

中国の河川水による水車材料の土砂摩耗評価

Evaluation of Erosion of Hydraulic Turbine Materials by Chinese River Sand

潘 偉 閻 梁 黒澤 貞男 鈴木 敏暁

■ PAN Wei ■ YAN Liang ■ KUROSAWA Sadao ■ SUZUKI Toshiaki

中国の水力発電機器では、河川の土砂混入量が多いことから土砂摩耗による性能低下や流路部品の損傷が問題になっている。今回、中国内の代表河川の土砂成分や土砂濃度などを調査し、実際の河川土砂及び人工砂を使って水車適用材料の土砂摩耗特性を実験的に評価した結果、東芝開発の耐土砂摩耗コーティングの適用によって土砂摩耗が大幅に低減できることを確認した。更に、河川水の主成分と同一の人工砂を製作して摩耗試験を行い、その試験結果を基に実際の河川水による土砂摩耗特性を精度よく推定することができた。

Performance degradation and damage of flowpath components due to sand erosion is a crucial issue in hydroelectric power generation equipment in China, because Chinese rivers contain large amounts of sand.

A study was conducted on the composition and concentration of sand in silt-laden water in a typical river in China and experiments on silt abrasion of hydraulic turbine materials, including a silt abrasion-resistant thermal coating developed by Toshiba, were performed using artificial sands as well as actual sand collected from the river. The results confirmed the effectiveness of the silt abrasion-resistant coating technology in protecting a hydraulic turbine from sand erosion. Furthermore, the results of the erosion tests demonstrated that artificial sands with similar compositions to the actual river sand can simulate the erosion behavior of the actual sand with high precision.

1 まえがき

中国では、水力発電が全発電量の20%以上を占めており、電力供給のなかで大きな役割を果たしている。中国雲南省は、金沙江（長江の上流）、瀾滄江（らんそうこう：メコン川の上流）などを含め、合計六つの水系が貫いており、開発できる水力発電資源が全国第二位である。特に、金沙江は総延長2,360 km、落差3,200 m、開発できる水力発電資源は全国水力発電の1/5を占める。中国の「第12次五カ年計画（2011～2015年）」にはクリーンなエネルギーである水力発電を重点的に発展させる計画が盛り込まれており、今後、金沙江には大型水力発電の開発が予想される。しかし、中国の河川には多量の土砂が含まれており、土砂摩耗による水力発電機器の損傷は深刻な問題であり、経済損失も無視できない状況にある。

今回、この問題に対応するため、中国の河川における水車材料の土砂摩耗メカニズムを把握するとともに、東芝が開発した耐土砂摩耗コーティングの有効性を確認することにした。金沙江を対象に河川水に含まれる土砂成分やその濃度の調査を進め、一方でジェット噴射式土砂摩耗試験装置を開発し、実際の河川土砂及び人工土砂を使って耐土砂摩耗コーティングを含む水車材料の評価試験を実施した。

ここでは、調査や評価試験から得た今後の水車の土砂摩耗寿命評価やその対策に有益な知見について述べる。

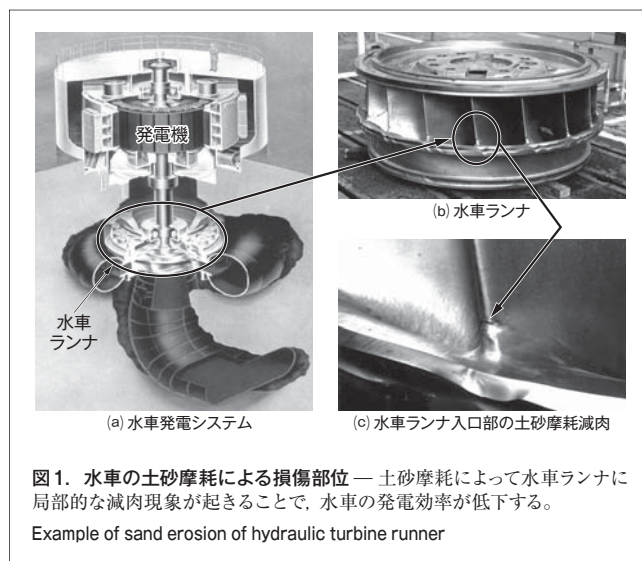


図1. 水車の土砂摩耗による損傷部位 — 土砂摩耗によって水車ランナに局所的な減肉現象が起きることで、水車の発電効率が低下する。
Example of sand erosion of hydraulic turbine runner

2 水車損傷の特徴

水車のコア部材である水車ランナの土砂摩耗の一例を図1に示す。水車の土砂摩耗は、流速の速い水車ランナ入口部で発生しやすく、材料に比較的硬いマルテンサイト系13 mass%Cr（クロム）-4 mass%Ni（ニッケル）ステンレス鋳鋼を使用しているにもかかわらず、局所的に減肉していくことが特徴である。このような局所的な土砂摩耗損傷によって生じたアンバランスにより、水車の振動が引き起こされる。また、水車ランナの形

状が変わることによって発電効率が低下する。そのため一般的には、土砂磨耗による損傷部位に対しては、溶接補修が行われている。

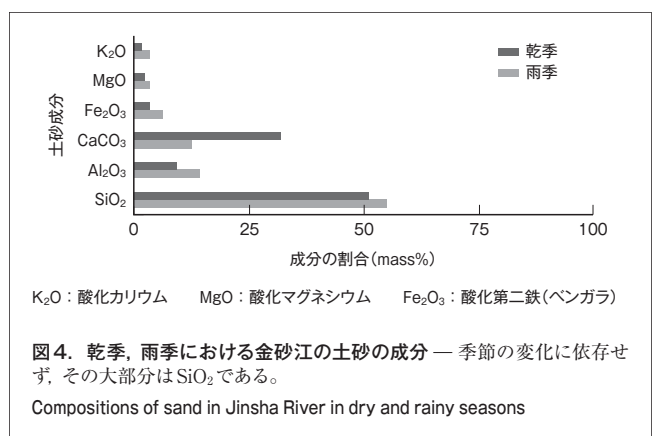
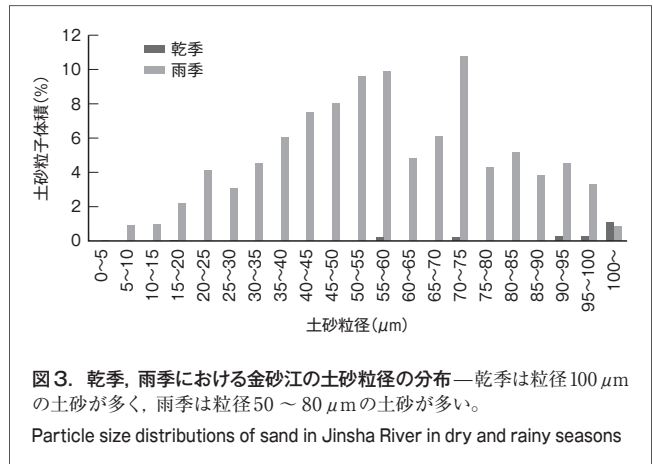
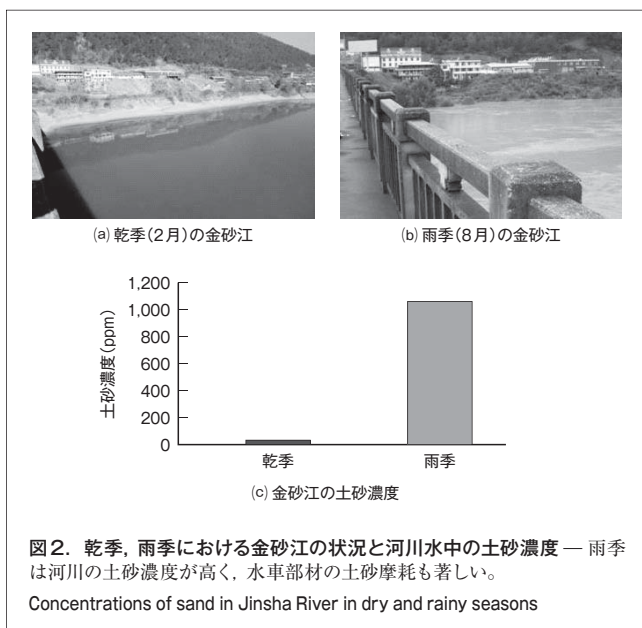
3 中国河川の土砂水分析調査

金沙江において、乾季(2月)と雨季(8月)に分けて河川の土砂水を採取し、河川水に含まれる土砂の濃度、粒径分布、及び成分を調査した。その結果、雨季の金沙江の土砂濃度は乾季と比べ100倍以上に増えることが明らかになった(図2)。

金沙江はチベット高原を起点として、温暖湿潤な季節風気候を持つ山岳地帯の雲南省に入る。この山岳地帯の地表は土壌が少なく、岩盤の露出が多く、高原のため植物の成長も遅い。乾季には岩盤の風化と浸食が進み、雨季には風化された岩石屑(くず)や土砂が雨水とともに金沙江に流れ込み、河川水の土砂濃度が高くなる。

また、乾季と雨季における金沙江の土砂の粒径分布を測定した結果、乾季と比べて雨季の土砂粒径は小さくなる傾向が確認できた(図3)。近年、金沙江の上流側にあいついで大型水力発電所が建設され、発電ピークとなる雨季には河川水はダムに貯められ、粒径が比較的大きい土砂は沈砂池に沈殿するため、雨季に河川の下流側に流れる砂は小さくなると考えられる。一方乾季になると、沈砂池の清掃によって粒径が比較的大きい土砂の一部が再び下流側に流れると考えられる。

乾季と雨季における金沙江の土砂成分の調査結果を図4に示す。土砂の主成分は、二酸化ケイ素(SiO_2)、酸化アルミニウム(Al_2O_3)、及び炭酸カルシウム(CaCO_3)であり、土砂成分の1/2以上を SiO_2 が占めている。 SiO_2 や Al_2O_3 は水車を構成する金属材料より硬いため、土砂磨耗を引き起こす主成分に



なる。土砂に含まれる成分は上流側の鉱脈採掘などの影響により乾季と雨季で若干異なるが、中国の土木研究機関による調査結果⁽¹⁾から、金沙江の土砂成分は上流側の山岳地帯の岩石成分とほぼ一致していることがわかる。

4 ジェット噴射式土砂磨耗試験装置

水車材料の土砂磨耗による挙動を評価するために、ジェット噴射式土砂磨耗試験装置を開発した(図5)。この装置の特徴は、実際の河川土砂が水車ランナに衝突する現象を平板衝突噴流で模擬した点にあり、土砂水の噴射速度は最大100 m/sである。また、噴射ノズルに対する試験片の設置角度を可変にすることで、衝突角度を0°から90°の間に調整できる。噴射ノズルは耐土砂磨耗性に優れた窒化ケイ素(Si_3N_4)セラミックスで製作し、試験中に噴流速度が変わらないように配慮するとともに、実際の河川土砂に近い条件下で土砂磨耗評価を行うため、金沙江で採取した実際の土砂を使用する。土砂水は攪拌(かくはん)機能を持つ土砂水タンク内で一定の濃度に調整してから、圧力ポンプを介して噴射ノズルに供給する。また、試験前後で土砂水を採取し、試験中に土砂の濃度や形状が変わらないことを確認した。

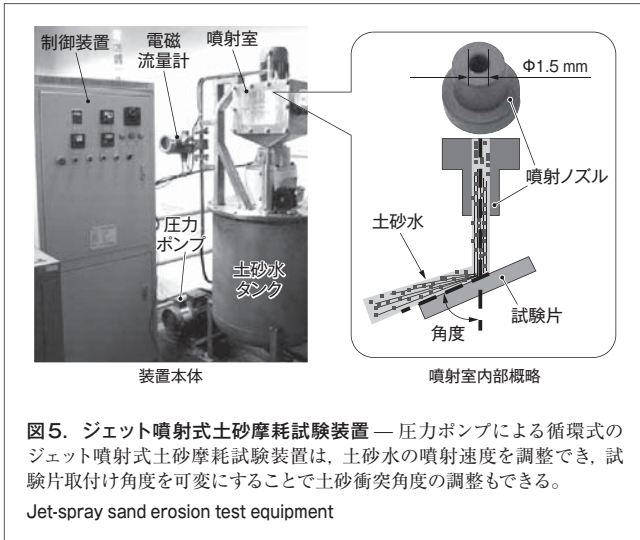


図5. ジェット噴射式土砂摩耗試験装置 — 圧力ポンプによる循環式のジェット噴射式土砂摩耗試験装置は、土砂水の噴射速度を調整でき、試験片取付け角度を可変にすることで土砂衝突角度の調整もできる。
Jet-spray sand erosion test equipment

5 水車材料の土砂摩耗特性評価

5.1 試験材料

水車ランナ及びガイドベーンに使用される13 mass%Cr-4 mass%Niステンレス鋼(JIS(日本工業規格)SCS6, ピッカース硬さ:305 Hv)と、ケーシング及び吸出し管に使用される溶接構造用炭素鋼(JIS SM490, ピッカース硬さ:160 Hv)を土砂摩耗試験に供した。更に、耐土砂摩耗対策として東芝が開発した硬質のタングステンカーバイド-コバルト(WC-Co)溶射コーティング(以下、TCCと呼ぶ。ピッカース硬さ:1,400 Hv)の評価を行った。

TCCは水車に適用した実績があり、長い耐摩耗寿命を持つことが確認されている⁽²⁾。今回TCCは、特殊な焼結方法で製造したWC-CoCrNi粉末^(注1)を用いて高速フレイム溶射(HPHVOF: High Pressure High Velocity Oxygen Fuel)によってコーティング施工した。TCCの表面気孔率(単位面積当たりの気孔面積)は0.5%以下に制御されており、緻密であり、かつ硬さは一般のHVOFコーティングメーカーのWC-Coコーティング(ピッカース硬さ:1,100 Hv)と比べ20%以上向上している。

5.2 土砂摩耗試験の結果

SCS6, SM490, 及びTCCに対して、金砂江で採取した実際の土砂を用いて土砂摩耗試験を実施した。試験片の寸法は40(長さ)×15(幅)×6(厚み)mmとし、表面は研磨仕上げにより鏡面に仕上げた。土砂水濃度は0.5 mass%, 噴射速度は50 m/s, 噴射角度は20°, 60°, 及び90°, 各噴射角度に対する噴射時間は10 minとした。噴射ノズルの内径は定期的計測し、土砂摩耗による変化がないことを確認した。

土砂摩耗試験後のSCS6とTCCの試験片外観を図6に示す。いずれの噴射角度においても、SCS6には顕著な土砂摩

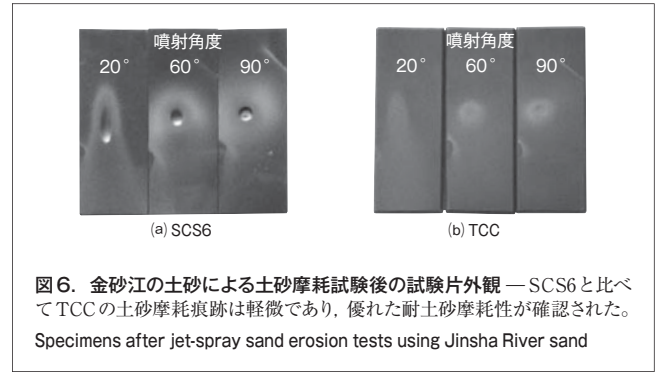


図6. 金砂江の土砂による土砂摩耗試験後の試験片外観 — SCS6と比べてTCCの土砂摩耗痕跡は軽微であり、優れた耐土砂摩耗性が確認された。
Specimens after jet-spray sand erosion tests using Jinsha River sand

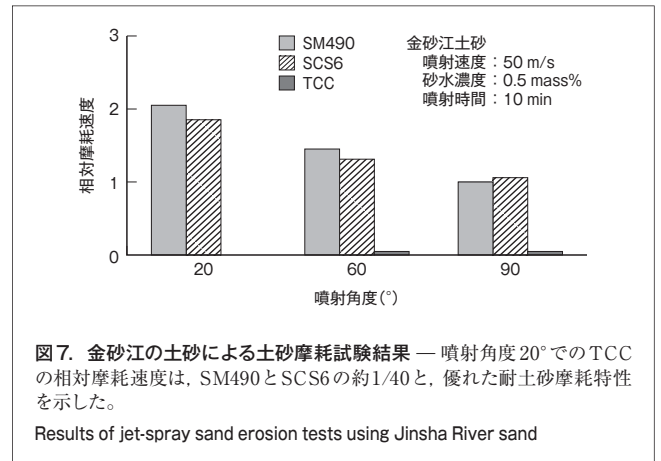


図7. 金砂江の土砂による土砂摩耗試験結果 — 噴射角度20°でのTCCの相対摩耗速度は、SM490とSCS6の約1/40と、優れた耐土砂摩耗特性を示した。
Results of jet-spray sand erosion tests using Jinsha River sand

耗痕跡が認められたが、TCCでは土砂摩耗の痕跡が非常に軽微であることがわかる。

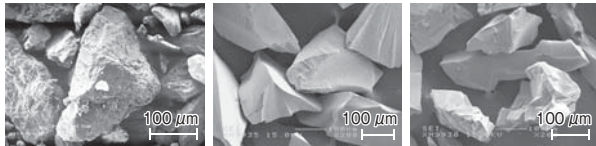
土砂摩耗試験前後の重量損失、土砂の運動エネルギー、及び材料の体積減少速度を基に、噴射角度90°でのSM490の土砂摩耗速度を1として求めた、各試験材の相対摩耗速度を図7に示す。SM490とSCS6は、噴射角度20°での相対摩耗速度がもっとも高く、噴射角度の増大に伴って相対摩耗速度は低下する傾向が認められる。一方TCCは、噴射角度20°での相対摩耗速度がもっとも低く、この条件下ではSM490とSCS6に比べ約1/40となり、優れた耐土砂摩耗特性を示した。

実際の水車ランナでの土砂衝突角度は小さい場合が多く、SCS6で構成される水車ランナ及びガイドベーンは厳しい土砂摩耗環境に置かれていることがわかる。今回の土砂摩耗試験結果により、噴射角度が小さくても東芝が開発した耐土砂摩耗コーティングのTCCは優れた特性を示しており、今後、金砂江に建設が予想される水車の土砂摩耗対策として期待される。

5.3 河川水での土砂摩耗特性の予測評価

これまでの研究により、土砂摩耗量と土砂粒子運動エネルギーは比例関係にあることがわかっている⁽³⁾。このため、金砂江の土砂の主成分であるSiO₂とAl₂O₃について、図8に示すような人工土砂による土砂摩耗試験を実施して、金砂江の実際の土砂による土砂摩耗特性の予測を試みた。人工土砂のSiO₂及びAl₂O₃は、金砂江の土砂の化学成分、形状、及び寸

(注1) WC-Coに結合剤のCo, Cr, Niとを混合し、焼結した粉末。



(a) 金沙江土砂 (b) 人工土砂 SiO₂ (c) 人工土砂 Al₂O₃

図8. 金沙江の土砂と、人工土砂のSEM(走査型電子顕微鏡)による観察—金沙江の土砂の化学成分、形状、及び寸法に近い人工土砂を使用することで、河川からの砂採取を省略し、効率的に水車材料の土砂摩耗特性を予測できる。

Scanning electron microscopy (SEM) observations of Jinsha River sand and artificial sands

法と類似になるように選別した。人工土砂試験結果及び河川水に混入するSiO₂とAl₂O₃の重量比率を基に、金沙江の河川水による土砂摩耗特性を式(1)から推定する。

$$WV = Wa \cdot WVa + Ws \cdot WVs \quad (\text{mm}^3/\text{min}) \quad (1)$$

WV : 体積減少速度(金沙江の土砂による試験結果)

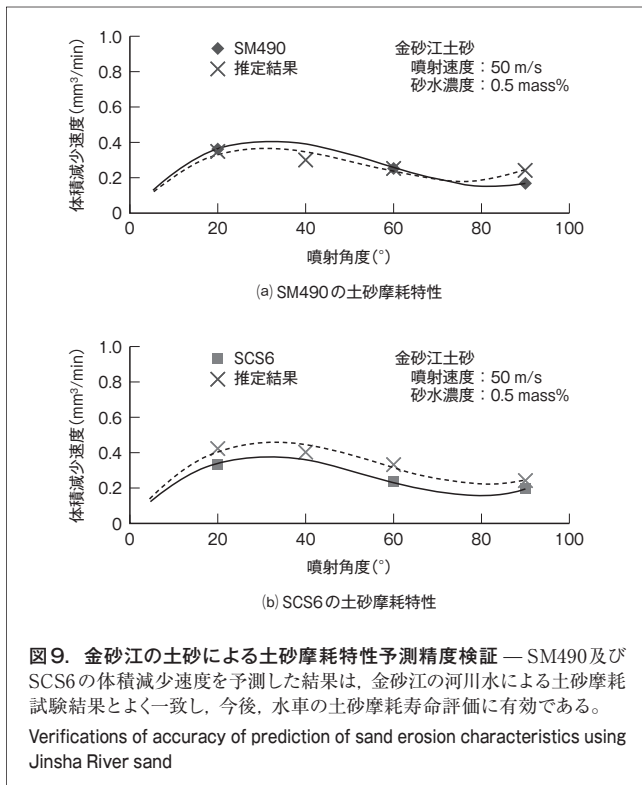
WVa : 体積減少速度(人工土砂Al₂O₃による試験結果)

WVs : 体積減少速度(人工土砂SiO₂による試験結果)

Wa : 金沙江の土砂におけるAl₂O₃含有重量比率

Ws : 金沙江の土砂におけるSiO₂含有重量比率

式(1)による推定結果と試験結果の関係を図9に示す。推定結果は河川水による土砂摩耗試験結果とよく一致することを確認できた。したがって、水力発電に適した他の河川につ



いても、土砂成分を分析して人工土砂による土砂摩耗試験で測定した体積減少速度を式(1)により求めることで、土砂摩耗特性を高精度に推定できると考えられる。

6 あとがき

中国の河川水の土砂調査と分析を行い、乾季及び雨季の土砂の特性を明らかにすることができた。また、ジェット噴射式土砂摩耗試験装置を開発し、河川の実際の土砂及び人工土砂を用いて水車材料と東芝が開発した耐土砂摩耗コーティングのTCCを評価し、TCCの適用により土砂摩耗が大幅に低減できることを確認した。更に、河川水の土砂主成分であるSiO₂とAl₂O₃について人工土砂を製作して摩耗試験を行い、その試験結果を基に河川の実際の土砂による土砂摩耗特性を精度よく予測できることを確認した。

TCCは日本を含め、土砂が多いネパールの河川の水力発電所にも適用されており、顧客から高い評価を受けている。今後は中国の水力事業の発展に貢献するため、TCCを用いた耐土砂摩耗コーティング技術を活用していく。

文 献

- (1) Liu, W. Mineralogical Characteristics of Suspended Matters and Sediments in the Jinshajiang River and Their Superficial Geochemical Significance. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, China. **26**, 2, 2007, p.164 - 169.
- (2) 中川 齊年 他. 世界市場での大容量・長寿命化のニーズに応える水車適用技術. 東芝レビュー. **65**, 6, 2010, p.11 - 14.
- (3) Bitter, J.G.A. A study on erosion phenomena part I. Wear. **6**, 1963, p.5 - 21.



潘 偉 PAN Wei, Ph.D.

清華大学 材料工学科教授、工博。
セラミックス及びナノテクノロジーの研究に従事。
Tsinghua University



閻 梁 YAN Liang

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 金属材料開発部主務。金属材料の技術開発に従事。
Power and Industrial Systems Research and Development Center



黒澤 貞男 KUROSAWA Sadao

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 回転機器開発部主査。水力機器の技術開発に従事。
Power and Industrial Systems Research and Development Center



鈴木 敏暁 SUZUKI Toshiaki

電力システム社 京浜事業所 水力機器部長。
水力機器の開発に従事。
Keihin Product Operations