

## 軽量構体パネルの研究

## Research on light weight sandwich panels

マテリアル・機構技術グループ

森 一之、島村 宏之、石澤 淳一郎、南 伸太朗、馬場 尚子

Mechanical and Materials Engineering Group

K.Mori, H.Shimamura, J.Ishizawa, S.Minami, N.Baba

## Abstract

Aluminum honeycomb sandwich panels are commonly used as spacecraft structures. The panels have a high specific rigidity, but are expensive. We have developed light-weight, low-cost sandwich panels using integral molding of CFRP-prepreg and light weight plastic foam. This panel has good workability, and thus higher design flexibility. In this paper, we report recent research results on the light weight sandwich panel, including simulation analysis and fracture tests. Analytical and experimental results show that further improvement in fracture strength of the panel will be expected.

## 1. はじめに

人工衛星を始めとする宇宙機の構体には、CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastics) またはアルミニウム合金 (Al) をスキン材、Al ハニカムをコア材とする Al ハニカムサンドイッチパネルが多く使用されている。Al ハニカムサンドイッチパネルは優れた比強度、比剛性を有するが、一方で製造加工に要するコストが高い。

そこで我々は、平成 12 年度から、宇宙機の軽量化、低コスト化を目的として、スキン材に CFRP、コア材に低密度高分子発泡材であるロハセル (ポリメタクリルイミド発泡材) を使用した軽量構体パネルの研究開発を実施している。通常のサンドイッチパネルが、別々に製作されたスキン材及びコア材を接着することにより製造されるのに対し、本軽量構体パネルは、スキン材となる CFRP プリプレグに含まれる樹脂が多孔質である発泡コア材に含浸することによる一体成形が可能である。そのため、軽量構体パネルは、従来のサンドイッチパネルと比較し、省工数、曲面等複雑形状の成形等が可能の他、コア材の切削性が良く、加工性に優れるという特長をもつ (Figure 1 参照)。なお、H-2A ロケットの段間部 (Figure 2 参照) は、本軽量構体パネルと同様の構成となっている。しかし、本軽量構体パネルは人工衛星及び宇宙ステーション等への適用を想定しており、H-2A ロケットの段間部と使用環境及び設計寿命が異なる。そのため、本軽量構体パネルには衛星及び宇宙ステーション等で要求される耐宇宙環境性が必要である。また、様々なコンポーネントを据え付けるため、インサートブロック等局所で発生する不均一な荷重集中への対策が必要である。

これまでの研究において、スキン材、コア材単体及びその接合界面の材料特性、パネル接合用インサートの機械的特性、電子線、紫外線、原子状酸素等に対する耐宇宙環境性の評価、パネル一体成形プロセスの最適化、さらに信頼性確保のための非破壊検査方法の選定とその検出限界評価を実施しており、軽量構体パネルの宇宙適用に向け、着実な成果を挙げている。

Sandwich structure consists of CFRP skin and Rohacell core

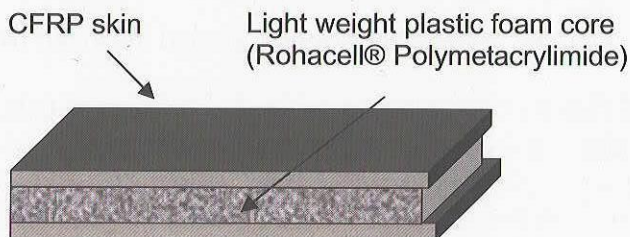


Figure 1 Schematic of the light weight sandwich panel

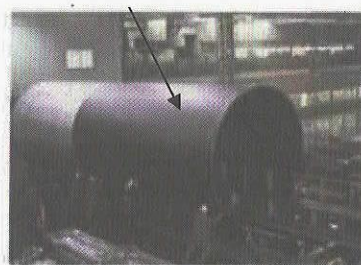


Figure 2 Interstage of H-2A launch vehicle

## 2. 研究の概要

平成 15 年度の研究で実施した 50kg 級小型衛星規模構体供試体の振動試験において、振動による負荷が最大となる底面パネルに損傷が生じた。損傷はインサートブロック周囲において、CFRP スキン層間剥離に至る状態であった。宇宙機適用のために、まず発生する破壊形態及び破壊強度を求め、その上で強度向上若しくは荷重分散等の改善が必要である。平成 16 年度は、以下の項目について研究を実施した。

### (1) インサート部周辺の数学モデルによる第 1 次解析

軽量構体パネル同士の接合、また軽量構体パネルへのペイロード固定に用いるインサート部周辺を数学モデル化し、荷重解析を実施した。

### (2) インサート部周辺の破壊評価試験

インサート部周辺に対し、曲げモードでの破壊評価試験を実施した。

### (3) インサート部周辺の数学モデルによる事後解析及び強度向上策の検討

上記 (1) 及び (2) の結果を比較評価し、数学モデルの検証を実施した。また、見直した数学モデル等を用い、インサート部強度向上の改善策を検討した。

## 3. 成果の概要

### (1) インサート部周辺の数学モデルによる第 1 次解析

軽量構体パネルのインサートブロック部周辺の破壊進展形態を推定するため、3 点曲げ試験を想定した当該部の数学モデルを作成した。この数学モデルは、低密度発泡材製コア材、CFRP 製スキン材、及び Al 合金製インサートブロックの材料特性値を用い、破壊評価試験に用いる供試体と同一寸法とした。CFRP スキンの物性値として既知なのは繊維と繊維直角方向の物性値のみであり、板厚方向のヤング率は繊維直角方向と等方性であると仮定した。

数学モデルの概略を Figure 3 に示す。数学モデルは、板厚方向及び長手方向にメッシュ分割した 2 次元モデルとした。破壊評価を行う 3 点曲げ試験ではインサートブロックをはさんで左右対称の挙動を示すと考えられるため、ここではインサートブロックの中央までをモデル化したハーフモデルで解析を行った。使用コードは、NASTRAN Ver. 2001 である。拘束条件は供試体が 3 点曲げに供されることからインサートブロックのない端部の下端で単純支持とし、もう一方の端部は対称条件で拘束した。荷重条件は、供試体中央部(数学モデルでは対称条件で拘束されている面)の上方から下方へ 1kgf の集中荷重を負荷した。

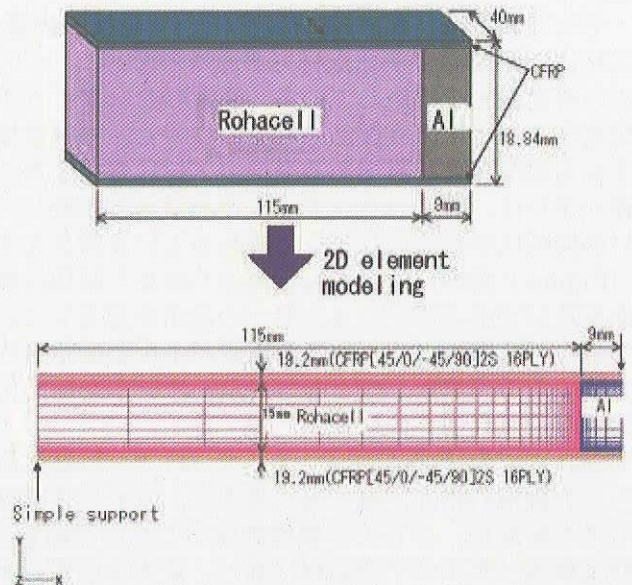


Figure 3 Mathematical model around the insert block

3 点曲げとなるよう荷重を負荷した第 1 次解析の結果、CFRP スキンはロハセルコアの約 100 倍程度の応力が発生した。しかし、CFRP スキンの引張り強度、せん断強度とも、ロハセルコアの 1000 倍以上であることを考慮すると、3 点曲げ試験にて CFRP スキンがロハセルコアより先に破壊することは考えにくい。そこで、ロハセルコアで破壊が進行するとし、解析を実施した。ここで、破壊進展は、最大主ひずみが発生した要素に沿って進行すると仮定した。解析の結果、破壊はインサートブロック/CFRP スキン/ロハセルコア境界を起点とし、約 45° 方向に進む傾向がみられた。

## (2) インサート部周辺の破壊評価試験

インサート部周辺の破壊形態を識別するための破壊形態確認試験と、破壊進展過程を評価するための破壊進展状況評価試験とに分けて実施した。

破壊形態確認として3点曲げ試験を、破壊進展状況評価として吊り下げ型の片持ち曲げ試験（静強度試験と繰り返し負荷試験）を行い、インサート部周辺の強度を測定した。Figure 4、Figure 5に、それぞれ3点曲げ試験と片持ち曲げ試験の概略を示す。

静強度試験は、試験片端部上面から下面に向けて荷重を負荷し、そのまま破壊まで荷重を負荷した。また、繰り返し負荷試験では静強度試験において破壊が発生した荷重を基に負荷レベルを設定し、繰り返し負荷を行った。

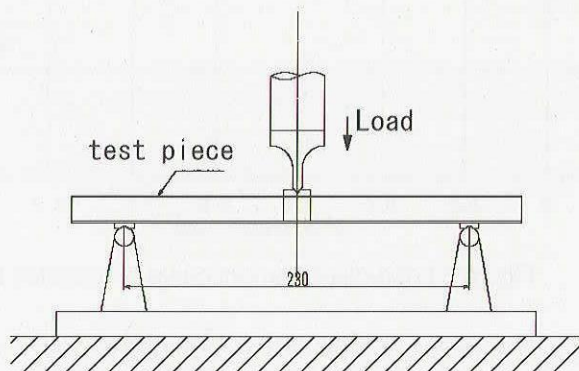


Figure 4 Outline of three-point bending test

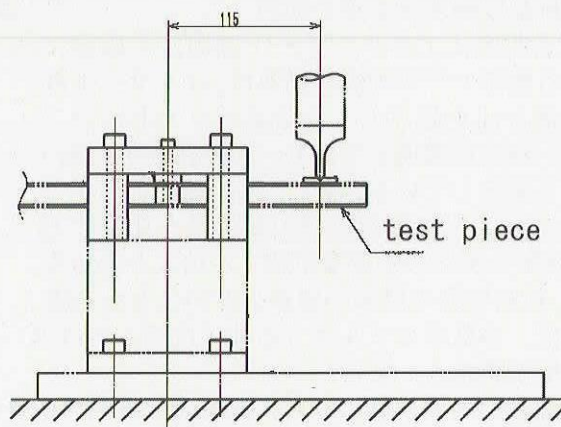


Figure 5 Outline of cantilever bending test

3点曲げ試験では、CFRP スキンに貼り付けたひずみゲージで測定された歪みは十分に小さく、また、異音等の破壊の前兆を示すことも無く、突然破壊に至った。試験後の供試体には、インサートブロック部との接合面を起点としたコアのせん断破壊、及び試験の荷重点と支点の中央部近辺を起点としたコアのせん断破壊という2種類の破壊形態が観察された(Figure 6 参照)。

静強度試験の結果、全ての供試体が約 200~300N 程度において何らかの破壊を示し、その破壊形態として、インサートブロックと CFRP スキンの剥離が観察され、またインサートブロックをはさんで負荷した側と反対側のロハセルコアが破壊するという現象が起こった(Figure 7 参照)。

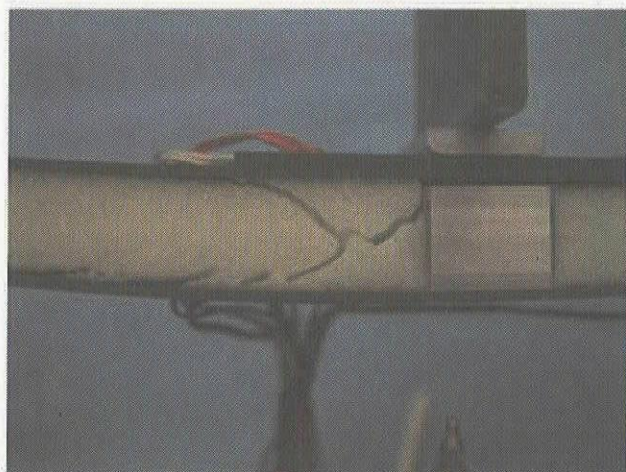


Figure 6 Crack of three-point bending test



Figure 7 Crack of cantilever bending test

繰り返し負荷試験では、インサートとスキンのはがれが初期破壊である。繰り返し負荷試験における荷重-変位図を Figure 8 に示す。初期破壊荷重は、3点曲げ試験、及び静荷重試験とほぼ同じ値となった。このことより、ロハセルコアの破壊荷重がこの試験形態では 200N 程度であることがわかった。

### (3) インサート部周辺の数学モデルによる事後解析及び強度向上策の検討

3点曲げによるインサート部周辺の破壊に関する数学モデルの解析結果は、インサート部との接合面を起点とした破壊がロハセルコア内部へ斜めに進展しており、実験結果の破壊の傾向と類似している。また、試験結果と数学モデルにおける破壊荷重での変形量を比較すると、数学モデルの変形量が約 1.2 倍大きかった。CFRP 材料特性の既知の値が少ないことを考慮すれば、本数学モデルは 3点曲げに関してはほぼ模擬できたといえる。

2種類の破壊形態のうち、荷重点と支点の中央部近辺を起点とした破壊が起きる場合では、インサート部周辺の主ひずみが、供試体の中央部近辺に比べ小さいことが推測される。インサート部周辺の強度が上昇した理由として、インサートとロハセルコア界面に使用する接着剤の回り込みによるインサートとロハセルコア界面の強度増加が考えられる。

一方、片持ち曲げによる破壊形態について、3点曲げで使用したハーフモデルの数学モデルで解析した結果、静強度試験の結果を模擬することができなかった。また、供試体全体を対象とした数学モデルでの解析においても、試験結果のような破壊形態を示さなかった。次に、インサートブロックと CFRP スキンの接着がないと仮定して解析をしたところ、試験結果と同様に荷重を負荷した側と反対のインサート部に最大主ひずみが発生した。この結果より、インサートブロックと CFRP スキンはほとんど接着されていないと推定される。

実際の破壊試験、及び数学モデルでの解析結果との対応より、インサートブロックと CFRP スキン間の接着、または、インサートブロック周辺のロハセルコアの高密度化等により、インサート部周辺の強度を向上させることができると考えられる。

## 4. まとめ

平成 16 年度の軽量構体パネルの研究では、インサート部周辺の数学モデルによる評価、及び破壊評価試験を実施した。その結果、インサート部周辺の曲げに対する挙動を明らかにした。また、数学モデルの事後解析により、インサートブロックとロハセルコア間への接着剤使用、高剛性発泡材の適用により構体の強度向上が期待できることが明確になった。

今後、さらなる軽量化・高強度化、パネル内部への機器の埋め込み等による高機能化を目指して開発を継続していく予定である。

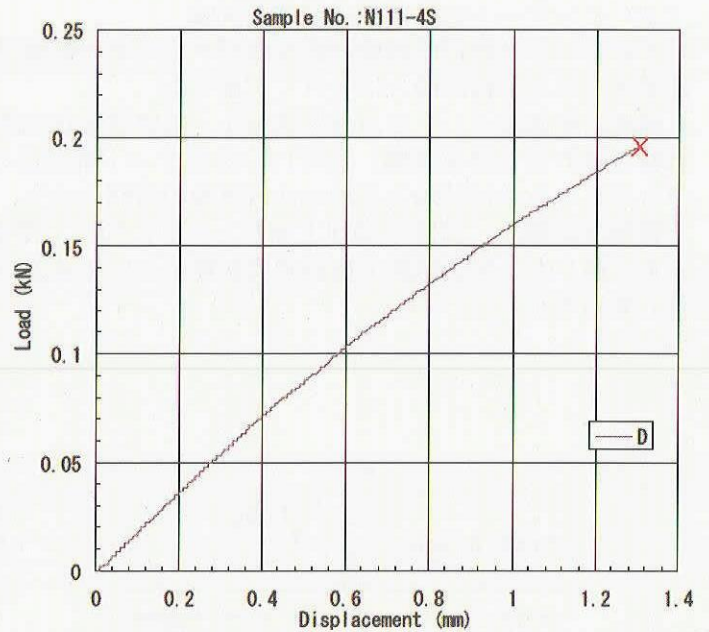


Figure 8 Load-displacement curve of repeated test