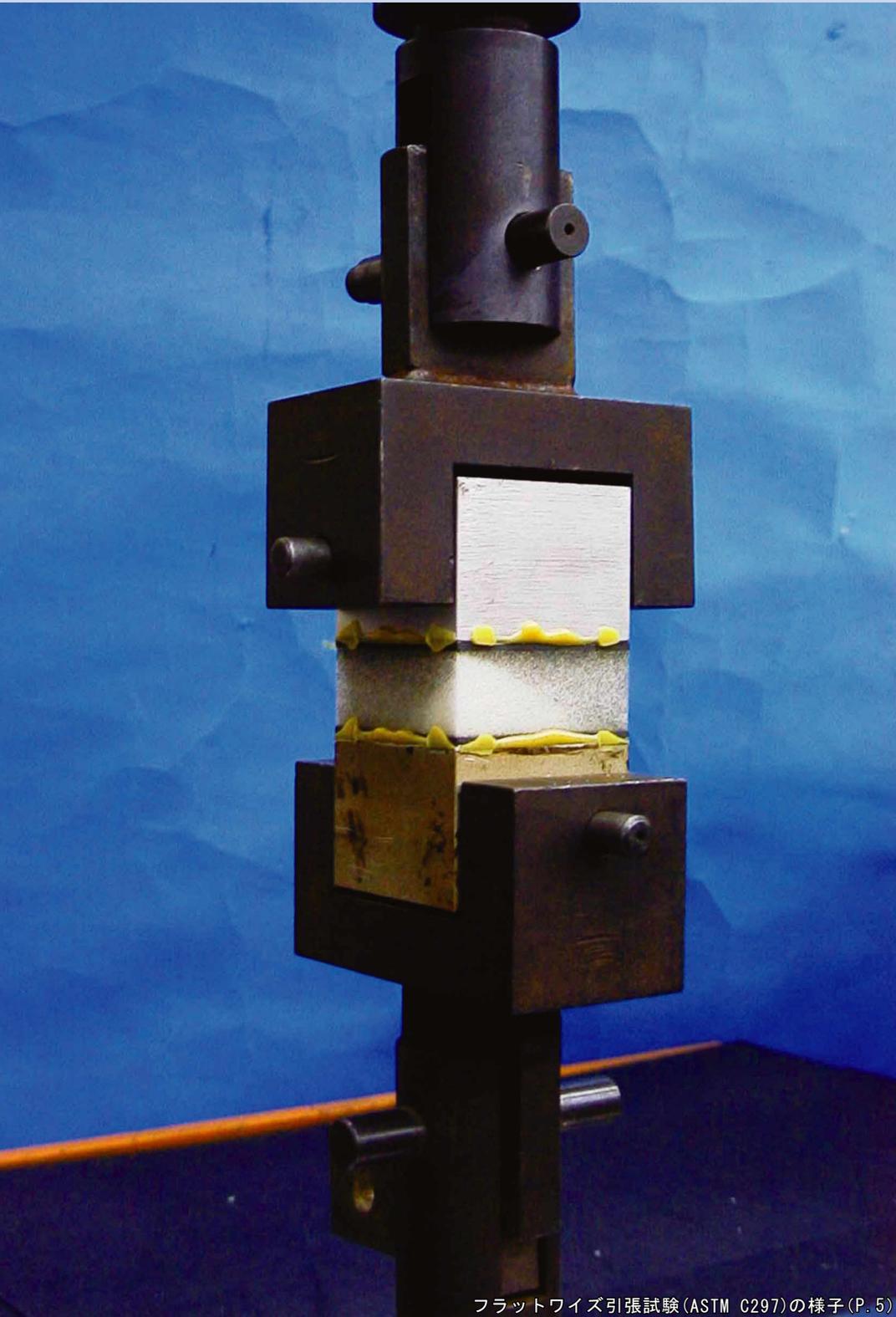


空と宙



2007 | MAR./APR.
隔月刊発行
EVERY OTHER MONTH
ISSN 1349-5577 No. 17



フラットワイズ引張試験 (ASTM G297) の様子 (P. 5)

研究紹介

CFRPで
そらとぶ機体を軽くする

航空機のさらなる軽量化
を目指して

発泡材で
人工衛星を軽くする!?

設備紹介

超音波探傷装置

「そら」の技術を身近に感じて

そらとそら

総合技術研究本部
Institute of Aerospace Technology
<http://www.iat.jaxa.jp/>

17

CFRPでそらとぶ機体を軽くする

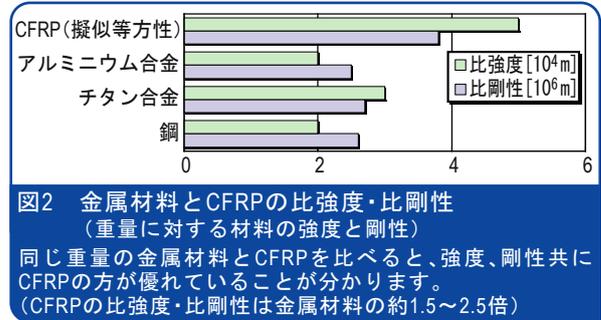
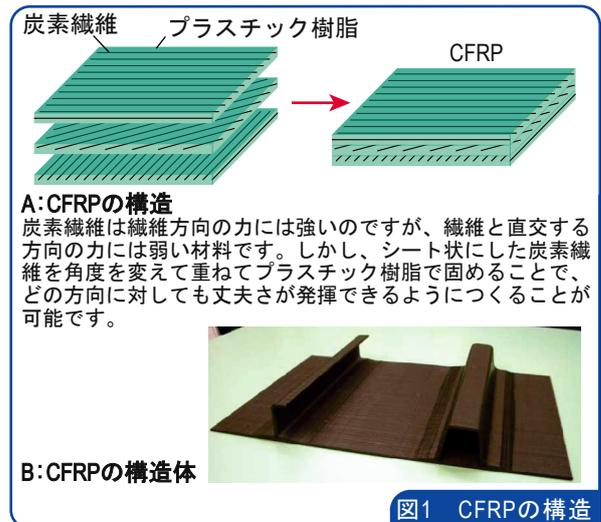
航空機・宇宙機の軽量化

複合材料の航空機・宇宙機への適用

ふたつ以上の材料を組み合わせることで、単一の材料よりも優れた特性を持たせた材料のことを「複合材料」といいます。身近な複合材料に、鉄筋コンクリートがあります。コンクリートは押し力(圧縮)には強いのですが引き力(引っ張り)には弱いため、引っ張りに強い鉄筋を中に組み込むことで、圧縮にも引っ張りにも強い材料を実現しています。

航空宇宙の分野では、「炭素繊維」と「プラスチック樹脂」を組み合わせた「炭素繊維強化プラスチック(CFRP)」と呼ばれる複合材料が主に使われています。CFRPは、航空機・宇宙機の材料には欠かせない「丈夫で軽い」という特長を備えています。シート状にした炭素繊維を、角度を変えて重ねてプラスチック樹脂で固めることで、どの方向にも丈夫な材料や特定の方向にだけ強い材料を自由自在につくることができる非常に優れたものです(図1)。

図2は、航空機材料であるアルミニウム合金(ジュラルミン)やチタン合金とCFRPの丈夫さ(重量に対する強度・剛性※)を比較したグラフです。強度・剛性共にCFRPの方が金属材料より優れているため、CFRPの使用により丈夫さを保ちつつ機体を軽量化することができます。機体の軽量化が図れると、エンジンの馬力や燃料消費を抑えられるため、コストの削減にもなります。現在開発中の最新鋭旅客



機では、全重量の約半分までCFRPなどの複合材料の使用が計画されています。

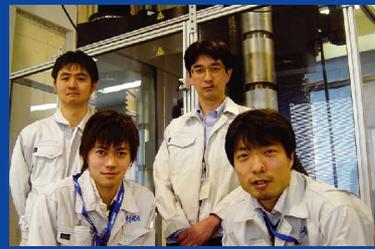
※剛性 曲げやねじりなどの外から加わる力に対し、どれだけ曲がりづらいかを表す値。

CFRPのつくり方

CFRPは、例えば飛行機の翼などの大きな構造をひとつのパーツとして製造することができます(一体成形)。一体成形によりネジなどを使用する結合部が減らせるため、結果として部品数を大幅に減らせ、その分も軽量化を図ることができます。

CFRPの製造法として一般的なものは、シート状にした炭素繊維にプラスチック樹脂を染み込ませた「プリプレグ」を重ね合わせて固める「オートクレーブ成形法」です。プリプレグは樹脂の持つ粘着性によりシールのようにベタベタしているため、重ね合わせるとくっつきます。樹脂には熱を与

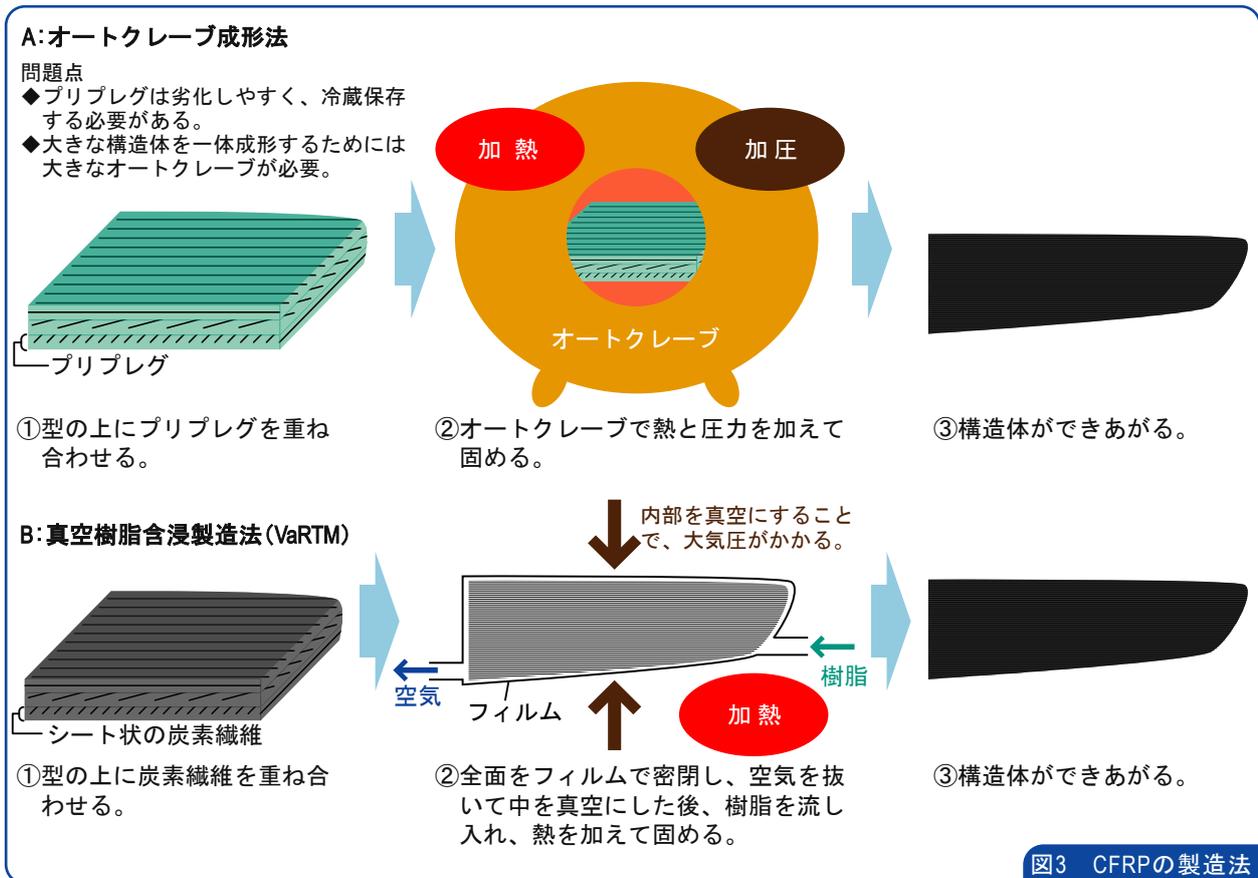
複合材技術開発センター
 (後列左より)加藤哲二、岩堀 豊
 (前列左より)平野義鎮、青木雄一郎



えると固まる性質があるため、「オートクレーブ」と呼ばれる加工炉の中に入れて熱と圧力を加えて固めます。この方法では、プリプレグの維持やオートクレーブの製造などにコストがかかってしまうという問題があります(図3A)。

この問題を解決するために考えられたのが、「真空樹脂

含浸製造法(VaRTM)」です。VaRTMでは、炭素繊維を型の上に積層してからフィルムで密閉し、空気を吸引して内部を真空にした後に樹脂を注入して形を整え、熱を加えて固めます。この方法だと、固めるときに高い圧力を加える必要がないため、設備コストを抑えることができます(図3B)。



CFRPのことをもっと知るために

CFRPIは航空機・宇宙機の軽量化につながる材料として研究が進められ、実際に使用されています。しかし、この材料の全てが明らかになったわけではありません。優秀な材料であるが故に、今後解明しなくてはならないことがたくさんあります。

CFRPIはシート状にした炭素繊維を何層も重ねた構造をしているため、外から大きな荷重が加わると、層と層の間

が剥がれてしまう「層間剥離」という損傷が発生します。層間剥離が起こった部分では強度や剛性が落ちるため、安全を保証しなくてはならない航空機構造において、この損傷は重要視されています。そこで、層間剥離の発生メカニズムを解明するための研究や、層間剥離に対する検査法や修理法の研究も進めています。

(広 報)

航空機のさらなる軽量化を目指して

インテリジェント材料の開発研究

インテリジェント材料

航空機は重力に逆らって空を飛ぶため、できるだけ丈夫で軽いことが望まれます。そのため「丈夫(高強度・高剛性)で軽い」材料を使った構造をしています。丈夫さを保ったままさらなる軽量化を図るためには、「さらに丈夫で軽い材料」か「インテリジェント材料」を使うことが考えられます。

インテリジェント材料とは、材料自体が変化を「感じ」、どう対処するか「考え」、実際に「対応する」機能を持つ

た材料のことです。航空機の軽量化で必要になるのは「感じる機能(計測機能)」です。

計測によって飛行中の航空機の状態を把握できれば、機体設計に反映して「設計の効率化」が図れ、軽量化につなげることができます。旅客機では一回の運行や一定時間ごとに様々な整備を行っています。飛行中も機体の状態を確認できるので「整備の効率化」にもつながるといふ利点もあります。

計測機能をどう持たせるか

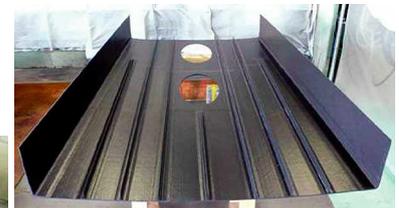
最近の航空機は、軽くて高強度なジュラルミンや、より軽くて丈夫なCFRP(P.1参照)でつくられています。ここでは、CFRPに「ひずみ※」を計測する機能を持たせたインテリジェント材料の研究を紹介します。

計測機能は「光ファイバー」が担います。光ファイバーには「軽くて細い」、「引火性が無い」、「光で計測する」などの特長があります。今回、特に重要視したのは「光で計測する」という点です。航空機の計器類や無線機類などは電気を利用しているため、電気で計測する「ひずみゲージ」や「ピエゾセラミックス」などでは、計測値にノイズが入ってしまう恐れがあります。光ファイバーであれば、そのような問題は起こりません。

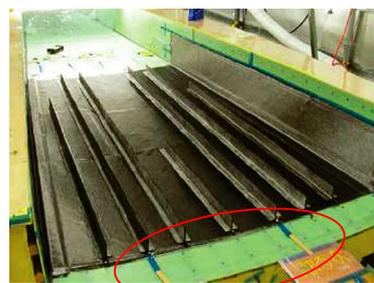
これまでに、光ファイバーを貼り付け、もしくは埋め込んだCFRPに荷重を与える試験を行い、「計測技術」の検



A: 供試体(長さ:1m)
埋め込んだ光ファイバーと表面に貼り付けたひずみゲージが見えています。



B: 供試体(長さ:2m)
(左)樹脂を流す前の状態
埋め込んだ光ファイバーが見えています。
(右)樹脂を流し込んで固めた状態
メンテナンスホールと呼ばれる整備用の窓を加工し、実際の航空機構造に近いものとしています。



光ファイバー

図1 試験で使用した供試体

光ファイバーをCFRPに埋め込み、「計測技術」を検証しました。Bの供試体では、製造中の温度を計測し、「製造工程の管理」についても検証しました。

(左より)
 複合材技術開発センター
 武田真一
 構造技術開発センター
 井川寛隆



証を進めてきました。光ファイバーは「温度」も計測できるため、プリプレグを重ねる際などに中に埋め込むことで製造中の温度を計測し、製造工程が管理で

きるかも検証しました(図1)。

※ひずみ 荷重が加わった時、その材料がどれだけ伸びの変化を起こしたかを表した値。値が大きいほど変化量も大きい。

鮮明に見える光ファイバーが欲しい

光ファイバーには、ファイバー上のいくつかの点で計測する点計測のものや、全ファイバー上で計測する線計測のものがあります。今回は、連続的な変化の流れが把握できるという利点から、線計測光ファイバーを使っています。しかし、広い範囲を計測できる反面、精度は低く、ある一点での大きなひずみを捉えることは困難です。

現在使われている一般的な線計測光ファイバーの「空間分解能(計測精度を表す値: 図2)」は約1mmです。そこで、精度が1000倍高い1mmの空間分解能を持つ線計測光ファイバーの開発を目指した研究も進めてきました(図3)。

今後は、小型機の翼を模擬した長さ6mのCFRPに開発した光ファイバーを貼り付け、「計測技術」および「光ファイバーの性能」を検証する試験を予定しています。(広報)

JAXA総合技術研究本部では、機体の構造同士をつなぐボルトに光ファイバーを埋め込んだインテリジェント材料の研究も行っています。

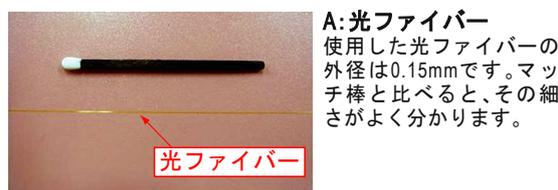


解像度: 低い⇒画像: 不鮮明
 空間分解能: 低い⇒計測結果: 不鮮明
 解像度: 高い⇒画像: 鮮明
 空間分解能: 高い⇒計測結果: 鮮明

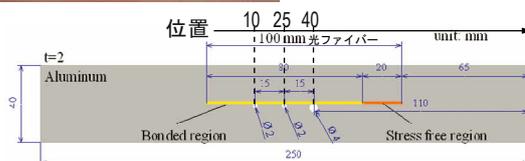
図2 空間分解能のイメージ

空間分解能は画像の解像度と似ています。解像度が高いほど画像が鮮明になるように、空間分解能が高い(単位が小さい)ほど計測結果が鮮明(詳細)になります。

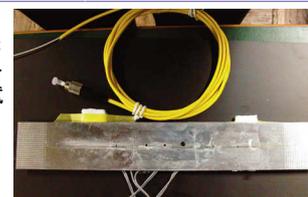
図3 使用した光ファイバーと試験結果



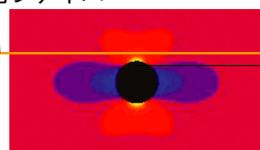
A: 光ファイバー
 使用した光ファイバーの外径は0.15mmです。マッチ棒と比べると、その細さがよく分かります。



B: アルミ試験片
 円孔のある試験片に長さ100mmの光ファイバーを貼り付け、ひずみ計測試験を行いました。

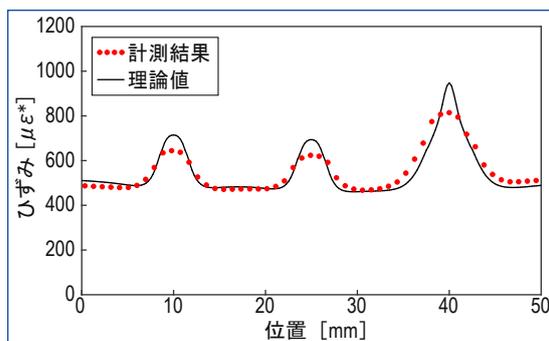


光ファイバー



円孔周りのひずみの解析結果

C: 理論解析結果との比較
 理論解析結果と比較し、その性能を検証しました。



光ファイバーによる計測結果と理論解析結果との比較
 * 1000 $\mu\epsilon$ = 0.1%

発泡材で人工衛星を軽くする!?

軽量構体パネル適用技術の研究

人工衛星を高精度化・高機能化するためには

近年、人工衛星の「高精度化」や「高機能化」の観点から、観測や計測に使う機器類などの搭載量の増加が進んでいます。しかし、ロケットが宇宙空間まで運べる人工衛星などの荷物(ペイロード)の重量は決

まっているため、無制限に増やすことはできません。機器類をできるだけ多く搭載するためには、他の部分で軽量化を図る必要があります。そこで眼を付けたのが、「構体パネル」です。

効率的に軽量化する

「構体パネル」とは人工衛星の壁部分です。構体パネルには様々な機器類がボルトで固定されるため、打ち上げ時の振動によって機器類が振り落とされないよう、ある程度の丈夫さ(強度・剛性)が求められます。

現在の構体パネルは、ハニカム構造※のアルミニウム合金を、軽くて丈夫な材料であるCFRP(P.1参照)もしくはアルミニウム合金板で挟んだサンドイッチ構造のものが主流です。必要な丈夫さは保ちつつ、これよりも軽い構体パネルを目指して、適切な材料を選定して特性評価を行ってきました。

その結果、発泡スチロールのように軽い低密度高分子発泡材(ロハセル®)をCFRPで挟んだサンドイッチ構造をもつ「軽量構体パネル」に行き着きました。同種の構体がH-IIAロケット段間部でも使用されて

います(図1)。ロハセル®は小さな穴が無数に空いた構造をしているため、プリプレグで挟むとプラスチック樹脂が穴の中に入り込みます。この状態で熱を加えて固めれば貼り付くため、接着剤が必要なく、その分も軽量化が図れます(図2)。製造工程も少なくて済むため、製造コストも削減できます。

軽量構体パネルには、機器類を固定するボルト部分に、アルミインサートブロックが入っています。試験

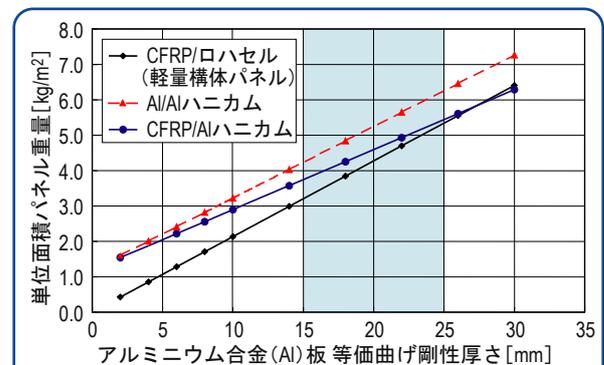
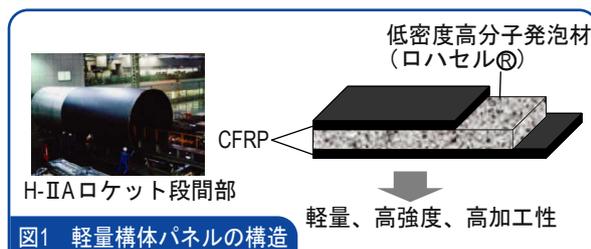


図2 等価剛性を持つ各種構体パネルの単片面積当たりの重量比較
Al板に対し、同じ強度を持たせるために必要な各構体パネルの重さを表した図です。水色の範囲が、人工衛星が実際に必要とする強度の範囲です。この範囲では、軽量構体パネルが最も軽量であることが分かります。

部品・材料・機構技術グループ
 (左より)石澤淳一郎、森一之
 島村宏之



の結果、この部分の強度が足りないことが分りました(図3)。そこで、2005～2006年度にかけ、接着剤の適用や材質の変更などを検討し、インサートブロック部の高強度化の見通しを得ました。今後、小型実

証衛星での宇宙実証を進める予定です。

※ハニカム構造 蜂の巣のように六角形を並べて、強度を保ちつつ軽量化した構造のこと。

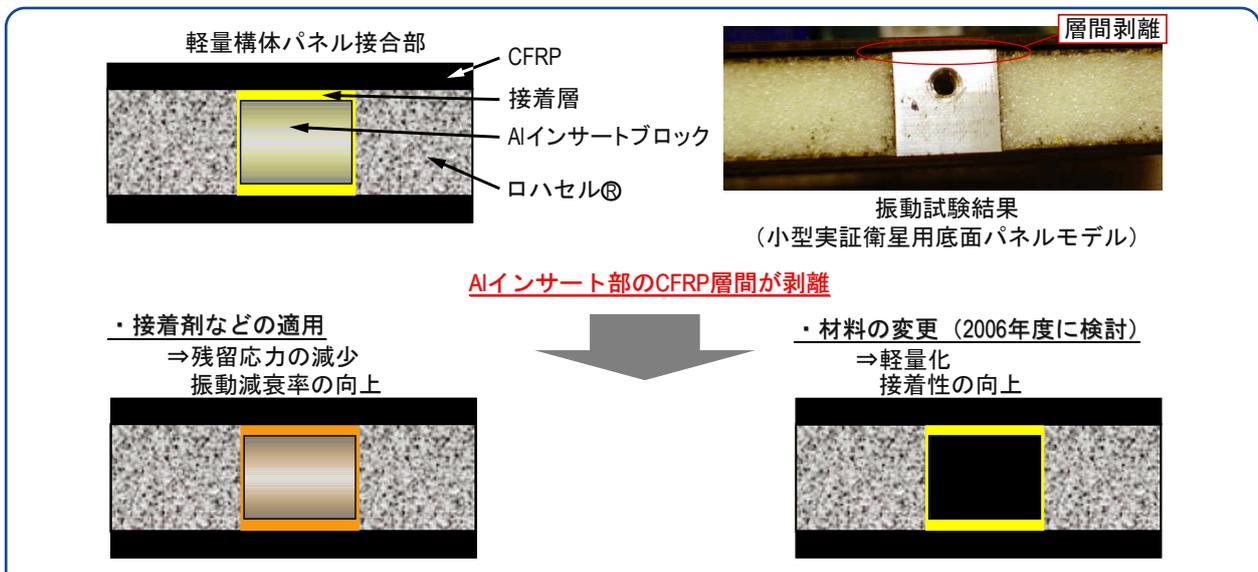


図3 インサートブロック部の試験
 振動試験の結果、このままではAlインサートブロックとCFRPの間が剥離してしまうことが分かったため、改善を図っています。

プラスアルファの技術

現在、軽量構体パネルのコア材であるロハセル®を削り、配管、配線類、センサなどをパネル内部に埋め込む技術の開発を行っています(図4)。この技術が確立され、衛星内部に張り巡らされた推進剤の配管や機器の配線類をパネル内部に収納することができれば、衛星内部の空間をより有効に使用することができます。また、軽量構体パネルは断熱性能が高いため、埋め込んだ配管、配線類を熱から守れるという利点もあります。(広報)

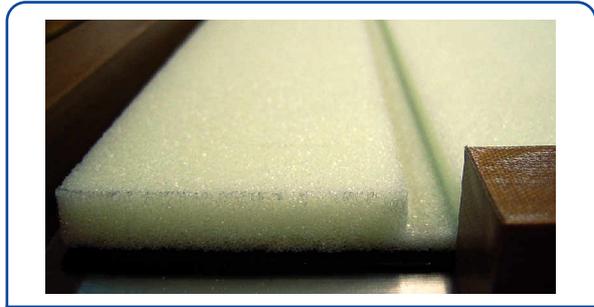


図4 ロハセル®の削り断面
 コア材であるロハセル®を削ることにより、配管や配線類などのパネル内部への収納が可能になります。

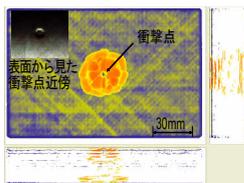
超音波探傷装置

CFRPに外側から衝撃のような荷重が加わると、表面上は特に問題なく見えても、内部で「層間剥離」が起こっている恐れがあります。この見えない内部の様子を、「超音波」を使って観測する装置のひとつに「超音波探傷装置」があります。

超音波は空気中では散逸して計測精度が落ちてしまうため、一般的な超音波探傷装置では、水に沈めた構造体に超音波を当て、その反射時間や強さの違いによって内部の様子を計測します(図1)。



CFRP積層板の探傷試験



探傷結果(衝撃を与えたCFRP積層板中の層間剥離)

探傷方法

何も無ければ、超音波はCFRPの表面を通過し、背面で反射して戻ってきます。層間剥離が起こっていると、その部分で反射するため戻ってくる超音波に時間差や強さの違いが生じ、層間剥離を発見することができます。

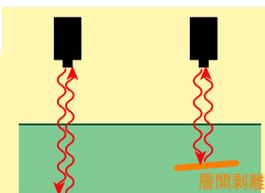
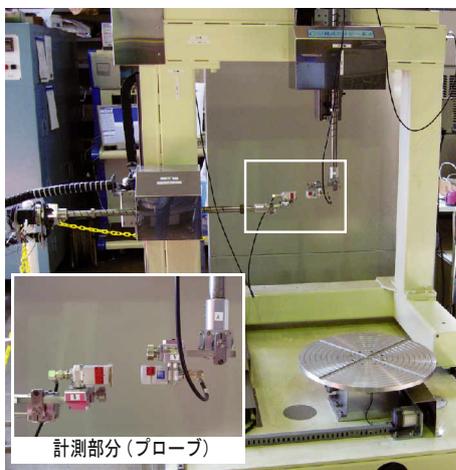
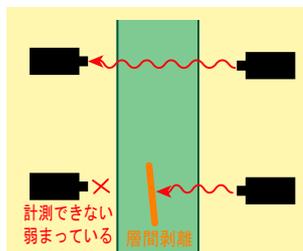


図1 超音波探傷装置(有効探傷範囲: 300mm×300mm)

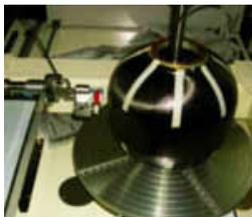


計測部分(プローブ)

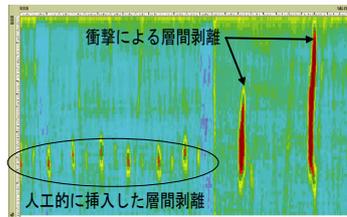


探傷方法

何も無ければ、超音波はCFRPを通過します。層間剥離が起こっていると、その部分で反射してしまい超音波はCFRPを通過できないか、できても弱まっているため、層間剥離を発見することができます。



タンク模擬供試体の探傷試験



探傷結果(展開図)

図2 空中伝播超音波スキャナ(有効探傷範囲: 直径300mm×高さ350mm)

図2は空気中でも計測が可能な「空中伝播超音波スキャナ」です。超音波の波長を長くすることで、空気中での計測を可能にしています。構造体に超音波を当て、通過できるか、通過できた場合その強さに違いがあるかを調べることで、内部の様子を計測します。ロケットのノズルなどの水に沈めることができない構造体には、こちらの装置での計測が適しています。

JAXA総合技術研究本部では他にも、2000mm×4000mm×1000mmの構造体を試験できる「ロボット式超音波探傷装置」、高精度な3次元探傷が可能な「アレイ型超音波探傷装置」などの装置も所有しています。