

## 小型 CFRP 翼の低コスト成形法の開発

機能性材料工学研究室 1170074 杉村 成哉

## 1. 緒言

CFRP とは、炭素繊維にプラスチック樹脂を染み込ませ、強度を向上させた複合材料である。CFRP は軽量、高剛性であり、様々な分野で利用が進んでいる。特に民間航空機においては、1970 年代後半から CFRP の利用が始まり、2012 年に就航した Boeing787 では機体重量の約 50% に CFRP が使用された。

しかし、小型無人機の翼においては、軍用を除いてはスキン等一部のみの CFRP 化された程度であり、リブ、ストリング等の補強材を含めた翼構造全体の CFRP 化は進んでいない。翼構造全体を CFRP 化することで、剛性が向上し、より高速で飛行することが可能となり、災害救助等に役立つことが期待される。

補強材の成形方法としては、翼スキンの成形後に部材を取り付ける方法が考えられるが、小型機では部材が小さく困難である。また、大型機のように両面から金型で押さえつけて成形する方法も考えられるが、この方法では非常にコストがかかる。

そこで本研究では、上型を用いず低コストで高剛性の小型無人機の CFRP 翼を一体成形することを目指した。

## 2. 材料および実験方法

本研究では、翼の製作前にストリング付き平板の成形法を確立することとした。図 1 にその概略を示す。平板は VaRTM 成形法を用いて、カーボクロスにエポキシ樹脂を含浸させて製作した。VaRTM 成形とは成形型の上に積層した強化繊維機材を、プラスチックフィルムなどに封入して真空吸引した後、液状樹脂を注入・含浸して硬化させる FRP 部材の成形方法である。

本研究では、150mm 角の正方形の平板を、厚さ  $70\mu\text{m}$  のカーボクロスを 2 枚重ねて強化材とした。さらに 3mm 角の発泡材のインサートコアを、1 層目と 2 層目の間に挿入し、2 層目のクロスを変形させることで、ハット型のストリング構造を作製した。今回使用したカーボクロスは樹脂の含浸が遅かったため、カーボクロスの上側に 1cm 間隔で穴を開けたフィルムを載せ、その上にガラス繊維および樹脂拡散メディアを乗せ樹脂の先流しを行った。また、ストリング部分に樹脂リッチ部が形成されるのを防ぐため、図 2 に示すような治具を製作した。治具は、ストリングの両端部分を左右からクリップで、ストリングの中央部分を上部から 4kg のおもりでフィルムの上から押さえつけた。治具の取り付けが完了した後、真空ポンプを起動させ樹脂を注入した。樹脂の注入から 7 時間後、樹脂が半硬化した段階で、治具とフィルムを取り外し、樹脂の注入から 20 時間が経過するまで静置させた。

次に、製作した平板の評価を行った。図 3 に試験片寸法を示す。ストリング付き平板の他にストリングなしの平板を製作し、それぞれ長さ 150mm、幅 25mm にカットしたものを評価用の試験片とした。

製作した試験片に、3 点曲げ試験機を用いて荷重を加え、変位との関係を調べた。3 点曲げ試験機のスパンは 120mm とした。ストリング付きの試験片については、ストリング側の負荷点を 1 点とした。また、ストリングなしの試験片につ

いては、曲げ試験で生じる荷重が小さすぎたため、計算によって曲げ剛性を算出している。

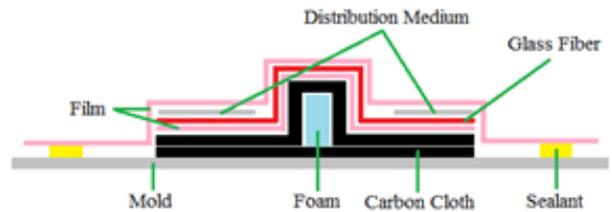


Fig.1 Cross-sectional view of VaRTM

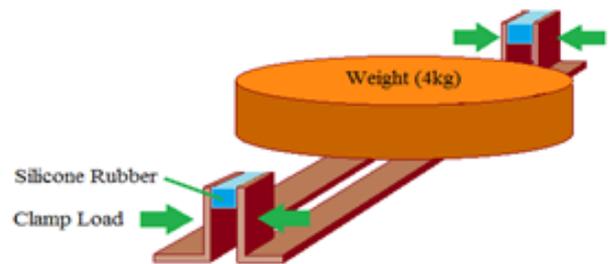


Fig.2 Jig for molding stringer

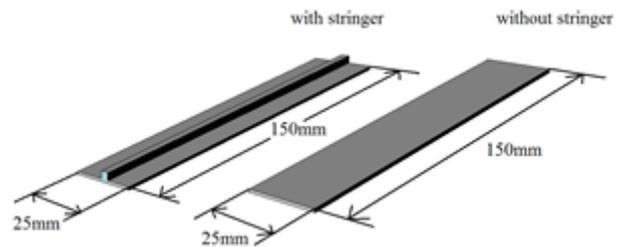


Fig.3 Dimensions of test pieces (with and without stringer)

## 3. 実験結果および考察

成形後の試験片について、長さ 15cm でのストリングの幅と高さの分布を、マイクロメータを用いて調べた。その結果を図 4 に示す。図より、ストリングの幅と高さは 1~2 割の変動で分布していることが分かる。高さは平均 2.7mm、幅は平均 2.2mm であった。成形前に挿入した発泡材のサイズが  $3 \times 3\text{mm}$  であったので、成形時の加圧によって発泡材が圧縮され、成形されたストリングのサイズが縮んだものと考えられる。

次に、製作したストリングの切断面を図 5 に示す。ストリング上部には樹脂リッチはほとんど見られないが、ストリング側面の、1 層目と 2 層目のカーボクロス間に樹脂リッチが発生した。これは、治具のストリングに対する密着が不十分であったためと考えられる。ストリングのサイズの精度を向上し、更なる樹脂リッチの削減のためには、成形治具により工夫が必要だと考えられる。

次に、ストリング付きの試験片の 3 点曲げ試験により得られた荷重と変位関係を図 6 に示す。なお、はりの曲げ理論より求められるストリング付きまたは無しの試験片の荷重一

変位関係も同時に示した。理論計算には、ストリングなしの試験片の引張試験により得られたヤング率 34GPa を用いた。樹脂リッチも考慮し、樹脂のヤング率を 3GPa として計算したが、曲げ剛性への影響はほとんどないことが分かった。また発泡材は計算に含めていない。

図より、変位が 11.5mm の点で荷重は最大値 0.0182kN を取り、以降は荷重値が下がり始め、変位が 33.5mm に達した時点で破壊することが分かった。また、変位が 10mm に達するまでは理論値とほぼ等しい値を示すことが分かる。剛性は、ストリングなしの試験片と比較して 4.97 倍に向上しており、ストリングによる断面二次モーメントの増加の効果が高いことが分かる。

次に、今回製作したストリングが、剛性と重量に与える影響を調べるために、1m<sup>2</sup>の正方形の平板を考え、取り付けるストリングの本数とサイズを変更した計算を行った。ストリングを取り付ける平板の厚みは 0.23mm とした。ストリングは 1mm~5mm 角まで 1mm ごとにサイズを変更し、さらに幅 1m あたりに配置するストリングの本数を 1~5 本まで変更した。ストリング断面の形状は製作した試験片と同様になると仮定し、ストリングの側面には三角形の樹脂リッチが生じることも考慮した。重量計算については樹脂の密度を 1200kg/m<sup>3</sup>、CFRP の密度を 1500kg/m<sup>3</sup> とし、発泡材の密度は計算により求め、94.81kg/m<sup>3</sup> とした。

剛性についての計算結果を図 7 に示す。図よりストリングのサイズが大きいほど、ストリングの本数の増加による曲げ剛性向上の効果が大きいことが分かる。曲げ剛性を 50 倍に向上させるには 5mm のストリングを 2 本取り付けるか、あるいは 4mm のストリングを 4 本取り付ける必要がある。実際の翼では、ストリングでリブを代用することを考えており、翼形状の維持が重要な役割となる。そのため、ストリングの間隔を小さくする必要があるが、この場合は後者がより適切と考えられる。

広い面積を持つ薄板の場合、厚みの増加による重量への影響が大きくなることから、ストリングによる補強は非常に有効な手法であると考えられる。

#### 4. 結言

本研究では、ストリング付き CFRP 薄板を、VaRTM 成形法により製作することができた。さらに計算結果から、ストリングによりわずかな重量増加で大幅な剛性の向上が得られることが分かった。今後は、曲面での成形を確認した後で、実際の翼を製作する予定である。

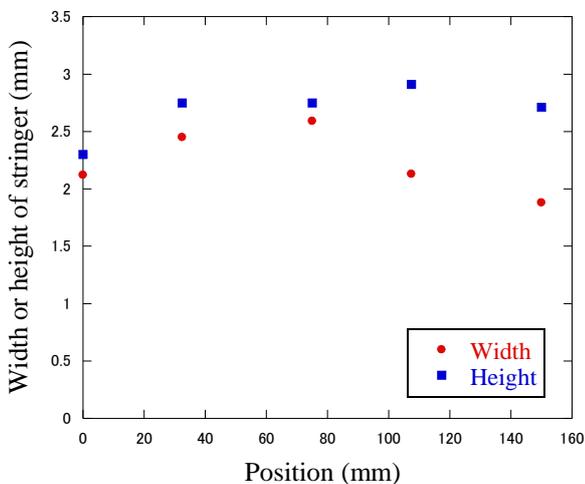


Fig4. Distribution of width and height of stringer

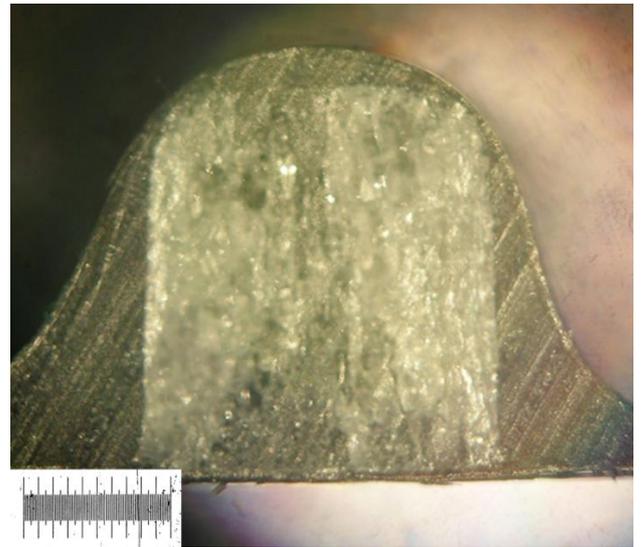


Fig.5 Cross-sectional photograph of stringer

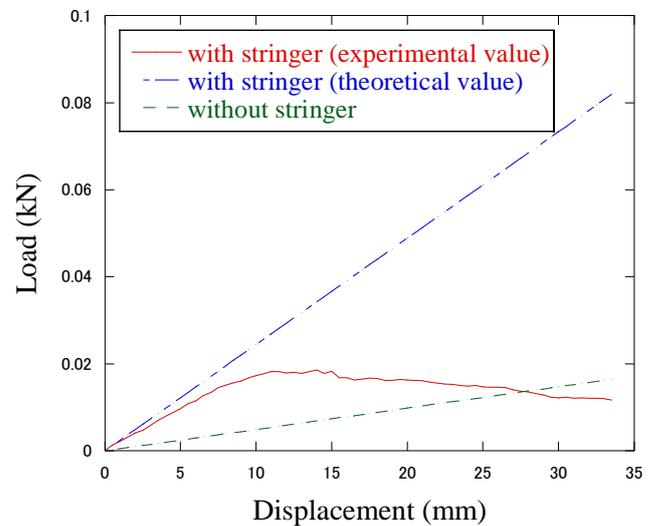


Fig.6 Relationships between displacement and load for specimens with and without stringer

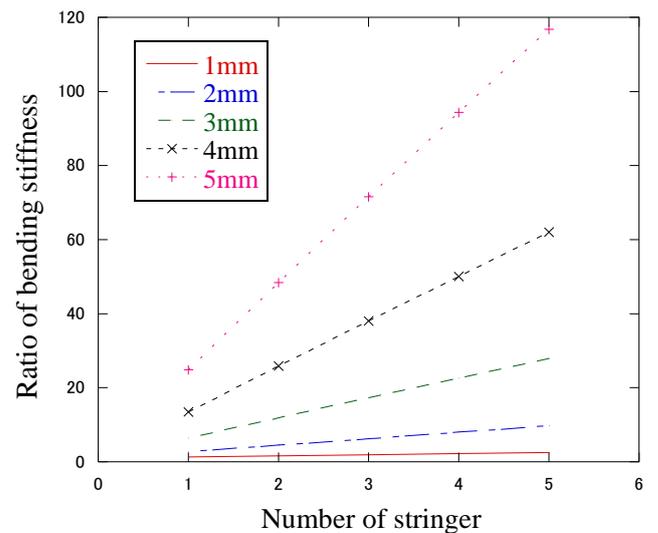


Fig.7 Relationship between number of stringer and bending stiffness