

# 黒鉛ジグの熱可塑成形／融着プロセスによる 液晶フィルムライナ製造法の開発

宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部  
教授 佐藤 英一  
(平成 18 年度研究開発助成 AF-2006018)

キーワード：複合材タンク、液晶フィルム、ライナ、黒鉛ジグ

## 1. 研究の目的と背景

ロケットをはじめ、宇宙輸送機の更なる高性能化を追求する上で、機体構造質量の軽量化は常に求められる命題であり、特に構造質量の大半を占める推進剤のタンクの軽量化は重要な技術課題となる。

タンク構造の軽量化を実現するための有効な方法として、今まで使われてきたアルミ、チタン合金等の金属材料と比較し、比強度、比剛性に優れた CFRP の適用した複合材タンクがこれまでも多く検討されてきた。

複合材タンクの大規模な開発例として、1990 年代には DC-XA プロジェクトで、1990 年代後半から 2001 年に掛けては X-33 プロジェクトでそれぞれ液体水素 (LH2) 用複合材タンクの開発が実施されてきた。これらの開発を通して、CFRP に発生するマイクロクラックからの LH2 の漏洩、極低温環境に伴う接着強度の低下といった問題の解決が非常に難しいことが分かってきた。特に CFRP のマイクロクラックについては炭素繊維とエポキシ樹脂の線膨張率差に起因して発生する現象であり、CFRP を使用する限り、抜本的な対策を得ることは難しい。

そこでわれわれはマイクロクラックからの漏洩を防ぐため、ガス透過性の低い樹脂ライナ付き複合材タンクコンセプトを採用し、ISAS/JAXA で試験中である再使用ロケット実験機 (RVT) への搭載を目標としたタンクを開発中である。

液晶フィルムは、ポリマフィルムの中で水素透過性が非常に小さく、ライナ材に適している。本研究では、液晶フィルムの熱可塑成型／融着プロセスジグとして、黒鉛製組み立て式のジグを製造、液晶フィルムライナ製造のフィージビリティを検証する。

## 2. 樹脂ライナ複合材タンクコンセプト

液体水素等の極低温流体を貯蔵するための複合材タンク形式には図 1 に示すように気密層であるライナの有無により大別することが出来る。

前述の DC-XA、X-33 等では CFRP そのものに耐圧及び気密性能を期待したライナの無い複合材タ

ンクであったが、マイクロクラックの問題を解決することが出来なかった。しかしながら、CFRP の成形方法を見直すことにより、CFRP からの漏洩を許容範囲内に抑えるタンク構造の開発が米国で進められている。

一方でライナ付き複合材タンクはライナと CFRP により気密と耐圧機能を分けた航空宇宙用の高圧容器としては一般的な構造である。ライナとして主にアルミ、チタン合金が使用されているが、極低温状態で使用する場合には、接着剤や樹脂の脆化、金属材料と CFRP との間で発生する熱応力によるライナ/CFRP 間の剥離の問題も指摘されている。

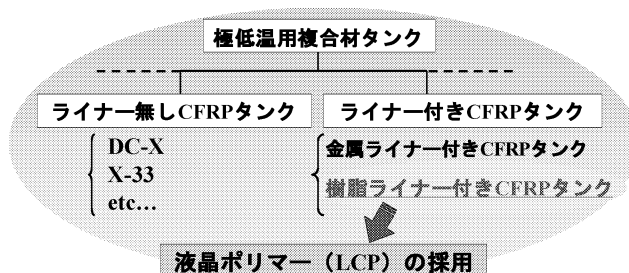


図1 極低温複合材タンクの分類

樹脂ライナについても同様に CFRP との熱応力が問題となるが、今回採用した液晶ポリマ (LCP) フィルムは熱膨張率が非常に小さく、CFRP との熱応力が小さくできる。また、LCP はガスバリア性も非常に良いため、樹脂ライナ材に適している。

ところが、極低温では接着剤層がリークパスとなるため接着構造は不可で、熱可塑成型プロセス (300℃、通常のポリマ材は使用不可) にて同時に融着し、一体構造とする必要がある。

我々は、ポリイミド内殻方式とって、耐熱温度の高いポリイミド樹脂複合材で半球状の内殻を製造し、その内側に液晶フィルムを融着させるプロセスを検討した。しかし、このプロセスは、より大型のタンクには適用が難しいことが判明してきたため、今後、新たな液晶フィルムの熱可塑成型／融着

プロセスを開発する必要がある。

そこで本研究では、熱可塑性成型/融着プロセスのジグとして、熱膨張率の小さい黒鉛素材に注目し、黒鉛製組み立て式のジグによるライナ製造法を開発することとした。

### 3. RVT 用極低温燃料タンクの開発

ISAS/JAXA で実施中の再使用ロケット実験機 (RVT) で必要となる液体水素用タンクを、樹脂ライナ複合材タンクコンセプトにより開発中である。図2に RVT の全体図を示す。

液体水素用複合材タンクに対する要求は容量 20 リットル、常用圧力 2.3MPa、使用温度-253℃ (液体水素温度) である。この要求に対して、常温、液体窒素、液体水素で実施する耐圧試験圧力を常用圧力の 5/3 倍である 3.8MPa、最大破壊圧力を常用圧力の 2 倍である 4.6MPa と設定し、設計を行った。



図2 再使用型ロケット実験機 (RVT)

表1 設計要求

容量	220 リットル
最大使用圧力	2.3MPa
試験圧力	3.8 MPa
設計破壊圧力	4.6 MPa
使用温度	-253℃

## 4. 複合材タンクの設計

### 4.1 基本設計/製造プロセス

本タンクの構造は液体水素及びヘリウムガスの透過を防ぐライナ、内圧等の荷重に耐荷する耐圧層、及び燃料の注排液、加圧等に必要となる配管とのインターフェース部となる口金部から構成される。

ライナ材料として、LCP (Vecster FA) フィルム、

耐圧層材料として CFRP (IM600/#112)、口金材料としてチタン合金 (Ti-6Al-4V) を使用した。タンク構造概要を図3に示す。

LCP は熱可塑性プラスチックであるため、フィルム状の LCP をタンク形状に賦形し、融着させることでピンホールのないライナを成形することが出来る。

また、チタン合金製口金とライナとの接合も LCP の融着により実施した。口金及びライナの外表面には、フィルム接着剤 (AF163-2K) を使用し接着及び CFRP の成形を実施した。CFRP 成形はプリプレグをレイアップする実績のある方法を採用した。タンク上下のドーム部分については曲面への賦形性を考慮し fabric 材を、円筒部には軽量化のため円周方向に UD 材追加し、fabric 材と合わせて使用した。

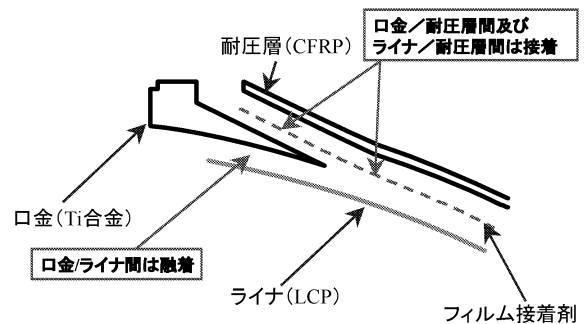


図3 樹脂ライナ付複合材タンク構造

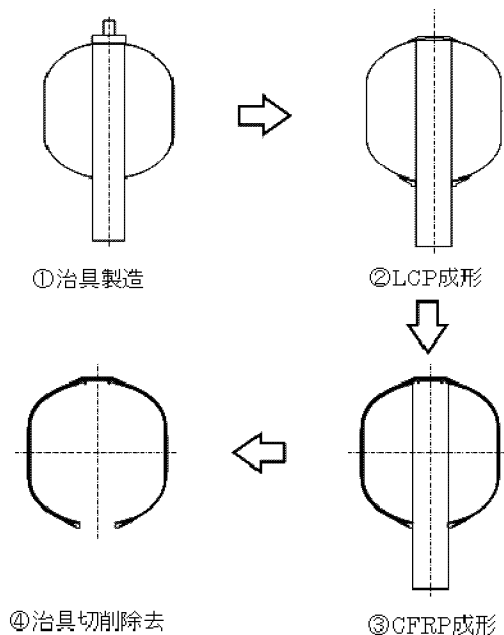


図4 タンク製造プロセス

このような閉構造の一体成形を実現する為に、今回は分解型マンドレルを使用した製造プロセスを採用した。タンク内面形状に合わせた分解型マンド



レルにハンドリング用のシャフトをつけ、LCP、口金の成形、融着の実施、CFRP 成形の後、治具をタンク口金の開口部より取り出して完成させる。製造プロセスの概要を図 4 に示す。図 5 には、黒鉛製組み立て式ジグの写真を示す。(a)は部品 1 枚、(b)は組み立てた内面、(c)は組み立てた全景である。

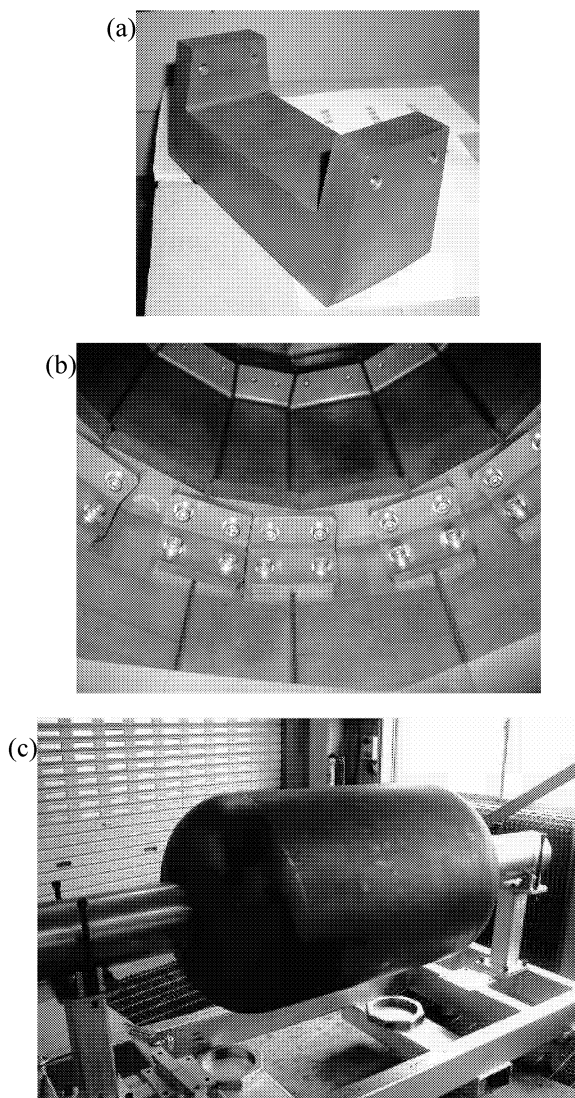


図 5 黒鉛製組み立て式ジグ

RVT からの設計要求に対して、タンクの外径及びドーム形状を決定した。ドーム形状は回転楕円体を基本とし、短径対長径の楕円比を 1:1.4 と設定した。図 6 に RVT 液体水素用複合材タンクのライン仕上げ状態と、タンク完成状態を示す。

タンクには外部とのインターフェース部品として、液体水素注排液配管、加圧配管、温度計用配管、上下差圧液面計配管が配置されており、それぞれチタン合金で製造され、Tig 溶接、EBW を併用してタンク口金と接合している。

タンク内部には、加圧配管に対して SUS 合金製

ディフューザが取り付けられており、タンク内部の加圧配管に対して、ボルト結合されている。

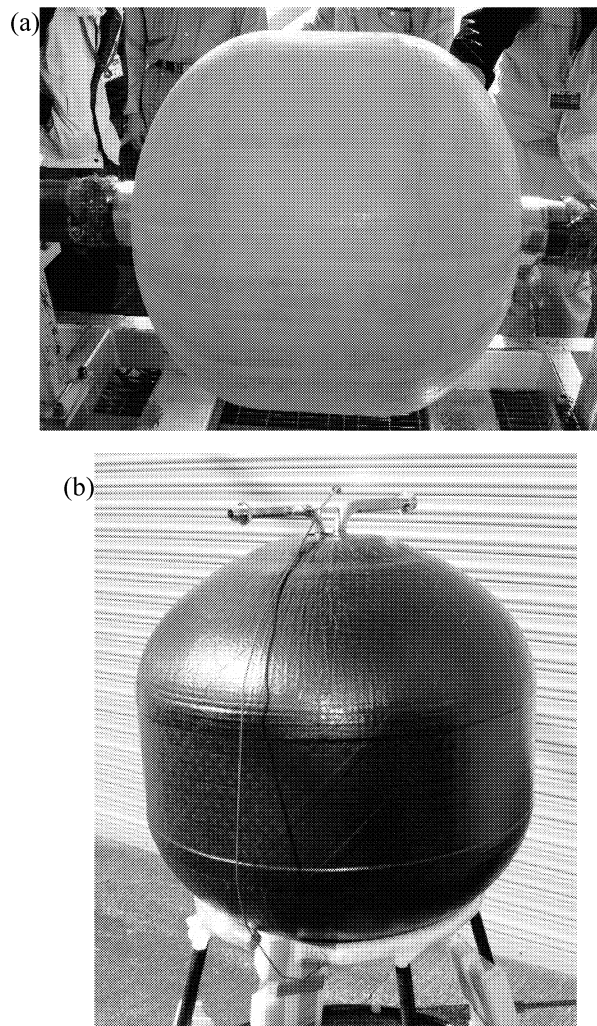


図 6 RVT 用液体水素タンク

#### 4.2 強度設計

静強度検討では CFRP に発生する許容歪を  $4000 \mu$  とした。常温及び液体水素温度環境下で破壊圧力での発生歪が許容歪以下となるよう FEM 解析を実施し、強度上成立することを確認した。表 2 に使用した基本材料の弾性率及び線膨張係数を、図 7 に静強度解析結果を示す。

本液体水素タンクでは燃料系、加圧系の各配管と接続する必要からチタン合金部品を一部使用しているが、金属/CFRP 間の線膨張率の差が大きく、材料が液体水素温度環境下で破壊靱性が低下することが問題となっていた。特に試作時に口金と CFRP の接着層の剥離により、漏洩、破壊に至った事例があり、従来の応力や歪といった材料強度を評定とした設計だけでは十分でないと判断し、破壊力学的設計手法を用いた CFRP とチタン合金の接着部のエネルギー解放率を標定として設計に追加した。

表 2 複合材タンク材料の物性

	弾性率 (MPa)	線膨張係数 ( $\mu / ^\circ\text{C}$ )
IM600/ # 112 (QI)	60.1	5.0
LCP	4.0	-3.0
Ti-6Al-4V	116.5	8.8

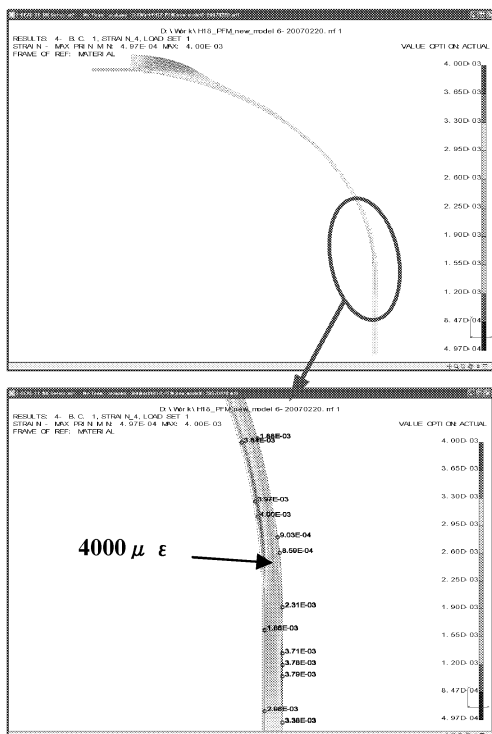


図 7 静強度解析結果

エネルギー解放率の許容値設定にあたり、タンク口金部構造を模擬した DCB 試験結果から、最小エネルギー解放率に着目し、更にその半分の値を液体水素温度での許容値と定めた。その結果、今回の設計では許容エネルギー解放率を  $200\text{J}/\text{m}^2$  と設定した。

本タンクではタンク上部及び下部にそれぞれタン合金部品が配置されているが、接着部の両端、及び口金の板厚が不連続に変化する部分について FEM 解析を実施した。

液体水素温度環境下で最小破壊圧力の解析結果から、J 積分によりエネルギー解放率を推算した結果、標定とした全ての箇所での亀裂先端のエネルギー解放率が DCB 試験結果から設定した許容値より低い値となっており、本タンク構造の設計が破壊力学的観点から成立していることを確認した。一例としてタンク上部口金の解析結果を図 8 に示す。

## 5. まとめ

極低温推進剤タンクの複合材料の適用は、機体重

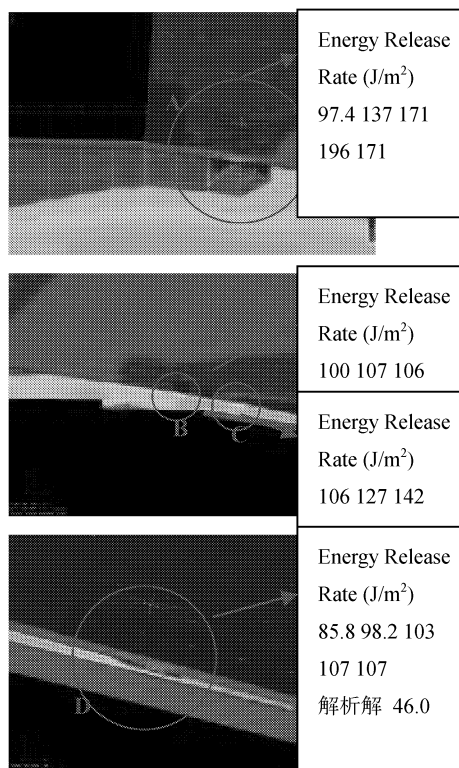


図 9 上部口金部標定箇所のエネルギー解放率推算結果

量の大幅な軽量化が期待できるキーテクノロジーであり、我々はガスバリア性の高い液晶ポリマーを用いた複合材タンクの設計・製造プロセスの確立を目指している。本研究の成果として、液晶フィルムライナ複合材タンクの最大の新規開発項目である、液晶フィルムの融着一体型ライナの製造プロセスが確立された。これにより、RVT 搭載型タンクの試作に進み、試作タンクの LH2 充填・加圧サイクル試験を実施し、製造プロセスの成立性と構造上の成立性を確認した。今後 H2 のリーク量等を評価し、RVT への搭載と試験飛行に進む計画である。

## 謝辞

この研究の一部は天田金属加工機械技術振興財団の平成 18 年度研究助成により実施できたことを記し、援助下さった財団および関係各位に深甚なる謝意を表します。

## 文献

- 1) 荒川陽司、佐藤英一、竹内伸介、複合材タンクの開発状況、第 23 回宇宙構造・材料シンポジウム (ISAS/JAXA) (2007/11)
- 2) 高橋孝平、垣本勇希、佐藤英一、北菌幸一、液体水素タンク用 CFRP 接合部の極低温強度評価、2008 年日本金属学会春期講演大会 (2008/3)