動の把握を行った。試片表面への粒子衝突挙動の解析においては、試験部の液の速度ベクトルを計算し、その速度場における粒子運動の軌道を計算した。まず液の速度ベクトルを有限体積法²⁾を用いて計算した。モデルは軸対称二次元とし、格子は Fig. 2.4 のように分割した。初期条件として、清澄液噴流部の平均流速 9.82 m/s, 周囲から吸い込まれるスラリーの平均流速 1.74 m/s を与えた。試験部における液の速度ベクトルの計算結果を Fig. 2.5 に示す。

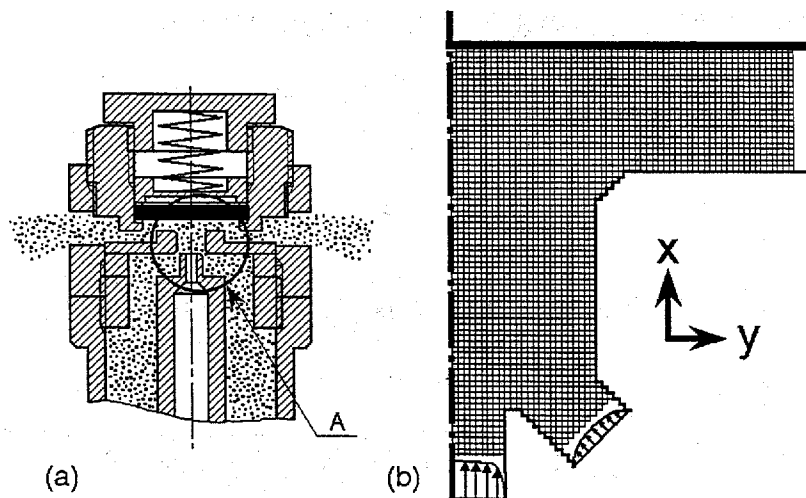


Fig. 2.4 Grid for numerical calculation of flow velocity vectors in test section; (a) calculation part, (b) grid in calculation part (part A in figure (a)).

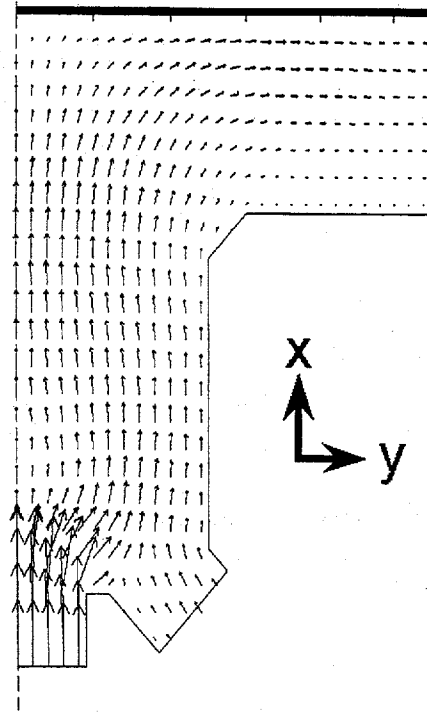


Fig. 2.5 Calculation result of flow velocity vectors in test section.

次に、得られた試験部の液の速度場における粒子の運動軌道を次のような仮定の下に調べた。

- (a) 粒子に加わる外力は液の流れによる抗力と重力のみで、粒子相互の衝突による干渉はないとする。
- (b) 粒子形状は球形とする。
- (c) 粒子が試片に衝突した後の運動については考慮に入れない。

粒子の運動方程式は以下の式を用いた。

軸方向 (x 方向)

$$dV_x/dt = 3/4 \times C_d / D_p \times \rho_l / \rho_p \times (u_x - V_x) \times \sqrt{(u_y - V_y)^2 + (u_x - V_x)^2} - (1 - \rho_l / \rho_p) \times g$$

半径方向 (y 方向)

$$dV_y/dt = 3/4 \times C_d / D_p \times \rho_l / \rho_p \times (u_y - V_y) \times \sqrt{(u_y - V_y)^2 + (u_x - V_x)^2}$$

ここで、 ρ_l は液の密度、 ρ_p は粒子の密度、 D_p は粒子の直径、 g は重力加速度、 V は粒子の速度、 u は液の速度、添字の x, y は軸方向、半径方向の成分、 C_d は粒子の抵抗係数を示す。 C_d には本試験装置における粒子レイノルズ数に適用でき、しかも精度の高い田中らの式³⁾を用いた。

初期入力値として、Fig. 2.2に示した粒子がスラリー流入口からスラリー液の流速と同じ速度で流入するものとした。流入粒子数はスラリー流入量および濃度から 304 個/ms となった。Fig. 2.6に粒子径 140, 260, 380 μm の粒子運動の軌道を示す。ノズルに近いスラリー流入口から入った粒子はノズルから噴射される清澄液によって流入直後に外周方向に押し流されていることが分かる。一方、スラリー流入口中央から入った粒子のうち、試片中央の沖合いで交差、衝突しているものがある。これは、最大直径 380 μm の粒子の軌道であり、他の粒子に比べ、慣性力が液の抗力に勝ったため試片の中心部まで到達したものである。

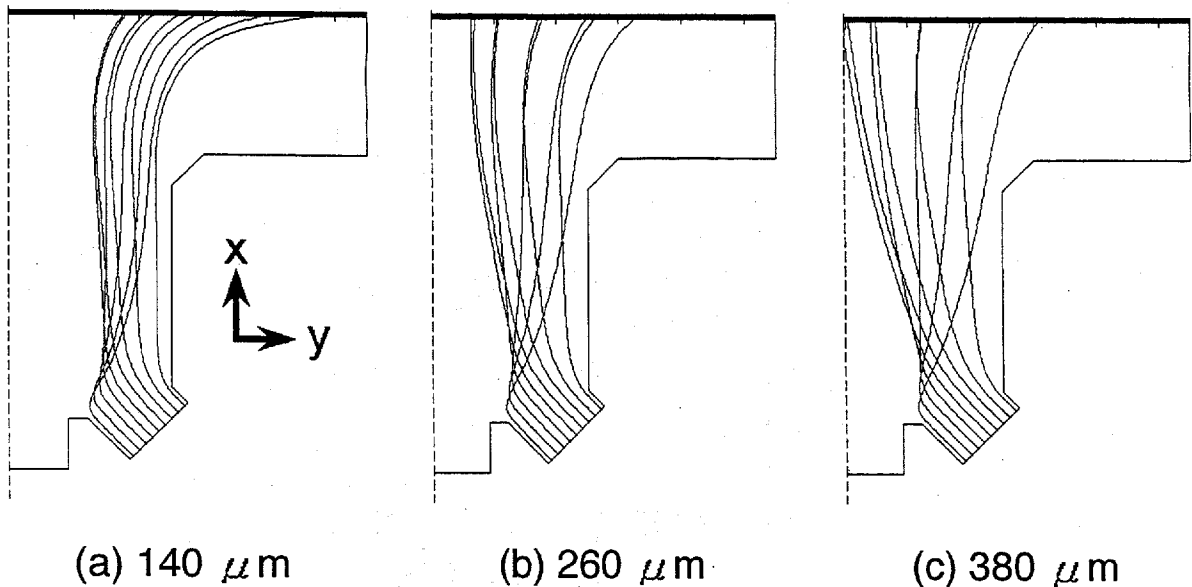


Fig. 2.6 Calculated locuses of solid particles in the test section; particle sizes of 140 μm (a), 260 μm (b) and 380 μm (c).

② 粒子の衝突条件

次に粒子運動の軌道から、粒子が試片表面に衝突するときの各場所における衝突頻度、衝突速度、衝突角度を調べた。

衝突頻度は、試片の中心から 3.2 mm までを 0.4 mm 間隔で 8 区間に分け、そこに衝突する粒子の数を累計した。結果を Fig. 2.7 (a) に示す。ここでは、粒子径の影響は無視した。衝突頻度は試片中央部で最大となり、外周になるに従って少なくなっていることが分かる。この結果を Fig. 2.6 における粒子の衝突挙動と比較すると一見矛盾するようであるが、Fig. 2.6 に示したのはそれぞれ粒子 1 個の軌跡であり、粒子径分布 (Fig. 2.2) およびスラリー入口

での流速分布を考慮する前のものである。さらに、Fig. 2.7 (a)に示した衝突頻度は単位面積当たりの衝突粒子数であり、外周においては衝突する面積が中央部と比べて大きいため、衝突頻度が小さくなっている。

粒子の衝突速度、衝突角度の計算結果を Fig. 2.7 (b), (c)に示す。ここでは、粒子径の影響が顕著に現われたため、その影響を図中に示した。試片中心部では大粒径の粒子が高角度で衝突しており、試片周辺部になるに従って、衝突速度、衝突角度とも小さくなっている。また、小粒径の粒子は試片中央部において全く衝突していない。

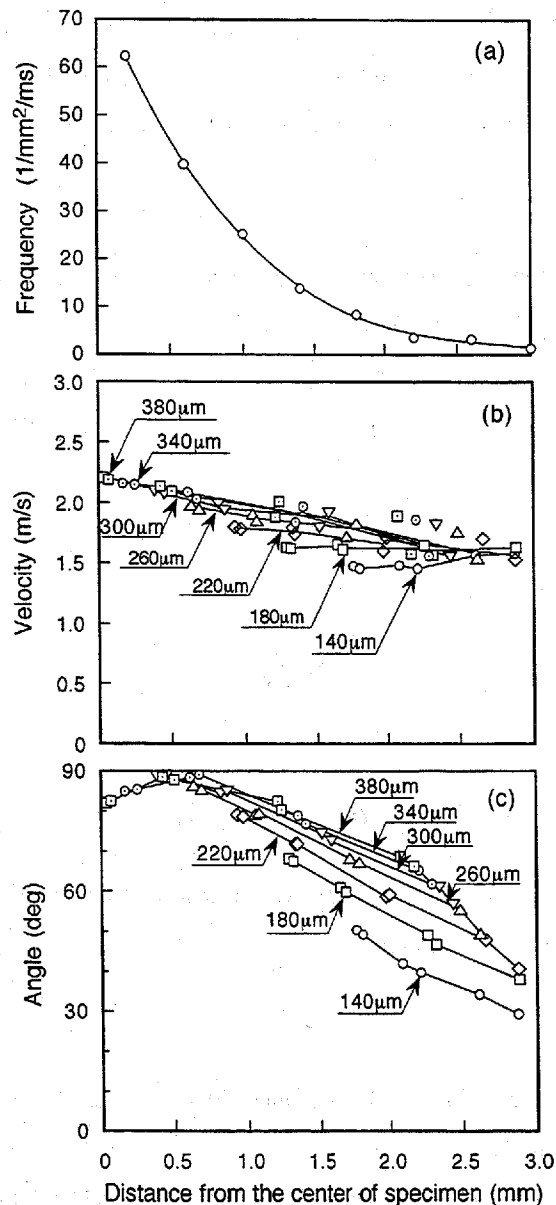


Fig. 2.7 Calculated impact conditions of solid particles on specimen surface; (a) frequency of impacted particles, (b) impact velocity, (c) impact angle.

(2) 数値解析結果の検証

数値解析によって得られた粒子衝突条件の妥当性を調べるため、Fig. 2.2 のコニカル珪砂を含むスラリーを用いて試験を行い、試片表面の粒子衝突痕の測定を行った。まず、衝突頻度について検討を行った。

粒子の衝突頻度、すなわち試片表面に衝突する粒子の個数を正確に測定するためには、粒子の衝突痕が重ならないよう、ごく短時間、試片表面をスラリー流れに曝す必要がある。300 μm の粒子が衝突した時は、平均直径 10 μm の衝突痕が残り、約 1.2 s で試片全面は衝突痕で覆い尽くされる。特に試片中央部では粒子の衝突は密になってくるので、単一の衝突痕を得るためには、露出時間を少なくともこの値の 1/5~1/10 にする必要がある。

Fig. 2.8 に試験面露出装置の概略図を示す。80° の扇形の開口を持つステンレス製シャッター(厚さ: 0.1 mm, 実際は試片と密着している)を通過した粒子はポリビニルシートを張り付けた試片表面に衝突する。この試片表面は回転できるようになっており、回転軸には曝露時間測定用のバーが取り付けられている。この測定装置を用いると、平均 0.12 s だけ試片表面をスラリー流れに曝すことができ、衝突痕の重なりを避けることができた。

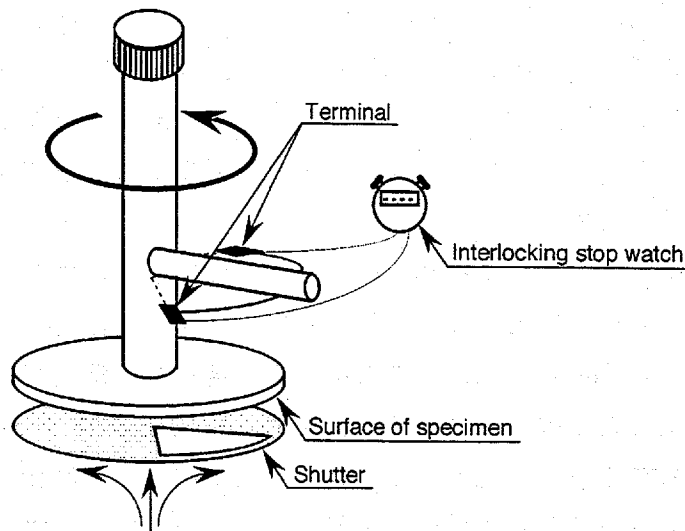


Fig. 2.8 Schematic diagram of apparatus for measuring particles impact frequency.

粒子の衝突頻度の測定結果を Fig. 2.9 (a) に示す。図には比較のため計算値を記してある。試片中央から 1.5 mm より外側では、測定値と計算値はほぼ一致しているが、1.5 mm 以内では計算結果の方が大きな値を示している。また、試片中央から 0.8 mm 以内では、衝突頻度はほぼ一定になっている。この計算値と測定値との差異は試片中央部における粒子相互の衝突によるものと考えられ、粒子軌道計算における仮定(各粒子は衝突しない)が適用できない範囲であると思われる。一方、この条件が満足できる(粒子相互の衝突がほとんど生じていない)外周において計算値と測定値がほぼ一致したことは、粒子軌道計算が妥当であることを示している。ここで、試片中央部で生じている現象は次のように考えられる。試片中央部に衝突した粒子は衝突角度が 90° 近くであるため、試片表面衝突後に試

片表面から流れ去りにくい。その粒子が流れ去る途中、次の粒子が粒子に衝突して試片に衝突できない。その結果、試片表面の粒子の衝突痕は減少したものと考えられる。結論として、粒子衝突条件の数値解析結果の内、衝突頻度については本試験装置において、周辺部に対しては適用できるが、中央部に対しては適用できない。

次に、衝突速度の妥当性を検討した。衝突粒子の直径が一定の場合、衝突速度が高くなれば、衝突痕の大きさは大きくなる。また、衝突角度により衝突痕の衝突方向の長さ (L) と幅 (W) の比 (W/L) は変わる⁴⁾。すなわち、衝突角度が低くなるにつれて、長さ (L) は幅 (W) に対し大きくなり、この比 (W/L) は小さくなる。このように衝突痕の大きさから衝突速度、形状から衝突角度を推測することができる⁴⁾。衝突痕の形状の測定においては正確な暴露時間は必要でないため、本試験装置内スラリー中に短時間(約 0.5~1 s)、試験部を沈め、試片表面に粒子を衝突させた。また、このとき試片表面に柔らかい半田の鏡面を作り、衝突痕が大きく明確に現れるようにした。

計算による衝突速度の妥当性を確かめるため、衝突痕の正方形相当径 $S^{1/2}$ (面積 S の平方根) が粒子衝突速度とほぼ比例の関係にある⁵⁾ことを利用して衝突速度を求めた。測定された $S^{1/2}$ (Fig. 2.9 (d), 平均値のみを示した。)から求められた衝突速度と粒子の軌道解析から計算された衝突速度を Fig. 2.9 (b)に示す。測定値は計算値との比較のため試片中央 0.2 mm における値を基準に計算結果に合わせ換算した。測定値と計算値は共に周辺部になるに従って小さくなっている。このことは、計算値が周辺部ほど衝突速度が低い事実を正しく再現したことを示している。

衝突速度と同様に、計算した衝突角度の妥当性を検討した。まず、粒子自由落下試験装置にて本試験と同一の粒子を 2.0 m/s で落下させ、得られた衝突痕の結果から衝突角度と W/L との関係性を求めた (Fig. 2.9 (e))。この関係を利用して試験装置内で測定された衝突痕の試片半径方向の幅と長さの比 (W/L) (Fig. 2.9 (f), 平均値のみを示した。)を衝突角度に換算した。測定から求められた衝突角度と粒子の軌道解析から計算された衝突角度を Fig. 2.9 (c)に示す。測定値と計算値は共に周辺部になるに従って、小さくなっている。すなわち、計算された衝突角度は測定値と同一の傾向を示しており、周辺部において粒子は低い角度で衝突することが確かめられた。周辺部で両者に差が生じたのは、計算値に粒子自由落下試験装置での結果、すなわち空気中での粒子衝突痕の結果を用いたためであると考えられる。空気中では粒子が衝突後に跳ね返りやすいが、スラリー中では跳ね返りにくい。そのため、スラリー中での粒子は周辺部で滑り、衝突痕の長さ L は大きくなり、 W/L は小さくなったものと思われる。また、試片中央部では測定値が 1 を超えており、これは衝突角度がほぼ 90° になっていることを意味している。実際の粒子が球形でないことにも起因すると考えられる。

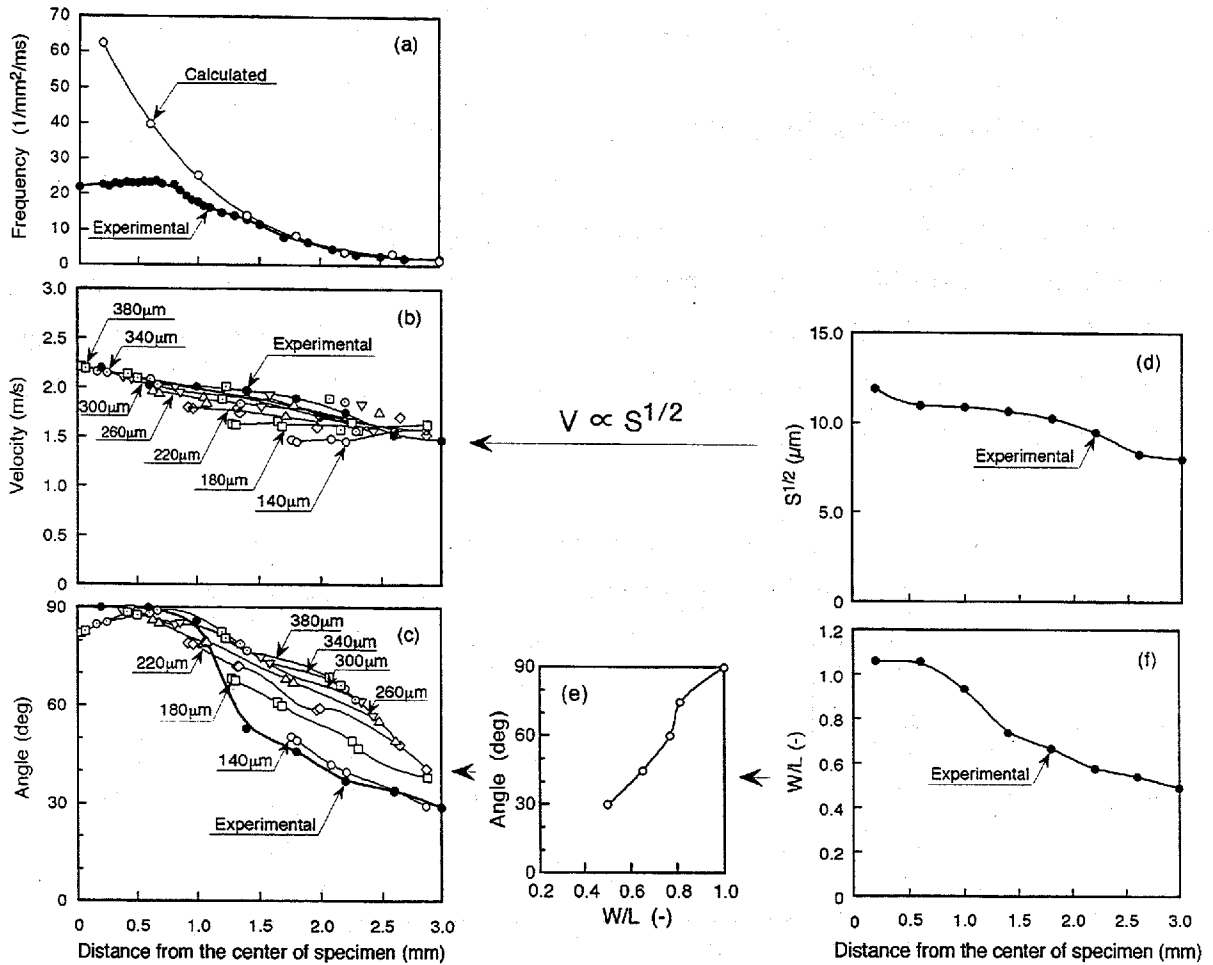


Fig. 2.9 Comparison of solid particles impact condition between measurement and calculation; (a) impact frequency, (b) impact velocity, (c) impact angle and measurement of (d) equivalent square diameter of craters, (f) ratio (W/L) of length (L) and width (W) of craters and (e) relationship between impact angle and ratio (W/L).

(3) 粒子衝突条件の決定とその妥当性

衝突条件のうち衝突頻度は、試片中央部 1.2 mm までは実測値を採用した。衝突速度は解析値のものを用いた。衝突角度については、Fig. 2.7 (c)において衝突角度がピークに達している試片中央から 0.6 mm までの衝突角度を 90° に補正した。

このようにして決定した粒子衝突条件が妥当かどうか検討するため、アルミニウム試片についてエロージョン量の推測と実際のそれとの比較を行った。すなわち、試片中央から 3.2 mm までを 0.4 mm 間隔で 8 区間に分け、エロージョン量を計算した。エロージョン量は衝突頻度、衝突速度の 2.3 乗⁵⁾、粒子径の 2.1 乗⁶⁾（ここで用いる 2.1 乗は粒子 1 個当たりの損傷に対する指数であり、Fig. 1.11 に示したものと異なる。）に比例するものとした。衝突角度の影響については一般的な理論値はなく、実験値を用いるしかない。アルミニウムの各衝突角度でのエロージョン量は衝突角度が正確に制御できる上昇噴流法試験装置で測定した値⁷⁾を用いた。実際のエロージョン量の測定は Fig. 2.2 の粒子を用いて損傷を

生じさせた後、表面粗さ計で試験片各場所の損傷深さの経時変化を測定し、損傷速度が一定になったときの値を用いた。

Fig. 2.10 に得られた損傷速度と実際のエロージョン試験の損傷速度を示す。計算値は比較のため、測定値に合わせてある。両曲線を比較すると、計算結果では試片中央から 1.5 mm 付近に多少のばらつきが認められるが、計算による損傷速度は実際のエロージョン試験の損傷速度とほぼ一致しており、数値解析を実測値で補足して求めた粒子の衝突条件は実際の衝突条件を十分示していることが確認された。なお、計算における損傷速度のばらつきは試片表面の各損傷区間（8 区間）の境界近くに衝突する粒子がその隣の区間に与える損傷を考慮に入れなかったためと考えられる。

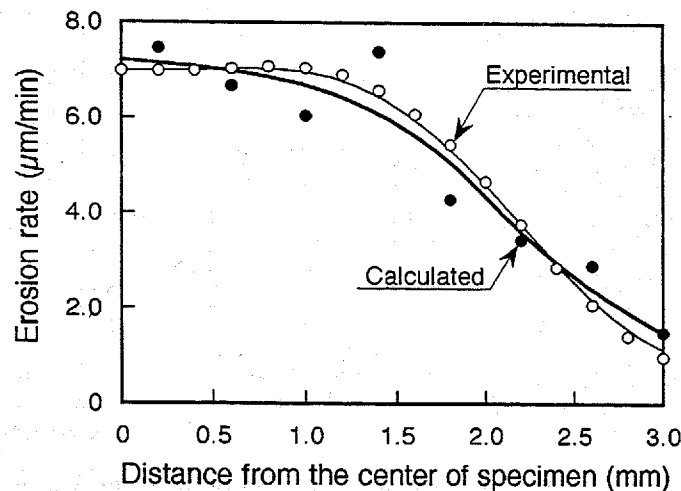


Fig. 2.10 Comparison of the erosion rate of aluminium between calculation and experimental measurement.

2.2.4 損傷の衝突角度依存性の算出方法

すき間噴流法試験装置において、数値計算および試片表面の衝突痕の形状の測定等から粒子の試片表面への衝突条件を詳細に把握し、この試験装置の特徴として一つの試片表面にあらゆる角度で粒子が衝突していることが分かった。これでは、従来の試験装置の様にスラリー粒子を全て同じ角度で衝突させ、試片全体の損傷量を測定して衝突角度の影響を調べることはできない。しかし、試片表面上の任意の位置における衝突角度が分かっているので、このことを逆に利用することによって、一つの試片から粒子の衝突角度の影響を迅速に測定できる。そこで、この試験装置の特徴を利用し、各種材料での衝突角度依存性を求め、この方法が利用できるかどうかを確かめた。

まず、それぞれの材料の角度依存性を求めた。試片中心部では粒子は直角に、周辺部では低い角度で衝突する。すなわち、粒子衝突角度が位置に依存する。さらに、同じ場所でもスラリ一流速や粒径によって衝突角度は変化する。これらの影響因子の全てを考慮して、衝突角度を決める必要がある。

試片中心からの距離が、例えば 1.5 mm の場所における粒子の衝突角度が全て同一であれば、衝突角度に対する損傷量は容易に求めることができる。しかし、Fig. 2.9 (c)に示す様に同じ場所でも粒径によって衝突角度は異なるので、単純に横軸を衝突角度に変換することはできない。そこで、損傷速度は前述の計算と同様に衝突頻度、粒子径の 2.1 乗⁶⁾、衝突速度の 2.3 乗⁵⁾に比例するものとし、衝突角度と試片各場所での損傷速度の関係を求めた。直径 $D(\mu\text{ m})$ の粒子が衝突角度 $\alpha(\text{deg})$ 、衝突速度 $V(\text{m/s})$ 、衝突頻度 $F(1/\text{mm}^2\text{ ms})$ で衝突する場合、損傷速度 $w(l)(\mu\text{ m/min})$ は以下のように表される。

$$w(l) = e(\alpha) \times (D/250)^{2.1} \times (V/2)^{2.3} \times F \times 60/1000$$

ここで、 $e(\alpha)$ がいま求めようとしている損傷量の角度依存性であり、基準粒子(250 $\mu\text{ m}$) 1個が基準速度(2.0 m/s)、衝突角度 $\alpha(\text{deg})$ で衝突したときの損傷量として表される。また、 $w(l)$ についてはある粒子についてのみの損傷を示していて、実際に測定される損傷はその他の粒子による損傷との合計 $W(l)(\mu\text{ m/min})$ であり、以下のように表される。

$$W(l) = w_1(l) + w_2(l) + w_3(l) + w_4(l) \dots\dots$$

$W(l)$ については試片中央 0.2 mm から 3.0 mm において 0.4 mm 間隔で 8 点に分け、 $W(0.2) \sim W(3.0)$ と表し、それぞれの場所について計算を行った。 $e(\alpha)$ については α を 20~90° で 10° 間隔で 8 点に分け、 $e(20) \sim e(90)$ と表した。前述の粒子軌跡計算から試片表面の各場所に衝突する粒子を選出して、損傷速度 $W(0.2) \sim W(3.0)$ の各場所の損傷速度の計算を行った。実際に、 $W(0.2)$ について計算すると、以下のようなになる。

$$W(0.2) = 2.82 \times e(90)$$

この係数 2.82 についての計算過程を以下に示す。

試片中心からの距離が 0.2 mm、すなわち 0~0.4 mm の範囲には以下の条件で粒子が衝突する。

粒径($\mu\text{ m}$)	衝突速度(m/s)	衝突角度(deg)	衝突頻度($1/\text{mm}^2\text{ ms}$) (=個数(1/ms) / 衝突面積(mm^2))
300	2.10	90	4.76 / ($\pi \times 0.4^2$)
340	2.16	90	2.76 / ($\pi \times 0.4^2$)
340	2.15	90	2.73 / ($\pi \times 0.4^2$)
380	2.21	90	0.57 / ($\pi \times 0.4^2$)
380	2.19	90	0.57 / ($\pi \times 0.4^2$)

これらの値を用いて $W(0.2)$ を計算すると、以下のようになり、2.82 が導かれる。

$$\begin{aligned}
 W(0.2) &= e(90) \times (300/250)^{2.1} \times (2.10/2)^{2.3} \times 4.76 / (\pi \times 0.4^2) \times 60/1000 \\
 &+ e(90) \times (340/250)^{2.1} \times (2.16/2)^{2.3} \times 2.76 / (\pi \times 0.4^2) \times 60/1000 \\
 &+ e(90) \times (340/250)^{2.1} \times (2.15/2)^{2.3} \times 2.73 / (\pi \times 0.4^2) \times 60/1000 \\
 &+ e(90) \times (380/250)^{2.1} \times (2.21/2)^{2.3} \times 0.57 / (\pi \times 0.4^2) \times 60/1000 \\
 &+ e(90) \times (380/250)^{2.1} \times (2.19/2)^{2.3} \times 0.57 / (\pi \times 0.4^2) \times 60/1000 \\
 &= 2.82 \times e(90)
 \end{aligned}$$

また、他の場所において、衝突角度 85° で衝突する粒子が1個あるとすると、 80° で衝突する粒子が0.5個、 90° で衝突する粒子が0.5個であるとして計算を行った。以下に $W(0.6)$, $W(1.0)$ の結果を示す。

$$\begin{aligned}
 W(0.6) &= 0.364 \times e(80) + 1.68 \times e(90) \\
 W(1.0) &= 0.0392 \times e(70) + 0.812 \times e(80) + 0.254 \times e(90)
 \end{aligned}$$

$W(1.6) \sim W(3.0)$ についても同様の式で表され、 $W(0.2) \sim W(3.0)$ と $e(20) \sim e(90)$ との関係については以下のように行列でまとめることができる。

$$\begin{pmatrix} W(0.2) \\ W(0.6) \\ W(1.0) \\ W(1.4) \\ W(1.8) \\ W(2.2) \\ W(2.6) \\ W(3.0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2.82 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.364 & 1.68 & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0392 & 0.812 & 0.254 & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.00779 & 0.433 & 0.455 & 0.0113 & \\ 0 & 0 & 0.000105 & 0.00944 & 0.131 & 0.181 & 0 & 0 & \\ 0 & 0.0000230 & 0.00487 & 0.0130 & 0.134 & 0.0695 & 0 & 0 & \\ 0 & 0.000482 & 0.00532 & 0.0784 & 0.0541 & 0 & 0 & 0 & \\ 0.0000481 & 0.00151 & 0.0193 & 0.0345 & 0.00299 & 0 & 0 & 0 & \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e(20) \\ e(30) \\ e(40) \\ e(50) \\ e(60) \\ e(70) \\ e(80) \\ e(90) \end{pmatrix}$$

この式を用いれば、 W の分布を測定し、その結果から $e(20) \sim e(90)$ を求めることができる。すなわち、Fig. 2.10 に示すような試片中心からの距離に対する損傷速度 ($\mu\text{m}/\text{min}$) を、衝突角度に対する基準粒子1個の損傷量 (μm^3) に変換することができる。

この方法を用いて、金属材料の損傷速度の変換を行った一例を示す。アルミニウム (Al), 黄銅 (Brass) の変換前のエロージョン速度を Fig. 2.11 に示す。このデータを用いて、衝突角度依存性へのデータに変換したものを Fig. 2.12 に示す。これより、この方法で求められた損傷の衝突角度依存性は従来の報告と同様に硬度の低い材料ほど低角度側で損傷が最大となった。

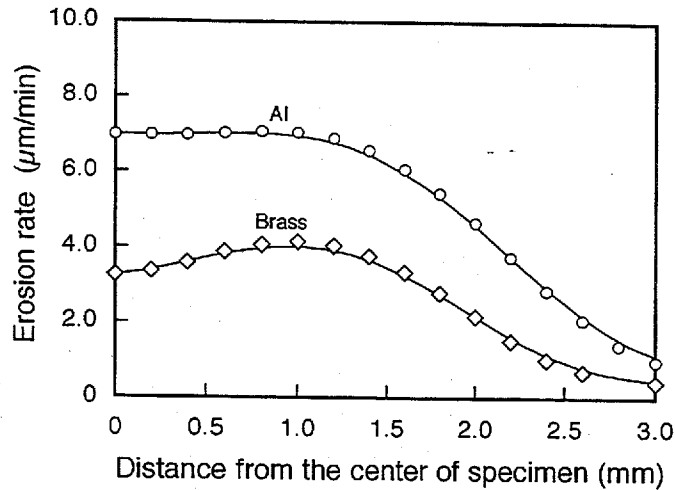


Fig. 2.11 Relationship between erosion rate and distance from the center of specimen for metallic materials.

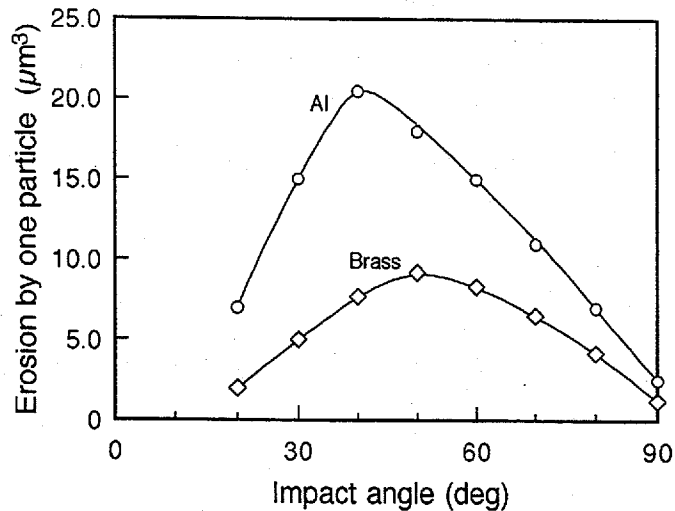


Fig. 2.12 Calculated erosion by one particle at the standard impact condition (impact velocity, 2.0 m/s; particle diameter, 250 μm) for metallic materials.

2.3 噴流型試験装置（ブロー型）

2.3.1 試験装置と試験条件

Fig. 2.13 に噴流型試験装置（ブロー型）の概略図を示す。本装置はブロー、バルブ、流量計、ホッパー、粒子混合部、ガラス製加速管（長さ 1 m、管内径 7.4 mm）、試験部から成っており、ホッパーから供給された粒子は粒子混合部で空気と混合され、ガラス製加速管を通り、試片に衝突する。また、バルブ 1, 2 で空気流量を 0.2~4 m³/min で調節することによって、粒子の衝突速度を後で述べるように 3~20 m/s の範囲で設定することができる。粒子の衝突角度は試片ホルダーの角度を変えることにより変更することができる。

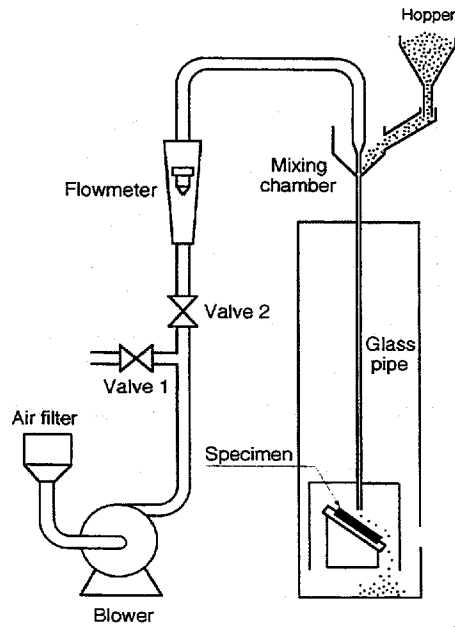


Fig. 2.13 Schematic diagram of a sand blast type apparatus (blower type).

固体粒子にはすき間噴流法試験装置で用いたものと同じの粒径分布 (Fig. 2.2) を持つコニカル珪砂を用いた。

2.3.2 粒子衝突条件

粒子の衝突速度はダブルディスク法⁷⁾により測定した。ダブルディスクの概略を Fig. 2.14 に示す。

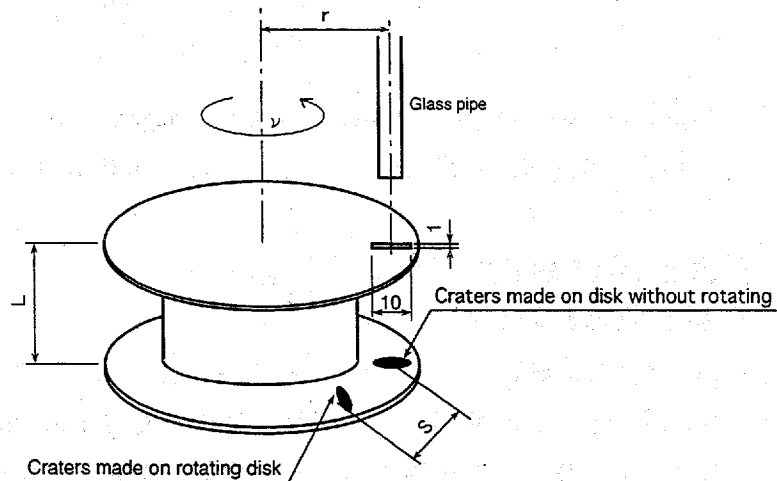


Fig. 2.14 Schematic diagram of double-disk method.

高速で回転する2枚の円盤 (ダブルディスク) の上部円盤のスリット (10 mm×1 mm) を通過した粒子は下部円盤に衝突する。通過した粒子は、円盤が回転しているため2枚の

円盤間の距離 L (mm)を進む間に、円盤が静止している時に衝突する場所よりも長さ S (mm)ずれた場所に衝突する。円盤の中心とガラス製加速管の中心との距離を r (mm)、円盤の回転数を ν (s^{-1})とすると、粒子衝突速度 V (m/s)は以下ようになる。

$$V = 2 \pi r \nu L / S$$

なお、本装置においては $L = 22$ mm, $r = 43.5$ mm であり、円盤の回転数 $\nu = 600 \sim 12000$ rpm で測定を行った。また、衝突痕の判定を容易にするため、下部円盤の表面にはアルミ箔が貼ってある。ダブルディスク法を用いて測定した空気流量と粒子衝突速度の関係を Fig. 2.15 に示す。

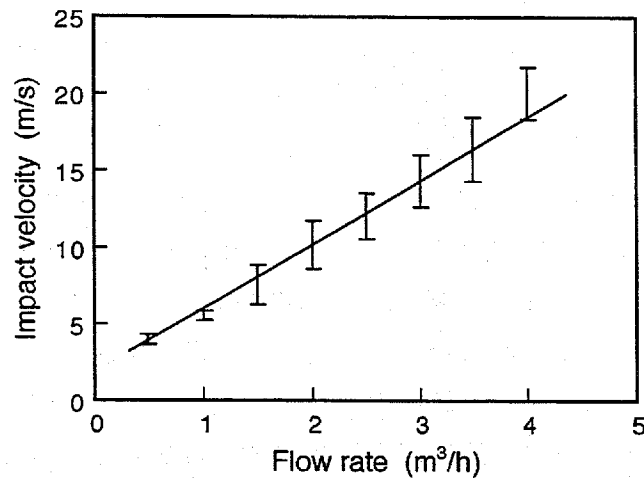


Fig. 2.15 Relationship between impact velocity and flow rate for silica sand (SiO_2).

各空気流量において粒子衝突速度のばらつきがあるが、この原因は粒子径のばらつきおよび加速管内の中心部と外周部での粒子速度の差によるばらつきであると考えられる。しかし、この図から分かるように、空気流量と粒子衝突速度の関係はほぼ直線とみなすことができる。粒子の衝突速度はこの直線の値を用いた。

次に本試験装置における試験結果について検討した。試片には高密度ポリエチレン (HDPE) を用いた。粒子衝突速度 15 m/s における質量減量の経時変化を Fig. 2.16 に示す。各衝突角度において初期の損傷速度は一定ではないが、落下させたコニカル珪砂が 1 kg 以上では各衝突角度において、それらは 1 本の直線上に乗っており、損傷速度が一定であることを示している。初期の損傷において一定の値を示さなかったのは、試片表面の研磨の状態が異なるためと考えられる。さらに、質量損失と落下させた砂の量の関係が直線であること、すなわち損傷速度が一定であることから、この試験条件では粒子の疲労（粒子の破壊による損傷速度の低下）はないことが明らかである。

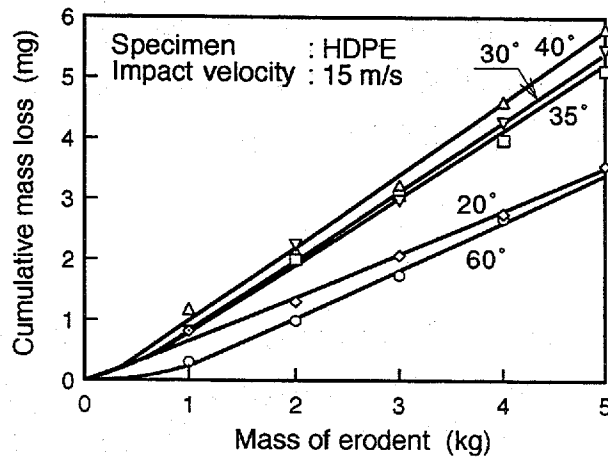


Fig. 2.16 Relationship between cumulative mass loss and particle mass for high density polyethylene (HDPE).

衝突頻度については、一般に粒子濃度が高くなるにつれて粒子同士の干渉や加速管出口において粒子の広がりが生じ、単位衝突量当たりの損傷量は減少することが知られている⁸⁻¹⁰⁾。本試験における粒子供給速度は約 $3 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ であり、このときの粒子間の相当距離¹⁰⁾は 3.5 mm と間隔が広いので、粒子の干渉の影響はほとんどない⁹⁾。

衝突角度については加速管出口における粒子の広がりを測定した。Fig. 2.17 に高密度ポリエチレン(HDPE)について衝突角度 60° 、衝突速度 15 m/s でのエロージョン試験を行った後の断面形状を示す。この図に示すように損傷の範囲は加速管の内径に対して約 3° 広がっていることが分かる。また、試片の長手方向においても同様な分布を示した。この断面形状から加速管より内側（加速管直下）での損傷量を計算すると、その損傷は全損傷量の約 90% を占めることが分かった。従って、粒子の広がりには 3° であっても、大半の粒子は加速管直下に集中しており、試片ホルダーの角度を粒子の衝突角度と見なすことができる。なお、試片上に生じている損傷分布は粒子の衝突頻度が異なるためであると考えられるが、この分布は本試験装置において用いられる損傷の評価法に対して影響はない。

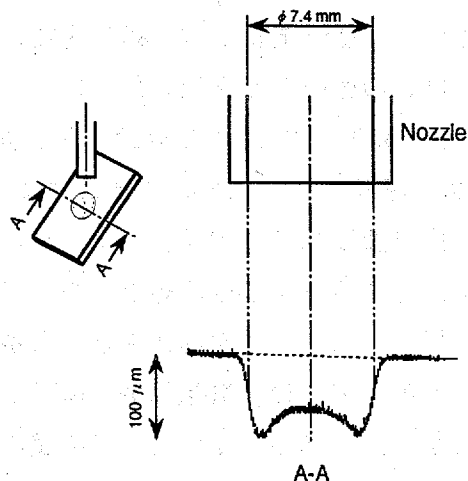


Fig. 2.17 Damaged surface profile of high density polyethylene (HDPE) at impact velocity of 15 m/s and impact angle of 60° .

2.4 噴流型試験装置（コンプレッサー型）

2.4.1 試験装置と試験条件

Fig. 2.18 に噴流型試験装置（コンプレッサー型）¹¹⁾の概略図を示す。本試験装置の粒子の衝突速度は後述するように 30~120 m/s であり、高い粒子衝突速度でエロージョン試験を行うことができる。本装置は圧縮空気の貯蔵タンク、空気開放弁、加速管（長さ 1.5 m、管内径 4 mm）および試験部から成る。粒子供給部から投入された粒子は加速管で加速され、試片に衝突する。タンク圧力を 0.1~0.6 MPa に調整することによって衝突速度は 30~120 m/s の範囲で設定することができる。また、衝突角度は試片ホルダーの設定角度を調節することにより変更することができる。

衝突粒子にはすき間噴流法試験装置で用いたものと同じの粒径分布（Fig. 2.2）を持つコニカル珪砂を用いた。

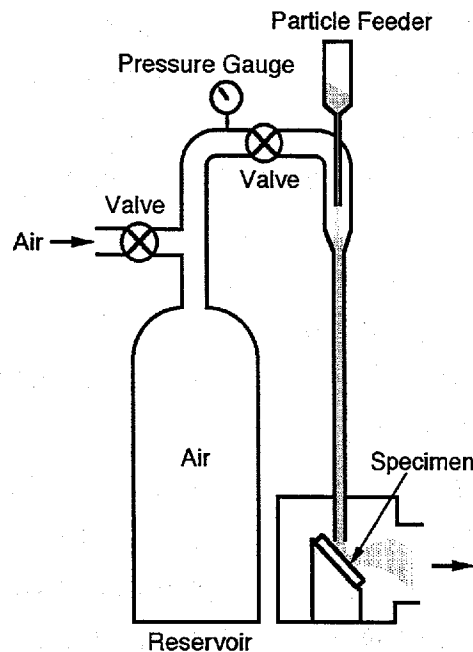


Fig. 2.18 Schematic diagram of a sand blast type apparatus (compressor type).

2.4.2 粒子衝突条件

本試験装置における粒子衝突速度の測定法は、予め球形粒子について、その衝突速度とそれが 90° でターゲット材料に衝突したときに生じるへこみの大きさとの関係を求めておき、本試験装置におけるエロージョン試験条件下で同じ粒子が発生させるへこみの大きさから粒子の衝突速度を求める方法である¹²⁾。衝突速度とへこみの関係を求めるためにガスガン試験装置が用いられた¹³⁾。ガスガン試験装置において粒子の衝突速度は2点の光源を用いて測定された。本試験装置においては粒子の衝突速度を理論的に計算から求めることができる¹²⁾。計算より求められたタンクの圧力と粒子衝突速度の関係を Fig. 2.19 に示す。

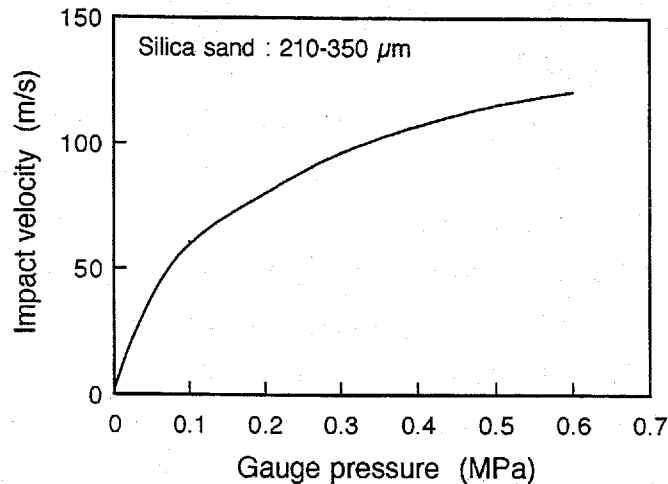


Fig. 2.19 Relationship between impact velocity and pressure in the tank.

次に本試験装置における試験結果について質量減量の経時変化を調べた。その結果、噴流型試験装置（プロアー型）の場合と同様に、初期の損傷では一定の値を示さなかったが、その後の損傷については落下させた砂の量に対して一定の損傷速度を示した。従って、本試験装置においても粒子の疲労（粒子の破壊による損傷速度の低下）はないことが明らかである¹⁴⁾。

衝突頻度については、粒子濃度が高くなるにつれて粒子同士の干渉や加速管出口において粒子の広がりが生じ、単位衝突量当たりの損傷量は減少する。本試験における粒子供給速度は約 $30 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ であり、このときの粒子間の相当距離¹⁰⁾は 5.7 mm と間隔は広いので、粒子の干渉の影響はほとんどない¹²⁾。

衝突角度については加速管出口における粒子の広がりが検討されており、本試験装置においてはエロージョン試験後の断面形状から加速管の内径よりも 3° 広がることが分かっている。加速管より内側（加速管直下）の損傷量は全損傷量の約 90% を占め、粒子の広がりは 3° であっても、大半の粒子は加速管直下に集中しており、プロアー型と同様に試片ホルダーの角度を粒子の衝突角度と見なすことができる¹²⁾。

2.5 結言

諸材料の耐エロージョン性の評価においては、再現性のあるデータを得るためにも試験に用いる装置内の粒子の衝突条件を十分に把握しておく必要がある。本章ではエロージョン試験に用いるすき間噴流法試験装置および2種の噴流型試験装置における粒子の衝突条件の解析を行い、それら装置内の粒子衝突条件を明らかにした。

(1) すき間噴流法試験装置

数値解析により、試験装置内の衝突粒子の衝突条件を計算した。得られた計算値は試片に粒子が衝突した後の衝突痕から得られた測定結果と比較検討された。

- ① すき間噴流法試験装置での粒子の衝突条件は以下のとおりである。

粒子径の影響：300～380 μm の粒子は損傷のほぼ全領域衝突しているが、中でも140～180 μm の粒子は試片の周辺部にのみ衝突する。

衝突速度：約2 m/s であり、粒径に関係なく周辺部では約20%減少する。

衝突角度：20～90° で衝突していて、周辺部になるほど衝突角度が低くなる。

衝突頻度：試片中央ではほぼ一定であり、周辺部になるほど減少する。

- ② 得られた粒子の衝突条件から計算したエロージョン量と実際のエロージョン量とを比較した結果、両者が一致したので、これらの衝突条件の推算が妥当であることが確かめられた。
- ③ すき間噴流法試験装置では一つの試片表面にあらゆる角度で粒子が衝突していることを利用することによって、一つの試片から粒子の衝突角度の影響を迅速に測定する方法を示した。

(2) 噴流法試験装置（ブロー型）

- ① 粒子の衝突速度をダブルディスク法より測定し、3～20 m/s で粒子が材料に衝突することが確認された。
- ② 粒子の衝突角度については加速管出口粒子の広がり測定から大半の粒子は加速管直下に集中しており、試片ホルダーの角度を粒子の衝突角度と見なすことができる。

(3) 噴流法試験装置（コンプレッサー型）

- ① 本試験装置における粒子の衝突速度は理論的に計算できる方法が確立されていて、その計算から求めた結果、30～120 m/s で粒子が材料に衝突する。
- ② 粒子の衝突角度についてはブロー型と同様に加速管出口粒子の広がりを測定したところ、大半の粒子は加速管直下に集中しており、試片ホルダーの角度を粒子の衝突角度と見なすことができる。

第3章 セラミック材料の損傷特性

3.1 緒言

本章ではまずセラミック材料についての損傷と粒子衝突条件の関係を論じ、次に工業材料としてのセラミック材料の長所と短所を述べる。この種の材料の短所を改善した減圧プラズマ溶射法によるセラミックコーティング材料の耐エロージョン性をセラミックバルク材および金属材料のそれと比較する。最後にセラミック材料の耐エロージョン性評価について検討する。

3.2 既往の研究とセラミック材料の工業的利用

3.2.1 セラミック材料の損傷

第1章で述べたようにセラミック材料は金属材料に比べて脆いため、クラック発生に基づく損傷機構が支配的となり、高い衝突角度で損傷のピークが生じる。セラミック材料において特に注目すべき点は粒子衝突条件が変化しても損傷の粒子衝突角度依存性がほとんど変化しないことである。Fig. 3.1 はアルミナバルク材にコニカル珪砂 (297~350 μm) を粒子衝突速度 78, 104, 117 m/s で衝突させた場合の結果¹⁾であるが、いずれの衝突速度においても損傷のピークは 90° であることが分かる。

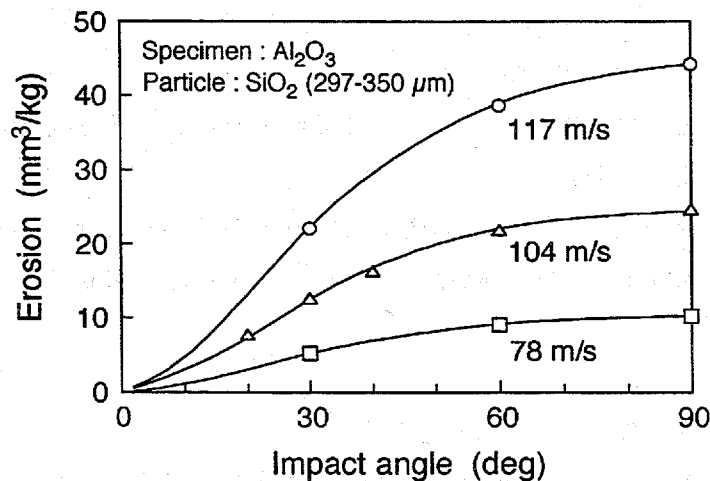


Fig. 3.1 Erosion of alumina at various impact velocities of solid particle in a sand blast type apparatus (compressor type).

このことはセラミック材料において、粒子の衝突速度、すなわち粒子の衝突条件が変化しても損傷の衝突角度依存性が変化しないため、実験室で得られた結果を粒子衝突条件の異なる実機に対しても比較的容易に適用できることを示している。

3.2.2 セラミック材料の工業的利用

金属材料と比較すると、セラミック材料は耐エロージョン性に優れているという報告がある。サンドブラスト用ノズルにアルミナ焼結体を用いた場合、鋳鉄製のノズルに比べて寿命が13~21倍になると報告されている²⁾。一方、製法の異なる3種のアルミナのエロージョン試験(27 μ mのアルミナ粒子を170 m/sで試片に垂直に衝突させた)を行ったところ、その損傷は304ステンレス鋼の損傷と比較して耐エロージョン性に優れているものもあれば、反対に劣っているものもあるとの報告がある³⁾。これはセラミック材料の作成された条件によってその損傷特性が大きく変化することを示している。

このような特性を有するセラミック材料については、耐摩耗性だけでなく、耐食性にも優れているので、耐エロージョン・コロージョン材料に適していると考えられる。さらに、その優れた高温特性から耐熱材料として適している。以上の理由から、セラミック材料が適用されるべき場所には次のようなものがある⁴⁾。

資源関連	: 海底資源採取	採取装置用材料
	海底石油掘削	掘削装置用材料
エネルギー関連	: 大型波力発電	空気タービン部品材料
	石炭スラリー輸送	耐摩耗性配管材料
環境関連	: 廃棄物焼却	装置材料
	排煙脱硫	装置材料, スラリーポンプ用材料
生産技術関連	: 流動触媒反応	反応装置用材料, スラリーポンプ用材料

しかし、これらの場所にセラミック材料を適用しようとした場合、構造用セラミックスとして解決していかなければならない課題は多く、以下の項目が挙げられる⁴⁾。

- (1) 機械的強度、特に高温強度および靱性の向上
- (2) 材料特性のばらつきを小さくすること
- (3) 大型品、複雑形状品の製造加工技術の確立
- (4) 生産コストを安くすること
- (5) 評価試験法の確立

(1)と(2)は材料特性の改善、(3)と(4)は製造技術上の課題、(5)はミクロン単位の小欠陥を検出する技術および材料寿命の推定である。これらの課題を解決する方法として、近年、

セラミックスを金属材料にコーティングすることによって、(1)の靱性および(3)の加工性を改善することができ、スラリーポンプのインペラー等の複雑な形状の部品にもセラミック材料を施工できる。

セラミックコーティング法には化学蒸着法 (CVD)、物理蒸着法 (PVD)、プラズマ溶射法の3種が挙げられる。耐熱基材上に密な薄膜をゆっくりコーティングするにはCVDが良く、比較的小さな基材にすみやかに付加価値の高いコーティング膜を得るにはPVDが良く、多少の気孔はあっても肉厚のコーティング膜を得るにはプラズマ溶射が適している。これらの中でプラズマ溶射法が構造材料として各所で導入されようとしている。Fig. 3.2にプラズマコーティング装置の主要部であるプラズマガンの構造図を示す⁵⁾。この装置ではプラズマガンを構成している電極間に電気アークを発生させ、導入したガスをプラズマ化させることにより高温高速のガス流を得ることができる。その温度はセラミックの融点を越え、高いところでは30000℃に達する。この高温ガス流中にコーティングする材料の粉末を供給すると、瞬時に溶融し液状になり、飛沫は高速で被施工物に衝突し基材表面で凝固する。この方法を用いると、他の燃焼ガス方式ではなかなか溶融しにくいセラミックスでも容易に溶融し、良好な被膜を得ることができる。また、被膜形成速度が著しく速く、また材料に対する制約も少ないことが特徴である。

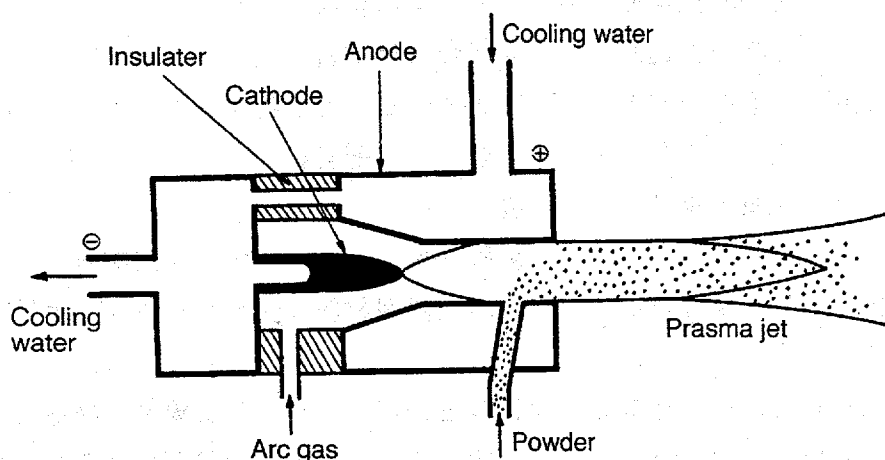


Fig. 3.2 Schematic diagram of plasma spray gun.

最近では、このプラズマ溶射を減圧下で行うことにより気孔の少ない緻密な被膜が形成され、大気中の溶射と異なり母材との総合力が強いコーティングが得られるようになってきた。このような背景から、減圧プラズマ溶射コーティング材は耐エロージョン性材料として非常に期待されている。しかし、プラズマ溶射の特性は溶射施工技術に大きく依存するので、コーティングの条件が変わると、材料の損傷量だけでなく、損傷の衝突角度依存性も変化する恐れがある。そのため、セラミックコーティング材料を実機に適用する前にその特性を十分に把握しておく必要があり、本章ではこのプラズマ溶射したセラミックコ

ーティングのエロージョン特性の把握を行う。

3.3 試験材料

プラズマ溶射法によって作成されたセラミックコーティング材料の特性を Table 3.1 に示す。セラミックコーティング材は基材にステンレス鋼 (SUS329J1) を用い、基材との密着性向上、熱応力の緩和のため、NiCrAlY をアンダーコートし、さらにその上にクロミア (Cr_2O_3)、アルミナ ($\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 13\text{TiO}_2$)、ジルコニア ($\text{ZrO}_2\cdot 8\text{Y}_2\text{O}_3$) を低圧プラズマ溶射した二層構造のものである。これら3種のコーティング材をA, B, C社の溶射施工会社に依頼し作成した。また、コーティングプロセスの影響を調べるため、ジルコニアのバルク材を、さらにエロージョン機構の比較のため、金属材料としてアルミニウム、黄銅、およびコーティングの基材であるステンレス鋼 (SUS329J1) を用いた。

Table 3.1 Materials and material preparation.

Varieties	Materials	Thickness	Hardness, Hv (GPa)
Ceramic coatings	Cr_2O_3 (A)	300 μm	15.00
	Cr_2O_3 (B)	320 μm	16.09
	Cr_2O_3 (C)	340 μm	14.48
	$\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 13\text{TiO}_2$ (A)	325 μm	9.62
	$\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 13\text{TiO}_2$ (B)	255 μm	11.24
	$\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 13\text{TiO}_2$ (C)	325 μm	11.00
	$\text{ZrO}_2\cdot 8\text{Y}_2\text{O}_3$ (A)	340 μm	7.60
	$\text{ZrO}_2\cdot 8\text{Y}_2\text{O}_3$ (B)	185 μm	10.42
	$\text{ZrO}_2\cdot 8\text{Y}_2\text{O}_3$ (C)	320 μm	8.17
Ceramic bulk	$\text{ZrO}_2\cdot 8\text{Y}_2\text{O}_3$	3 mm	15.28
Metallic material	Al	3 mm	0.39
	Brass	3 mm	0.90
	Stainless steel (SUS329J1)	3 mm	2.77

3.4 試験方法

エロージョン試験にはすき間噴流法試験装置を用いた。試片形状は $\phi 20 \times 3t$ の円盤状で、セラミックコーティング材については溶射したままのものを、セラミックバルク材については焼結したままのものを、金属材料については表面を2000番のエメリー紙で研磨したものをを用いた。試験の評価には表面粗さ計を用いて損傷深さの経時変化を測定した。

3.5 試験結果および考察

3.5.1 損傷速度の粒子衝突角度依存性

表面粗さ計を用い、各材料について損傷深さの経時変化を調べた。Fig. 3.3 にクロミアコーティング材とアルミニウムの試片中心からの距離で表示した各場所における損傷深さの経時変化を示す。クロミアコーティング材では損傷初期において大きく損傷した後は、それぞれの直線の傾きがほぼ一定の値を示している。一方、アルミニウムでは初期の大きな損傷は認められないが、その後の損傷はクロミアコーティング材と同じように一定になっている。これらの損傷初期の損傷速度の挙動の違いは材料の表面処理の違いによるものであるため、材料間の比較には初期の損傷を除いて損傷速度が一定となるときの値を用いた。

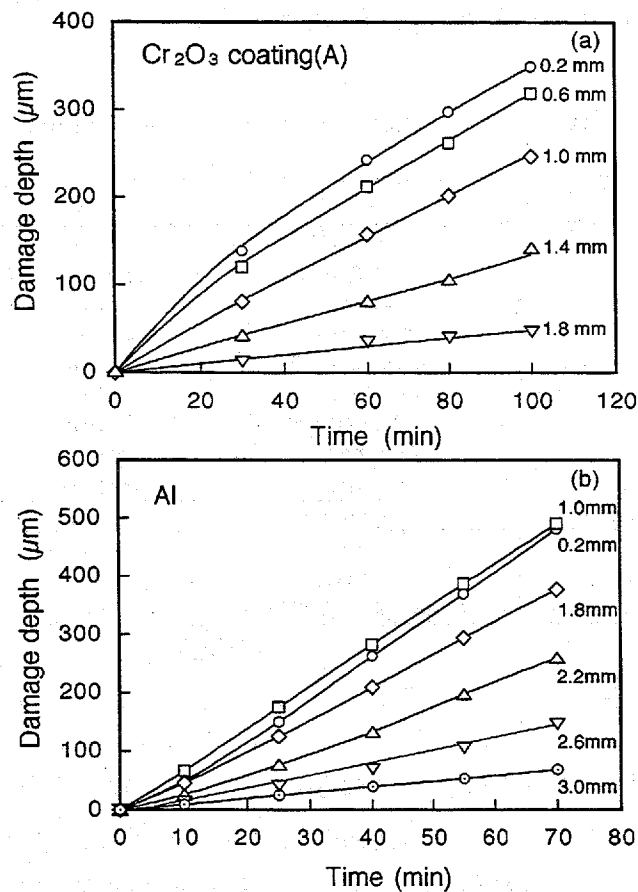


Fig. 3.3 Relationship between erosion depth and testing time for; (a) chromia coating material(A), and (b) aluminium.

Fig. 3.4 (a), (b)にセラミック材料、および金属材料試片の損傷速度分布を示す。金属材料はセラミック材料と比較し、損傷速度が最大になる位置が試片中心から外側に移っていることが分かる。このような損傷挙動の差は、それぞれの材料の損傷量の粒子衝突角度依存性の違いに起因することは明らかである。

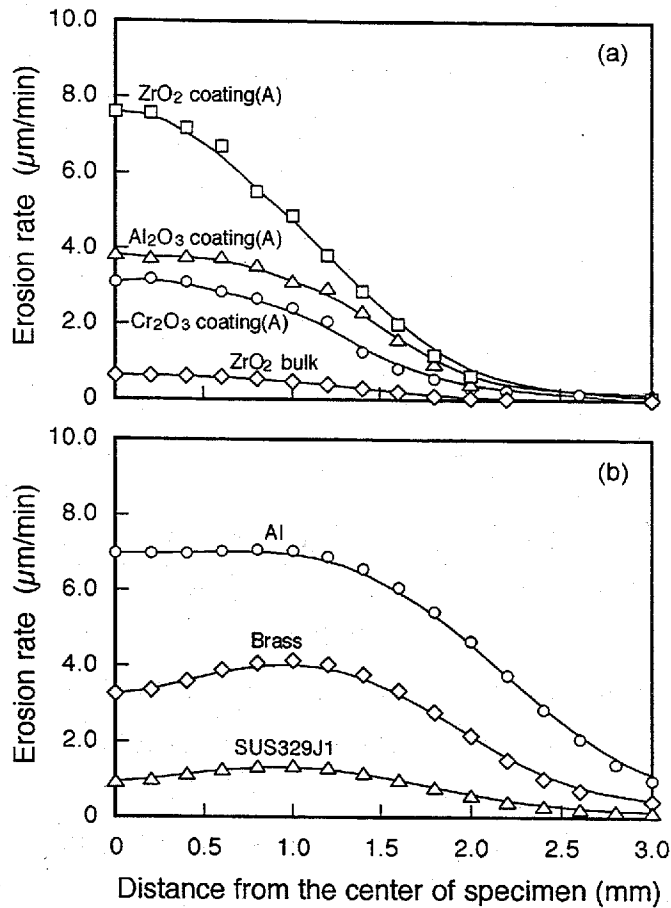


Fig. 3.4 Relationship between erosion rates and distance from the center of the specimen for (a) ceramic coatings and bulk; and metallic materials (b).

Fig. 3.4 の試片中心からの距離に対する損傷速度を、第2章で述べた方法を用いて粒子の衝突角度に対する損傷量に変換したものを Fig. 3.5 に示す。(a)はセラミックスのコーティング材とバルク材、(b)は金属材料の損傷を示している。セラミック材料と金属材料ではその特性が大きく異なっていることが分かる。また、アルミニウム、黄銅は他の材料に比べて大きく損傷している。

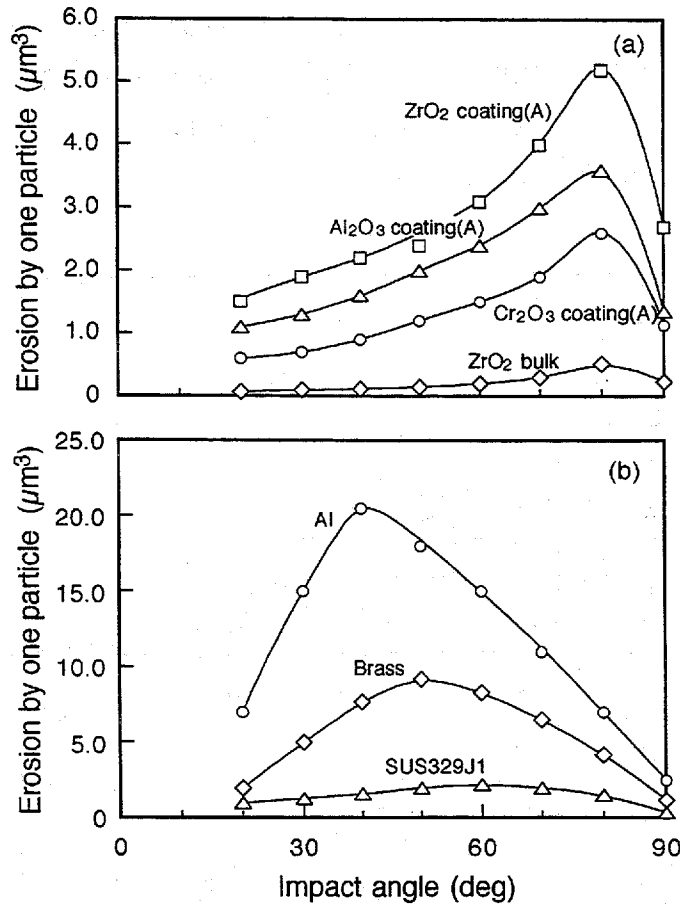


Fig. 3.5 Erosion by one particle at the standard impact condition (impact velocity, 2.0 m/s; particle diameter, 250 μm) for; (a) ceramic coatings and bulk, and (b) metallic materials.

セラミックコーティング材とセラミックバルク材の定性的な比較を行った。Fig. 3.6に3社 (A, B, C) のジルコニアコーティング材とジルコニアバルク材を各損傷量の最大値で基準化した損傷量を示す。セラミック材料ではコーティング材、バルク材とも損傷量のピークの位置は変わらない。これは、高角度側の損傷が支配的であることを示している。ピークの位置が 90° でなく、それよりも低い衝突角度になっていることは既往の研究とも一致している^{6, 7)}。クロミア、アルミナコーティング材においても、ピークの位置はジルコニアと同じであり、損傷の機構はいずれのセラミック材料も同一であった。

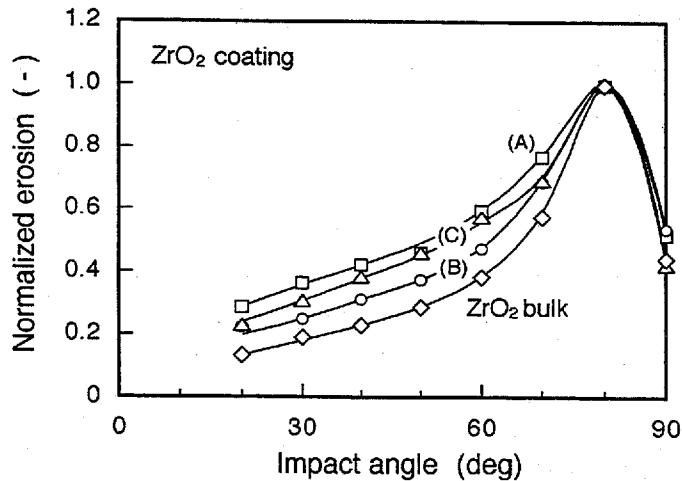


Fig. 3.6 Normalized erosion at the standard impact condition (impact velocity, 2.0 m/s; particle diameter, 250 μ m) for three kinds of zirconia coating materials (A, B, C) and for zirconia bulk material.

次に、セラミックコーティング材と金属材料の定性的な比較を行った。Fig. 3.7にそれぞれの損傷速度の最大値で基準化した損傷速度を示す。セラミックコーティング材と金属材料とでは、各材料のピークの位置に違いが生じた。金属材料では硬さによって損傷機構の寄与の割合が大きく異なる。すなわち、硬度が低くなるに従ってピークの位置が低角度側に移動している。一般に認められているように、これは、損傷の機構が一つではなく、主に低角度において生じる損傷、すなわち切削による損傷の寄与する割合が材質によって変化することを示している。これは、金属材料間、金属・セラミックス材料間では衝突角度によって損傷の順位の逆転があることを示している。特に金属・セラミックス材料間の比較では損傷の逆転現象（ある条件で損傷量に大差があっても、それが別の条件下で反対になる）が起こる可能性がある。

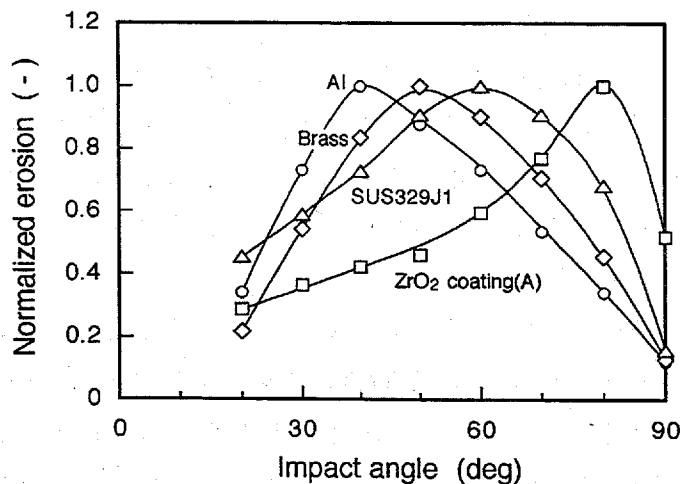


Fig. 3.7 Normalized erosion at the standard impact condition (impact velocity, 2.0 m/s; particle diameter, 250 μ m) for ceramic coating and metallic materials.

3.5.2 低・高衝突角度における損傷速度の比較

セラミックコーティング材とセラミックバルク材の定量的な比較を行った。低角度損傷、高角度損傷を示す代表的な角度として 30° 、 70° を選び、それらの損傷速度で比較した(Fig. 3.8 (a), (b))。図中の(A), (B), (C)はコーティング施工会社を示している。

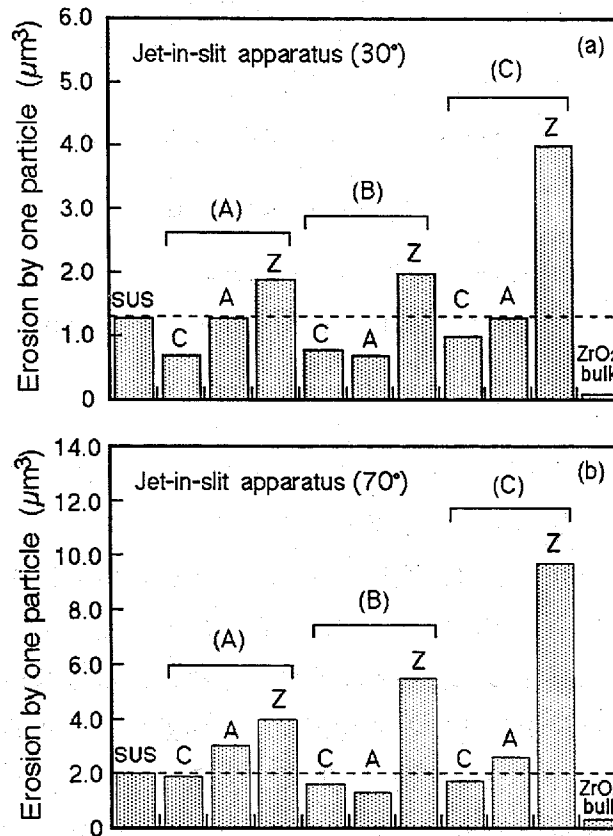


Fig. 3.8 Erosion by one particle of various materials in jet-in-slit type apparatus; (a) impact angle of 30° , (b) impact angle of 70° .

まず、粒子の衝突角度 30° の場合について比較を行った。3社におけるセラミックコーティング材料間の比較では、B社を除いて、クロミア>アルミナ>ジルコニアの順に優れていることが分かる。しかし、最低のジルコニアでもバルク材はどのコーティング材よりもはるかに優れている。ステンレス鋼に対しては、3社のクロミア、B社のアルミナコーティング材が優れていることが分かる。

次に、粒子の衝突角度が 70° の場合について比較を行った。セラミックコーティング材料間の比較では衝突角度 30° の場合と同様に損傷の順位が同じであった。これは、Fig. 3.6における定性的比較からも分かるように損傷の機構が一つであることから、セラミック材料同士では大きな差がでなかったものと思われる。これらセラミック材料をステンレス鋼と比較してみると、B社のアルミナおよび、クロミアコーティング材、C社のクロミアコーティング材が5~35%損傷が小さいだけであり、特に優れているとは言えない。これは、

Fig. 3.6における定性的比較からも分かるように、金属材料に比べ、セラミックが高角度側の損傷を受けやすいためである。

衝突角度 30° 、 70° でセラミックコーティング材がセラミックバルク材よりも著しく劣った理由は、溶射のとき生じた多数のポイド等の欠陥によるものと考えられる。また、金属との比較では、衝突角度によって損傷は大きく異なり、セラミックコーティング材では低衝突角度側において特に優れた特性を示すことが分かった。

次に、3社間のセラミックコーティング材の性能の比較を行うと、A、B社のセラミックコーティング材に比べ、C社のものは特に耐エロージョン性に劣る。これは、各社のコーティングプロセスの違いによるものと考えられる。セラミックスパウダーフィード量、キャリアガス量の違いによって、セラミックスパウダーの疎密が変化し、ポイドの状態も変わる。また、溶射の射程距離の遠近により材料の表面温度が変わり、強度も変わってくる⁵⁾。しかし、これらの条件決定は各施工会社のノウハウであり、各々の因子の影響の詳細については明確にはできなかった。

このようにセラミックコーティング材は溶射条件によってその損傷の程度が大きく変化するが、損傷の衝突角度依存性は従来のセラミック材料と同様な挙動を示すことが分かった。上記のように、溶射条件の解析は行うことができなかったが、これらのセラミックコーティング材がどのような材料物性と相関があるのかを調べることによって、セラミックコーティング材の耐エロージョン性について簡単な評価を行うことができる。そこで、次節ではセラミック材料において支配的損傷となる高角度損傷、ここでは 70° での損傷を用いて材料物性との相関を調べた。また、本研究の目的である諸材料の耐エロージョン性の評価法を確立する上で重要となる損傷の衝突角度依存性について、第4、5章で述べる高分子材料および金属材料と比較するためのパラメータを用いて、セラミック材料の損傷特性を表すことにした。

3.5.3 損傷特性と材料物性との相関

9種のセラミックコーティング材とセラミックバルク材について衝突角度 70° での損傷量（衝突粒子1個が引き起こす脱離体積）と材料の機械的性質との関係について調べた。無機材料の損傷については先に述べたようにクラックの発生と進展が顕著であるため、破壊靱性値を導入する考えがあり、Dimondらがそのパラメータを提案しているが、非常に複雑な式となり実用的とは言えない⁸⁾。一方、金属材料についてはピッカース硬度と良い相関があることが報告されている⁹⁾。そこで、セラミック材料の損傷機構を十分反映しているとは言えないが、硬さとの相関を調べた。セラミックコーティング材料とセラミックバルク材における衝突角度 70° での基準粒子1個当たりの損傷量とピッカース硬度との関係をFig.3.9に示す。

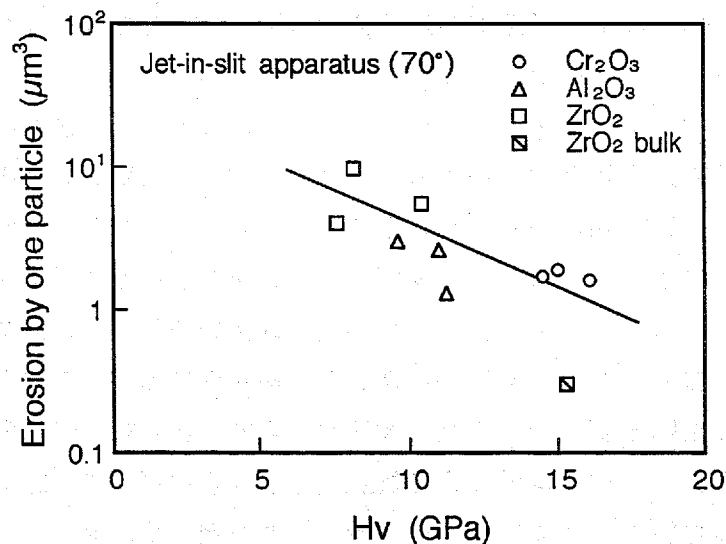


Fig. 3.9 Correlation between erosion by one particle at impact angle of 70° in jet-in-slit apparatus and Vickers hardness for various ceramic coatings and bulk ceramics.

上図に示すように、予想に反してセラミックコーティング材の損傷量と材料の硬さとの間にはある程度の相関が認められ、硬度の高いものほど耐エロージョン性に優れていた。同じ材料間でのばらつきが認められるが、これは各施工会社の溶射条件によるものと考えられる。一方、セラミックバルク材と比較してみると、セラミックコーティング材の相関はバルク材に対して外れた所に位置し、同程度の硬さを持つセラミックコーティング材はバルク材よりも損傷量が多いことが分かる。同じ組成を持つジルコニアコーティング材と比較してみると、コーティングによって見掛けの硬度は約 $1/2$ に低下していることが分かる。これは、セラミックコーティング材の耐エロージョン性がバルク材のそれよりも劣った理由が硬さだけによるものではなく、先に述べた溶射条件に依存しており、硬さ以外のセラミックスパウダー間の疎密の状態に起因する粒子同士の結合力の低下が原因であると考えられる。

次にセラミック材料における損傷の衝突角度依存性について、第4, 5章で述べる高分子材料および金属材料と比較するために以下に示すパラメータを用いて損傷特性を整理した。損傷の衝突角度依存性の傾向を表す簡単な指標として衝突角度 30° と 70° での損傷量の比率であるパラメータ ($Erosion(30^\circ) / Erosion(70^\circ)$) を用いた。このパラメータが1より大きい場合には、 30° での損傷、すなわち低角度側の損傷が多いことを示している。反対に1より小さい場合、 70° での損傷、すなわち高角度側の損傷が多いことを示している。ここで、損傷の衝突角度依存性を示すパラメータには損傷量がピークを示す衝突角度、あるいは 20° と 80° における損傷の比の方がより適しているのではないかという疑問が残るが、このパラメータを選んだ理由については第5章において詳しく説明する。9種のセラミックコーティング材とセラミックバルク材および既往に研究で取り上げたアルミナバルク材 (粒子衝突速度 117 m/s) における損傷のパラメータ ($Erosion(30^\circ) / Erosion(70^\circ)$) とビッカース硬さ (Hv) との関係を図 3.10 に示す。

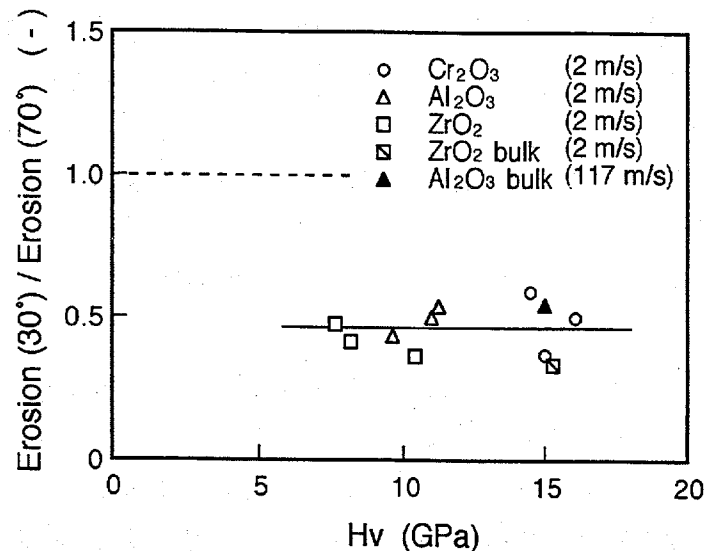


Fig. 3.10 Correlation between parameter of impact angle dependence ($Erosion(30^\circ) / Erosion(70^\circ)$) and Vickers hardness for various ceramic coatings and bulk ceramics.

セラミック材料の場合、硬さが変化してもこの損傷のパラメータはほぼ 0.5 で一定となった。また、衝突速度が 117 m/s と高い場合においてもほぼ 0.5 となり、このパラメータを用いることによって、先に述べたセラミック材料の損傷の衝突角度依存性が変化しないことを数値で表すことができる。

3.6 セラミック材料の耐エロージョン性の予測

セラミックバルク材料およびセラミックコーティング材料の損傷については高角度側の損傷が支配的であることが分かった。その損傷の衝突角度依存性の曲線は粒子の衝突条件が変化しても、また材料の硬度が変化してもほぼ同じ曲線となることが分かった。このことは、実験室での得られた加速試験の結果を粒子衝突条件の異なる現場に適用しようとした場合、たとえ粒子衝突角度が実験室でのそれと異なっていたとしてもそれらの優劣が一致することを示している。従って、セラミック材料の優劣の判断は比較的容易であると考えられる。

3.7 結言

本章ではセラミック材料の損傷特性について把握を行った。セラミック材料の中でセラミックバルク材ではなく、セラミックコーティング材料を用いたのは、この材料がバルク材の欠点である韌性と加工性を補えるエンジニアリング材料として特に注目されているからである。試験の結果、コーティング材料の耐エロージョン性は低角度の損傷において基材よりも優れていたが、バルク材の特性より劣っていた。その原因は加工プロセスに強く依存することが分かった。一方、耐エロージョン性の予測に関してはその損傷を比較的容易に推測できる利便性を有していた。以下に得られた結果を述べる。

- (1) 減圧プラズマ溶射法によって作成された9種のコーティング材料のエロージョン特性について以下のように評価された。
 - ① セラミックコーティング材料は溶射施工会社によって特性は異なるが、クロミア>アルミナ>ジルコニアの順に優れている。
 - ② セラミックコーティング材料については高角度側の損傷が支配的であり、延性材料に現れる低角度側の損傷は生じておらず、基材に比べて低角度における損傷に対して優れている。しかし、バルク材の耐エロージョン性よりはかなり劣る。
 - ③ セラミックコーティング材料の耐エロージョン性はコーティング材料の見掛けの硬さと相関があり、溶射条件を変更することで、その性能は改善されるものと期待される。
- (2) セラミックバルク材料およびセラミックコーティング材料の損傷についてはいずれも高角度側の損傷が支配的である。また、この特性は材料の硬さおよび粒子の衝突条件が変化しても変わらない。従って、セラミック材料の耐エロージョン性の予測は比較的容易であると考えられる。

第4章 高分子材料の損傷特性

4.1 緒言

本章では高分子材料について、損傷と粒子衝突条件の関係および工業材料としての特徴を述べる。この種の材料の内、最近現場での溶接技術が発達によって下水道管への適用が可能となり構造材料として有望なポリエチレンのエロージョン試験を行い、それらを他の材料の耐エロージョン性と比較する。また、ポリエチレンの損傷と機械的性質との関係について相関を調べる。最後に高分子材料の耐エロージョン性評価における問題点について述べる。

4.2 既往の研究と高分子材料の工業的利用

4.2.1 高分子材料の損傷

第1章で述べたように高分子材料には、多くの種類があり、エポキシ樹脂のように脆いものから、ゴム等のように非常に弾性に富むものまで、その性質は材料により大きく異なっている。PP（ポリプロピレン）、PVC（ポリ塩化ビニル）やSBR（スチレン・ブタジエンゴム）等のいわゆる延性材料に属するものは、金属における場合と同様、低衝突角度で損傷速度が最大となり、PMMA（ポリメチルメタクリレート）ではセラミック材料と同様、高角度側で最大損傷速度を示し、PS（ポリスチレン）やEP（エポキシ）では中間の角度で最大となる。高分子材料の耐エロージョン性を評価する際に特に注意すべき点は粒子衝突条件が変化した場合に、損傷の粒子衝突角度依存性が大きく変化する点である。特にポリメチルメタクリレート¹⁾やポリ塩化ビニル²⁾では粒子衝突速度が変化すると、損傷速度の衝突角度依存性が大きく変化することが分かっている。

Fig. 4.1 にポリ塩化ビニル（PVC）において粒子の衝突速度を20～50 m/sまで変化させた時の損傷速度と衝突角度との関係を示す²⁾。粒子衝突速度が20 m/sから40 m/sまでは、速度の上昇とともに低角度側の損傷の割合が増加していることが分かる。さらに50 m/sになると、高角度側にも損傷のピークが現れている。この50 m/s時の高角度側のピークは粒子衝突時の熱変形のために材料に生じたクラック損傷によるものと説明されている。また、粒子の衝突速度が20 m/sでは低角度側の損傷のピークが若干高角度側に移動している。

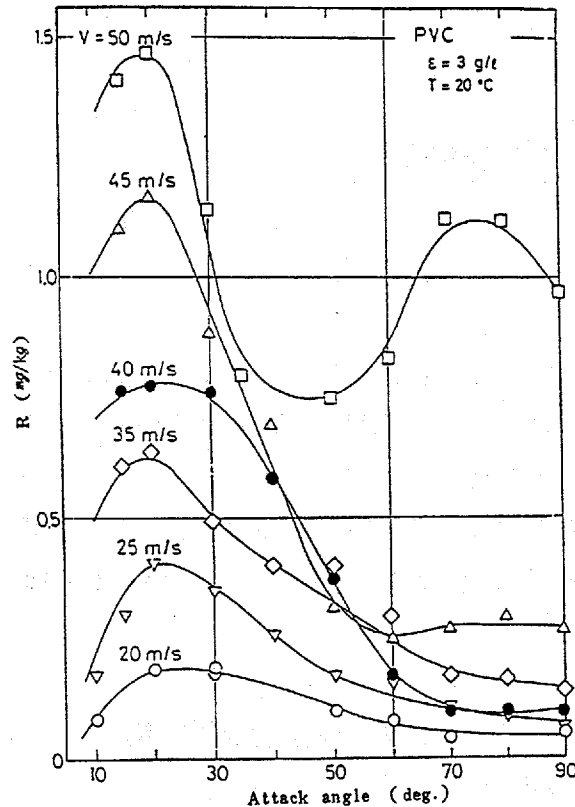


Fig. 4.1 Erosion rate of polyvinyl chloride (PVC) under various impact velocities.

このように、高分子材料において粒子の衝突条件が変化すると、損傷の衝突角度依存性が大きく変化するため、実験室で得られた結果を粒子衝突条件の異なる実機に対して適用することは非常に難しいと考えられる。

4.2.2 高分子材料の工業的利用

金属材料と比較すると、高分子材料の中でポリウレタンの耐エロージョン性が特に優れているという報告が多くある。Hocke らは各種のスラリー配管材料のスラリーエロージョン試験（流速 4.3 m/s, 粒子濃度 40 wt%）を行い、ポリウレタンの損傷量は軟鋼の約 1/30 であったと報告している。また、同じ試験条件でのポリエチレンの損傷は軟鋼の約 1/2 であったが、流速 3.7 m/s においてはその優劣は逆転し、軟鋼の損傷の 2 倍以上になったと報告している³⁾。これは Fig. 4.1 からも推測されるように、試験条件がわずかに変わっただけで、損傷の衝突角度依存性が変わるためである。

このような特性を有する高分子材料の工業的利用については、セラミック材料と同様にその優れた耐食性からエロージョン・コロージョン材料に適していると考えられる。しかし、耐熱性に劣るため、高温環境には適用できないのが欠点である。以上のことから高分子材料が用いられる場所として、スラリー輸送配管材料、スラリーポンプのインペラ、土砂輸送配管材料、下水道配管等が挙げられる。これらの中で、スラリー輸送配管、下水道配管へ高分子材料で最も耐エロージョン性が優れたポリウレタンを適用しようとした例が

報告されている⁴⁾。このポリウレタンについては、バルク材では接合と耐圧の問題があるため、鋼管の内面にポリウレタンをライニングして使用する方法が提唱されている。しかし、この方法では経済性を考えると通常の鋼管の約3倍と高価となるため、現場へ用いられるケースは少ない。配管材料としては従来から現場での接合が容易なポリ塩化ビニル管が用いられているが、最近現場での溶接技術が発達してきたポリエチレン管の使用が検討されている。Fig. 4.2にポリエチレンの継手方法の一例を示す。このポリエチレン製の継手にはあらかじめ加熱用電熱線（電気ヒーター）を埋め込まれており、それに電流を流して発熱・融着させることができる。これは小口径のパイプに適用されるもので、大口径のものになると、ポリエチレン管の端面を熔融させて接合するバット融着工法がある。

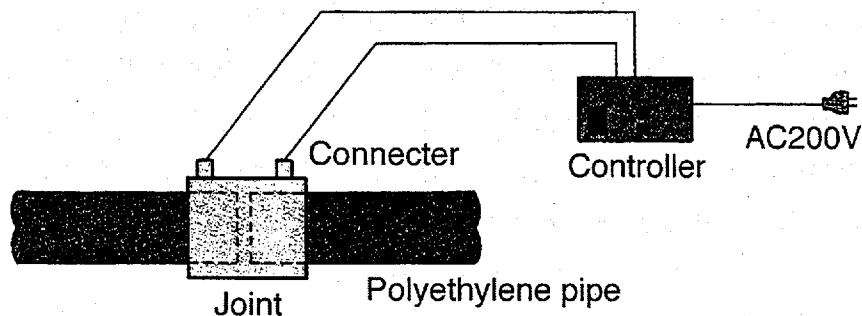


Fig. 4.2 Method to joint two polyethylene pipes.

また、コストで比較すると、ポリ塩化ビニルが156~161円/kgであるのに対し、ポリエチレンは140~170円/kgであり、価格面での競争力もある⁵⁾。また、外部に鋼帯を巻くことによって耐圧60 kgf/cm²の配管を製作することができる。このポリエチレン管を近年急速に普及している下水道施設用配管へ用いることが計画されている。さらに、ポリエチレンは柔軟性に富む材料であるため、近年多発する震災に対して有効であり、埋設配管としての評価も高い。そこで、本章では種々の特性を持つポリエチレンと比較材の耐エロージョン性を比較する。

4.3 試験材料

本研究で用いるポリエチレンの分子構造および機械的性質について以下に述べる。

ポリエチレン(polyethylene, PE)はエチレンがほぼ直線上に結合した高分子で、その結合数 n を重合度と呼んでいる。 n の増大と共に常温、常圧で気体、液体、固体と変化し、 $n=60$ でろう状固体、 $n=100$ で脆い固体、 $n=1,000\sim 10,000$ で強靱な固体（市販フィルムなどの高密度ポリエチレン）となる。今日では、 n が数百から数万のものが工業的に生産されており、 n が2万（分子量約100万）以上のものを超高分子量ポリエチレンと呼んで区別しており、 n が100,000程度にもなると熔融温度以上でも分子鎖の絡み合いのため、流動しない⁶⁾。ポリエチレンは、合成法によって分岐構造の多い高分子や、きわめて少ない直鎖状、

結晶性構造のものが生成するが、これらの構造の相違によって、樹脂の性質が異なってくる。ポリエチレンの種類は密度、分子量の値によって、低密度ポリエチレン、中密度ポリエチレン、高密度ポリエチレン、架橋ポリエチレン、直鎖状低密度ポリエチレン、超高分子量ポリエチレンなどに分類されている。

(1) 低密度ポリエチレン

低密度ポリエチレン (low density polyethylene, LDPE) は、ガラス転移点が -120°C 、融点が 137°C の軟らかいプラスチックである。古くは高圧法ポリエチレンと呼ばれていたが、これは $1,000\sim 2,000$ 気圧の高圧下で合成されるためである。その製造過程で連鎖移動が行われ、分子鎖に枝分かれが生じる。この枝分かれは、炭素原子鎖 $1,000$ 個当たり $20\sim 30$ 個程度である。この枝分かれのために分子配列は困難となり、結晶性は低下し、密度も小さくなる。これに伴って引張強さも弾性率も低下し、剛性も低くなる。低密度ポリエチレンには分子鎖に枝分かれが多く、三級炭素を持つために酸化されやすく、空気中では 100°C 以下でも表面酸化が始まる。そのため、市販品にはこの酸化を防ぐためにフェノール系やナフチルアミン系などの安定剤が加えられている。

(2) 中密度ポリエチレン

中密度ポリエチレン (middle density polyethylene, MDPE) は一般にはヘキセンやブテンなどのモノマーとエチレンとの共重合体であり、 $1,000$ 炭素原子当たり数個の分岐を有している。この中密度ポリエチレンはガス管用樹脂としての用途が主であり、そのために配管材料として長時間の使用に耐えるように、特に機械的強度や長期寿命に力点をおいて設計される。そのため、長時間の応力下において結晶間での脆性的破壊を抑制することが重要であり、高分子量成分の量を増加させたり、分子量の大きい成分の結晶間の結合を増大させる製法が取られている⁷⁾。

(3) 高密度ポリエチレン

高密度ポリエチレン (high density polyethylene, HDPE) には Ziegler 法で代表される低圧法ポリエチレンと、Phillips 法または Standard 法で代表される中圧法ポリエチレンとがある。いずれも分子鎖の枝分かれが少ないのが特徴で、前者のものが炭素鎖 $1,000$ 個当たり $2\sim 3$ 個程度、後者のものも同じく $1\sim 2$ 個またはそれ以下の枝分かれしか持たない。従って、両者とも分子鎖は配列しやすく、結晶度も密度も高い。これに伴って引張強さや弾性率も大きく、剛性も高いが伸びは小さい。また、枝分かれが少ないため酸化されにくい。主な用途として、常温から中温の各種薬品を貯蔵する $1\sim 2\text{ m}^3$ 程度の成形タンクや耐摩耗性を要求されるパイプ(1~12B)などに使用される。

最近では分子鎖の絡み合いを多くすることによってクリープ強度を上昇させたポリエチレンが開発され、PE100 と呼ばれている。それに対して、現状のポリエチレンは PE80 と

呼ばれる。

(4) 架橋ポリエチレン

ポリエチレンに γ 線または電子線を当てるか、もしくは過酸化物触媒を加えて加熱すると、ポリエチレンの分子鎖間に橋かけが行われる。一般には、低密度ポリエチレンを原料としており、生成物は橋かけポリエチレンまたは架橋ポリエチレン (crosslinked polyethylene) と呼ばれる。低密度ポリエチレンは前述のように酸化されやすく、耐候性に劣る。しかし、このような橋かけを行うと耐候性、耐熱性が向上し、長時間の屋外使用にも耐えることができる¹⁾。近年では、高密度ポリエチレンを原料とする橋かけのポリエチレンも開発されている。この架橋高密度ポリエチレン (crosslinked high density polyethylene, XL-HDPE) は、高密度ポリエチレンの分子が鎖状構造であるのに対し、部分的に三次元的に架橋している。従って、耐熱性 (130℃)、耐寒性 (-40℃) に優れており、耐薬品性、耐摩耗性も高密度ポリエチレンと同様に優れている。

(5) 直鎖状ポリエチレン

直鎖状ポリエチレンは (linear low density polyethylene, LLDPE) は低密度ポリエチレンであるが、高圧法低密度ポリエチレンより分岐が少なく優れた物性を有する。直鎖状ポリエチレンを低密度ポリエチレン (LDPE) および高密度ポリエチレン (HDPE) と比較すると、引張強さはそれらの中間の値で、特に伸びが LDPE より 30%程度高い。破れにくく丈夫で、剛性が高い。従って、同じ強度のフィルムを薄く作ることができ、約 30%の原料の節約ができる⁸⁾。

(6) 超高分子量ポリエチレン

ポリエチレンの重合度 n が大きくなると分子は長くなり、分子鎖の絡み合いが増えて機械的性質、耐クリープ性、耐摩耗性および低温特性が著しく改善される。この場合、分子量が 100 万 (重合度が約 35,000) を越えると、低温での衝撃でも破壊せず、100℃でもクリープしない優れた耐摩耗性を有する超高分子量ポリエチレン (ultra high molecular weight polyethylene, UHMW-PE) が得られる。このポリエチレンは、1961年に Charnley が人工股関節材料に用いたのを初めとして、現在では不可欠な材料として使用されている。

試験には7種類のポリエチレンおよび比較材料としてポリエチレン以外の3種類の高分子材料および2種類の金属材料を用いた。試験に用いた材料の特性をTable 1に示す。

Table 4.1 Properties of test materials.

Varieties	Materials	Code	Density (g/cm ³)	Elastic modulus (MPa)	Elongation (-)	Fracture energy (MPa)	Hardness, Hv (GPa)
Polymer	High density polyethylene	HDPE	0.952	276	7.0	126	0.0637
	Middle density polyethylene	MDPE	0.945	207	7.4	129	0.0579
	Low density polyethylene	LDPE	0.938	130	6.3	79	0.0269
	Linear low density polyethylene	LLDPE	0.934	170	7.9	102	0.0495
	Polyethylene 100	PE100	0.962	260	7.4	137	0.0595
	Crosslinked high density polyethylene	XL-HDPE	0.945	170	4.5	84	0.0767
	Ultra high molecular weight polyethylene	UHMW-PE	0.945	220	4.7	143	0.347
	Polyvinyl chloride	PVC	1.43	858	0.33	1.4	0.338
	Phenol-formaldehyde resin	PF	1.65	-	-	-	0.705
	Fiberglass reinforced plastics	FRP	2.00	-	-	-	0.442
Metal	Carbon steel	SGP	7.80	188000	0.30	109	3.04
	Cast iron	FC	7.26	99200	0.025	2.6	4.12

なお、ポリエチレンについてはJIS K 6301で定められたダンベル状試験片を用いて、引張り速度100 mm/minで引張り試験を行い、弾性係数(MPa)、伸び(-)、破壊エネルギー(応力と歪みの積を破断伸びまで積分したもの、MPa)のデータを得た。

4.4 試験方法

エロージョン試験には、すき間噴流法試験装置を用いた。試片は一辺14 mm、厚さ3 mmの正方形のもので、エメリー紙#2000まで表面を研磨した。損傷の評価には表面粗さ計で測定した試片表面の損傷深さを用いた。さらに、ポリエチレンの損傷に対する衝突速度の影響を調べるための試験装置として、2種の噴流型試験装置を用いた。噴流型試験装置(ブローアー型)では粒子衝突速度3, 5, 15 m/sで試験を行った。噴流型試験装置(コンプレッサー型)では粒子衝突速度30, 60, 120 m/sで試験を行った。これらの噴流型試験装置では、試片は共に60×31×5 mmで、各衝突角度において落下させた粒子量に対する試片の質量減量の経時変化から求めた定常損傷速度を用いた。

4.5 試験結果および考察

4.5.1 損傷速度の粒子衝突角度依存性

まず、すき間噴流法試験装置を用いて試験を行った。Fig. 4.3 に HDPE について試片中心からの距離で表示した試片各場所における損傷深さの経時変化を示す。HDPE において損傷深さは試験時間に対して、直線的に増加している。材料間の比較にはこの直線の傾きの値を用いた。

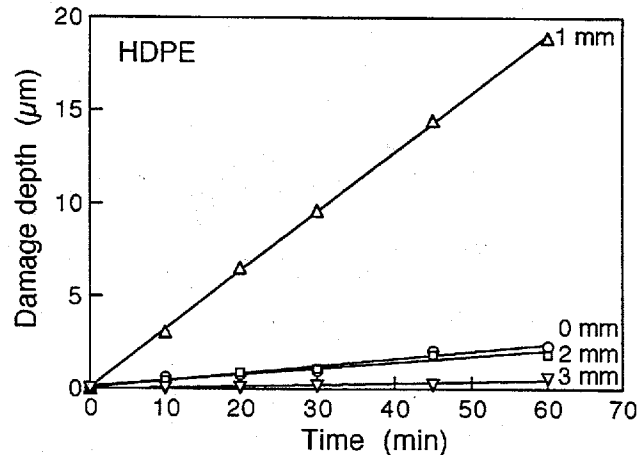


Fig. 4.3 Relationship between damage depth and testing time for high density polyethylene (HDPE).

Fig. 4.4 は全ての材料について得られた試片中心からの距離と損傷速度との関係である（図中の PEs は 7 種のポリエチレンを意味する）。それぞれの材料において、試片表面に損傷分布が生じているが、これは損傷量に強い衝突角度依存性があるばかりでなく、試片表面に衝突する粒子の衝突角度、粒子径、衝突速度および衝突頻度が異なるためである。第 2 章で述べたエロージョン量の算出方法を利用して、基準条件における損傷量を算出することにより、材料の衝突角度依存性を求める。すなわち、試片中心からの距離と損傷速度との関係を衝突角度と粒径 $250 \mu\text{m}$ の粒子 1 個が 2 m/s の速度で衝突して引き起こす脱離体積で表されるエロージョン量との関係へ変換した。Fig. 4.5 に全ての材料における衝突角度と基準粒子一個当たりの損傷量との関係を示す。

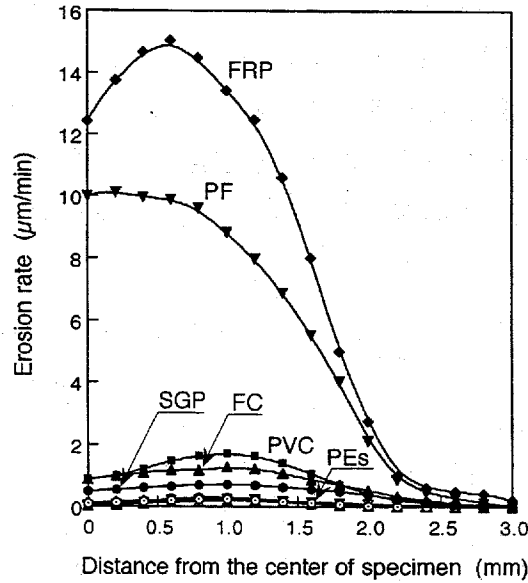


Fig. 4.4 Relationship between erosion rate and distance from the center of specimen.

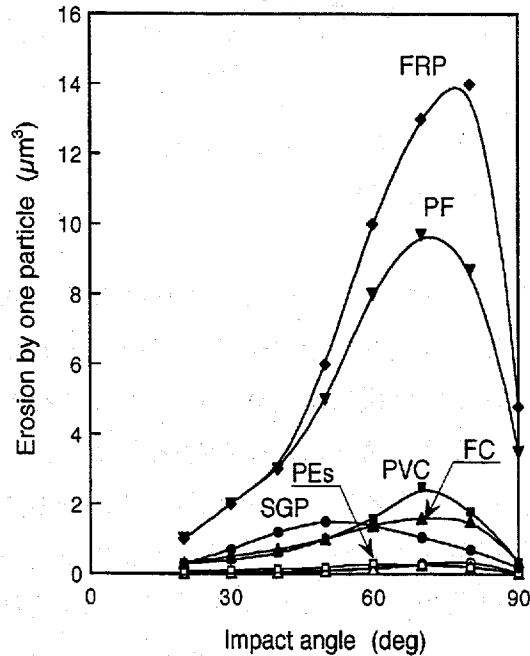


Fig. 4.5 Erosion by one particle at the standard impact condition (impact velocity, 2.0 m/s; particle diameter, 250 μ m) for materials tested.

代表的金属材料の鉄鋼材料を基準にして検討すると、鋼管材 (SGP) の損傷量は粒子衝突角度 50° において最大値を示した。また、鋳鉄 (FC) では 70° 付近で最大に達した。これらはそれぞれ延性金属材料および脆性金属材料の特徴であり、従来の他の研究者によって報告されている挙動とも一致する。一方、高分子材料では、いずれも鋳鉄 (FC) のそれよりさらに高角度側にピークが現われた。しかし、これらの高分子材料は柔軟な材料であるので、脆性金属材料と同じ機構で損傷が生じたとは考え難い。ポリエチレン類の損傷機構は後に詳しく検討するが、ここでは損傷機構や損傷のピーク的位置に関係なく、全衝

突角度に亘ってこの種の高分子材料が他の高分子材料や、鉄鋼材料に比べて格段に優れた耐久性を有していることが分かる。

各種ポリエチレンの損傷挙動を、Fig. 4.6 に示す。これらのポリエチレンの中では UHMW-PE の損傷が最も小さく、耐エロージョン性に最も優れている。その他のポリエチレンの損傷については、比較する衝突角度によって異なり優劣の判定が難しい。

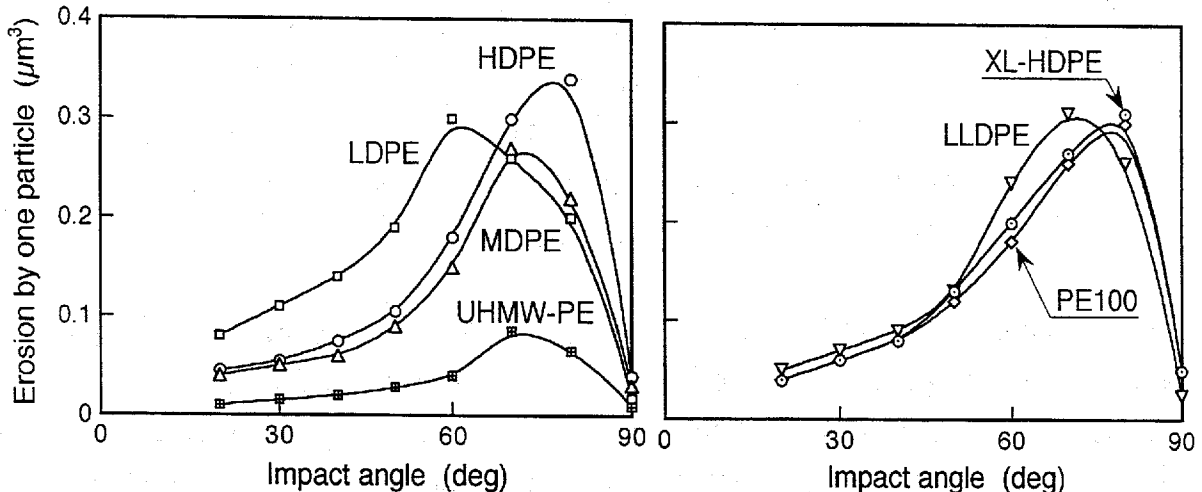


Fig. 4.6 Erosion by one particle at the standard impact condition (impact velocity, 2.0 m/s; particle diameter, 250 μ m) for various polyethylenes.

4.5.2 損傷の衝突角度依存性に及ぼす衝突速度の影響

ポリエチレンの損傷機構について、さらに詳しい検討を行った。セラミックスのような典型的な脆性材料は損傷のピーク位置が高角度側にあり、そこではクラック発生による損傷が支配的である⁹⁾。金属材料のような延性材料ではそのピーク位置は低角度側に移動し、塑性変形の繰り返しによる損傷と切削による損傷が生じる。金属材料よりも柔らかい材料であるポリエチレンではさらにそのピーク位置が低角度側に移動すると思われたが、逆に高角度側にピーク位置が移動した。この原因として、粒子衝突速度が 2 m/s と低く、粒子が低角度で材料表面に衝突した場合、衝突時のエネルギーのほとんどが材料の弾性変形に費やされ、損傷が生じにくいのではないかと考えられる。すなわち、粒子衝突速度の影響によって低角度側の損傷が生じなかったのではないかと考えられる。この影響を確認するため、HDPE を取り上げ、その損傷量の衝突角度依存性に対する衝突速度の影響を調べた。エロージョン試験には、2 種の噴流型試験装置の内のプロアー型を用いて粒子衝突速度 3, 5, 15 m/s、コンプレッサー型を用いて 30, 60, 120 m/s で行った。Fig. 4.7 に衝突速度 2, 3, 5, 60, 120 m/s における損傷の最大値で基準化した損傷量と衝突角度との関係を示す。これらの試験より HDPE においては、速度が高くなるにつれて損傷のピークが低角度側に移動することが確認された。

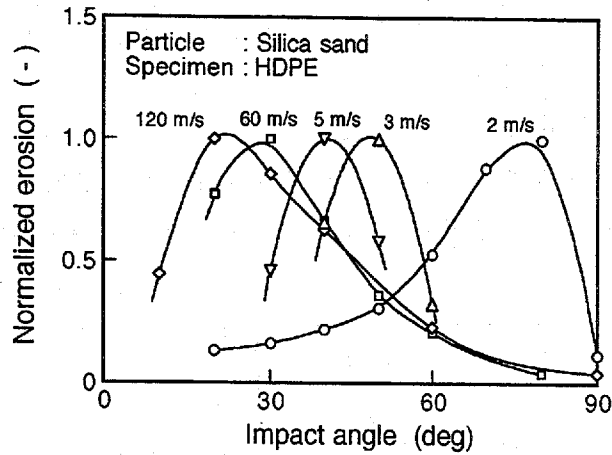


Fig. 4.7 Relationship between normalized erosion rate and impact angle for high density polyethylene under various impact velocities.

低い衝突角度における損傷について考えてみると、粒子が試片に衝突するとき、材料表面に垂直な力と水平な力が生じる。垂直方向の力が弱く、材料が弾性変形するのみで塑性変形しない場合には損傷は生じない。すなわち損傷にはあるしきい値以上の垂直方向の力が必要となる。水平方向についても、垂直に侵入した距離が大きいくほど材料を押しやるために大きな力が必要となるため、損傷を起こすには垂直方向の侵入量に比例したあるしきい値以上の水平方向の力が必要となると考えられる。ここで、運動量保存の法則 $mV = Ft$ (m : 粒子の質量, V : 粒子衝突速度, F : 力, t : 接触時間) において m および t は一定¹⁰⁾とすると、水平方向, 垂直方向の速度 $V \cos \theta$, $V \sin \theta$ がこれらの力に比例するものと考えられる。また、接触時間 t が一定¹⁰⁾とすると $V \sin \theta$ が垂直方向の侵入量に比例するものと考えられる。これらの力の積が損傷を引き起こすと考えると、損傷量 W は次式で表される。

$$W = k(V \sin \theta - A)(V \cos \theta - BV \sin \theta) \quad (4.1)$$

ここで、 W は損傷量 (mg/kg), V は粒子衝突速度 (m/s), θ は衝突角度 (degree), k は定数 (mg/kg/(m/s)²), A は垂直方向に粒子が衝突した後に塑性変形が残るために必要な垂直速度のしきい値 (m/s), $BV \sin \theta$ は水平方向に材料の塑性変形が残るために必要な水平速度のしきい値 (m/s) である。

この式に $k = 1/20$, $A = 2$, $B = 0.5$ を代入して、各衝突速度、衝突角度について損傷量 W を求めた。まず、各衝突速度における最大損傷量 W と実測値の結果を Fig. 4.8 に示す。計算された損傷量と実測値とはほぼ一致したので、選んだパラメータの値は定量的に妥当である。次に、損傷が最大値を示す衝突角度と衝突速度との関係を Fig. 4.9 に示す。図中の実線は(4.1)式による計算結果である。両者はほぼ一致しているため(4.1)式で表されるモデルは定性的にも定量的にも実際の損傷を模擬していることになる。ここで、Fig. 4.9 において 120 m/s の高流速域で若干のずれが生じたのは(4.1)式だけではこの高流速域での損傷を完全に表してはいることを示していると考えられ

る。粒子衝突速度 120 m/s においては試片表面においても熱発生に起因すると思われる変色が観察された。この熱の発生によって粒子衝突時に材料のごく表面が融解し、少なくとも付近の温度は上昇し、(4.1)式における水平方向のしきい値 A, B が変化したためと考えられる。直観的には材料の温度が上昇して硬度が下がったものと考え、Fig. 4.11 から推測されるように損傷のピークは低角度側になる。

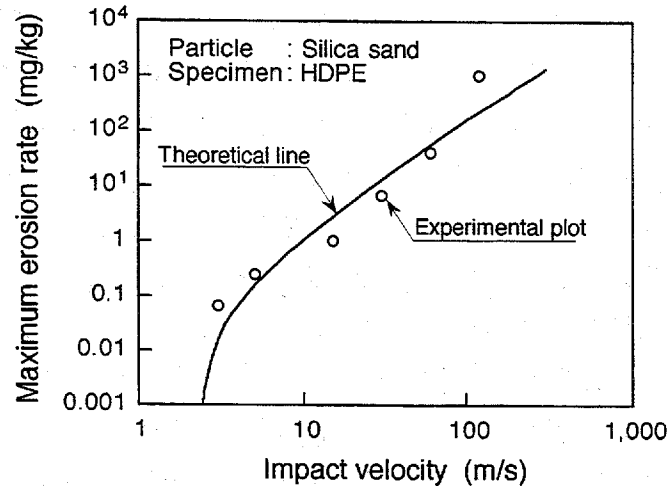


Fig. 4.8 Comparison between theoretical and experimental maximum erosion rate of high density polyethylene under various impact velocities.

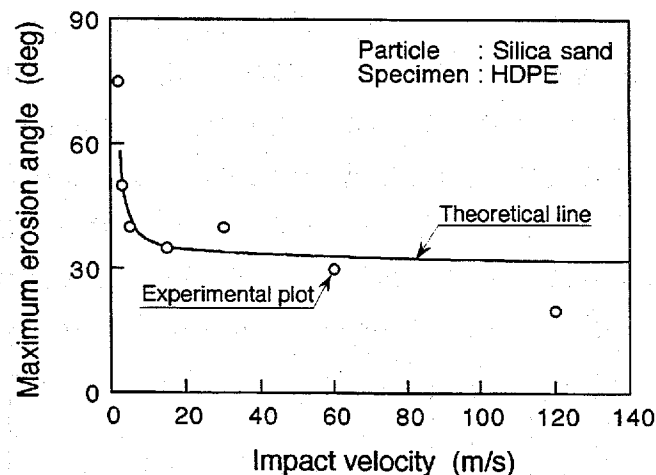


Fig. 4.9 Comparison between theoretical and experimental maximum erosion angle for high density polyethylene under various impact velocities.

Fig. 4.8 および Fig. 4.9 によると 2~5 m/s で損傷のピーク位置が急激に変化していることが注目される。そこで、この低流速域の損傷挙動と材料物性との相関を調べた。また、本研究の目的である諸材料の耐エロージョン性の評価法を確立する上で重要となる損傷の衝突角度依存性について、第3章と同様にセラミック材料および金属材料と比較するために、高分子材料の損傷特性を表わすことにした。

4.5.3 損傷特性と材料物性との相関

7種のポリエチレンについてすき間噴流法試験装置における衝突速度、すなわち2 m/sにおける損傷の代表値（衝突粒子1個が引き起こす脱離体積）と材料の機械的性質との関係について調べた。Fig. 4.5においてポリエチレンが鉄鋼材料と比較して優れた耐エロージョン性を示したのは、ポリエチレンにおいて破断するまでの伸びが大きいこと、すなわち材料が脱離するまでの破壊エネルギーが大きいことが挙げられる。そこで、破壊エネルギーとの関係を調べたが、良い相関は得られなかった。一方、従来の研究では高分子材料の損傷と弾性係数との間に良い相関があり、弾性係数が小さい材料ほど損傷量は小さいとの報告がなされている¹¹⁾。本研究でも弾性係数との関係を調べたが、良い相関は得られなかった。そこで、破壊エネルギーと弾性係数との両方を考慮することにした。ポリエチレンの最大損傷量と、弾性係数と破壊エネルギーから成るパラメータである（弾性係数/破壊エネルギー）との関係をFig. 4.10に示す。ポリエチレンの損傷量と上記パラメータとの間に良い相関が得られており、2つのグループに分かれている。この良い相関の理由は次のように説明できる。粒子衝突2 m/sは、どのポリエチレンにおいても式(4.1)のしきい値 A と $BV\sin\theta$ に近い値であり、粒子が材料を塑性変形させるか否かの境界に近い。衝突表面が大きく弾性変形すれば粒子と材料との接触面積が増加して、接触圧が下がり粒子は材料を塑性変形させることができない、すなわち弾性係数が小さければ材料の塑性変形を防ぐので損傷が少ない。一方、粒子が材料を塑性変形させた後は破壊エネルギーが大きいほど損傷が少ない。この相関が2つのグループに分かれたのは、Fig. 4.6のピーク位置から推定されるように、ピーク位置が 60° ぐらいにあるLDPE(low density polyethylene)、LLDPE(linear low density polyethylene)を含むグループではこの衝突速度でも、少し低角度側の損傷機構による脱離が生じているためと思われる。また、損傷のピーク位置が全て 80° にあるHDPE(high density polyethylene)を含むグループはHDPEをベースにして分子同士を架橋させた、あるいは分子鎖を絡めた構造を持つポリエチレンであり、ベースとなる材料が類似しているため、損傷の衝突角度依存性が同様な挙動を示すと同時に材料物性との相関においても同じグループに属したものと考えられる。

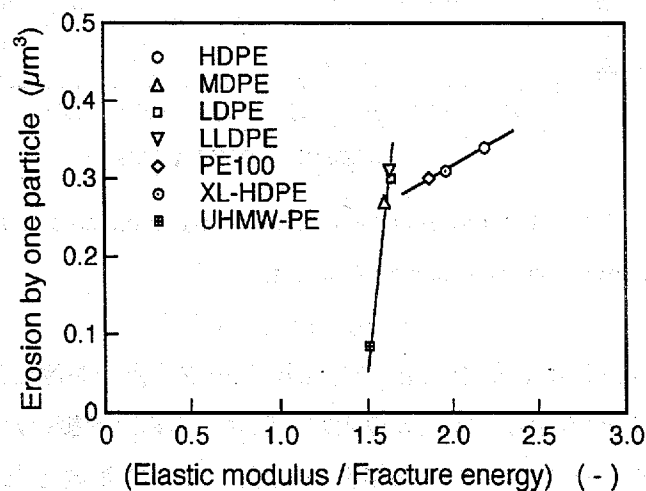


Fig. 4.10 Correlation between erosion by one particle at maximum erosion angle in jet-in-slit apparatus and elastic modulus divided by fracture energy for various polyethylenes.

次に高分子材料における損傷の衝突角度依存性について、第3章と同様に他の工業材料と比較するために以下に示すパラメータを用いて損傷特性を整理した。損傷の衝突角度依存性の傾向を表す簡単な指標としてセラミック材料の場合と同様に衝突角度 30° と 70° での損傷量の比率であるパラメータ ($Erosion(30^\circ) / Erosion(70^\circ)$) を用いた。このパラメータが1より大きい場合には、 30° での損傷、すなわち低角度側の損傷が多いことを示している。反対に1より小さい場合、 70° での損傷、すなわち高角度側の損傷が多いことを示している。ここで、第3章に述べたように損傷の衝突角度依存性を表す他のパラメータとの比較については、第5章において詳しく説明する。10種類の高分子材料（衝突速度 2 m/s）と高密度ポリエチレン（HDPE, 衝突速度 120 m/s）とポリ塩化ビニル（PVC, 衝突速度 50 m/s）におけるパラメータ ($Erosion(30^\circ) / Erosion(70^\circ)$) とビッカース硬さ（Hv）との関係を Fig. 4.11 に示す。ポリ塩化ビニルに粒子を 50 m/s で衝突させた結果は既往の研究で述べた報告を引用したものである²⁾。

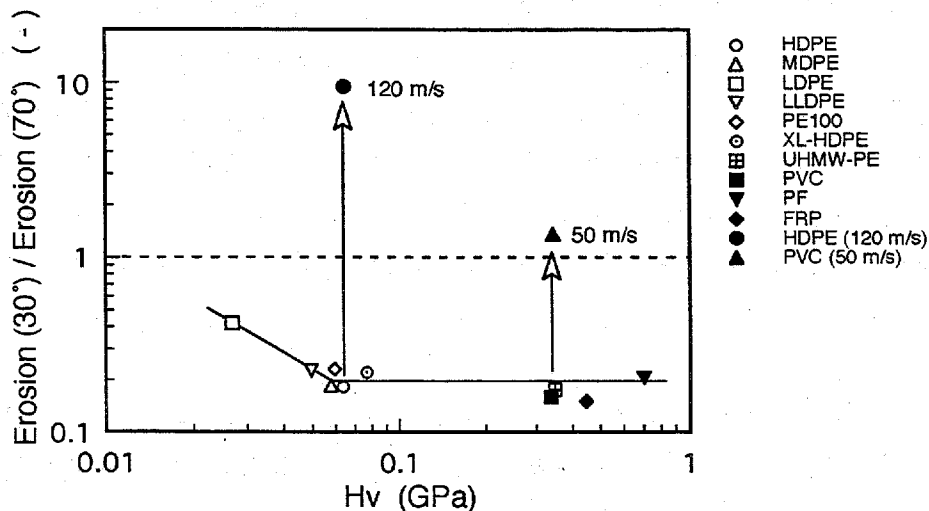


Fig. 4.11 Correlation between parameter of impact angle dependence ($Erosion(30^\circ) / Erosion(70^\circ)$) and Vickers hardness for various polymers.

高分子材料において、粒子の衝突速度が 2 m/s の場合、硬さが約 0.05 GPa 以上では、パラメータ ($Erosion(30^\circ) / Erosion(70^\circ)$) はほぼ 0.2 となることが分かる。しかし、硬さが約 0.05 GPa 以下ではその値は大きくなり、1 に近づくが 1 以上にはならず、高角度側の損傷がなお支配的である。

衝突速度の影響については衝突速度が上昇するにつれてパラメータ ($Erosion(30^\circ) / Erosion(70^\circ)$) は大きくなっている。これらの高分子材料の中でも硬い材料であるポリ塩化ビニル（PVC）では上昇の割合が少なく 1.3 程度であったのに対して、硬さの低い材料である高密度ポリエチレン（HDPE）ではその上昇の割合は大きく 10 に達しており、低角度側の損傷がかなり支配的となっている。このパラメータを用いることによって高分子の

中で硬さの低い材料の方が、さらに衝突速度が高い場合の方が低角度側の損傷を受けやすいことが明らかとなった。

4.6 高分子材料の耐エロージョン性の予測

高分子材料の損傷については衝突速度が低い場合は、高角度側の損傷が支配的であるが、衝突速度が高くなると、低角度側の損傷が支配的となる。また、その傾向は硬さの低いものほど顕著に現れることが分かった。このことは、ある硬さ以下の材料、ある衝突速度以上の条件では低角度損傷が出現し、損傷の衝突角度依存性が変化するためにそれらの耐エロージョン性を予測することが難しいことを示している。逆に言えば、もしその限界の硬さおよび衝突速度があらかじめ予測できれば、損傷の優劣が逆転するようなことはなくなると考えられる。

4.7 結言

本章では高分子材料の損傷特性について把握を行った。高分子材料の中でポリエチレンの特性を調べたのは、この材料が下水道管として震災に耐えうる柔軟性を有しているエンジニアリング材料として注目されているからである。試験の結果、ポリエチレンは従来の下水道管材料と比較して、非常に優れた耐エロージョン性を有していたが、粒子衝突速度によって、その特性が大きく変化した。耐エロージョン性の予測に関して、ポリエチレンおよび他の高分子材料における損傷特性は条件によって大きく変化するため、損傷の予測が難しいことが分かった。以下に得られた結果を示す。

- (1) 7種のポリエチレンのエロージョン試験を行い、その特性は以下のように評価された。
 - ① 粒子衝突速度が低いとき (2 m/s) は、ポリエチレン類は鉄鋼材料に比べて優れた耐エロージョン性を示す。
 - ② ポリエチレンの固体粒子衝突エロージョン速度が最大に達する粒子衝突角度は低衝突速度 (2 m/s) では高角度側 (80° 付近) にあるが、粒子衝突速度が上昇するにつれて低衝突角度側に移動する。
 - ③ 低衝突速度下でのポリエチレン類の耐エロージョン性は、破壊エネルギーと弾性係数から成るパラメータと良い相関がある。
- (2) 高分子材料の損傷について、低衝突速度では高角度側の損傷が支配的である。しかし、粒子の衝突速度が上昇すると、低角度側の損傷が支配的となり、その傾向は硬さの低いものほど顕著に現れる。従って、高分子材料の耐エロージョン性の予測は難しいと考えられる。

第5章 金属材料の損傷特性

5.1 緒言

本章では既往の研究から金属材料の損傷と粒子衝突条件との関係および損傷機構が一つになる臨界衝突速度について説明し、工業材料としての金属材料の長所と短所を述べる。次に、各種の金属材料のエロージョン試験を行い、材料の硬さの影響および粒子の衝突速度の影響について検討し、損傷の衝突角度依存性を簡単に表せる指標について検討する。最後に、金属材料の耐エロージョン性の評価の問題点を述べる。

5.2 既往の研究と金属材料の工業的利用

5.2.1 金属材料の損傷と臨界衝突速度

金属材料は耐熱性、加工性、コストの面から従来も今後も工業材料として最も重要な材料である。そのため、金属材料の損傷特性については従来からよく調べられているが、粒子の衝突条件が変わるとその損傷挙動が特に大きく変わることがこの種の材料の特徴である。すなわち、金属材料の固体粒子衝突エロージョンにおいては、材料の2種類の損傷が同時に生じており、それぞれの損傷の大きさ、あるいは全損傷に占めるこれらの損傷機構による被害の割合が、多くの因子に大きく依存する¹⁾。衝突角度が高く固体粒子がターゲット材にほぼ直角に衝突する場合は、金属材料は主に塑性変形の繰り返しによって脱離する。一方、衝突角度が低くなると、塑性変形による脱離はほとんど起こらず切削による脱離が生じ、これらの和が全損傷量となる (Fig. 5.1)。

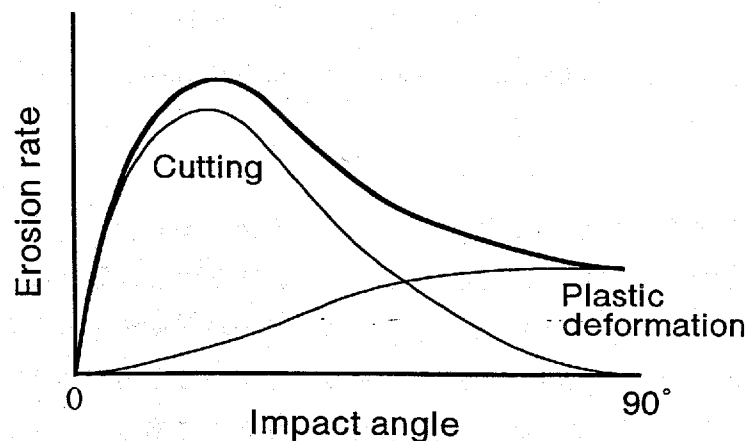


Fig. 5.1 Ratio of two kinds of damage mechanisms on erosion of metallic material.

最近では全損傷量は塑性変形損傷と切削損傷の単純な和ではなく、それらが相互に影響を及ぼしているとし、塑性変形損傷に関する項と切削に関する項の積で表されるとの報告がある^{2,3)}。いずれにしても、金属材料の損傷において塑性変形損傷と切削損傷が同時に生じていることに異論を挟む研究者はいない。また、粒子の衝突条件によってはこの2種類の損傷の内、切削損傷がなくなり、材料の損傷が塑性変形損傷のみとなったとの報告がある⁴⁾。その塑性変形損傷のみになることは純粋なエロージョンではなく、腐食が重畳したエロージョン・コロージョンの結果から推測されたものであり、種々の環境における金属材料の被害に対して非常に有効であると説明されている。この損傷機構が塑性変形損傷のみになるという考えについて以下に詳しく説明する。

以前、硫酸酸性の石こうスラリーによる高クロム鋼のエロージョン・コロージョン試験が行われ、固体粒子の衝突速度や衝突角度が現場の条件に比較して著しく異なる条件（すなわち、試験機での衝突速度は1.7 m/s、これに対して実機では10 m/s以上、試験機における粒子の衝突角度は90°、実機では低い衝突角度）であったにもかかわらず、試験結果は現場の成績とよく一致した（Fig. 5.2）⁵⁾。この予測されなかった意外な一致の理由は次のように推測された。

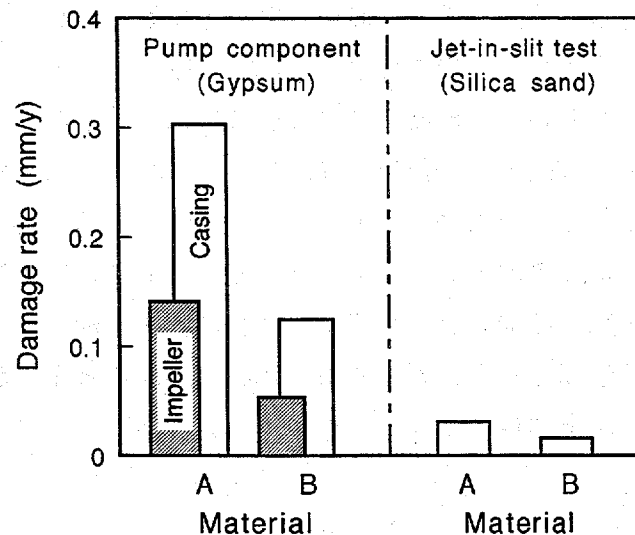


Fig. 5.2 Comparison between laboratory test result and performance in the field for material A and B.

衝突速度が低くなると、粒子はターゲット材料表面に衝突してもその表面を滑らなくなる。粒子が表面を滑らなければ、切削が生じない。すなわち、固体粒子衝突エロージョンの機構が塑性変形損傷の一つだけになる。このときの粒子衝突速度を臨界衝突速度と名付けられた。試験機においては粒子の衝突速度が小さく、しかも高角度で衝突したため、切削損傷は起こらなかった。すなわち、臨界衝突速度以下であったと考えられる。一方、現場における粒子は加速試験に用いられる粒子よりも小さく柔らかいものであった。これらの粒子は高い速度でターゲット材料に衝突しても、材料の切削損傷を引き起こすことはな

いであろう。すなわち、実機の粒子における臨界衝突速度はかなり高く、先に述べた速度 1.7 m/s (試験機) および 10 m/s 以上 (実機) の値は臨界衝突速度以下であったことが充分予想される。すなわち、加速試験も実機の条件も共に臨界衝突速度以下にあって、損傷機構がそれぞれ塑性変形のみであり、互いに一致していたので、試験結果と実機の成績が一致したと説明される。この臨界衝突速度の存在を証明するために、さらに次のような実験が行なわれた。すなわち、粒子自由落下衝突装置を用いて軟鋼板に炭化珪素粒子を衝突させた。その際、衝突角度と衝突速度を変化させた。得られた損傷面以外の表面部を耐食性被膜で覆い、腐食液に浸漬して損傷表面の腐食速度を測定した。その結果を示したのが Fig. 5.3 である⁴⁾。衝突速度 1.7 m/s 以下では衝突角度に関係なく、腐食速度が一定になっていることが認められる。これは損傷面の損傷機構が一種類になっているためと思われる。すなわち、1.7 m/s が臨界衝突速度である。

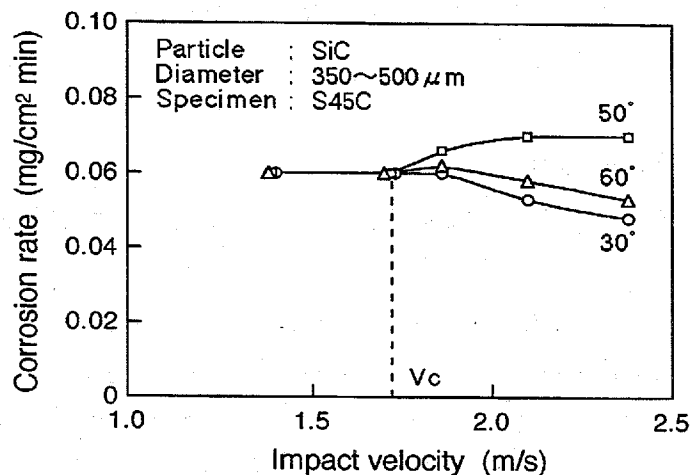


Fig. 5.3 Relationship between dissolution rate of damaged surface and SiC particle impact velocity on mild steel.

臨界衝突条件以下で行った加速試験の結果はその装置の耐エロージョン性と一致するはずである。さらに、エロージョンとコロージョンの相互作用までもが一致すると期待される。このように、粒子衝突条件の中で粒子衝突速度は金属材料の損傷機構を判定するための有用な指標であると考えられる。

5.2.2 金属材料の工業的利用

前項に述べたような特性を有する金属材料を大別すると、鉄鋼材料、アルミニウム合金、銅合金、マグネシウム合金、チタン合金等に分けることができる。これらの中で構造用耐摩耗性材料として主に用いられているのは、鉄鋼材料である。これは他の金属材料と比べて強さが大きく、加工が容易であり、かつ安価であるなどの多くの長所を持っているからである。その中で耐摩耗材料として主として用いられているものは鋳鋼と鋳鉄である⁶⁾。

鋳鋼は単に耐摩耗性のみでなく、各種の要求が付加される場合に用いられ、添加元素の少ない低合金鋳鋼と多い高合金鋳鋼がある。耐熱、耐食性などが耐摩耗性と共に必要とされるところにはニッケル・クロム鋼のような高合金鋳鋼、大きな衝撃性を伴う場合には靱性と加工硬化性をそなえた高マンガン鋳鋼が使われる。また、中程度の衝撃用には低合金鋼が良い。鋳鉄は衝撃力が小さい場合に用いられ、硬いため加工が困難で、多くは鋳造のままである。この他、硬質クロムめっきや表面焼き入れ鋼などの表面硬化がある。また、摩耗を受ける部分にのみ溶接肉盛りするハードフェイシングがあり、構造用としては使えない硬い材料を利用できる特徴がある。このように、工業的に構造用耐摩耗性材料として利用されるのは鉄鋼材料であり、硬さが要求される。

このような硬い材料の耐エロージョン性を調べるためには、通常耐摩耗性材料として用いられている材料だけでなく、広範囲で硬さを変えて、その特性を調べる必要がある。そこで、本章では硬度の異なる代表的な金属材料を取り上げて、それらの耐エロージョン性が硬さに対しどのように変化するのか、また粒子の衝突速度に対してどのように変化するかを調べる。

5.3 試験材料および試験方法

試験には硬さが異なる3種の鉄鋼材料とアルミニウム、銅を用いた。それらのピッカース硬さを Table 1 に示す。

Table 5.1 Properties of test materials.

Materials	Code	Hardness, Hv (GPa)
Aluminium	Al	0.39
Brass	Brass	0.90
Stainless steel (SUS329J1)	SUS329J1	2.77
Carbon steel	SGP	3.04
Cast iron	FC	4.12

エロージョン試験にはすき間噴流法試験装置を用いた。試片は一辺 14 mm、厚さ 3 mm の正方形のもので、エメリー紙#2000 まで表面を研磨した。損傷の評価には表面粗さ計で測定した試片表面の損傷深さを用いた。さらに、炭素鋼の損傷に対する衝突速度の影響を調べるため噴流型試験装置（コンプレッサー型）を用いて、粒子衝突速度 120 m/s で試験を行った。これらの噴流型試験装置では、試片は 60×31×5 mm で、各衝突角度において落下させた粒子量に対する試片の質量減量の経時変化から求めた定常損傷速度を用いた。

5.4 試験結果および考察

5.4.1 損傷速度の粒子衝突角度依存性

まず、すき間噴流法試験装置を用いて試験を行った。Fig. 5.4 にアルミニウム (Al) について試片中心からの距離で表示した試片各場所における損傷深さの経時変化を示す。アル

ミニウムにおいて初期の損傷速度はわずかに低いですが、その後、損傷深さは試験時間に対して直線的に増加している。この直線の傾きを定常損傷速度として用いた。

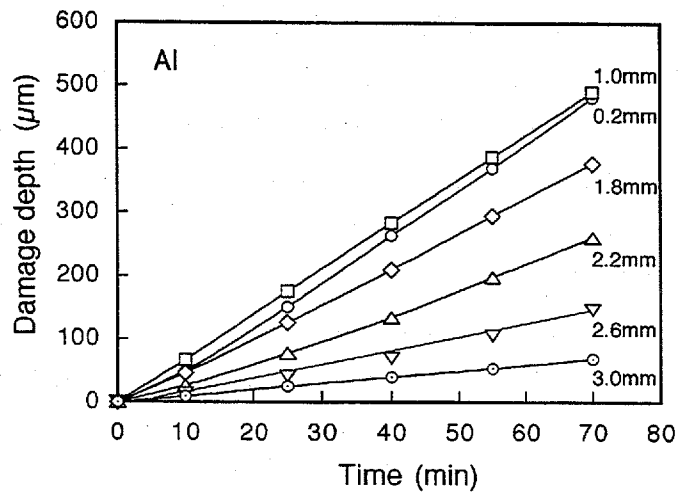


Fig. 5.4 Relationship between erosion depth and testing time for aluminium.

Fig. 5.5 はアルミニウム (Al), 黄銅 (Brass), ステンレス鋼 (SUS329J1) について得られた試片中心からの距離と損傷速度との関係を示している。それぞれの材料において、試片表面に損傷分布が生じているが、これは損傷量に強い衝突角度依存性があるばかりでなく、試片表面に衝突する粒子の衝突角度、粒子径、衝突速度および衝突頻度が異なるためである。この結果を第2章で述べたエロージョン量の算出方法を利用して、基準条件における損傷量を換算することにより、材料の衝突角度依存性を求める。すなわち、試片中心からの距離と損傷速度との関係を衝突角度と粒径 $250 \mu\text{m}$ の粒子1個が 2 m/s の速度で衝突して引き起こす脱離体積で表されるエロージョン量の関係へ変換した。

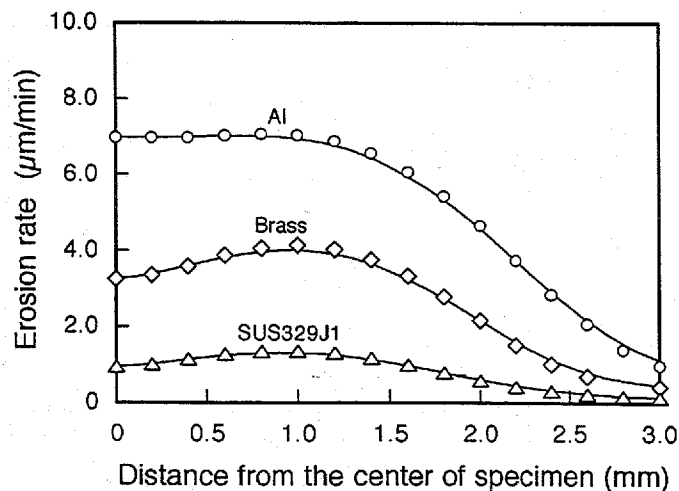


Fig. 5.5 Relationship between erosion rates and distance from the center of the specimen for metallic materials (b).

5種の金属材料における粒子衝突角度と基準粒子一個当たりの損傷量との関係を Fig. 5.6 に示す（左図の縦軸のスケールは右図より大きいことに注意）。これらの中でアルミニウム（Al）の損傷が最も大きいことが分かる。損傷量が最も少ないのは鋼管材（SGP）あるいは鋳鉄（FC）であるが、粒子の衝突角度によって評価が異なるため、判断できない。各材料の損傷のピークを示す角度については、アルミニウム（Al）では衝突角度 40° 、黄銅（Brass）では 50° 、ステンレス鋼（SUS329J1）では 60° 、鋼管材（SGP）および鋳鉄（FC）では 70° 付近において損傷の最大値を示した。材料の物性であるビッカース硬さで比較すると、アルミニウムが39と最も低く、鋳鉄が412と最も高い。これより、順位は必ずしも一致しないが、軟らかい材料ほど、低角度側に損傷のピークを示し、硬い材料ほど高角度側にピークを示すことが分かる。

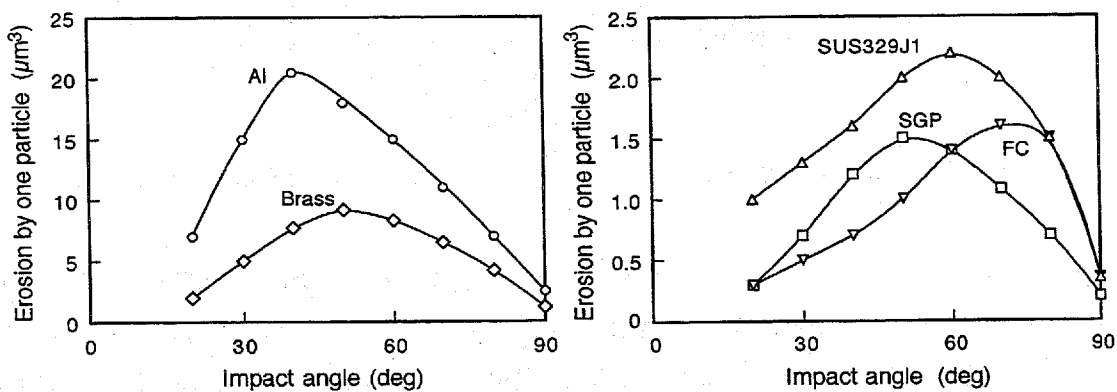


Fig. 5.6 Erosion by one particle at the standard impact condition (impact velocity, 2.0 m/s; particle diameter, $250 \mu\text{m}$) for various metallic materials.

5.4.2 損傷の粒子衝突角度依存性に及ぼす衝突速度の影響

金属材料の損傷における粒子衝突速度の影響について調べるため、噴流型試験装置（コンプレッサー型）を用いて、鋼管材（SGP）のエロージョン試験を行った。鋼管材（SGP）

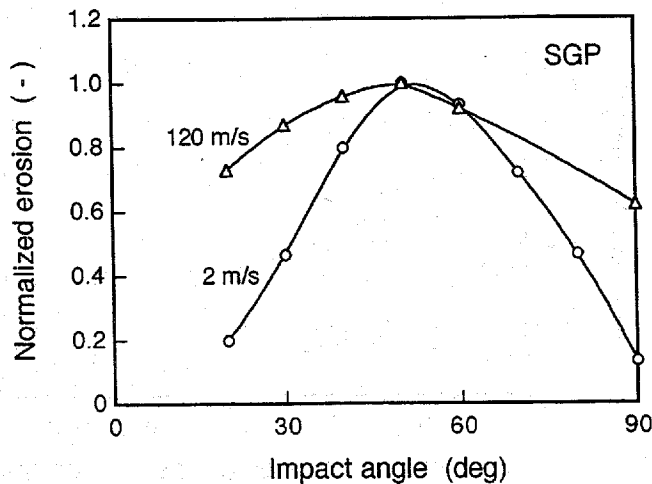


Fig. 5.7 Normalized erosion at low and high impact velocities for carbon steel (SGP).

において衝突速度 2 m/s および 120 m/s で粒子を衝突させた場合の粒子衝突角度と最大損傷量で基準化した損傷量との関係を Fig. 5.7 に示す。この図において損傷のピーク角度は低い衝突速度、高い衝突速度のどちらにおいても 50° となっているが、それらの損傷の曲線は明らかに異なる。これは金属材料の損傷である切削損傷と塑性変形損傷の割合が変化しているためと考えられる。

5.4.3 損傷特性と材料物性との相関

金属材料の耐エロージョン性については材料の硬さと良い相関があることが既に報告されており⁷⁾、一般にもよく認められている。本研究においても、低角度損傷、高角度損傷を示す代表的な角度として 30° 、 70° を選び、それらの損傷と材料のビッカース硬度との関係を調べた (Fig. 5.8 (a), (b))。衝突角度 30° および 70° における損傷のどちらにおいても材料の硬さとの相関が認められた。しかし、衝突角度 70° においては鋼管材 (SGP) と鋳鉄 (FC) でずれが生じている。これは Fig. 5.6 から分かるようにこの2種の材料においては評価を行う衝突角度によって損傷が逆転してしまうため、評価が困難であることを示している。

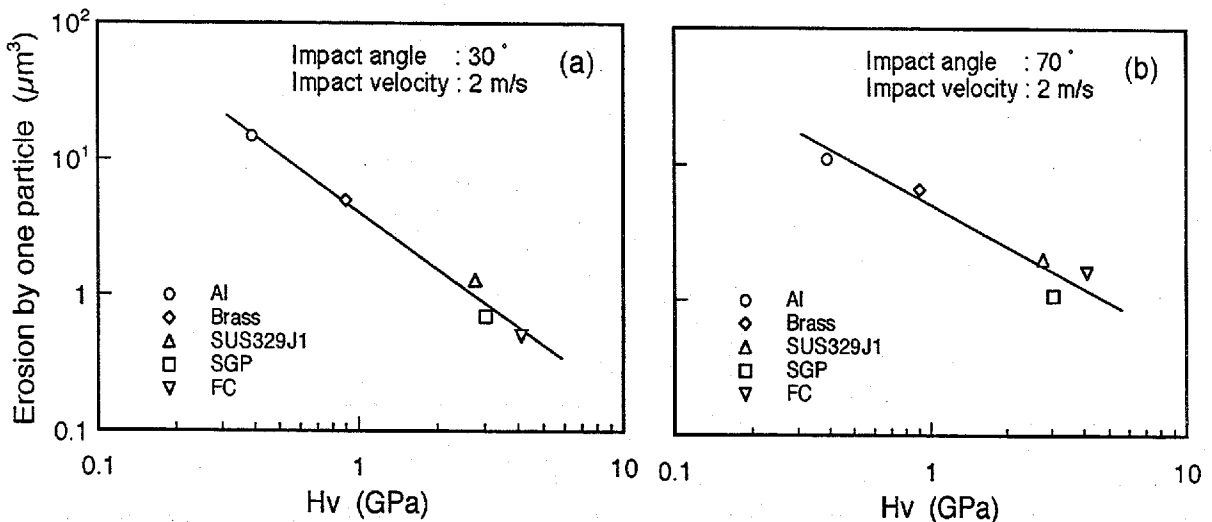


Fig. 5.8 Correlation between erosion by one particle and Vickers hardness for various metallic materials; (a) impact angle of 30° , (b) impact angle of 70° .

次に金属材料における損傷の衝突角度依存性について、材料の硬さとの相関を調べ、他の工業材料と比較を行うため、以下に示す損傷の指標を用いて評価を行った。ここで、損傷の衝突角度依存性の整理を行ったのは、諸材料の耐エロージョン性を評価するためである。しかし、この特性を一つの指標で表すことは非常に困難である。そこで、まずこの損傷の衝突角度依存性が大まかに示すことができる指標を決定し、その指標と材料物性とがどのような関係にあるのかを調べた。損傷の衝突角度依存性を表す簡単な指標として以下のパラメータが考えられる。

- (1) 損傷のピーク角度
- (2) 低角度と高角度における損傷量の比率
 - ① 衝突角度 30° と 70° における損傷量の比率
 - ② 衝突角度 20° と 80° における損傷量の比率
 - ③ 衝突角度 30° と 80° における損傷量の比率

この中でどのパラメータが簡便に損傷の衝突角度依存性を示すことができるかを検討する。まず、損傷のピーク角度と材料の硬さとの相関を調べた。5種の金属材料に粒子を2 m/sで衝突させた場合と、鋼管材 (SGP) に粒子を120 m/sで衝突させた場合の損傷のピーク角度とビッカース硬さ (Hv) との関係を図 5.9 に示す。両者の間にはある程度の相関が見られるが、両者の関係が直線になっているので高角度側、低角度側の境界を明確に決定することができない。また、この指標ではピーク角度より低い角度および高い角度での損傷について全く考慮されていない。それは、図 5.7 に示した粒子の衝突速度の影響に対しての衝突角度依存性が明らかに異なるにもかかわらず、ピーク角度がほぼ同じであるため、その違いを表すことができないことから明らかである。これはこの指標の欠点である。

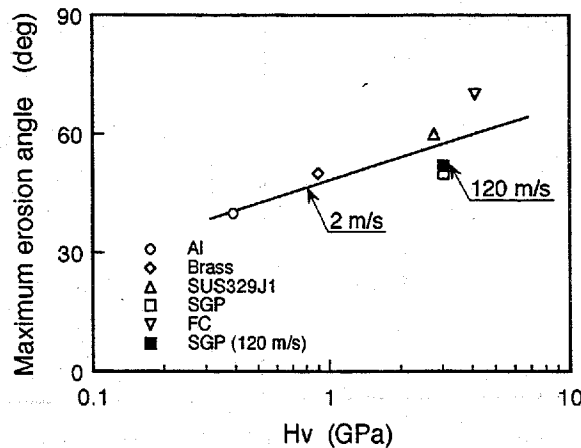


Fig. 5.9 Correlation between maximum erosion angle and Vickers hardness for various metallic materials.

次に低角度と高角度における損傷量の比率を指標とした場合について検討した。5種の金属材料に粒子を2 m/sで衝突させた場合と鋼管材 (SGP) に粒子を120 m/sで衝突させた場合の衝突角度 30° と 70° における損傷量の比率 (Erosion(30°) / Erosion(70°))、20° と 80° における比率 (Erosion(20°) / Erosion(80°)) および 30° と 80° における比率 (Erosion(30°) / Erosion(80°)) とビッカース硬さ (Hv) との関係を Fig. 5.10 (a), (b), (c) に示す。このパラメータでは損傷挙動の基準を定めることができ、1より大きい場合には、20° あるいは 30° での損傷である低角度側の損傷が多いことを示している。反対に1より小さい場合、70° あるいは 80° での損傷である高角度側の損傷が多いことを示している。

まず、衝突速度の影響については損傷のピーク角度ではその違いを表すことができなかつたが、これらの指標では、その差を表わすことができた。さらに、これら3つを比較してみると、(a)のパラメータ ($Erosion(30^\circ) / Erosion(70^\circ)$) の場合は硬さに対して非常に敏感に変化している。その他のパラメータでは、若干のばらつきが見られ、黄銅 (Brass) とステンレス鋼 (SUS329J1) ではその順位が逆転している。これらの比較から損傷の衝突角度依存性を大まかに表すには衝突角度 30° と 70° における損傷量の比率 ($Erosion(30^\circ) / Erosion(70^\circ)$) が最も適していると考えられる。

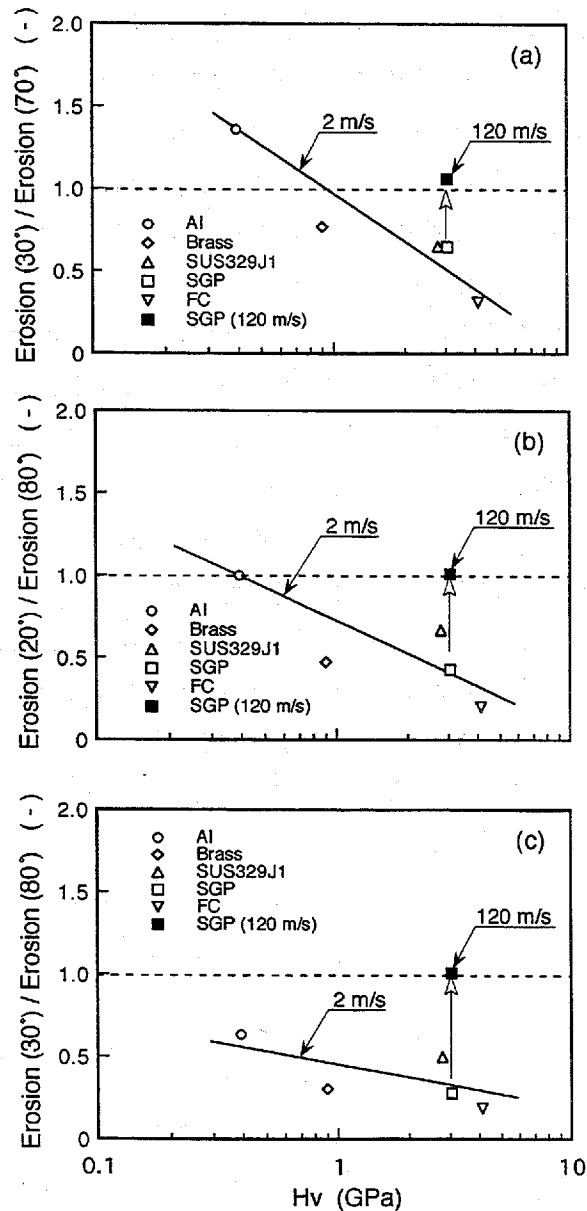


Fig. 5.10 Comparison among parameters of impact angle dependence;
 (a) ($Erosion(30^\circ) / Erosion(70^\circ)$), (b), ($Erosion(20^\circ) / Erosion(80^\circ)$),
 (c) ($Erosion(30^\circ) / Erosion(70^\circ)$).

Fig. 5.9 (a)に示したパラメータ ($Erosion(30^\circ) / Erosion(70^\circ)$) を用いて、材料の硬さとの比較を行うと、金属材料の場合、粒子衝突速度が 2 m/s の場合では硬さが低くなるにつれて低角度側の損傷が支配的となることが分かる。衝突速度の影響については鋼管材 (SGP) において衝突速度が高くなるにつれてパラメータ ($Erosion(30^\circ) / Erosion(70^\circ)$) は大きくなり、120 m/s でその値はおよそ 1 となり、高角度側の損傷と低角度側の損傷が同程度になっている。金属材料においても高分子材料の場合と同様に硬さの低い材料の方が、さらに衝突速度が高い場合の方が低角度側の損傷を受けやすいことが明らかとなった。

5.5 金属材料の耐エロージョン性の予測

金属材料の損傷については硬度の高いものは高角度側の損傷が支配的であるが、硬度が低くなるにつれて低角度側の損傷が支配的となる。また、衝突速度が高くなるにつれても、低角度側の損傷が支配的となる。このことは、高分子材料の場合と同様にある硬さ以下の材料、ある衝突速度以上の条件では低角度損傷の割合が増加し、損傷の衝突角度依存性を予測することが難しいことを示している。逆に言えば、もしその限界となる硬さ、衝突速度があらかじめ予測できれば、損傷の優劣が逆転するような誤診はなくなると考えられる。低角度側の損傷が生じるのは材料の硬度が低く、高い衝突速度において生じやすく、この現象は本章の既往の研究で述べた金属材料の低角度損傷の一つである切削損傷がなくなる臨界衝突速度の考えとも一致している。従って、低角度損傷が支配的となるかどうかの判断はこの臨界衝突速度から予測する方法が妥当であると考えられる。

次章ではまず、第3, 4, 5章で示した全ての材料における損傷の衝突角度依存性を表すパラメータである衝突角度 30° と 70° における損傷量の比率 ($Erosion(30^\circ) / Erosion(70^\circ)$) を示し、その結果を基に諸材料の耐エロージョン性を容易に評価できる条件について考察し、その条件を導くことのできる臨界衝突速度を実験的、理論的に考察する。

5.6 結言

本章では金属材料の損傷特性について把握を行った。すなわち金属材料のエロージョン試験を行い、材料の硬度と粒子の衝突速度の影響を調べた。さらに、これらの損傷の衝突角度依存性を表す指標を決定し、それを用いて金属材料の損傷挙動を比較した。耐エロージョン性の予測に関して、金属材料における損傷特性は条件によって変化するため、損傷の予測が難しいことが分かった。以下に得られた結果を示す。

(1) 5種の金属材料についてエロージョン試験を行い、その特性は以下のように評価された。

- ① 金属材料の損傷は従来の報告と同様に材料の硬度が高いものほど優れた耐エロージョン性を示すことが確認された。
- ② 損傷の衝突角度依存性を大まかに表すことのできる指標として衝突角度 30° と 70° における損傷量の比率 ($Erosion(30^\circ) / Erosion(70^\circ)$) が適している。
- ③ 損傷の衝突角度依存性を表す指標を用いて金属材料の損傷挙動の比較を行った結果、材料の硬さが低くなると、低角度側の損傷が支配的となり、粒子の衝突速度が高くなると、低角度側の損傷の割合が増加することが確認された。

(2) 金属材料の損傷については材料の硬さが低く、粒子の衝突条件が高くなると、低角度側の損傷の割合が増加して、損傷の衝突角度依存性が変わるので、材料の耐エロージョン性を予測することが難しくなる。しかし、その低衝突角度側の損傷が増加し始める粒子の衝突条件があらかじめ分かれば、誤診を防止することができる。その条件の予測には粒子の衝突速度が低くなると、切削損傷がなくなり、塑性変形損傷のみになる時の速度、すなわち臨界衝突速度を利用するのが妥当である。

第6章 損傷機構判定の指標（臨界衝突速度）

6.1 緒言

本章ではまず諸材料における損傷の衝突角度依存性を比較して、その損傷を容易に推定できる条件を調べ、その条件と臨界衝突速度との関係を論じる。次に、金属材料について新たに考案した試片回転式摩擦係数測定装置を用いて、粒子-試片間の摩擦係数から臨界衝突速度を測定する方法を述べる。さらに、粒子衝突時の材料挙動から臨界衝突速度の理論式を導出し、理論値と実測値の比較を行う。セラミック材料、高分子材料の臨界衝突速度についても述べる。最後に諸材料の耐エロージョン性の評価における臨界衝突速度の意義を述べる。

6.2 損傷の衝突角度依存性と臨界衝突速度

第3,4,5章では、セラミック材料、高分子材料および金属材料において、材料の硬さおよび粒子の衝突条件、特に衝突速度が変化したときのそれぞれの損傷の衝突角度依存性の変化を調べた。これら全ての材料におけるパラメータ ($Erosion(30^\circ) / Erosion(70^\circ)$) とピッカース硬さ (Hv) との関係を図6.1に示す。ここで、先にも述べたが、このパラメータが1より大きい場合には、 30° での損傷、すなわち低角度側の損傷が多いことを示している。反対に1より小さい場合、 70° での損傷、すなわち高角度側の損傷が多いことを示している。

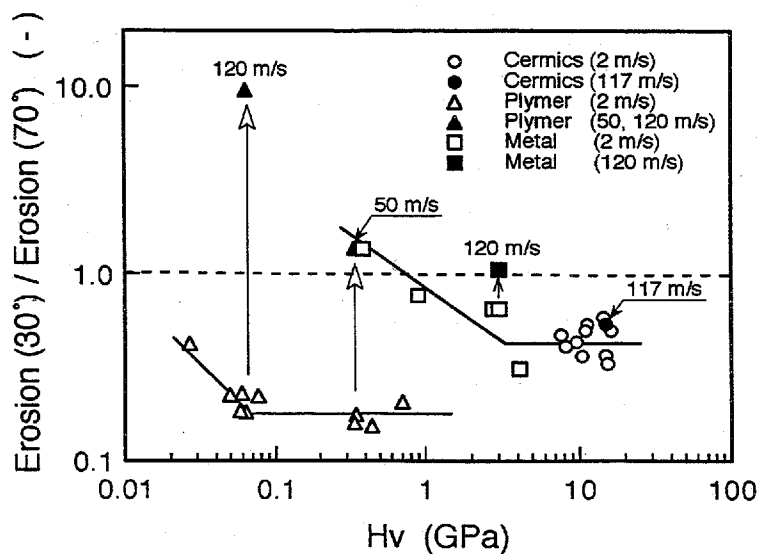


Fig. 6.1 Correlation between parameter of impact angle dependence ($Erosion(30^\circ) / Erosion(70^\circ)$) and Vickers hardness for various materials.

まず、粒子衝突速度が低い場合（2 m/s），これらは大きく2つのグループに分けることができる。すなわち、硬度の低い高分子材料のグループと硬度の高い金属材料およびセラミック材料のグループである。これらのグループにおいて、ある硬さ以上ではパラメータの値が一定であるが、それ以下では硬さが低くなるにつれてパラメータの値が増加している。

次に衝突速度の影響について、高分子材料においては衝突速度の上昇に伴い、パラメータ（ $Erosion(30^\circ)/Erosion(70^\circ)$ ）が大きく増加している。その中でも硬さの低い材料ではそれが顕著となる。金属材料においても衝突速度の上昇に伴い、低角度損傷の割合が増加しているが、高分子材料のそれよりは少ない。セラミック材料においては120 m/sの衝突速度でも低角度損傷の増加が見られない。

ここで、諸材料の耐エロージョン性を最も容易に評価できる条件についてはFig. 6.1においてパラメータ（ $Erosion(30^\circ)/Erosion(70^\circ)$ ）が硬さに対して変化しない条件、すなわちセラミック材料、硬さが約0.05 GPa以上の高分子材料で衝突速度が低い場合である。その他の条件については材料の硬度が異なると、その損傷の衝突角度依存性が変化することを示している。高分子材料においては粒子衝突速度に非常に敏感であり、少しでも速度が上昇すると、その挙動が大きく変化する。それには低角度側の損傷が大きく関与していることは明らかである。この低角度側の損傷についてはそれぞれの材料についてその損傷の曲線の形状および全体の損傷に占める割合がよく分かっていない。そのため、本研究ではその損傷が比較的単純な場合にのみ限定して、損傷の予測を行う方法を見いだすこととした。その方法とは、低角度側の損傷が小さくなり高角度側の損傷が支配的となる条件、すなわち第5章の既往の研究で述べた臨界衝突速度を利用する方法である。この臨界衝突速度を用いた耐エロージョン性の評価方法の工業的利用方法についての詳しい記述は第7章で行う。次に、この臨界衝突速度を実験的、理論的に求める方法について述べる。

6.3 測定装置と測定原理

6.3.1 摩擦係数

臨界衝突速度を求める際、既往の研究では金属材料についてその損傷表面の腐食速度の挙動からこの値を求めている。そのため、この測定方法では多大の時間と労力を要する上、セラミック材料および高分子材料においてはほとんどの場合、適切な腐食環境や腐食速度の測定法が無い。そこで、新たに考案した方法、すなわち試片回転式摩擦係数測定装置を用いて、まず金属材料について粒子-試片間の摩擦係数から臨界衝突速度の測定を行った。Fig. 6.2に測定に用いた試片回転式摩擦係数測定装置を示す。この装置では、まず粒子を任意の高さから落下させ、回転している円錐状の試片に衝突させる。試片に衝突し跳ね返った粒子は計測板へ衝突する。粒子が試片へ衝突する瞬間、試片は回転しているので、粒子には円周方向に摩擦力が働く。その結果、試片が回転していないときよりも横方向へずれて計測板へ衝突する。この時の水平方向のずれ角度 α から摩擦係数を求めることができる。

粒子の衝突速度は、粒子の落下高さを変化させることにより、また試片への衝突角度は、試片の頂角 β と試片の回転速度を変えることにより変えることができる。

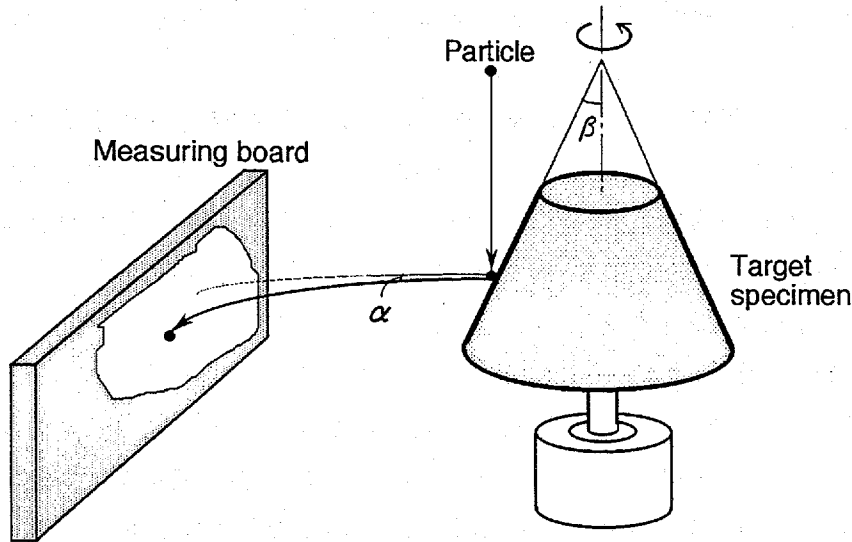


Fig. 6.2 Schematic diagram of the rotating target apparatus for measuring the friction coefficient during particle impact.

ターゲット試片には機械的物性の異なる4種類の材料すなわち Table 6.1 に示すアルミニウム、黄銅、炭素鋼および焼入された炭素鋼を用いた。試片の半頂角は 20° 、 30° 、 40° のもの3種類を準備した。それら試片の表面は#2000のエメリー研磨紙で研磨した。

Table 6.1 Chemical composition and mechanical properties of target specimens.

Material	Chemical composition (%)	Vickers hardness $Hv_0.05$ (GPa)
Aluminium	2.4Mg	0.88
Brass	58.69Cu-37.85Zn-3.06Pb-0.25Sn	1.23
S45C	0.43C-0.63Mn-0.26Si	2.35
S45C (quenched)	0.43C-0.63Mn-0.26Si	4.41

衝突粒子は Table 6.2 に示す球形粒子2種類と多角粒子3種類を用いた。計測板は塩化ビニル樹脂製で、表面に染色浸透深傷試験に用いられる現像剤を吹き付けた。現像剤は乾燥すると、チョークの粉のようになり、粒子が衝突するとその部分の粉が剥がれ落ちるので、粒子の衝突場所が分かる。粒子の衝突速度は $1.0\sim 5.0$ m/sに変化させ、衝突角度は 15° 、 20° 、 30° の3種類で行った。

Table 6.2 Mechanical and physical properties of particles.

Shape	Material	Mean diameter D_p (mm)	Density ρ_p (kg/m ³)	Vickers hardness Hv_p (GPa)
Spherical	Steel shot	0.6	7890	8.8
		0.8		
		3.0		
		5.0		
	Brass shot	3.0	8430	2.1
Angular	Steel grit	0.28	7890	2.9
		0.88		
		1.13		
	Silicon carbide	0.27	3170	11.8
		0.29		
		0.56		
		0.26		
Silica sand	0.34	2650	35.3	
	0.40			

6.3.2 臨界衝突速度

次に、摩擦係数から臨界衝突速度を求める方法について述べる。

今、衝突時における粒子とターゲット金属表面の間の摩擦係数について考えると、粒子がターゲット表面を滑るときは、その値は動摩擦係数のそれであり、滑らないときは静摩擦係数のそれである。一般に動摩擦係数は静摩擦係数に比べてかなり小さく、しかも滑り速度に関係なく一定である¹⁾。従って、粒子とターゲット表面の間の摩擦係数を測定すれば、衝突に際して粒子が滑っているか否か検知できるし、その値の衝突速度に対する変化から臨界衝突速度を決定することができる。

6.4 測定方法

6.4.1 摩擦係数

ここでは摩擦係数の測定方法を述べる。

Fig. 6.3 に示すように周速度 $2\pi rn$ で回転している試験装置の試片表面に自由落下により粒子を衝突速度 V_0 で衝突させると、試片上へ衝突した粒子は、衝突時に二つの力を受ける。すなわち、試片面接線方向の摩擦力 F および試片面垂直方向の反発力 W である (Fig. 6.3 (a))。摩擦力 F はさらに、試片回転方向の摩擦力 $F \cos \gamma$ と試片面尾根方向の摩擦力 $F \sin \gamma$ に分解される。粒子の速度に関しては、Fig. 6.3 (b) に示すように、衝突速度 V_0 で衝突した粒子は V_0' に変化し、これは V_t と V_r に分解される。

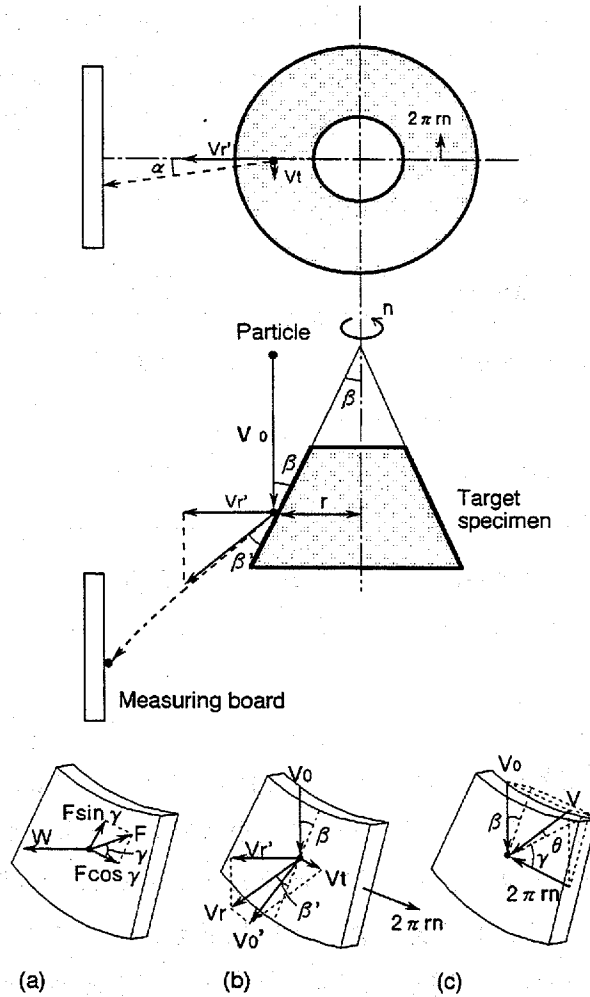


Fig. 6.3 The locus of an impacting particle on rotating target specimen: (a) forces applied on a particle : (b) velocities of particle before and after the impact : (c) relative impact velocity and angle of particle against target specimen.

求める摩擦係数 μ は以下のように表される。

$$\mu = \frac{F}{W} \quad (6.1)$$

また、計測されるずれ角度 α は以下のように表される。

$$\tan \alpha = \frac{V_t}{V_r'} \quad (6.2)$$

まず、試片回転方向の成分について考える。 V_t は粒子衝突時の試片回転方向の摩擦力によって発生し、試片回転方向の運動量保存則から式 (6.3) のように表される。

$$m(V_t - 0) = \int F \cos \gamma dt \quad (6.3)$$

(6.1)式を(6.3)式に代入すると、以下のようなになる。

$$mV_t = \cos \gamma \int \mu W dt \quad (6.4)$$

ここで、粒子がターゲット試片の接触している間の摩擦係数は、時々刻々と変化していて、その時々摩擦係数を測定することは困難である。そこで接触期間中の摩擦係数の平均を示す時間平均摩擦係数 $\bar{\mu}$ を導入し²⁾、以下のように表す。

$$\int \mu W dt = \bar{\mu} \int W dt \quad (6.5)$$

(6.5)式を(6.4)式に代入し、 $\bar{\mu}$ について整理する。

$$\bar{\mu} = \frac{mVt}{\cos \gamma \int W dt} \quad (6.6)$$

次に、試片面に垂直な方向の成分について考える。試片面垂直方向の力積と運動量変化は等しいので、以下のように表される。

$$\int W dt = mV_r \sin \beta' - (-mV_0 \sin \beta) \quad (6.7)$$

また、反発係数 e は粒子の試片面垂直方向の衝突前後の速度比として、以下のように表される³⁾。

$$e = \frac{V_r \sin \beta'}{V_0 \sin \beta} \quad (6.8)$$

ここで、 V_r' は以下のように表される。

$$V_r' = V_r \cos(180^\circ - 90^\circ - \beta - \beta') = V_r \sin(\beta + \beta') \quad (6.9)$$

(6.6)式に(6.2), (6.7), (6.8), (6.9)式を代入すると $\bar{\mu}$ は以下のように表される。

$$\bar{\mu} = \frac{V_r \tan \alpha}{V_0 \sin \beta \cos \gamma (1+e)} \sin(\beta + \beta') \quad (6.10)$$

さらに、試片の尾根方向の成分を考える。試片面尾根方向の力積と運動量変化は等しいので、以下のように表される。

$$mV_r \cos \beta' - mV_0 \cos \beta = -\bar{\mu} \sin \gamma \int W dt \quad (6.11)$$

(6.7)式を(6.11)式に代入すると次式のようなになる。

$$V_r \cos \beta' - mV_0 \cos \beta = -\bar{\mu} \sin \gamma (mV_r \sin \beta' + mV_0 \sin \beta) \quad (6.12)$$

(6.8)式と(6.12)式より V_r について解くと以下の式になる。

$$V_r = V_0 \sin \beta \sqrt{e^2 + \left[\frac{1}{\tan \beta} - \bar{\mu} (1+e) \sin \gamma \right]^2} \quad (6.13)$$

最後に(6.10)式に(6.13)式を代入すると、 $\bar{\mu}$ を求めることができる。

$$\bar{\mu} = \frac{\tan \alpha \sqrt{e^2 + \left[\frac{1}{\tan \beta} - \bar{\mu}(1+e)\sin \gamma \right]^2}}{(1+e)\cos \gamma} \sin(\beta + \beta') \quad (6.14)$$

ここで、 β' は粒子反射時の試片に対する角度であり、(6.8), (6.12)式より以下のように表される。

$$\tan \beta' = \frac{e \sin \beta}{\cos \beta - \bar{\mu}(1+e)\sin \gamma \sin \beta} \quad (6.15)$$

また、衝突時の衝突速度 V 、衝突角度 θ, γ は以下ようになる (Fig. 6.3 (c) 参照、但し Fig. 6.3 (c) は実際の衝突速度を分かりやすく示すため、Fig. 6.3 (a), (b) に示した固定座標系ではなく動く座標系で示してある)。

$$V = \sqrt{V_0^2 + (2\pi r n)^2} \quad (6.16)$$

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{V_0 \sin \beta}{V} \right) \quad (6.17)$$

$$\gamma = \tan^{-1} \left(\frac{V_0 \cos \beta}{2\pi r n} \right) \quad (6.18)$$

$\bar{\mu}$ は、角度 α を測定し、(6.14), (6.15), (6.18)式から算出する。衝突条件は (6.16), (6.17) 式によって決定する。ただし、ここで測定される摩擦係数は、粒子が試片に接している間の平均値として表される接触時の時間平均摩擦係数 $\bar{\mu}$ である。なお、これらの式で $\bar{\mu}$ を求める際、反発係数 e を代入する必要があるが、 $e = 0 \sim 1$ を代入しても、 $\bar{\mu}$ の値に影響を及ぼさないため、 e は任意の値 (本計算では 0.5) を代入し、 $\bar{\mu}$ を計算した。

6.4.2 測定装置の検証

(1) 摩擦係数

まず、前述の摩擦係数を算出する理論式が正しいかどうか確認するために、半頂角 β の異なった回転試片を用いて測定を行い、摩擦係数を算出した。理論の検証のために、粒子には球形粒子を用いた。測定理論が正しいければ、同一衝突条件下での時間平均摩擦係数 $\bar{\mu}$ は試片の半頂角 β によらず、同一の値を示すはずである。Fig. 6.4 に直径 0.6 mm の鋼球を衝突角度 20° で半頂角 $20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$ の炭素鋼試片に衝突させた場合の時間平均摩擦係数の測定値を示す。測定された時間平均摩擦係数はいずれの半頂角の場合でもほぼ同一の値を示したので、測定理論および算出式は正しい。また、測定された摩擦係数は予測したとおり、衝突速度が高い場合は一定であり、ある速度以下では摩擦係数が高くなっている。衝突速度の低下と共に連続的に上昇している点については、静摩擦係数自身が力の条件によって変化すること、また衝突粒子とターゲット表面との接触初期のすべり時に動摩擦係数を示し、その後の回転時に静摩擦係数を示し、時間平均摩擦係数には両者が含まれることを考えれば理解できる。

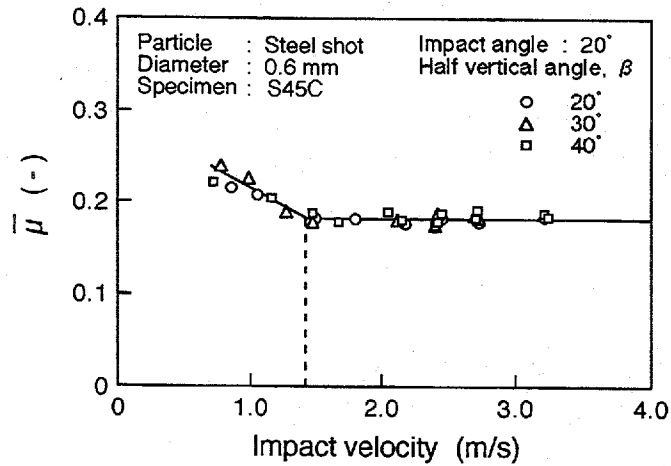


Fig. 6.4 Relationship between friction coefficient and impact velocity for various half vertical angles.

(2) 臨界衝突速度

臨界衝突速度を確認するため、摩擦係数と衝突後の圧痕表面の比較を行った。ここでは、圧痕の観察を容易にするために、直径5 mmの鋼球を用いた。衝突角度は30°とした。摩擦係数を測定したところ、値が一定になる速度は約2.0 m/sであった。そこで、この速度前後の圧痕の観察を行った。Fig. 6.5に衝突速度1.9 m/sと2.5 m/sにおける衝突後の圧痕内のピットの状態を示す。

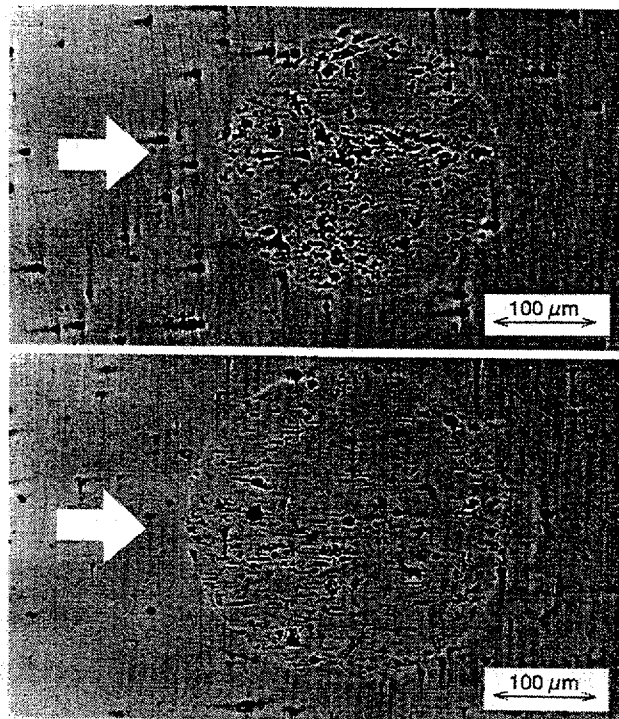


Fig. 6.5 Optical micrographs of crater formed on mild steel, S45C, by impacting of steel shot of 5 mm, diameter ; upper : impact velocity of 1.9 m/s ; and lower : impact velocity of 2.5 m/s.

衝突速度 1.9 m/s では圧痕部内のピットはほぼ円形であったのに対して、衝突速度 2.5 m/s では圧痕部内のピットが衝突方向に引き伸ばされて細長い楕円形になっていた。これは、衝突速度が 2.0 m/s 以上では粒子は滑っていることと矛盾しない。また、この他に圧痕全体の形状を各衝突速度において測定し、摩擦係数が上昇する速度以上では粒子の衝突方向に伸ばされ、楕円になっていることを確認した。よって、摩擦係数の上昇する速度が臨界衝突速度であると判断した。

6.5 金属材料における測定結果および考察

6.5.1 臨界衝突速度の測定

(1) 球形粒子の臨界衝突速度

球形粒子について、衝突角度、粒径、材質を変化させた場合の摩擦係数を測定し、臨界衝突速度を求めた。炭素鋼に鋼球粒子の直径 0.6 mm の鋼球を衝突角度 15°、20°、30° で衝突させた場合の摩擦係数および鋼球の直径を 0.6 mm から 5.0 mm まで変化させた場合の摩擦係数を Fig. 6.6 に示す。直径 0.6 mm の鋼球を衝突させた時の摩擦係数は衝突角度が変わっても、同じ値を示し臨界衝突速度も同じであった。球径を変化させた場合には臨界衝突速度だけでなく、摩擦係数の値も大きく変化した。

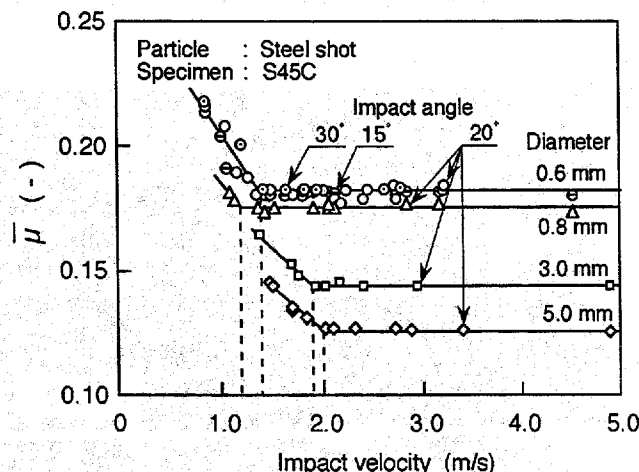


Fig. 6.6 Relationship between friction coefficient and impact velocity for various impact angles and diameters of steel shot.

ターゲット試片を変化させた場合の結果を Fig. 6.7 に示す。試片の材質を変化させた場合も球径を変化させた場合と同様に、臨界衝突速度および摩擦係数の値が大きく変化した。黄銅粒子を各試片に衝突させた場合の臨界衝突速度については摩擦係数の値も含めて上記の鋼球粒子の結果と共に、Table 6.3 に示した。

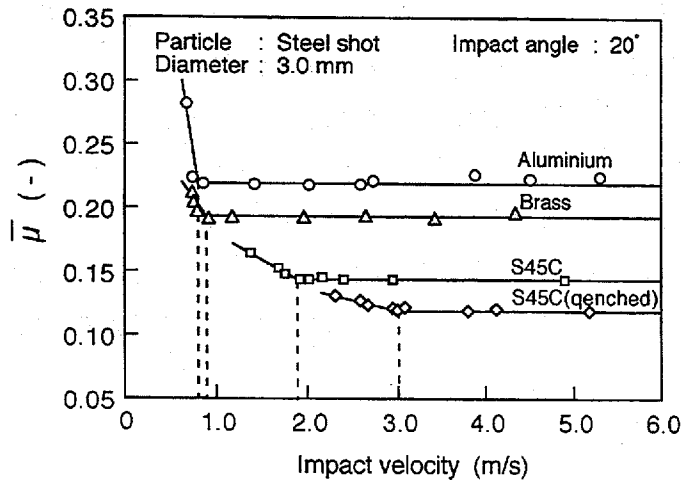


Fig. 6.7 Relationship between friction coefficient and impact velocity for various target specimens.

Table 6.3 Critical impact velocity and friction coefficient under various impact conditions.

Particle		Mean diameter D_p (mm)	Target specimen	Critical impact velocity V_c (m/s)	Friction coefficient $\bar{\mu}$ (-)
Shape	Material				
Spherical	Steel shot	3.0	Aluminium	0.8	0.22
		3.0	Brass	0.9	0.19
		0.6	S45C	1.4	0.18
		0.8	S45C	1.2	0.17
		3.0	S45C	1.9	0.14
		5.0	S45C	2.0	0.13
		3.0	S45C(qenched)	3.0	0.12
	Brass shot	3.0	Aluminium	1.0	0.26
		3.0	Brass	1.2	0.22
		3.0	S45C	1.5	0.17
Angular	Steel grit	0.28	S45C	3.0	0.36
		0.88	S45C	2.1	0.28
		1.13	S45C	1.7	0.23
	Silicon carbide	0.27	S45C	2.7	0.39
		0.29	S45C	2.3	0.39
		0.56	S45C	2.3	0.38
		0.26	S45C	2.5	0.29
	Silica sand	0.34	S45C	2.3	0.26
		0.40	S45C	2.1	0.25

(2) 多角粒子の臨界衝突速度

多角粒子である破碎鋼（平均直径 0.88 mm）を炭素鋼試片に衝突させた場合の摩擦係数の測定を行った。その結果、同一条件下で摩擦係数にばらつきが生じた。Fig. 6.8 に 4 種類の速度における摩擦係数の出現頻度分布を示す。これらの図において、衝突速度 2.6~4.0 m/s での摩擦係数の分布はほぼ等しいが、衝突速度 1.9 m/s では分布の幅が広がり、最大出現頻度を示す摩擦係数も上昇している。この理由は次のように考えられる。衝突速度の十分高い 4.0 m/s では粒子は試片表面を滑っているので、摩擦係数はほぼ一定の値をとる。従って、衝突速度の高い場合でのばらつきは多角粒子の形状が均一でないため、試片衝突後

に飛ぶ方向のずれが生じたためと考えられる。一方、衝突速度が低いときは多角粒子の形状が均一でないのに加えて、試片表面を滑らない粒子が出現するため、大きな値の摩擦係数が出現する。そのため、最大出現頻度の摩擦係数も上昇する。そこで、各衝突速度に対する摩擦係数の代表値として、最大頻度を示す摩擦係数を用いることにした。これら摩擦係数の代表値と同程度の摩擦係数を示した Fig. 6.7 におけるアルミニウムの結果から、Fig. 6.9 に示すように曲線を描くと、臨界衝突速度を 2.1 m/s と決定することができた。各種の粒径の炭化珪素、珪砂を炭素鋼試片に衝突させた場合の臨界衝突速度の結果については Table 6.3 に示した。

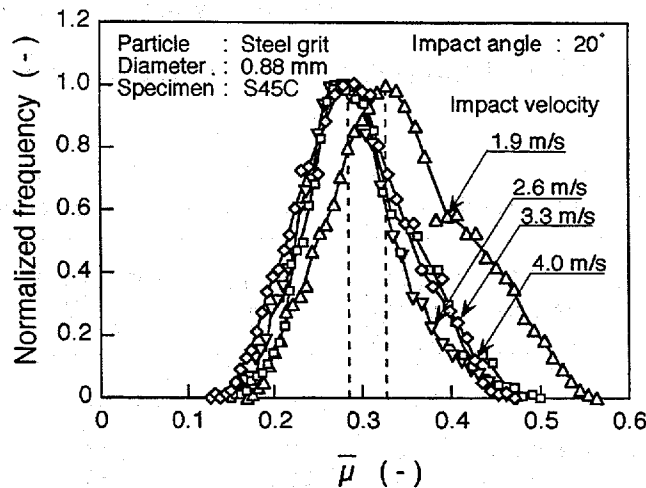


Fig. 6.8 Normalized frequency distributions of friction coefficient during impact of angular particle for various impact velocities.

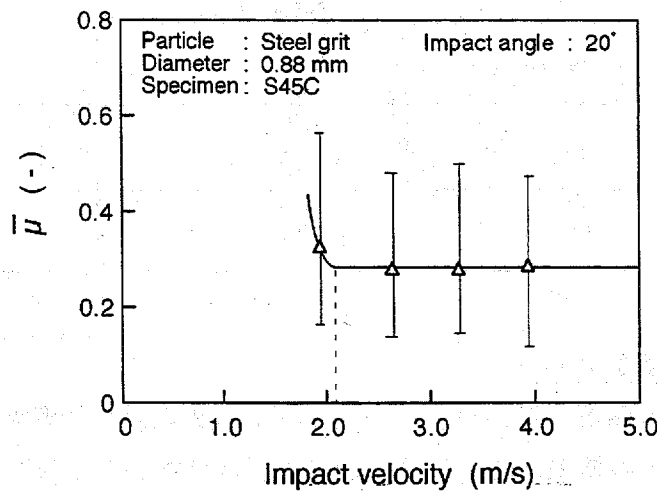


Fig. 6.9 Relationship between friction coefficient and impact velocity during impact of angular particle.

Table 6.3 の内の臨界衝突速度の粒子径による変化を Fig. 6.10 に示す。球形粒子の場合は粒子径が大きくなるにつれて、臨界衝突速度が高くなるが、多角粒子では反対に臨界衝突速度が低くなっている。これは、明らかに多角粒子の形状の影響であると考えられる。

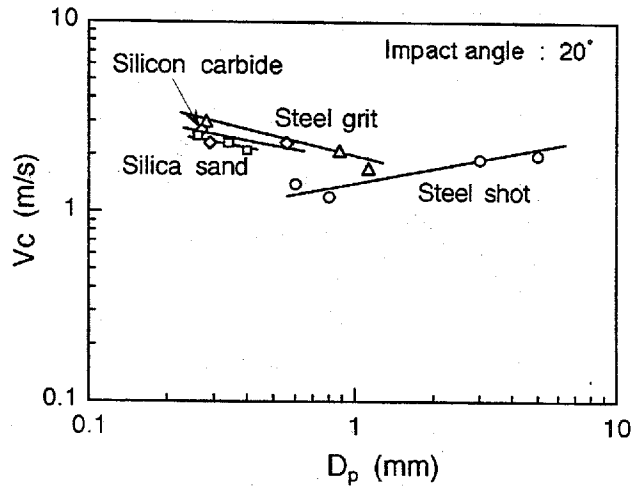


Fig. 6.10 Influence of particle diameter on critical impact velocity for spherical and angular particles.

6.5.2 臨界衝突速度と材料物性との相関

摩擦係数測定より得られた臨界衝突速度と材料の物性との相関を調べた。一般に固体粒子衝突エロージョンでは粒子の硬さと試片の硬さが逆転する時に損傷の大きさが大きく変化する⁴⁾。球形粒子の場合の試片の硬さ(Hv_s)と粒子の硬さ(Hv_p)の比に対する臨界衝突速度の関係を Fig. 6.11 に示す。粒子と試片の硬さの比が増加するに従って臨界衝突速度が増加する傾向はどちらの粒子でも一致した。しかし、衝突粒子が異なると硬さ比のみで一義的に臨界衝突速度を相関させることはできなかった。

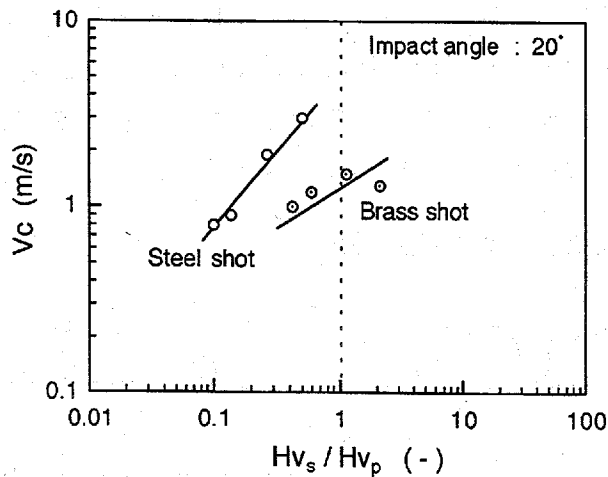


Fig. 6.11 Correlation between critical impact velocity and ratio of Vickers hardness of particle and target specimen.

臨界衝突速度と動摩擦係数の関係を Fig. 6.12 に示す。球形粒子の場合は衝突粒子が異なっても、動摩擦係数によって一義的に臨界衝突速度の値が決定されるが、多角粒子ではそのような関連は無かった。

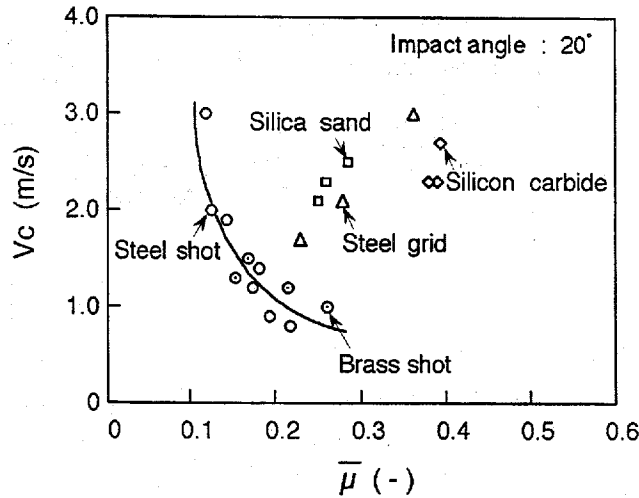


Fig. 6.12 Correlation between critical impact velocity and friction coefficient for various impact conditions.

以上の結果から、臨界衝突速度が材料の物性（硬さ、動摩擦係数など）に関係していることはある程度分かったが、単一の物性で全ての粒子-ターゲット金属材料の組合せに対する臨界衝突速度を相関させることはできなかった。さらに、多角粒子における臨界衝突速度を求めるためには、その形状の影響を考慮しなければならないことが分かった。

6.6 理論式の導出

6.6.1 臨界衝突速度の境界条件

臨界衝突速度以上では、試片に衝突した粒子は材料表面にへこみを形成した後、材料表面を滑りながら回転を始め、材料から離れていく (Fig. 6.13 (a))。一方、臨界衝突速度以下では、へこみを形成した後に、滑らず回転のみが生じ、材料を離れていく (Fig. 6.13 (b))。臨界衝突速度の理論式は滑り発生の有無より導出する。

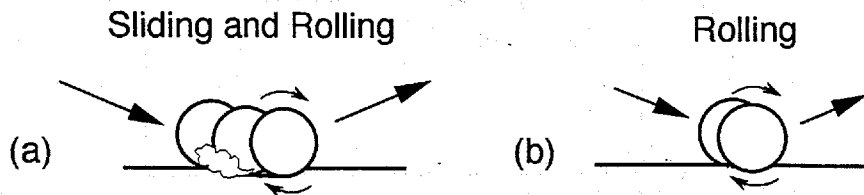


Fig. 6.13 Behavior of particle impacted on material surface at a velocity higher than critical impact velocity (a), and lower than critical impact velocity (b).

二つの物体間での滑りの発生については、2円筒のころがり-すべり現象で次のように説明されている。今、2本の回転速度の異なるローラが軸を平行にして面で接触するとき、接触を開始する時点では、接触のみで滑りはない。しかし、ある距離進んだところでは接線方向にずれが生じる。ところが、実際には摩擦が存在するため、ある場所までは接触部はくっついたままで、このずれは表面下の材料の接触部に生ずる接線方向の弾性変形によって吸収される。しかし、そのずれがある値を超えると、材料は滑り始める⁵⁾。この考えを固体粒子衝突における臨界衝突速度に導入する。

粒子が材料に衝突する時に作用する水平方向の応力は Fig. 6.14 に示すように、粒子が衝突した材料表面の前方には圧縮応力、後方には引張応力が生じる⁶⁾。臨界衝突速度の算出には、粒子の後方の伸びに着目し、この部分での水平方向の引張歪み ε がある限界値 ε_c に達すると、滑りが生じ始めると仮定した。すなわち、臨界衝突速度の境界条件として次の式を与えた。

$$\varepsilon = \varepsilon_c \quad (6.19)$$

次に粒子衝突時の材料の水平方向の引張歪み ε および引張歪みの限界値 ε_c の算出方法について述べる。

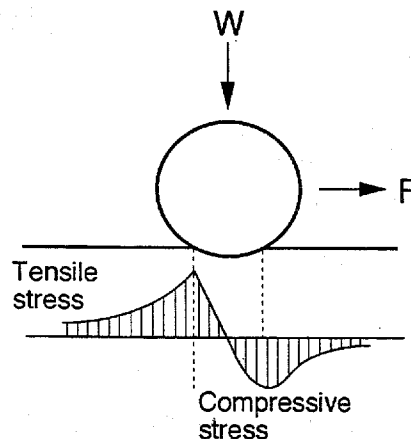


Fig. 6.14 The distribution of tangential stress put on target surface during a particle impact.

6.6.2 粒子衝突時の材料の引張歪み

粒子衝突時の材料の水平方向の引張歪み ε は衝突する粒子表面と材料表面の相対的な速度差に依存して生じる。接触時間内での伸びはその速度差と接触時間との積で表される。さらに、その伸びを引張られた長さで除したものが引張歪みである。

まず、粒子接触時の粒子表面と材料表面との相対速度の平均値を求めるにあたって、Fig. 6.15 に示すような衝突モデルを考える。平均相対速度 V_s は粒子が材料に衝突する時の水平方向の平均速度から粒子の平均回転速度による減速分を引いたもので(6.20)式で表される。なお、平均速度は衝突前速度 V_i と衝突後速度 V_f の平均速度、平均回転速度は衝突前粒子回転速度 $r \Omega=0$ と衝突後粒子回転速度 $r \Omega'$ の平均速度、 r は衝突時の粒子と試片との接触

点 c と粒子の重心との距離, Ω , Ω' は粒子衝突前後の回転角速度である。

$$V_s = (V_t + V'_t)/2 - r \Omega'/2 \quad (6.20)$$

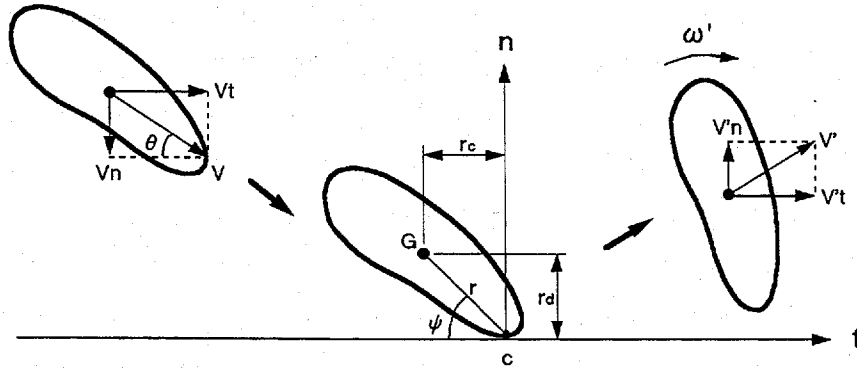


Fig. 6.15 Velocities and angular velocities of particle before and after impact.

衝突角度 θ , 衝突速度 V (水平方向成分: V_t , 垂直方向成分: V_n) で試片に衝突した粒子は速度 V' で試片から離れる。 r の水平成分, 垂直成分を r_c, r_d とする。接触時の時間平均摩擦係数を $\bar{\mu}$, 反発係数を e とする。粒子慣性モーメントについては $I = mk^2$ (m は粒子の質量) とし, 衝突前の粒子の回転はないものとする, 粒子の衝突後の水平方向速度 V'_t は以下のように理論的に表される⁷⁾。

$$V'_t = V_t - \bar{\mu} \frac{k^2(1+e)}{k^2 + r_c(r_c - \bar{\mu}r_d)} V_n \quad (6.21)$$

$$r\Omega' = \frac{(r_c - \bar{\mu}r_d)(1+e)}{k^2 + r_c(r_c - \bar{\mu}r_d)} V_n \quad (6.22)$$

r_c, r_d を r と接触角 ψ (r と試片面とが成す角度) を用いて表すと, $r_c = r \cos \psi$, $r_d = r \sin \psi$ になる。また, 慣性モーメント I を r を用いて $I = mk^2 = Kmr^2$ と表す。これらの関係を用いて, 式 (6.21), (6.22) を変形すると, 以下のようなになる。

$$V'_t = V_t - \bar{\mu} \frac{K(1+e)}{K + \cos \psi (\cos \psi - \bar{\mu} \sin \psi)} V_n \quad (6.23)$$

$$r\Omega' = \frac{(\cos \psi - \bar{\mu} \sin \psi)(1+e)}{K + \cos \psi (\cos \psi - \bar{\mu} \sin \psi)} V_n \quad (6.24)$$

(6.23), (6.24) 式を (6.20) 式に代入すると, V_s は以下のようなになる。

$$V_s = \frac{\bar{\mu} (K + \sin \psi) - \cos \psi}{K + \cos \psi (\cos \psi - \bar{\mu} \sin \psi)} (1+e) V_n \quad (6.25)$$

次に、粒子と材料の接触時間については粒子が材料に衝突するときの降伏圧力を p 、粒子の球相当半径を r_s とすると以下のように表される⁸⁾。

$$\Delta t_{ep} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{m}{2\pi p r_s}} \quad (6.26)$$

ここで、この接触時間 Δt_{ep} は粒子が材料に衝突し、垂直方向の速度が0になるまでの時間、すなわち衝突初期の弾性変形とその後の塑性変形する時間を表しており、弾性跳ね返り時間は含まれていない。この接触時間 Δt_{ep} のうち、塑性変形する時間のみが本研究で注目する滑り、すなわち塑性滑りに関係しているとした⁹⁾。完全弾性衝突のときの接触時間 Δt_e （衝突初期および跳ね返り時間）は Hertz によって以下の式で与えられた¹⁰⁾。

$$\Delta t_e = k_e V n^{-1/5} \quad (6.27)$$

ここで、 k_e は粒子、材料によって決まる定数である。この Δt_e の $1/2$ が垂直方向の速度が0になるまでの弾性接触時間である。粒子が材料に完全弾性衝突する場合、すなわち反発係数 $e=1$ になる場合、 Δt_{ep} と $\Delta t_e/2$ は一致することから、 k_e を算出することができる。以上より、垂直方向に塑性変形する時間 Δt_p は以下ようになる。

$$\Delta t_p = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{m}{2\pi p r_s}} - \frac{k_e}{2} V n^{-1/5} \quad (6.28)$$

(6.25)式より求められる平均相対速度 V_s および(6.28)式で表される接触時間 Δt_p との積が伸び Δl であり、以下のように表される。

$$\Delta l = \frac{\overline{\mu(K + \sin \psi)} - \cos \psi}{K + \cos \psi (\cos \psi - \overline{\mu \sin \psi})} \left(\frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{m}{2\pi p r_s}} - \frac{k_e}{2} V n^{-1/5} \right) (1+e) V n \quad (6.29)$$

この伸び Δl を引張られた部分の長さ l で割ったものが引張歪みである。ここで、 l は衝突時の最大圧痕直径 d の半分、すなわち $d/2$ を基準として、比例定数 k_l との積とした。

$$l = k_l d / 2 \quad (6.30)$$

(6.29)、(6.30)式から粒子衝突時の材料の引張歪み ε は以下のように表される。

$$\varepsilon = \frac{\overline{\mu(K + \sin \psi)} - \cos \psi}{K + \cos \psi (\cos \psi - \overline{\mu \sin \psi})} \left(\pi \sqrt{\frac{m}{2\pi p r_s}} - k_e V n^{-1/5} \right) \frac{(1+e) V n}{k_l d} \quad (6.31)$$

なお、最大圧痕直径 d は粒子衝突による垂直方向の運動エネルギーから求めることができる。まず、粒子衝突によって形成されるへこみの体積 v は以下のように表される¹¹⁾。

$$v = \frac{1}{2p} m V n^2 \quad (6.32)$$

さらに、最大圧痕直径 d とへこみの体積 v は以下の式で表される¹²⁾。

$$d = \left(\frac{64 v r_s}{\pi} \right)^{1/4} \quad (6.33)$$

6.6.3 材料の限界歪み

材料が引張られて滑り始めるのは材料が弾性変形した後にある程度塑性変形したときであると考えられるが、その塑性変形歪みは弾性変形歪みと比較してわずかであると考え、ここでは材料の限界弾性歪みを限界歪みとして用いた。限界弾性歪み ϵ_c は、降伏点 σ_y と弾性係数 E を用いると、以下のように表される。

$$\epsilon_c = \sigma_y / E \quad (6.34)$$

さらに $Hv_s = 2.7 \sigma_y$ の関係¹³⁾ を用いると、限界弾性歪みは以下のように表される。

$$\epsilon_c = Hv_s / 2.7 E \quad (6.35)$$

6.6.4 臨界衝突速度の理論式

(6.33), (6.35)式を条件式(6.19)に代入して、衝突速度 V について解く。この時の速度が臨界衝突速度 V_c であり、以下のように表される。

$$V_c = \frac{K + \cos \psi (\cos \psi - \mu \sin \psi)}{\mu (K + \sin \psi) - \cos \psi} \frac{k_i d}{(1+e) \left(\pi \sqrt{\frac{m}{2\pi p r_s}} - k_e V n^{-1/5} \right)} \frac{Hv_s}{2.7 E \sin \theta} \quad (6.36)$$

上式を用いて、理論臨界衝突速度 V_c を求めるには、式中の反発係数 e 、摩擦係数 μ 、粒子の形状係数 K および接触角 ψ を定める必要がある。

6.7 理論式に用いる物性値の推算

6.7.1 摩擦係数の推算

臨界衝突速度の理論値を計算するために用いたターゲット試片と衝突粒子の機械的物性値を Table 6.4, 6.5 に示す。これら値を用いて摩擦係数と反発係数の推算および粒子形状係数の測定を行った。

Table 6.4 Mechanical properties of target specimens.

Material	Vickers hardness Hv _s (GPa)	Elastic modulus E _s (GPa)	Poisson's ratio ν _s (-)	Shearing strength s (GPa)
Aluminium	0.88	93	0.33	0.19
Brass	1.23	104	0.33	0.20
S45C	2.35	207	0.28	0.25
S45C(quenched)	4.41	490	0.28	0.29

Table 6.5 Mechanical and physical properties of particles.

Shape	Material	Mean diameter	Mass	Density	Vickers hardness	Elastic modulus	Poisson's ratio
		D_p (mm)	m (mg)	ρ_p (kg/m ³)	Hv_p (GPa)	E_p (GPa)	ν_p (-)
Spherical	Steel shot	0.6	0.860	7890	8.8	785	0.33
		0.8	2.10				
		3.0	110				
		5.0	508				
	Brass shot	3.0	144	8430	2.1	216	0.33
	Steel grit	0.28	0.05	7890	2.9	218	0.33
		0.88	1.20				
		1.13	3.50				
Angular	Silicon carbide	0.27	0.017	3170	11.8	410	0.17
		0.29	0.021				
		0.56	0.146				
	Silica sand	0.26	0.011	2650	35.3	200	0.24
		0.34	0.019				
		0.40	0.068				

粒子が試片に衝突する時の動摩擦係数 μ は、粒子衝突時の試片水平方向の摩擦力 F と垂直方向の垂直抗力 W との比として求めることができる。まず、衝突時の摩擦力 F を求める。金属の摩擦機構は Tabor の説明によると¹⁴⁾、二つの項からなる。第一項はせん断項、第二項は掘り起こし項である。せん断項は Fig. 6.16 に示した衝突時の平均接触面積 A と単位面積当たりのせん断力 s の積で表される。また、掘り起こし項は Fig. 6.15 の右側面図に示した衝突時の溝の平均断面積 A' に、表面で金属を押しのけるのに要する平均圧力 p' を乗じて得る。摩擦力 F はこれらの項の和となる。

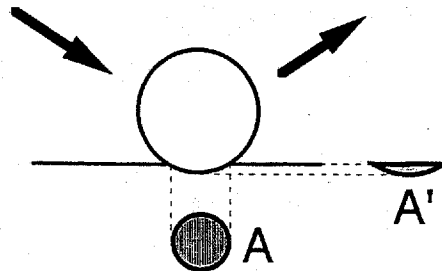


Fig. 6.16 Sheared area, A , and ploughing area, A' , on target specimen during a particle impact.

$$\begin{aligned}
 F &= (\text{せん断項}) + (\text{掘り起こし項}) \\
 &= A s + A' p'
 \end{aligned}
 \tag{6.37}$$

ここで、(6.37)式中の接触投影面積 A および溝の痕跡の断面積 A' を d の関数として求め、(6.37)式に代入すると、次式のようなになる。

$$F = \frac{\pi}{4} d^2 s + \frac{1}{12} \frac{d^3}{r_s} p'
 \tag{6.38}$$

次に、垂直抗力 W について求める。垂直抗力については垂直方向の運動量保存の法則より、次式の関係がある。

$$W\Delta t = m\Delta V_n \tag{6.39}$$

粒子が試片に接触している時間は(6.26), (6.27)式を用いると, 以下のように表される。

$$\Delta t = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{m}{2\pi pr_s} + \frac{k_e}{2} V_n^{-1/5}} \tag{6.40}$$

よって, (6.39)式に(6.40)式を代入すると, 垂直抗力 W は以下のようになる。

$$W = \frac{m\Delta V_n}{\Delta t} = \frac{m(1+e)V_n}{\frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{m}{2\pi pr_s} + \frac{k_e}{2} V_n^{-1/5}}} \tag{6.41}$$

式(6.38), (6.41)より, 摩擦係数 $\bar{\mu}$ は以下のように表される。

$$\bar{\mu} = \frac{F}{W} = \frac{\frac{\pi}{8} d^2 s + \frac{1}{12} \frac{d^3}{r_s} p'}{m(1+e)V_n} \left(\frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{m}{2\pi pr_s} + \frac{k_e}{2} V_n^{-1/5}} \right) \tag{6.42}$$

この式より粒子衝突時の摩擦係数を求めることができる。なお, d は(6.32)式より求めることができる。また, 反発係数 e には後述する推算方法によって求められた値を代入した。

この式の妥当性を調べるために, 理論摩擦係数と実測値の比較を行った。球形粒子における理論摩擦係数と先に得られた実測値を Fig. 6.17 に, 球形粒子と多角粒子のそれらの値を Table 6.6 に示す。理論摩擦係数は全ての粒子について臨界衝突速度以上である 5 m/s および衝突角度 20° を代入して求めたものである。式中の降伏圧力 p および p' には粒子と材料の柔らかい方のピッカース硬さの値を用いた。球形粒子において理論値と実測値はほぼ一致し, 理論式の妥当性が確認された。一方, 多角粒子の理論値は実測値よりも小さくなった (Table 6.6)。これは, 理論計算における球形モデルの衝突が多角粒子の衝突の形態が大きく異なるためと考えられる。よって, 後の計算では多角粒子には実測値を用いた。

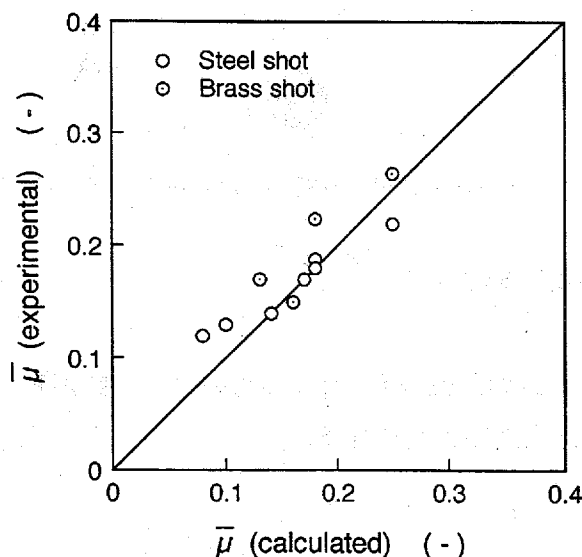


Fig. 6.17 Comparison between theoretical and experimental friction coefficient under various impact conditions.

Table 6.6 Comparison of calculated friction coefficients with those determined by experiments.

Particle		Target specimen	Experimental	Calculated	
Shape	Material		$\bar{\mu}$ (-)	$\bar{\mu}$ (-)	
Spherical		3.0	Aluminium	0.22	0.25
		3.0	Brass	0.19	0.18
	Steel shot	0.6	S45C	0.18	0.18 (Hv:1.57)
		0.8	S45C	0.17	0.17 (Hv:1.57)
		3.0	S45C	0.14	0.14 (Hv:2.06)
		5.0	S45C	0.13	0.12 (Hv:2.35)
	Brass shot	3.0	S45C(q)	0.12	0.08
		3.0	Aluminium	0.26	0.25
		3.0	Brass	0.22	0.18
		3.0	S45C	0.17	0.13
Angular	Steel grit	3.0	S45C(q)	0.15	0.16
		0.28	S45C	0.36	0.11
		0.88	S45C	0.28	0.11
		1.13	S45C	0.23	0.11
	Silicon carbide	0.27	S45C	0.39	0.10
		0.29	S45C	0.39	0.11
		0.56	S45C	0.38	0.11
	Silica sand	0.26	S45C	0.29	0.10
		0.34	S45C	0.26	0.10
		0.40	S45C	0.25	0.10

なお、鋼球の摩擦係数についてさらに検討してみると、粒径が小さくなると、実測では摩擦係数が大きくなったが、理論計算では一定であった。これについては、粒径が小さくなると、粒子衝突時の降伏圧力が小さくなると考えると、実測値と傾向が一致する。硬度測定においても荷重が小さくなると、硬度は低下する結果が得られたので、鋼球に関する材料の硬度は Table 6.6 に示すように補正した硬度を用いた。

6.7.2 反発係数の推算

反発係数 e は Tabor によって衝突前後の衝突速度の垂直成分 $V'n$ を用いて以下のように表されている¹⁵⁾。

$$e = V'n' / V'n \tag{6.43}$$

$$V'n = k_e \left(V'n^2 - \frac{3}{8} V'n^2 \right)^{\frac{3}{8}} \tag{6.44}$$

$$k_e = \left(\frac{10^4}{\pi^5 4^3 3^5} \frac{m}{2r_s^3} \right)^{-\frac{1}{8}} \left(\frac{1 - \nu_p^2}{E_p} + \frac{1 - \nu_m^2}{E_m} \right)^2 p^{\frac{5}{8}} \tag{6.45}$$

ここで、 m は粒子の質量、 r_s は粒子の球相当半径、 E_p 、 E_s は粒子および試片の弾性係数、 ν_p 、 ν_s は粒子および試片のポアソン比、 p は粒子衝突時の降伏圧力を示しており、計算には粒子と材料のうちの柔らかい方のピッカース硬度を用いた。 k_e の計算結果を Table 6.7 に示す。

Table 6.7 Calculated k_e for calculating rebounding coefficient.

Particle		Mean diameter D_p (mm)	Target specimen	Calculated
Shape	Material			k_e (-)
Spherical	Steel shot	3.0	Aluminium	0.538
		3.0	Brass	0.629
		0.6	S45C	0.558
		0.8	S45C	0.556
		3.0	S45C	0.660
		5.0	S45C	0.718
	Brass shot	3.0	S45C(q)	0.780
		3.0	Aluminium	0.588
		3.0	Brass	0.695
		3.0	S45C	0.791
Angular	Steel grit	0.28	S45C	0.886
		0.88	S45C	0.885
		1.13	S45C	0.885
	Silicon carbide	0.27	S45C	0.888
		0.29	S45C	0.888
		0.56	S45C	0.886
	Silica sand	0.26	S45C	1.055
		0.34	S45C	1.057
		0.40	S45C	1.057
			S45C	1.057

これらの式の妥当性を調べるために、反発係数の実測値と計算値との比較を行った。実測値は粒子をターゲット材料に対して垂直に落下させた時の、落下高さを h 、跳ね返り高さを h' とすると、次式によって得られる。

$$e = \sqrt{h'/h} \tag{6.46}$$

黄銅試片に対する 2 種の球形粒子の反発係数の計算値と実測値を Fig. 6.18 に示す。理論式から計算された反発係数は実測値とほぼ一致した。他の粒子、試片に関しても同様の結果が得られた。また、多角粒子については理論値と実測値の比較が行えなかったが、球形粒子の結果からその信頼性が確かめられた理論値を用いることにした。

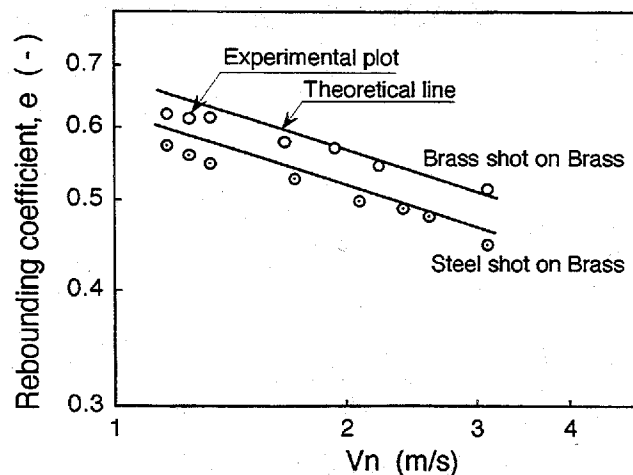


Fig. 6.18 Comparison between theoretical and experimental rebounding coefficient during impact of two kinds of shots on brass target specimen.

6.7.3 粒子の形状係数の測定

粒子が試片表面に衝突するときの接触角 ψ は粒子の重心と支点とを結ぶ直線と試片表面がなす角度である (Fig. 6.15)。この角度は球形粒子では一定であるが、多角粒子では粒子が試片に衝突するときの位置によって各々異なる。よって、1粒子について Fig. 6.19 に示すような測定を行い、その値の出現頻度が最大となる値をその粒子の ψ とした。なお、 ψ は粒子が滑りやすい鋭角を採用した。

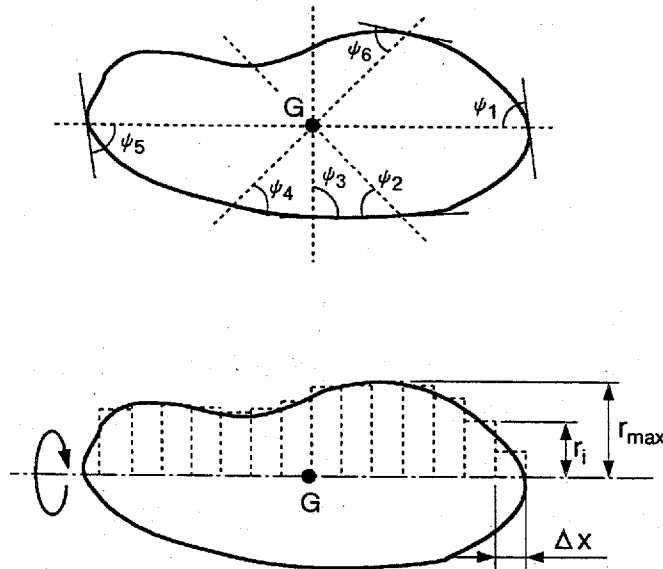


Fig. 6.19 Method for measuring properties of particles shape ; upper : for contact angle ; lower : for inertial moment.

慣性モーメントの係数 K は、各粒子について Fig. 6.19 に示すように、粒子を分割近似し、その各々の部分についての慣性モーメントを求め、それらを合計して粒子と慣性モーメントとした。

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n (K_i m_i r_i^2)}{m r_{max}} \quad (6.47)$$

測定結果を Table 6.8 に示す。なお、球形粒子では ψ は 90° 、慣性モーメントの係数 K は 0.4 になる。

Table 6.8 Inertial moment, K , and contact angle, ψ , determined by measurement of particles.

Particle		Mean diameter D_p (mm)	Target specimen	Measured	
Shape	Material			K (-)	ψ (deg)
Spherical	Steel shot	3.0	Aluminium	0.40	90
		3.0	Brass	0.40	90
		0.6	S45C	0.40	90
		0.8	S45C	0.40	90
		3.0	S45C	0.40	90
		5.0	S45C	0.40	90
	Brass shot	3.0	S45C(q)	0.40	90
		3.0	Aluminium	0.40	90
		3.0	Brass	0.40	90
		3.0	S45C	0.40	90
Angular	Steel grit	0.28	S45C	0.38	70
		0.88	S45C	0.44	71
		1.13	S45C	0.42	73
	Silicon carbide	0.27	S45C	0.39	72
		0.29	S45C	0.39	70
		0.56	S45C	0.38	70
	Silica sand	0.26	S45C	0.38	69
		0.34	S45C	0.38	74
		0.40	S45C	0.37	75

6.8 理論式の検定

理論式に推算した物性値を代入し、理論臨界衝突速度を求めた。(6.12)式の比例定数 k_t には、計算値が実測値にフィッティングするよう 10 を代入した。まず、理論式の衝突角度依存性について検討を行った。炭素鋼に直径 0.8 mm の鋼球が衝突するときの理論臨界衝突速度と衝突角度の関係を Fig. 6.20 に示す。理論臨界衝突速度は約 5° で最小値を示し、 $5 \sim 20^\circ$ では同程度の値を示した。衝突角度 90° では水平方向に働く力は 0 であるので、臨界衝突速度は無限大になっている。また、衝突角度 0° においては垂直方向に働く力がないため、垂直方向には塑性変形せず、塑性滑りは生じていない。これは粒子の衝突時間に弾性変形を除く塑性変形のみを用いたからである。また、この臨界衝突速度がほぼ同じ値を示す衝突角度の範囲は、先に臨界衝突速度を測定した衝突角度 $15 \sim 25^\circ$ と一致している。

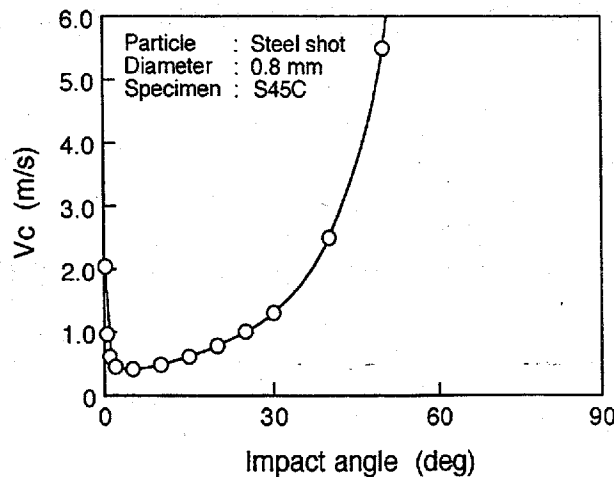


Fig. 6.20 Relationship between impact angle and the critical impact velocity calculated by theoretical equation for impact of 0.8 mm steel shot on carbon steel .

次に、粒径の依存性について比較を行なった。Fig. 6.21 に炭素鋼に対する鋼球および破碎鋼の臨界衝突速度を示す。球形粒子、多角粒子とも臨界衝突速度およびその粒径依存性の傾向が実測値と一致した。

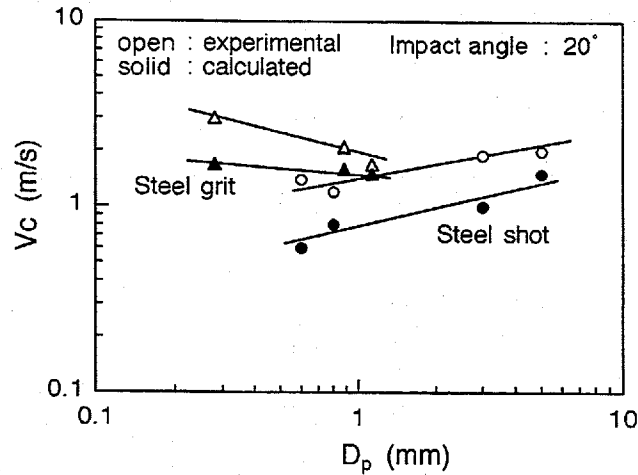


Fig. 6.21 Comparison of particles' diameter effect on the critical impact velocity between theory and experiment for spherical and angular particles.

各粒子、各ターゲット材料における理論臨界衝突速度と実測値の関係を Table 6.9 および Fig. 6.22 に示す。理論値と実測値はほぼ一致した。しかし、これらの中で 3.0 mm の鋼球を焼き入れされた炭素鋼に衝突させた場合 (Fig. 6.22 中の○) と、0.28 mm の破碎鋼を炭素鋼に衝突させた場合 (Fig. 6.22 中の△) の結果が相関から大きく外れた。鋼球を焼き入れ炭素鋼に衝突させた場合のずれについては、理論計算において用いられた硬さが、粒子が焼き入れ炭素鋼に衝突する場合の実際の硬さと異なったためと考えられる。焼き入れ鋼に粒子が衝突するときには若干の焼きなまし現象が生じる可能性があり、仮に理論式に代入する硬さを低くすると、臨界衝突速度は高くなりそのずれは小さくなる。破碎鋼を炭素鋼に衝突させた場合のずれについては、この破碎鋼は密度が高く粒子径が小さいために粒子衝突時に局所的に材料表面に深く衝突したためと考えられる。その結果、粒子が材料に衝突するときの実際の材料の硬さが理論式に代入した値と異なったためであると考えられる。その他の条件についてはほぼ良好な相関を示したことから、導出された臨界衝突速度の理論式の妥当性が確認された。

Table 6.9 Comparison of calculated critical impact velocities with those determined by experiments.

Particle		Mean diameter D_p (mm)	Target specimen	Experimental	Calculated
Shape	Material			V_c (m/s)	V_c (m/s)
Spherical	Steel shot	3.0	Aluminium	0.8	0.8
		3.0	Brass	0.9	1.2
		0.6	S45C	1.4	0.6
		0.8	S45C	1.2	0.8
		3.0	S45C	1.9	1.1
		5.0	S45C	2.0	1.5
	Brass shot	3.0	S45C(q)	3.0	1.3
		3.0	Aluminium	1.0	0.8
		3.0	Brass	1.2	1.2
		3.0	S45C	1.5	1.1
Angular	Steel grit	0.28	S45C	3.0	1.7
		0.88	S45C	2.1	1.6
		1.13	S45C	1.7	1.5
	Silicon carbide	0.27	S45C	2.7	2.9
		0.29	S45C	2.3	2.7
		0.56	S45C	2.3	2.6
		0.26	S45C	2.5	2.7
	Silica sand	0.34	S45C	2.3	2.9
		0.40	S45C	2.1	3.0

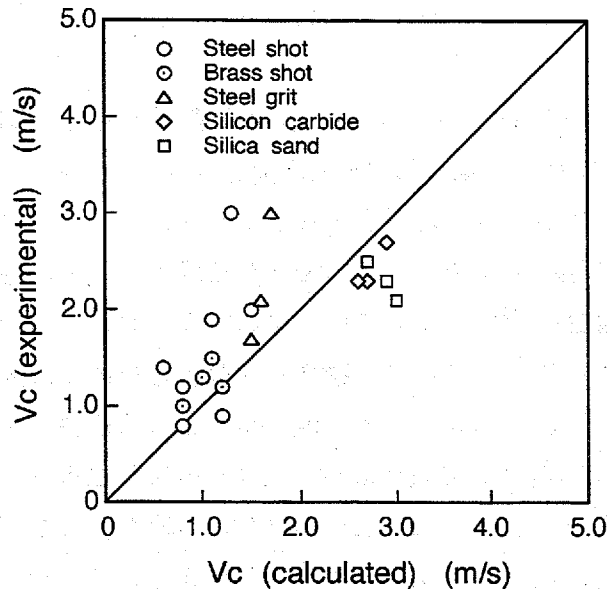


Fig. 6.22 Comparison between theoretical and experimental critical impact velocity under various impact conditions.

最後に、第5章で述べた石こうスラリーによる高クロム鋼の損傷について理論式から臨界衝突速度を計算したところ、17 m/s になった。ポンプのインペラーの平均周速度は約 18 m/s であるが、液との相対速度はこれよりかなり低いものと思われる。すなわち、この損傷は臨界衝突速度以下で生じていたことが十分推測できる。従って、耐エロージョン性の順位が同じになったことが、本章で導出した臨界衝突速度の理論式を用いて、十分に説明できる。

6.9 セラミック材料の臨界衝突速度

導出された理論式を用いてセラミック材料の臨界衝突速度について検討した。第3章で述べたようにアルミナにおける損傷は粒子衝突速度が 120 m/s 程度においても損傷の衝突角度依存性が変化しない。従って、アルミナの臨界衝突速度が存在するなら、その値は 120 m/s 以上であると推測される。試しに、この試験条件でのアルミナの臨界衝突速度の計算を行った。理論式に代入したアルミナおよび衝突粒子の物性値を Table 6.10 に示す。

Table 6.10 Properties of ceramic material and particle.

Particle							Target specimen			
Material	Mean diameter D_p (mm)	Mass m (mg)	Density ρ_p (kg/m ³)	Vickers hardness Hv_p (GPa)	Elastic modulus E_p (GPa)	Poisson's ratio ν_p (-)	Material	Vickers hardness Hv_s (GPa)	Elastic modulus E_s (GPa)	Poisson's ratio ν_s (-)
Silica sand	0.34	0.019	2650	35.3	200	0.24	Al ₂ O ₃	15.0	380	0.26

摩擦係数 μ および粒子の形状係数 K , ψ については測定を行った。摩擦係数 μ は衝突粒子とアルミナ試片の動摩擦係数を測定した。粒子の形状係数 K , ψ については金属材料と同様な測定を行った。測定した物性値とこれらの物性値から計算した臨界衝突速度を Table 6.11 に示す。なお、臨界衝突速度の理論式の比例定数 k_1 には、金属材料と同じ値である 10 を代入した。

Table 6.11 Critical impact velocity for alumina.

Particle		Target specimen	Properties				Calculated
Material	Mean diameter D_p (mm)		μ (-)	ke (-)	K (-)	ψ (deg)	V_c (m/s)
Silica sand	0.34	Al ₂ O ₃	0.13	2.95	0.38	74	141

アルミナの臨界衝突速度を計算した結果、臨界衝突速度は 141 m/s となった。この結果はセラミック材料に臨界衝突速度が存在し、その値が 120 m/s 以上であることと矛盾しない。

6.10 高分子材料の臨界衝突速度

セラミック材料と同様に高分子材料においても臨界衝突速度について検討した。第4章においてポリエチレン (HDPE) の損傷は、粒子衝突条件によって大きく変化し、粒子の衝突速度が上昇するにつれて損傷がピークを示す角度は低角度側に移動することが分かった。また、ポリ塩化ビニル (PVC) において Fig. 6.23 に示すように粒子衝突速度が 20 m/s から 40 m/s までは、速度の上昇とともに低角度側の損傷の割合が増加している。さらに 50 m/s になると、高角度側にも損

傷のピークが現れる。また、粒子の衝突速度が 20 m/s では低角度側の損傷のピークが若干高角度側に移動している。

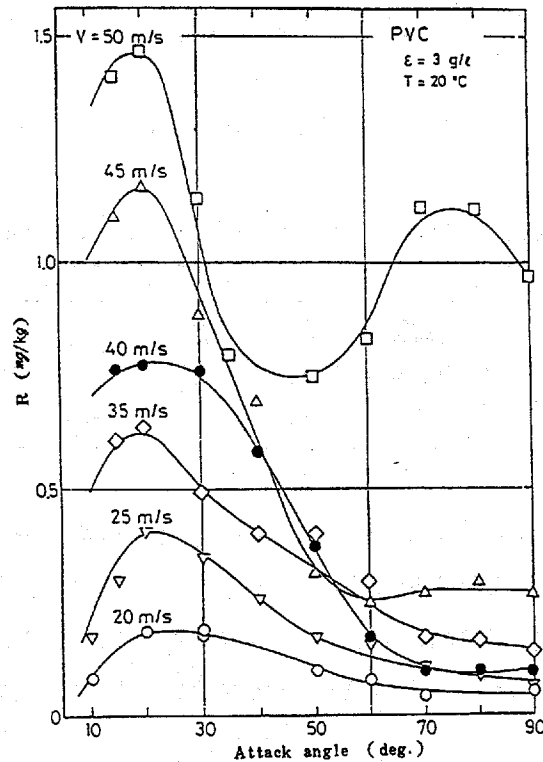


Fig. 6.23 Erosion rate of polyvinyl chloride (PVC) under various impact velocities.

さらに、粒子衝突速度が 2 m/s であるすき間噴流法試験装置においては損傷のピーク角度は 70° となった (Fig. 6.24)。

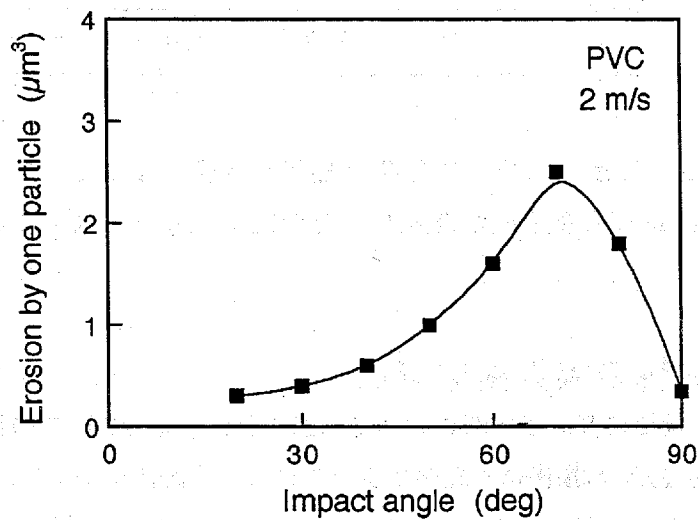


Fig. 6.24 Erosion by one particle at the standard impact condition (impact velocity, 2.0 m/s; particle diameter, $250 \mu\text{m}$) for polyvinyl chloride (PVC).

この結果と Fig. 6.23 の 20 m/s での損傷が高角度側に移動していることから考えると、ポリ塩化ビニルの場合もポリエチレンの場合と同様に低衝突速度において損傷のピーク角度が高角度側へ移動するものと考えられる。

このように2種の高分子材料における粒子衝突速度の影響を比較した結果、高密度ポリエチレン（HDPE）では粒子衝突速度が 2 m/s では低角度側の損傷が生じていない。また、ポリ塩化ビニル（PVC）では 2 m/s でわずかに低角度損傷が生じており、臨界衝突速度は 2 m/s 以下であると推測される。そこで、これらの高分子材料について臨界衝突速度の計算を行った。理論式に代入した材料および粒子の物性値を Table 6.12 に示す。

Table 6.12 Properties of polymer and particle.

Material	Particle						Target specimen			
	Mean diameter	Mass	Density	Vickers hardness	Elastic modulus	Poisson's ratio	Material	Vickers hardness	Elastic modulus	Poisson's ratio
	D_p (mm)	m (mg)	ρ_p (kg/m ³)	Hv_p (GPa)	E_p (GPa)	ν_p (-)				
Silica sand	0.34	0.019	2650	35.3	200	0.24	HDPE	0.064	0.28	0.40
							PVC	0.083	0.86	0.35

摩擦係数 μ および粒子の形状係数 K , ψ については金属材料の場合と同様な測定を行った。衝突粒子とターゲット材料との間の反発係数の係数 ke は衝突粒子と同じ組成を持つガラス球 (ϕ 3) をアルミナ試片に衝突させて測定した。測定された物性値とこれらの物性値から計算した臨界衝突速度を Table 6.13 に示す。なお、臨界衝突速度の理論式の比例定数 k_l には、計算値が実測値にフィッティングするよう 1.5 を代入した。

Table 6.13 Critical impact velocity for polymer.

Particle		Target specimen	Properties				Calculated
Material	Mean diameter D_p (mm)		μ (-)	ke (-)	K (-)	ψ (deg)	V_c (m/s)
Silica sand	0.34	HDPE	0.16	0.628	0.38	74	2.1
		PVC	0.065	0.787	0.38	74	0.6

高密度ポリエチレン（HDPE）では臨界衝突速度が 2.1 m/s、ポリ塩化ビニルでは 0.6 m/s となり、先の試験結果から推測した値と矛盾しない。

6.11 臨界衝突速度の意義

これまで、金属材料における損傷機構を判定するための指標として臨界衝突速度を実験的、理論的に求め、その結果をセラミック材料および高分子材料に適用したところ、臨界衝突速度はそれらの損傷を矛盾なく説明できた。ここで、再度諸材料の耐エロージョン性と臨界衝突速度との関係について整理する。諸材料の損傷に対する臨界衝突速度の定義をFig. 6.25に示す。諸材料の損傷における臨界衝突速度については、臨界衝突速度以下では塑性変形損傷あるいはクラックによる損傷が生じていおり、切削損傷が生じていないため、高角度損傷が支配的となる。一方、臨界衝突速度以上では塑性変形損傷あるいはクラックによる損傷に加えて切削損傷が生じるので、次第に低角度損傷が支配的となる。この速度が諸材料の臨界衝突速度である。

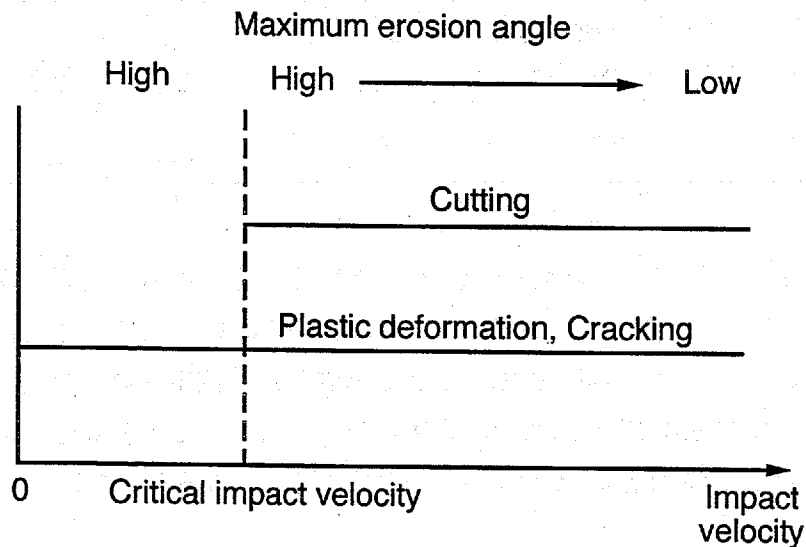


Fig. 6.25 Definition of the critical impact velocity.

まず、高角度損傷が支配的である場合は既往の研究および本実験から考えると、ほとんどの材料でほぼ同様な損傷の曲線を示す。これは、損傷の予測が比較的容易であることを示している。一方、低角度損傷が支配的である、既往の研究および本実験から考えると、損傷がピークとなる角度が材料によって異なることから類似した損傷の曲線を示すことはほとんどない。これは、高角度損傷とは反対に損傷の予測が困難であることを示している。従って、低角度損傷の支配的である条件での損傷を予測することは現時点でほとんど不可能であると言っても過言でない。

本論文で提案する諸材料の耐エロージョン性の評価法は第7章で詳しく述べるが、その方法とは高角度損傷が支配的となる損傷の条件を見いだして、その場合の損傷を推測する方法である。臨界衝突速度はこの条件を見いだすための指標となる。

6.12 結言

本章では諸材料における損傷の衝突角度依存性を検討して、その損傷を比較的容易に推定できる条件を調べた。その条件を求めるための指標となる臨界衝突速度を粒子衝突時の摩擦係数から測定する方法を述べ、その理論式的な解析を行った。さらに、セラミック材料と高分子材料の臨界衝突速度についても検討した。最後に諸材料の耐エロージョン性の評価における臨界衝突速度の意義を述べた。以下に得られた結果を示す。

- (1) 諸材料における損傷の衝突角度依存性と材料物性と粒子の衝突速度の影響を調べた結果、セラミック材料、高分子材料および金属材料における損傷の衝突角度依存性については硬度が高い場合、粒子の衝突速度が低い場合（2 m/s）、高角度側の損傷が支配的となり、この条件での損傷は比較的、損傷の推定が容易であることが分かった。
- (2) 新たに考案した試片回転式摩擦係数測定装置を用いて臨界衝突速度を実験的に測定した後に臨界衝突速度の理論式を導出し、以下の結果が得られた。
 - ① 試片回転型摩擦係数測定装置を用いて粒子衝突時の摩擦係数を測定する方法および測定された摩擦係数から臨界衝突速度を決定する方法を確立した。
 - ② 臨界衝突速度は粒子、試片の物性によって変化する。
 - ③ 臨界衝突速度の理論式を粒子衝突挙動から導出し、実測値と一致することが確認された。
 - ④ 導出された理論式はセラミック材料および高分子材料の臨界衝突速度を矛盾なく説明できた。
- (3) 諸材料の損傷を比較的容易に推定できるのは高角度損傷が支配的である場合であり、臨界衝突速度を用いればその条件を見いだすことができる。

第7章 諸材料の耐エロージョン性評価法

7.1 緒言

本章では諸材料の耐エロージョン性を評価する方法について、実験室での試験結果と現場での成績が一致しない理由を粒子の衝突条件と損傷の衝突角度依存性の関係から論じる。さらに、損傷の衝突角度依存性を判定する指標である臨界衝突速度を用いて2種の材料間での耐エロージョン性の優劣を評価する方法について提案する。

7.2 実験室と現場での粒子衝突条件の比較における問題点

ある材料を現場に用いたときの耐エロージョン性の予測は実験室での試験結果を基に行うが、実験室での条件と現場での条件が異なるため、耐久性の定性的順位でさえ合わないと言われていることは第1章で述べたとおりである。この問題について最近、Stackらはあらゆる試験条件でエロージョン試験を行い、粒子の衝突速度および粒子径の影響を調べ、エロージョンマップを作成したと称しているが衝突角度 90° のみでしか試験が行っておらず、そのため衝突速度を上げると損傷速度が低下するという非常識な結果を得ており¹⁾、未だ固体粒子衝突エロージョンにおいて最も重要な衝突角度依存性についての検討が十分なされていないのが現状である。

また、実験室での試験結果と実機での成績が一致するかどうかは、腐食の分野では寿命予測を行う場合、腐食形態、すなわち腐食機構を変化させないように注意して、種々の条件（応力、材料因子、環境因子）を変化させた加速試験が行われたかどうかで判断されると述べられているが²⁾、その根拠は不明確な場合が多い。

これらのことを踏まえて、2種の材料の優劣について実験室での試験結果と現場での成績が一致しない理由を被衝突材条件、粒子条件、衝突条件の場合に分けて考えてみると、以下のようなになる。

被衝突材条件：比較する材料は実験室と現場で同一である。

粒子条件：衝突粒子は実験室と現場で同じにすることができる。

衝突条件：加速試験を行うため、条件を変更せざるを得ない。

これらの中で問題となるのは、やはり衝突条件であることが分かる。この衝突条件についてさらに分けて考えると、以下のようなになる。

衝突角度	実験室での衝突角度は管理して試験しているものもあれば、全く管理していない試験もある。現場においては、配管に限っても、直管部では低角度で粒子が衝突しているが、曲がり管では高角度で衝突する。従って、条件を一致させるというよりも全衝突角度での損傷を把握する必要がある。
衝突速度	実験室での衝突速度と現場での衝突速度は同じにできる場合もあるが、実際は加速実験のため、現場よりも高い衝突速度で行うことが多い。

このように実験室での試験結果と現場での成績が一致しない理由は、粒子の衝突条件の中でも特に衝突角度および衝突速度の不一致によるものが多く、そのため損傷の逆転が生じるものと考えられる。次に粒子の衝突角度および衝突速度が変化した場合の損傷の逆転現象について第3, 4, 5章で得られたデータを用いて考察する。

7.3 耐エロージョン性評価における問題点

7.3.1 衝突角度の違いによる損傷の逆転現象

2種の材料について実験室での試験結果と現場での成績が一致しない、すなわち耐エロージョン性の優劣の順位が逆転する現象について述べる。ここでは、第3章で得られた損傷の衝突角度依存性が異なる2種の材料を比較する。Fig. 7.1にクロミアコーティング材(A)とステンレス鋼(SUS329J1)における基準粒子1個当たりの損傷量と衝突角度との関係を示す。

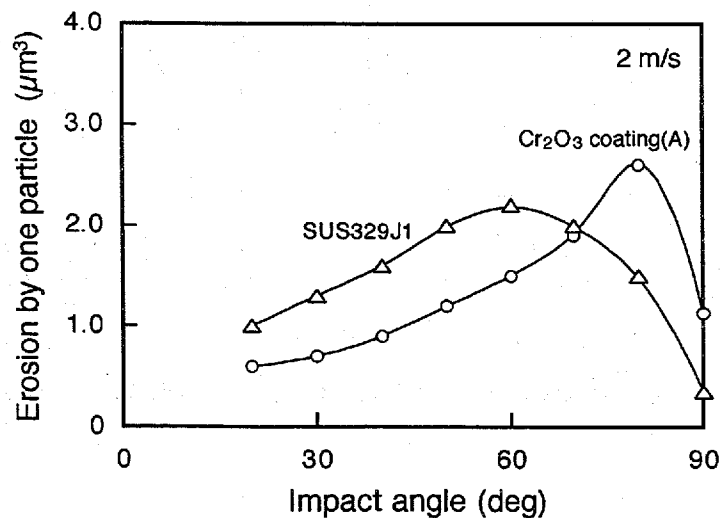


Fig. 7.1 Relationship between erosion by one particle and impact angle for ceramic coating material (A) and stainless steel.

この2種の材料を現場に適用するための実験室における試験を考える。粒子の衝突条件として、もし実験室での粒子の衝突角度と現場での粒子の衝突角度について十分考慮されておらず、実験室においては試験の容易さから粒子を試験片に対してほぼ垂直に衝突させたのに対して、実際の現場では配管の直管部において低い衝突角度でエロージョンが生じていたとしよう。この場合、実験室での結果は Fig. 7.1 において $70\sim 90^\circ$ での試験結果となるので、クロミアコーティング材 (A) の方が耐エロージョン性に優れていると評価される。しかし、現場においては低い衝突角度 $20\sim 40^\circ$ での成績となるので、ステンレス鋼の方が優れているという結果となり、実験室での試験結果と現場での成績は一致しない。これは優劣の比較を行った2種の材料における損傷のピーク角度が異なっているからである。このことより、損傷の衝突角度依存性の異なる材料の耐エロージョン性を評価する際には、実験室と現場での粒子の衝突角度を必ず一致させる必要がある。

7.3.2 衝突速度の違いによる損傷の逆転現象

次に衝突速度が異なった場合の2種の材料の耐エロージョン性の優劣の順位が逆転する現象について述べる。ここでは、第4,5章で得られた損傷の結果を用いて考察する。Fig. 7.2 に高密度ポリエチレン (HDPE) と鋼管材 (SGP) において低い速度 (2 m/s) で粒子を衝突させた場合と高い速度 (120 m/s) で衝突させた場合の損傷と衝突角度との関係を示す。

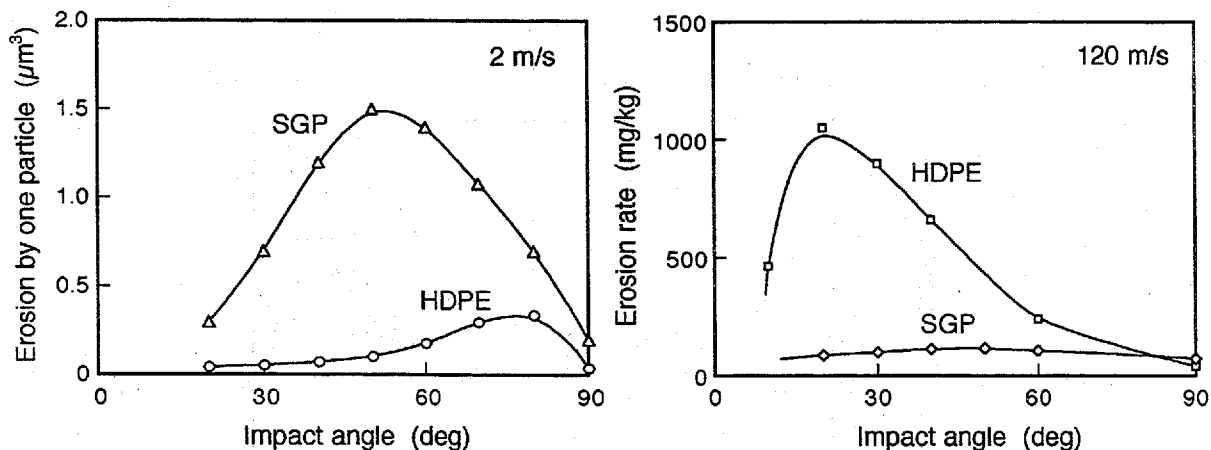


Fig. 7.2 Relationship between erosion and impact angle at various impact velocities for HDPE and SGP.

これら2種の材料を現場に適用するために実験室で加速試験を行った場合を考える。前項の結果から実験室と現場での粒子の衝突角度については十分考慮されており、実験室、現場ともに低角度衝突 (例えば、 $20\sim 40^\circ$) であったとしよう。しかし、現場での粒子の衝突速度が低く (Fig. 7.2 左図に相当)、損傷が非常に少ない場合は、実験室において加速試験を行わざるを得なく、高い速度 (Fig. 7.2 右図に相当) で粒子を衝突させて試験を行ったとしよう。この場合、実験室における試験結果から、鋼管材の方が優れているということ

となる。しかし、現場の条件（低衝突速度）では高密度ポリエチレンの方が優れているという全く逆の結果となる。この原因は明らかにポリエチレンに粒子を高い速度で衝突させたときは損傷のピーク角度が低角度側に移動していることから分かるように低角度側の損傷が大きくなったためである。しかし、高い衝突角度における損傷を比較した場合はどうであろう。実験室と現場での粒子の衝突角度が 90° の場合には、低速度、高速度の場合ともにポリエチレンが優れているという結果となり、優劣の逆転は生じない。これは、粒子が高い角度で衝突する場合には、切削による損傷が少ないためであると考えられ、衝突角度 70° 程度までであれば、生じたとしてもその差は低角度での損傷における差と比べて比較的小さい。

これらのことより、材料の耐エロージョン性を評価する際には実験室と現場での粒子の衝突角度のみならず、衝突速度が一致している必要がある。しかし、実験室と現場での衝突角度が高角度である場合には損傷の逆転現象は生じにくく、生じたとしてもその差は比較的小さいと考えられる。

7.4 臨界衝突速度以下での損傷

2種の材料間の耐エロージョン性の優劣の評価において、それぞれの材料において損傷のピーク角度が異なったり、衝突速度の影響によって損傷のピーク角度する場合には損傷の逆転現象が生じやすいことが分かった。ここで、高角度損傷と低角度損傷が支配的な材料における損傷の衝突角度依存性を考えると、高角度損傷の大きい材料においてはほとんど全ての材料でほぼ同様な損傷の衝突角度依存性を示す。これは、損傷の予測が比較的容易であることを示している。一方、低角度損傷が大きい材料においては損傷のピーク角度は材料によって異なっていて、例えば硬度の異なる材料では損傷の衝突角度依存性の形状が大きく異なる場合が多い。これは、高角度損傷とは反対に損傷の予測が困難であることを示している。従って、低角度損傷の大きい条件での損傷を予測することはほとんど不可能であると言える。これは第6章で既に述べたとおりである。

以上のことを踏まえると、より現実的な2種の材料間の耐エロージョン性の優劣を評価する方法は高角度損傷が支配的である場合に限って行うことである。材料および粒子衝突条件等が変化しても、高角度損傷が支配的な粒子衝突条件内であれば材料相互の優劣の判断は比較的容易であると考えられる。その条件を見いだすための指標が第6章で述べた臨界衝突速度である。Fig. 7.3に臨界衝突速度以下で生じた損傷の例として、3種のセラミックコーティング材料およびセラミックバルク材における基準粒子1個当たりの損傷量と衝突角度との関係を示す。

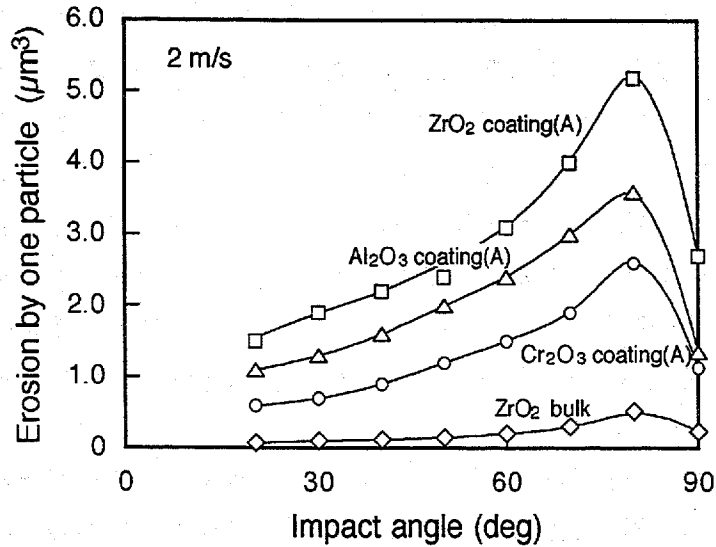


Fig. 7.3 Relationship between erosion by one particle and impact angle for ceramic coating materials and ceramic bulk materials.

セラミック材料では低い粒子衝突速度において切削による損傷がない、すなわち粒子の衝突条件が臨界衝突速度以下であるため高角度損傷が支配的となり、損傷の衝突角度依存性は材料の物性が変わっても変化は小さい。さらに、第3章の既往の研究で述べたように高い粒子衝突速度においてもその損傷の衝突角度依存性はほとんど変化しないと考えられるので、この種の材料においては、少しばかり異なる条件で試験を行った結果を現場に適用しても材料の優劣が逆転することはない、仮にあったとしてもその差はかなり小さいと考えられる。

これらのことより、比較する材料における粒子の衝突条件が臨界衝突速度以下であれば、現場における材料の耐エロージョン性の優劣は実験室で得られた優劣と一致すると予測されるので、材料の選定も容易であり、ある材料における寿命が既に分かっている場合には、材料間の損傷データの比較から新たに適用しようとする材料の寿命を知ることができる。

7.5 耐エロージョン性の評価の方法

これまでの結果から、2種の材料間での耐エロージョン性の優劣を評価を行う際の粒子の衝突条件については以下のように整理できる。

- (1) 実験室と現場における粒子の衝突角度は一致している必要がある。
- (2) 実験室と現場における粒子の衝突速度は一致している必要がある。しかし、現場での衝突角度が高い角度である場合には必ずしも一致している必要はない。
- (3) 実験室と現場における粒子の衝突条件が臨界衝突速度以下であれば、損傷の逆転現象は生じにくく、生じたとしてもその差は小さい。

一方、実験室で切削損傷のなくなる試験方法を考えると、以下のようなになる。

- (1) 臨界衝突速度以下の条件であれば、粒子の衝突角度はどのような条件でもよい。
- (2) 粒子の衝突角度が 70° 以上の高角度であれば、粒子は滑りにくく、切削損傷は生じにくいので高い衝突速度で試験できる。

この2つの条件を比較すると、実験室での試験は加速試験を行いたいので、(2)の高角度衝突による試験が適していると考えられる。これらのことを2種の材料間の諸材料の耐エロージョン性の優劣の評価に利用する場合には、以下のように行うべきであると考えられる。

- (1) まず、実機での粒子の衝突条件が十分に分かっているなければならない。
- (2) 現場での粒子の衝突条件が臨界衝突速度以下であれば、実験室の加速試験装置で 70° 以上の高角度で試験を行う。
- (3) 現場での粒子の衝突条件が臨界衝突速度以上であっても、粒子の衝突角度が 70° 以上の高角度であれば、この場合も実験室の加速試験装置で 70° 以上の高角度で試験を行う。
- (4) 現場での粒子の衝突条件が臨界衝突速度以上であって、粒子の衝突角度が低角度である場合には、損傷の予測は困難であるので、全く同一の条件で試験を行うより他に方法がない。

この耐エロージョン性評価法を工学的に適用する場合のフローチャートを Fig. 7.4 に示す。

耐エロージョン性の評価法

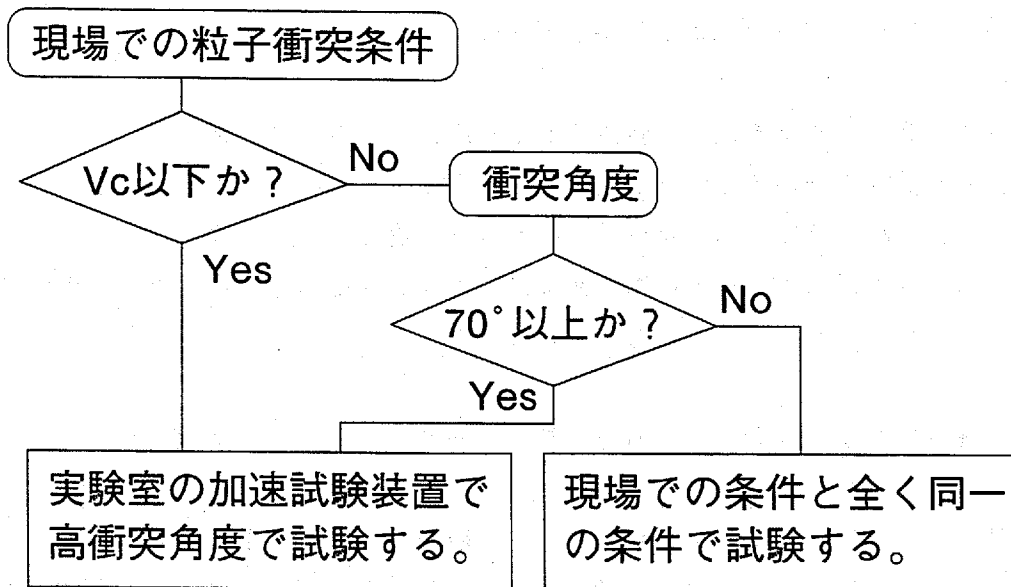


Fig. 7.4 Flow chart for estimation of anti-erosion property of materials.

- (1) まず、現場で使用されている粒子および比較する2種の材料物性から臨界衝突条件を求める。
- (2) 現場での粒子の衝突速度が2種の材料とも臨界衝突速度以下であるか判定する。
- (3) 2種の材料とも臨界衝突速度以下であれば、両材料とも高角度側の損傷が支配的であるので実験室の加速試験装置を用いて70°以上の高い衝突角度で試験を行い、材料の優劣の評価を行う。2種の材料の内、1つの材料の現場における寿命が既に分かっている場合には、材料間の損傷データの比較から新たに適用しようとする材料の寿命を知ることができる。
- (4) 1つの材料でも臨界衝突速度以上であれば、次に現場での粒子の衝突角度を調べる。
- (5) 現場での粒子の衝突角度が高く、70°以上であれば、この場合も高角度側の損傷が支配的であるので2種の材料について実験室の加速試験装置で、70°以上の高い衝突角度で試験を行い、それらの優劣の比較を行う。この場合も、2種の材料の内、1つの材料の現場における寿命が既に分かっている場合には、材料間の損傷データの比較から新たに適用しようとする材料の寿命を知ることができる。
- (6) 現場での粒子の衝突角度が低く、70°以下であれば、低角度側の損傷が支配的となり、粒子衝突条件の異なる加速試験結果から損傷の衝突角度依存性を予測することは困難となるので、実験室での粒子の衝突条件（衝突角度、衝突速度）は現場での衝突条件と全く同一にして試験を行い、2種の材料間の優劣を比較せざるを得ない。

7.6 耐エロージョン性評価法の精度

前節では2種の材料間における耐エロージョン性の優劣の比較の手順を述べた。この方法に従うと、条件によっては材料間の定性的な比較はもとより、定量的な寿命予測が可能な場合もあることが分かった。ここでは、この手順で求められる材料間の優劣の比較の精度を損傷量のばらつき、損傷の衝突角度依存性のばらつきおよび臨界衝突速度の計算誤差から検討し、提案した耐エロージョン性評価法の精度について検討する。

(1) 損傷量のばらつき

従来の損傷量を比較すると、100%、200%のばらつきは当たり前と言われてきたが、試験装置内の粒子衝突条件と粒子の破碎等を管理することで、第2章の Fig. 2.3 から推測されるように損傷量のばらつきは±10%以内にはできるものと考えられる。

(2) 損傷の衝突角度依存性のばらつき

本評価法では高角度損傷が支配的な場合について限定しているので、その条件における衝突角度依存性のばらつきを考える。第5章で決定した損傷の衝突角度依存性を示すパラメータ ($Erosion(30^\circ) / Erosion(70^\circ)$) を用いると、セラミック材料における衝突角度依存性のばらつきは第3章の Fig. 3.10 から推測されるように±30%以内であると考えられる。高分子材料においても同様に第4章の Fig. 4.11 (衝突速度が低く硬度が約0.05GPa以上の場合) から推測されるように±30%以内であると考えられる。しかし、セラミック材料と高分子材料においてはパラメータの平均値がそれぞれ0.5、0.2と異なるので、この2種の材料の優劣を比較する場合には注意が必要である。

(3) 臨界衝突速度の計算誤差

臨界衝突速度の計算誤差は、第6章の Fig. 6.22 から推測すると、+50%–30%の範囲にあると考えられる。+50%の範囲は計算値が実測値よりも低く見積もられるので、安全サイドである。–30%の範囲は計算値が実測値よりも高く見積もられ、この誤差が臨界衝突速度の誤差となる。

本評価法を用いる場合には、これらのばらつきおよび誤差を考慮に入れる必要がある。なお、本評価法は1つの材料についてその材料が現場に用いられた場合に寿命がどの程度であるのかを予測する方法ではなく、2種の材料間における優劣を比較して、耐エロージョン性が何倍優れているかという相対評価を行う際に有効な方法である。

7.7 結言

本章では諸材料の2種の材料間における耐エロージョン性の優劣を評価する方法において実験室での試験結果と現場での成績が一致しない理由を粒子の衝突条件と損傷の衝突角度依存性から論じ、損傷の衝突角度依存性を判定する指標として臨界衝突速度を用いた諸材料の耐エロージョン性の評価法を提案した。以下に得られた結果を述べる。

- (1) 2種の材料における耐エロージョン性の優劣を評価する際の粒子衝突条件および損傷の衝突角度依存性の関係は以下のとおりである。
 - ① 実験室での試験結果と現場で成績が一致しない理由は粒子の諸突角度および衝突速度が一致していないからであると考えられる。
 - ② 低角度側の損傷が支配的な材料が比較材料にある場合には耐エロージョン性の優劣が条件によって逆転する場合があるので、優劣の評価が困難である。
 - ③ 粒子の衝突条件が臨界衝突速度以下であれば、高角度側の損傷が支配的となり、損傷の衝突角度依存性が同様な曲線となるので、耐エロージョン性の優劣の評価において、損傷の逆転が生じにくく、たとえ生じたとしてもその差は小さい。
- (2) 臨界衝突速度を利用し、損傷の衝突角度依存性を判定し、2種の材料間の耐エロージョン性の優劣を評価する手順を提案した。この手順に従えば、臨界衝突速度以下あるいは切削損傷の生じにくい 70° 以上の高衝突角度の条件においては、材料間の定性的な優劣の比較はもとより、1つの材料について現場での寿命が既に分かっているならば、材料間の損傷の比較から定量的な寿命予測が可能である。

第8章 総括

前章までに得られた結果を総括すると次のようになる。

第1章では固体粒子衝突エロージョンに関する既往の研究によって今まで明らかにされた金属材料、セラミック材料および高分子材料における基礎的な損傷機構およびエロージョンに及ぼす種々の因子の影響について述べた。それらの研究における最大の問題点は実験室で得られた試験結果を実際の装置構成材料に適用しようとしたときに、2種の材料間における耐エロージョン性の優劣でさえ一致することがほとんどないこと、それ以前に再現性のあるデータを得ることすら困難なことである。この原因は材料が受ける損傷の機構および大きさが粒子の衝突条件（衝突速度、衝突角度など）、粒子の性状およびターゲット材料の物性に大きく依存するからである。エロージョン研究においては、再現性の観点からもまず試験装置内の粒子の衝突条件を把握することが必要となる。これらのことから固体粒子衝突エロージョンにおいて現場での成績を予測するための実験室での加速試験法は未だ確立されていない。よって本研究の目的は、従来から多くの工業分野で用いられている金属材料、セラミック材料、高分子材料を現場に適用するに当たってその成績を予測するために実験室での加速試験をどのように行うべきかを考察し、それら材料の耐エロージョン性の評価法を確立することとした。

第2章では固体粒子衝突エロージョン試験に用いるすき間噴流法試験装置について試片表面に衝突する粒子の衝突頻度、衝突速度、衝突角度を数値解析から算出し、その結果と衝突痕の観察から、装置内の粒子衝突条件について把握したところ、一つの試片表面に粒子があらゆる角度で衝突していることを明らかにした。この短所を逆に利用して、一つの試片から衝突角度の影響を迅速に測定する方法を示した。次に、2種の噴流型試験装置（ブロー型、コンプレッサー型）については、粒子の衝突速度の変動範囲を示し、加速管出口での噴流の広がりを検討して粒子の衝突条件を明らかにし、これらの試験装置では要求される精度内で設定した角度と速度で粒子が衝突していることを示した。

第3章ではまず既往の研究からセラミック材料の損傷では高角度側の損傷が支配的であり、粒子の衝突速度が変化しても損傷の衝突角度依存性が変化しないことを示した。次に、セラミックバルク材の短所である加工性を改善した減圧プラズマ溶射法によるセラミックコーティング材料の耐エロージョン性をセラミックバルク材および金属材料のそれと比較した。その結果、セラミックコーティング材料の損傷特性についてはセラミックバルク材と同様に高角度側の損傷が支配的であり、金属材料に現れる低角度側の損傷は生じておらず、金属基材に比べて低角度における損傷に対して優れていることが分かった。材料物性

との相関ではセラミック材料の損傷は材料の硬さと良い相関があったが、その耐エロージョン性は同程度の硬さのバルク材より劣っており、溶射条件の改善が望まれる。セラミック材料の耐エロージョン性の予測に関しては、セラミック材料では高角度側の損傷が支配的であり、材料の硬さおよび粒子の衝突条件が変化しても損傷の衝突角度依存性は変化しないため、これら材料間の優劣の判断は比較的容易であると考えられる。

第4章では既往の研究から、高分子材料の損傷の衝突角度依存性が粒子の衝突速度によって大きく変化することを示した。次に、高分子材料の内、最近現場での溶接技術の発達によって下水道管材料への適用が可能となり構造材料として有望なポリエチレンのエロージョン挙動を調べたところ、衝突速度が高くなるにつれて最大損傷を示す衝突角度が低衝突角度側に移動することが分かった。材料物性との相関については、低衝突速度下でのポリエチレンの損傷量は破壊エネルギーと弾性係数から成るパラメータとの間に良い相関があった。高分子材料のエロージョン挙動の予測において、高分子材料の損傷の衝突角度依存性は、材料の硬さがより低く、衝突速度がより高くなるにつれて低角度側の損傷の割合が増加して損傷の衝突角度依存性が大きく変わるため、高分子材料の耐エロージョン性の優劣の判断は難しいことを述べた。

第5章では既往の研究から金属材料については切削損傷と塑性変形損傷の2種の損傷が同時に生じ、粒子の衝突角度、衝突速度によってそれらの占める割合が変化することを示した。また、粒子の衝突速度が低くなると、低角度損傷である切削損傷がなくなり、高角度損傷である塑性変形損傷だけになる臨界衝突速度を説明した。次に、硬さの異なる金属材料についてエロージョン試験を行い、低角度損傷と高角度損傷の割合を調べた。その結果、材料の硬さが低く、粒子の衝突速度が高い場合、低角度側の損傷の割合が増加することが分かった。金属材料の耐エロージョン性の予測に関しては、金属材料の損傷は材料の硬さ、粒子の衝突速度が変化すると、損傷の衝突角度依存性も大きく変わるため、その耐エロージョン性の優劣の判断は難しいと考えられる。しかし、低衝突角度側の損傷が増加し始める粒子の衝突条件があらかじめ分かれば、誤診を防ぐことができることを示した。

第6章では第3, 4, 5章で得られたセラミック材料、高分子材料および金属材料における損傷の衝突角度依存性について、ある硬さ以上では高角度損傷が支配的であるが、ある硬さ以下では低角度側の損傷が大きくなることを示した。また、一般に衝突速度の高くなるにつれて低角度側の損傷の占める割合が大きくなるが、この挙動は高分子材料において顕著に現れることが分かった。この低角度損傷の出現する粒子衝突速度が臨界衝突速度であり、この速度は諸材料の耐エロージョン性を評価する際の重要な指標となることを示した。次に、金属材料について新たに開発した試片回転型摩擦係数測定装置を用いて粒子衝突時の粒子-試片間の摩擦係数から臨界衝突速度を決定する方法を確立した。また、臨界衝突速度は粒子、試片の物性によっても変化することが分かった。さらに、粒子衝突時の材料の変形挙動から臨界衝突速度の理論式を導出し、実測値と一致することを確認した。さらに、導出された理論式を用いてセラミック材料および高分子材料の臨界衝突速度の計算を

行ったところ、これらの材料における損傷の衝突角度依存性を矛盾なく説明することができた。最後に、諸材料の耐エロージョン性評価における臨界衝突速度の意義を述べた。

第7章では諸材料において実験室での試験結果と現場での成績が一致しない原因を2種の材料における損傷の逆転現象から実験室での加速試験に要求される項目について整理し、粒子の衝突角度、衝突速度の重要性について述べた。実験室での試験結果と現場での成績が一致させるためには、まず実験室と現場での粒子の衝突角度、衝突速度が一致している必要がある。その中で、粒子の衝突角度が高角度である場合には損傷の逆転現象は生じないことを明らかにした。また、低角度衝突であっても、粒子の衝突条件が臨界衝突速度以下であれば、材料の優劣は変わらないことを明らかにした。この結果から、損傷の衝突角度依存性を判定する臨界衝突速度を用いた諸材料の耐エロージョン性の評価法を提案した。

以上、本論文の結論は以下のとおりである。

- (1) 金属材料、セラミック材料、高分子材料だけでなく、最近注目されているセラミックコーティング材料およびポリエチレン下水道管について、それらの損傷の衝突角度依存性を材料物性および粒子の衝突速度が変化した場合にどのように変化するかを調べた。その結果、材料の硬度が低くなるにつれて低角度側の損傷が大きくなることを示した。また、粒子衝突速度の上昇につれて低角度側の損傷が大きくなり、その割合は高分子材料において特に顕著に現れることが分かった。この損傷の衝突角度依存性の判定することが諸材料の耐エロージョン性判定において必要不可欠である。
- (2) 損傷の衝突角度依存性には低角度側の損傷の有無しが深く関係している。その有無は低角度側の損傷がなくなり、高角度側の損傷のみとなる臨界衝突速度によって判定することができる。そこで、試片回転型摩擦係数測定装置を新たに開発し、金属材料について粒子衝突時の粒子-試片間の摩擦係数の測定から臨界衝突速度を決定する方法を確立した。さらに、粒子衝突時の材料挙動から臨界衝突速度の理論式を導出し、実測値と一致することを確認した。この理論式はセラミック材料および高分子材料における損傷の衝突角度依存性を矛盾なく説明できる。
- (3) 臨界衝突速度を用いて、損傷の衝突角度依存性を判定し、諸材料における耐固体粒子衝突エロージョン性を評価する手順を提案した。この手順に従えば、条件によっては材料間の定性的な比較はもとより、定量的な寿命予測が可能となる。

謝 辞

本研究を行うにあたり，終始変わらぬ熱意を持たれ御指導下さいました松村昌信先生に深く感謝の意を表します。

論文の作成に際しまして御指導下さいました吉田英人先生，迫原修治先生，中佐啓治郎先生，磯本良則先生に深く感謝の意を表します。

本研究に御協力下さいました趙 翰燮先生，試験装置および試片を製作して下さいました小林康男助手，実験に御協力下さいました化学工学教室の松村研究室の卒業論文研究生，修士論文研究生の諸君に厚く感謝致します。

本試験において試験材料を提供して頂きました三井金属エンジニアリング株式会社の平嶋雅雄様，津永正行様および超高温材料研究所の山本雅章様，高橋亨様に心から感謝を申し上げます。

なお，本研究の一部は文部省科学研究費補助金基盤研究（研究課題番号07455292）により実施されました。ここに感謝の意を表します。

引用文献

1 章

- 1) I. Finnie: *Wear*, **3**, 87 (1960).
- 2) J. G. A. Bitter: *Wear*, **6**, 5 (1963).
- 3) J. G. A. Bitter: *Wear*, **6**, 169 (1963).
- 4) I. Finnie, D. H. McFadden: *Wear*, **48**, 181 (1978).
- 5) I. Finnie, A. Levy, D. H. McFadden: *ASTM STP 664*, 36 (1979).
- 6) E. R. Marshall, M.C. Shaw: *Trans. ASME*, **74**, 51 (1952).
- 7) I. M. Hutchings, R. E. Winter: *Wear*, **27**, 121 (1974).
- 8) R. E. Winter, I. M. Hutchings: *Wear*, **29**, 181 (1974).
- 9) I. M. Hutchings: *ASTM STP 664*, 59 (1979).
- 10) T. Christman, P. G. Shewmon: *Wear*, **54**, 145 (1979).
- 11) R. Bellman. Jr. and A. V. Levy: *Wear*, **70**, 1 (1981).
- 12) K. G. Budinski, Hong Chin: *ASME*, , 311 (1983).
- 13) R. Brown and J. W. Edington: *Wear*, **71**, 113 (1981).
- 14) S. P. Timothy, I. M. Hutchings: *Proc. 6th Int. Conf. ELSI (Cambridge)*, , 43-1 (1983).
- 15) S. M. Walley, J. E. Field: *Proc. 6th Int. Conf. ELSI (Cambridge)*, , 44-1 (1983).
- 16) D. G. Rickerby, N. H. Macmillan: *Proc. 5th Int. Conf. ELSI, (Cambridge)*, 29-1 (1979).
- 17) M. E. Gulden: *ASTM STP 664*, 101 (1979).
- 18) I. Finnie, Y. H. Kabil: *Wear*, **8**, 60 (1965).
- 19) G. Carter, M. J. Nobes, K. I. Arshak: *Wear*, **65**, 151 (1980).
- 20) I. Finnie: *ASTM STP 307*, 70 (1962).
- 21) A. W. Ruff and S. M. Wiederhorn: "Trealise on Materials Science & Technology", **16**, Erosion (ed. C. M. Preece) p. 69 'Academic Press) (1979).
- 22) 北條英光, 津田 健, カオ・ミン・タイ, 小笠原強: *材料科学*, **20**, 125 (1983).
- 23) W. H. Jennings, W. J. Head and C. R. Manning: *Wear*, **40**, 93 (1970).
- 24) W. J. Head, L. D. Lineback and C. R. Manning: *Wear*, **32**, 291 (1973).
- 25) I. Finnie: *Proc. Corrosion/Erosion of Coal Conversion Systems Materials Conference*, 429 (1979).
- 26) 北條英光, 津田 健, カオ・ミン・タイ: *材料*, **29**, 731 (1980).
- 27) G. P. Tilly, W. Sage: *Wear*, **16**, 447 (1970).
- 28) G. L. Sheldon, I. Finnie: *J. Eng. Ind., Trans. ASME*, **88**, 393 (1966).
- 29) G. L. Sheldon, A. Kanhere: *Wear*, **21**, 195 (1972).

- 30) G. L. Sheldon: *J. Basic Eng., Trans. ASME*, **92**, 619 (1970).
- 31) I. M. Hutchings, R. E. Winter: *J. Physics, Ser. D*, **8**, 8 (1975).
- 32) J. Maji, G. L. Sheldon: *ASTM STP 664*, 136 (1979).
- 33) J. H. Williams. Jr, E. K. Lau: *Wear*, **29**, 219 (1974).
- 34) E. Raask: *Wear*, **13**, 301 (1969).
- 35) I. Kleis: *Wear*, **13**, 199 (1969).
- 36) G. A. Sargent, P. K. Mehrotra, H. Conrad: *ASTM STP 664*, 77 (1979).
- 37) I. Finnie: *Proc. Soc. Experimental Stress Analysis*, **17**, 65 (1960).
- 38) G. P. Tilly: *Wear*, **14**, 241 (1969).
- 39) G. P. Tilly: *Wear*, **23**, 87 (1973).
- 40) W. Weibull: *Ingenior Veterskaps Akademiens Headlings No.*, **151**, 1 (1939).
- 41) G. L. Sheldon, I. Finnie: *J. Eng. Ind., Trans. ASME*, **88**, 387 (1966).
- 42) M. E. Gulden: *Wear*, **69**, 115 (1981).
- 43) D. B. Marshall, A. G. Evans: *Wear*, **71**, 363 (1981).
- 44) 松村昌信, 岡 良則, 畑中宏計, 山脇正昭: *防食技術*, **30**, 574 (1981).
- 45) H. Uuemôis and I. Kleis: *Wear*, **31**, 359 (1975).
- 46) W. Tabakoff, W. Hosny, A. Hamed: *J. Eng. Power, Trans. ASME*, **98**, 47 (1975).
- 47) E. Rabinowics, A. Mutis: *Wear*, **8**, 381 (1965).
- 48) K. Wellinger, H. Uetz, M. Gürleyik: *Wear*, **11**, 173 (1968).
- 49) R. C. D. Richardson: *Wear*, **11**, 245 (1968).
- 50) M. A. Moore: *Wear*, **28**, 59 (1974).
- 51) M. M. Khrushov: *Wear*, **28**, 59 (1974).
- 52) G. Levy, R. G. Linford, L. A. Mitchell: *Wear*, **21**, 167 (1972).
- 53) E. Rabinowicz: *Wear of Materials 1983, ASME*, 12 (1983).
- 54) I. Finnie: *Wear*, **19**, 81 (1972).
- 55) I. Finnie, J. Wolak, Y. Kabil: *J. Mater.*, **2**, 682 (1967).
- 56) G. L. Sheldon: *J. Eng. Mater. Tech., Trans. ASME*, **99**, 133 (1977).
- 57) H. Uetz, J. Föhl: *Wear*, **49**, 253 (1978).
- 58) G. P. Tilly: *Wear*, **14**, 63 (1969).
- 59) E. Kriegel: *Chemie-Ingenieur-Technik*, **40**, 31 (1968).
- 60) W. J. Head, M. E. Harr: *Wear*, **15**, 1 (1970).
- 61) I. M. Hutchings: *Wear*, **70**, 269 (1981).
- 62) Y. I. Oka, M. Matsumura and T. Kawabata: *Wear*, **162-164**, 688 (1993).
- 63) Y. I. Oka, H. Ohnogi, T. Hosokawa and M. Matsumura: *Wear*, **203-204**, 573 (1997).
- 64) S. M. Wiederhorn, E. R. Fuller, J. M. Bukuwski and C. R. Robbin: *Trans. ASME, J. Eng. Mat. & Tech.*, **99**, 143 (1977).

- 65) M. S. Crowley: Am. Ceramic Soc. Bulletin, **48**, 707 (1969).
- 66) J. T. Shapland: Blast Furnace & Steel Plant, **52**, 154 (1964).
- 67) D. R. Reid and E. Ruh: Am. Ceramic Soc. Bulletin, **40**, 452 (1961).
- 68) C. R. Venable: *ibid.*, **38**, 363 (1959).
- 69) W. H. Gitzen, L. D. Hart and G. MacZura: *ibid.*, **35**, 217 (1956).
- 70) J. F. Wygant and W. L. Bulkley: *ibid.*, **33**, 233 (1954).
- 71) C. R. Diamond, J. N. Kirk and J. Briggs: J. of Materials Science, **16**, 1579 (1981).
- 72) H. Brauer and E. Kriegel: Chemie-Ing. Techn., **35**, 697 (1963).
- 73) A. V. Levy: Wear, **117**, 129 (1987).

2 章

- 1) 岡 良則, 松村昌信, 畑中宏計, 山脇正昭: 防食技術, **30**, 547 (1981).
- 2) 香月正司, 中山 顕: “熱流動の数値シミュレーション”, p.55, 森北出版, (1990).
- 3) Z.Tanaka and K.Iiyama: Journal of Chemical Engineering of Japan, **3**, 261 (1970).
- 4) 岡 良則, 香西弘之, 松村昌信: 防食技術, **35**, 320 (1986).
- 5) 岡 良則, 松村昌信, 大佐古正明, 山脇正昭: 防食技術, **33**, 278 (1984).
- 6) 下田 潔, 白丸信彦, 湯川隆男: 材料科学, **22**, 330 (1986).
- 7) A. W. Ruff and L. K. Ives: Wear, **35**, 195 (1975).
- 8) K. Anand: Wear, **118**, 243 (1987).
- 9) P. R. Krishnamoorthy, S. Seetharamu and P. Sampathkumaran: Wear, **165**, 151 (1993).
- 10) P. H. Shipway and I. M. Hutchings: Wear, **174**, 169 (1994).
- 11) Y. I. Oka, H. Ohnogi, T. Hosokawa and M. Matsumura: Wear, **203-204**, 573 (1997).
- 12) 磯本良則, 西村美由喜, 松村昌信: 材料と環境, **48**, 349 (1999).
- 13) Y. I. Oka, M. Matsumura and T. Kawabata: Wear, **162-164**, 688 (1993).
- 14) 西村美由喜: 広島大学修士論文 (1999).

3 章

- 1) 西村美由喜: 広島大学修士論文 (1999).
- 2) 日本溶射協会編: “溶射便覧”, p. 206, 日刊工業新聞社 (1964).
- 3) J. S. Hansen: ASTM STP 664, 148 (1979).
- 4) 植村益次, 河村弘迪, 牧 広, 渡辺 治編: “現代化学 増刊 8 新しい複合材料と先端技術”, p. 23, 東京化学同人 (1986).
- 5) 竹内博光編: “セラミックコーティング”, p.179, 日刊工業新聞社 (1988).
- 6) I. Finnie: ASTM, STP307, 70 (1962).
- 7) G. L. Sheldon: Trans. ASME, Ser. D, J. Basic Eng., **92**, 619 (1970).
- 8) C. R. Diamond, J. N. Kirk and J. Briggs: Proc. Int. Conf. On Wear of Materials (Reston,

Virginia), 333 (1983).

9) I. Finnie, J. Wolak and Y. Kabil: *J. of Materials*, **2**, 682 (1967).

4 章

- 1) 北條英光, 津田 健, カオ・ミン・タイ: *材料*, **29**, 1215 (1980).
- 2) 「エロージョン/コロージョンと利用技術」編集委員会: 「エロージョン/コロージョンと利用技術」, p. 37, (株)アイピーシー (1987).
- 3) H. Hocke and H. N. Wilkinson: *Tribology International*, **11**, 289 (1978).
- 4) 化学工業日報社: “12093 の化学商品”, p. 801 and p.822, 化学工業日報社 (1993).
- 5) 湾岸技術研究所, 鋼材倶楽部: “-共同研究総合報告書- 土砂輸送用パイプの耐摩耗性に関する研究”, 鋼材倶楽部(1986).
- 6) 新保正樹: “高分子工学シリーズ [4] 高分子材料”, p. 37, 日刊工業新聞社 (1975).
- 7) 西村寛之: *化学工学*, **58**, 117 (1994).
- 8) 桜内雄二郎: “新版 プラスチック材料読本”, p. 134, 工業調査会 (1987).
- 9) Y. I. Oka, H. Ohnogi, T. Hosokawa, M. Matsumura: *Wear*, **203-204**, 573 (1997).
- 10) D. Tabor: “The Hardness of Metals”, p. 132, Clarendon Press (1951).
- 11) H. Brauer and E. Kriegel: *Chemie-Ing. Techn.*, **35**, 697 (1963).

5 章

- 1) J. G. A. Bitter: *Wear*, **6**, 5 & 169 (1963).
- 2) Y. I. Oka, M. Matsumura and T. Kawabata: *Wear*, **162-164**, 688 (1993).
- 3) Y. I. Oka, H. Ohnogi, T. Hosokawa and M. Matsumura: *Wear*, **203-204**, 573 (1997).
- 4) M. Matsumura: *Corrosion Reviews*, **12**, 321 (1994).
- 5) Y. Oka, M. Matsumura, M. Yamawaki and M. Sakai: *ASTM STP 946*, 141 (1987).
- 6) 橋本建次: “粉流体による摩耗の対策技術”, p.107, アイピーシー (1977).
- 7) I. Finnie, J. Wolak and Y. Kabil: *J. of Materials*, **2**, 682 (1967).

6 章

- 1) C. A. Coulomb: “Memoires de Mathematique et de Physique de l'Academie Royal de Sciences”, p. 161 (1785).
- 2) F. P. Bowden and P. A. Persson: *Proc. Roy. Soc. A*, **260**, 433 (1960).
- 3) A. D. Salman, A. Verba, Zs. Lukenics and M. Szabo: *Periodica Polytechnica Chem. Eng.*, **35**, 43 (1991).
- 4) K. Wellinger and H. Uetz: *Wear*, **1**, 225 (1957-1958).
- 5) 曾田範宗, 木村好次, 関沢昌美: *日本機械学会論文集*, **37**, 2204 (1971).
- 6) 榎本祐嗣, 三宅正二郎: “薄膜トライボロジー”, p. 3, 東京大学出版会 (1994).

- 7) Raymond M. Brach : *Int. J. Impact Engng*, **7**, 37 (1988).
- 8) D. Tabor : "The Hardness of Metals", p. 132, Clarendon Press (1951).
- 9) 小野浩二, 河村未久, 北野昌則, 島宗 勉: "理論切削工学", p. 217, 現代工学社 (1979).
- 10) H. Hertz : *J. reine und angewandte Math.*, **92**, 156 (1882).
- 11) D. Tabor : "The Hardness of Metals", p. 115, Clarendon Press (1951).
- 12) D. Tabor : "The Hardness of Metals", p. 119, Clarendon Press (1951).
- 13) D. Tabor : *J. Inst. Metals*, **79**, 1 (1951)
- 14) F. P. Bowden, A. J. W. Moore and D. Tabor : *J. Appl. Phys.*, **14**, 80 (1943).
- 15) D. Tabor : "The Hardness of Metals", p. 129, Clarendon Press (1951).

7 章

- 1) M. M. Stack, N. Pungwiwat: *Wear*, **215**, 67 (1998).
- 2) 腐食防食協会編: "装置材料の寿命予測入門 -極値統計の腐食への適用-", p. 59, 丸善 (1979).

公表論文

1. 矢吹彰広, 趙 翰燮, 松村昌信: 「数値解析によるスラリーエロージョン試験装置内の粒子衝突挙動の把握」, 材料と環境, 46, 293 (1997). (第2章)
2. 矢吹彰広, 趙 翰燮, 山本雅章, 松村昌信「減圧プラズマ溶射したセラミックコーティング材料のスラリーエロージョン特性」, 材料と環境, 46, 299 (1997). (第3章)
3. 矢吹彰広, 杉田幸次朗, 松村昌信, 平嶋雅雄, 津永正行: 「ポリエチレンのスラリーエロージョン特性」, 材料と環境, 48, 508 (1999). (第4章)
4. 矢吹彰広, 松脇和雄, 松村昌信: 「金属材料の固体粒子衝突エロージョンにおける臨界衝突速度」, 材料と環境, 47, 540 (1998). (第6章)
5. Akihiro Yabuki, Kazuo Matsuwaki and Masanobu Matsumura : “Critical Impact Velocity in Solid Particles Impact Erosion of Metallic Materials”, 9th International Conference on Erosion by Liquid and Solid Impact ELSI IX (1999) 掲載決定済. (第6章)
6. 矢吹彰広, 松脇和雄, 松村昌信: 「固体粒子衝突エロージョンにおける臨界衝突速度の理論式」, 材料と環境, 47, 631 (1998). (第6章)
7. Akihiro Yabuki and Masanobu Matsumura : “Theoretical Equation of the Critical Impact Velocity in Solid Particles Impact Erosion”, 9th International Conference on Erosion by Liquid and Solid Impact ELSI IX (1999) 掲載決定済. (第6章)

参考論文

1. 松村昌信, 岡良則, 植田雅也, 矢吹彰広: 「キャビテーション攻撃を受ける金属材料の寿命予測」, 防食技術, **39**, 550 (1990).
2. 松村昌信, 矢吹彰広, 讃井昭二: 「工業用純鉄のキャビテーション・エロージョンに及ぼすインヒビターの影響」, 材料と環境, **40**, 814 (1991).
3. 松村昌信, 磯本良則, 矢吹彰広, 讃井昭二: 「引張応力のキャビテーション・エロージョン遅延効果」, 材料と環境, **40**, 821 (1991).
4. M. Matsumura, A. Yabuki and S. Sanui: "Erosion-retarding effect of corrosion inhibitor", IMechE c453/014, 147 (1992).
5. H. Louis, P. T. Tai, T. Wehlage and A. Yabuki: "Evaluation and prediction of surface roughness due to cavitation erosion", STG-Symposium on Propulsors and Cavitation in Hamburg (1992).
6. H. Louis, P. T. Tai, T. Wehlage and A. Yabuki: "Cavitation erosion prediction by quantification of surface integrity", 3rd Int. Conf. on Cavitation in Cambridge (1992).
7. A. Yabuki, K. Noishiki and M. Matsumura: "The application of the mass transfer equation to flow induced localized corrosion", Meeting Abstract 191st Society Meeting (Electrochemical Society), **97**, 263 (1997).
8. 野一色公二, 矢吹彰広, 松村昌信, 高山博和, 宮坂松甫: 「セラミック材料のキャビテーション・エロージョン特性」, 材料と環境, **46**, 588 (1997).
9. 野一色公二, 矢吹彰広, 松村昌信, 長坂浩司, 宮坂松甫: 「セラミック材料の耐キャビテーション・エロージョン特性の改善」, 材料と環境, **46**, 637 (1997).
10. Akihiro Yabuki, Koji Noishiki and Masanobu Matsumura: "Cavitation Erosion Properties of High Strength Ceramics", Wear of Engineering Materials, Conference Proceedings from Materials Solutions '97, **1**, 137 (1998).
11. 平嶋雅雄, 津永正行, 矢吹彰広, 松村昌信: 「下水道用ポリエチレン管の耐摩耗・腐食性」, 下水道協会誌, **35**, 141 (1998).

公開特許

1. 松村昌信，矢吹彰広，平嶋雅雄，津永正行，松並秀一：「耐摩耗性腐食性配管」，平 10-104117，1998.3.31.
2. 松村昌信，矢吹彰広，丸亀和雄：「流路耐食試験方法及びその試験装置」，平 10-237743，1998.8.24.
3. 松村昌信，矢吹彰広，丸亀和雄：「試験片装着制御方法と試験片装着制御機構及びその機構が組み込まれた流路耐食試験装置」，平 10-377208，1998.12.29.