

炭素繊維強化形状記憶ポリマの宇宙適用性評価

Space Applicability Study on Carbon Reinforced Shape Memory Polymer

部品・材料・機構技術グループ

(Electronic, Mechanical Components and Materials Engineering Group)

石澤 淳一郎、南 伸太郎、島村 宏之

Junichiro Ishizawa, Shintaro Minami, Hiroyuki Shimamura

Abstract

Carbon fiber reinforced shape memory polymer (FR-SMP) has been developed for space deployable structures as solar paddles, antennas, etc. This material is lightweight, low-cost, and has high workability. We have experimentally proved enough tolerance against space environment for its mechanical and shapes recover property. Deploying test using flat plate models has been revealed that unidirectional reinforced configuration has good shape memory property due to well-balanced rigidity and flexibility.

Hemisphere model has been produced through newly-developed FR-SMP dry prepreg.

1. はじめに

宇宙開発における展開構造技術の研究は、太陽電池パドル、アンテナ、ラジエータ等や、太陽発電衛星をはじめとする新しい大型宇宙構造物の実現のために国内外で実施されている。人工衛星の展開型太陽電池パドル等、実用が進んでいるものも多いが、展開機構が追加されることによる重量、寸法の増加や信頼性の低下等、期待するほどの形状展開の効果が得られにくい場合もあり、その技術向上が求められている。

そこで我々は、信頼性や形状自在性の高い展開構造を実現する材料として、形状記憶ポリマに着目し、宇宙適用に向けた研究を行っている。形状記憶ポリマは、材料の加熱のみで展開する単純な機構となるため信頼性が高く、複雑形状への適用が可能等の利点を有する。形状記憶ポリマは、同様な形状記憶材料である形状記憶合金と比較し、高分子材料に特徴的な軽量で加工性に優れる等の利点を有している。一方で、樹脂単体では展開精度や耐宇宙環境性に劣るため、炭素繊維による複合強化（形状記憶ポリマ複合材）や樹脂成分の改良によって、宇宙適用性を高める研究を実施してきた。

本研究は平成 12 年度から形状記憶ポリマの基礎物性、耐宇宙環境性の評価や、宇宙適用のための複合材用樹脂の開発、形状回復温度を向上させるための材料設計、プロセス改良等を実施し、その後、平成 16 年度から 2 年間に亘り、用途先を拡大するプリプレグの開発や展開試験等を実施した。本項では、形状記憶ポリマの特徴と共に、最近の成果である形状記憶特性評価結果や、成形プロセスの改善を目的として実施したプリプレグの試作評価結果について報告する。

2. 研究の概要

形状記憶ポリマの形状記憶機能は、高分子材料のガラス転移現象を利用している。

一般的な高分子材料の機械的特性はガラス転移温度 (T_g) を境として変化し、低温では硬いガラス状態、高温では柔軟なゴム状態として振舞う。形状記憶ポリマは、 T_g 以上の温度ではゴムのよう自由に變形させることが可能であり、その變形（負荷応力）を保ったまま T_g 以下の温度に冷却することによって、そのままの形状で固定させることができる。その後、 T_g 以上に加熱すると、材料は柔軟性を取り戻し、本来の弾性力によって元の形状に回復する。

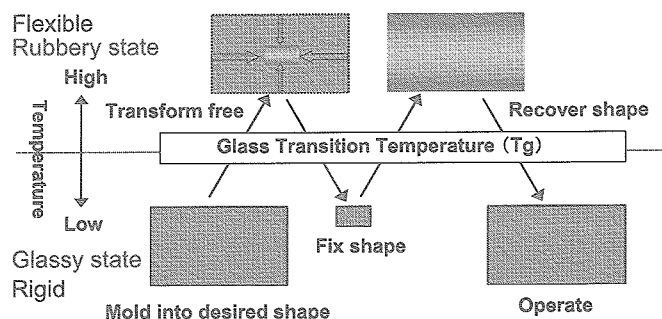


Figure 1 Concept of SMP's Shape Memory Effect

Tg は形状回復温度となり、本材料に重要な特性となる。

収縮状態でロケット等の輸送機に搭載、輸送後展開させる場合は、軌道上で展開させたい形状に成形した後、Tg 以上でロール状等に畳み、その形状を保ったまま Tg 以下に冷却して形状を固定する。これを軌道上に輸送後、Tg 以上に加熱することによって展開させ、加熱を止めることにより剛性の高いガラス状態とし、運用状態とすることができる (Figure 1)。

駆動機構を用いた張力負荷型の展開では、展開力の制御や長期安定性が構造全体の信頼性を左右するが、形状記憶ポリマによる展開は、材料が安定となる元の形状に回復していくものであるため、確実な展開動作を実現させやすい。さらに、局所的な負荷が掛かりにくい、展開速度や展開力が小さいため宇宙機の姿勢への影響が小さい (反対に、大きな駆動力を必要とするようなアクチュエータとしては不向きとなる)、展開の中断、再開が可能である等、宇宙機への適用に有利な点が多い。

形状記憶ポリマは、日本で開発された材料を中心に、組成や機械的特性、形状回復温度が異なる複数種が存在する。この中から、形状回復温度の設定温度範囲が広く、既に民生用途で多くの実績を有する三菱重工業 (株) 製ダイアリイ® (上市は (株) ディアプレックス) を選択して宇宙適用性の研究を行っている。ダイアリイ® はポリオールとイソシアネートを主原料としたポリウレタン系高分子材料であり、その配合、分子構造、分子量を変化させることによって、 $-40\sim 120^{\circ}\text{C}$ の範囲で形状回復温度となる Tg を設定することができる^[1-3]。

形状記憶ポリマを宇宙機に適用する場合、ポリウレタン樹脂単体では機械的特性が十分ではない。このため、炭素繊維による材料強化を行い、宇宙用の形状記憶ポリマ複合材としての研究開発を実施してきた。これまで、機械的特性データの取得、形状回復温度 (Tg) の高温化 ($55^{\circ}\text{C}\rightarrow 100^{\circ}\text{C}$)、柔軟性低下の少ない炭素繊維強化方法の検討、宇宙環境に対する耐性評価及び耐性向上、加熱用ヒータ埋込み品の試作評価等を実施してきた。特に、耐宇宙環境性については、電子線、紫外線、原子状酸素の各照射後においても機械的特性や形状記憶特性が十分維持されることを確認した。これらの詳細については文献^[4-5] を参照されたい。

3. 成果概要

3. 1 形状記憶特性評価試験

形状記憶ポリマ複合材の形状記憶特性評価のため、平板モデルを用いた収納性評価試験及び展開試験を実施した。ゴム状態となる $Tg+30^{\circ}\text{C}$ で供試体をジグザグ状に折畳み、若しくはロール状に丸めて収納性を評価した後、透明アクリル製加熱室中で $Tg+30^{\circ}\text{C}$ の対流空気加熱による展開試験を実施した。展開方法は下向きとした。

評価試験に用いた供試体を Table 1 に示す。炭素繊維による強化は、平織及び一方向強化の 2 形態とした。一方向材では、繊維に対し平行方向と垂直方向で機械的特性等の異方性を有するが (繊維強化の効果)、長軸方向を高剛性にする用途が主となると考え、繊維と平行方向を収納及び展開方

向と設定した。一方向材は長軸方向の強化が大きいため、平織り材の半分の厚みとした。なお、試験実施の簡便さから、形状記憶樹脂には $Tg:55^{\circ}\text{C}$ の MP5500 を用いている。

本試験で得られた結果を Table 2 に、形状回復挙動を示す写真を Figure 2 に示す。収納性は畳んだ際の高さから、形状回復性は回復に要した時間と回復形状精度 (○: ほぼ元通りに回復、△: 局所的な変形が一部に残る、×: 平置き時に 1cm 以上の浮きが見られる) で評価した。

繊維強化形態の比較では、平織材と比べ形状の薄い一方向材が、ゴム状態 (Tg 以上) での柔軟性が高く、収納高さを小さくすることができた。また、収納方法の比較では、局所的に歪みが生じにくいロール状で良い結果が得られたが、その後の展開試験では、回復精度や回復時間が劣る結果となった。

これは、ロール状に巻き始める際の歪みが大きくなり形状回復を妨げる損傷が生じたこと、接触する部分が多く形状回復時の摩擦が大きくなること、さらに熱が伝わりにくい形状で回復に時間が掛かったものと考えられる。本試験では、繊維強化形態は平織材よりも一方向強化材の方が、収納形態はロール法よりも折畳み法の方が、形状

Table 1 Specimen for shape memory test

Specimen	Quasi-Isotropic (4ply) FR-SMP	Unidirectional (2ply) FR-SMP	Resin only
Resin material	MP5500 ($Tg:55^{\circ}\text{C}$)		
Dimensions (mm)	500×100×1	500×100×0.5	500×100×1
Bending strength (MPa)*	228	535** 42***	—
Bending elastic modulus (MPa)*	9.1	38* 2***	—

* Measuring at room temperature

** Fiber-reinforced direction *** Vertical to fiber-reinforced direction

記憶特性が優れた結果となった。

今後は変形部の板厚を薄くするように配慮する等、強化繊維の選択、収納方法を含めた設計手法の向上を図っていく。併せて、軌道上展開を模擬した真空環境下での加熱、展開試験を実施する予定である。

Table 2 Specimen for shape memory test

	Quasi-Isotropic (4ply) FR-SMP		Unidirectional (2ply) FR-SMP	
	Fold	Roll	Fold	Roll
Minimum Storage Height (mm)	64	46	50	30
Shape Recovery Time (s)	90	240	40	100
Shape Recovery Accuracy	○	×	○	△

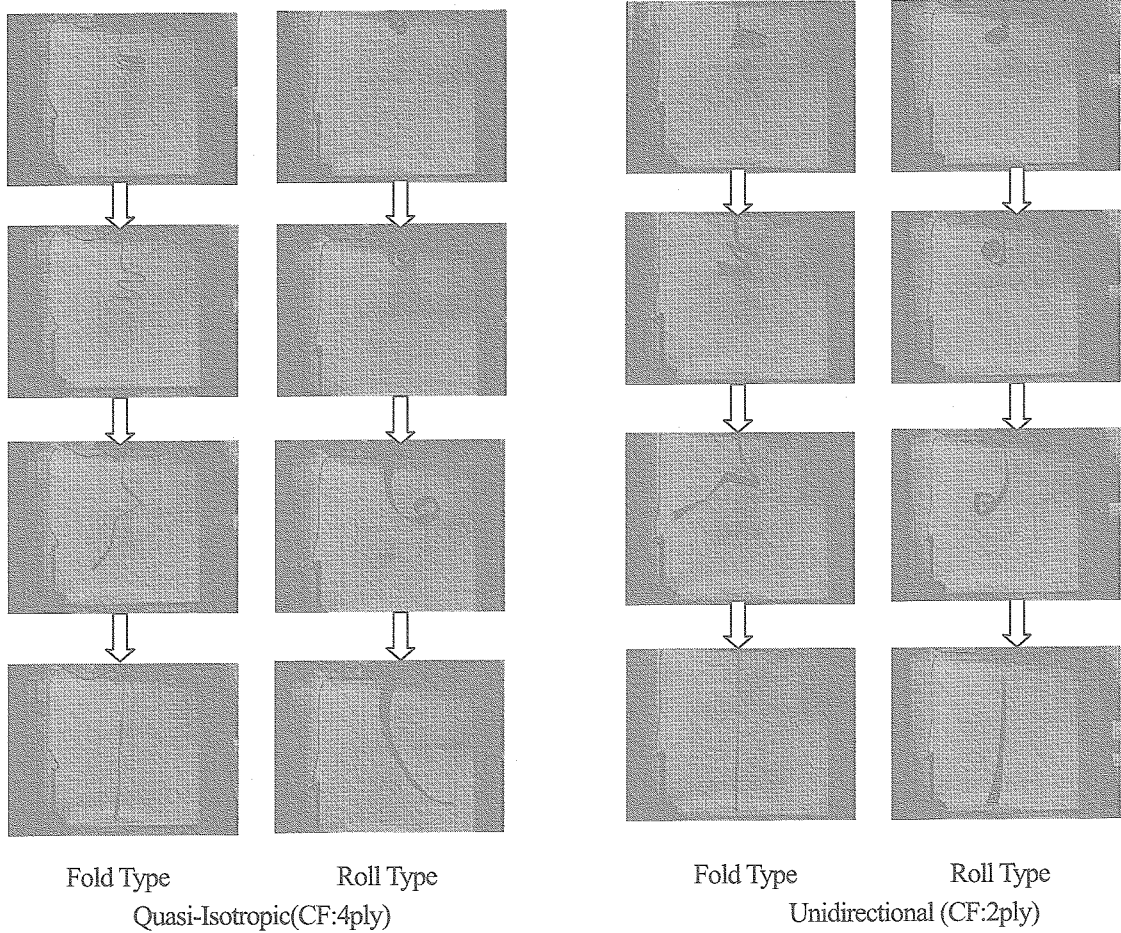


Figure 2 Sequential Photographs of FR-SMP during Moving Model Tests

3. 2 プリプレグの試作評価

形状記憶ポリマ複合材は、モールド成形が可能で、ヒートシール性や同系材料からなる形状記憶接着剤を利用した接着加工が可能、切削性も良い等、加工性に多くの利点を有している。

これまでの研究では、平板状の形状記憶ポリマ複合材をホットプレス成形若しくは真空アシスト RTM 成形 (Resin Transfer Molding、気密な型に強化繊維を設置後、樹脂を流し込んで成形する複合材料の成形法) によって製作してきたが、曲面やアングル等、様々な形状での成形を容易にするため、形状記憶ポリマプリプレグの製作を試みた。

今回試作を行ったものは、取扱い性で有利なドライプリプレグであり、繊維に含浸させた形状記憶ポリマ (MP9000) の硬化を途中まで進行させたものである。得られたドライプリプレグは、ガラス転移点以上からプリプレグの硬化温度以下に加熱することで柔軟にできる。プリプレグを任意の型に積層させ配置するレイアップの作業では、型に積層させる際に加熱して柔軟になり、その後は冷却によって固定できるため、作業性が高まる

利点も得られた。

Table 3 にオートクレーブ成形及びプリプレグ・ハンドレイアップ成形によって作製された 4ply 平織複合材の 3 点曲げ試験結果を示す。プリプレグ成形材は、目標とした板厚よりも厚くなったため、機械的特性の直接比較ができないが、オートクレーブ品に対し特性が劣らない結果が得られた。板厚等の形状精度については、今後の試作試験でデータを充実することによって向上できる見込みである。

プリプレグ成形品の断面観察写真を Figure 3 に示す。炭素繊維-樹脂層間のボイド等、内部に含まれる欠陥は観察されず、ドライプリプレグによる形状記憶ポリマ複合材の成立性が確認できた。

さらに曲面を有する立体形状での成形性評価のため、半球型モデル (2ply 平織、直径 350mm、高さ 120mm) をプリプレグから作製した。Figure 4 のように平板状の形状記憶ポリマ複合材に放射状の切込みを入れ、半球の型に合わせて成形を行った。端部仕上げを行った成形体外観を Figure 5 に示す。仕上りが良好なモデルを作製することができた。

Table 3 Mechanical properties of FR-SMP

Molding process	Autoclave	Prepreg
Thickness (mm)	1.1	1.6
Maximum load (N)	77	130
Maximum deflection (mm)	6.8	12.6
Bending strength (MPa)	316	449
Bending elastic modulus (GPa)	11	15

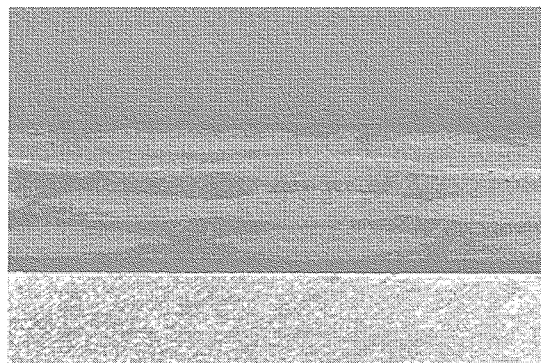


Figure 3 Cross-section of FR-SMP by prepreg processing

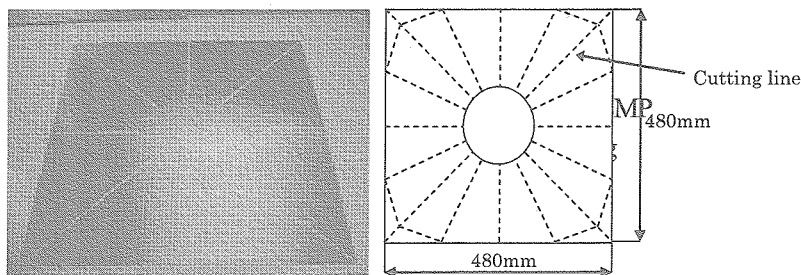


Figure 4 Cut line of FR-SMP plate for Hemisphere model

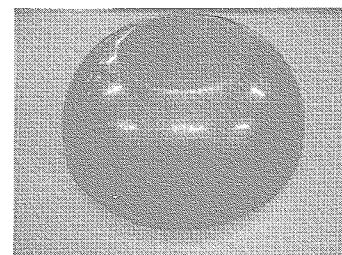


Figure 5 Hemisphere model of FR-SMP Using prepreg processing

4. まとめ

炭素繊維強化を行った形状記憶ポリマ複合材について、形状記憶特性評価試験及びプリプレグの試作評価結果を報告した。形状記憶特性評価試験では、板厚を薄く柔軟にできる一方向強化材が形状記憶特性に優れる結果が得られた。また、形状記憶ポリマ複合材のドライプリプレグ化に成功し、平板及び半球形状での成形性を確認することができた。

今後は、宇宙機用展開構造への適用に向け、より具体的なコンポーネントを見据えた動作モデルでの試験を行う等、研究開発を進展させたい

また本材料は、その新規性から民生用としての活用も期待できる。宇宙用としての開発と並行して、民生用途の展開も積極的に考えていく予定である。

参考文献

- [1] 戸伏, 林, 小島, 日本機械学会論文集, 57(1991), 543 号, pp.146-152.
- [2] 戸伏, 林, 日本機械学会論文集, 62(1996), 第 597 号, pp.1291-1298.
- [3] Sokolowski, Chmielewski, Hayashi and Yamada, Proc. SPIE, Smart Structures and Materials, 3669(1999), pp.179-185.
- [4] Ishizawa, Imagawa, Yoshikawa, Hayashi and Miwa, Proc. The 7th Japan International SAMPE Symposium (2001), pp.295-298.
- [5] 島村, 石澤, 林, プラスチックス, 1(2006), pp.124-128.