各種実験法による水車材料の耐土砂摩耗性評価* (微視的摩耗形態の検討)

佐藤 譲之良*¹, 宇佐美 賢一*¹
岡村 共由*¹, 堀切川 一男*²

Comparison of Silt Erosion Characteristics of Materials through Different Types of Test Methods

Joshiro SATO, Kenichi USAMI,
Tomoyoshi OKAMURA and Kazuo HOKKIRIGAWA

Abrasive wear patterns of materials were studied using experimental apparatuses of an impinging jet in air, an impinging jet in water and a rotating disk. These were also compared with patterns obtained with prototype turbines. Ploughing was main type, with some wedge type observed in the prototype turbine. These patterns resembled those observed for some test results with the impinging jet. Test results on the impinging jet could be shown on the abrasive wear mode diagram, applying the maximum degree of penetration D_{pmax} and shear strength f at the contact interface.

Key Words: Fluid Machinery, Water Turbine, Jet, Wear, Cavitation

1. 緒 言

河川水に土砂を含む水力発電所において、土砂による材料の損傷および水車性能の低下が重要な問題となっている。従来、摩耗の研究は多数なされているが、実験装置により摩耗の評価が異なり、実機水車において寿命を推定することが困難であった。著者らは、土砂摩耗とキャビテーションが、干渉し合いつつ共存する複合損傷において、単純な摩耗に比べ、材料の侵食量が増大し、かつ微視的摩耗形態も変化していることを、走査形電子顕微鏡 (SEM) 観察結果により明らかにした⁽¹⁾。そこで本研究では、空中噴流、水中噴流、回転円盤の3種類の試験において得られた微視的摩耗形態と、実機水車の流水部において得られた微視的摩耗形態を比較し、各種実験法の評価を行った。さらに衝突粒子の最大食込み度の概念を導入することにより、各微視的摩耗形態の発生条件について検討した。

2. 実験装置と実験方法

2・1 実験装置 実験室での土砂摩耗試験は、空中噴流実験装置⁽²⁾、水中噴流実験装置⁽¹⁾、回転円盤実験装置を使用した。図1に装置の概要を示す。噴流は、空中噴流では大気中の試験片に衝突し、水中噴流では、水中にセットされた試験片に衝突する。回転円盤は土砂水中で回転する。

2・2 実機調査部位 実機での調査は、ペルトン水車のバケット内面、フランシス水車のランナブレードとランナライナとした。

2・3 微視的摩耗形態の観察 摩耗による侵食部は、SEMにより観察した。なお、実機の微視的摩耗形態はレプリカ法により採取し、SEMで観察した。

2・4 供試材および試験条件 実験室での摩耗試験の供試材および試験条件を表1に示す。供試材は、13Cr-5Ni-SC, SUS 304, Composite metal (SiC金属複合材料)の3種を用いた。砂は河川砂(長江砂)および人工砂 Al_2O_3 を使用した。なお、実機水車は13Cr-5Ni-SC製である。

3. 実験結果および考察

3・1 摩耗形態の分類 引っかき摩耗の微視的形

* 平成2年4月23日 第3回日中流体機械国際会議において講演。原稿受付 平成2年8月31日。

*¹ 正員、(株)日立製作所日立工場 (〒317 日立市幸町3-1-1)。

*² 正員、山形大学工学部 (〒992 米沢市城南4-3-16)。

態は、Ploughing タイプ、wedge タイプおよび cutting タイプの 3 種類の mode に分類される⁽³⁾⁽⁴⁾。図 2 には、無潤滑状態の軸受鋼とダイヤモンドピンを用いて求めた 3 種類の摩耗形態と摩耗こんの形状を示す。

3・2 噴流式実験装置における微視的摩耗形態

図 3 に、空中噴流式実験装置による摩耗面の断面曲線と、各位置における微視的摩耗形態を示す。A 部(写真 A-2) はノズルに近い部分であり、砂の押込こん(径 1 μm 程度)が、多数見られるが、引っかきこんはほとんど見られない。また断面曲線からわかるように、摩耗の程度は非常に小さい。砂の実際の衝突角度は、流れの広がりにより設定角度 45°より大きく、90°に近いものと考えられる。

B 部は中央部であり、引っかきこんの ploughing タイプ(幅 1 μm 、長さ 2~5 μm 程度)が多数見られる。また、B 部(写真 B-2) では、砂の切削作用による摩耗が起きており、この部分が最も摩耗が激しい。C 部はノズルから遠い部分であるが、引っかきこん(幅 0.5~1 μm 、長さ 2~8 μm 程度)が見られる。写真 C-2 の中央部には、砂が材料表面をほり起こし(ploughing)、引っかきこんの両側が盛り上がっている様子が見られ

る。この摩耗の程度は B 部より小さい。これは砂の衝突速度および単位時間あるいは単位面積当たりの衝突数が、B 部より少ないためと考えられる。なお、水中噴流実験装置においても同様の傾向が得られており、以後の噴流実験装置による微視的摩耗形態は、B 部およびやや上流位置 B' から採取することにした。

3・3 微視的摩耗形態に及ぼす衝突角度の影響

図 4 に、空中噴流法により衝突角度を変えた場合の微視的摩耗形態を示す。15、45°時は引っかきこんの ploughing タイプが支配的である。60°では押込みこんが認められるが、やはり ploughing タイプの摩耗こんと考えられる。また、wedge タイプの引っかきこんが部分的に認められる。

水中噴流において衝突角度を 30、45、75°と変化させても、いずれも ploughing タイプが支配的であった。

3・4 微視的摩耗形態に及ぼす粒径の影響

図 5 には、空中噴流法により粒径を 8、39、62 μm と変えたときの、微視的摩耗形態を示す。いずれも引っかきこんの ploughing タイプであり、部分的に wedge タイプが観察される。粒径が大きくなるに従い、wedge

表 1

Test methods		Impinging jet in air		Impinging jet in water	Rotating disk
Test materials		SUS304, 13Cr-5Ni SC Composite metal*		SUS304	
Test conditions	Silt use	Al ₂ O ₃	River silt	Al ₂ O ₃	River silt
	Silt concentration (g/l)	30	30	30	30
	Silt granule size (μm)	8, 39, 62	6	8, 39	6
	Velocity (m/s)	20		40	47.1
	Attack angle (deg)	15, 45, 60		30, 45, 75	—
	Nozzle dia. (mm)	1.1		2.1	—
	Stand off distance (mm)	3.0		10.0	—
	Test period (max. h)	4		4	36

* Carbide dispersion type overlay weld metal

図 1 実験装置

が鮮明に認められる。

3・5 微視的摩耗形態に及ぼすキャビテーションの影響 水中噴流法において、土砂摩耗とキャビテーションが干渉し合いつつ共存する複合損傷においては、侵食量が増大し、微視的摩耗形態も変化することが明らかとなった⁽¹⁾。図6には摩耗と複合損傷の微視的摩耗形態の比較を示す⁽¹⁾。

キャビテーションが存在しない摩耗時には、

図2 3種類の摩耗形態

図3 微視的摩耗形態の場所による相違

図4 微視的摩耗形態に及ぼす衝突角度の影響

ploughing タイプが支配的で、部分的に wedge タイプも見られる。

しかし、複合損傷においては、ploughing により盛り上がった両側部(塑性変形部)が、キャビテーションにより細かい単位(サブ μm)で破壊、脱落している。すなわち、キャビテーションは、摩耗を促進する作用を有することが、微視的摩耗形態の上からも判定される⁽¹⁾。

3・6 材料が異なる場合の微視的摩耗形態の比較

図7には、空中噴流法による材料A(SUS304)と材料B(Composite metal)の微視的摩耗形態を示す。

材料Aでは、ploughing タイプと wedge タイプが生じている。引っかけこん幅は1~2 μmである。材料Bでは、wedge タイプはほとんど確認されず、ploughing タイプが支配的である。引っかけこん幅は0.5~1.0 μmである。

微視的摩耗形態から、材料Bのほうが、衝突粒子の食込みが小さいため、摩耗量の減少をもたらすことがわかる。

図5 微視的摩耗形態に及ぼす粒径の影響

図6 微視的摩耗形態に及ぼすキャビテーションの影響

3・7 回転円盤の微視的摩耗形態 回転円盤実験装置は、材料の耐摩耗性を比較する手段としてしばしば使用される。図8には、材料A (SUS304) の回転円盤の微視的摩耗形態を示す。図8からわかるように、摩耗面は平滑であり、噴流実験装置による結果とは異なっている。

その微視的摩耗形態は弱い ploughing タイプの引っかきこんと考えられる。

3・8 実機水車の流水部の微視的摩耗形態 図9には、ペルトン水車バケット、フランシス水車ランナベーンおよびランナライナの微視的摩耗形態を示す。実機の土砂は時々刻々変化し定量的に把握できぬが、いずれも ploughing タイプの引っかきこんが支配的である。摩耗は使用材料、砂の種類、濃度、粒径、流速、衝突角度、キャビテーション、運転時間などにより支配されるが、微視的摩耗形態は、これら条件が同じであれば、変わらないと考えられる。土砂濃度が大きい河川においては、粒径の衝突頻度が多くなり、摩耗量自体は大きくなる。

そこで、実機と各種実験方法で得られた微視的摩耗

形態を比較すると、図9に示した実機の微視的摩耗形態に類似しているのは、図6に示した粒径 $39\mu\text{m}$ の水中噴流と、図3に示した河川砂の空中噴流による形態である。これより、微視的摩耗形態は、河川水の土砂のうち、比較的大きい粒径の土砂によって現出されるものと考えられる⁽²⁾。したがって、微視的摩耗形態を評価することは、摩耗損傷の、一つの手がかりになると考えられる。

3・9 微視的摩耗形態観察結果の検討

3・9・1 微視的摩耗形態について 微視的摩耗形態の観察結果によれば、キャビテーションがない場合の微視的摩耗形態は、噴流実験装置による結果も、実機水車の結果もともに ploughing タイプが支配的であり、時おり wedge タイプも見られる。しかし、Cutting タイプはほとんど見られない。以下にその理由を考察する。

衝突粒子は、球状硬質粒子とし、衝突による接触が完全に塑性的であるとすれば、微視的摩耗形態を考える上で次式で定義される食込み度 D_p (degree of penetration) が有効である⁽³⁾⁽⁴⁾。

$$D_p = h/a$$

図7 材料と微視的摩耗形態

Direction of rotation

Pelton turbine	Francis turbine	
Runner bucket	Runner blade	Runner liner

Out put: 8000kW	Out put: 11000kW	Out put: 11000kW
Head: 304m	Head: 179m	Head: 179m
13Cr-5Ni SC	$3\mu\text{m}$	

図9 実機水車の微視的摩耗形態

図8 回転円盤の微視的摩耗形態

図10 衝突モデル

ここで、 h は食込み深さ、 a は接触半径である。図 10 に衝突のモデルを示す。

衝突粒子は、速度零になるまで材料に食い込む。このとき、食込み深さ h 、接触半径 a は、それぞれ最大値 $h_{\max}$ 、 $a_{\max}$ となる。衝突による力 F の、垂直方向成分、すなわち押付け力は $F \sin \theta$ であり、これを $\pi a^2/2$ の面積が、硬さ H の圧力で支えるものと仮定すれば、最大の食込み度 $D_{p\max} = h_{\max}/a_{\max}$ は次式で表すことができる。

$$D_{p\max} = 0.64 \sqrt[4]{\rho \sin \theta \sqrt{v}} / \sqrt[4]{H} \dots\dots\dots (2)$$

ここで

ρ : 衝突粒子の密度、 θ : 衝突角度

v : 衝突速度、 H : 材料の硬さ

式(2)に、河川砂の $\rho = 2.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、 Al_2O_3 の $\rho = 3.9 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、 $\theta = 45^\circ$ 、空中噴流の $v = 20 \text{ m/s}$ 、水中噴流の $v = 40 \text{ m/s}$ 、SUS304 の $H = 1.73 \times 10^9 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2/\text{m}$ ($H_v = 173$) を用いると、おのおのの $D_{p\max}$ が表 2 のように得られる。

微視的摩耗形態の発生領域は、食込み度 D_p と、衝突粒子と材料との間の接触界面における、無次元せん断強度 f を両軸とする摩耗形態図により示される⁽³⁾⁽⁴⁾。ステンレス鋼の場合、dry (大気中) では $f = 0.8 \sim 0.9$ 、油潤滑下では $f = 0.5 \sim 0.7$ である。水潤滑下での f は、油潤滑下と dry の中間であり、 $f = 0.7 \sim 0.8$ と推定される。これを図 11 の摩耗形態図⁽⁴⁾に示すと、空中噴流、水中噴流ともに、ploughing タイプの摩耗領域にあることがわかる。

なお、ploughing タイプにおいては、1 回の引っかかりではほとんど摩耗しないが、繰返し引っかくことにより、薄片状の shear tongue と呼ばれる摩耗が、ときどき発生することが知られている⁽⁵⁾。実際には、衝突粒子の形状には、ばらつきがある。もし D_p 値が上記予測値の 2 倍程度になる場合には、wedge タイプの摩耗の発生もあり得るわけであり、事実観察される微視的摩耗形態に、部分的に認められる。

3・9・2 実機水車の摩耗について 実機水車の微視的摩耗形態を図 9 に示したが、これらは、図 11 の摩耗形態図で、空中および水中噴流の位置に近いものと

考えられる。しかし、同一河川地点において、仮に水車の仕様が 바뀌り、落差が 10 倍になれば、速度は 3.2 倍となり、この場合、土砂条件、材料を同じとすれば、 $D_{p\max}$ は 1.8 倍となる。摩耗は、wedge タイプの領域となり、摩耗量は急速に増大することがわかる。

4. 結 言

(1) 噴流実験装置によるステンレス鋼 (5Ni13CrSC, SUS304) の微視的摩耗形態は、ploughing タイプの引っかかりこんが支配的であり、部分的に wedge タイプが認められる。

(2) (1) の微視的摩耗形態は、噴流の角度と土砂粒径を変えても、大きくは変わらない。

(3) 複合損傷においては、ploughing により盛り上がった両側部 (塑性変形部) が、キャビテーションにより、細かい単位 (サブ μm) で破壊脱落していることがわかった。

(4) Composite metal では、wedge タイプはほとんど認められず、ploughing タイプが支配的である。

(5) 回転円盤の微視的摩耗形態は、弱い ploughing タイプであると考えられる。

(6) 供試実機水車の微視的摩耗形態は、ploughing タイプで、部分的に wedge タイプが認められ、水中噴流実験および、空中噴流実験結果の一部に、近似した形態を認めることができる。

(7) 噴流実験結果を、砂粒の最大食込み度 $D_{p\max}$ 、無次元せん断強度 f を用いて、摩耗形態図上に示すことができる。空中、水中実験結果のいずれも ploughing タイプの摩耗領域に存在し、SEM 観察結果と合

図 11 摩耗形態図

表 2 $D_{p\max}$ の計算結果

Experimental Apparatus	v (m/s)	Silt use	$D_{p\max}$
Impinging jet in air	20	River silt	0.083
		Al_2O_3	0.093
Impinging jet in water	40	River silt	0.118
		Al_2O_3	0.132

致する。すなわち、実験室評価法としては噴流試験が適していると考えられる。

(8) 摩耗形態図より、河川状況、水車仕様、材料、運転を変えたときの、摩耗の予測ができる。

本研究の一部は昭和 63、平成元年度科学研究費補助金（国際学術研究、課題番号 63044009）により実施された。本研究を行うにあたり、有益なご助言を賜った、東北大学流体科学研究所 大場教授、伊藤助手、東北大学工学部 加藤教授ならびに、実験に協力いただいた日立製作所 佐藤、高安研究員に感謝する。

〔付 録〕

図 10 に示される衝突のモデルを考える。以下のように記号を追加する。 R : 衝突粒子半径, t : 衝突開始からの時間, m : 衝突粒子の質量, $t_{\max}: h=h_{\max}$, $a=a_{\max}$ のときの時間

(1) $h_{\max}$ の誘き方

衝突粒子の運動方程式は、

$$F = -md^2(h/\sin\theta)/dt^2 \quad (1)$$

境界条件は

$$h=0 \text{ のとき } d(h/\sin\theta)/dt = v \quad (2)$$

$$h=h_{\max} \text{ のとき } d(h/\sin\theta)/dt = 0 \quad (3)$$

$$h=0 \text{ のとき } h/\sin\theta = 0 \quad (4)$$

一方、幾何学的に、 R , a , h は次の条件

$$R^2 = a^2 + (R-h)^2 \quad (5)$$

を満たすから

$$a^2 = 2Rh - h^2 \quad (6)$$

ここで、接触が完全に塑性的であり、 $\pi a^2/2$ の面積が、垂直方向の押付力 $F \sin\theta$ を、圧力 H で支えるものと仮定すると、

$$\pi a^2 H/2 = F \sin\theta \quad (7)$$

式(6)、(7)より、

$$F = \pi H(2Rh - h^2)/2 \sin\theta \quad (8)$$

式(8)を、式(1)に代入すると

$$\frac{d^2(h/\sin\theta)}{dt^2} = -\frac{\pi H(2Rh - h^2)}{2m \sin\theta} \quad (9)$$

よって

$$d^2 h/dt^2 = -\pi H(2Rh - h^2)/2m \quad (10)$$

式(10)より

$$dh/dt = -\pi H(2Rh - h^2)t/2m + C_1 \quad (11)$$

境界条件式(2)より

$$C_1 = v \sin\theta \quad (12)$$

式(11)、(12)より

$$dh/dt = -\pi H(2Rh - h^2)t/2m + v \sin\theta \quad (13)$$

式(13)より

$$h = -\pi H(2Rh - h^2)t^2/4m + vt \sin\theta + C_2 \quad (14)$$

$$\text{境界条件式(4)より } C_2 = 0 \quad (15)$$

式(14)、(15)より

$$h = -\pi H(2Rh - h^2)t^2/4m + vt \sin\theta \quad (16)$$

$h=h_{\max}$ のときには、式(16)は次式で表される、

$$h_{\max} = -\pi H(2Rh_{\max} - h_{\max}^2)t_{\max}^2/4m + vt_{\max} \sin\theta \quad (17)$$

一方、境界条件式(3)を式(13)に代入すると

$$t_{\max} = \frac{2mv \sin\theta}{\pi H(2Rh_{\max} - h_{\max}^2)} \quad (18)$$

式(18)を式(17)に代入すると

$$h_{\max} = \frac{mv^2(\sin\theta)^2}{\pi H(2Rh_{\max} - h_{\max}^2)} \quad (19)$$

よって

$$h_{\max}^3 - 2Rh_{\max}^2 + mv^2(\sin\theta)^2/\pi H = 0 \quad (20)$$

$$m = \pi R^3 \rho/3 \quad (21)$$

式(21)を式(20)に代入すると、

$$\left(\frac{h_{\max}}{R}\right)^3 - 2\left(\frac{h_{\max}}{R}\right)^2 + \frac{4\rho v^2(\sin\theta)^2}{3H} = 0 \quad (22)$$

式(22)において、 $\left(\frac{h_{\max}}{R}\right)^3 \approx 0$ とすると

$$h_{\max}/R = v\sqrt{2\rho/3H} \sin\theta \quad (23)$$

(2) $D_{p\max}$ の誘き方

$$D_{p\max} = h_{\max}/a_{\max} \approx \sqrt{h_{\max}/2R} \quad (24)$$

式(23)、(24)より

$$D_{p\max} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{v \sin\theta} \sqrt{2\rho/3H} \quad (25)$$

よって、

$$D_{p\max} = 0.64 \sqrt{\rho \sin\theta} \sqrt{v/H} \quad (26)$$

式(26)より $D_{p\max}$ は、密度 ρ 、衝突角 θ 、衝突速度 v 、材料硬さ H により表すことができる。

文 献

- (1) 佐藤・ほか 2 名、土砂摩耗と壊食の複合損傷に関する基礎的研究（第 1 報、水中噴流による実験）、機論、56-523, B (1990), 696-701.
- (2) Sato, J., ほか 3 名、River Water Use in Silt Erosion Tests and Its Effects on Test Results, *Proc. Int. Symp. Large Hydraul. Mach. Assoc. Equip.*, (1989-3), 558.
- (3) Kato, K. and Hokkirigawa, K. *Proc. Congr. Int. Tribol.* LYON, France (1985-9).
- (4) Hokkirigawa, K. and Kato, K., An Experimental and Theoretical Investigation of Ploughing, Cutting and Wedge Formation during Abrasive Wear, *Proc. TRIBOLOGY Int.* 2-1-1 (1988), 51.
- (5) Kitunai, K., Kato, K., Hokkirigawa, K. and Inoue, H., Transitions between Microscopic Wear Modes during Repeated Sliding Friction Observed by a Scanning Election Microscope Tribosystem, *Proc. Int. Conf. Wear Mater.*, 1989, (1989), 807.