

構造技術の研究

Researches on Space Structural Technology

GX ロケット LNG 推進系複合材タンク開発支援のための評価試験
Cryogenic Mechanical Performance Assessments for LNG Composite Tank Development of the GX Rocketシステム評価技術グループ 何 建梅、下田 孝幸、幸節 雄二
Space Systems Evaluation Engineering Group
Jianmei HE, Takayuki SHIMODA, Yuji KOHSETSU

Abstract

Adhesively-bonded structure between CFRP composites and Aluminum metal (Al) plays an important role in the development of a light-weight Aluminum-lined CFRP cryogenic propellant tank in terms of design safety and durability. Large thermal stresses and strains produced by the difference of thermal expansion ratios among an adhesive material, CFRP composite and aluminum liner will lead to the potential of fracture strength deterioration for CFRP-Adhesive-Al bond structures at cryogenic temperatures below -150°C . In this study we experimentally investigated some temperature-dependent mechanical performance of the adhesive film AF163-2K itself and CFRP-AF163-2K-Al bond structures.

1. はじめに

本研究は、GXロケットLNG (Liquefied Natural Gas) 推進系のアルミライナ付きCFRP複合材推進薬タンクの開発支援として、本グループで行った接着剤関連の極低温力学的特性評価試験である。極低温LNG推進薬タンクの運用温度範囲（常温～LNG温度（ -163°C ））におけるCFRP複合材とアルミライナ間接着構造の強度耐久性、安全性などはタンク設計の信頼性や成立性に重要なキーポイントである。特に常温から極低温度（通常定義として -150°C より低い）まで大きな温度変化があった場合には、接着構造の各構成部材間に存在する熱線膨張率の相異で接着界面に大きな熱歪・応力が発生し、接着構造の大幅な強度低下につながる事が考えられる。そのため推進薬タンク製造条件を考慮した上、LNG複合材タンクの運用温度範囲で接着剤単体を含め、接着構造の力学的特性（弾性剛性、破断強度、破壊靱性など）の温度依存性を正確に把握することが設計上重要となる。

平成 15 年度にシステム評価技術グループは、実際に使用されているフィルム接着剤 AF163-2K を対象に、常温と LNG 温度で下記に示すフィルム接着材料・接着構造の力学的特性の温度依存性を評価する試験を行った。

- ① フィルム接着剤単体の引張特性（弾性率、引張強度等）とせん断強度（破断歪と破断応力）
- ② アルミ接着構造（アルミ-フィルム接着剤-アルミ）の引張モード I 破壊靱性値
- ③ CFRP 接着構造（CFRP-フィルム接着剤-CFRP）の引張モード I 破壊エネルギー
- ④ アルミ接着構造（アルミ-フィルム接着剤-アルミ）のせん断モード II 破壊靱性値
- ⑤ CFRP 接着構造（CFRP-フィルム接着剤-CFRP）のせん断モード II 破壊靱性値

2. 評価試験について

LNG 推進系飛行実証プロジェクトに適用されているフィルム接着剤 AF163-2K を対象に、CFRP 複合材タンクの製造工程におけるキュア条件に合わせて下記に示す評価試験用の供試体を製作した。LNG 推進薬タンクの運用温度範囲から、常温と LNG 温度の -163°C を評価試験温度として設定した。供試体を含めて試験環境における安定温度を得るため、LNG 温度での評価試験では液体窒素を用いて恒温槽の中を -163°C まで冷却した後平均 30 分以上の保持をして温度の安定化を図った。

2.1 フィルム接着剤AF163-2K単体の力学的特性評価

ASTM標準規格試験法 (ASTM D882-01^[1]とASTM D3528-96^[2]) に基づき、フィルム接着材AF163-2Kを使用し、図1と図2に示す引張特性評価用短冊供試体とせん断特性評価用ダブルラップ供試体を製作して評価試験を実施した。引張評価試験ではポアソン比とせん断弾性係数も評価するため、短冊供試体の中心に二軸方向の歪ゲージを貼り付けて引張方向と横方向の歪測定を行った。またダブルラップせん断評価試験では、接着エリア側面の両端部にマークをつけて画像センサーによって接着層のせん断伸びを測定した。

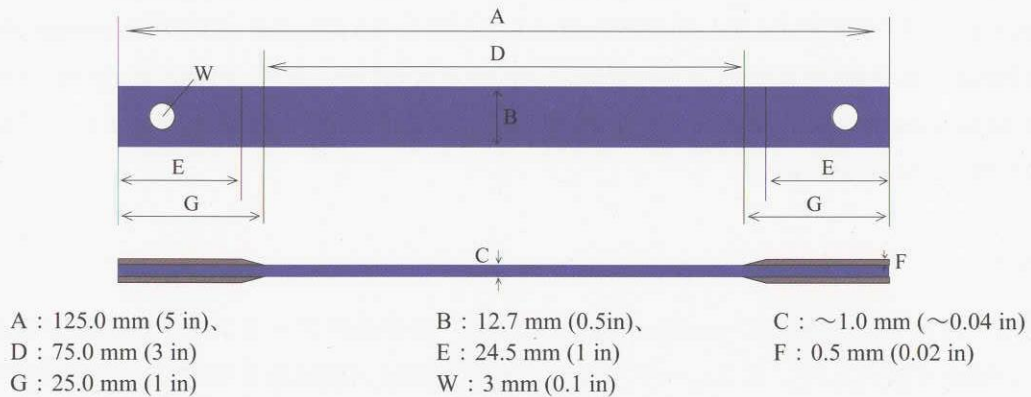


Fig.1 Tensile specimen for thinner adhesive film less than 1.0mm-thick

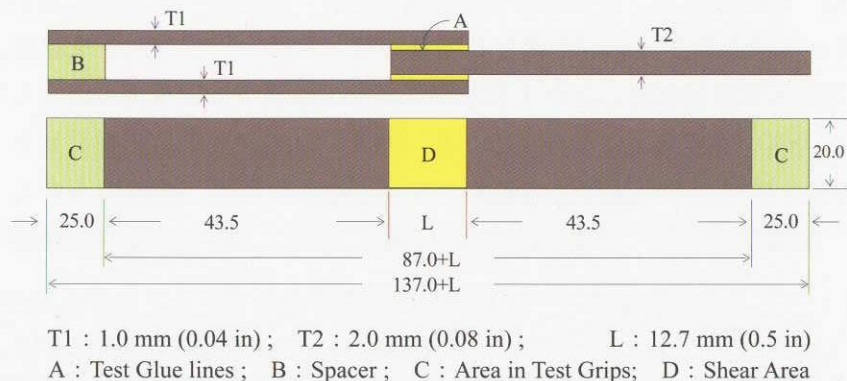


Fig.2 Double-lap specimen for shear performance testing of adhesive film (mm)

2.2 引張モードI破壊力学的特性評価

CFRP 積層材とアルミライナ間の接着構造 (アルミ-フィルム接着剤-CFRP) を用いて単純引張モード I 破壊力学的特性を評価することは困難なため、下記に示すようにアルミ接着構造 (アルミ-フィルム接着剤-アルミ) と CFRP 接着構造 (CFRP-フィルム接着剤-CFRP) 別に引張モード I 破壊力学的特性の評価試験を実施した。

2.2.1 アルミ接着構造の引張モード I 破壊靱性値評価

ASTM標準規格試験法 (ASTM D3433-99^[3]) に基づき、複合材タンクの製造工程に適用されているキュア条件に合わせて製作したアルミ接着構造のDCB (Double-Cantilever Beam) 試験用供試体を図 3 に示す。

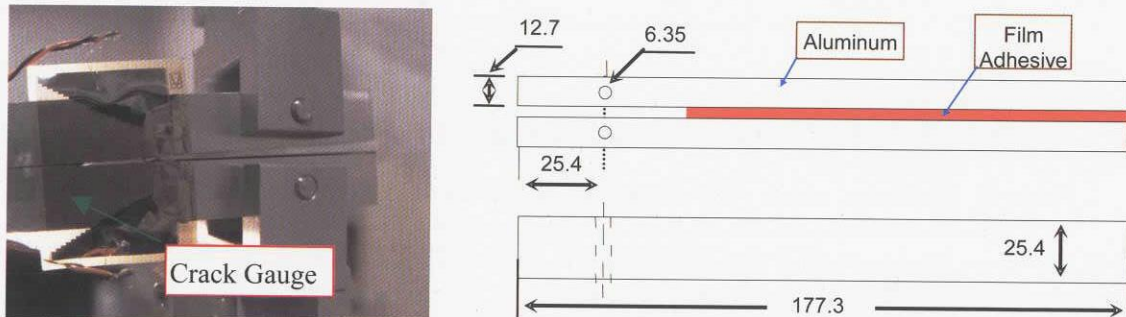


Fig.3 Mode-I fracture strength measurement of Aluminum-AF163-2K bond joint (mm)

2.2.2 CFRP 接着構造の引張モード I 破壊エネルギー評価

本試験はASTM標準規格試験法 (ASTM D5041-98^[4]) に基づき、図 4 に示すようにCFRP接着構造に圧縮荷重を負荷することによって引張モードI破壊エネルギーを評価する試験である。CFRP被着材に高靱性を持つ東邦レーヨンの#133 樹脂と中弾性・高強度のBESFIGHT/IM600 炭素繊維を組合せたQ-133 のCFRP積層板 (2.54mm厚) を用いた。

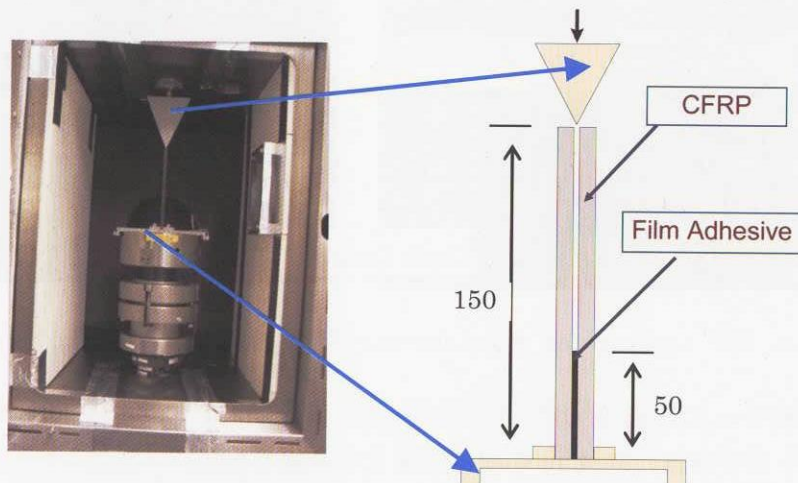


Fig.4 Mode-I fracture energy measurement of CFRP-AF163-2K bond joint (mm)

2.3 せん断モード II 破壊力学的評価

2.2 項と同じように、CFRP複合材とアルミライナ間の接着構造 (アルミ-フィルム接着剤-CFRP) を用いて単純せん断モードII破壊力学的特性を評価することは困難なため、アルミ接着構造 (アルミ-フィルム接着剤-アルミ) とCFRP接着構造 (CFRP-フィルム接着剤-CFRP) 別にせん断モードII破壊力学的特性の評価試験を実施した。JIS規格試験法 (JIS K 7086^[5]) に基づき、図 5 に示すような ENF (End-Notched Flexure) 試験用供試体を用いる。図 5 に示すアルミ接着構造とCFRP接着構造別のENF供試体の寸法を表 1 に示す。また図 6 に二つの接着構造に対する評価試験の写真イメージを示す。

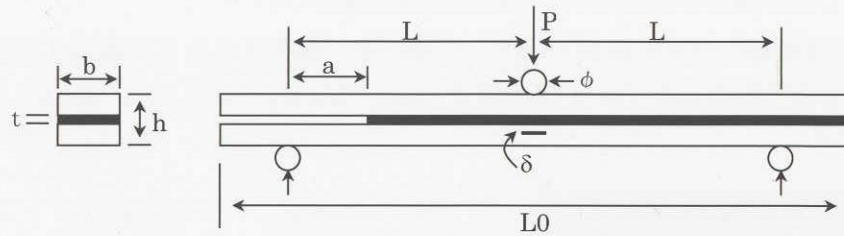


Fig.5 Mode-II fracture strength measurement adhesively-bonded joints

Table 1 Specimen sizes for Aluminum-AF163-2K and CFRP-AF163-2K bond joints

寸法項目	アルミ接着構造 ENF 供試体寸法 (mm)	CFRP 接着構造 ENF 供試体寸法 (mm)
L	50.0	50.0
L0	-----	140.0±0.5
A	25.0	20.0
B	16.0	20.0
T	0.2	0.2
H	19.0	3.2

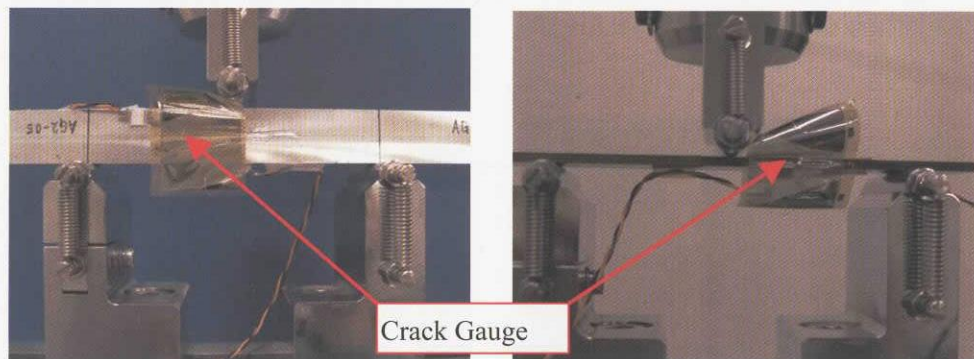


Fig.6 ENF testing for Aluminum-AF163-2K and CFRP-AF163-2K bond joints

これらのせん断モード II 破壊力学的評価試験に関して、平成 15 年度には試験の実施を行い、試験結果の取りまとめと評価は平成 16 年度に実施する計画である。

3. 評価試験の結果について

3.1 複合材タンクの製造キュア条件に合わせるフィルム接着剤 AF163-2K 単体の材料特性

3.1.1 フィルム接着剤 AF163-2K 単体の引張特性評価結果

図 1 に示す引張試験用供試体を用いて、常温と LNG 温度で 0.5mm 厚のフィルム接着剤 AF163-2K 単体の引張試験を実施した。本試験により得られた 0.5mm 厚フィルム接着剤の引張弾性率、ポアソン比及びせん断弾性係数、また引張破断強度 (破断応力と破断歪) を表 2 に示す。これらの結果から、下記の結論が得られた。

- ① LNG 温度で 0.5mm 厚フィルム接着剤の引張弾性率は常温結果の約 3 倍である

- ② LNG 温度で 0.5mm 厚フィルム接着剤のせん断弾性係数も常温結果の約 3 倍である
- ③ LNG 温度で 0.5mm 厚フィルム接着剤の引張破断応力強度は常温の結果より約 70%増に対し、引張破断歪強度は常温結果の約 14%となった

Table 2 Tensile performance of 0.5mm-thick AF163-2K adhesive film

評価項目	常温	LNG温度
弾性率 (GPa)	2.87±0.15	8.60±0.17
ポアソン比	0.40±0.02	0.46±0.01
せん断弾性係数 (GPa)	1.02±0.06	2.95±0.08
引張破断応力 (MPa)	44.5±1.3	76.0±12.6
引張破断歪 ($\mu, \times 10^4$)	7.5±2.1	1.0±0.2

3.1.2 フィルム接着剤 AF163-2K 単体のダブルラップせん断試験結果

図 2 に示すダブルラップ供試体を用いて、0.2mm 厚フィルム接着剤 AF163-2K のせん断破断強度を評価した。得られた評価試験の結果をまとめて表 3 に示す。ダブルラップ供試体全体の破断伸び（アルミの伸びも含めている）と、画像センサーを用いて測定したフィルム接着剤だけのせん断伸び結果も示している。これらの結果から、LNG 温度で 0.2mm フィルム接着剤のせん断破断強度は常温の結果より僅かに増加したこと、せん断破断伸びの方はほとんどないことも判明した。

Table 3 Shear performance of AF163-2K adhesive film in 0.2mm bond thickness

評価項目	常温	LNG温度
せん断破断強度 (MPa)	25.70±1.84	27.50±0.31
供試体全体破断伸び (mm)	8.73±0.12	1.19±0.11
接着エリア破断伸び (mm)	0.32±0.01	~0.10

3.2 引張モード I 破壊力学的特性

3.2.1 アルミ接着構造の引張モード I 破壊靱性値

0.2mm 厚フィルム接着剤を用いるアルミ接着構造の引張モード I 破壊靱性値を評価するため、図 3 に示す DCB 試験用供試体を用いて、常温と LNG 温度でそれぞれ 5 本の評価試験を実施した。ASTM 規格に基づき算出したアルミ接着構造の破壊靱性値を表 4 に示す。これらの結果から、LNG 温度でアルミ接着構造の引張モード I 破壊靱性値は常温での結果の約半分となったことが判明した。

Table 4 Tensile Mode-I fracture strength of Aluminum-AF163-2K bond joint

評価項目	常温	LNG温度
アルミ接着構造の破壊靱性値 G_{IC} (J/m ²)	1139.9±99.1	614.1±50.6

3.2.2 CFRP 接着構造の引張モード I 破壊エネルギー

アルミ接着構造の場合と同じく 0.2mm 厚フィルム接着剤を用いて、CFRP 接着構造の引張モード I 破壊エネルギーを評価するため、図 4 に示す圧縮荷重の負荷試験を常温 4 本と LNG 温度 3 本でそれぞれ実施した。ASTM 規格に基づいて得られた CFRP 接着構造の引張モード I 破壊エネルギーを表 5 に示す。これらの結果から、LNG 温度で CFRP 接着構造の圧縮試験による引張モード I 破壊エネルギーは常温での結果の 1/5 以下であることが判明した。

Table 5 Tensile Mode-I rupture energy of CFRP-AF163-2K bond joint

評価項目	常温	LNG温度
CFRP接着構造の 引張モードI破壊エネルギー (Nm)	10.98±0.88	2.14±0.16

温度低下に伴う CFRP の熱変形はほとんどないから、フィルム接着剤との熱変形差がアルミ/フィルム接着剤間の熱変形差より大きいため、上記の二つ接着構造において引張モード I の破壊挙動が異なることにつないだと考えられる。

4. まとめ

LNG 推進系飛行実証プロジェクトのアルミライナ付き CFRP 複合材タンク開発において、実際に使用されるフィルム接着剤を対象に推進薬タンクの運用温度範囲でフィルム接着剤 AF163-2K 単体の力学的特性及びアルミ/CFRP 間接着構造の破壊力学的特性の温度依存性を評価した。得られた結論を下記に示す。

- ・ 極低温までの温度範囲でフィルム接着剤の引張特性（弾性係数と破断強度）は大きく変化する
- ・ 極低温までの温度範囲でフィルム接着剤のせん断破断応力はほとんど変化しないが、せん断破断歪が大きく変化する
- ・ LNG 温度でアルミ接着構造の引張モード I 破壊靱性値は常温結果の約半分までに低下する
- ・ LNG 温度で CFRP 接着構造の引張モード I 破壊エネルギーは常温結果の約 1/5 までに低下する

これらの評価試験結果を参考値として複合材タンク全体の設計計算への反映ができ、また不具合等が発生する場合の原因究明にも役に立つと考える。

[参考文献]

- ① ASTM 標準規格試験法 (ASTM D882-01) Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting
- ② ASTM 標準規格試験法 (ASTM D3528-96) Standard Test Method for Strength Properties of Double-Lap Shear Adhesive Joints By Tension Loading
- ③ ASTM 標準規格試験法 (ASTM D3433-99) Standard Test Method for Fracture Strength in Cleavage of Adhesives in Bonded Metal Joints
- ④ ASTM 標準規格試験法 (ASTM D5041-98) Standard Test Method for Fracture Strength in Cleavage of Adhesives in Bonded Joints
- ⑤ JIS 規格試験法 (JIS K 7086 : 炭素繊維強化プラスチックの層間破壊じん (靱) 性試験方法)