解 説

極低温用 FRP の開発と評価

鎌 田 譲*, 富士 慶滋**, 永井 又男***

1. 緒 言

ガラス繊維強化プラスチック (GFRP) はいまやわれわれの生活環境においてきわめて身近な材料であり、人々は材料のもつ機能を十分に享受しているといえよう。比強度の大なるガラス繊維を布状に編み、接着力の強いエポキシ樹脂などを含浸した複合材料はどのような経過を経て誕生したのであろうか。筆者が調べた限りでは、昭和 19 年、第二次大戦において、対日戦争を継続しつつあった米国が軍事技術をさらに高度化させるため、鋼板よりも軽く、鋼板よりも機械強度の優れている GFRP を開発し、航空機の機体の一部や魚雷艇に実用したのが始まりといわれている。わが国で GFRP の開発が始まったのは昭和 26 年頃からのようである。鋼板に比較して、軽い、錆びない、成形が容易などの特徴は、家庭用品から高価な機械装置にまで普及し、現在では地上環境にあふれんばかりになっている。

地上に存在しない環境、たとえば極低温下においても GFRP を利用できないだろうかという着想が生まれたのは昭和 45 年代後半のことである。つまり超電導現象を応用した大型の試験研究装置が、わが国において次々と誕生しつつあった時期に呼応している。本誌では昭和 57 年から行なってきた極低温用非金属複合材料開発に関する研究成果の概要を報告する。

なお、本研究は科学技術庁の昭和 57~60 年度科学技術振興調整費による「超電導・極低温基盤技術の開発に関する研究」の一環として実施したものである。

2. 超電導機器における GFRP の位置づけ

極低温用 GFRP が材料として、どのような要求を満たすべきかについて述べる。図 1 は一例として、強制冷却型超電導マグネットおよび液体 He 浸漬型マグネットの概念図を示したものである。一般に大型の超電導マグネットには超電導導体の内部を冷却路と併用し、液体

He を強制循環する方式とコイル全体を浸漬する方式とがある。今後マグネットのエネルギーが増大するにつれて強制冷却型に移行するであろうといわれている。超電導マグネットはクライオスタット (一種の大型の魔法瓶) に収納される。そして、内部での発熱 (たとえば磁界の変化によって金属体に流れる渦電流によるジュール熱) を極力避けねばならないから、非金属性の高強度構造材料が必要になる。

GFRP の使用環境という点からみれば、

(1) 常時または cool down 時に 4.2 K の極低温液体 (液体 He, LHe) にさらされる。とくに cool down 時には常温 (300 K) → 液体窒素温度 (77 K) → 4.2 K と、きわめて大きな温度差を受ける。

(2) 超電導導体に流れる大電流 (数百 kA) とコイルのつくる高磁界 (数 T) によって強力な電磁力が発生し、数百 MPa の圧縮、曲げ、引張り応力をうける。

(3) 大電流の過渡変化によって、高電界 (数 kV/mm) にさらされるため、極低温真空中あるいは液体 He 中において良質の電気絶縁性が要求される。

3. 材料の選定と評価結果

極低温用 GFRP を開発するためには材料的にいろいろな条件を考慮しなくてはならない。われわれは固体の電気絶縁材料の開発と応用を担当してきた長年の経験から以下のような条件を設定した。

(1) ガラス繊維は電気絶縁性の点から E ガラス系とする。

(2) ガラス繊維の充填密度を向上すれば、より高強度で、収縮率の小さな材料となるはずであるから、繊維の織り方を数種類選定する。

(3) 含浸する樹脂はできるだけ低収縮率のものを選定する。汎用性を考えてエポキシ系、将来の核融合炉用を考慮して耐放射線性の良好なポリイミド系の二系列を考える。

(4) 材料中の樹脂量を小さくし、繊維の量を増やすことが望ましい方向のはずである。したがって成形方法についても実用性あるいは量産性に配慮して、2 種類の方法

* Yuzuru KAMATA, ** Keiji FUKUSHI, *** Matao NAGAI : (株) 日立製作所日立研究所第 2 部 (316-12 日立市久慈町 4026)

図1 超電導マグネットの概念図と GFRP の使用場所

を考える。

結局、当初の材料選定のための組合せはエポキシ系 GFRP で 14 種、ポリイミド系 GFRP で 17 種になった³⁾。そして一種の材料スクリーニングであるため、高価な液体 He の使用を少なくし、液体 N₂ 中で特性を求めることにした。

このなかから得られた主な特性を以下に記述する。まず図2にエポキシ系 GFRP の熱収縮率と圧縮強度の関係を示す。これら二つの特性値は図1(b)に示される浸漬型超電導コイルにおいては、スパーサ（絶縁材料でなければならない）用 GFRP に関して最も優先性の高い性能が要求される。測定点は板状の小サンプルで求めた。

図2 エポキシ系 GFRP の熱収縮率と圧縮強度 (汎用 GFRP)

実線で示されているカーソル線は米国で市販されている極低温用 GFRP の特性値を比較基準線とするためにひいた。また図中の番号は材料の種類を表わしている。多くのパラメータを検討した結果、次のようなことが明らかになった。

(1) マクロな指標として、樹脂の重量含有率によって収縮率が変わる。16~18% にすると金属 (SUS, Cu, Al) なみの値が得られる。

(2) 圧縮強さに関してはガラス繊維の織り方がおもな影響を与え、充填密度が大である一方向織が好ましい。

ポリイミド系の GFRP についても、図3に示すように、同様の傾向が得られた。図4はエポキシ系 GFRP

図3 ポリイミド系 GFRP の熱収縮率と圧縮強度 (耐放射線性 GFRP)

図 4 曲げ強度の温度特性 (エポキシ GFRP)

のなかから代表的なものを選定して、曲げ強度と温度の関係を検討したものである。低温になると強度が増加するがその増加比率は常温である 300 K から 77 K に低下すると著しく大となるが、さらに液体 He 温度である 4.2 K に低下しても飽和することがわかる。この点で安価な液体 N₂ を使って極低温特性を評価しておけば、極低温での機械的物性をほぼ把握できるといえる。このことは、表 1 をみていただければよりはっきりすると思う。各種の機械的物性値は 77 K から 4.2 K に低下させても、その変化率は数%以下であることが示されている²⁾。

最後に本節のまとめをしておく必要がある。もし市販されている極低温用 GFRP を基準にすれば、それと

表 1 77 K と常温および 4.2 K と 77 K における各種特性の比較

	77 K/300 K	4.2 K/77 K
引張り強度	1.7	1.03
曲げ強度	1.7	1.04
圧縮強度	1.6	—
曲げ弾性率	1.4	1.05
引張り破断伸び	1.3	1.01
曲げ破断伸び	1.3	1.01

等かもしくはそれ以上の性能をもったものが素材的に開発されたといえる。しかし実際に超電導マグネットに応用するには、ばらつきや疲労特性、電気絶縁特性などについて幅広いデータベースを蓄積する必要がある。一つの目安として述べれば、超電導マグネットの軸方向電磁力を重視するのであれば数種の GFRP が金属なみの収縮率になるので合格といえよう。また面垂直圧縮強さとして 1,000 MPa 以上のものが必要であれ十種を越える GFRP が合格したといえる。これらの詳細な数値表については別稿を参照していただきたい。

4. 量産化を指向した評価

多数の材料選定を行なって、市販品よりも性能の優れた極低温用 GFRP を素材的に得ることに成功したが、そのパラメータは多種多様でありかつ小サンプルでの数値が大型の GFRP 板としたとき、どの程度のものであるかという疑問が生ずる。そのため仮のグレード分けと

表 2 大型積層板の仕様

基 材	GE1, GP1		GE2, GP2			GE3, GP3
	平 織	平 織	ガラス ロービング	平 織	一方向織	一方向織
成 形 方 法	真空含浸	プリプレグ プレス	真空含浸	プリプレグ プレス	プリプレグ プレス	プリプレグ プレス
レジン量	<29 wt%		<22 wt%			<18 wt%
レジン	GE1-1	GE1-2	GE2-3	GE2-4	GE2-5	GE3-6
	脂環式 エポキシ 酸無水物	ビスフェ ノール A 酸無水物	脂環式 エポキシ 酸無水物	ビスフェ ノール A 酸無水物	ビスフェノール A 芳香族アミン	
	GP1-1	GP1-2	GP2-3	GP2-4	GP2-5	GP3-6
	ISOX	ケルイミド®	ISOX	ケルイミド®	BT-2 レジン®	

®は商標を意味する。

いう考え方から表2のような仕様を決定した。すなわちガラスの繊維を織った基材、重要な know how を含む成形方法、収縮率の目安になる樹脂含有量、汎用あるいは耐放射線性を考えた樹脂の種類によって、密度、収縮率、圧縮強さ、引張り強さ、引張り破断歪み、曲げ弾性率、層間剪断強さなどの物性値がほぼ定められるであろうとする考え方を採用した。GEはガラスエポキシ、GPはガラスポリイミドを意味する。そして番号がGE-1からGE-3へとますますほど、特性が向上することを意味する。番号1のクラスは極低温用として市販されているものと同等、番号2のクラスは極低温機器の導体材料に用いられている高純度アルミニウムと同等の熱収縮率、番号3は同じく無酸素銅と同等または金属構造材料 SUS 304 なみの熱収縮率を有する GFRP と考えてもらえばよい。1節で検討した素材のなかから12種に絞りこんで、生産性や品質管理に配慮し大型の GFRP 板 (1 m ×

2 m, または 1 m × 50 cm, 厚さ 1.5 mm, 3.5 mm, 10 mm) を国内メーカ3社に試作してもらった。図5に大型 FRP 板のサンプル採取位置を、図6、図7に収縮率と圧縮強度の採取位置変化を示す。これらの図から、ばらつきは非常に少ないことがわかる。さらに密度、樹脂含有率、曲げ、引張り、層間剪断強さについても検討したが、同様な結果が得られた。これらのことから、少なくとも機械特性全般に関しては実用に供しうる極低温用 GFRP を提供できることが明らかになった¹⁾。

5. 機械的応力下における電気絶縁特性

GFRP は機械強度特性の優れた材料であると同時に本来良質の電気絶縁材料であるが、機械的応力を加えることによって、外見上異常はなくても内部に微小なクラックを発生し、容易に電子雪崩の通路が形成されて、絶縁耐力が著しく失われる可能性がある。とくに超電導機器は本質的に大電流、高磁場機器であるから強大な電磁力が使用される材料に印加される。この点についていくつかの評価を行なった。

図8および図9に圧縮応力を加えながら絶縁破壊を生ぜしめる装置の概略と引張り応力と絶縁破壊の関係を求める装置の概略を示す。機械応力を加えながら高電圧で絶縁破壊を生ぜしめる市販の装置はないため、いくつかの工夫をこらした。とくに当初十分用心していたにもかかわらず、絶縁破壊時に生ずる誘導サージ電圧によって、機械応力発生装置の電子制御系を破損するという失

図5 大型 FRP 板のサンプル採取位置

図6 試験片採取位置と面垂直方向熱収縮率 α のばらつき

図7 試験片採取位置と面垂直方向圧縮強度のばらつき

図 8 圧縮応力下での電気絶縁破壊特性を求める装置の概略

敗に遭遇したが、高電圧発生回路の接地系や電子回路の遮蔽を改善して克服した。

図 10 は圧縮応力と破壊電圧の関係を示したものである。ある圧縮応力から交流 50 Hz の破壊電圧が急激に低下していることが判明する。材料の差による破壊電圧への影響は少なく、むしろ機械的に破壊することによってほぼ同時に電気絶縁破壊電圧が急激に低下すると予想される。図中の※印は電気絶縁破壊が先行した場合につけた。電気的に破壊した場合でも、機械的に破断した場合でもその差は非常に少ないことから、前述の予想が妥当であることがうなずかれる。

一方、引張り応力と電気絶縁破壊電圧の関係は図 11

図 10 圧縮応力と電気絶縁破壊電圧の関係

図 9 引張り応力下での電気絶縁破壊特性を求める装置の概略

図 11 引張り応力と電気絶縁破壊電圧の関係

のようになり、材料の種類によって3種類の特性を示すことが明らかである。Aグループは引張り応力を増すことによって電気絶縁破壊電圧が著しく低下し、引張り応力を加えることによって見掛上異常のない GFRP の内部に電気破壊を起こす欠陥を生じていることを示している。顕微鏡によって観察したところ、引張り応力の方向と直角にマイクロクラックが発生し、その部分で電気的に破壊していることが判明した。この様子を図 12 に示す。Bグループはやや良好であるがやはり微小なクラックが原因になっている。比較的低下傾向の少ないCグループ

図 12 引張り応力下で生じたマイクロクラックに沿って電気絶縁破壊を起こした写真

ープは 300 MPa からゆるやかに低下している。仮につけた材料のグレード番号からも理解されるように、引張り強度の大きいものほど有利になる。このようなことから超電導機器に使用する GFRP に電気絶縁機能も付与しようとするさいには、たんに機械的な破断と同等に扱ってよい場合と、破断の前に発生する微小なクラックに十分注意しなければならない場合があることが明らかになった¹⁾。

解 説

航空機における複合材損傷例と修理上の問題点

高 坂 邵*

1. はじめに

機体メーカーが複合材を積極的に導入する主目的は、重量軽減にあることは、オペレータとしても十分承知していることであるが、過去の損傷事例や修理上の複雑な諸問題を考えると、必ずしも歓迎すべきことばかりではない。機体メーカーは、各種の損傷が発生するという事実を

* Takashi KOSAKA : 日本航空(株)技術部システム技術室 (144 東京都大田区羽田空港 1-9-1)

6. 結 言

以上、極低温 GFRP の開発と評価について、われわれの行ってきた概要を紹介した。おもな結論をまとめれば以下のようなものである。

- (1) 極低温において十分使用できる汎用のガラスエポキシ系 GFRP および耐放射線性を期待できるガラスポリイミド系 GFRP 素材を開発した。
- (2) 大型の GFRP 板を試作し、ばらつきについて検討し、素材のいくつかは実用に供しうる段階にあることを明らかにした。
- (3) 電気絶縁特性におよぼす機械的応力の影響についても検討し、電気-機械応力の相互作用が応力の種類によってある場合とない場合とがあることを示した。

終りに臨み、種々ご指導、ご意見をいただいた極低温構造材料ワーキンググループのメンバーの方々に謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 鎌田 譲, 富士慶滋, 永井又男, 門谷建蔵: 極低温材料の性能評価と標準化予稿集(1986), pp. 8-23.
- 2) K. Fukushima, M. Nagai, Y. Kamata & K. Kado-tani: *International Conference on Nonmetallic Materials and Composites at Low Temperatures*, Plenum Press (1985), pp. 187-193.
- 3) 門谷建蔵, 永井又男: 強化プラスチック, 29, 12 (1983), 25-43.

十分認識し、整備作業負荷の軽減を図れるよう簡便な検査方法および簡単な修理方法の確立についても複合材の導入と同時に検討されることが望まれる。

2. 複合材使用区分の拡大

一例として、ボーイング社の導入実績を図1に示してある。767 および 757 型機では、二次構造部材のみならず、一次構造部材であるフライト・コントロール・サーフィスにも拡大されてきた。1990 年代には、主翼および