

# 有曲部を持つ炭素繊維強化アルミニウム複合材料の製造

Fabrication of U-bend Carbon Fiber/Aluminum Composite by Hot Press Method

石坂 信啓\*・大蔵 明光\*

Nobuhiro ISHIZAKA and Akimitsu OKURA

## 1. ま え が き

近年、省エネルギー・省資源を目的として、軽量・高強度・高弾性・耐熱性・耐食性に優れた材料の開発が求められている。繊維強化複合材料は、比強度・比弾性が大きいために多くの研究が行われ、繊維強化プラスチック (FRP) は、構造用材料としても、さまざまな方面で使用されているが、耐熱性・耐摩耗性が劣り制約を受けている。

また一方、高強度・高靱性金属材料の開発は、合金化と熱処理により析出物、第2相粒子などの分散、粒度調整などの組織制御によって行われてきた。しかし、さらに高比強度・高比弾性の材料が求められ、従来の手法でなく、複合化による繊維強化金属 (F. R. M) が最近注目を集め、実用化へ検討されつつある。特に炭素繊維は、比強度・比弾性率が高く、また高温強度も大きく、さらに量産化に伴う低価格・高品質化が期待されている。この点から、耐熱・軽量に優れた複合材料として、比重の小さいアルミニウムとの炭素繊維強化アルミニウム金属複合材料 (CF/Al FRM) についての研究が、広く検討され始めてきた。

長繊維強化複合材料の形状は、成形法の制約から、板あるいは棒など直線状であり、曲部を持つ複合材料は、極めて少ない。成形後に塑性加工を与えることが難しいため、無理に強加工、強変形を与えると繊維が裂傷したり、マトリックスから剝離し、破損してしまう。したがって、長繊維強化複合材料は、最終形状を考慮して、成形する必要がある。

本実験では、炭素繊維表面へアルミニウムを付着させた可撓性のあるプリフォームシートをU字形金型内へ配置し、ホットプレスを行い、曲部 (U-bend) を持つ一方向強化 CF/Al 複合材料の製造を試み、その可能性を確認し、また機械的強度を求めた。

## 2. 実験方法

### 2.1 プリフォームシート

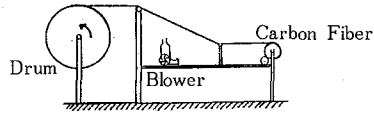
2種類のシート状プリフォームを用いた。

\* 東京大学生産技術研究所 第4部

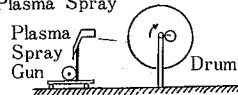
プラズマスプレー・プリフォームシート (以降 P. S. S. と略) は、以下の手法で作製した。強化繊維は、直径約 7  $\mu\text{m}$ 、引張り強度約 300  $\text{kgf}/\text{mm}^2$ 、比重 1.76 の 12000 本/束の PAN 系高強度炭素繊維である。プロアーを用い、繊維束を掛け、銅板製ドラムに巻き付け固定し、回転装置にて、ドラムを回転させながら、プラズマトーチを一定速度で横送りして、大気中で、アルミニウムを炭素繊維上へ均一に溶射すると、銅板上にプリフォームシートが得られる (Fig. 1 (1), (2))。繊維体積率 ( $V_f$ ) を、20~25% に調整した、多孔質・可撓性を有する、約 120  $\text{mm} \times 1800 \text{mm}$  のシートを製作した。

イオンプレーティング・プリフォームシート (以降 I.

### 1. Carbon Fiber Winding



### 2. Plasma Spray



Plasma Pre Form Sheet



Ion Plating Pre Form Sheet



### 3. Cutting & Preparation

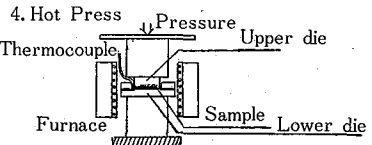


Fig.1 Schematic Diagram of C. F./Al Composite Fabrication Process.

研 究 速 報  
 P. S. と略) は、同種の PAN 系高強度炭素繊維上へ、JIS 5056 アルミニウム合金を真空下で物理蒸着したものである。V<sub>f</sub> は 40 %前後と高く、炭素繊維はテープ状になったシートで比較的アルミニウムの付着状態が良い。

なお、V<sub>f</sub> は、いずれもアルミニウムを溶解除去後の抽出炭素繊維の重量から、体積率へ換算した。

2.2 予備成形体の準備

ホットプレス金型へのプリフォームの配置・取扱いを容易にするため予備成形をした (Fig. 1 (3))。I. P. S. を予備成形用型枠に巻き付けながら、適宜シート間を有機接着剤で固定し、O 字形の繊維配列の予備成形体を準備した。幅 5 mm、高さ約 10 mm で、ホットプレス後、3 mm 厚の U 字形試験片となる。P. S. S. は、柔やかさにやや劣るため U 字形シートを積層固定し、予備成形体とした。

2.3 ホットプレス

予備成形体を U 字型金型に入れ、高さ方向に、大気中ホットプレスを行った (Fig. 1 (4))。金型が加圧温度に予熱された状態で成形体を設置し、所定の温度に到達後 10 分間保持均熱化し、加圧を開始した。加圧は 60 秒で、所定の圧力に達するように調整し、プレス後の試験片は、金型温度 300~400°C まで冷却し取り出した。ホットプレスの製造因子は、加圧温度、加圧力、加圧時間が考えられ、I. P. S. について予備試験を行い、その結果から、次の成形条件を設定した。

加圧温度：560°C

加圧力：9 kgf/mm<sup>2</sup>

加圧時間：15 min

また P. S. S. 成形体に対しては、予備試験の結果、曲部の複合化がやや悪く、加圧温度のみを 600°C へ変更した。

2.4 引張り試験

得られた U 字形複合材は、Fig. 2 (a) に示す形状であ

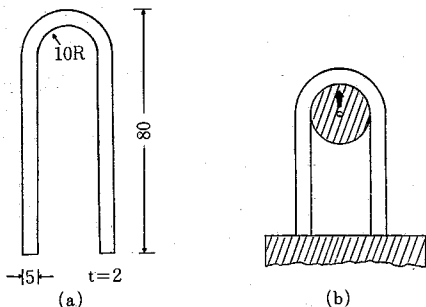


Fig. 2 Schematic Illustration of U-bend C.F./Al Composite Test Specimens (a) and Apparatus of Tensile Test (b).

り、直線部分および U 字形そのまま常温引張り試験をした。直線部分については、板厚方向に曲率 100 mm の円弧を両面から面削し、最小断面部での破断位置を指定した。U 字形のままの引張り試験片に対しては、ASTM 規格 NOL リングテストを参考に、U 字形引張り試験治具 (Fig. 2 (b)) を作製した。U-bend の内面円周部に円筒を入れ、これを上部チャックとし、下部は汎用平板チャックとする引張り試験をした。このとき、内面円周部へ装着する円筒の大きさは、U 字形曲率に合わせ、隙間が生じないように調整した。なお、アルミニウムマトリックスだけの試験片として、焼鈍した純アルミ板材 (1100-0 材) を U 字形に切削加工した。試験機は、インストロン社製 1195 型、引張り速度は、1 mm/min とした。

また強化繊維についても、ゲージ長さ 20 mm での、単繊維引張り強度を求めた。

3. 結果および考察

シート状のプリフォームを予備成形し、ホットプレスすることで、U 字形複合材料を試作できた。プリフォームを使用する理由は、1) アルミニウムとの濡れ性の悪い炭素繊維との接着性を改善し、繊維へ機械的にアルミニウムを固定。2) 繊維の配向・取扱いが容易。3) 固相拡散接合するだけで複合材料が得られる、などである。プリフォーム中のマトリックスの分析値を Table. 1 に

Table. 1 Chemical Composition of Aluminium Matrix (wt%)

	Si	Fe	Cu	Mg	Cr	Mn
Plasma Spray Pre-Form Sheet	0.06	0.1	—	—	—	—
Ion Plating Pre-Form Sheet	0.05	0.08	0.03	0.17	0.05	0.06

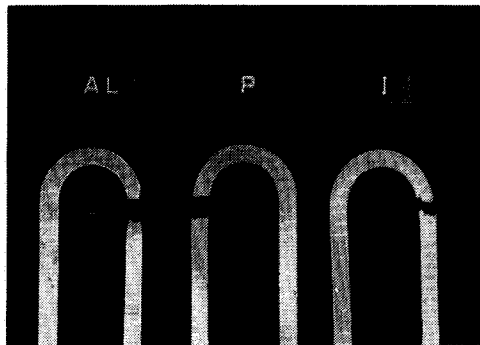


Photo. 1 U-bend Specimen After Tensile Test  
 (AL) : Pure Aluminum (P) : Plasma Spray Hot Press F.R.M  
 (I) : Ion Plating Hot Press F.R.M

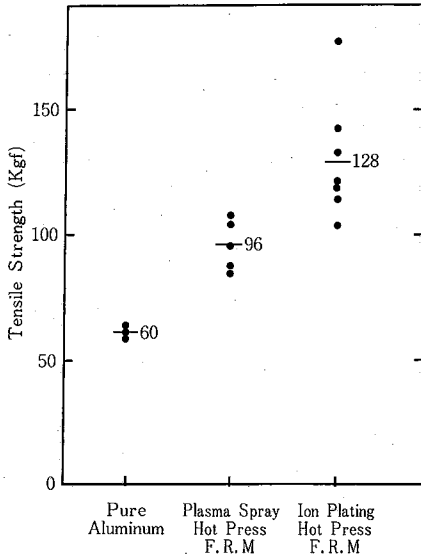


Fig. 3 Tensile Strength of U-bend Specimen.

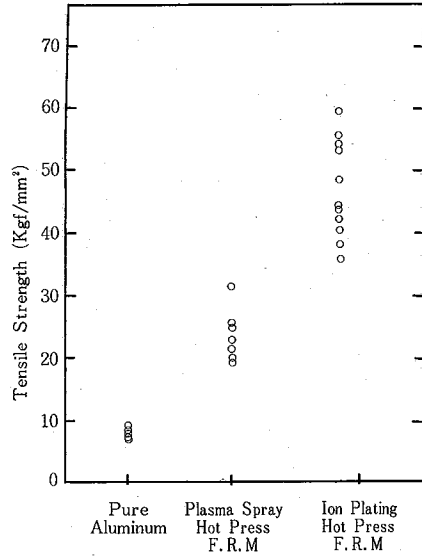


Fig. 4 Tensile Strength of Linear Part of U-bend Specimens.

示す。イオンプレーティング時には、5056 合金相当の組成も、プリフォームでは Mg の損失が大きく、0.17%へ低下している。この分析結果から、両プリフォーム共に、純アルミニウムに近く、マトリックスとしての強度は、ほとんど差が無いと考えてよい。

U 字形引張り試験での破断位置は、直線部分から曲部への境界で、純アルミニウム板、P. S. S., I. P. S., からの試験片について、いずれも同様である (Photo. 1)。直線-曲部で、引張り応力のほかに曲げモーメントが重畳するため、破断は内側から外側へ向かって進行する。このため、引張り強さは荷重負担面積に比例せずに、内側表面での応力が降伏応力に達すると破断する。幅 (内側～外側) を大きくしても、曲げモーメントが重なるため、小さな引張り応力でもクラックを生ずる。このため、本実験では、一般的な強度表示でなく、幅を 5 mm に規定し、厚さ 1 mm 当たりの引張り強さを kgf で表示し、評価することとした。Fig. 3 は、U 字形引張り試験の結果である。繊維強化していない純アルミニウムの引張り強さが、60 kgf に対し、炭素繊維で強化した P. S. S. からの複合材では、 $V_f=0.22$  で引張り強さ 96 kgf、I. P. S. からの複合材では、 $V_f=0.40$  と高いため、128 kgf と強度が上昇した。(純アルミに対し、P. S. S. で 1.6 倍、I. P. S. で 2.1 倍) 破断は、伸び・絞りがほとんど無く、脆性的である。一方、純アルミニウムは、大きく絞られ伸びも大きい (Photo. 1, (AL))。この差異は、強化用炭素繊維が、脆性繊維であり、強度は大きいものの破断伸びが約 1% と極めて小さいため複合材も、脆性的な挙動を

示す。また破断面の観察から、炭素繊維は脆性破面を呈し、マトリックスは延性的な破面を示した。なお、マトリックス間の接着も良く、複合化は良好であることを確認した。

直線部分の引張り強度は、純アルミで  $8 \text{ kgf/mm}^2$ 、 $V_f=0.22$  の P. S. S. からの複合材で  $20\sim30 \text{ kgf/mm}^2$ 、 $V_f$  が 0.40 と高い I. P. S. からの複合材では、 $35\sim60 \text{ kgf/mm}^2$  であった (Fig. 4)。 $V_f$  の差を考慮すれば、プラズマも、イオンプレーティングの強度も、同程度か、ややイオンプレーティングの方が良い。この引張り強度は、長繊維強化複合材料に対する理論強度 ( $\sigma_{r.o.m.}$ ) の 50% 程度である。 $\sigma_{r.o.m.}$  に達しない原因は、1) プレス工程に受ける炭素繊維の機械的損傷。2) 高温加熱中の炭素繊維の化学的劣化等が考えられる。この損傷・劣化はプリフォーム製造時のイオンプレーティングおよびプラズマスプレーによる炭素繊維の劣化は起こらない<sup>3)</sup>と報告されており、強度低下は、ホットプレス工程が原因と思われる。Photo. 2(a) は、ホットプレス終了後の繊維状況である。一方向に繊維が配向しているが、部分的には、Photo. 2(b)のごとく、繊維が蛇行し、重なり、折損している部分も見られる。これは、プレス時にマトリックスの塑性流動とともに移動した脆性繊維同士の変位によって折れたものと推定され、U 字曲部に多く観察された。また Photo. 2(c) は、マトリックスが回り込まないポア部である。繊維が束状のままプリフォーム化された部分で、ホットプレスでは、アルミニウムの塑性流動距離が短く、東内部へアルミニウムが侵入しなかった部分であ

## 研究速報

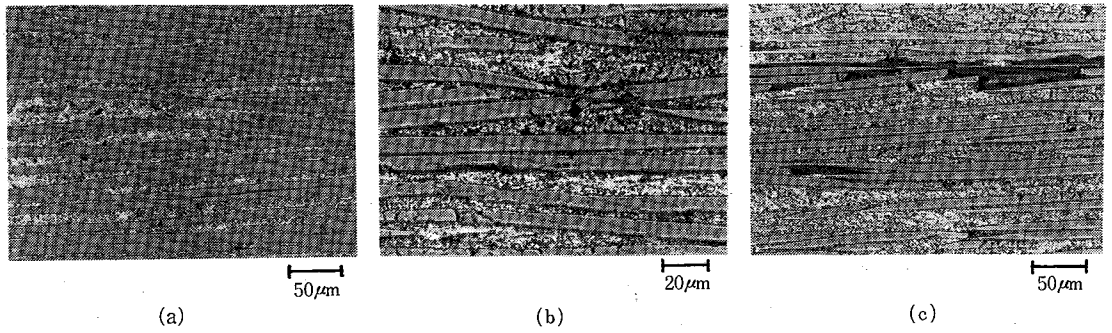


Photo. 2 Optical Micrographs of C.F./Al Composite (Ion Plating Pre-Form)

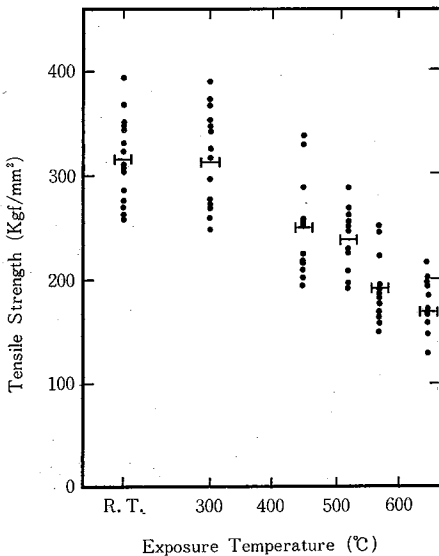


Fig. 5 Relation Between Exposure Temperature and Tensile Strength of Mono-Filament Carbon Fiber (Extracted from Ion Plating Pre-Form). (Gage length=20 mm, Exposure time=40 min)

る。ここでは、マトリックス、繊維間の応力伝達が行れず、強度が低下する。また、プレス時に裸の繊維同士で接触し合い損傷し、実際に複合化した試験片から炭素繊維を抽出すると、数 mm から数 cm へ短化した繊維が観察された。

ホットプレス法は、固相間接合のため、ロール拡散接合法、<sup>2)</sup> 溶浸法などの複合化手法に比べ、長時間を要するので、繊維の化学的な劣化が懸念された。Fig. 5 は、アルミニウムの付着性が比較的良好な I. P. S. を用い、大気中で 40 分間、各温度下で曝露した後、アルミニウムを溶

解除したときの単繊維強度の変化である。300°C までは、常温強度を保持するものの、それ以上では、著しく繊維強度が低下し、複合材の強度も低下する。本実験での温度・時間では、室温強度の 2/3 程度へ劣化し、これは、炭素繊維表面での酸化消耗劣化およびカーバイド (Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub>) 生成反応に帰因するものと考えられる。特に脆弱なカーバイド生成は、高真空中 (1×10<sup>-5</sup> Torr) でも、475°C 以上で起こる<sup>3)</sup> といわれ、炭素繊維の劣化を防ぐことが、複合材料の強度向上にとっては重要であることが示唆された。

## 4. あとがき

炭素繊維へアルミニウムを被覆したプリフォームを予備成形し、ホットプレスすることで U 字形一方向強化複合材料を製作し、繊維強化効果を確認した。U 字形複合材の引張り破断は、直線～曲部境界で、内側から外側へ向かって脆性的に進行した。

また強度は、理論強度に達しなかったが、その原因は、ホットプレス工程での炭素繊維の機械的損傷および化学的な劣化と推定された。この改善のためには、炭素繊維の束部を無くすように均一に開織し、繊維配向性・被覆性を向上することが重要であり、また界面での化学反応の抑制、接着性を改良する目的で炭素繊維の表面処理も今後の課題となるものと考えられる。これらの問題点が克服されれば、炭素繊維強化アルミニウム複合材料の特性が向上し、工業用材料として使用されてゆくものと期待される。

(1983年9月17日受理)

## 参考文献

- 1) ASTM 規格 D-2290 (1964)
- 2) 大蔵明光・浅沼 博: ICCM-IV Vol 2 (1982) 1435
- 3) 酒井茂男: 早大修士論文 (1982)