

## インパクト・エロージョンに関する基礎的研究\*

本間寛臣\*\*, 伊藤研志\*\*\*

A Basic Approach to Repeated-Impact Erosion of Ductile Material  
with Solid Particle at Low Velocities

by Hiroomi HOMMA and Kenshi ITOH

The experiments of repeated impacts with steel balls of 20mm in a diameter on the same spot of the plate specimen surface were performed in order to clarify a mechanical parameter taking a dominant part for the erosion damage. The observation of the specimen surface was made every a few cycles to measure the number of impacts when an erosion-lip was removed, that is defined as an erosion life. The measurement of dynamic stress histories near the crater gave the useful information of applied pressure to the crater by the steel ball. The pressure was successfully used to explain the effect of the impact angle on the erosion life observed in the experiments. It was concluded that the pressure is one of the important parameters which dominate the erosion damage.

**Key Words :** Impact-Erosion, Impact Velocity, Impact Angle, Ductile Material, Crater, Erosion Lip

## 1. 緒言

石炭液化・ガス化プラントにおいては微粉炭による輸送配管および減圧弁の、地熱発電および風力発電プラントにおいては砂粒によるタービン翼および風車翼のインパクト・エロージョン破壊が長寿命・高効率プラントの実用化を妨げる一因となっている。しかしながら、この現象を支配する力学特性の定量的把握には動的弾塑性応力解析を必要とするうえ、現象が複雑であるのでいまだ十分な把握はなされておらず、耐インパクト・エロージョンを考慮した構造物の寿命設計基準は確立されていない。

現在インパクト・エロージョンの機構としては粒子による切削<sup>(1)(2)</sup>および粒子の繰返し衝突にともなう塑性疲労<sup>(3)(4)</sup>が提案されている。とくに、本研究における低速粒子の衝突では後者の機構が支配的であると考えられている<sup>(5)</sup>。しかし、それを裏付ける直接的観察結果が得られているわけではない。

そこで本研究は、低速度粒子による延性材料のインパクト・エロージョンを検討するために試験片の同一箇所にて一定寸法の粒子を繰返し衝突させる実験を行い、試験片表面の観察よりエロージョン機構およびそ

の損傷を支配する力学パラメータを明らかにすることを試みた。

## 2. 実験装置および試験片

**2.1 試験片** 本実験に供した材料は機械構造用炭素鋼 S45C であり、厚さ 3mm の圧延板から 100×100mm<sup>2</sup> の正方形板を切り出し、その片面をエメリー紙およびホワイトランダム#3000 を用いて研磨した。本材料の機械的性質は表 1 に示すとおりである。

**2.2 実験装置** 本実験のために製作した繰返し粒子衝撃装置の概略を図 1 に示す。本装置の主な構成要素は圧縮空気だめ (Reservoir)、粒子装てん装置 (Particle Charger)、銃筒 (Barrel) および試験片固定具 (Test Piece Holder) である。まず圧縮機から 7 気圧に加圧された空気を空気だめに導き、所定の圧力 (本実験では 5, 4, 2 気圧: ゲージ圧力) になったら圧力スイッチが作動して電磁弁 A を閉じる。この圧力スイッチは設定圧力から 0.2 気圧の圧力降下で再び作動し、電磁弁 A を開くので、空気だめの圧力は常に (所定圧力) ±0.2 の範囲に保持される。粒子装てん装置は銃筒の周りを一定速度で回転し、1 回転毎に 1 個の粒子を

表 1 S45C の機械的性質

$\sigma_s$ MPa	$\sigma_B$ MPa	$\delta$ %	HRC
376	645	11.9	20

\* 昭和 58 年 11 月 28 日 第 923 回講演会において講演、原稿受付 昭和 58 年 5 月 24 日

\*\* 正員、豊橋技術科学大学 (〒440 豊橋市天伯町宇雲雀ヶ丘 1-1)

\*\*\* ミノルタカメラ㈱ (〒541 大阪市東区安土町 2-30)

銃筒に装着しマイクロスイッチを作動させて電磁弁 B を開く。所定の圧力に圧縮された空気が空気だめから銃筒に高速で流入し粒子を加速する。銃筒内で一定の速度に加速された粒子は試験片に角度  $\alpha$  (衝突角度: 本実験では 22.5° と 45° の 2 種類) で衝突し、反射後再び粒子装てん装置に戻る。試験片は固定具にその周辺がしっかりと支持されており (ただし、応力波の伝ばに対しては自由端となっている), また裏面には硬質ゴムが固定具との間に挿入されており実験中に試験片が銃筒に対して移動することはない。

本装置より、試験片の同一箇所を粒子を一定速度で繰返し衝突させることができた。なお、本実験では試験片表面のエロージョン損傷域の観察を容易にするために、粒子として直径 20 mm の玉軸受用鋼球 (JIS B 1501-1975,  $H_{RC}$  61~66) を用いた。粒子径はエロージョン寿命等に大きな影響をおよぼすものと思われるが、本研究の目的はエロージョン損傷を支配する力学パラメータを明らかにすることであり、これが判明すれば、粒子径の影響についても多くのことが予想できる可能性がある。しかし、微粉炭のような微細粒子による場合と本実験でのエロージョン機構が同一であるという保証はないので、今後小粒子についても実験を行う所存である。

### 3. 実験結果

**3.1 クレータ** 試験片に粒子が衝突すると試験片表面が塑性変形し粒子が食い込んだくぼみ、すなわちクレータを生じる。このクレータの寸法を衝突回数に対して整理したのが図 2~4 である。図中には本実験で行ったすべての衝突速度と衝突角度についての結果が示されている。

図 2 は試験片表面上のクレータ寸法を粒子の入射・反射方向に測定した結果を、各衝突速度および各衝突

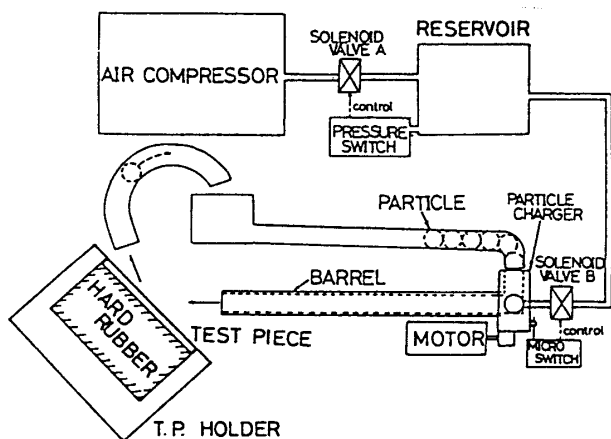


図 1 繰返し粒子衝撃装置の概略

角度に対して整理したものである。この図と図 3 において、横軸は粒子衝突回数を後述するエロージョン寿命  $N_e$  で正規化しているが、衝突角度が同一ならば、衝突速度にほぼ無関係にクレータ寸法が変化しているのが両図より明らかである。 $v=10\text{ m/s}$ ,  $\alpha=45^\circ$  の結果が他の二つの衝突速度の結果より大きい、これは粒子の衝突位置が試験片の同一箇所定まらず、周囲に多少ずれたためである。また両図で、クレータ寸法は衝突角度 45° の方が大きく、粒子衝突繰返しの初期に急速に増大し、その後漸増する傾向にある。これは試験片が塑性変形にともなって加工硬化したためである。

図 3 はクレータ形状を明らかにするためにそのアスペクト比  $a/b$  を衝突繰返し数について整理したものである。各衝突角度について、衝突速度にはほとんど無関係に繰返しの初期に減少し、その後ほぼ一定となっている。その値は  $\alpha=45^\circ$  で約 1.1,  $\alpha=22.5^\circ$  で約 1.2 である。すなわち、クレータの形状は粒子の入射・反射方向にわずかに引き伸ばされた円状である。図 2~3 の結果を総合すれば、クレータの寸法は粒子の入射角度が小さいほど小さいが、アスペクト比は逆に大きくなりより引き伸ばされた円形状のクレータとなる。これは、粒子の持つ速度のうち試験片に垂直な

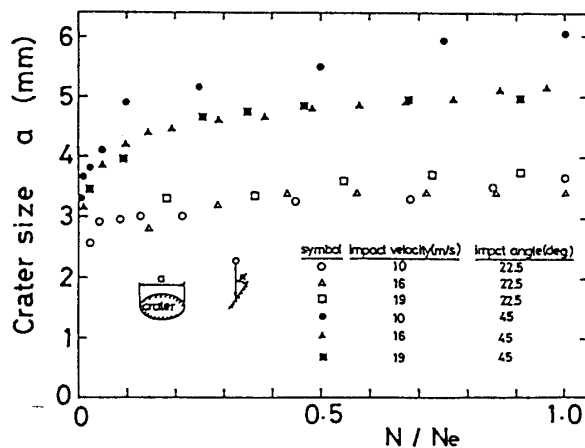


図 2 クレータ長径と粒子衝突回数

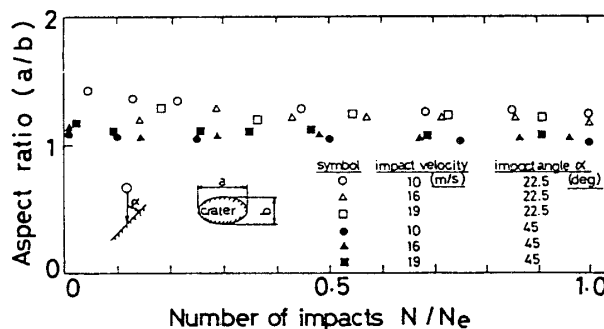


図 3 クレータアスペクト比と粒子衝突回数

成分と表面に沿う接線成分にそれぞれ関係している。特に垂直成分は図4に示したクレータ深さ（最深部の値）に大いに影響するものと思われる。同図において、クレータ深さは衝突速度によって顕著な影響は受けないが、衝突角度によって大きく相違している。

たとえば、 $N/N_e=1$  において  $\alpha=45^\circ$  の深さは  $\alpha=22.5^\circ$  の場合の約4倍となっている。

**3.2 エロージョン・リップ** 図5は試験片をクレータの長径（粒子の入・反射方向）に沿って切断した断面を光学顕微鏡で観察したものである。同図で矢印は粒子の入射および反射の方向を示す。粒子が入射する側のクレータ部は試験片表面が滑らかにくぼんでいるが、反射側においては元の表面より多少盛り上がった突起を生じている。これはエロージョン・リップ（またはクレータ・リップ）と呼ばれているものである。

このエロージョン・リップは衝突繰返しの初期にはほとんど認められないが、クレータの深さが増加するにつれて寸法が大きくなっていく。本観察結果によれば、リップは  $\alpha=45^\circ$  の方が、そして同一衝突角度の場合には衝突速度の小さい方が大きかった。

エロージョン・リップは粒子の衝突の繰返しにともなって徐々に成長するが、詳細に観察するとリップの一部がある衝突繰返し数の後に欠落するのが認められる。図6はリップ欠落の様子を示したものである。この写真はリップを試験片真上から撮影したものであり、(a)のリップに更に5回の粒子衝突を繰返した後の状態が(b)に示されている。明らかに(a)で存在していたリップの一部が(b)では欠落しているのが分かる。そこで、本研究ではこのようなリップの欠落が初めて生じるときの粒子衝突回数をエロージョン寿命と定義した。リップ欠落の認定は、ある衝突繰返し数ごとにクレータ全体をプラスチックレプリカに取り光学顕微鏡で前回のレプリカと比較して行った。なお、

今回は欠落したリップの大きさについては考慮を払わなかった。

**3.3 エロージョン寿命** 3.2節の定義に従って求めたエロージョン寿命と衝突速度の関係を片対数線図に整理したのが図7である。これより、エロージョン寿命は衝突角度  $\alpha=22.5^\circ$  の方が  $45^\circ$  の場合より同一衝突速度に対して約1/10となっており、また同一衝突角度の結果では衝突速度が1/2 (19m/sと10m/s) となると寿命は約10倍になることが分かる。

図7の結果は金属材料の疲労寿命と応力の関係を表すS-N曲線と類似の傾向を示しているが、この事実のみから本実験条件におけるエロージョン機構が疲労破壊に基づく結論するのは早計であろう。

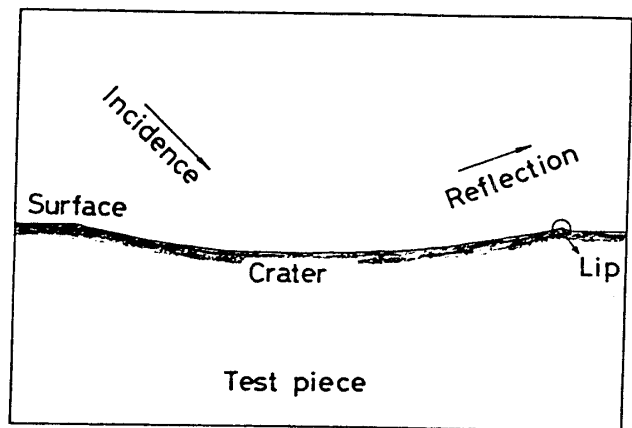


図5 クレータ断面図 ( $\alpha=45^\circ$ ,  $V=19\text{m/s}$ ,  $N/N_e=1$ )

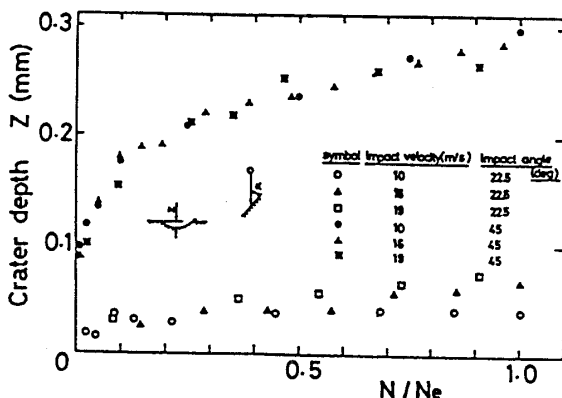
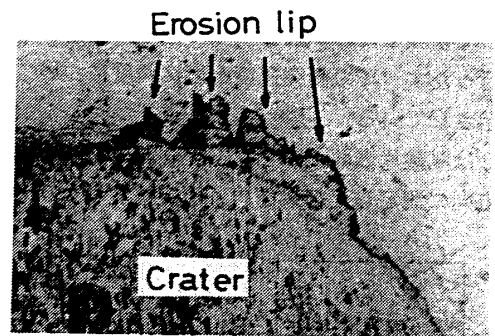


図4 クレータ深さと粒子衝突回数



(a)  $N=50$  cycles



(Impact angle:  $22.5^\circ$ , vel.  $19\text{m/s}$ )

(b)  $N=55$  cycles

図6 エロージョン・リップの欠落

## 4. 考察および結論

4.1 エロージョン・リップの形成および損傷 本実験におけるように粒子の繰返し衝突によって生じたエロージョン・リップが Hutchings の観察結果<sup>(2)</sup> で1回的高速粒子の衝突によって生じたものとの形成機構が同一であるか否かを検討することはエロージョン機構を解明するうえで重要である。Hutchings によれば<sup>(2)</sup> エロージョン・リップの形成は衝突粒子の形状によってその機構が異なる。角張った粒子の場合には切削バイトのような働きによって切りくず状のリップが形成される。これに対して球状の粒子の場合には本実験で得られたものと同一形状のリップが形成されると報告している。したがって、要する回数は異なるがその形成機構は本質的には同一と思われる。

図8は本実験で得られたエロージョン・リップの切断面であり、研磨後軽く腐食してある。これは、粒子直径約5.6mmで衝突角度45°、速度19m/sで2600回繰返し衝撃し、リップの一部が欠落したエロージョン寿命時におけるものである。粒子径が小さい場合により大きなリップが形成されたが、その形成機構は20mm径の場合と同一であると思われる。

図8にはフェライトとパーライトの混合組織が出現されているが、試験片表面に沿った組織の状態に注目すると、図左端のリップ前方では結晶粒が素材のもの

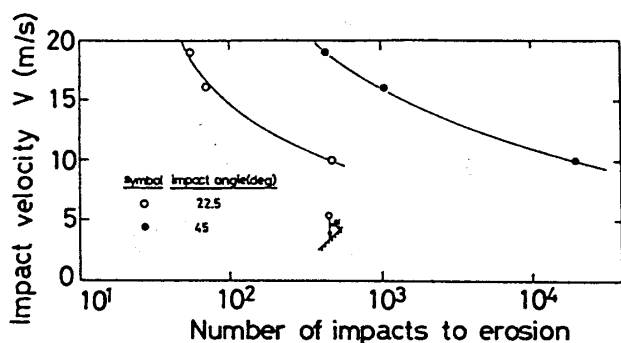


図7 エロージョン寿命と衝突速度

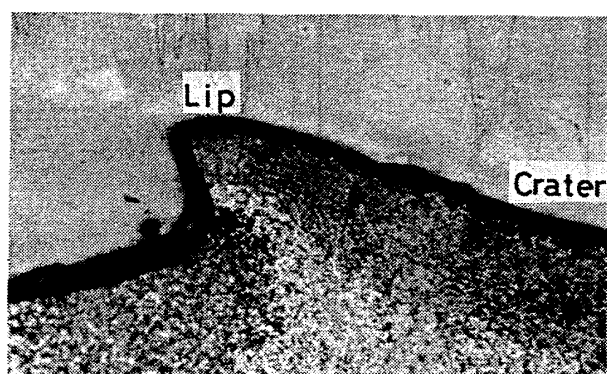


図8 エロージョン・リップ拡大写真

とほとんど同じ状態にある。これに対してリップ近傍およびクレータ部では結晶粒が扁平に押しつぶされ、リップ先端に向かって組織が流れている様子が認められる。したがって、このようなリップ近傍の材料の変形状態から推察すれば、その形成は図9に示すように模式化されるであろう。(a)では衝突繰返しの初期であり、粒子のもつエネルギーはクレータの深さを増加させるための塑性変形に費やされるが、材料の加工硬化にともなってクレータ深さ方向への塑性変形は減少する。したがって、粒子のもつ運動エネルギーは粒子がクレータから反射されて飛び去るときにクレータ側面を押し上げて塑性変形させるためにより多く消費されることになる。このようにして、エロージョン・リップは徐々に成長していくことになる。これを示したのが図(b)である。さて観察によれば、エロージョン・リップは粒子の引き続く衝突によりその一部が欠落するが、欠落後のリップ観察および粒子反射角度の変化からその状況を模式的に示したのが図(c)および(d)である。欠落部はリップ表面層の一部であり、リップ根本からの破損はほとんど観察されなかった。また粒子反射角度は入射角45°の場合繰返しの初期で18°であったが、粒子の衝突にともなって徐々に上昇し、エロージョン寿命時には約30°であった。さて、粒子によるクレータ底面および側面の圧縮による材料の塑性変形が加工硬化によってほとんど進行しなくなると、

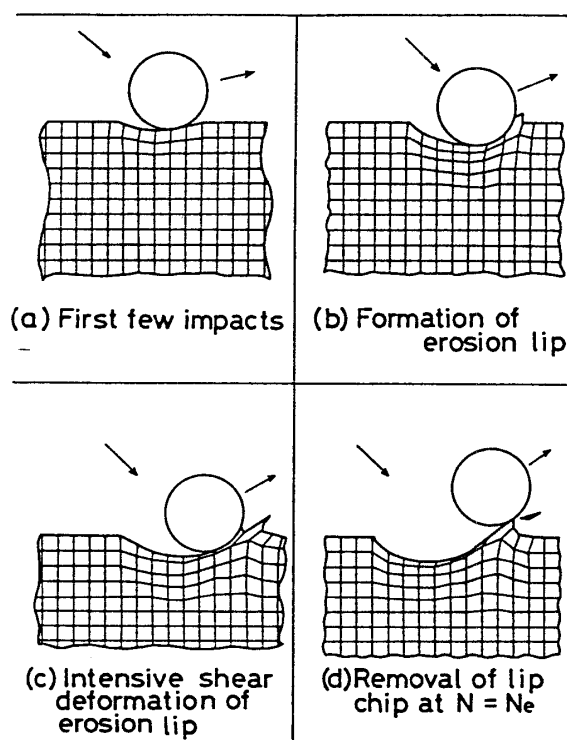


図9 エロージョン・リップ形成およびエロージョン損傷モデル

粒子がクレータにおよぼす作用は粒子とクレータ側面間の摩擦力に起因したクレータ側部表面層のせん断変形に移行していくものと推察される。このせん断変形が進行するとリップ頂上付近に薄層の突出しを生じせしめる。これが(c)に示されている。そして(d)に示したように、この突出しがある限界に達すると欠落してエロージョン損傷を生じる。

4.2 エロージョン寿命と力学因子 エロージョン損傷が生じる過程は4.1節で述べたように次の三つに大きく分けられる。

(1) 粒子衝突初期におけるクレータ深さ方向への変形、

(2) クレータ側部への粒子衝突によるリップの形成、そして

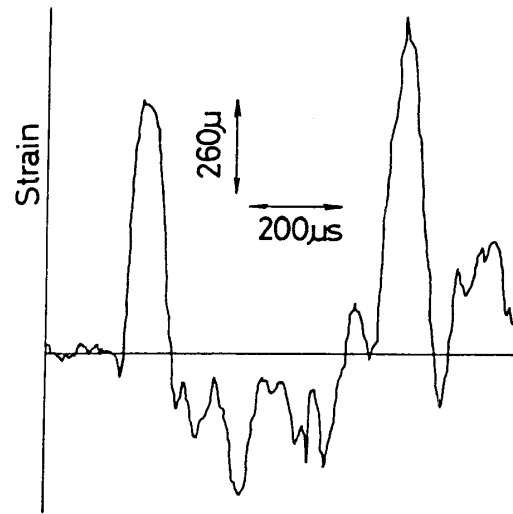
(3) リップ表面層の極度なせん断変形およびすべり破断による材料の欠落。

これらのうち、(2)の過程が最も長く、エロージョン寿命の大半を占めている。そこで、リップ形成に主要な役割を演じているものと思われる粒子のクレータ側面への押しつけ力を定性的に評価することを試みた。このために、粒子の反射方向にクレータ中心から15mm離れた試験片表面の位置に2方向ひずみゲージを接着し、粒子衝突時のひずみの時間履歴を測定した。図10(a)は試験片に垂直に粒子を衝突させたとき、クレータ中心から極座標系をとったときの半径方向のひずみゲージの出力を示したものである。また同様に(b)、(c)は粒子が試験片に対して22.5°および45°で入射したときの半径方向および円周方向のひずみゲージ出力を示したものである。(a)と(b)および(c)の結果を比較すると半径方向のひずみゲージ出力の時間履歴に明らかな相違がある。粒子が垂直に落下したときには約100 $\mu$ sの引張りのひずみ波が現れ、その後は微少な圧縮のひずみが続いている。これに対して、粒子が22.5°および45°で入射したときは、約50 $\mu$ sの引張りのひずみ波に続いて約100 $\mu$ sの大きな圧縮のひずみ波が続いている。最初に現れる引張りのひずみ波は粒子が試験片表面に食い込んだときに生じることはヘルツの接触理論から理解される。しかしながら粒子入射角が22.5°および45°の場合に圧縮のひずみ波が直ちに現れるのは粒子がクレータ側面を圧縮するためと思われる。したがって、2方向ひずみゲージの履歴から算定される半径方向圧縮応力の最大値は粒子がクレータ側面を圧縮する合力に関係するものと思われる。クレータ深さは試験片厚さに比較して十分に浅いので、試験片表面に水平荷重 $F_{\max}\alpha(t)$  ( $0 \leq \alpha(t) \leq 1$ ) が作用しているとみなせば、荷重点から15

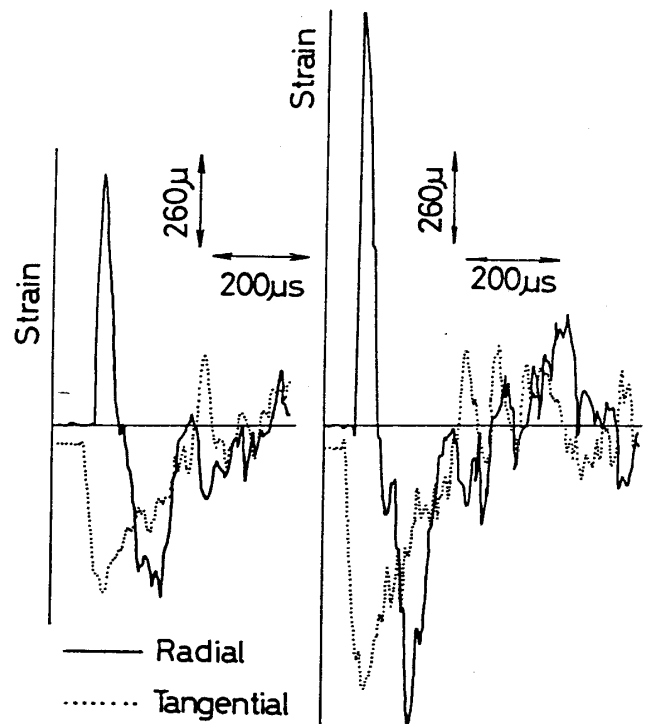
mm離れた位置における半径方向圧縮応力の最大値 $\sigma_{\max}^r$ は、

$$\sigma_{\max}^r = KF_{\max} \dots \dots \dots (1)$$

で与えられる。ここで $K$ は定数である。荷重履歴を表す関数 $\alpha(t)$ が異なれば定数 $K$ も変化する。本実験において、粒子衝突角22.5°と45°とで荷重履歴は厳密には異なるものと考えられるが、図10の両者のひず



(a) 粒子垂直落下時の半径方向ひずみ履歴



(b) 衝突角度 22.5°  
 $V=19$  m/s,  $N=N_c$

(c) 衝突角度 45°  
 $V=19$  m/s,  $N=N_c$

図10 ひずみゲージ出力の時間履歴の例

みゲージ出力の履歴をみると時間にもなうひずみの変動の様相に大きな差異は認められない。したがって、両条件で生じる荷重履歴  $\alpha(t)$  にも大差ないものと思われる。図 11 は 2 方向ひずみゲージの出力から半径方向応力を算定した結果である。これらの結果は粒子衝突回数がエロージョン寿命時におけるものであるが、応力履歴は衝突回数にはほとんど依存しない。同図をみると衝突角度  $45^\circ$  の場合は  $22.5^\circ$  に比較して、 $\sigma_{\max}^c$  は約 2 倍大きいことが分かる。したがって、式 (1) の関係を用いれば、 $F_{\max}$  についても同様の結果となる。次に衝突角度が同一で粒子衝突速度が異なる場合はヘルツの理論によれば、粒子衝突によって生じる衝撃圧縮力の最大値は衝突速度の 1.2 乗に比例する。したがって、衝突速度  $19\text{m/s}$  における  $F_{\max}$  を  $F_{\max}^{19}$  としたときの任意速度  $V$  における  $F_{\max}$  の値は

$$F_{\max} = F_{\max}^{19} \left( \frac{V}{19} \right)^{1.2} \dots\dots\dots (2)$$

で与えられる。いま、この圧縮力がクレータ全表面積のうち粒子反射側の半分に均一に分布して作用すると仮定すれば、クレータ側面に作用する最大圧縮応力  $\sigma_e$  は

$$\sigma_e = F_{\max} / A \dots\dots\dots (3)$$

で与えられる。ここで  $A$  はクレータ全表面積の  $1/2$  である。 $A$  は粒子が垂直にクレータ深さまで押込まれたときのクレータ表面積と近似的に等しいので、

$$A = \frac{\pi}{2} DZ \dots\dots\dots (4)$$

で与えられる。ここで  $D$  は粒子直径、 $Z$  はクレータ深さである。図 4 に示したように  $Z$  は衝突回数にもなって増加するが衝突角度が同一ならば衝突速度に依存せず、また両角度における深さの比はほぼ 4 で回数に依存しない。したがって、 $N = N_e$  における衝突角度  $22.5^\circ$ 、衝突速度  $19\text{m/s}$  の最大圧縮応力を  $\sigma_{e0}$  とすれば、本実験における任意の条件のもとでの  $\sigma_e$  は、

$$\frac{\sigma_e}{\sigma_{e0}} = C \left( \frac{V}{19} \right)^{1.2} \dots\dots\dots (5)$$

で与えられる。ここで  $C$  は  $\alpha = 22.5^\circ$  のとき  $1$ 、 $45^\circ$  のとき  $1/2$  の値をとる。式 (5) で与えられる  $\sigma_e / \sigma_{e0}$  に対してエロージョン寿命を整理したのが図 12 である。衝突角度によるエロージョン寿命の依存性が消滅

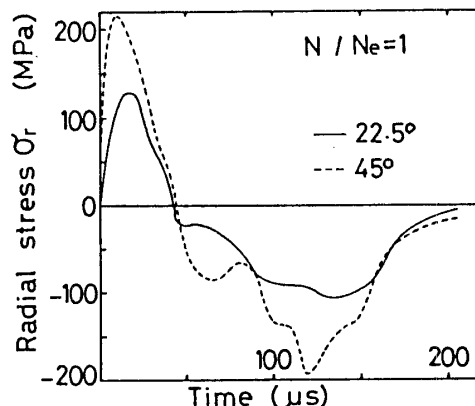


図 11 半径方向応力の時間履歴

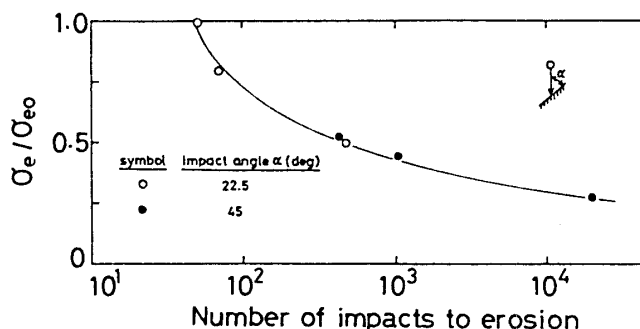


図 12 エロージョン寿命と  $\sigma_e / \sigma_{e0}$  の関係

しているのが認められる。以上の結果を総合すれば、低速度の球形粒子による延性材料のエロージョン損傷を支配する力学因子の一つとして、粒子によるクレータ側面圧縮応力が考えられる。しかし、ここで得られた結果は非常に限られており、今後は粒子径および材料の種類を変えた実験を行い、本報告で明らかにしたエロージョン機構の確認と、その損傷を支配する力学因子の定量的な検討を行う必要がある。

文 献

- (1) Finnie, I., *Proc. 3rd National Cong. of Applied Mechanics*, (1958), 527, ASME.
- (2) Hutchings, I.M., *ASTM Spec. Tech. Publ.*, 664 (1979), 59.
- (3) Bitter, J.G.A., *Wear*, 6 (1963), 5.
- (4) Mamoun, M.M., *Argonne National Lab.*, T.R. XX-3 (1975).
- (5) Follansbee, P.S., ほか 2 名, *Wear*, 74 (1981), 107.

討 論

〔質問〕 黒川 知 明 (京都大学工学部)

(1) 式(5)の定数  $C$  に関して、なぜ  $\alpha = 22.5^\circ$  で

$1$ 、 $\alpha = 45^\circ$  で  $1/2$  に選ばれたのか。図 12 で測定点が 1 本の線に乗るように選ばれたと推定されるが角度に

よって  $C$  を変える根拠は何か。

(2) 図 10 のゲージ出力がクレータに働く水平荷重に対応すると考えておられるようだがそれは正しい。もしそうなら垂直衝突の図 10(a) でも水平分力が生じていることになり、不合理ではないか。水平力であるなら縦波 ( $C_0 = 5000 \text{ m/s}$ ) で伝ばするから衝突点から自由端まで  $10 \mu\text{s}$  しか要しない。波形の振動周期から考えて衝突による板のたわみによるひずみのようにも考えられるがいかかがか。衝突点に関して反対側でもひずみ履歴を測定すればそのことは確認できるのではないか。

〔回答〕 (1) 式(5)の定数  $C$  は基準値  $\sigma_{e0}$  を  $\alpha = 22.5^\circ$ ,  $V = 19 \text{ m/s}$  のときにとっているので,  $\alpha = 22.5^\circ$  で衝突角度が異なる場合の  $\sigma_e$  に対して 1 をとるのは式(2)~(4)の議論で明らかと思われる。同様に, 基準値  $\sigma_{e0}$  を  $\alpha = 45^\circ$ ,  $V = 19 \text{ m/s}$  のときにとり,  $\alpha = 45^\circ$  で衝突速度が異なる場合にも式(1)~式(5)の議論が成立し, 定数  $C$  は 1 となる。ところが, 基準値を常に前者の場合にとると,  $\sigma_{e0}(\alpha = 22.5^\circ)$  の値は  $\sigma_{e0}(\alpha = 45^\circ)$  の値より約 2 倍大きくなるのが図 11 の結果および式(1), (3), (4)関係からわかる。すなわち, 図 11 の結果では  $\sigma_{e\text{max}}^c$  (半径方向応力の圧縮最大値) は

$\alpha = 45^\circ$  のほうが約 2 倍大きくなっているが, 図 4 の結果より, 式(4)中のクレータ深さ  $z$  は  $\alpha = 45^\circ$  のほうがやはり約 4 倍大きく, 面積  $A$  も 4 倍となるので, 結局  $\sigma_{e0}(\alpha = 22.5^\circ)$  は  $\sigma_{e0}(\alpha = 45^\circ)$  より約 2 倍大きくなる。この基準値の相違を表したのが定数  $C$  である。

(2) ご指摘のとおり, 試験片の曲げ変形も当然, 存在すると思われる。図 10(b), (c) の半径方向の圧縮ひずみ側の周期は平板の曲げ自由振動の周期とほぼ同程度になっている。ところが同図で, 接線方向のひずみ履歴に注目すると, 圧縮ひずみのピークは半径方向のピークより約  $100 \mu\text{s}$  早くも生じ, その後多少の変動を伴いながらも全般的に滑らかに減少している。もし, 半径方向の圧縮ひずみが, 曲げ変形に主に起因するものであるならば, 接線方向のひずみ履歴にも半径方向ひずみの圧縮側ピークに対応する変動が認められるはずである。また, 図 10(a) に示した, 垂直落下のひずみ履歴における引張側の接続時間に比較して, 同図(b), (c)のそれらは明らかに短いことより, 半径方向ひずみの圧縮側ピークは主に, 粒子がクレータ側面を圧縮することによって生じたと推定した。なお, ご指摘の試験片裏面におけるひずみ測定を現在計画している。