

中国万家寨引黄プロジェクト向けポンプ羽根車の耐エロージョン対策

杉山 憲一* 川村 聡** 長坂 浩志**
小川 俊之** 成田 貴行** 浅野 保夫***

Erosion-resistant Coatings for Pump Impellers developed for the Wanjiashai Yellow River Diversion Project

by Kenichi SUGIYAMA, Satoshi KAWAMURA, Hiroshi NAGASAKA, Toshiyuki OGAWA, Takayuki NARITA, & Yasuo ASANO

Deep concern is being directed at the erosion-resistance of pump impellers being operated in Yellow River pumping stations in China. The type of erosion these impellers face are slurry erosion induced by sand impingement and cavitation erosion. As a measure, Ebara has developed methods of predicting volume-loss by slurry erosion. The prediction method features the use of factors such as impingement angle velocity, frequency and impingement particle distribution. As for erosion-resistance, self-flexing alloy coatings have been developed. The following introduces these and discusses test results.

Keywords: Slurry erosion, Cavitation erosion, Thermal spraying, Pump, Impeller, Coating, Anti-erosion materials, Prediction of volume loss, Yellow River, Self-flexing alloy

1. はじめに

多量の土砂を含んだ河川で使用されるポンプや水車では、液体中の微細な固体粒子が衝突してスラリー摩耗が引き起こされ、機器の性能低下や材料損傷による低寿命化が深刻な問題になっている¹⁾。一方、流体機械の小形化・高速化によりキャビテーション気泡崩壊時の衝撃圧によって生じるキャビテーション壊食も問題になっている²⁾。このような環境でポンプなどを使用する場合の対策の一つとして、母材となる金属に溶射皮膜などの施工を行い、材料表面を硬化させて耐エロージョン性を向上させる方法が挙げられる。特に炭化タングステン (WC) などのセラミックと金属を混合して溶射した材料は、スラリー摩耗に対して優れている^{3, 4)}。

本稿では、ポンプによる大水量長距離送水プロジェクトとしては世界最大級の中国万家寨引黄プロジェクト⁵⁾

を取り上げ、ポンプに適用されている耐エロージョン対策について述べる。

2. 中国万家寨引黄プロジェクト概要

本プロジェクトは中国山西省の水不足を解消し、重化学工業基地として発展させることを目的として計画された送水プロジェクトである。2002年に試運転を完了し、現在、稼動中である。

本ポンプは、多量の砂を含んだ黄河水を汲み上げるため、黄河砂の衝突によって引き起こされる材料の摩耗が最大の課題となる。写真1に黄河から採取した砂のSEM写真を示す。平均粒子径は約30 μmで角ばった形状をしている。特に羽根車では、部分的にスラリー摩耗と同時にキャビテーション壊食が重畳して発生するため、材料に要求される性能は非常に過酷である。本プロジェクトでは、立軸単段片吸込渦巻形の高揚程用(揚程: 140 m)と低揚程用(揚程: 76 m)の2種類のポンプが採用されており、羽根車は溶接構造で、主側板には鋳鋼材(CA6NM, Fe-13Cr-4Ni)、羽根材には板材を採用している。高揚程用羽根車は直径が約1.8 mで外周速が55 m/sとなる。黄河における土砂濃度は、8, 9月には水1 m³あたり10 kgを超える量となる。本ポンプはこ

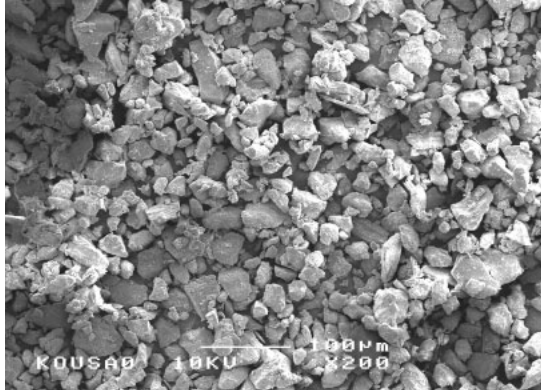
* 株荏原総合研究所 材料研究室

** 同 開発事業化支援室

** 風水力機械カンパニー 生産技術統括部 生産プロセス開発室

** 同 生産企画統括部 企画グループ

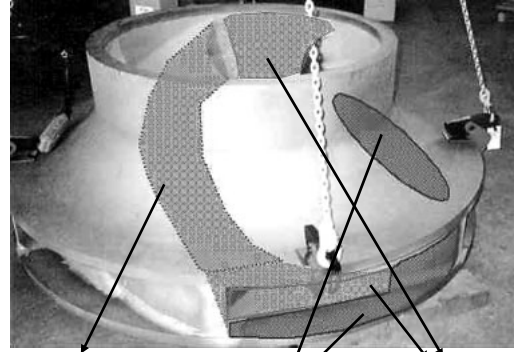
*** QA 統括部



06-72 01/211

写真1 黄河砂のSEM写真

Photo 1 SEM image of Yellow River sand



アーク溶射 Arc sprayed coating
HVOF溶射 HVOF sprayed coating
フレイム溶射溶融 Flame sprayed and fused coating

06-72 02/211

写真2 羽根車に適用した溶射手法

Photo 2 Thermal spraying methods applied to the pump impeller

の2箇月を除く10箇月間（約7300時間）、連続運転される計画となっている。

3. 万家寨ポンプ羽根車に適用した耐エロージョン対策及び耐エロージョン性と材料因子の関係

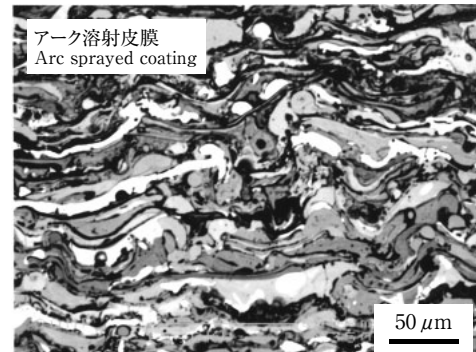
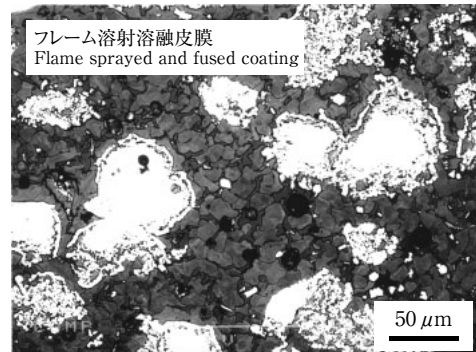
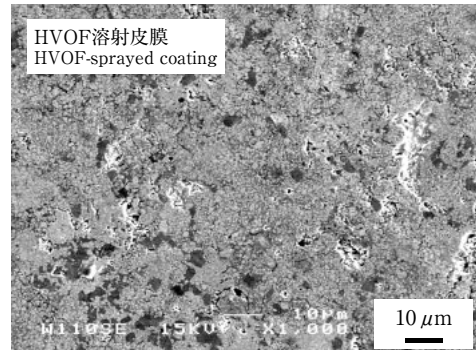
耐摩耗溶射材料としては、広く利用されているWC系サーメットを採用しており、羽根車の各部位に応じた最適な材料と溶射方法を適用した。

写真2に各部位に適用した溶射手法を示す。また、写真3に各溶射皮膜断面のSEM写真を示す。羽根車の外表面に対しては、キャビテーション非発生領域であるため、耐スラリー摩耗性に優れたWC系サーメット材料を高速フレイム（HVOF）溶射法で施工した。耐スラリー摩耗性と同時に耐キャビテーション壊食性が要求される吸込部、並びに高周速の外周側流路部でHVOF溶射の施工が難しい部分では、WC含有Ni基自溶性合金による溶射溶融法を適用した。クローズ型の羽根車では羽根が羽根車の主板、側板に囲まれた閉空間の通路を構成しているため、この部位に対する溶射は通常極めて困難である。このような狭隘部への溶射施工に対しては施工上の制約が比較的少ないアーク溶射法を採用するとともに、特殊アーク溶射トーチを新たに開発することによって羽根車内面全面の溶射が可能となった⁶⁾。

前記の材料選定にあたっては、各種材料について評価試験を実施しており、これらの試験結果から耐エロージョン性に及ぼす材料因子の影響を検討した。

3-1 試験方法

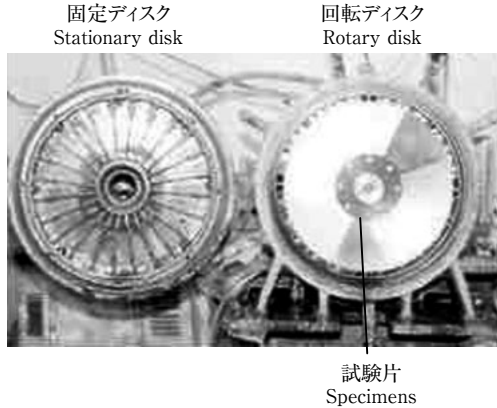
スラリー摩耗試験装置の外観及び試験部概略図をそれぞれ写真4、図1に示す。外径360 mmの円板を8等分し扇形試験片として使用したため、1度に8個の試験片を試



06-72 03/211

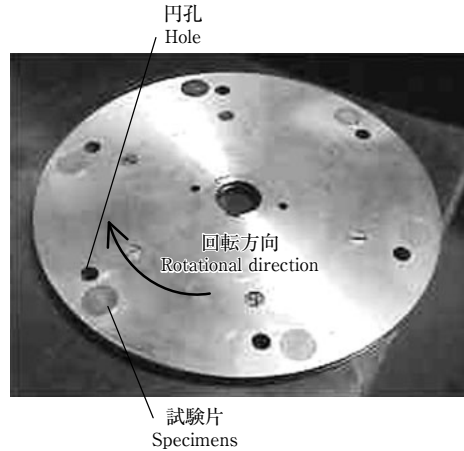
写真3 各溶射皮膜断面のSEM写真

Photo 3 SEM images of thermal sprayed layers



06-72 04/211

写真4 スラリー摩耗試験装置外観
Photo 4 View of slurry erosion test apparatus



06-72 05/211

写真5 キャビテーション壊食試験装置外観
Photo 5 View of cavitation erosion test apparatus

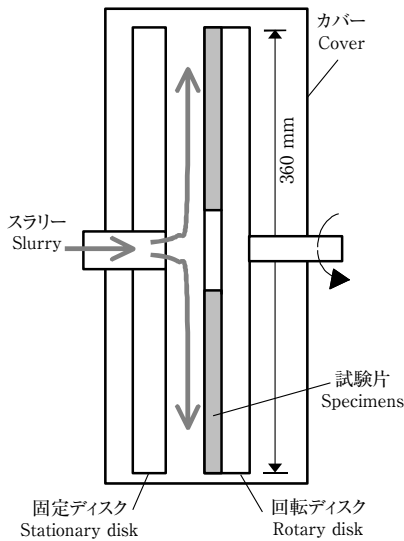


図1 スラリー摩耗試験装置概略図
Fig. 1 Schematic drawing of slurry erosion test apparatus

験できる。回転速度は 3000 min^{-1} （最外周速度 55 m/s ）、砂は黄河砂を用い濃度を $1 \text{ wt.}\%$ とし、水温は $25 \sim 30 \text{ }^\circ\text{C}$ に調整した。試験後の摩耗深さを測定しスラリー摩耗速度を求めた。

写真5にキャビテーション壊食試験装置の試験片取付け部の外観を示す。写真5の円孔部において人工的にキャビテーションを発生させ、円孔の下流側に設置した試験片をキャビテーション損傷させた。円板中心から円孔部中心までの距離は 158 mm 、回転速度は 3000 min^{-1} 、水温は $15 \text{ }^\circ\text{C}$ 、流量は $1.15 \sim 1.25 \text{ L/s}$ とした。試験前後の質量測定から体積減少量を算出しキャビテーション壊食速度を求めた。

3-2 試験結果及び考察

図2に黄河砂濃度 1% （平均粒径約 $30 \mu\text{m}$ ）、周速度 55 m/s における各種溶射皮膜のビッカース硬度（以下Hv）とスラリー摩耗速度の関係を示す。図2の丸印は現在実機に適用している材料である。耐エロージョン性は、フレーム溶射溶融皮膜以外は硬さといふ相関があり、硬いほど耐エロージョン性は向上する。Hv900以上でエロージョン速度はほぼ一定になり、下限値となる。フレーム溶射溶融皮膜は、WC-Coが均一に分散していないため、平均硬さが低くなる傾向にある。したがって硬さとの相関が明確に表れないと考える。

図3にセラミックス粒子面積率とスラリー摩耗速度の関係を示す。ここで、セラミックス粒子面積率は皮膜断

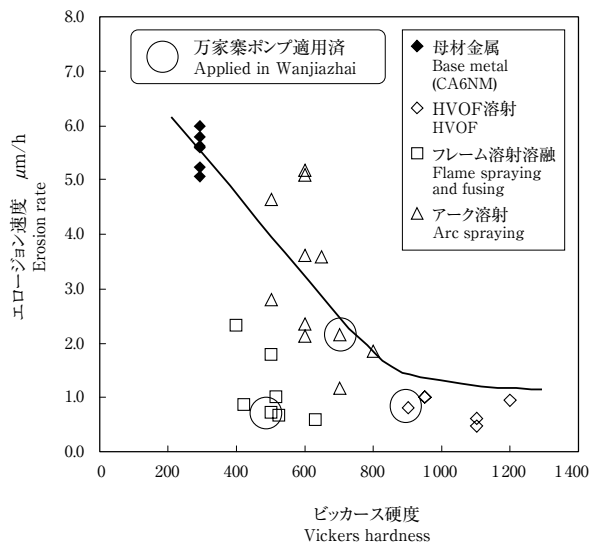


図2 Hvとスラリー摩耗速度の関係
Fig. 2 Relation between Hv and slurry erosion rates

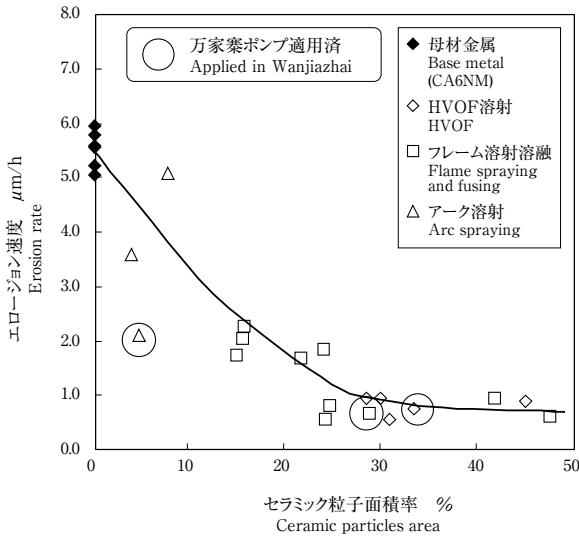


図3 セラミックス粒子面積率とスラリー摩耗速度の関係
Fig. 3 Relation between ceramic particles area and slurry erosion rates

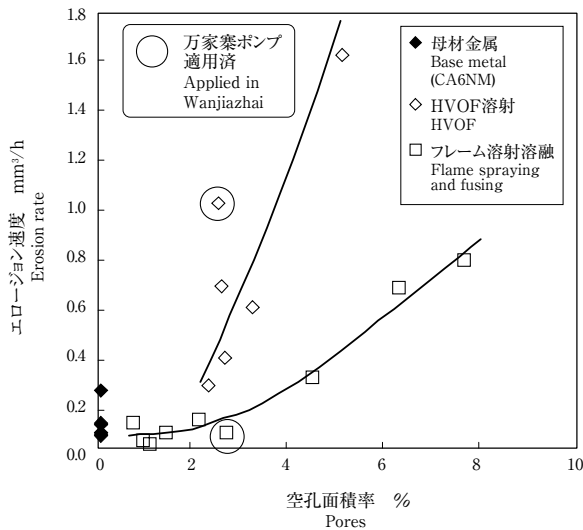


図4 空孔面積率とキャビテーション壊食速度の関係
Fig. 4 Relation between pores and cavitation erosion rates

面のSEM写真を画像解析して求めた。スラリー摩耗速度をセラミックス粒子面積率で整理した結果、両者にはよい相関が認められ、セラミックス粒子面積率が大きいほど耐エロージョン性が向上する。セラミックス粒子面積率25%以上で最大摩耗深さ進行速度はほぼ一定になり、下限値となる。

図4に各種溶射皮膜の空孔率とキャビテーション壊食速度の関係を示す。アーク溶射皮膜は耐キャビテーション壊食性が非常に劣るとともに、空孔率の測定が困難であったため、ここでは除外した。図4中の丸印は現在実

機に適用中の材料である。同じ溶射法であれば空孔率と耐キャビテーション壊食性はよい相関があり、空孔率が小さいほど耐キャビテーション壊食性は向上する。同等の空孔率であっても、HVOF溶射皮膜より溶射溶融皮膜の耐キャビテーション壊食性が優れている。これは、溶射溶融皮膜は自溶性合金を溶射後、溶融処理しているために粒子間の結合力が大きいことが原因の一つであると考えられる。

4. 現地補修用溶射材料の開発及び耐エロージョン性と材料因子の関係

万家寨用ポンプは、現地において定期的な補修を行わなければならない可能性があるため、補修用材料の開発及び施工方法の確立は最優先課題である。そこで、前述で得られた知見を基に、現地補修用材料を開発した。ここで開発した材料は補修だけでなく新規施工においても適用可能である。

耐スラリー性については硬さの向上、耐キャビテーション壊食性については空孔率の低減を目標として、改良型HVOF溶射皮膜、自溶性アーク溶射皮膜を各種試作し評価した。また、HVOFは高压酸素を必要とするが、大量の酸素を確保することが困難な場合に備えて、酸素の代わりに空気を用いるHVAF (high velocity air fuel) 溶射も新たに検討対象とした。

4-1 試験方法

スラリー摩耗試験は加速試験のために平均粒径の大きいJIS9号けい砂 (平均粒径80 μm) を使用し、図5に示す噴流式スラリー摩耗装置を用いて行った。試験片表面から25 mm離れた位置に対向して取り付けられた直径3 mmのノズルからスラリー試験液を噴出させて、試験片に衝

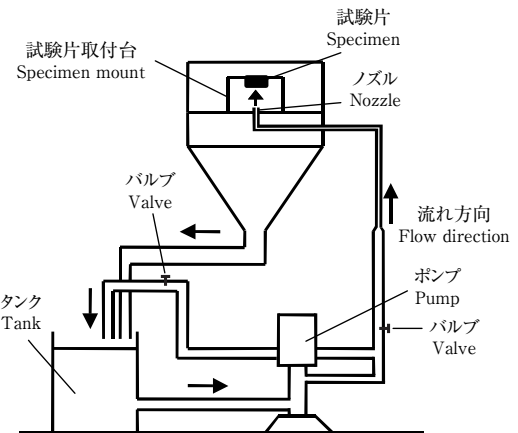


図5 噴流式スラリー摩耗試験装置概略図
Fig. 5 Schematic drawing of slurry jet test apparatus

突させ損傷を与えた。試験流速は40 m/s、試験液温度は恒温装置を介して20～35℃に保持した。試験前後の試験片表面断面曲線測定結果から最大摩耗深さを測定し、スラリー摩耗速度を求めた。

キャビテーション壊食試験はASTM32-98⁷⁾に基づいて静置試験片法で行った。図6に磁歪式キャビテーション壊食試験装置の概略図を示す。振動子の増幅ホーン先端に耐壊食性に優れたTi-6Al-4V合金製のディスクを取り付け、このディスクと平行にすき間を1 mm隔てて試験片を対向させ、振動ディスクの端面から発生するキャビテーション気泡を試験面にさらして壊食させた。振動子の共振周波数は19 kHz、ディスクの全振幅は50 μmとした。試験液はイオン交換水を用い、液温は恒温装置を介して25～30℃に保持した。試験前後の試験片表面断面曲線測定結果から、平均壊食深さを測定し、キャビテーション壊食速度を求めた。

4-2 試験結果及び考察

図7に材料のHvとスラリー摩耗速度及びキャビテーション壊食速度の関係を示す。

耐スラリー摩耗性は、Hvが大きいほど優れているが、傾向は二つのグループに分けられる。グループAは基材の金属材料、あるいは気孔が少なく緻密な溶射皮膜のグループである。グループBはアーク溶射、フレイム溶射で熱処理を行わなかったもの、あるいは溶融が不十分であった皮膜のグループである。一般的に硬い材料ほど優れた耐スラリー摩耗性を示すが、溶融が不十分で気孔率が大きいと硬さは同等であっても耐スラリー摩耗性は劣ることが分かった。

耐キャビテーション壊食性は、材料の種類によって三つのグループに分けられる。グループAは金属材料及び

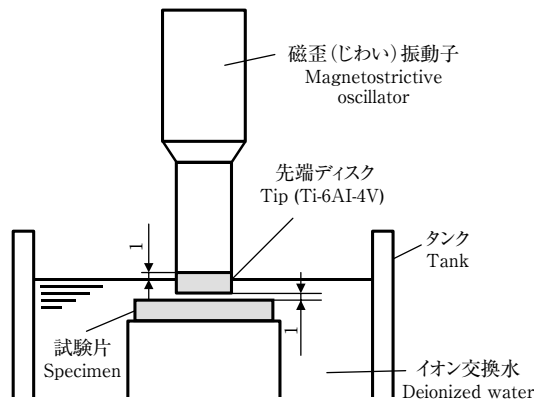


図6 磁歪式キャビテーション壊食試験装置
Fig. 6 Schematic drawing of magnetostrictive vibratory apparatus

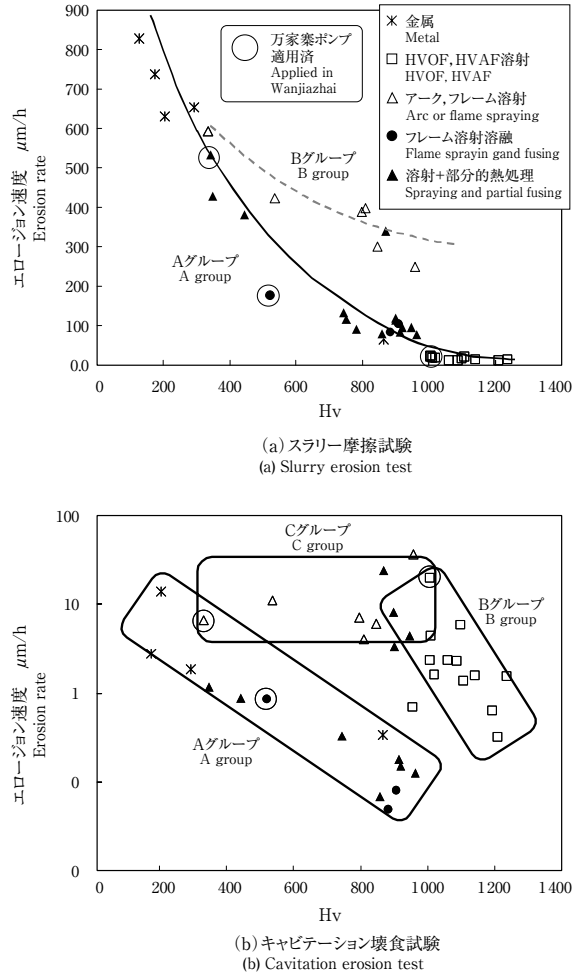


図7 Hvとエロージョン速度の関係
Fig. 7 Relation between Hv and erosion rates

気孔が少なく緻密な皮膜のグループであり、Hvが大きいほど耐キャビテーション壊食性に優れている。グループBは高速フレイム溶射のグループであり、Hvが大きいほど耐キャビテーション壊食性に優れているが、グループAより性能は劣る。グループCはアーク溶射、フレイム溶射で熱処理を行わなかったもの、あるいは溶融が不十分であった皮膜のグループであり、Hvと耐壊食性との相関が見られず、性能もグループA、Bより劣る。これらの溶射皮膜は気孔率が大きく、粒子間の密着強度が低いために性能が低く、また、性能は硬さに依存しなかったものとする。

材料の自溶け化あるいは溶射後の皮膜に適切な熱処理を施すことにより耐エロージョン性が向上することを確認した。ただし、補修時における熱処理は補修箇所以外の皮膜に損傷を与える可能性があるため、実機羽根車への適用については、割れやひずみ等の発生について検討する必要がある。

5. スラリー摩耗量予測技術の確立

スラリー摩耗量の定量的予測は、今後の羽根車の補修施工条件決定や、溶射材料及び施工法の改良を行う上で不可欠である。そこで、噴流式スラリー摩耗試験装置における砂粒子挙動解析を行い、その結果と噴流式スラリー摩耗試験結果とを組み合わせることにより、砂の粒度分布、衝突速度、衝突角度、衝突頻度を考慮に入れた摩耗量予測式を作成した。

図8に、噴流方向に対して試験片表面を垂直（90°）に配置して試験した後の試験片外観写真と断面曲線測定結果の一例を示す。断面曲線は噴流式スラリー摩耗試験特有のW字形状となる⁸⁾。この形状から、衝突位置によって衝突角度、衝突速度等が異なることが推測できる。そこで、図9に示す試験装置のモデル図について、汎用熱流体解析ソフトStar-CDを用いて直径3 mmのノズルから噴射されたスラリー粒子の挙動について解析を行った。解析条件を以下に記す。

- ・解析領域は軸対称として角度60°で周期境界とする。
- ・乱流モデルとして標準k-εモデルを用いる。
- ・水だけの単相流解析で得た定常解を元に、粒子（密度2300 kg/m³）をノズル内部の図9に示す初期位置に径方向に等間隔で30個並べて配置し、水と同じ初期速度を与えて計算を開始する。

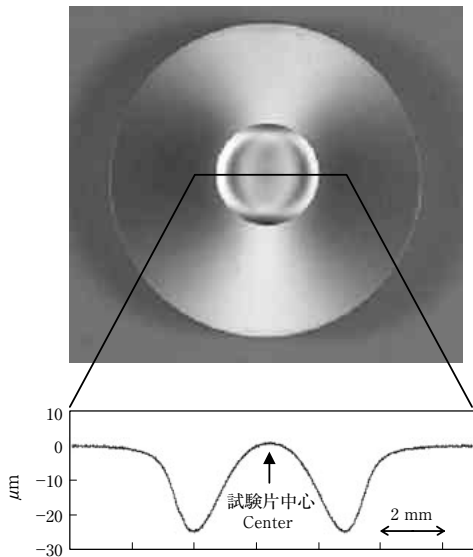


図8 スラリー試験後のCA6NM試験片外観及び粗さ
[流速：20 m/s、衝突角度：90°、砂濃度：1%
(平均粒径60 μmけい砂)、90分試験後]

Fig. 8 View and profile of CA6NM after slurry wear test
[flow velocity: 20 m/s, impingement angle: 90 deg., sand concentration: 1% (silica sand of 60 μm in mean diameter), after 90 min. test]

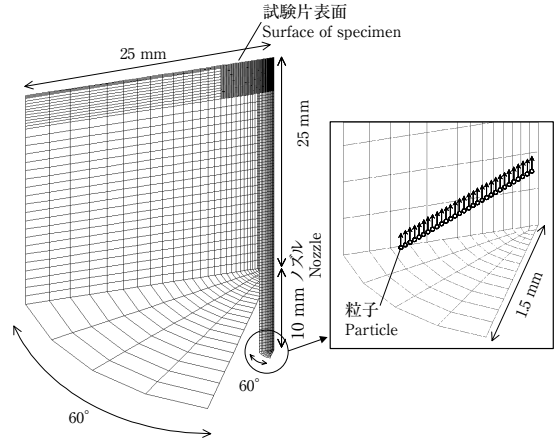


図9 計算モデル（衝突角度：90°）
Fig. 9 Calculation model (impingement angle: 90 deg.)

・ラグランジュ法を用いて個々の粒子の挙動を追跡し、試験片表面における衝突位置、衝突速度、衝突角度を予測する。

・粒子径は10, 30, 50, 80, 120, 160, 200, 300 μmの各場合について解析する。

・初期流速は20 m/s, 40 m/sの各場合について解析する。

・粒子自体の回転は考慮しない。

なお、混入する粒子の濃度が低いため、

・粒子の抗力係数は単一粒子に対するモデルを用いる。

・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は考慮しない。

けい砂の密度は2300 kg/m³、黄河砂の密度は2500 kg/m³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 kg/m³とした。

図10に代表的な解析結果として、流速20 m/sにおける試験片表面での衝突位置と衝突速度の関係、衝突位置と衝突角度の関係を示す。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、同じ衝突位置であれば粒子径が小さい程衝突速度は小さい。衝突角度は試験片中心付近では90°に近いが、中心から離れるほど低角度で衝突する。また、同じ衝突位置であれば粒子径が小さい程衝突角度は小さい。

そこで、試験材料における摩耗量は、衝突する固体粒子の運動エネルギーに比例するものと考え、摩耗深さ速度を $W(X)$ (mm/s)、固体粒子の運動エネルギーを E (N・m) とすれば以下ようになる。

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

(C：定数, m：粒子の質量, V：衝突時の粒子速度)

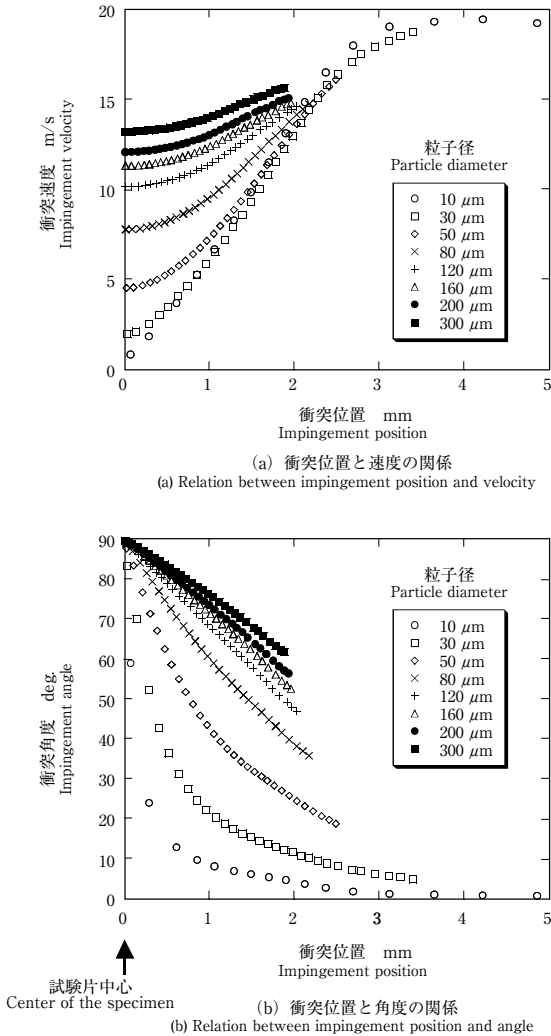


図10 粒子挙動解析結果 (初期流速: 20 m/s, 試験角度: 90°)
Fig. 10 Calculation results of particles behavior
(initial flow velocity: 20 m/s, setting angle: 90 deg.)

また、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、体積分布での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、衝突粒子1個当りの体積減少量 $Y (\text{mm}^3)$ と衝突角度 $G (\text{deg.})$ の関係を以下の3次関数で表現することを考えた。

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

この式 (2) 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。

更に、解析結果から粒子は粒子径に応じて様々な角度、

速度で衝突していることが分かったので、摩耗量は各粒子径に分けて考える必要がある。けい砂の粒子径は最小で $10.09 \mu\text{m}$ 、最大で $296 \mu\text{m}$ であり、 $10.09 \mu\text{m} \sim 296 \mu\text{m}$ の間を40区間に分類した。衝突位置 $X (\text{mm})$ における摩耗速度 $W (X) (\text{mm/s})$ は、各粒子の寄与を考慮して次式のように表される。

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

ここで、 $G_{D,X}$ は衝突角度 (deg.)、 D は粒子径 (μm)、 $V_{D,X}$ 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。材料の摩耗量は衝突粒子の運動エネルギーに比例すると仮定し、質量は D_0 、粒子速度は V_0 を用いて無次元化した。この時点で粒子の密度は式 (3) から消去される。位置 X を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、図10から高角度の衝突は衝突中心付近であり、低角度の衝突は衝突中心から離れた位置にとる必要がある。ここでは3点を衝突中心付近の 0.2 mm 、中心から離れた位置の 1.8 mm 、偏曲点の 1.0 mm とした。

Wang⁹⁾ は流体機械において、ある粒径以下の砂はスラリー摩耗にほとんど寄与しないと報告している。そこで、「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、衝突位置 1.8 mm について、約 $1.0 \times 10^{-6} \text{ N} \cdot \text{m}$ 以上の運動エネルギーを有する粒子の流速 40 m/s 、 20 m/s での運動エネルギーの総和の比は $8943/240 = 37$ となる。この値は、スラリー摩耗試験から得られた衝突位置 1.8 mm における流速 40 m/s 、 20 m/s での摩耗速度の比 34 とほぼ同値となる。

そこで、流速 20 m/s の試験結果について、運動エネルギーが $1.0 \times 10^{-6} \text{ N} \cdot \text{m}$ 以下である粒径による寄与を除き、解析結果から衝突頻度 F を求め、前記の連立方程式を解き a, b, c を求めた。これらの値を式 (2) に代入すると、基準粒子径、基準速度における粒子1個当りの体積減少量と衝突角度の関係が得られる。

CA6NMについて、前記方法により求めた粒子衝突角度と粒子1個当りの体積減少量の関係を図11に示す。体積減少量のピークは 40° 付近に存在し、延性材料は低角度で摩耗速度が最大となる従来の報告^{10, 11)} と一致する。

前記計算は平均粒径約 $60 \mu\text{m}$ のけい砂を用いて行ったが、この摩耗量予測式を用いて平均粒径 $30 \mu\text{m}$ の黄河砂で試験した場合の摩耗量を予測し、試験結果と比較検討した。

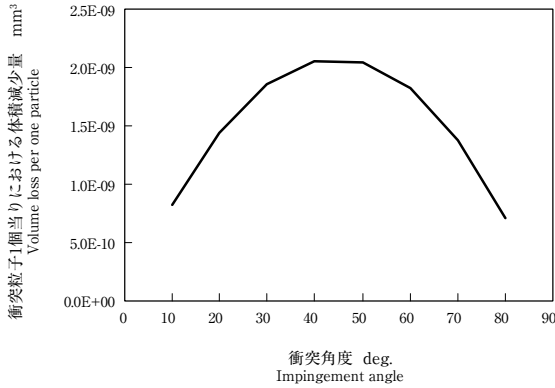


図11 衝突角度と粒子1個当りの摩耗体積の関係
(速度：20 m/s, 粒子径：80 μm)

Fig. 11 Relation between impingement angle and calculated volume loss per one particle
(flow velocity: 20 m/s, particle diameter: 80 μm)

図12に黄河砂1%, 2%, 3%, 流速40 m/s, 30分試験後における試験角度90°の摩耗形状の実験値と計算値を示す。実験値と計算値はよく一致しており、粒度分布の異なる粒子であっても成分がほぼ同等であれば、噴流式スラリー摩耗試験装置における摩耗量を予測可能である。

同様の手法で、セラミックス含有溶射皮膜についても摩耗量予測式を作成し、実機羽根車における粒子挙動解析を組み合わせることにより、羽根車の摩耗量予測が可能となる。セラミックス含有溶射皮膜については現在検討中である。

6. ま と め

本稿では、中国黄河の取水用ポンプ羽根車の耐エロージョン対策における取り組みについて紹介した。ポンプ羽根車のように部位によって求められる性能が異なる場合、コーティングを用いて要求される性能を付与することは、コスト、補修の面から有用な対策である。今後も更に耐エロージョン性に優れた表面処理技術の研究・開発を継続的に進めるとともに、実機における摩耗量予測技術向上のために、調査・研究を継続していく必要がある。

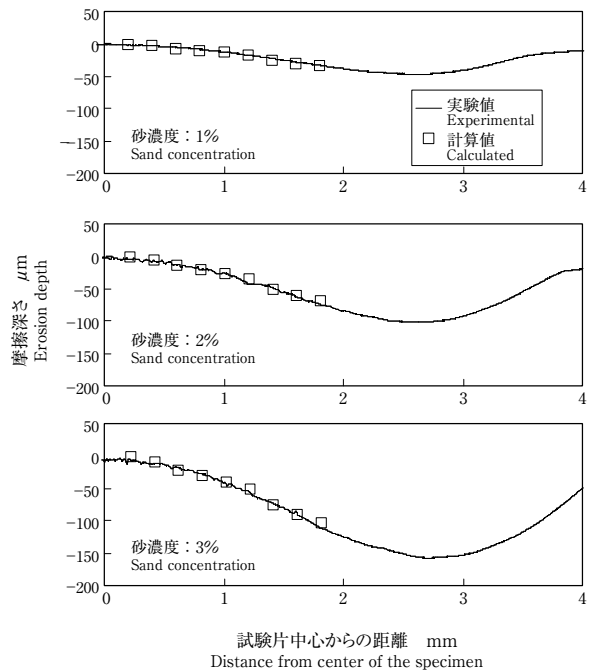


図12 噴流式スラリー摩耗試験装置における摩耗量の予測値と実験値の比較

(流速：40 m/s, 衝突角度：90°, 黄河砂, 30分試験後)

Fig. 12 Comparison of calculated results and experimental results of erosion depth on slurry jet test apparatus
(flow velocity: 40 m/s, impingement angle: 90 deg., Yellow River sand, after 30 min. test)

参 考 文 献

- 1) XU, H., LUO, X: Proc. 19th IAHR Symp. Hydraul. Mach. Cavitation 1998 Vol.2, (1998), 544.
- 2) 服部修次：ターボ機械, Vol.30, No.10, (2002), 64.
- 3) 吉川哲之, C. Schneider：ターボ機械, Vol.28, No.10, (2000), 577.
- 4) 稲垣泰造, 齊藤正弘：ターボ機械, Vol.32, No.11, (2004), 676.
- 5) 中浜修平他3名：ターボ機械, Vol.30, No.11, (2002), 29.
- 6) 万家寨引黄プロジェクトチーム：エバラ時報No.195, (2002), 70.
- 7) ASTM Designation, G32-98, Annual Book of ASTM Standards, (2000), 107.
- 8) 服部修次他4名：日本機械学会論文集 (A編), Vol.62, No.593, (1996-1), 74.
- 9) Zhigao, W: ABRASION AND CAVITATION IN HYDRAULIC MACHINERY, (2003), 19.
- 10) Finnie, I. 他2名：J. Mater., Vol.2, (1967), 682.
- 11) Kiselev, G. J: Russian Eng. J., Vol.51, No.12, (1971), 10.