

氏 名 鍵本 良実
 授 与 学 位 博士 (工学)
 学位授与年月日 平成11年3月25日
 学位授与の根拠法規 学位規則第4条第1項
 研究科、専攻の名称 東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 機械工学専攻
 学 位 論 文 題 目 粉体エロージョン機構の研究
 指 導 教 官 東北大学教授 加藤 康司
 論文審査委員 主査 東北大学教授 加藤 康司 東北大学教授 井小萩 利明
 東北大学教授 林 一夫 東北大学助教授 祖山 均

論文内容要旨

粉体エロージョンとは多数の固体粒子が衝突すること起因する材料の摩耗である。今日の発電用石炭焚きボイラおよび将来エネルギープラントとして期待される加圧流動床ボイラや石炭ガス化炉などの寿命を左右する重要な課題であり、そのメカニズム解明と正確な摩耗量予測および摩耗低減が求められている。

本論文はこのエロージョンに関する研究成果についてまとめたもので、LDVによる正確な粒子速度計測や、超音波厚さ計によるエロージョン進行のin-situ計測などの試験方法の革新によって正確な摩耗計測を行っている。また、摩耗メカニズムに関して従来見過ごされてきた材料表面への粒子の移着に注目し、粒子と材料との凝着によってエロージョンを生じるモデルを提案した。そして、金属材料などで粒子が垂直に衝突する場合よりも斜めからの場合にエロージョン量が最大になる原因が材料表面に移着した粒子によるエロージョン抑制作用によるものであることを示し、材料の融解熱などの物性値からエロージョン量を予測する実験式を作成して実際のエロージョンによる摩耗予測手法を確立したものである。

本論文は全文8章よりなり、その構成は次のようになっている。

第1章は緒論である。第2章では本研究で用いた実験手法について述べている。

第3章では実際の試験結果およびエロージョン面の観察結果について述べている。

第4章で衝突条件、第5章で材料物性、第6章で衝突粒子とエロージョンとの関係を調べている。

第7章では総合的なエロージョンメカニズムの検討を行い、摩耗予測式の導出を行っている。

第8章は結論である。

以下に、その内容を要約する。

図1に試験装置を示す。この試験装置は圧縮空気により内径7.8mm、長さ1,000mmの加速管を通して粒子を試験片に吹き付けるものである。一般的にこの方式では粒子の速度が正確に求められない欠点があるため、本研究ではLDV (レーザードップラー速度計) を用いて試験機内部での粒子速度を計測し、衝突速度を求めた。図2に粒子径と衝突速度の関係を示すが、小さい粒子では試験片直前での減速が大きいため、また、大きい粒子では加速管内部での加速が十分でないためにそれぞれ衝突速度が小さくな

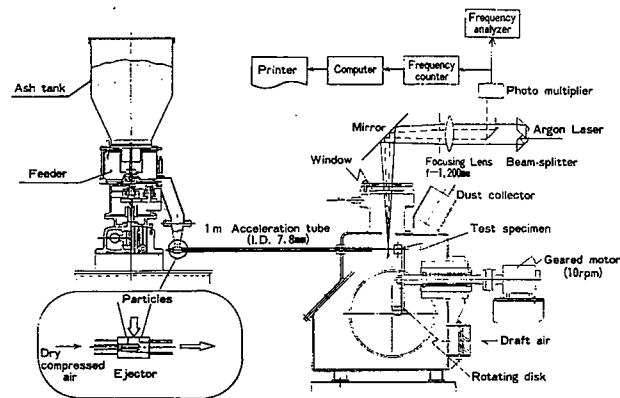


図1. 試験装置

る結果が得られた。こうした計測結果をもとに、粒子密度、粒子径、設定流速などから衝突速度を推定する実験式を作成し、以降の実験結果をこの衝突速度で整理した。

図3に炭素鋼の表面にアルミナ粒子を衝突させ、エロージョンを起こさせた面の観察結果を示す。SEI像から、材料表面に粒子の角が転写された無数の傷が見られることがわかる。図3は衝突角度 90° であるので傷の方向はランダムであるが、衝突角度 45° でも面の傷の方向や大きさは 90° の場合と変わらず、従来の切削メカニズムに基づくエロージョン機構では説明ができないことを示した。また、Al-K α 像から材料表面には白く見えるアルミが分布しており、粒子の断片が大量に移着していることを示した。

そして、超音波厚さ計を使用したin-situ計測によってエロージョンの進行が時間に比例であると見なせることを明らかにし、第4章で衝突粒子の濃度を変化させても単位粒子量あたりのエロージョン量は一定(試験範囲は濃度 2350g/m^3 までの範囲)になることを明らかにして、異なる条件でのエロージョン試験結果を摩耗率(衝突粒子量あたりの摩耗体積)で整理できることを示した。

図4は炭素鋼の表面に石炭灰を 45° の角度で衝突させた結果を摩耗率と衝突速度との関係で整理したものであり、摩耗率は衝突速度の2乗で変化する、すなわち、摩耗率は粒子の運動エネルギーに比例するというを示したものである。また、アルミナヘシリカを吹き付けた試験結果などからセラミックス材料については摩耗率が粒子速度の垂直方向成分に比例するという結果が得られることから、摩耗における比摩耗量に相当する比エロージョン量(衝突粒子の垂直方向運動エネルギーあたりの摩耗体積)を定義し、この量を尺度としてエロージョンの評価が可能であることを示した。

第5章において、この比エロージョン量と各種材料物性との関係を調べた。図5はアルミ合金、銅、炭素鋼などの金属材料について融解熱と比エロージョン量との関係を調べたものであり、ほぼ反比例の関係であることを見出したものである。そこで、摩耗における摩耗係数に相当する係数としてエロージョン係数を定義した。これは融解熱と比エロージョン量との積をとった無次元数であり、材料の違いに関わらず一定値になる。

他の物性値として、例えば、セラミックスの比エロージョン量と破壊靱性の関係を調べたが、セラミックスのエロージョン機構がクラックによる破壊で生じるものであるという傾向は見られなかった。

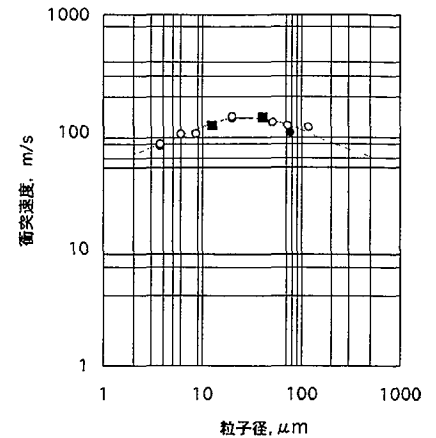


図2. 衝突速度と粒子径との関係

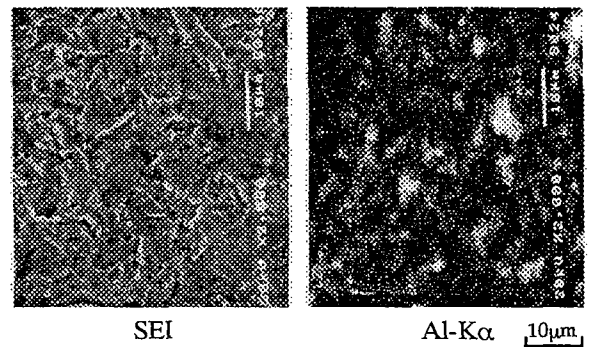


図3. 炭素鋼のエロージョン面

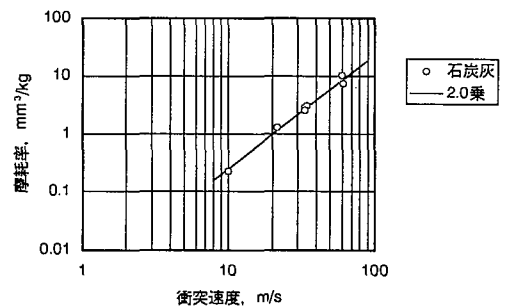


図4. 摩耗率と衝突速度との関係

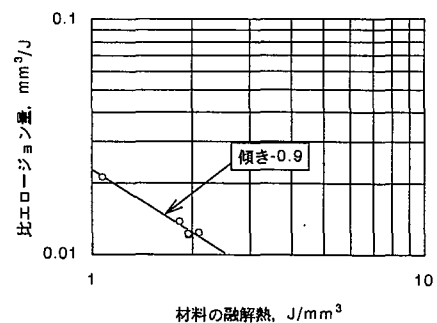


図5. 比エロージョン量と融解熱との関係

また、図6に示すように材料の硬さが小さくなるほど衝突角度90°での角度係数、すなわち、衝突角度45°でのエロージョン量に対する衝突角度90°でのエロージョン量が小さくなることを示した。これは、軟質の材料ほど衝突角度90°での粒子移着量が多くなるために摩擦が抑制されるためである。

第6章では衝突粒子とエロージョンとの関係を調べ、粒子によって摩擦形態が大きく変化することを示し、摩擦予測データ採取のための実験における試験粉体選定の重要性を明らかにした。また、図7に示すように、粒子と材料との硬さ比によって摩擦量を整理できることを示した。

第7章では以上の結果をもとに検討を行った。エロージョンのメカニズムとして材料と粒子との凝着に注目し、材料の粒子への移着量が衝突時に粒子が持っている垂直方向の運動エネルギーに比例し、材料から粒子への移着量と粒子から材料への移着量との差が摩擦になるというモデルを提案した。そして、図8に示すような材料へ移着した粒子によるエロージョンの抑制効果によってエロージョンの角度特性が決定されるということを示し、従来延性材料と脆性材料として別個に取り扱われていたエロージョンのメカニズムを統一的に説明可能であることを示した。

さらに、このメカニズムに立脚して実機の摩擦予測のための推定式を以下に示す形にまとめた。

$$L = K_e \cdot K_\theta \cdot K_H \frac{C v_a v_i^2 \sin^3 \theta}{2U_e} T$$

K_e はエロージョン係数で、0.024

$$K_\theta = \sqrt{\frac{H_M}{18}} \left\{ 1 - \left(1 - \sqrt{\frac{18}{H_M}} \right) \times 67^{\left(\frac{45-\theta}{90} \right)} \times \frac{90-\theta}{45} \right\}$$

ただし、 $H_M > 18$ のとき $K_\theta = 1$

$$K_H = \left(\frac{H_p}{H_M} \times 0.5 \right)^{2.6} \quad \text{ただし、} H_M < 0.5H_p \text{のとき } K_H = 1$$

L : 摩擦深さ C : 粒子濃度 H_M : 材料硬さ
 v_i : 衝突速度 v_a : 気流速度 H_p : 粒子硬さ
 U_e : 融解熱 T : 時間

以上のように本論文は粉体エロージョンのメカニズムに対して材料と粒子との凝着という新たな視点に基づくモデルを提案し、さらに、耐エロージョン設計に必要な摩擦予測手法をも提供したものである。

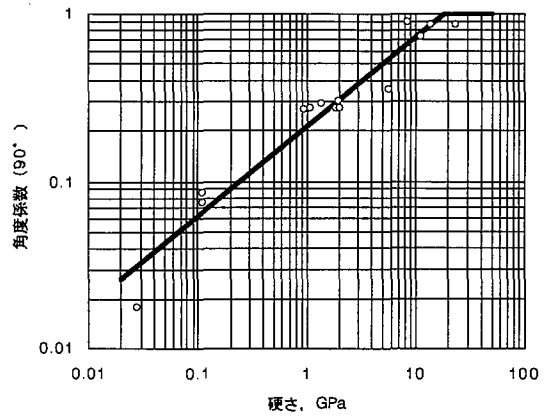


図6. 角度係数と材料硬さとの関係

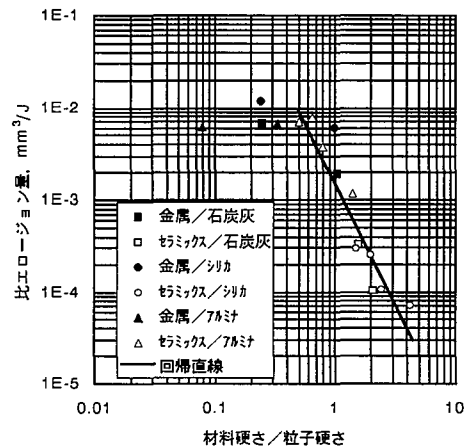
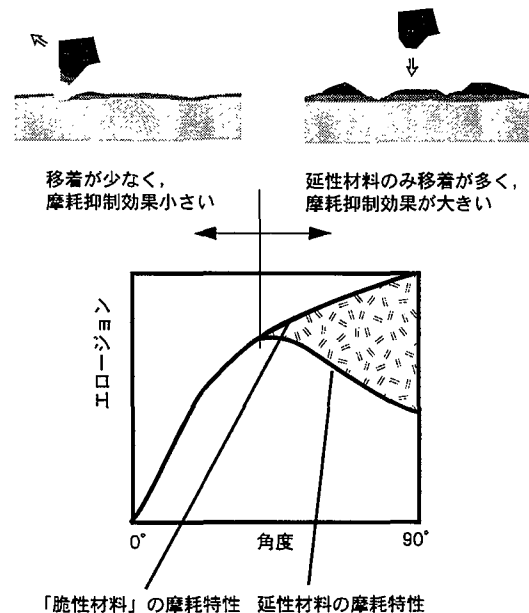


図7. 比エロージョン量と硬さ比との関係



「脆性材料」の摩擦特性 延性材料の摩擦特性

従来、脆性材料の摩擦特性と考えられていたカーブは、本来、凝着によるエロージョンのカーブである。延性材料の場合、移着物による摩擦抑制によって垂直衝突で摩擦量が減少する。

図8. 移着による摩擦抑制と摩擦角度特性

審査結果の要旨

今日の石炭焚きボイラおよび将来の石炭ガス化炉などのエネルギープラントの寿命を左右する重要な課題として粉体エロージョンがある。しかし、その現象の複雑さの故にエロージョンの機構は解明されていない。その結果、試験方法が確立されておらず、プラントの寿命予測も不可能なのが現状である。このような背景の下に著者は粉体エロージョン機構研究のために精度の高い試験方法を開発し、それを用いた実験結果に基づき粉体エロージョンによる摩耗の推定式を導いた。本論文は、この研究成果をまとめたもので、全文 8 章よりなる。

第 1 章は緒論であり、本研究の背景、目的および構成を述べている。

第 2 章では、新たに開発した試験装置について述べ、レーザードップラー法により正確な粉体の粒子速度を決定し、さらに、エロージョンによる摩耗量のその場計測が可能であることを説明している。

第 3 章では、粉体の材質とエロージョンを受ける側の材質の組み合わせによっては、粉体が摩耗面に厚く移着し摩耗率を大きく左右する事実を明らかにしている。これは重要な知見である。

第 4 章では、粉体の衝突条件によるエロージョンの摩耗量変化を調べ、石炭灰が被エロージョン材料表面に衝突する際の運動エネルギー（鉛直方向）に対する摩耗量の割合が一定になることを示し、これを比エロージョン量として定義している。

第 5 章では、エロージョンの角度特性と材料の硬さ依存性を明らかにしている。その結果、金属材料の融解熱と比エロージョン量との積が一定値になることを見出している。これは重要かつ有効な知見である。

第 6 章では、粉体の粒子と材料との硬さ比によって摩耗状態を 2 つの領域に大別できることを明らかにしている。

第 7 章では、総合的なエロージョンメカニズムの検討を行い、それが材料のアブレシブ摩耗と凝着摩耗及び粉体の移着の組み合わせによるものであることを明らかにしている。また、粉体の移着量の増加によってエロージョンの抑制が起こること、そして、その抑制効果によってエロージョンの角度特性が決定されることを明らかにし、従来個別に取り扱われていた延性材料と脆性材料のエロージョンを統一的に説明可能であることを示している。さらに、実機のための摩耗の推定式を導出している。これは、今後耐エロージョン設計を行う上で有用な成果である。

第 8 章は結論である。

以上要するに本論文は粉体エロージョンの機構を新たな試験方法により実験的に明らかにし、その結果に基づき耐エロージョン設計に必要な摩耗の推定式を提案したものであり、トライボロジー及び機械工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。