一方向炭素繊維強化エポキシ複合材料の繊維方向がその摩擦特性に与える影響[†]

肖 毅* 松 原 監 壮**
汪 文 学*** 高 雄 善 裕***

Effect of Carbon Fiber Direction of Unidirectionally Reinforced Epoxy Composites on Frictional Behavior

by

Yi XIAO*, Terutake MATSUBARA**, Wen-Xue WANG***
and Yoshihiro TAKAO***

This paper reports the experimental results of frictional properties of carbon fiber unidirectionally reinforced epoxy with a counter part of mild steel and the effect of fiber orientation is investigated. It is shown that the coefficient of friction increases with increasing fiber orientation, where 0 degree means that the fiber is parallel to the contact surface, and that this tendency is enhanced with the roughness of the contact surface increasing. The contact surface structures are studied before and after friction by OM, SEM, EPMA and roughness analyzer, and the effects of fiber orientation on the original and frictionally damaged surfaces are mentioned in detail including the discussion on the distribution process of each element. Several mechanisms based on the experimental analyses are presented to explain the effect of fiber orientation on the coefficient of friction of carbon fiber unidirectionally reinforced epoxy.

Key words : CFRP, Friction coefficient, Fiber orientation, Surface roughness, SEM, EPMA

1 緒 言

炭素繊維強化樹脂系複合材料 (CFRP : Carbon Fiber Reinforced Plastics) は、比強度、比弾性に優れ、構造用部材として航空宇宙分野をはじめ各方面に利用されている。この複合材料を構造物の一部として組み込む接続の方法の1つに、ピンを介した機械的継手がある。これには、簡便さ、取り外し検査あるいは新品への取り替えが可能であること、経験的信頼性などの利点があり、これまで、積層板のピン継手に関する応力状態、破壊様式、強度予測に関する研究が行われてきた。¹⁾

ピン継手による CFRP 材接合部では、ピンと CFRP 積層材ピン穴間の摩擦が応力解析と強度解析に重要な役割を果たすと考えられる。しかし、積層板のピン穴を円周方向に眺めてみると、1つの層でも、強化繊維の形状は円からだ円になり、90度違う位置では繊維を横から見る状態に変わる。この繊維形状あるいは繊維方向の変化は面の摩擦特性に影響を与えられと考えられる。また、ピン穴を厚さ方向に辿っても繊維の強化方向が層毎に変わっている。この厚さ方向の摩擦係数の変化についての処理は、解析的に可能である²⁾が、周方向の摩擦係数の変化については、現在のところ材料定数と捕え、材料異方性に関する実験解析を行うのが妥当と思われる。

Lancaster³⁾や、築添^{4), 5)}は一方向強化 CFRP の摩擦特性における異方性を3つの方向、つまり、繊維方向が接触面に垂直である Normal 方向、繊維方向がすべり方向に平行な Parallel 方向、繊維方向は接触面内であるが

繊維方向とすべり方向が直交する Transverse 方向について議論している。しかし、ピン継手では、ピン穴各層の内面と繊維の方向は Normal 方向から Parallel 方向まで連続的に変化する。そこで、一方向材積層板の継手問題の基礎研究として、炭素繊維一方向強化エポキシ樹脂 CFUR/E (Carbon Fiber Unidirectionally Reinforced Epoxy) の Normal 方向と Parallel 方向間の摩擦係数を求めることが必要となる。摩擦問題に関しては極めて多くの実験条件が存在する。⁶⁾今回は一方向強化 CFRP 積層板におけるピン継手問題であることから、往復摩擦方式を採用し、最大摩擦に注目し、潤滑材を使用せず、相手材はバフ研磨した平坦な炭素鋼とした。摩擦面荷重、摩擦方向、摩擦速度、摩擦回数(経過時間)等が及ぼす効果については予備実験⁷⁾を行い、安定した値が得られる実験パラメータを決定した。これにより、CFUR/E 摩擦面の粗さと繊維方向が摩擦係数に及ぼす影響を手製の摩擦力測定器⁸⁾を組み込んだスガ式摩擦試験機により求めた。また、走査型電子顕微鏡 SEM、電子線マイクロアナライザ EPMA (Electron Probe Micro Analyzer)、粗さ計により摩擦面を分析検討し、CFUR/E の繊維方向が摩擦に与える力学的効果について検討した。

なお、継手問題を念頭に置いた今回の実験では、2・2節に述べるように、一般の摩耗試験と比べ延べ摩擦距離がかなり小さいために、摩耗量が少なくこれを求めている。摩耗については摩擦機構に関する定性的な議論に留めている。

[†] 原稿受理 平成9年8月11日 Received Aug. 11, 1997

* 九州大学大学院工学研究科応用力学専攻 〒812-8581 福岡市東区箱崎, Dept. Appl. Mech., Kyushu Univ., Higashi-ku, Fukuoka, 812-8581

** 九州大学応用力学研究所 〒816-8580 春日市春日公園, Res. Ins. for Appl. Mech., Kyushu Univ., Kasuga-koen, Kasuga, 816-8580

*** 正 会 員 九州大学応用力学研究所 〒816-8580 春日市春日公園, Res. Ins. for Appl. Mech., Kyushu Univ., Kasuga-koen, Kasuga, 816-8580

2 実験方法

2.1 供試材および試験片

CFUR/E は東レ製のプリプレグ T800H/3631 を摄氏 180 度で硬化させたもの（繊維体積含有率は約 68%）で、平均径約 $5\mu\text{m}$ の PAN 系高じん性カーボン繊維とこれに適合した樹脂が組み合せられている。CFUR/E 試験片の繊維方向と摩擦面のなす角度を θ と定義している。先に述べた Parallel 方向は 0 度、Normal 方向は 90 度となる。300 x 300mm 厚さ 4mm の CFUR/E 板材から 50 x 6mm の短冊状の試験片をダイヤモンド刃による精密切断機を使って切り出した。角度 θ を 0 度から 90 度まで 15 度毎に取り、7 種類の試験片を準備した。摩擦試験は 50x4mm の面で行う。

3 種の CFUR/E 表面粗さを用意した。精密機械切断した摩擦面を市販の炭化ケイ素研磨紙 #800、次に #1500 で予備研磨し、#2400 で仕上げ研磨をしたものと、これを #800 および #1500 で粗面化した 2 種類である。精密機械切断面の表面粗さはほぼ #800 で粗面化した研磨調整面に対応している。各研磨後に、2 回純水で超音波洗浄、強制乾燥し、その後、摩擦試験までデシケータに 6 時間以上保管した。相手材には炭素工具鋼 SK5 を使用した。角柱状の相手材 (Fig. 1 の A) 先端部を研磨により削ぎ落とし研磨面を 0.3 x 3mm にした。摩耗痕からわかる実際の接触面積は更に一桁小さい。その後、この研磨面をバフ研磨処理し、アセトンで超音波洗浄した。バフ研磨処理後の表面粗さは #2400 で仕上げた CFUR/E 表面より遥かに滑らかとなる。また、バフ研磨したために、削ぎ落とした面と摩擦面の角に丸みが付き、この角で CFUR/E 研磨表面を削ることはなくなった。

2.2 摩擦試験装置および試験条件

ピン継手部分では負荷の増減に対し CFUR/E 面がピンに対して往復運動をするので、本実験には往復運動方式の摩耗試験機 (スガ摩耗試験機 NUS-ISO-3 型) を用いた。回転円盤の慣性により滑らかな三角関数状の速度変化を示す往復移動テーブル上に CFUR/E 摩擦試験片 (Fig. 1 の B) を固定し、相手材の平坦面ができるだけ一様に接触するように調整する。摩擦力は相手材保持構造に直接接触する容量 500gf のロードセル (Fig. 1 の C) により、電磁オシログラフ上に記録する。バネ (Fig. 1 の D) により 200gf で相手材保持構造をロードセルに押し付けているため、往復両方向の摩擦力が計測できる。ロードセルを内蔵する円筒と相手材保持構造の相対運動はベアリングを介して行われ、滑らかなものとなっている。移動台ストローク長 30mm で回転数が 1Hz であるため、相手材の相対的平均移動速度は約 50mm/s 程度になる。この速度で相手材に重りを抱かせ垂直圧力を 2~30MPa の範囲に取った予備実験を行ったが、摩擦係数に意味ある差は生じなかった。また、往復運動が少ない範囲では摩擦現象は不安定だが、往復運動数百回では摩擦係数が安定する。そこで、本実験では、垂直荷重 80gf (垂直圧力約 2MPa)、繰り返しが数百回のデータを使用した。

Fig. 1. Measurement system for coefficient of friction.
A: Counter part, B: Test piece (CFUR/E), C: Load cell (500gf) and D: Spring with balance load of 200gf.

実験はすべて室温、空気中および湿度 50% 以下において行っている。摩擦ゼロの位置は相手材を約 1m の長い糸で上にわずかにつり上げた位置でのロードセル出力とした。

2.3 観察、分析、粗さ測定

摩擦面の表面観察および X 線元素分析には(株)日立製作所製の高分解能電界放射型走査電子顕微鏡 FE-SEM と(株)島津製作所製の EPMA1500 を使用した。EPMA 分析では 100Å 程度の金蒸着を施した。粗さ計測には(株)東京精密製の表面粗さ・輪郭形状測定器 surfcom400B を使用した。計測針の先端半径は $1\mu\text{m}$ である。

3 結果と考察

3.1 摩擦力

Fig. 2 に半サイクル分の電磁オシログラフ出力例を示す。これから、接触面の繊維方向が垂直に近づくほど摩擦係数が大きくなっている他に、(1) 摩擦力が最大になる前にカーブは傾く。これは、最大に達する前に滑り始めること、つまり最大静止摩擦力が検出されない事を意味する。(2) 最大摩擦状態は瞬時の現象ではない。(3) いわゆる動摩擦と最大値との差は 45 度でも小さい。90 度では更に小さく、0 度で差はゼロ、つまり平坦になる。(4) 相手材が止まる時に摩擦が上昇する。0 度では、この現象は見られない。以上 4 つの特徴がわかる。また、ロードセル引張り側と圧縮側の摩擦力の差が無視できることから、最初に達する最大摩擦のロードセル引張り側と圧縮側の差の半分を摩擦力と定義し、すべり方向によらないものとした。

Fig. 2. Frictional forces along CFUR/E edges roughened by #800 sand paper.

Fig. 3. Coefficients of friction of CFUR/E as a function of its fiber direction with the parameter of surface roughness.

3・2 摩擦係数の繊維方向依存性

#800 および #1500 で粗面化したものと #2400 仕上げのものについて、その摩擦係数を繊維方向の関数として Fig. 3 に示す。繊維配向角 θ が大きいほど、摩擦係数が大きくなっている。また、摩擦表面仕上げが粗いほど、摩擦係数は大きい。詳細に見ると、角度が小さい時と 90 度に近い時、摩擦係数の増加の割合は小さく、45 度付近で増加の割合が大きくなっている。

今回の結果に対応するこれまでの研究は、別の種類の炭素繊維とエポキシ樹脂につき、0 度と 90 度に限って築添ら^{4), 5)}に見られる。そこでは、繊維角度の上昇によって摩擦係数が上昇すると述べられており、定性的に今回の実験結果を支持している。摩擦係数の値自体については、試験片の表面仕上げ、摩擦圧力、延べ摩擦距離なども複雑に影響し、その直接比較には疑問があるが、今回の繊維含有率 0.68 に対応するものを、築添らの実験平均値の内挿により求めてみると、0 度での摩擦係数が約 0.14、90 度で 0.18 となってくる。これは今回 #2400 で仕上げた試験片のデータにほぼ等しい。

3・3 摩擦試験前の試験片表面

Fig. 4 に、#800 で表面を仕上げた後の $\theta = 90$ 度、45 度、0 度、3 種の CFUR/E 摩擦試験片表面の SEM 像と

Fig. 4. SEM images (upper) and roughness of edges before friction; roughened by #800 sand paper.

粗さを示す。SEM 像は面垂直方向から見たものである。粗さ計のデータは SEM 像の左右方向に粗さの変化を記録したものである。45 度の紙面上下に $5\mu\text{m}$ 、左右に $7 \sim 8\mu\text{m}$ のやや白い模様が炭素繊維、その間の黒い部分は樹脂になる。更に大きなスケールで明暗が認められる。暗い部分の大きさは $10\mu\text{m}$ 平方から $20\mu\text{m}$ 平方程度である。暗い部分間距離は $20 \sim 30\mu\text{m}$ である。粗さには大小 30 弱の鞍部、つまり 30 弱の突起が認められる。小さな突起の平均間隔は約 $8\mu\text{m}$ 強となる。これらは大きく 6 つの突起群にまとめられる。突起群の広がりには $25 \sim 60\mu\text{m}$ 程度で、突起群間は $7 \sim 20\mu\text{m}$ になる。縦（深さ）方向は横（面内）方向の 25 倍に拡大表示されている。これから、小さな突起が飛び出る距離は $0.2\mu\text{m}$ 程度が最も多く、 0.1 から $0.6\mu\text{m}$ 程度にほぼ収まっていることがわかる。突起群間には $1\mu\text{m}$ 程度あるいはこれ以上の凹部が検出されている。なお、凹の部分の最深部では針の先端曲率半径が限度になり、控えめの深さが出ることが多い。

この 2 つのデータを基に、次のような表面形状を描くことができる。繊維直径は $5\mu\text{m}$ であるが 45 度面であるので 1 つの方向には $7\mu\text{m}$ になって現われる。この繊維の斜断面にも SEM 像に見られるように小さな凹部が見られるが、粗さ計には現われない。繊維間には $1\mu\text{m}$ 以下程度の樹脂層があり、この部分は凹んでいる。繊維の斜断面の高さは同じではない、4~7 本の距離毎に 1~3 本が $1\mu\text{m}$ 程度あるいはそれ以上低くなっている。#800 の表面仕上げにより、まとまった繊維の欠落、繊維に比べて選択的な樹脂の損耗、繊維斜面での局所的損傷が起き、 $\theta = 45$ 度の CFUR/E 試験片表面には 3 種の凹部、つまり数本の繊維にわたる深さ $1\mu\text{m}$ 程度の凹部、繊維間の樹脂の $0.2\mu\text{m}$ 程度の凹部、かなり小さな繊維面内での凹部、が現われることがわかった。

90 度では 45 度と比較して平坦な端面形状を保っている繊維が多い。粗さ計測結果から 40 個程度の突起が認められ、小さな突起の平均間隔は約 $6\mu\text{m}$ となる。これらをいくつかの突起群にまとめるのは難しい。繊維と樹脂の出入量は 45 度より小さく、繊維間の樹脂の損傷が少ない。これは、繊維間が 45 度と比較して研磨方向には 30% ほど小さく、研磨により樹脂がえぐりだされる量がその分だけ制限されたと考えられる。以上のように 3 種の凹部の規模は、90 度ではいずれもより小さくなるが、SEM 像並びに粗さのデータから理解できる。

0 度の SEM 像の、横方向に黒い線となっている暗部間は、場所によっては荒れが激しい。この荒れが激しい部分の下に繊維が見える場所もある。このことから横方向の黒い線は繊維が抜け出た跡の凹部であり、黒い繊維間は樹脂であることがわかる。つまり、殆どは樹脂である。一部を研磨された、即ち、かまぼこを裏から見たような繊維が残ることは余りないと考えられる。結果的には柔らかい樹脂層を #800 によって研磨したのと同じで、面

Fig. 5. SEM images of edges after friction; roughened by #800 sand paper; frictional direction: up and down.

Fig. 6. SEM (upper) and mapping images of Fe, C and S of edges after friction; conditioning: #800 sand paper; frictional direction: up and down.

は全体的に荒れてくる。また、45 度の場合よりも大きい凹部が観察され、樹脂の大きな欠落に対する抵抗も小さい。そこで、粗さは 45 度よりも大きく、細かな凹凸の頻度は小さくなっている。

以上のような傾向は他の研磨紙を使った場合でも同様に見られるが、番数の大きい目の細かな研磨紙を使うと、繊維角度の違いによる上記 3 種の表面の粗さの違いは小さくなっている。

3・4 摩擦試験後の試験片表面とその分析結果

Fig. 5 に CFUR/E 摩擦面の SEM 像を 90 度、45 度、0 度の各試験片について示している。端部を除き各試験片それぞれ場所による違いは認められない。これらは最初の最大摩擦力が得られた領域の像に対応する。いずれも表面の全体に渡って付着物が見られる。90 度の写真をよく見ると、付着したものの下から繊維の形が見えてくるので、付着物はかなり薄いと考えられる。45 度では更に明瞭に見える。これは、Fig. 4 に述べたように、45 度の繊維と樹脂の凹凸が大きく、この段差が容易には解消しない場合が多いため、と思われる。また、付着物によって平坦になった面は 90 度の場合より少ないことがわかる。これは同じく、Fig. 4 で述べた数十 μm 程度の大きなうねりが 45 度で大きいことと対

応する。0 度では付着物が一様に大きな領域を占める所と、繊維が見えたままの所に別れている。繊維が見えるのは、Fig. 4 に示した樹脂の脱落がかなり深いものであったことを表わしている。また、一面に付着物が広がっていることは、Fig. 4 の 0 度に見られた横方向の黒い線となった繊維の抜け痕が、あまり深くはないこと、付着物が Fig. 4 の表面に広く存在する樹脂であることも示している。

CFUR/E 摩擦試験片表面全体にわたる、広い $2 \times 2 \text{ mm}^2$ 領域の EPMA による鉄マッピングから、各試験片のほぼ全面に鉄の存在が示されている。また、鉄が多く観察された部分を拡大し、鉄と炭素繊維の色を変えて同じ図の上に合成した結果、両者の関係が明瞭に示された。90 度での鉄の大きな集まりはほとんど炭素繊維の上か炭素と樹脂の境界近傍にある。0 度では全体に均等に分散しており、特に繊維位置との強い相関性は認められない。

Fig. 6 には、相手材の運動方向が変わる端部での CFUR/E 摩擦試験片表面 SEM 像と、鉄、炭素および硫黄の EPMA 元素分析結果を示す。左から 90 度、45 度、0 度の結果である。樹脂主成分は炭素と水素であるが、水素は EPMA では検出されず、炭素では繊維と区別が

つかないので、硫黄で樹脂を代表している。この硫黄は、高温特性を上げるため T800H/3631 に使ったジアミノジフェニルスルホン DDS 系統の硬化剤に含まれる硫黄分 S に対応している。

90 度の SEM 像の上から垂れている物は鉄のマッピングから鉄とわかる。45 度の鉄は、これより少量であり、CFUR/E 摩擦試験片表面を少し薄く覆っている。0 度の鉄はかたまって散らばっており、絶対量も少ない。この鉄は主に樹脂の欠落した部分に溜まっていると思われる。これは、SEM 像との対応関係から、また、SEM 像に見られる繊維が健全であることからわかる。繊維が損傷を受けていないことは、硫黄の少ない部分の模様あるいは炭素模様が上下に連続していることからわかる。

90 度の炭素は炭素繊維間にも広がっている。そこでは、薄い樹脂の膜（炭素位置の硫黄検出状況からわかる）に摩耗粉となって炭素が混入していると理解される。45 度においても鉄の濃淡があるが、ここでは鉄の少ない部分でも炭素繊維の形状が判然としなない。これは、摩耗粉を含む付着樹脂膜の厚さが大きかったためと思われる。45 度の SEM 像に見られる付着物の割れの様子からも、膜厚の大きさが推測される。

3・5 摩擦試験後の相手材の表面とその分析結果

Fig. 7 に相手材の光学顕微鏡写真を示す。上から、それぞれ 90 度試験用、45 度試験用、0 度試験用の相手材の接触面を見たものである。左右の長手方向に研磨傷が入っている。これに垂直に摩耗痕が入るが、全面一様というわけではない。0 度の場合も摩耗されている。部分的な繊維欠落箇所により、あるいは、健全な繊維との接触という、より小さなスケールにおける凹凸部間の干渉により、鉄に摩耗痕が生じたと思われる。鉄の摩耗粉の

Fig. 7. Optical images of worn surface of counter parts.

大部分は Fig. 6 に示すような姿で CFUR/E に蓄積している。Fig. 4 と 5 の比較から、90 度と 45 度の炭素繊維の形状が摩擦実験後は平坦に見える。そこで、相手材接触面の EPMA による元素分析を行った。

Fig. 8 に炭素マッピングを示す。各図の上 1/3 と下 1/3 は傾斜部分で中央の 1/3 が平坦に仕上げた部分である。マッピングの中の白い部分は炭素が多い位置である。

Fig. 8. Mapping images of C at the contact surface of counter parts.

90 度では未使用材より多くの炭素が検出され、削られた炭素の一部が移動していることを示している。45 度ではこれより更に多くの炭素が検出されている。Fig. 4 において、90 度より 45 度の方で CFUR/E 面がより大きくうねり、繊維と樹脂の段差も大きいものであった。炭素の突出量が大きいため、損耗への抵抗が小さく多くの炭素が削られたと思われる。0 度の結果は 90 度に近い。Fig. 4 と 5 からは 0 度の CFUR/E 面が最も荒れていたが、繊維の割れは殆ど認められなかった。このため、界面からの繊維の欠落が局所的に大規模に起こった可能性が高い。このことは、0 度の CFUR/E の繊維保持機能が小さい事を意味している。

樹脂を現わす硫黄は分析の結果殆ど検出されなかった。樹脂が相手材に付着する機構が、この組み合わせ、この摩擦繰返し数では顕著ではないことになる。

4 摩擦機構のモデル

4・1 摩耗機構

第 3 章の結果より、この摩耗に関しては、次のような各要素の損傷と移動が想定される。相手材との摩擦により、突起した炭素繊維は鉄を削り、また、鉄も凸状の炭素をこわしていく。炭素の損耗の量は 90 度より凹凸の激しい 45 度で多くなる。0 度での詳細な摩耗の姿は確定できないが、樹脂の繊維保持機能が小さく炭素の損耗は 90 度に近い。相手材の摩耗は 90 度で最も多く、0 度で最も少ない。樹脂も相手材により摩擦を受けるがこの樹脂に鉄と炭素の摩耗粉が混入し、CFUR/E の繊維間を埋めたり、炭素繊維を覆う膜となる。しかし、殆どの鉄は相手材自身によって CFUR/E の端部に運ばれ、そこに蓄積する。樹脂もここに厚く蓄積する傾向がある。なお、炭素繊維摩耗粉のいくらかは相手材に移る。

また、端部に運ばれた摩耗粉末あるいはこれを含む樹脂膜は以下の 2 つの働きをすると理解される。一般には摩擦を軽減する。最大摩擦は存在するが、最大静止摩擦が Fig. 2 に示すように得られないのはこのためである。しかし、相手材がこれに乗り上げる時には、同じく Fig. 2 の 45 度や 90 度に見られる摩擦上昇に繋がってくる。

4・2 摩擦係数

今回の摩擦抵抗の主要因として、CFUR/E の損耗と相手材の損耗の他、目に見える損傷をともなわない抵抗、つまり平坦な部分の滑り抵抗も考えられる。なお、CFUR/E においては、幾何学的にたとえ同一高さの面があっても繊維と樹脂の剛性が極端に異なるために、相手材は滑る過程で力学的に明瞭な段差を感じる。つまり、力学的には炭素繊維の突起があるのと同じである。このため、今回の平坦な部分の滑り抵抗とは、境界以外の、均質と捉えられる部分間のものを意味している。

4・2・1 炭素繊維一方向強化エポキシ樹脂 CFUR/E の損耗抵抗の繊維方向依存性 Fig. 4 より、同一研磨紙による損傷は 0 度で大きく、90 度で小さいことがわかる。これは、摩耗に対する抵抗が 0 度で最も小さく、90 度で最も大きい事を意味している。0 度の場合の抵抗の基になるのは、樹脂あるいは界面のせん断抵抗であり、いずれも余り強いものではないと理解される。90 度の場合、樹脂の抵抗と繊維の抵抗がおおよそ相乗的に働くために高くなっている。45 度の場合には、このような単純な理解はできないが、強度の弱い界面が寄与することも考えられ、両者の間の抵抗を示したと理解できる。これらの CFUR/E の摩擦抵抗を表わす妥当な方法は角度 θ に関する 1 次の関係である。

なお、繊維せん断強度の繊維方向依存性について直接の情報はないが、繊維の破壊が引張曲げ一定ひずみ条件で発生すると仮定するなら、破壊強度は引張り方向のヤング率に比例する。これには、よく知られている様に角度 θ の三角関数の 4 乗の項は余り効かず、おおよそ定数項に三角関数の 2 乗を加えたものになる。

いずれの場合も、摩擦抵抗は 90 度で最も大きく、0 度で最も小さく、前者ではその間を直線、後者では 180 度で 1 サイクルとなる三角関数で結ぶことになる。

4・2・2 相手材の損耗の繊維方向依存性 Fig. 6 と 7 から、鉄は炭素繊維によって削り取られ、この鉄の摩耗量に繊維方向依存性があることがわかった。相手材を削り取る主な部分として、繊維樹脂間の凹凸、つまり炭素繊維のエッジが考えられる。繊維内にも欠落が見られるが、これは全繊維の 15% 程度、大きなものでは数% 程度と少ない。しかも、その直径は繊維の 1/3 程度である。このため、繊維と樹脂の境界に比べ、繊維内のエッジが鉄を削る働きは小さいと考えられる。

なお、摩擦係数が滑りの向きには依らなかったことは、エッジの有無が問題で、エッジの角度と滑りの方向の関係は 2 次的な要因であった事を意味する。

CFUR/E の 90 度の断面に、単位長さあたり平均的に N 本の繊維が並んでいるとする。これから角度 θ の面を作ると、 N 本の繊維が並ぶ切断面の平均的長さは $1/\sin\theta$ となる。つまり、角度 θ の面の単位長さ当たりの炭素繊維のエッジの数は $2N\sin\theta$ となる。繊維群の凹凸、相手材との位置関係から、すべてのエッジがあらゆる摩擦運動に対して有効に働くわけではない。エッジのうち

のいくつかが確率的に鉄を削る。これに鉄のせん断強度とミクロな 1 つの損耗の平均面積を形式的に掛ければ、相手材をミクロに切削することによる摩擦抵抗が $C\sin\theta$ と得られる。

4・2・3 平坦な部分の滑り抵抗の繊維方向依存性 CFUR/E 摩擦面の平坦な部分は 3 種類ある。炭素繊維、樹脂、炭素と鉄の摩耗粉を含む樹脂であり、これらの摩擦係数は違った値を示す。ここでは、炭素繊維と樹脂について考える。繊維あるいは樹脂の形は面の繊維方向によって変化するが、その割合はどのように面を切っても変わらない。しかも、各々の面に作用するせん断力の和が摩擦力になるので、この摩擦力に対しては繊維方向依存性が存在しない。樹脂に含まれる摩耗粉の割合は、面の繊維方向が異なると異なり、より複雑な現象が考えられるので、摩耗粉を含む樹脂についての議論は行わない。

4・2・4 CFUR/E 摩擦面の摩擦係数 各摩擦面の摩擦力は、この章で議論した各項の摩擦力に現象の出現確率を掛けて加え合わせたものになる。その結果、一定値 (4・2・3 項に対応) に $C_1\theta$ (4・2・1 項の前者)、 $C_2\sin\theta$ (4・2・2 項)、 $C_3\sin^2\theta$ (4・2・1 項の後者) を加えたものになる。各係数 C_i は粗面化により大きくなるものと考えられる。

相手材の損耗が摩擦発生の主要因と考え、 $C_2\sin\theta$ (4・2・2 項) が効いてくる。しかし、角度 θ が小さい場合には、3・5 節で述べたように CFUR/E のせん断抵抗が小さくなり、これが限界値となる可能性もある。せん断抵抗が一定角度以下でより小さな値になることを、式の上で表現するには、更に $\sin\theta$ を掛ければ良く、 $C_2\sin^2\theta$ が得られる。

以上のように本章の議論は Fig. 3 の実験結果を説明している。なお、各モデルの内、 $\sin^2\theta$ だけが 45 度近辺での摩擦係数のやや急な立ち上がりを説明できる。

5 結 論

一方向炭素繊維強化エポキシ複合材料 CFUR/E 端面の摩擦係数が繊維方向によって異なる事を示し、SEM 像、マッピング像、面粗さにより摩擦面を分析し、摩擦問題における繊維方向の力学的意味について検討し、以下の結論を得た。

(1) CFUR/E 材の繊維配向角 θ が大きいほど、摩擦係数が大きくなり、また、表面仕上げが粗いほど、摩擦係数は大きい。詳細に見ると、角度が小さい時と 90 度に近い時、摩擦係数の増加の割合は小さく、45 度付近で増加の割合が大きい。

(2) 相手材との摩擦により、突出した炭素繊維は鉄を削り、また、鉄も凸状の炭素を壊していく。炭素の損耗の量は 90 度より凹凸の激しい 45 度で多くなる。相手材の摩耗は 90 度で多く、0 度で少ない。樹脂も相手材により摩擦を受け、この樹脂に鉄と炭素の摩耗粉が混入し、CFUR/E の繊維間を埋め、摩擦面を薄く覆い、CFUR/E の端部に厚く蓄積する傾向がある。

端部に運ばれた摩耗粉末を含む樹脂膜は、一般には摩擦を軽減し、最大静止摩擦の発生を阻む。しかし、相手材がこれ乗り上げると摩擦が上昇する。

(3) 結論 (2) に基づくいくつかのモデルと式を示し、結論 (1) を量的に説明した。

参 考 文 献

- 1) F. L. Matthews (ed.), "Joining Fiber-Reinforced Plastics" (1986) Elsevier.
- 2) 肖 毅, 汪 文学, 高雄善裕, 九州大学応用力学研究 所所報, **81**, 1 (1997).
- 3) J. P. Giltrow and J. K. Lancaster, Wear, **16**, 359 (1970).
- 4) 築添 正, 大前伸夫, 日本機械学会論文集, **43**, 1115 (1977).
- 5) T. Tsukizoe and N. Ohmae, "Friction and wear of polymer composites" (K. Friedrich, ed.), p.205 (1986) Elsevier.
- 6) 野呂瀬進 (編), "摩擦機構の解析と対策" (1992) テクノ システム.
- 7) 松原監壮, 汪 文学, 高雄善裕, 肖 毅, 日本複合材料学会第 22 回複合材料シンポジウム講演集, p.42 (1997).
- 8) 福田重久, 松原監壮, 高雄善裕, 溶射, **27-4**, 11 (1990).
- 9) J. C. Halpin, "Prime on Composite Materials Analysis", p.30 (1992) Technomic.