

E-05 固体粒子衝突エロージョン(サンドエロージョン, スラリーエロージョン)

1. 概要

固体粒子の衝突による材料の損耗現象で、気-固系のサンドエロージョンと液-固系のスラリーエロージョンに分けられる。サンドエロージョンの場合、浅い角度で粒子が衝突する場合は切削による損傷が支配的となり、深い角度で衝突する場合は塑性変形による損傷が支配的となる。スラリーエロージョンは、粉体による機械的因子に溶液の腐食性因子が加わる現象である。

2. 損傷を受ける材料

金属材料 セラミック 高分子材料

3. 損傷機構と損傷事例

サンドエロージョンによる損傷事例としては、砂塵によるヘリコプター翼の損傷、高温水蒸気酸化皮膜の飛来による火力発電設備のタービン翼の損傷、化学プラントガス環境中の触媒粒子の衝突などがあげられる。スラリーエロージョンによる損傷事例としては、スラリー輸送用の配管やポンプの損傷などがある。いずれも固体粒子が材料表面にある衝突することで、粒子の運動エネルギーが材料の変形と損耗エネルギーに変換される。本解説では、サンドエロージョン（気-固系）を説明した後、スラリーエロージョン（液-固系）について述べる。

3.1 サンドエロージョン（気-固系）

エロージョン速度に及ぼす粉体の衝突角度の一例を図1に示すが、延性にとむ金属材料（アルミ、銅、炭素鋼）ではエロージョン速度は低角度側で最大を示すが、硬くて脆い材料（ガラス板、セラミック等）では高角度側で最大となる。

延性に富む材料と硬くて脆い材料とで衝突角度依存性が異なる理由は、それぞれの材料のエロージョンの支配因子が異なるためである。

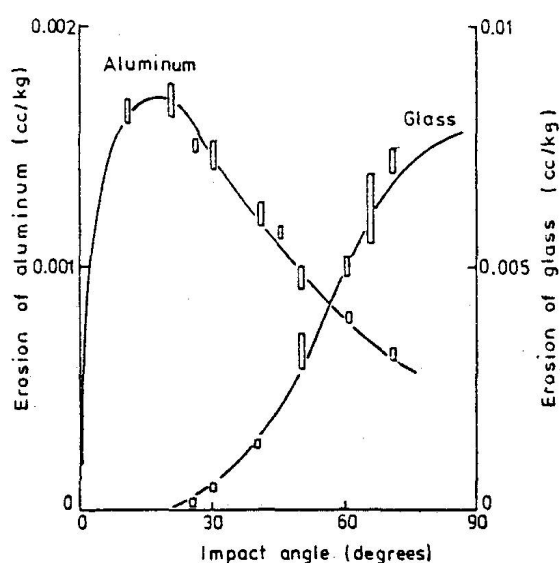


図1. 粉体の衝突角度の影響¹⁾

図2は、延性材料において見られるエロージョン挙動である。

(a)は **ploughing** “掘りおこし”と呼んでおり球形粒子が斜めから衝突した時に見られる。金属は粒子の運動方向に沿って掘りおこされ、クレーターを形成しつつ押し上げられて出口側にチップをつくる。このチップは、粒子速度が大きい場合は、その運動エネルギーによってもぎとられる。単

一の衝突でもぎとられない場合でも後続の衝突によってもぎとられる。(b)は “切削” の一機構で、鋭角な粒子が衝突した時に見られる。粒子の衝突と転がりにより材料が押し上げられ、チップを形成する。(c)も “切削” の一機構で、鋭角粒子が水平に近い角度で金属に衝突し、材料が削り取られていく場合のものである。以上3つの形態は、単一粒子が金属に衝突した場合であって、実際は粒子が連続し、衝突が繰り返されるため、損耗過程は複雑となる。つまり、衝突の繰り返しで、掘りおこし→押し込み→切削が繰り返されるとともに、金属表面は繰り返し塑性変形を受け、脆くなり、疲労現象のため剥離が生じることになる。粉体が低角度で衝突する場合は、切削的要素が大となるが、高角度で衝突する場合は、押し込みが繰り返されることによる疲労の影響が重要な役割を果たすようになる。

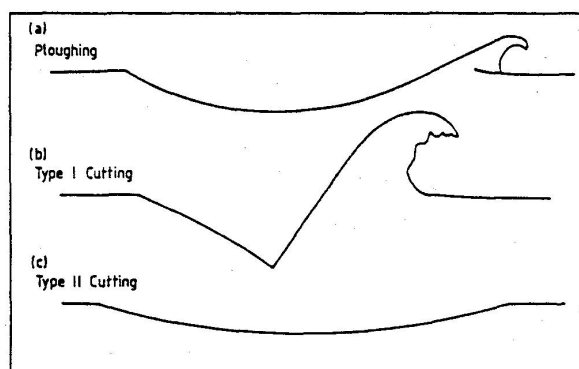


図2．延性材料のエロージョンの形態
(粒子運動方向：左→右)¹⁾

一方、硬く脆性材料において見られる形態を図3に示す。硬くて脆い材料は変形能が少ないため応力に逆らいきれなくなると、伸びたり曲がったりすることなく破壊する。このような材料に粉体が衝突した時はほとんど変形しないまま、クラックを生じる。クラックが各所に発生し、互いに連なると剥離して摩耗粉となる。(a)は球形粒子が衝突した場合で、(b)は鋭角の粒子が衝突した場合のクラックの入り方を示す。

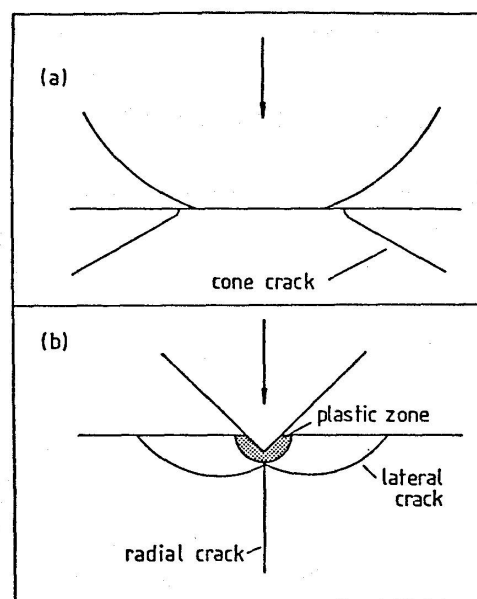


図3．脆性材料のエロージョン¹⁾

前述のように、エロージョンのメカニズムは延性材料と脆性材料とでは異なるため、エロージョン速度に及ぼす衝突角度依存性は材料によって異なってくる。

エロージョン速度は、衝突する粉体の各種条件によって異なる。一般的には粉体の大きさが大きく、粉体の硬さが硬いほどエロージョン速度は速くなる。衝突する粉体の形状も関係し、球状よりも鋭角な粉体は、切削メカニズムや切込み効果が働くので、材料のエロージョン速度は速くなる。衝突する粉体の速度も損傷速度に大きく影響を及ぼす。図4は衝突する粉体の速度の影響の一例である。エロージョン速度は一般に衝突速度（V）のn乗に比例する。nの値は、衝突角度および粉体特性によって異なり、延性材料では2～3の値を示し、脆性材料では2～4の値を示す。

材料の特性によってもエロージョン速度は異なる。図5は、切削機構が支配因子となる低角度の衝突角度での試験結果である。

切削機構が支配的な条件では、一般に硬さが硬い材料ほど、耐エロージョン性が向上する。図5では、金属材料がAl、Cu、Ni、Taのように純金属の場合には、耐エロージョン性は材料の表面硬さの増加にしたがって向上する。一方、

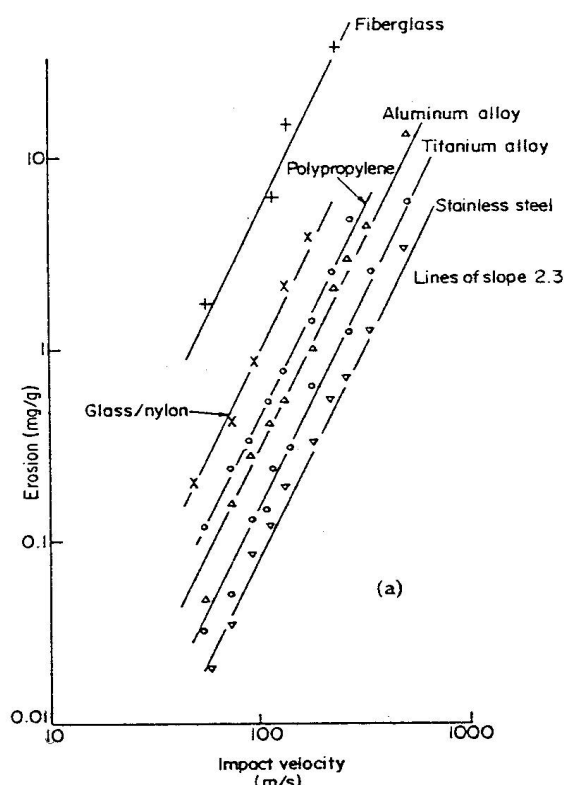


図4．粉体の衝突速度の影響¹⁾

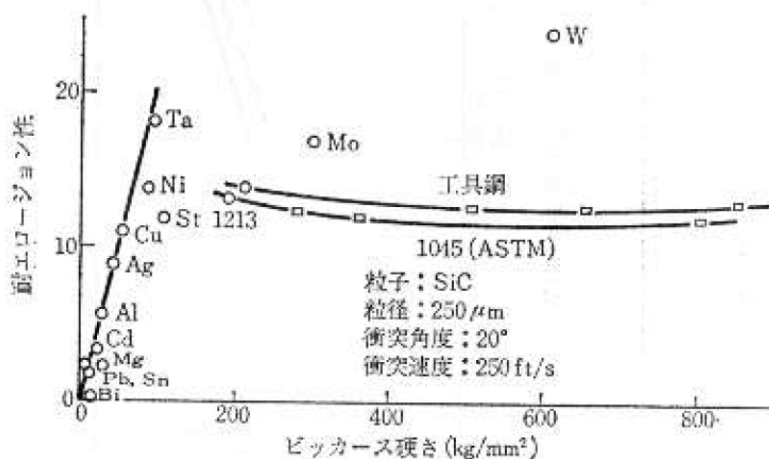


図5．エロージョン量に及ぼす金属試験片の硬さの影響²⁾

工具鋼の例のように、加工効果や熱処理で硬さを硬くしても耐エロージョン特性は向上しない場合もある。

3.1 スラリーエロージョン (液-固系)

スラリーは固体粒子と液体が混ざっているため、液体の腐食性が無視できなくなる。機械的因子が強い条件では水溶液の腐食の影響は比較的少なく、硬い材料ほど耐スラリーエロージョン性は優れるが、機械的因子が弱い条件、もしくは腐食性の高い水溶液では、腐食の影響を受け、耐食性のある材料のほうが優れた耐スラリーエロージョン特性を示す。

図6は、pH3.0の水溶液中で流速2.1m/sの条件で、粉体内回転法で各種材料について試験した結果である。粉体内回転法は比較的機械的因子の影響が弱い試験方法である。硬さが高い材料ほど損耗量は少なくなるが、同じ硬さレベルの材料について比較すると、耐食性が優れた材料の損耗量が少ない。一方、図6は、機械的因子が強い噴流法で5.0m/sの条件で試験した結果である。水溶液のpHは7.0、3.0の条件で行っているが、損耗速度は水溶液のpHの影響を受けず、材料の硬さが高いほど、耐スラリーエロージョン特性が向上している。

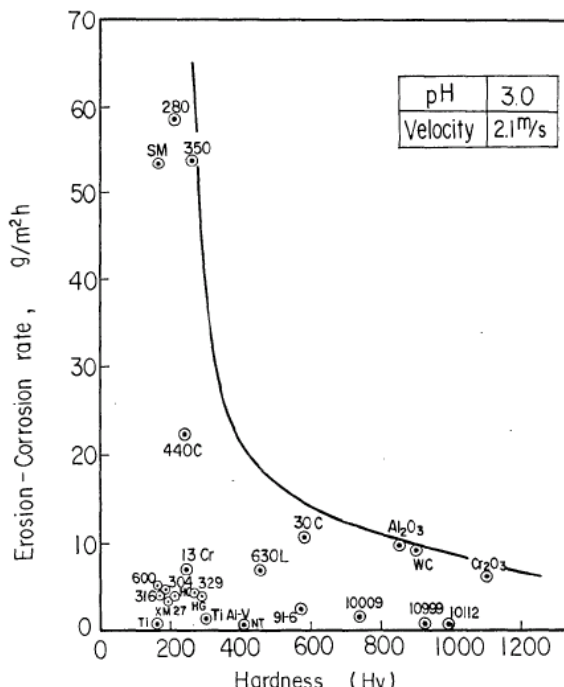


図6. 粉体内回転法による各種材料のスラリーエロージョン試験結果³⁾

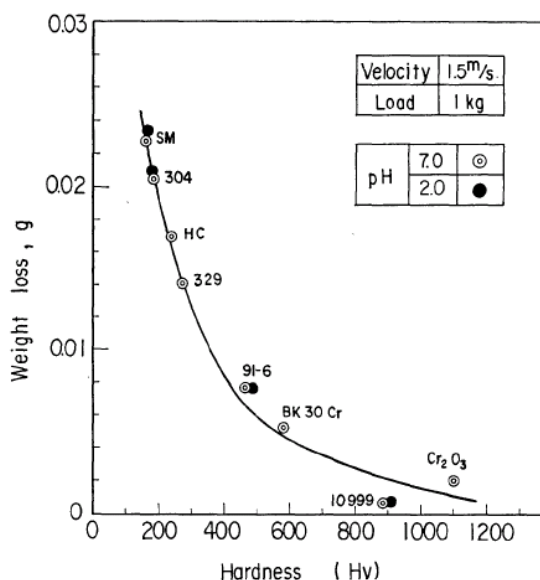


図6. 噴流法による各種材料のスラリーエロージョン試験結果³⁾

4. 対策

サンドエロージョンを受ける機器で、エロージョン速度が早すぎ、実用的でない場合は、対策として、①粉体の衝突速度を遅くする、②粉体の輸送量を減らす、③耐エロージョン性に優れた材料に変更する等が考えられる。その中で、粒子の衝突速度を遅くすることが可能であれば、衝突速度を遅くすることは最も有効な対策となる。図4で説明したように、エロージョン速度は衝突速度の2～4乗に比例して速くなる。したがって、僅かの衝突速度の低下により、エロージョン速度を大きく低下させることが可能である。耐エロージョン材料の採用も効果的な対策であるが、この場合粉体の衝突角度で、耐エロージョン材料が異なってくるので注意が必要である。低角度の衝突条件では硬さが高い材料が優れた特性を示すが、高角度での衝突では、材料の靱性が重要となる。

スラリーエロージョンの場合は、水溶液の腐食性が問題となってくる。その場合、耐食性材料の使用、腐食抑制剤の添加、電気防食の適用が対策となる。

6. 参考文献

- 1) 第30回技術セミナー資料：腐食防食協会（平成14年9月20日）
- 2) エロージョンとコロージョンー流体による材料の侵食ー：（社）腐食防食協会編 編集委員長北條英光、しょう華房（1987）
- 3) 梅村文夫：防食技術、Vol.34、175～(1985)