

摩耗シミュレータの開発

Development of an Erosion Simulator

林 映 里 技術開発本部基盤技術研究所熱・流体研究部
水 野 昌 幸 技術開発本部基盤技術研究所熱・流体研究部 主査 博士（工学）
長 尾 隆 央 技術開発本部基盤技術研究所熱・流体研究部
横 峯 健 彦 京都大学大学院 工学研究科 原子核工学専攻 准教授 博士（工学）

固気混相流を伴う機器のエロージョン予測・評価を目的として摩耗シミュレータを開発している。シミュレータは、① エロージョン推算モデル ② エロージョン基礎試験 ③ CFD による粒子挙動解析、から成る。推算モデルには Finnie と Bitter の式を用い、その実験定数は遠心式エロージョン試験機を用いて粒子衝突角度とエロージョン率の関係から求めた。本手法の妥当性を検証するため、12×4 列の管群試験の損傷深さと比較した結果、両者は定性的に一致し、管群の摩耗特性を評価可能であることが分かった。

In order to predict and evaluate the erosion to products that accompanies particle-gas flow, an erosion simulator has been developed. The simulator comprises the following components: (1) an erosion prediction model; (2) an erosion basic test; and (3) particle movement analysis employing CFD. In this research, the equations of Finnie and Bitter have been adopted for the erosion prediction model. The experimental fixed values in the model have been obtained with a centrifugal erosion tester. In order to ascertain the validity of this method, the simulation was compared with erosion test data for the erosion depth of a 12×4 tube array. The results showed that the analysis generally agrees with the erosion depth experimental results for the tube array, demonstrating the simulator is able to estimate the characteristics of tube array erosion.

1. 緒 言

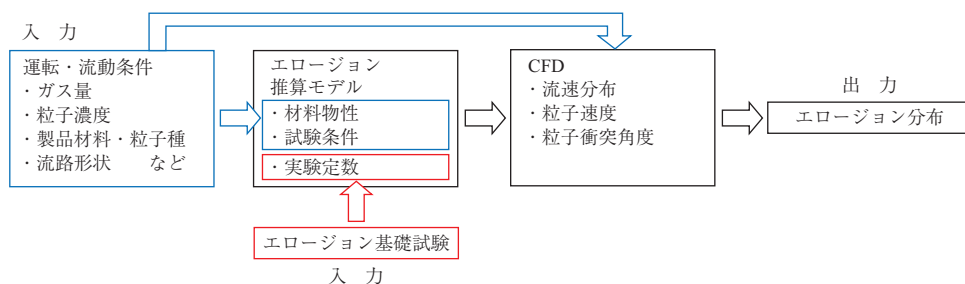
固気混相流を伴う粉体輸送管や流動層などの装置では、固体粒子が装置表面に衝突することによって摩耗（エロージョン）が発生し、損傷・故障の原因となる。エロージョン分布・進行速度を予測できれば、補修の効率化だけでなく、設計段階で装置の損傷を未然に回避することが可能になり、機器の健全性向上にも役立つ。従来のエロージョン予測を試みた研究は、その多くがエルボなどの単純な系を対象にしており、複雑形状への適用を目指したものは限定的であった。そのため本研究では複雑形状のエロージョン予測・評価を目的として、① エ

ロージョン推算モデル ② エロージョン基礎試験 ③ CFD (Computational Fluid Dynamics) による粒子挙動解析から成るエロージョン予測・評価技術、すなわち摩耗シミュレータを開発している。

今回、本予測評価手法の妥当性を検証するため、管群を模擬した装置で摩耗試験を行い、その損傷深さを本予測手法による結果と比較したので報告する。

2. エロージョン予測・評価手法

摩耗シミュレータの概要を第1図に示す。まず、装置のガス量や材料などの運転条件をエロージョン推算モデルに入力する。加えてエロージョン基礎試験によって実験定



第1図 摩耗シミュレータ概要
Fig. 1 Outline of erosion simulator

数を決め、摩耗特性を求める。これを CFD の粒子衝突部に適用することによって摩耗量分布を算出するしくみである。

2.1 エロージョン推算モデル

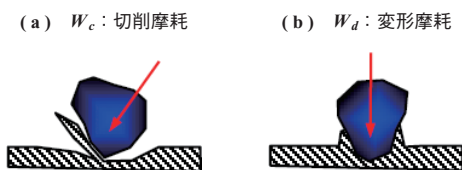
衝突粒子と被衝突材の摩耗特性は Finnie⁽¹⁾ と Bitter⁽²⁾ の式を組み合わせた摩耗推算式 (1) ~ (3)⁽³⁾ から予測する。このとき総摩耗量 W は切削摩耗量 W_c と変形摩耗量 W_d の和で表すことができる。第 2 図に示すように切削摩耗 W_c は粒子が浅い角度で衝突し材料表面を削り取り、変形摩耗 W_d は深い角度で粒子が衝突し材料表面を変形させる。それぞれの摩耗量を算出するには、衝突条件となる粒子速度、衝突角度、衝突粒子数などを代入するほか、幾つかの実験定数を求める必要がある。

$$W_c = \begin{cases} \frac{\rho_t MCV^2}{P\Psi} \left[\sin 2\alpha - \frac{2(1+m_p r_p^2/I_p)}{K} \sin^2 \alpha \right] \\ \quad \because \tan \alpha \leq \frac{K}{2(1+m_p r_p^2/I_p)} \\ \frac{\rho_t MCV^2}{P\Psi} \left[\frac{K \cos^2 \alpha}{2(1+m_p r_p^2/I_p)} \right] \\ \quad \because \tan \alpha > \frac{K}{2(1+m_p r_p^2/I_p)} \end{cases} \dots\dots\dots (1)$$

$$W_d = \frac{1}{2} \frac{\rho_t M (V \sin \alpha - K')^2}{\epsilon} \dots\dots\dots (2)$$

$$W = W_c + W_d \dots\dots\dots (3)$$

- M : 総粒子衝突量 (kg)
- W : 総摩耗量 (kg)
- ρ : 密度 (kg/m³)
- α : 粒子の衝突角度 (rad)
- V : 粒子の衝突速度 (m/s)
- m_p : 粒子の質量 (kg)
- r_p : 粒子半径 (m)
- I_p : 粒子の慣性モーメント (kg・m²)



第 2 図 摩耗モード
Fig. 2 Erosion mode

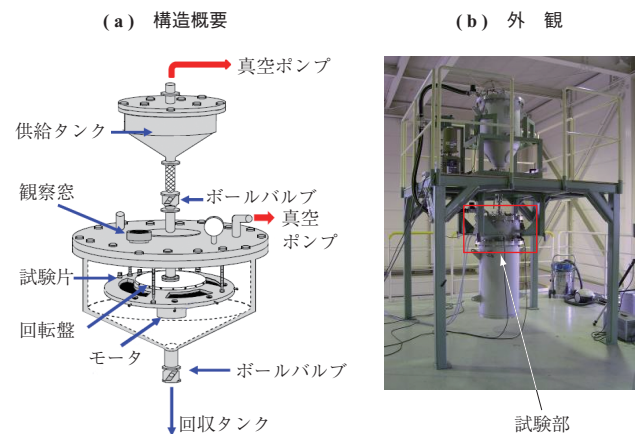
- K : 粒子が衝突する際の垂直力と水平力の比 (-) (実験定数)
- K' : 被摩耗材に生ずる応力が弾性限界に達する衝突速度 (m/s)
- P : 最大接触応力の垂直成分 (N/m²)
- Ψ : 切削摩耗定数 (-) (=2 (定数))
- ϵ : 単位体積の被摩耗材をはぎ取るのに必要なエネルギー (J/m³) (実験定数)
- C : 実験定数 (J/m³)
- 添字 t : 被摩耗材
- p : 粒子

2.2 エロージョン基礎試験

エロージョン推算モデルの実験定数 C , K および ϵ を求めるために、対象とする粒子-被摩耗材を用いて摩耗試験を行う必要がある。摩耗特性は粒子衝突速度・角度に強い影響を受けるため、本研究では減圧下で粒子を遠心力で射出することで、粒子速度・衝突角度をより正確に定量化できる遠心式エロージョン試験機⁽³⁾を新たに製作した(第 3 図)。試験では供給タンクから落下した粒子が回転盤中央に供給され、円盤内部の孔を通過するとき遠心力によって加速・射出、周囲に設置された試験片を摩耗させる。このとき、粒子射出速度は回転盤の回転速度で、衝突角度は試験片の設置角度で設定することができる。

2.3 CFD による粒子挙動解析

CFD による固気混相流解析を行い、エロージョン量の推算に必要な粒子速度、衝突角度、衝突粒子数などの衝突条件を計算する。これに 2.1 節および 2.2 節で求めた摩耗推算式を導入し、摩耗分布を求める。本研究では第 1 表に示す解析モデルを用いた。



第 3 図 遠心式エロージョン試験機
Fig. 3 Centrifugal erosion tester

第1表 解析モデル

Table 1 Analysis model	
解析ソフト	Fluent 13 *1
流体モデル	非定常・非圧縮 NS
差分スキーム	2次精度風上
乱流モデル	k-ε Realizable *2
壁面境界	壁関数
粒子モデル	粒子追跡法 (DPM) 2way
乱流粒子分散	ランダムウォーク

(注) *1: ANSYS 社 (アメリカ) 数値解析ソフト
*2: レイノズル平均モデル

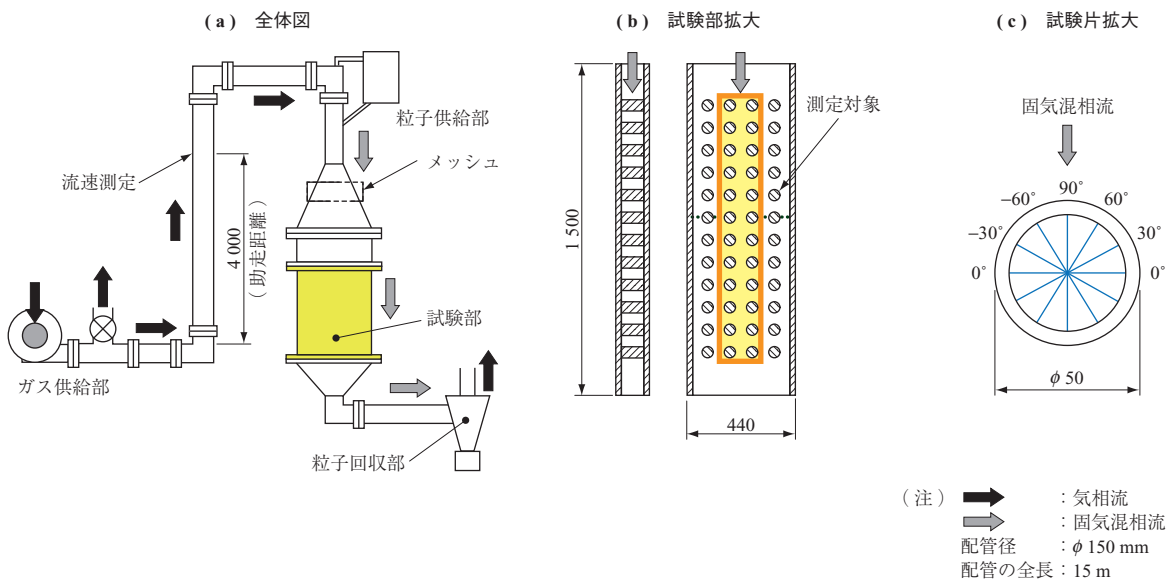
3. 結果と考察

3.1 エロージョン基礎試験

基礎試験と後述する管群試験は同じ灰-炭素鋼の組合せで行った。供試体と基礎試験で得られたエロージョン率を第4図に示す。エロージョン率は損耗質量に対する衝突粒子質量の比で定義する。粒子衝突速度 50 m/s, 試験雰囲気は常温 50 ± 40 Pa とした。第4図から衝突角 30 度付近にピークをもつことが分かる。第4図の実線は摩擦推算式を今回の実験値にフィッティングしたものであるが、低角度側でかい離する傾向が認められる。これは、粒子射出面に対する試験片投影面積の小ささから、低角度の試験片への絶対的な衝突量が少ないためと考えられる。

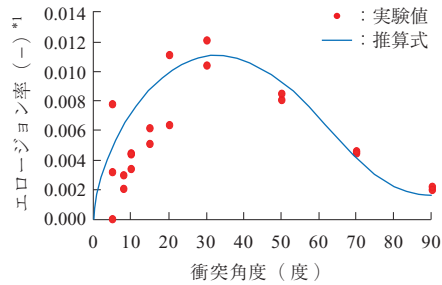
3.2 シミュレータ精度検証

摩擦シミュレータの精度を検証するため、第5図に示す 12 × 4 列の管群において摩擦試験を行い、損傷深さを解析と比較した。試験条件を第2表に示す。なお、壁面の影響を避けるため、計測は中央2列について行った。

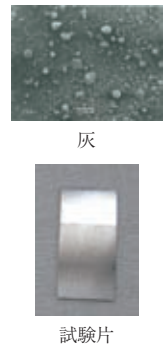


第5図 管群摩擦試験機 (単位: mm)
Fig. 5 Tube array erosion tester (unit: mm)

(a) 摩擦特性曲線



(b) 供試体



(注) *1: g/kg (損耗質量/衝突粒子量)
C = 13
K = 45

第4図 基礎試験

Fig. 4 Basic test

第2表 管群試験条件

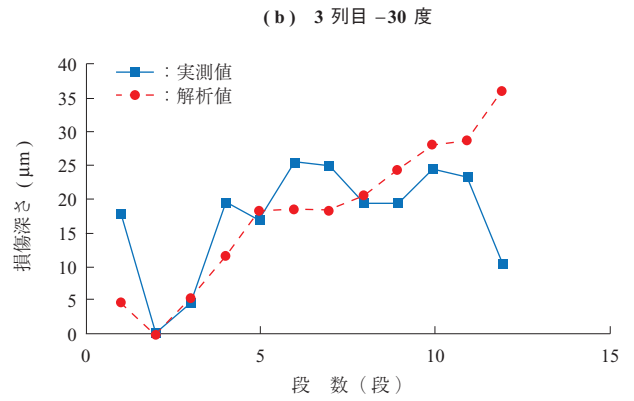
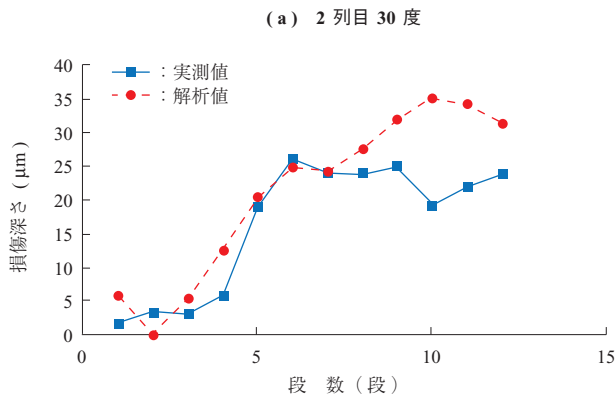
Table 2 Tube array test conditions

項目	単位	仕様
試験雰囲気	-	常温・常圧
ローディング比 *1	-	5.7×10^{-2}
入口空気流速	m/s	10
総供給粒子量	kg	5 000
質量平均粒子径	μm	42
粒子・被摩耗材	-	灰・炭素鋼

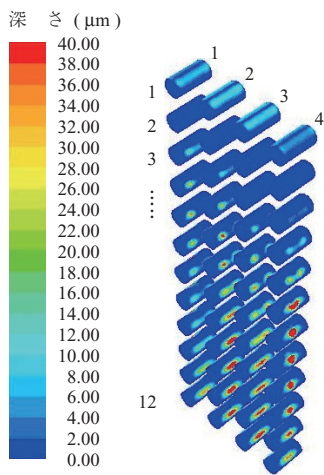
(注) *1: 粒子質量流量/気相質量流量

管群試験結果を第6図に示す。最も摩擦が顕著だった ± 30 度の管長手方向の損傷深さを、レーザ変位計で計測し、損傷深さを平均化して示している。

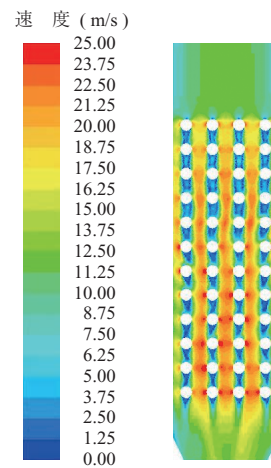
第6図は測定結果とともに、解析による平均損傷深さを示す。このときの損傷深さ分布を第7図に示す。解析の損



第 6 図 平均損傷深さ
Fig. 6 Average erosion depth



第 7 図 損傷深さ分布
Fig. 7 Erosion depth distribution



第 8 図 ガス速度分布
Fig. 8 Gas velocity distribution

傷深さは、微小面積のエロージョン質量を被摩耗材密度で割ることで算出した。第 7 図から、全体的に粒子が流入する 1 段目は大量の粒子が衝突し、2 段目は 1 段目で左右に回り込んだ粒子が側面を通過するため最も摩耗が少なく、3 段目以降で再度粒子が衝突し始め、下段側は摩耗量が増す傾向があることが分かる。これは第 8 図に示す流速分布から、下段側は流速が速いため、摩耗を促進したと考えられる。

試験と解析を比較すると、損傷深さがほぼ一致し、1 段目は流入粒子で摩耗し、2 段目は粒子が側面に回り込むことで摩耗が減少し、後段側で摩耗量が増す傾向も共通した。ただし後段側ではやや解析値が大きい。これは今回質量平均粒子径の単一粒子のみで解析を行ったため、流れに乗りやすい小径粒子が考慮されておらず、試験より衝突量を高めに見積もったことで摩耗が増大したと考えられる。

4. 結 言

本研究では摩耗シミュレータを開発し、管群摩耗試験を

対象に検証を行った。これによってエロージョン深さの予測値が実験結果をおおよそ模擬できていることが分かった。今後は本シミュレータを種々の粒子・被摩耗材の組合せやさまざまな形状などに適用することで、解析精度を把握するとともに、より実際的な摩耗予測ツールとしての確立が課題となる。

参 考 文 献

- (1) I. Finnie : Erosion of Surfaces by Solid Particles
Wear 3 (1960) pp. 87 - 103
- (2) J. Bitter : A Study of Erosion Phenomena-Part 1 and 2
Wear 6 (1963) pp. 5 - 21 and 169 - 190
- (3) A. Shimizu, Y. Yagi, H. Yoshida and T. Yokomine : Erosion of Gaseous Suspension Flow Duct due to Particle Collision (I)
Journal of Nuclear Science and Technology Vol. 30 No. 9 (1993) pp. 881 - 889