

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 1 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2009～2011

課題番号：21560085

研究課題名(和文) エロージョン特性に優れた高強度FRPのメカニズムの究明と最適構造に関する研究

研究課題名(英文) A study on optimal structure and investigate the mechanism of high-strength and excellent erosion characteristics of FRP

研究代表者

鮑 力民 (BAO Limin)

信州大学・繊維学部・准教授

研究者番号：10262700

研究成果の概要(和文): 繊維強化複合材料(FRP)の比弾性率と比強度が金属材料に比べて極めて大きいから広い分野で用いられている。しかし現在主に使用されているCFRPとGFRPは耐エロージョンが弱いという弱点があり、強度だけでなくその衝撃性能も求められている。本研究では、複合材料のエロージョンのメカニズムを解明し、高比強度かつエロージョンに強いFRP材料と構造の発見と開発を行った。スーパー繊維の軸と直径方向特性が異なることが利用して、高強度かつエロージョンもよいFRPを実現した。

研究成果の概要(英文): Fiber-reinforced polymer (FRP) composite materials have been widely used in various engineering fields because of their superior specific strength, lower density, and higher corrosion resistance compared to monolithic metal alloys. It has been reported that various applications of FRP in equipment expose it to erosion wear conditions. It has been reported that reinforcement fiber such as carbon fiber (CF) and glass fiber (GF) can enhance the strength of polymer composites, but reduce the particle erosion resistance of the polymer composites. In our study, organic high-polymer fibers (DyneemaR and ZylonR) were used as reinforcement to make fiber-reinforced polymers (FRPs). Tensile tests and particle erosion wear tests under various impact angles were carried out for comparison with carbon-fiber-reinforced polymer (CFRP), glass-fiber-reinforced polymer (GFRP), and unsaturated polyester (UP) resin. The damaged surfaces of the Dyneema-fiber reinforced polymer (DFRP) and Zylon-fiber-reinforced polymer (ZFRP) were analyzed with a scanning electron microscope, and the erosion wear mechanisms of the composites were discussed. It was concluded that it was feasible to develop the FRP materials with low density, high strength, and excellent particle erosion resistance.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械材料・材料力学

キーワード：ドライサンドエロージョン, FRP, スーパー繊維, 物性評価

### 1. 研究開始当初の背景

繊維強化複合材料(FRP)とは異なった材料(強化繊維・母材)を組み合わせて作られたもので、FRPの比弾性と比強度が普通の金属材料に比べて極めて大きいことである。また、FRPは小型化・軽量化の時代的要求に合致し、宇宙機器から航空機、船舶、自動車、スポーツ用品などの身近なものまで広い分野で用いられている。風力発電における重要な部品のプロペラーは発電効率を向上するために軽くかつ強いCFRP(カーボン繊維強化複合材料)を使用している。また、飛行機の胴体や高速移動車両の先頭部などは高強度と軽量性を両立するために、FRPが多く使われている。

しかし、砂漠や高山の悪環境において、風力発電機のプロペラーやレーダーの保護用ドームなどには黄砂などの衝突摩耗で傷み、高額なメンテナンス費用がかかるなど、粒子衝突摩耗に強いFRPの構造のメカニズムの解明と強く、軽くかつ耐粒子摩耗の最適なFRP材料と構造がメーカーから強く要請されている。

今までの研究では、GFRP、CFRPなどの複合材料は母材樹脂のみと比べて、エロージョンに弱いことを報告され、繊維強化複合材料は強度などに対して、“強化”されたが、高速粒子の衝突によるエロージョンに対して、繊維“弱化”複合材料になってしまい、FRPは粒子衝突の環境に適していない材料になっている。粒子衝突が多い環境でのFRP材料の使用は出来るだけ避けるのが現状である。

### 2. 研究の目的

本研究では、高比強度かつエロージョンに強い材料を開発するために、耐エロージョ

ンのメカニズムを解明し、それらを利用して高比強度かつエロージョンに強い新型のFRPと構造を提案し、実現する。また、樹脂材料の耐エロージョンを向上するために、今まで柔軟な粒子状材料が充てん物として使われ、材料強度が低下したことに対して、ナノ高剛性フィラーを充てんすることを提案し、ナノ粒子充てん材料のエロージョンメカニズムを解明する。現場で材料のエロージョン状態の自動計測方法がなかったことに対して、現場のFRPエロージョンの自動計測システムを提案と実現する。

### 3. 研究の方法

本研究では、高比強度かつエロージョンに強いメカニズムを追求するために、スーパー繊維中のダイニーマ繊維(DF)やザイロン繊維(ZF)を強化繊維として、FRP材を試作し、その力学特性とエロージョン特性を調べ、悪環境における高比弾性と比強度かつ耐エロージョンも優れたFRP材料の研究開発を試みる。

カーボン繊維と比較してスーパー繊維の価格が現在やや高い。高強度かつエロージョンに優れたハイコストパフォーマンスFRPが求められるために、エロージョンは材料表面のみに発生し内部にはほぼ影響を受けないことやスーパー繊維の耐エロージョン特性に着目し、スーパー繊維を表面に使用したハイブリッドFRPを提案する。ハイブリッドD-CFRPを成形し、エロージョン実験を行い、ハイブリッドFRPのエロージョン挙動を調べ、提案する方法の有効性を確認する。

また、ナノフィラー充てん材料の耐エロ

ージョンについて、高強度と高ヤング率の VGCF (Vapor- Grown Carbon Fiber) と CB (Carbon Black)を母材樹脂に充てんし、それらのフィラーの種類や充てん率などがエロージョン特性への影響を調べ、ナノフィラー充てん材料のエロージョン特性を明らかにする。

エロージョン自動測定システムについて光ファイバを用いた FRP エロージョンの感知センサを提案した。光ファイバ単体のエロージョン特性と光量の減衰などを調べ、エロージョン感知センサの利用の可能性を確認する。

#### 4. 研究成果

##### 4.1 高比強度かつエロージョンにも強い FRP の実現

提案した方法を利用し、DF と ZF を強化繊維として FRP を試作した。測定した FRP の力学特性は Fig.1 に示している。CFRP より高い比強度と比弾性率になった。

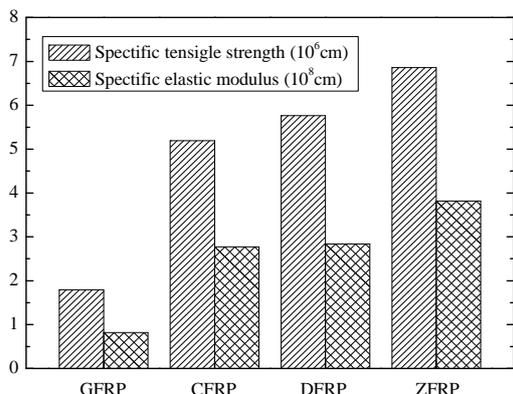


Fig. 1 Comparison of specific tensile strength and specific elastic modulus of four kinds of FRP.

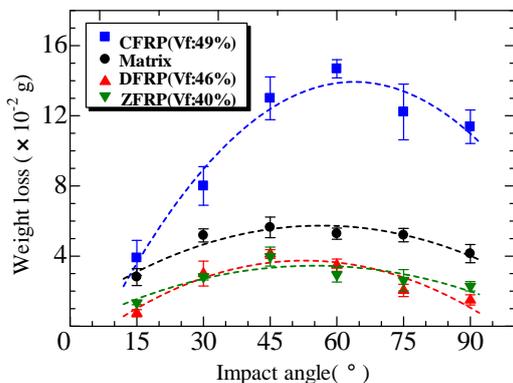


Fig. 2 Comparison of the erosion weight loss among the four kinds of materials.

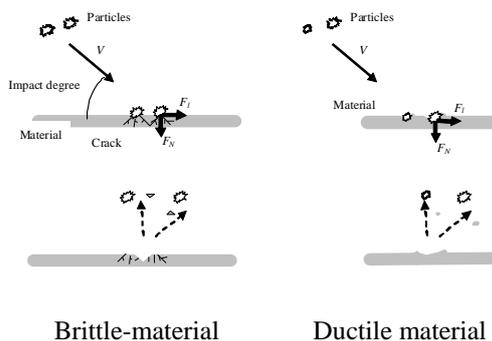


Fig.3 FRP エロージョンのメカニズム

図 2 は測定した各 FRP のエロージョン特性である。図に示したように、提案したスーパー繊維 FRP の耐エロージョン特性はこれまでの CFRP や GFRP より 10 倍以上に向上した。

これは、図 3 に示したように、強化繊維の軸方向の力学特性はカーボン繊維より強いですが、直径方向では延性材料特性を示し、両立できた。これは世界で初めて高比強度かつエロージョンにも強い FRP が実現できた。

##### 4.2 高強度かつエロージョンに優れたハイコストパフォーマンス FRP

ハイコストパフォーマンス FRP を目指すために図 4 に示したような DF を表面に使用したハイブリッドを世界で始めて提案し、試作した。図 5 はハイブリッド FRP のエロージョン挙動を調べた結果である。提案する方法の有効性を確認する。

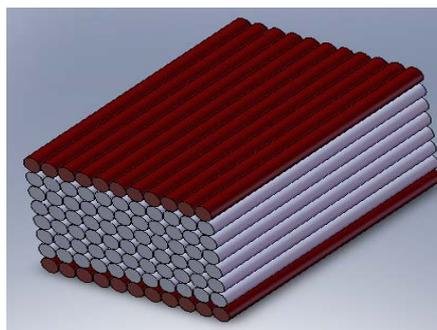


Fig.4 Interply type of hybrid-FRP

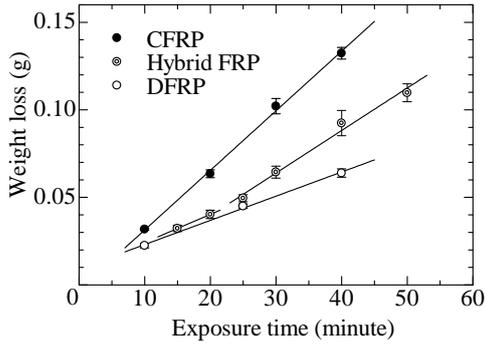


Fig.5 Relationship between exposure time and weight loss of CFRP, hybrid-FRP and DFRP in 45° impact angle

#### 4.3 ナノ剛性フィラー充てんプラスチックの粒子衝突摩耗特性

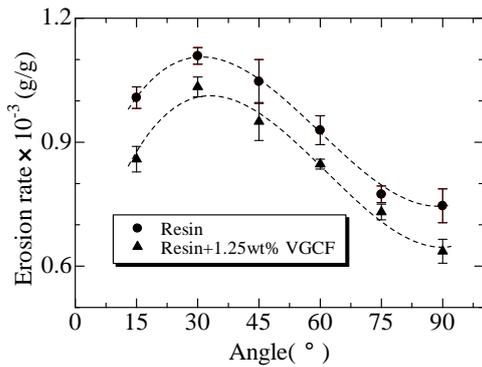


Fig. 5 Impact angles - Erosion rate for VGCF and resin only-resin. (Impact velocity 128m/s)

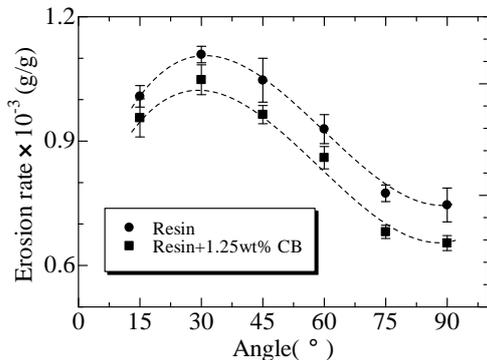


Fig. 6 Impact angles - Erosion rate for CB(B) and resin only-resin. (Impact velocity 128m/s)

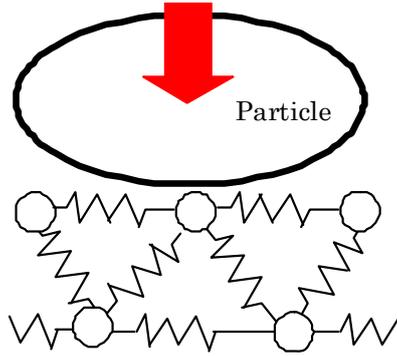


Fig.7 剛性ナノフィラーによる耐エロージョン向上のメカニズム

高強度と高ヤング率のナノフィラーの VGCF (Vapor- Grown Carbon Fiber) と CB (Carbon Black) を母材樹脂に充てんし、それらのフィラーの種類や充てん率などがエロージョン特性への影響を調べた。図 5,6 はその測定結果一例で、充てんにより耐エロージョン特性が向上し、力学特性も向上した。

図 7 の剛性ナノフィラー充てんにより樹脂の耐エロージョン向上のメカニズムで、衝突粒子より小さなフィラーと樹脂のネット作用で耐エロージョン特性の改善に有効であることがわかった。

これは、世界で初めて材料の強度と耐エロージョン特性が両立した粒子充てんプラスチックである。

#### 4.4 光ファイバセンサによる FRP エロージョンの予知

センサとして使用する光ファイバ自体のエロージョン摩耗試験を行い、光ファイバは被覆、クラッド層 (Fig.8) が損傷すると内部を伝達する光量が急減する (Fig.9) . さらにその反応は即座に起きるため光ファイバはセンサとして有効である。

光ファイバを内部に埋め込んだ CFRP 積層板のエロージョン摩耗試験を行った。図 10

はエロージョンが到達した FRP 層と衝突粒子量との関係で、これらの結果より、世界で初めて提案した光ファイバが FRP のエロージョン摩耗感知センサとして有用で、光ファイバを FRP 内に埋め込んだエロージョンヘルスマonitoringシステムが有効である。

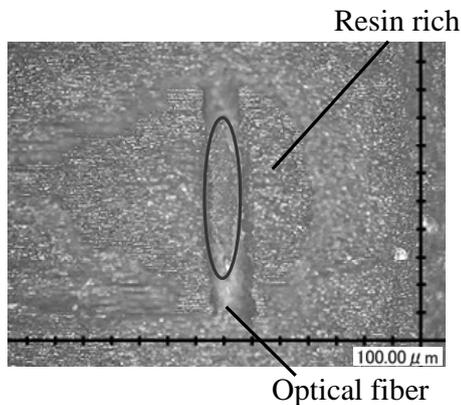


Fig. 8 Enlarged image of A Type specimen.

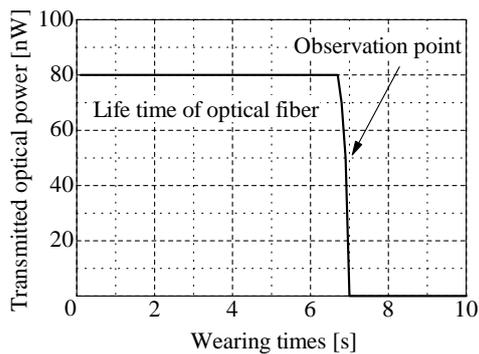


Fig. 9 Relationship between transmitted optical power and wearing times.

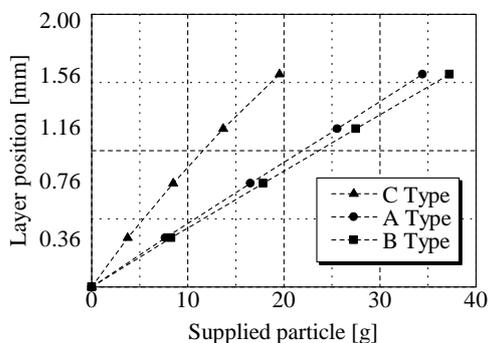


Fig. 10 Relationship between layer position of optical fiber and supplied particle of A-C Type specimen.

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計7件)

1. Limin BAO, Danna QIAN, Guoyu WANG, Kiyoshi KEMMOCHI, Solid Particle Erosion Characteristics of Composites Filled with Nano Carbon Fibers, *Journal of Textile Engineering*, Vol.58, No.2, 13-19(2012)
2. 鮑力民, 赤羽 賢一, 施建 劔持潔, 光ファイバセンサによるFRPエロージョンの予知, *日本複合材料学会誌*, 37, (6)209-215(2011).
3. Danna QIAN, Anchang XU, Limin BAO and Masayuki TAKATERA, Improvement of Erosion Behavior and mechanical strength of UP Resin Composites filled with VGCF, *Applied mechanics and materials*(2011), Vol. 43, pp712-716
4. Limin BAO, Yasuyuki Sato, Danna QIAN, Satoshi Simakawa, Zhijuan Pan and Shigeru Hinata, Dry Sand Erosion Damage Characteristic of Fibers Induced by Solid Particle Impact, *Textile Research Journal*, Volume 80, 1675-1681 (2010).
5. Danna Qian, Limin Bao, Masayuki Takatera, Kiyoshi Kemmochi and Atsuhiko Yamanaka, Fiber-reinforced polymer composite materials with high specific strength and excellent solid particle erosion resistance, *Wear*, Volume 268, Issues 3-4, 4 February 2010, Pages 637-642
6. QIAN Danna, BAO Limin, TAKATERA Masayuki, KEMMOCHI Kiyoshi, Particle

Erosion Behavior of Unidirectional CF and GF Hybrid Fiber-Reinforced Plastic Composites, Journal of Textile Engineering, Vol.55, No.2, 39-44(2009)

7. 鮑力民, 錢丹娜, 佐藤康之, 島川 聡, 高寺 政行, 日向 滋, 劔持潔, 繊維および糸におけるエロージョンの測定と評価法, 日本機械学会論文集 A 編, 74, 3, 428-433(2008).

〔学会発表〕(計 11 件)

1. 鮑力民, 劔持潔, 山元 剛, 錢丹娜, 山中 敦彦, 高強度かつ粒子衝撃特性に優れたハイブリッド FRP 材料, 日本複合材料合同会議 JCCM-3, USB(2012)
2. 鮑力民, 李東玲, 錢丹娜, 高寺 政行, 劔持潔, 高温における繊維エロージョンの測定と評価, 繊維学会予稿集, 66-1, 19 (2011).
3. 鮑力民, 劔持潔, FRPのエロージョンとその自動計測, 55<sup>th</sup> FRP CON-EX 2010, 67-69(2010).
4. Go Yamamoto, D.N.Qian, L.M.Bao, Development of DF/CF hybrid composites materials for high strength and superior particle erosion behavior, 6<sup>th</sup> China- Japan International Conference Mechatronics (CJCM ' 2010), CD-PJ003 1-4
5. D.N. QIAN, L.M. BAO, M.Y. TAKATERA and A.H. YAMANAKA, Development of FRP Composites with Excellent Erosion Resistance by Solid Particles, Proceedings of 17th International Conference on Composite, Materials (ICCM-17, Edinburgh), F24:2, pp. 1-7, Published by IOM Communications Ltd (2009).
6. 錢丹娜, 鮑力民, 高寺 政行, 劔持

潔, 山中 淳彦, 高速粒子におけるVGCF-CB充てん樹脂のエロージョン特性. 第17回フィラ-シンポジウム講演予稿集, 92-95(2009).

7. Danna QIAN, Limin BAO, Guoyu Wang, and Masayuki TAKATERA, Solid particle erosion behavior of polymer composites filled with VGCF and CB, THE 10<sup>TH</sup> ASIAN TEXTILE CONFERENCE, Japan, Proceedings, G4-P-13, 1-3 (2009) October 7-9
8. 鮑力民, 李東玲, 劔持潔, 繊維および糸におけるエロージョンの測定と評価法, 第17回繊維連合研究発表会講演予稿集, p68(2008).
9. 錢丹娜, 鮑力民, 高寺 政行, 劔持潔, 山中 淳彦, 高比強度かつエロージョンにも強い FRP の開発, 複合材料学会 2008 年研究発表講演会要旨集, 69-70(2008).
10. Dongling LI, Danna QIAN, Limin BAO and Kiyoshi KEMMOCHI, Evaluation of Particle Erosion Behavior of Procon Fiber under Various Temperatures, *The 5th Japan-China Conference on Mechatronics (JCCM2008)*, J13, pp.54-56
11. Limin BAO, Yasuyuki Sato, Satoshi Simakawa, Zhijuan Pan and Shigeru Hinata, Research on erosion damage of fibers in bag-filter by solid particle impact, The 4th international conference on advanced fiber/textile materials 2007 in ueda, PB-15, 122-123(2007)

6. 研究組織

(1)研究代表者

鮑力民 (BAO Limin)

信州大学・繊維学部・准教授

研究者番号: 10262700