

# SCS6とサーメット系溶射皮膜のスラリー摩耗深さ予測技術

杉山 憲一\* 服部 修次\*\*

## Wear Depth Prediction by Slurry Jet Tests on Thermal Sprayed Cermet Layers

by Kenichi SUGIYAMA, & Shuji HATTORI

A novel method of predicting erosion volume loss of SCS6 and thermal sprayed cermet layers by slurry jet tests has been developed, offering a solution for a serious slurry erosion problem caused by sand particles in China's Yellow River Pumping Station. This method allows selection of erosion resistant materials and determination of maintenance sequences. An equation has been compiled which uses analytical results of sand particle behavior and measurement results on surface profiles of 60  $\mu\text{m}$  (mean diameter) silica sand specimens. Prediction by this equation showed an almost perfect match with test results. This equation makes it possible to predict wear patterns of 30  $\mu\text{m}$  (mean diameter) sand. It was also revealed that a threshold value exists as for kinetic energy of colliding particles which contribute to erosion. This threshold value was found to increase in proportion to Vickers hardness.

**Keywords:** Slurry erosion, Thermal spraying, Pump, Impeller, Prediction of slurry wear, Yellow River, Numerical analysis, Cermet, Slurry jet test, Erosion resistant materials

### 1. はじめに

多量の土砂を含む中国の大河流域で使用される河川水くみ上げポンプなどの流体機械では、流体中に含まれる微細な固体粒子が材料表面に繰り返し衝突することによりスラリー摩耗が発生し深刻な問題になっている。特にポンプの羽根車などはスラリー流速が大きいので、スラリー摩耗を受けやすい部材の一つである。

一方、耐スラリー摩耗対策としては、硬いサーメット系溶射が用いられるケースが増えており、耐スラリー摩耗材料として期待されている<sup>1, 2)</sup>。しかし、サーメット系溶射皮膜のスラリー摩耗特性に影響を及ぼす流速、スラリー濃度、衝突角度などの因子についての研究<sup>3, 4)</sup>は、金属材料と比較すれば少なく未解明な部分も多い。また、羽根車などのスラリー摩耗深さ分布を予測することは、溶射材料の選定、溶射部位の決定の観点から非常に重要である。

著者らは前報<sup>5)</sup>において、噴流式スラリー摩耗試験装置における粒子の流れ挙動解析と、スラリー摩耗試験結果から、簡易的に金属材料のスラリー摩耗量に対する衝突角度依存性を求める手法を報告した。しかし、試験角

度90°の粒子挙動解析だけを使用しており、低角度の粒子挙動解析も行って予測精度を向上させる必要がある。また、サーメット系溶射皮膜のような脆性材料への適用の可否は未検討であった。

本報では、脆性材料である3種類のサーメット系溶射皮膜について、摩耗深さ予測手法の適用を試みた結果を報告する。

### 2. 試験方法

#### 2-1 噴流式スラリー摩耗試験

図1に評価に用いた噴流式スラリー摩耗試験装置の概略図を示す。装置は、試験片、試験片の取付け台、スラ

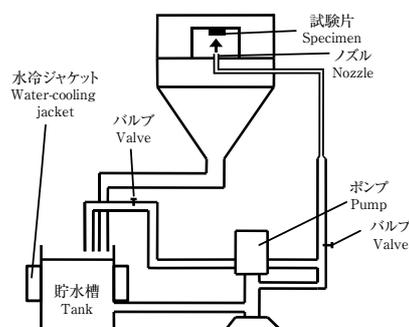


図1 噴流式スラリー摩耗試験装置概略図  
Fig. 1 Slurry jet test apparatus

\* (株)荏原総合研究所 材料研究室

\*\* 福井大学大学院工学研究科 工学博士

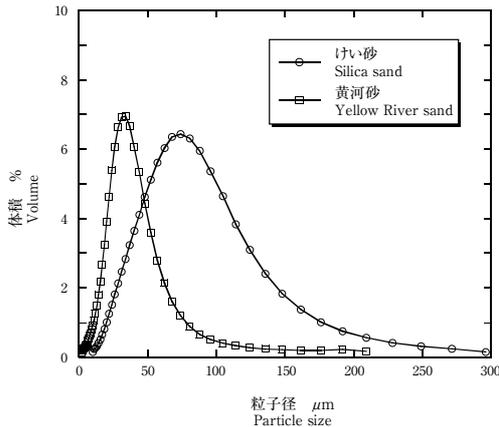
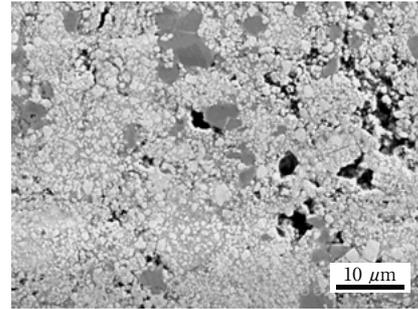


図2 試験用砂の粒子径分布 (平均粒子径: けい砂  $63.2 \mu\text{m}$ , 黄河砂  $29.7 \mu\text{m}$ )

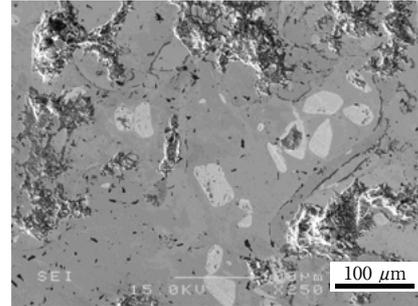
Fig. 2 Particle size distribution (Mean dia. of silica sand and Yellow River sand are  $63.2 \mu\text{m}$  and  $29.7 \mu\text{m}$  respectively)

リーを噴射するためのノズル, 水に固体粒子を混合するための貯水槽, スラリーを搬送するためのポンプから構成されている。試験片表面から  $25 \text{ mm}$  離れた位置に対向して取付けた内径  $3 \text{ mm}$  のノズルからスラリーを噴出させて試験片表面に衝突させ損傷を与えた。試験片表面はスラリーの噴出方向と  $90^\circ$  あるいは  $30^\circ$  になるよう取付け, スラリー流速は  $20 \text{ m/s}$ ,  $30 \text{ m/s}$ ,  $40 \text{ m/s}$  とした。流速は, ノズルから噴出される水を別途準備した水槽に貯め, 水が所定量貯まるまでの時間を計測し決定した。また貯水槽に水冷ジャケットを設けスラリー温度を  $20 \sim 35^\circ\text{C}$  の範囲に保持した。スラリーは,  $80 \text{ L}$  の水道水にけい砂 ( $d_{50} = \text{約 } 60 \mu\text{m}$ ,  $d_{50}$ : 累積質量が  $50\%$  となる粒子径), 又は黄河砂 ( $d_{50} = \text{約 } 30 \mu\text{m}$ ) を  $1\%$  混合したものを使用した。図2に各砂の粒度分布を示す。化学成分から計算したけい砂, 黄河砂の密度はそれぞれ  $2300 \text{ kg/m}^3$ ,  $2500 \text{ kg/m}^3$  である。

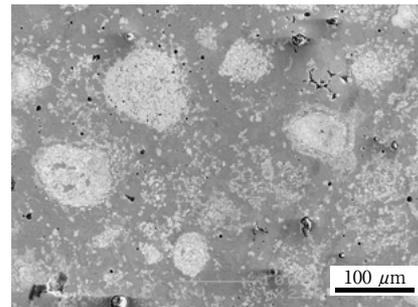
試験材料には河川水くみ上げポンプの羽根車に使用されているマルテンサイト系ステンレス鋼 SCS6 (Fe-13Cr-4Ni 鋼) と 3 種類のサーメット系材料である 73WC-20Cr-7Ni,  $56\text{W}_2\text{C-NiCr}$ , 41WC-NiCoCr を準備した。サーメット系材料は, それぞれ HP/HVOF (Hi pressure/hive-locity oxygen fuel), アーク溶射, フレーム溶射溶融を用いて SCS6 母材上に皮膜厚さ約  $0.5 \text{ mm}$  で溶射し, 試験面をラップ加工したものを試験片とした。各試験材料のビッカース硬度は, SCS6: 285, 73WC-20Cr-7Ni: 1190,  $56\text{W}_2\text{C-NiCr}$ : 509, 41WC-NiCoCr: 623 である。各皮膜における試験前表面 SEM 像を写真1に示す。写真1中の白い部分が WC あるいは  $\text{W}_2\text{C}$  である。 $56\text{W}_2\text{C-NiCr}$  は他の材料と比較して空孔が多い。



73WC-20Cr-7Ni  
(HP/HVOF 溶射 HP/HVOF spraying)



$56\text{W}_2\text{C-NiCr}$   
(アーク溶射 Arc spraying)



41WC-NiCoCr  
(フレーム溶射溶融 Flame spraying and fusing)

08-61 01/219

写真1 各溶射皮膜断面の SEM 写真  
Photo 1 SE images of thermal sprayed materials

試験片の摩耗形状は所定の試験時間ごとに表面粗さ計〔株東京精密製サーフコム 1400D-3DF-12, 精度  $0.01 \mu\text{m}$ 〕を用いて測定した。

## 2-2 粒子挙動解析

今回の研究には前報<sup>5)</sup>での解析手法が必要であるので, その概要について簡単に述べる。

汎用熱流体解析ソフト Star-CD を用いて水だけの単相流解析で得た定常解を基に, ラグランジェ法を用いて個々の粒子の挙動を追跡する解析を行った。ラグランジェ法を用いた解析では, 粒子の抗力係数は単一粒子に対するモデルを用い, 液体から粒子への抗力は考慮するが, 粒子から水への抗力及び粒子自体の回転は考慮しなかった。また, 粒子濃度が低いため粒子間の相互作用も考慮

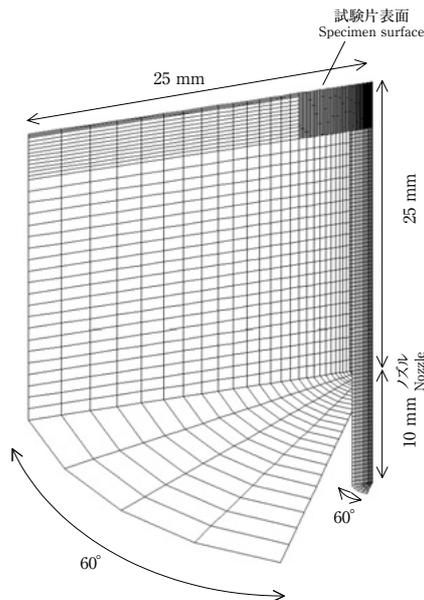


図3 計算モデル (試験角度: 90°)  
 Fig. 3 Calculation model (impingement angle : 90 deg.)

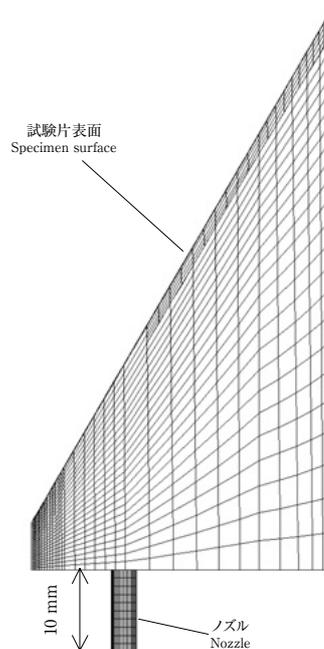
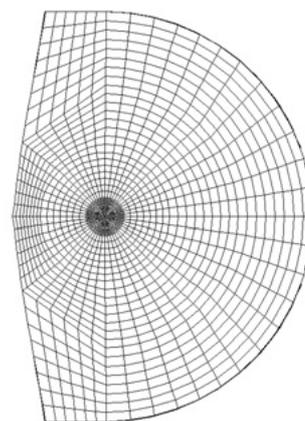


図4 計算モデル (試験角度: 30°)  
 Fig. 4 Calculation model (impingement angle : 30 deg.)



しなかった<sup>6)</sup>。単相流解析には乱流モデルとして標準  $k-\epsilon$  モデルを用いた。

粒子径 10, 30, 50, 80, 120, 160, 200, 300  $\mu\text{m}$  の各場合について粒子をノズル内部に水と同じ初期速度 20 m/s, 30 m/s, 40 m/s を与えて計算を開始した。粒子の材料表面への衝突回数は1回とし、1回目に衝突した時点でその粒子の解析を中止した。粒子の密度については、けい砂は 2300  $\text{kg}/\text{m}^3$ 、黄河砂は 2500  $\text{kg}/\text{m}^3$  とほとんど差がないため、本試験で取り扱う粒子の密度は 2300  $\text{kg}/\text{m}^3$  とした。

図3, 4にそれぞれ試験角度 90°, 30° の解析に用いたメッシュ分割図を示す。試験角度 90° の解析領域は軸対象として、角度 60° で周期境界とした。

ノズル出口形状を試験片表面に投影した場合にノズルの中心に当る部分を試験片の中心と定義した。また、試験角度 30° については、座標上、噴流上流側を負、下流側を正とした。

### 2-3 摩耗深さ予測式の導出方法

2-2節で得られた粒子挙動解析結果と、スラリー摩耗試験結果からスラリー摩耗深さ予測式を導出する。

Bitter<sup>7)</sup> は摩耗量が粒子の運動エネルギーに比例することを報告しているので、粒子の衝突位置 X における摩耗速度を  $W(X)$  (mm/s)、固体粒子の運動エネルギーを  $E$  (N·m) とすれば以下のように表せる。

$$W(X) = C \times E = C \times \frac{1}{2} \times m \times V^2 \dots\dots\dots (1)$$

$C$  は定数、 $m$  は粒子の質量、 $V$  は衝突時の粒子速度である。スラリー粒子は様々な大きさの分布をもっているために、それぞれの粒子径について角度依存性を検討することは困難である。したがって、平均粒子径を基準粒子径 ( $D_0=80 \mu\text{m}$ )、ノズルからの噴出速度を基準速度 ( $V_0=20 \text{ m/s}$ ) として、粒子 1 個当りの体積減少量  $Y$  ( $\text{mm}^3$ ) と衝突角度  $\alpha$  (deg.) の関係を以下の 3 次関数で表現する。

$$Y = a \cdot \alpha^3 + b \cdot \alpha^2 + c \cdot \alpha \dots\dots\dots (2)$$

この式の  $a, b, c$  は未知数である。3 次関数を用いたのは、高角度でピークをとる曲線と低角度でピークをとる曲線のどちらも表すことができるためである。 $Y$  は材料の固有値であり式 (1) の  $C$  に相当する。なお、粒子形状の影響を定式化することは困難であるため予測式に

は取り入れていない。したがって、試験及び計算では実際の環境と同じ性状の粒子を取り扱う必要がある。

また、摩耗量は粒子径ごとに分けて考える必要があるため、10.09～296  $\mu\text{m}$ の間を40区間に分類した。衝突位置Xにおける摩耗速度 $W(X)$ は、各粒子の寄与を考慮して次式のように表される。

$$W(X) = \sum_{D=10.09}^{296} (a \cdot \alpha_{D,X}^3 + b \cdot \alpha_{D,X}^2 + c \cdot \alpha_{D,X}) \cdot (D/D_0)^3 \cdot (V_{D,X}/V_0)^2 \cdot F_{D,X} \dots\dots (3)$$

( $D=10.09 \sim 296$ )

$\alpha_{D,X}$ は衝突角度 (deg.)、 $D$ は粒子径 ( $\mu\text{m}$ )、 $V_{D,X}$ は粒子速度 (m/s)、 $F_{D,X}$ は衝突頻度 [ $1/(\text{mm}^2 \cdot \text{s})$ ]である。質量は $D_0$ 、粒子速度は $V_0$ を用いて無次元化したため粒子密度は式(3)から消去される。位置Xをスラリー試験後の摩耗面から3箇所選び、連立方程式を立てることにより $a$ 、 $b$ 、 $c$ の値を求める。

位置Xについては、(1)すべての粒子径の粒子が衝突す

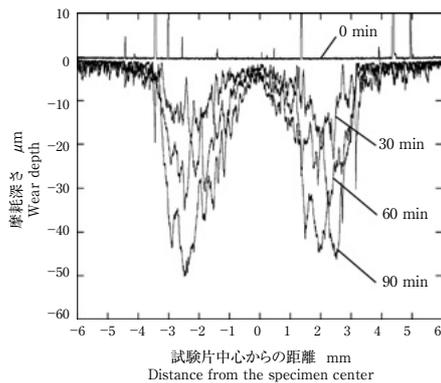
る位置、(2)低角度から高角度まで広範囲の衝突角度で粒子が衝突する位置となるように選定した。したがって、試験角度 $90^\circ$ においては試験片中心からの距離が0.2 mm、1.8 mmの2点、試験角度 $30^\circ$ においては $X = -2$  mmの1点の合計3点を選んだ。

### 3. 試験結果及び考察

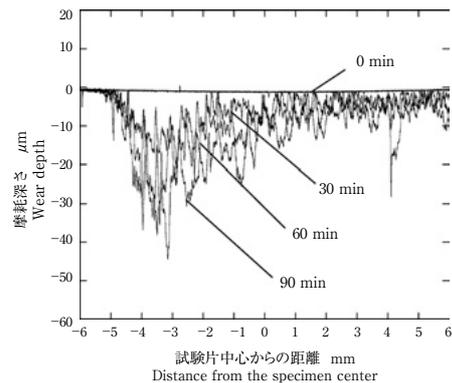
#### 3-1 噴流式スラリー摩耗試験結果

図5は試験角度 $90^\circ$ 、流速30 m/s、けい砂濃度1%の条件における41WC-NiCoCrの各試験時間での試験片摩耗面形状及び試験片表面の中心から1.8 mmまでの各衝突位置における試験時間と摩耗深さである。摩耗形状は、粗さの中心を通るような滑らかな曲線で近似し摩耗深さを読み取った。噴流の中心よりもその周囲が摩耗する試験装置特有のW字型形状が観察される。また、摩耗深さは試験時間に比例してほぼ直線的に増加する。

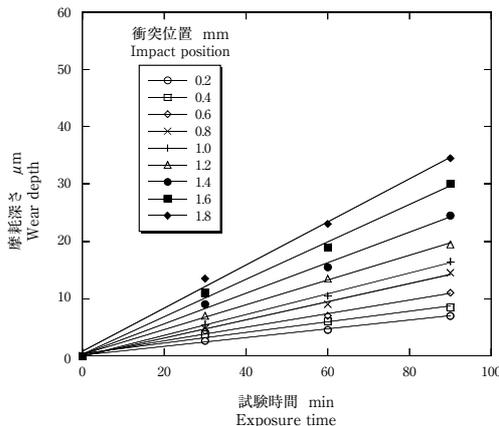
図6は試験角度 $30^\circ$ 、流速30 m/s、けい砂濃度1%の



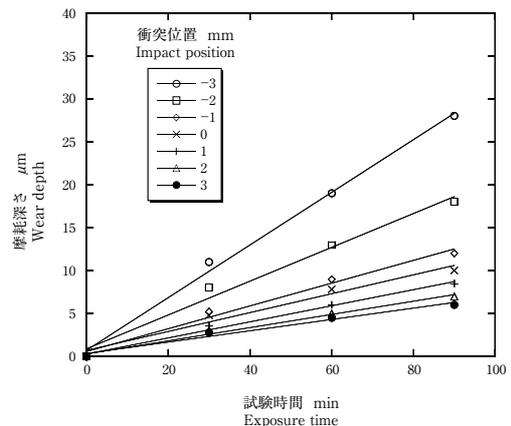
(a) 各試験時間における摩耗形状  
(a) Surface profiles at each exposure time



(a) 各試験時間における摩耗形状  
(a) Surface profiles at each exposure time



(b) エロージョン曲線  
(b) Erosion curve at each position on specimen surface



(b) エロージョン曲線  
(b) Erosion curve at each position on specimen surface

図5 41WC-NiCoCrのスラリー摩耗試験結果 (流速: 30 m/s, けい砂濃度: 1%, 試験角度:  $90^\circ$ )

Fig. 5 Slurry jet test result of 41WC-NiCoCr (flow velocity: 30 m/s, silica sand: 1%, impingement angle: 90 deg.)

図6 41WC-NiCoCrのスラリー摩耗試験結果 (流速: 30 m/s, けい砂濃度: 1%, 試験角度:  $30^\circ$ )

Fig. 6 Slurry jet test result of 41WC-NiCoCr (flow velocity: 30 m/s, silica sand: 1%, impingement angle: 30 deg.)

条件における41WC-NiCoCrの各試験時間での試験片摩耗面形状及び各衝突位置における試験時間と摩耗深さの関係である。各衝突位置において、摩耗深さは試験時間にほぼ比例して直線的に増加する。

他の材料の結果については省略するが、41WC-NiCoCrと同様に摩耗深さは試験時間に比例してほぼ直線的に増加する。

### 3-2 粒子挙動解析結果

図7は粒子挙動解析から得られた試験角度 $90^\circ$ 、流速30 m/sにおける衝突位置と衝突速度の関係、衝突位置と衝突角度の関係である。衝突速度は試験片中心付近では小さく、中心から離れるに従って大きくなる。また、衝突位置が同じ場合、粒子径が小さいほど衝突速度は小さい。衝突角度は試験片中心付近では $90^\circ$ に近いが、中心から離れるほど低角度で衝突する。また、衝突位置が同じ場合、粒子径が小さいほど衝突角度は小さい。

図8は粒子挙動解析から得られた試験角度 $30^\circ$ 、流速30 m/sにおける衝突位置と衝突速度の関係、衝突位置と衝突角度の関係である。衝突速度はいずれの粒子径で

あっても噴流上流側の衝突位置 $-3.0 \sim -2.5$  mmの範囲で極小値を示した後、下流側に移動するに従って大きくなる。また、衝突位置が同じ場合、粒子径が小さいほど衝突速度は小さい。衝突角度は噴流上流側では約 $50^\circ$ （粒子径10  $\mu\text{m}$ ）であり、衝突位置が下流側に移動するほど低角度で衝突する。また、衝突位置が同じ場合、粒子径が小さいほど衝突角度は小さい。

ここで、“材料の摩耗量に寄与する衝突粒子の運動エネルギー”について考察する。一例として、41WC-NiCoCrを取り上げる。図9に粒子挙動解析結果から求めた流速30 m/s及び40 m/sにおける衝突角度 $90^\circ$ 、衝突位置1.8 mmでのけい砂の運動エネルギー分布を示す。横軸は粒子1個当たりの運動エネルギー、左縦軸は粒子径、右縦軸は粒子1個当たりの運動エネルギーに衝突頻度 $[1/(\text{mm}^2 \cdot \text{s})]$ を掛けた値である。衝突位置に供給される単位時間、単位面積当りにおける全粒子の運動エネルギーの総和は、流速30 m/s、40 m/sにおいてそれぞれ24094  $[\text{N} \cdot \text{m}/(\text{mm}^2 \cdot \text{s})]$ 、58738  $[\text{N} \cdot \text{m}/(\text{mm}^2 \cdot \text{s})]$ である。したがって、摩耗量が運動エネルギーに比例すると仮定した場合、

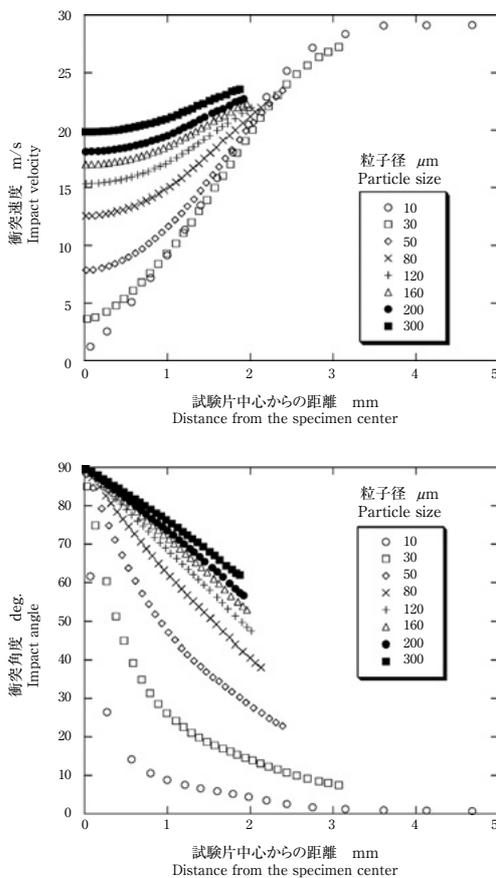


図7 粒子挙動解析結果（流速：30 m/s、試験角度： $90^\circ$ ）

Fig. 7 Calculation results (flow velocity : 30 m/s, impingement angle : 90 deg.)

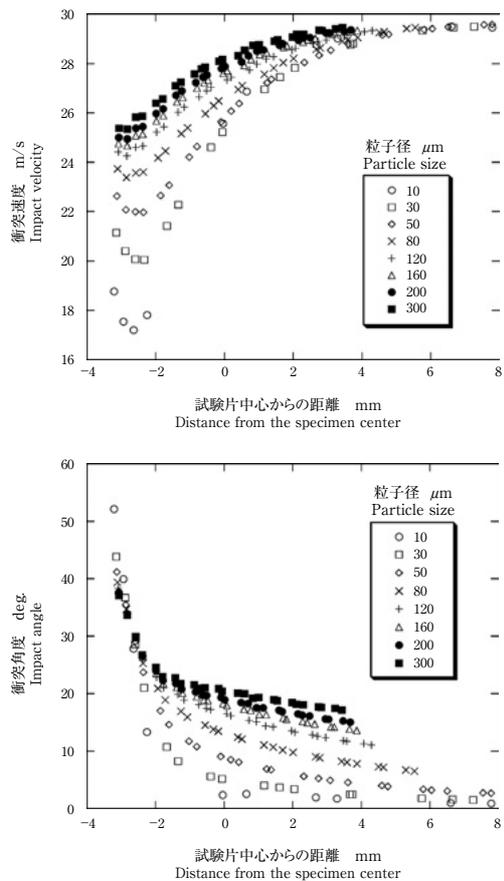


図8 粒子挙動解析結果（流速：30 m/s、試験角度： $30^\circ$ ）

Fig. 8 Calculation results (flow velocity : 30 m/s, impingement angle : 30 deg.)

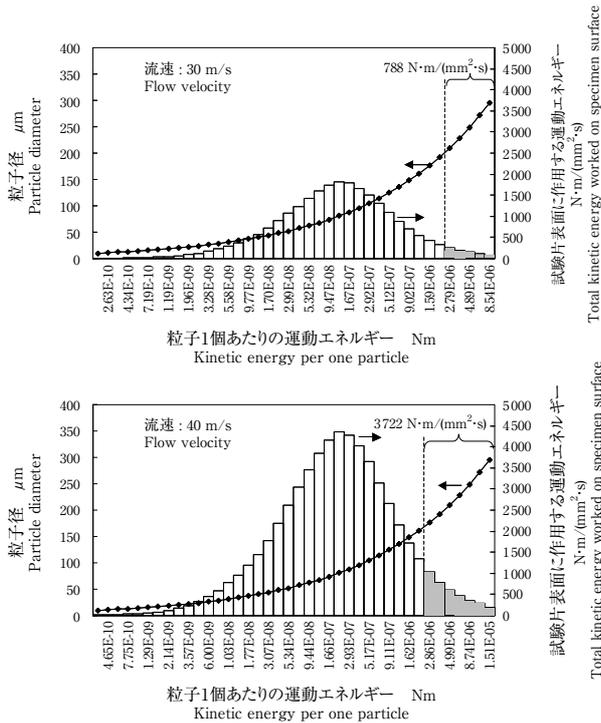


図9 衝突粒子の運動エネルギー分布（衝突位置：1.8 mm，  
けい砂濃度：1%，試験角度：90°）

Fig. 9 Distribution of kinetic energy on impact particles (impact  
position : 1.8 mm, silica sand : 1%, impingement angle : 90 deg.)

衝突位置1.8 mmにおける流速30 m/s, 40 m/sでの摩耗速度の比は24094 : 58738 = 1 : 2.4となるはずであるが，試験結果から得られた比は21 ( $\mu\text{m}/\text{h}$ ) : 93.5 ( $\mu\text{m}/\text{h}$ ) = 1 : 4.5となる。

Wang<sup>8)</sup>は流体機械において，ある粒子径以下の砂の衝突はスラリー摩耗にほとんど寄与しないことを報告している。そこで本研究でも「ある運動エネルギー以下の衝突粒子は材料に損傷を与えない」とすると， $2.8 \times 10^{-6}$  ( $\text{N}\cdot\text{m}$ )以上の範囲における流速30 m/s, 40 m/sでの運動エネルギーの総和（図9中棒グラフのハッチング部分）はそれぞれ788 [ $\text{N}\cdot\text{m}/(\text{mm}^2\cdot\text{s})$ ]，3722 [ $\text{N}\cdot\text{m}/(\text{mm}^2\cdot\text{s})$ ]で，その比は1 : 4.7となり，前述の試験結果から得られた比1 : 4.5とほぼ一致する。したがって，下限値以上の運動エネルギーの総和が摩耗速度に比例すると考えると，下限値は $2.8 \times 10^{-6}$  ( $\text{N}\cdot\text{m}$ )となる。その他の材料についても同様の方法で下限値を求めることができる。

前記の方法で求めた各試験材料の運動エネルギー下限値とビッカース硬さの関係を図10に示す。硬さと運動エネルギーは比例関係を示す。比例関係となる理由は現在のところ不明であるが，未知の材料においてもビッカース硬さから下限値を推定できるので工業的な利用

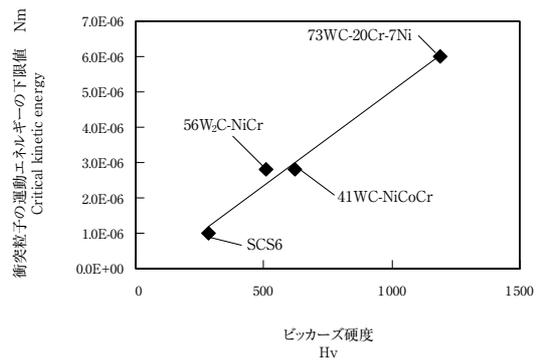


図10 材料のビッカース硬度と衝突粒子の運動エネルギー下限値の関係

Fig. 10 Relation between Vickers hardness and critical kinetic energy (60  $\mu\text{m}$  silica sand)

価値がある。

運動エネルギーの下限値の存在を確認するため，73WC-20Cr-7Niにおいて，解析上，すべての衝突粒子の運動エネルギーが下限値 $6.0 \times 10^{-6}$   $\text{N}\cdot\text{m}$ 以下である条件（黄河砂1%，流速20 m/s，衝突角度90°，試験時間300分）でスラリー摩耗試験を行った。図11に試験後の摩耗面形状を示すが，ほとんど摩耗しておらず，下限値は存在すると考えられる。

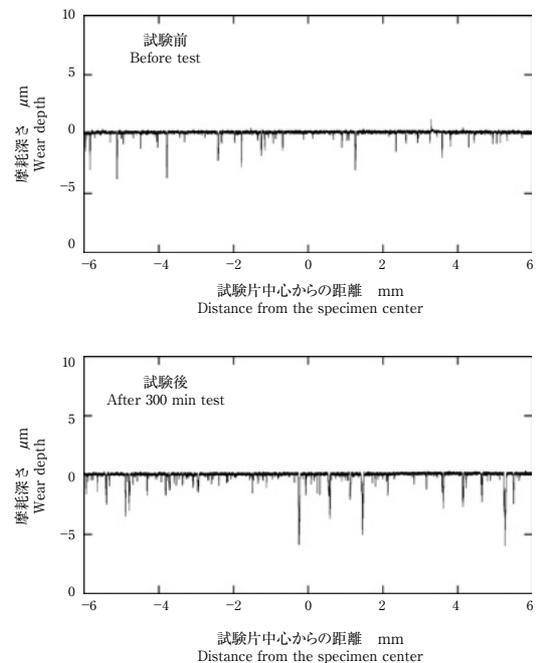


図11 73WC-20Cr-7Niの試験後の摩耗形状（流速：20 m/s，  
黄河砂濃度：1%，試験角度：90°）

Fig. 11 Surface profiles of 73WC-20Cr-7Ni (flow velocity : 20 m/s,  
Yellow River sand : 1%, impingement angle : 90 deg.)

### 3-3 摩耗深さ予測式の導出及びスラリー摩耗と衝突角度の関係

流速30 m/sの試験結果を用いて、3-2節で求めた運動エネルギーの下限値以下の粒子を式(3)から除き、連立方程式を解くことにより算出した $a$ 、 $b$ 、 $c$ の値を表1に示す。これらの値を式(3)に代入することにより摩耗速度を算出し、摩耗深さを予測することができる。

算出した $a$ 、 $b$ 、 $c$ の値を式(2)に代入し、基準粒子径80  $\mu\text{m}$ 、基準速度20 m/sにおける衝突粒子1個による各試験材料の体積減少量と衝突角度の関係を図12に示す。ピッカース硬さが大きい材料ほど体積減少量の極大値を示す衝突角度は高く試験材料中最も硬い73WC-20Cr-7Niは約80°である。これは矢吹ら<sup>3)</sup>の結果と一致する。

金属材料であるSCS6とサーメット系溶射皮膜の摩耗状態を観察した。写真2にSCS6の試験後摩耗面のSEM像を示す。(a)は試験角度90°、衝突位置0.2 mm、(b)は試験角度30°、衝突位置-2.0 mmである。前述の粒子挙動解析によると、(a)の領域において粒子は25~90°で衝突しており、大きい粒子ほど高角度側で衝突する傾向を示す。したがって、主に変形損傷 (deformation

表 各材料の $a$ 、 $b$ 、 $c$ の値  
Table Values of  $a$ 、 $b$ 、 $c$

	$a$	$b$	$c$
SCS6	7.09E-15	- 2.12E-12	1.32E-10
73WC-20Cr-7Ni	- 9.20E-16	8.20E-14	5.39E-12
56W <sub>2</sub> C-NiCr	1.85E-15	- 8.39E-13	7.84E-11
41WC-NiCoCr	- 6.21E-15	3.91E-13	1.89E-11

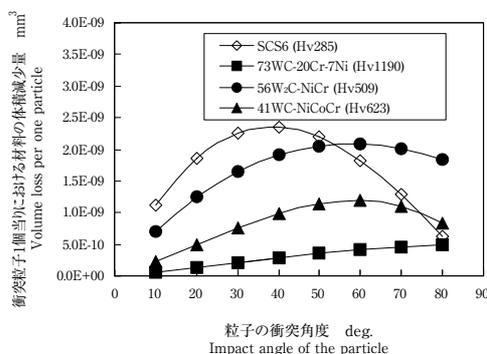
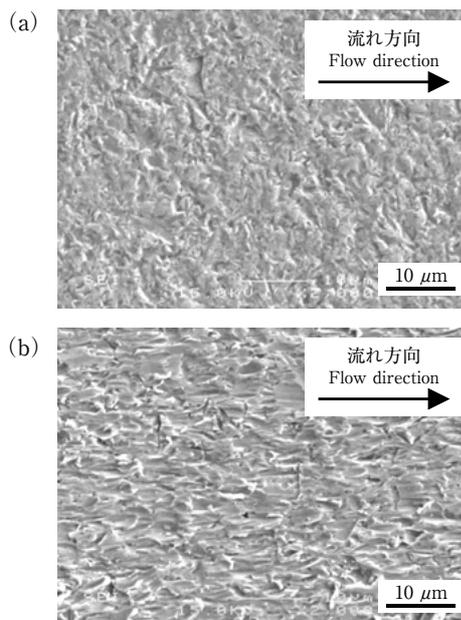


図12 粒子の衝突角度とスラリー摩耗による材料の体積減少量の関係 (粒子径: 80  $\mu\text{m}$ , 衝突速度: 20 m/s)

Fig. 12 Relation between impact angle of the particle and calculated volume loss per one particle (particle diameter: 80  $\mu\text{m}$ , impact velocity: 20 m/s)



08-61 02/219

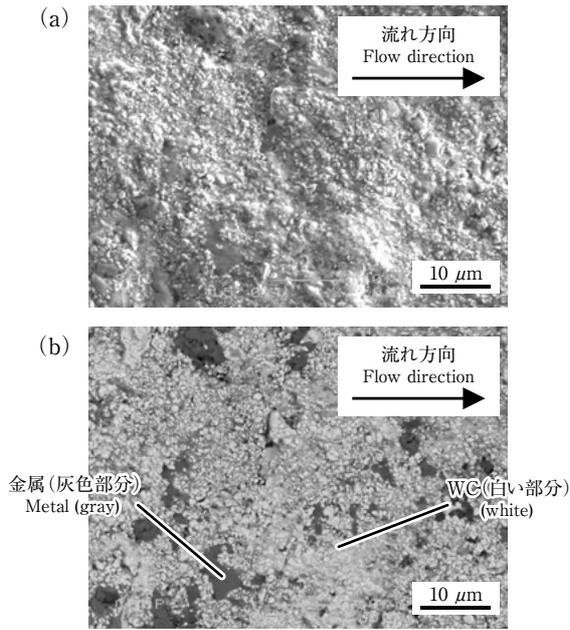
写真2 90分間試験後のSCS6の摩耗面のSEM写真 (a) 衝突位置: 0.2 mm, 試験角度90°, (b) 衝突位置: -2.0 mm, 試験角度: 30° (流速20 m/s, けい砂濃度: 1%)

Photo 2 SE images of SCS6 surface after 90 min; (a) impact position: 0.2 mm, impingement angle: 90 deg., (b) impact position: -2.0 mm, impingement angle: 30 deg. (flow velocity: 20 m/s, Silica sand: 1%)

wear)<sup>9)</sup>によって形成されたくぼみが観察される。一方(b)の領域において粒子は10~25°で衝突しているため、主に切削損傷 (cutting wear)<sup>9)</sup>によって形成された切削痕が観察される。

次に、写真3に脆性材料である73WC-20Cr-7Niについて試験角度30°、衝突位置-2.0 mmにおける試験後摩耗面のSEM像と反射電子像を示す。反射電子像の白い部分はWC粒子である。SCS6のように明らかな切削損傷と判断できる形態は観察されない。しかし、WC粒子の周りがくぼんでいることからWC粒子の周りの金属バインダが摩耗したあとWCが脱落するか、あるいは大きい粒子の衝突によりWC粒子ごと取り去られることによって摩耗が進行すると思われる。

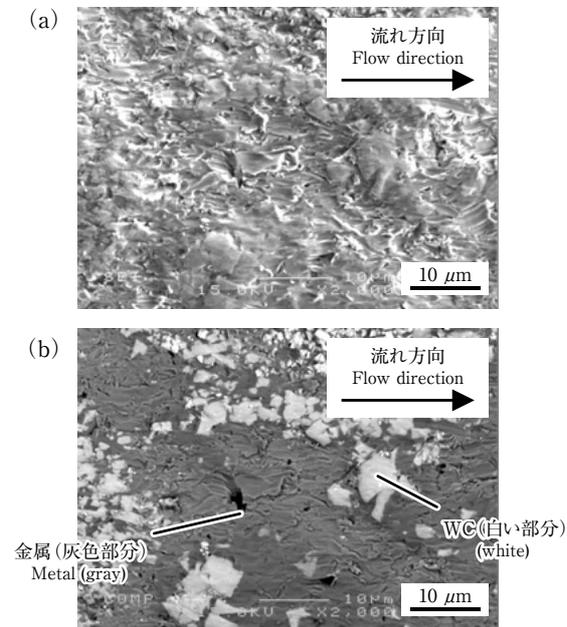
次に、SCS6と73WC-20Cr-7Niの中間程度の硬さである41WC-NiCoCrについて試験角度30°、衝突位置-2.0 mmにおける試験後摩耗面のSEM像と反射電子像を写真4に示す。73WC-20Cr-7NiよりWC含有量が少なく金属バインダが多い皮膜であるため、金属バインダ部にはSCS6に似た表面状態が観察される。主に、金属バインダが摩耗した後WC粒子が脱落することにより摩耗が進行すると思われるが、金属バインダが多いため、損傷ピークはSCS6と73WC-20Cr-7Niの中間付近に存在する。



08-61 03/219

**写真3** 300分間試験後の73WC-20Cr-7Niの (a) SEM写真, (b) 反射電子像 (試験角度: 30°, 衝突位置: -2.0 mm, 流速: 20 m/s, けい砂濃度: 1%)

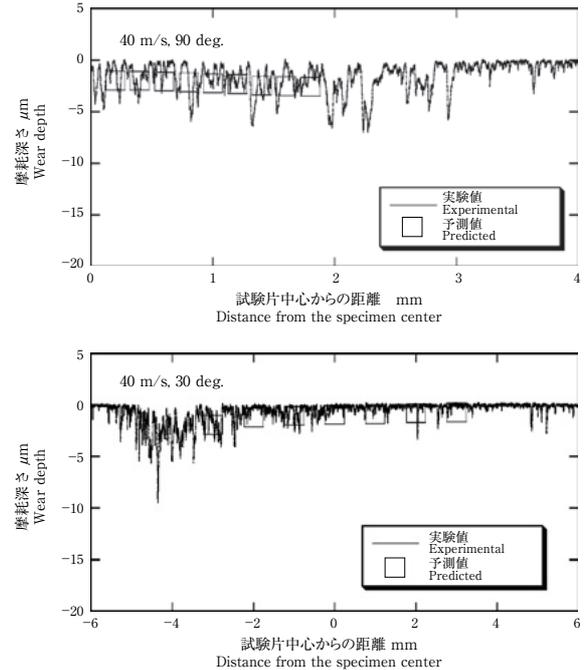
**Photo 3** (a) SE image and (b) BE image of 73WC-20Cr-7Ni surface after 300 min (impingement angle : 30 deg, impact position : -2.0 mm, flow velocity : 20 m/s, Silica sand : 1%)



08-61 04/219

**写真4** 90分間試験後の41WC-NiCoCrの (a) SEM写真, (b) 反射電子像 (試験角度: 30°, 衝突位置: -2.0 mm, 流速: 20 m/s, けい砂濃度: 1%)

**Photo 4** (a) SE image and (b) BE image of 41WC-NiCoCr surface after 90 min (impingement angle : 30 deg, impact position : -2.0mm, flow velocity : 20 m/s, Silica sand : 1%)



**図13** 73WC-20Cr-7Niの摩耗形状の予測値と実験値の比較 (黄河砂濃度: 1%, 試験時間: 120分間)

**Fig. 13** Comparison between estimated and experimental values (73WC-20Cr-7Ni, Yellow River sand : 1%, 120 min)

### 3-4 黄河砂を用いた場合の摩耗形状予測

3-3節で求めた予測式を用いてけい砂と粒度分布の異なる黄河砂を用いた場合の摩耗深さを予測し, 試験結果と比較検討した。比較範囲は試験角度90°では0.2~1.8 mm, 試験角度30°では-3.0~3.0 mmとし, 摩耗深さは式(3)を用いて予測した。試験角度90°の場合, 図5から最大摩耗深さの位置は時間と共に試験片中心からわずかつ離れていく傾向が観察される。このことは局部的に摩耗深さが大きくなるにつれ最大摩耗深さ近傍の粒子挙動が変化していることを示唆している。したがって, 試験角度90°の場合の比較範囲を0.2~1.8 mmの領域とした。

図13, 14, 15にそれぞれ73WC-NiCr, 56W<sub>2</sub>C-NiCr, 41WC-NiCoCrについて, 黄河砂濃度1%, 流速40 m/s, 試験角度90°と30°における摩耗深さの試験結果と予測値を示す。いずれの条件においても試験結果と予測値はほぼ一致しており, サーメット系溶射皮膜においても, 摩耗深さを予測することが可能である。このように本手法を用いることにより羽根車の摩耗深さの空間分布を求めることができ, 溶射材料の選定, 溶射場所の決定を効率的に行うことが可能となる。

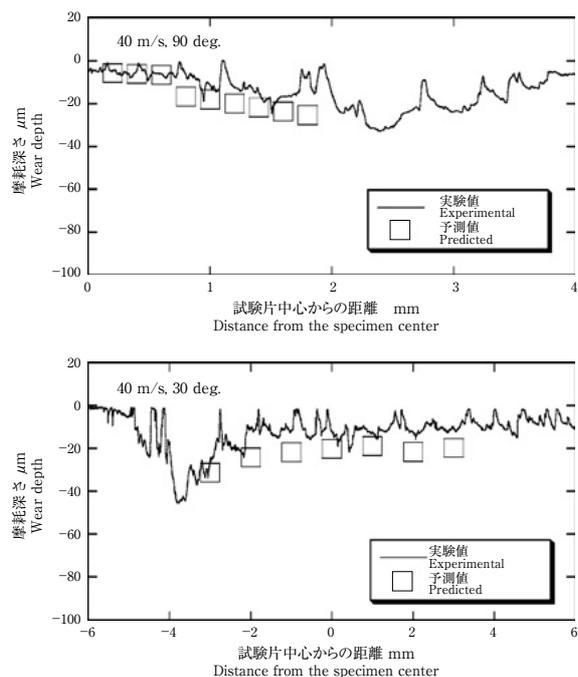


図14 56W<sub>2</sub>C-NiCrの摩耗形状の予測値と実験値の比較  
(黄河砂濃度：1%，試験時間：60分間)

Fig. 14 Comparison between estimated and experimental values  
(56W<sub>2</sub>C-NiCr, Yellow River sand : 1%, 60 min)

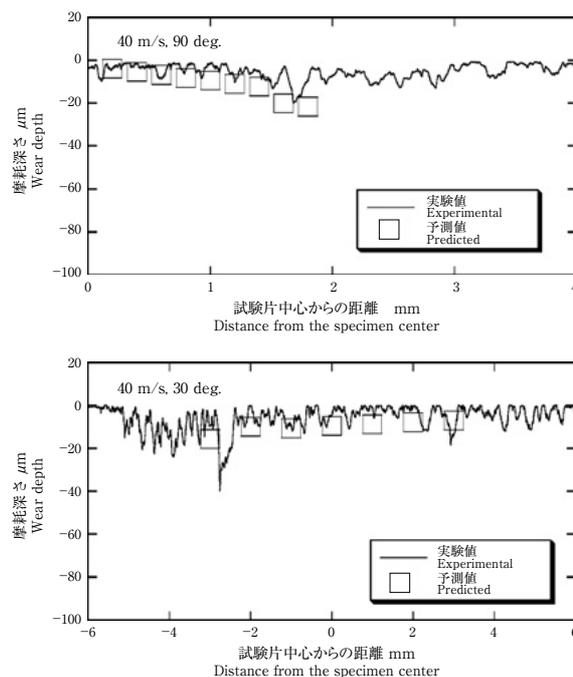


図15 41WC-NiCoCrの摩耗形状の予測値と実験値の比較  
(黄河砂濃度：1%，試験時間：60分間)

Fig. 15 Comparison between estimated and experimental values  
(41WC-NiCoCr, Yellow River sand : 1%, 60 min)

#### 4. まとめ

3種類のサーメット系溶射皮膜について、スラリー摩耗試験及び粒子挙動解析を行い、スラリー摩耗深さを定量的に予測する手法を検討した結果、以下の結論を得た。

(1) 平均粒子径約60 μmのけい砂を用いた流速30 m/s, 40 m/sでのスラリー摩耗試験及び粒子挙動解析から導出した摩耗深さ予測式を用いることにより、スラリー摩耗試験におけるサーメット系溶射皮膜の摩耗深さを予測することが可能である。

(2) SCS6, 73WC-20Cr-7Ni, 56W<sub>2</sub>C-NiCr, 41WC-NiCoCrについて、体積減少量に対する衝突角度の影響を試験結果及び粒子挙動解析結果から計算すると、極大値はそれぞれ衝突角度40°, 80°, 60°, 60°付近に存在する。

(3) スラリーに使用する固体粒子の密度、形状などが同じ場合、スラリー摩耗に寄与する衝突粒子の運動エネルギーに下限値が存在すると仮定すると摩耗深さの定量的予測が可能となり、これら下限値は材料のビッカース硬度に比例して大きくなる。

#### 参考文献

- 1) Tani, K. et al., Turbomachinery, Vol.30, No.11 (2002), pp.666-671.
- 2) Nakahama, S. et al., Turbomachinery, Vol.30, No.11 (2002), pp.672-677.
- 3) Yabuki, A. et al., Corrosion Engineering, Vol.46, No.5 (1997), pp.299-304.
- 4) Shetty, D. K., et al., Preprints presented at the ASLE annual meeting (American society of lubrication engineers), Vol.39 (1984), pp.1-11.
- 5) Sugiyama, K. et al., Ebara Engineering Review, No.211, (2006), pp.3-10.
- 6) Lynn R. S., et al., Wear, Vol.149, (1991), pp55-71.
- 7) Hattori, S. et al., Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A, Vol.62, No.593 (1996), pp.74-81.
- 8) Wang, Z., W., ABRASION AND CAVITATION IN HYDRAULIC MACHINERY, (2003), pp.19-24.
- 9) Bitter, J. G. A., Wear, Vol. 6, (1963), pp.169-190.