織布積層複合材の低温域における異方性について[†]

前 田 利 雄* 桜 井 昭 男*

高 島 逸 男* 山 越 寿 夫*

A Study on Anisotropy of Woven Cloth Laminates at Low Temperatures

by

Toshio MAEDA*, Akio SAKURAI*, Hayao TAKASHIMA*
and Hisao YAMAKOSHI*

Generally woven cloth laminates have a typical right-angled anisotropy. Their thermal and mechanical properties are also dependent upon temperature at cryogenic atmosphere. Therefore, it is necessary for cryogenic use to understand the anisotropy of FRP. In this report, the thermal contraction and bending property of woven cloth laminates have been studied by changing the off-axis angle in order to analyze the anisotropy of FRP for cryogenic use. The angle-ply FRP, made by piling up the woven cloth lamina at a fixed angle, and hybrid FRP have also been investigated so as to reduce the anisotropy of the thermal contraction and bending property.

The following results are obtained.

(1) The thermal contraction of cross ply FRP has a peak value when the off-axis angle becomes 45° , that is the maximum mismatch angle made by the principal axis and fiber direction of the specimen. Especially AFRP shows a notable anisotropy.

(2) The 45° angle ply FRP and hybrid FRP are effective to reduce the anisotropy of thermal contraction and bending property at low temperatures.

Key words: FRP, Thermal contraction, Bending property, Cryogenic, Anisotropy

1 は じ め に

長繊維型の積層複合材はアルミ合金等に比べて熱的寸法安定性がよく、軽量、高強度であることから、船舶・航空機部品等の構造部材に広く使用されている。最近では、極低温容器や宇宙構造物等の大きな温度変化を受ける構造物への利用が検討されており、これに伴って、従来にも増して高い寸法精度が要求されるようになってきた。そのため、広い温度範囲にわたって主軸方向の熱膨張係数を0とするとCFRP対称バランストアングルプライ材の積層構成も得られている¹⁾。

しかしながら、一般に使用される織布積層複合材は典型的な直交異方性を持つとともに、極低温域においては熱・機械的特性とも温度への依存性が高くなるので、クライオスタット構造物として用いる場合、その異方性を十分把握しておく必要がある。本研究では、直交積層材の熱収縮率、低温強度特性の方向依存性を明らかにするとともに、異方性の低減を図るため、斜交積層材およびハイブリッド積層材を製作し、低温特性を調べたので、得られた結果について報告する。

2 供 試 材

本試験に供したFRPの強化材はTable Iに示すように平織のガラスロービングクロス、カーボクロス、アラミドクロスの3織布を、また樹脂には低温じん性に優れたビニルエステル樹脂を用いた。供試複合材はこれらの資材を用いてFig. 1に示すような、織布の方向が揃っている直交積層材、織布を所定の角度(積層角度)で積み重ねた斜交積層材、および2種の織布を交互に積層したハイブリッド積層材の3種を作製した。積層数は、対称バランスト積層となり、かつ板厚の差異があまり生じないよう6~8プライとし、さらに繊維の体積分率が均一となるよう調整して、ハンドレイアップ法で積層した。Table IIに供試した積層複合材

Table I. List of materials.

	Materials	Weight
Fiber	Glass-roving-cloth	570 g/m ²
	Carbon-cloth	317 g/m ²
	Aramid-cloth	231 g/m ²
Matrix resin	Vinylester	1140 g/l

[†] 原稿受理 平成4年6月8日 Received June 8, 1992

* 船舶技術研究所 〒181 三鷹市新川, Ship Res. Inst., Shinkawa, Mitaka, 181

Fig. 1. Schematic diagram of built-up sequence of FRP.

の積層構成並びに比重, 繊維の体積分率を示す。試験片は Fig. 2 に示すように積層材の最も下に位置する織布の縦糸方向を 0° として, これより所定の角度 (斜

Fig. 2. Cutting out configuration of specimen from woven cloth laminates.

向角度) を主軸方向として規定寸法の試験片を切出し, 熱収縮率試験および曲げ試験に供した。

3 熱収縮率特性

3・1 直交積層材

熱収縮率特性は, 長さ 200 mm の試験片の寸法変化を差動トランスで検出・記録する押棒式熱収縮測定装置を用いて, 83~273K の各点における熱収縮量を測定することにより行った。Fig. 3 に直交積層材の温度の低下に伴う熱収縮率の変化を示す。GFRP および CFRP は液体窒素温度まではほぼ直線的に収縮し, 線膨張係数が定数で近似できるのに対して, AFRP は 180K 付近を境にして熱収縮率特性が変化しており, 線膨張係数が温度の関数になることを示している。また, CFRP および AFRP の熱収縮率が GFRP より小さいのは, カーボン繊維およびアラミド繊維の軸方向の線膨張係数が負であるためである。

Table II. List of specimen.

	Symbol	Fabric No. of ply	Built-up formation	Specific gravity	V_f (%)
Cross ply	G90	G×6	$[0^\circ]_6$	1.81	48.2
	C90	C×6	$[0^\circ]_6$	1.39	44.0
	A90	C×6	$[0^\circ]_6$	1.24	47.1
Angle ply	G45	G×8	$[0^\circ/45^\circ/0^\circ/45^\circ]_8$	1.80	48.4
	C45	C×8	$[0^\circ/45^\circ/0^\circ/45^\circ]_8$	1.40	46.1
	A45	A×8	$[0^\circ/45^\circ/0^\circ/45^\circ]_8$	1.24	45.4
	C30	C×6	$[0^\circ/30^\circ/60^\circ]_6$	1.36	41.8
	C15	C×6	$[0^\circ/60^\circ/45^\circ/30^\circ/15^\circ/75^\circ]_6$	1.39	43.7
Hybrid	AC90	A×4	$[0^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ]_4$	1.32	45.4
		C×4	$\begin{matrix} \uparrow & \uparrow & \uparrow & \uparrow \\ A & C & A & C \end{matrix}$		
	AG90	A×4	$[0^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ]_4$	1.53	45.5
		G×4	$\begin{matrix} \uparrow & \uparrow & \uparrow & \uparrow \\ A & G & A & G \end{matrix}$		
	GC90	G×4	$[0^\circ/0^\circ/0^\circ/0^\circ]_4$	1.60	46.3
		C×4	$\begin{matrix} \uparrow & \uparrow & \uparrow & \uparrow \\ G & C & G & C \end{matrix}$		

G: Glass-roving-cloth.

C: Carbon-cloth.

A: Aramid-cloth.

Fig. 3. Thermal contraction of woven cloth laminates.

斜向角度の影響では、いずれも試験片主軸と繊維方向とのずれが最大となる 45° において熱収縮率は最大になり、特に AFRP は異方性が顕著である。これはアラミド繊維の半径方向の線膨張係数が他に比べて極端に大きい²⁾ため、斜向角度に対する感受性が高く現れたものと考えられる。

3・2 斜交積層材

上述した直交積層材の熱収縮率異方性を改善するため、第一の方策として、織布の方向を変化させて積層した斜交積層材について検討を行った。Fig. 4 は積層角度を 45° とした FRP について、83K における熱収縮率を斜向角度との関係で整理したものである。この場合は 0° と 45° 方向に繊維が入っているため、 22.5° を中心とした対称図形になっている。また、CFRP および AFRP は直交積層材と比較して全体的に熱収

Fig. 4. The anisotropy of thermal contraction in the FRP containing woven cloth lamina with 45° orientation at low temperature.

Fig. 5. Relation between thermal contraction and pile-up angle of CFRP at low temperature.

Fig. 6. The anisotropy of thermal contraction in hybrid FRP at low temperature.

縮率が低下しているとともに、異方性を小さくする効果が顕著に現れている。

Fig. 5 は CFRP について積層角度と熱収縮率との関係を調べたものである。異方性は積層角度 45° 以下ではほとんど認められない。一方、織布のハンドレイアップ積層では、繊維の交わる点に溜る樹脂（ポケット溜り）は積層角度を小さくするにつれて抜けにくくなり、繊維の体積分率を高く保つことが困難になることもあって、熱収縮率低減の効果はあまり見られない。したがって、熱収縮率の見地からは積層角度は 45° が望ましい。

3・3 ハイブリッド積層材

上述したように斜交積層材は単一織布で異方性を軽減する効果があるが、積層構成に制約があり、また作業性が若干劣る。そこで、異方性の強い AFRP を比較的異方性の少ない GFRP あるいは CFRP とハイブリッド化することによって、異方性の軽減とともに、熱収縮特性の向上を試みた。

Fig. 6 は供試したハイブリッド積層材の 83K における熱収縮率を通常の直交積層材のそれと比較したものである。A/CFRP および A/GFRP とハイブリッド化の効果が顕著に現れ、低温域での熱収縮率の異方性の低減に効果を発揮していることがわかる。

4 曲げ強度特性

4・1 直交積層材およびハイブリッド積層材

曲げ強度特性は超低温試験装置を使用し、JIS K7203 に準拠して求めた。直交積層材の 93K における曲げ強度特性の異方性について調べた結果を Fig. 7

Fig. 7. Relation between bending property and off-axis angle of woven cloth laminates.

に示す。ここではハイブリッド積層材も直交積層材と同じ範ちゅうにあるものとして同図中に掲載した。得られた結果は供試材の比重の違いを考慮して、いわゆる比強度、比弾性率で示している。図からわかるように、供試した直交積層材の曲げ強度は斜向角度により2~3割減少している。なかでもGFRPは異方性が大きく現れている。AFRPについては繊維の圧縮強度がかなり小さいために積層材の曲げ強度も小さくなっている。一方、比弾性率についてはCFRP積層材が優れた値を示している反面、異方性が大きく設計に注意を要する材料であることがわかる。この点、ハ

Fig. 8. Relation between bending property and off-axis angle of the FRP containing woven cloth lamina with 45° orientation.

Fig. 9. Relation between bending property and pile-up angle of CFRP.

イブリッド積層材は異方性が若干改善されており、その積層構成を最適化することにより異方性のさらなる低減も可能である。

4・2 斜交積層材

Fig. 8は45°斜交積層材について曲げ強度特性の異方性を調べたものである。比強度は直交積層材の斜向角度0°すなわち繊維方向の強度値とほぼ一致しており、また斜向角度の影響はほとんど認められず、異方性の解消に有効であることがわかる。一方、弾性率は全体的に向上し、異方性が小さくなっているものの、熱収縮率の場合とは異なり、22.5°を中心とした対称図形になっていない。これは弾性率が最外層の繊維方向に大きく依存するためであるが、この点については極低温構造物の設計段階で考慮すれば問題ないと考え

る。さらに、CFRPについて積層角度と曲げ強度特性との関係をFig. 9に示すが、熱収縮率の場合と同様、強度特性向上の効果はあまり見られず、積層角度は45°で十分であることがわかった。

5 おわりに

カーボクロス、アラミドクロス、ロービングクロスの3織布による直交積層材の熱収縮率および極低温曲げ特性の方向依存性を調べるとともに、異方性の低減を図るため、斜交積層材およびハイブリッド積層材の低温特性を調べた。得られた主な結果を以下にまとめる。

(1) 直交積層材の熱収縮率に及ぼす斜向角度の影響は、CFRP、AFRP、GFRPのいずれも試験片主軸と繊維方向とのずれが最大となる45°において熱収縮率が最大となり、特にAFRPは異方性が顕著である。

(2) 曲げ強度は斜向角度により2~3割減少し、なかでもGFRPは異方性が大きく現れた。一方、曲げ弾性率はCFRPが優れた値を示したが、異方性が大きく設計に注意が必要である。

(3) 異方性を改善するため、織布の方向を変化させて斜交積層としたCFRPおよびAFRPは、直交積層材に比べて全体的に熱収縮率が低下するとともに、異方性を小さくする効果が顕著に現れた。

(4) 斜交積層材の曲げ強度特性は斜向角度の影響がほとんどなく、異方性の解消に有効である。

(5) 熱収縮率の異方性が強いAFRPと比較的少な

いGFRPあるいはCFRPとをハイブリッド積層することにより、低温域での熱収縮率の異方性をかなり低減できることがわかった。

(平成4年3月19日 日本材料学会第21回FRPシンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) 石川隆司, 福永久雄, 小野幸一, 日本航空宇宙学会誌, **36**, 512 (1988).
- 2) D. ハル, “複合材料入門”, p. 13 (1984) 培風館

書 評

“フ ラ ー レ ン”

——魅惑的な新物質群, C_{60} とその仲間達——

谷垣 勝己・菊地 耕一 (著)
阿知波洋次・入山 啓治

(1992年, 産業図書(株)発行, B 6 判, 176ページ, 1854円)

フラーレンが多くの実験者の耳目を集めたのはわずか3年前の1990年からである。それはフラーレンが量産(と言ってもmg単位)され、分離出来るようになったからである。ところがそれ以後の研究の進展は目覚ましく本書のような立派な解説書が出版されるまでになった。

フラーレンについては、本書でもすでに紹介されている(斉藤弥八, 材料, **41**, 1465 (1992))。最初1970年に大澤映二, 現豊橋技術科大学教授に予言され, 1985年にイギリスのクロトーとアメリカのスモーリーにより炭素だけからなる C_{60} 分子として存在が確認された, 第3の炭素同素体である。

フラーレンには C_{60} だけでなく C_{70} , C_{76} , ...と原子数がさらに多いものもあり, これらを高次フラーレンと呼ぶ。これらのフラーレン類は炭素の5員環と6員環だけから出来ている。高次フラーレンでも含まれる5員環は12個だけのことである。フラーレン製造研究の過程で, 7員環も含まれるカーボンナノチューブが日本人(NECのIijimaら)により発見されている。

わずか最近の6年ほどの間にセラミックスの“高温”超伝導体, 常温核融合, そして本書のフラーレンと, 次々に新しい物質や現象が発見された。自然界は身近にありながら, まだまだ, 未知の物質や現象に満ちているように思える。本書を読むことにより, 今後も新発見の夢がふくらみ, 楽しくなった。欲を言えば1970年以後の主な経過を年表にまとめてもらおうとさらによかったように思える。

口絵にモデルなどのカラー写真があり, 4人の共著であり, またわずか2カ月余りでまとめられたものでありながら, 文体もかなり統一されており, 縦書きの分かり易く読み易い入門書である。多くの人が読まれ, 自然科学の新たな夢をふくらませて欲しい。

(大阪工業技術試験所 中西洋一郎)