

# 繊維強化型複合材料による キャビテーション損傷補修技術の確立

中本浩章\* 能見基彦\*\* 早房敬祐\*\*  
服部修次\*\* 楊 曉 輝\*\*

## Development of the repair technology using the cavitation erosion resistance of fiber-reinforced plastic

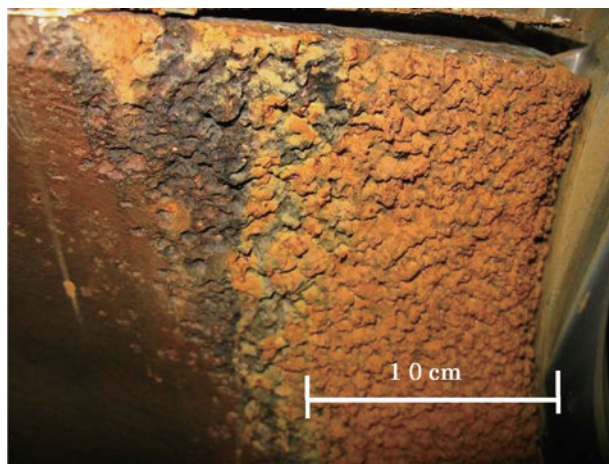
by Hiroaki NAKAMOTO, Motohiko NOHMI, Keisuke HAYABUSA, Shuji HATTORI, & Xiaohui YANG

Pumps used in critical applications, such as water treatment plants and power plants, are subject to regular maintenance for long-term operation. In recent years, comparatively minor damage is often repaired using plastic repair materials with high workability; a wide variety of plastic repair materials are commercially available for various applications. Plastic repair materials are evaluated in terms of their workability, water resistance, chemical resistance, cavitation erosion resistance, wear resistance, and delamination strength. However, complete data of these parameters are not provided in manufacturer catalogs, and cavitation erosion resistance has not been quantitatively clarified. We conducted cavitation erosion tests on plastic repair materials. This study reports the results of examination of glass fiber-reinforced plastics (GFRP) with excellent cavitation erosion resistance.

**Keywords:** Maintenance technology, Repair technology, Cavitation, Cavitation erosion, Glass fiber reinforced plastic, Plastic repair material, Cavitation erosion test, Cavitation erosion resistance

### 1. はじめに

浄水場や揚水発電所など生活や産業に密接に関連している施設において使用されるポンプは、長期間の使用に耐えるため、定期的な保守管理のもとで運用されている。写真1は東北管内の揚水機場で20年間以上使用された口径1000 mm以上のポンプのキャビテーション損傷写真である。ケーシング内部の広範囲にわたって顕著なキャビテーション壊食痕が確認された。キャビテーションは作動流体の圧力減少によって流体中の気泡核が成長し流体の圧力回復が起こる場所で気泡が崩壊する現象である。キャビテーションによって発生した気泡が崩壊する際に発生する衝撃波やマイクロジェットによって、部材表面



13-57 01/240

写真1 20年以上使用されたポンプ内部に発生した  
キャビテーション損傷

Photo 1 Cavitation erosion of pump casing in service  
for more than 20 years

が海綿状に損傷するキャビテーション壊食現象は、材料損傷による機器の寿命低下や部材破断を引き起こす非常に深刻な問題である。ターボ機械協会指針<sup>1)</sup>によると、キャビテーション壊食に対する有効な事前対策方法として、

\* Ebara International Corporation  
\*\* 風水力機械カンパニー 技術生産統括 開発統括部  
\*\* 同 同 同  
技術開発室 材料技術グループ  
\*\* 福井大学大学院

産業機械 (2012年9月) に掲載した内容を一部加筆・修正して転載した。

耐キャビテーション壊食性に優れた材料で流体機械を製作することが挙げられている。しかし、経年使用されたポンプ機場ではキャビテーションによる材料損傷箇所を補修する事後対策技術が求められている。特に大規模ポンプ施設の機能停止は産業や生活に多大な影響を与え得るため、補修点検の短納期化によるメンテナンス期間の短縮と補修箇所の強度向上による延命化が求められている。

近年では比較的軽微な補修を行う場合には施工性に優れた樹脂系の補修材料が用いられることが多く、用途に応じて様々な材料が販売されている。樹脂系補修材料を適切に選定するための評価項目としては、施工性、耐水性、耐薬品性、耐キャビテーション壊食性、耐スラリー摩耗性、被補修材表面との界面強度が挙げられるが、材料メーカーのカタログに記載されている情報だけでは十分ではなく、特に樹脂系補修材の耐キャビテーション壊食性については定量的な評価が行われていない。

このため、我々は多様な樹脂系補修材料について耐キャビテーション壊食性を評価し<sup>2)</sup>、実用性についての検討を行った。本報告では優れた耐キャビテーション壊食性を示した補修用繊維強化型複合材料であるGFRP(ガラス繊維強化プラスチック)の検討結果及び実機応用事例について報告する。

## 2. 試験方法及び試験材料

### 2-1 試験方法

キャビテーション壊食試験はASTM G32-03<sup>3)</sup>に基づく磁歪式振動装置を用いた静置試験片法によって行った。図1に試験装置の概要を示す。振動子の増幅ホーンの先

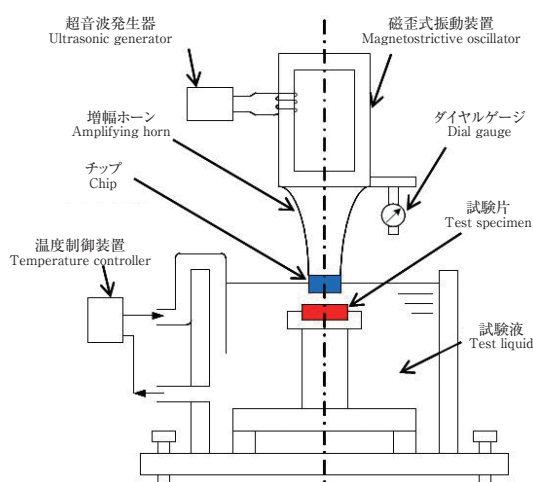


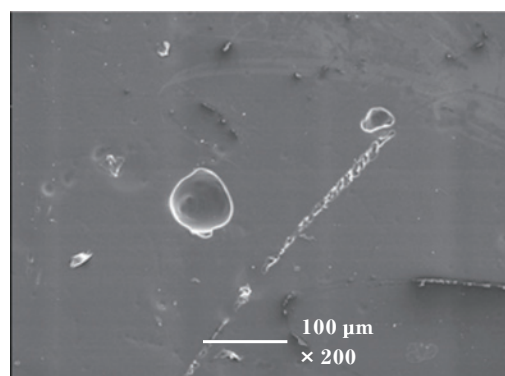
図1 磁歪式振動装置

Fig. 1 Magnetostrictive vibratory apparatus

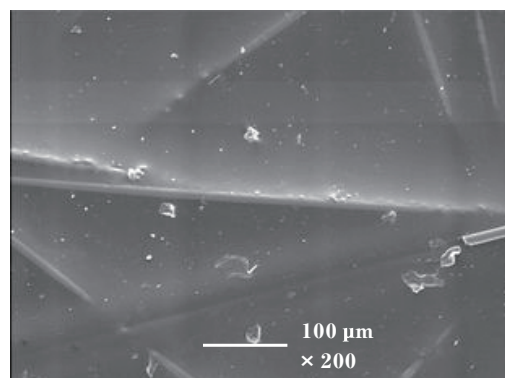
端に耐壊食性に優れた直径16 mmのステンレス鋼製のチップを取り付け、このチップと平行になるよう試験片を対向させて静置した。チップと試験片の間隔は1 mmであり、振動子の共振周波数は19.5 kHz、チップ端面の全振幅 (peak to peak) は50  $\mu\text{m}$  一定とした。試験結果は累積体積減少量を用いて整理した。質量は所定時間ごとに取り出した試験片をイオン交換水中で超音波洗浄し、真空装置で乾燥させた後に精密天秤 (感度0.01 mg) を用いて測定した。

### 2-2 試験材料

本研究ではGFRPの耐キャビテーション壊食性を検討するにあたり、GFRPを構成する各層の構造が耐キャビテーション壊食性に与える影響を調べるために4種類の試験片；表面にコーティング材Aが施工された試験片GFRP-A、表面にコーティング材Bが施工された試験片GFRP-B、表面がコーティングされていない試験片GFRP-C (non-coating)、及びコーティングAが施工されているがガラス繊維を含有していない試験片GFRP-A (non-fiber) について試験を行った。写真2は壊食試験



(a) GFRP-Aの表面  
(a) Virgin surface of GFRP-A



(b) GFRP-Bの表面  
(b) Virgin surface of GFRP-B

13-57 02/240

写真2 壊食試験前のGFRP試験片の表面写真  
Photo 2 Virgin surface of GFRP test pieces

前のGFRP-AとGFRP-Bの表面写真である。GFRP-Aの表面には繊維の筋は観察できなかったがGFRP-Bの表面には多数の繊維の筋が見られた。

### 3. 試験結果と考察

#### 3-1 試験結果

図2はGFRP試験片の体積減少量曲線である。●印で示したGFRP-Aの体積減少量は、試験開始直後から直線的に増加した。5時間後には7 mm<sup>3</sup>に達し、その後減少速度は低下したが10時間後には11 mm<sup>3</sup>に達した。◆印で示したGFRP-Bの体積減少量は、試験開始後やや大きな速度で増加し、2時間経過時には10 mm<sup>3</sup>に達した。その後、減少速度は低下しGFRP-Aの勾配とほぼ同一の勾配となった。▲印で示したGFRP-C (non-coating)の体積減少量は、試験開始後急速に増加した。○印で示したGFRP-A (non-fiber)の体積減少速度は試験開始0.5時間から1時間にかけて最大となり、体積減少量はおよそ16 mm<sup>3</sup>に達した。その後、体積減少速度は1.75時間後までわずかに低下し、1.75時間以降から再び大きな速度で増加した。試験開始後2.5時間には体積減少量はおよそ30 mm<sup>3</sup>となった。

#### 3-2 考察

GFRP-Bの体積減少量がGFRP-Aの体積減少量よりも大きい理由としては、表面粗さの影響が考えられる。図3よりGFRP-Aの表面粗さは算術平均粗さ方式で1.92 μmRaであり、GFRP-Aよりも体積減少量の大きいGFRP-Bの表面粗さは16.98 μmRaであることが分かった。湯沢らはキャビテーション壊食量は材料表面の粗さに対して単調増加する傾向にあることを示しており<sup>4)</sup>、本研究のGFRP-AとGFRP-Bの表面粗さと体積減少量の関係は湯

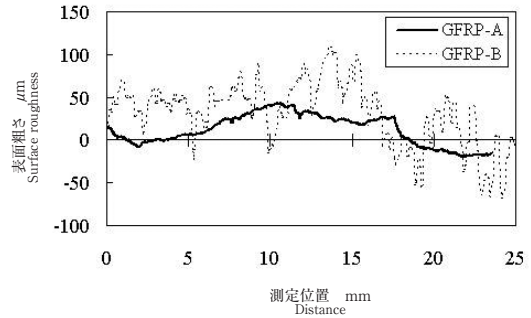
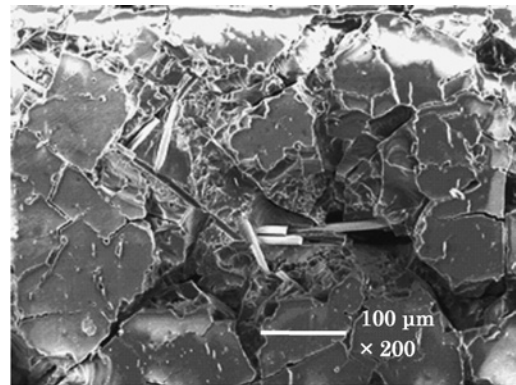


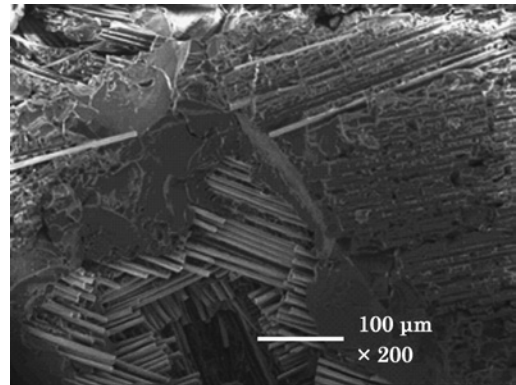
図3 GFRP-A及びBの表面状態  
Fig. 3 Surface profile of GFRP test pieces

沢らの結果と同様の傾向を示した。

GFRP-A (non-fiber)の体積減少量がGFRP-Aの体積減少量よりも大きい理由としては、ガラス繊維が影響していると考えられる。写真3(a)に示したGFRP-Aの壊食面を見ると試験片内のガラス繊維が樹脂母材の脱落を拘束していることが確認できた。これに対してGFRP-A (non-fiber)はガラス繊維を含有していないため、繊維



(a) GFRP-Aの壊食面  
(a) Erosion surface of GFRP-A



(b) GFRP-Cの壊食面  
(b) Erosion surface of GFRP-C

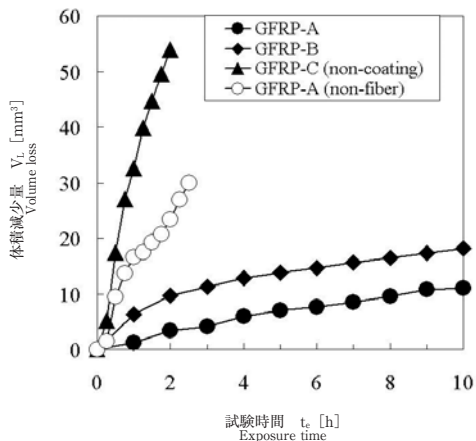
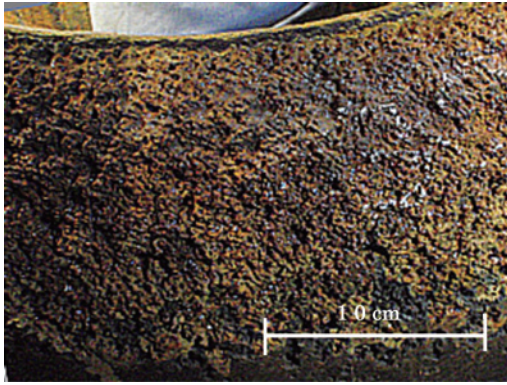


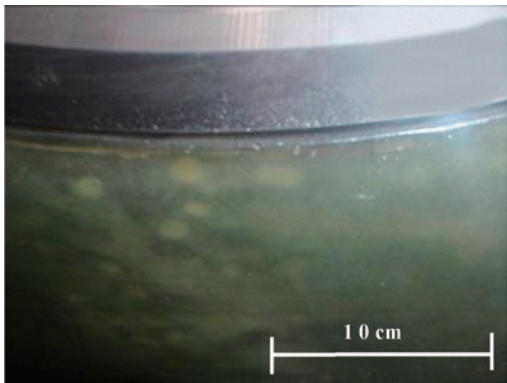
図2 GFRP試験片の体積減少量曲線  
Fig. 2 Volume loss curves of GFRP

写真3 壊食試験後のGFRP試験片の表面写真  
Photo 3 Erosion surface of GFRP test pieces

13-57 03/240



(a) 補修前  
(a) Erosion surface



(b) 補修後  
(b) Repaired surface

13-57 04/240

写真4 GFRP-Aによる補修事例  
Photo 4 Pictures of GFRP-A repairment

による脱落を拘束する作用が得られない。

GFRP-C (non-coating) の最大速度期の勾配は  $436 \text{ mm}^3/\text{h}$  であり、他の GFRP 試験片に比べて壊食速度が大きい。写真3 (b) に GFRP-C (non-coating) の壊食写真を示す。壊食面から繊維と母材が剥離した様相が観察でき、繊維が母材を拘束する効果が得られずに耐壊食性が低下したと考えられる。

GFRP-A (non-fiber) の最大速度期の勾配が GFRP-C (non-coating) よりも小さい理由としては、GFRP-C

(non-coating) はコーティングされておらず、GFRP-A (non-fiber) はコーティングされていることが原因であると考えられる。

#### 4. おわりに

本研究ではキャビテーションによる損傷を受けたポンプ部品を対象とした効果的な樹脂系補修材料による補修技術を確立することを目的に、多様な樹脂系補修材料について耐キャビテーション壊食性の評価を行った。

補修用繊維強化型複合材料 GFRP の検討の結果、最も耐壊食性に優れているのは GFRP-A であり次いで GFRP-B の耐壊食性が優れていることが明らかとなった。GFRP-C (non-coating) 及び GFRP-A (non-fiber) の耐壊食性は比較的小さく、その原因は積層構造と含有繊維の影響であることが確認できた。

耐キャビテーション壊食性の検討に加えて GFRP の施工性及び価格を検討した結果、損傷部品を新規品に取り替える場合よりも低コスト、短納期で補修を行うことが可能となり、GFRP によるキャビテーション損傷部の補修技術を確立することができた。写真4 は実際に GFRP-A を用いてキャビテーション損傷部を補修した写真である。GFRP の接着力を損なうことなく凹凸の激しい損傷面に施工する技術を適用することで、キャビテーション壊食に対する延命化を達成すると共に流体性能を回復することが可能となった。

#### 参考文献

- 1) 「TSJ G001 ポンプのキャビテーション損傷の予測と評価」(2011).
- 2) 中本浩章, 能見基彦, 早房敬祐, 服部修次, 楊曉輝: 補修用繊維強化型および粒子強化型複合材料のキャビテーション壊食, ターボ機械第40巻第2号 pp. 21-26 (2012).
- 3) ASTM G32-03, Standard Test Method For Cavitation Erosion Using Vibratory Apparatus.
- 4) 湯沢聡, 後藤史英, 奥津良之, 橋詰匠, 大田英輔: 高圧用調整弁のキャビテーション壊食 (第7報, プラグ表面粗さの初期壊食量に及ぼす影響), 日本機械学会第75期通常総会講演会講演論文集Ⅲ pp.39-40 (1998).