

# 空と宙

2009 NOV/DEC  
<http://www.ard.jaxa.jp/>

隔月刊発行 ISSN 1349-5577

## 研究開発

飛行機をもっと安くつくる方法

熱に強い新材料をつくる

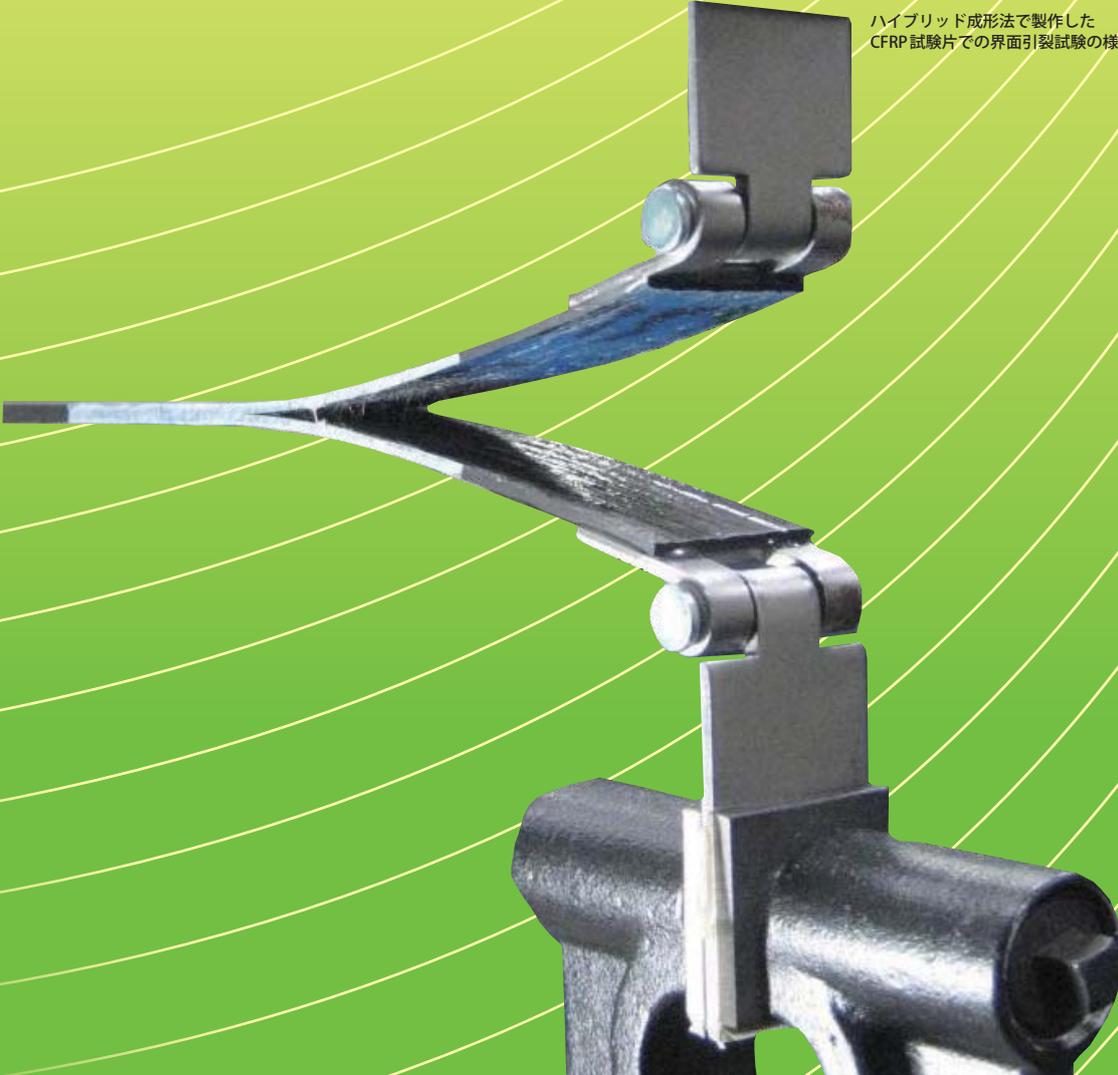
## 横路散歩

CFRP — プラスチックと炭素のこども

## 空宙情報

大型風洞試験技術の多様な研究開発への応用

「東大—JAXA 航空宇宙工学ワークショップ」開催案内



ハイブリッド成形法で製作した  
CFRP 試験片での界面引裂試験の様子

No. **33**  
研究開発本部  
Aerospace Research and Development Directorate

## 飛行機をもっと安くつくる方法

## ハイブリッド成形法という選択

1903年12月17日、骨組みは木、翼は布でつくられた飛行機が世界で初めて動力飛行に成功しました。それから何年もかけ、航空機の材料はアルミ合金などの金属へ移り変わり、近年では金属よりも軽くて丈夫、耐腐食性が高く、一体成形の可能な「炭素繊維強化プラスチック（Carbon Fiber Reinforced Plastics：CFRP）」が使われるようになってきています。

CFRPはその名の通り、「プラスチック」と「炭素繊維」とからできています。非常に高性能な材料ではありますが、金属材料に比べると構造の製造にコストがかかってしまう、という問題も抱えています。CFRPで航空機の構造をつくる場合、一方向に並べた炭素繊維の隙間にプラスチック（人工樹脂）を含ませた「プリプレグ」と呼ばれるシートを積層することで望みの形をつくり、オートクレーブという

圧力釜内で高温・高圧下で固める「オートクレーブ成形法」が一般的です。この方法は、オートクレーブという特殊な設備が必要になるため、製造コストは必然的に高くなります。

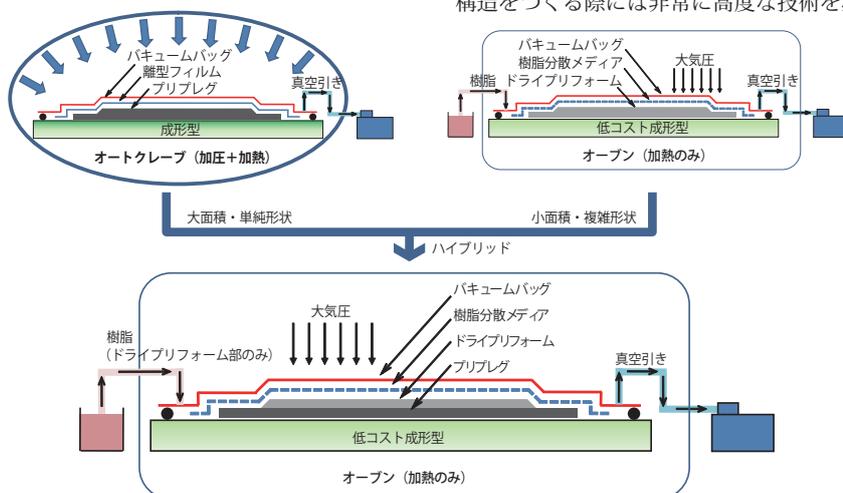
船舶や自動車の分野には、「真空樹脂含浸（Vacuum assisted Resin Transfer Molding：VaRTM）成形法」という低コストCFRP成形法があります。VaRTM成形法とは、乾いた布状の炭素繊維だけで望みの形をつくり、それを真空パックで覆って空気を抜き、中に樹脂を流し込んで繊維間に隙間無く行き渡らせてから、大気圧下で熱を加えて固める方法です。JAXAではVaRTM成形法による航空機構造成形プロセスを研究しており、従来法よりも約25%のコスト低減が可能という結論を得ています。しかし、大きな構造の成形には大変高度な技術を要する、という側面もあります。そこで、各成形法の良いところを取り入れつつ、更なる低コスト化を目指した「ハイブリッド成形法」の研究を進めています（図1）。

## オートクレーブ成形法

高温高圧化で硬化することにより高性能の航空機用CFRP構造を成形できます。しかし、構造が大きくなればなるほど、それに見合った大きさのオートクレーブが必要となってくるため、どうしても高コストになってしまうという問題があります。

## VaRTM 成形法

真空パックを使い、大気圧下かつ比較的低温でCFRP構造を成形する手法です。炭素繊維（ドライプリフォーム）のみの方がプリプレグよりも複雑な形状に対応しやすい、という利点もあります。しかし、構造の形や大きさに成形品質が影響を受けやすく、大きな構造をつくる際には非常に高度な技術を必要とするのが難点です。



## ハイブリッド成形法

大面積単純形状はプリプレグ、小面積複雑形状はドライプリフォームで構造を形づくり、一体化します。そこからはVaRTM成形法と一緒です。真空パックで全体を覆って中の空気を抜き、ドライプリフォーム部分のみに樹脂を流し込み、最後に温度をかけて全体を同時に固めます。

図1 各種成形法

### まずはプロセスを確立する

ハイブリッド成形法には、解決すべき様々な課題があります。まず始めに解決すべき課題は“成形プロセス”です。最適な温度の加え方や樹脂の流し方などを調べて、それを確立することが大切です。

成形時の温度や熱の加え方などにより、CFRPの品質は変わってきます。我々は120℃での成形を目指していますが、その際、温度を急激に上げるのではなく、段階的に上げていく方が材料を高品質にできることが分かりました。樹脂を流す際には、樹脂の入口と出口の位置や、空気を抜いてから樹脂を流し込むまでのタイミングなどが重要になってきます。各プロセスに対して最適な方法を地道に調べ、現在、理想的な強度が得られるハイブリッド成形による航空機構成形成プロセスを確立することができました(図2)。



2009年6月に開催された第48回パリエアショーにて展示し、各国の専門家から好評を得ることができました。

図2 ハイブリッド成形法で試作した飛行機の1/4胴体模型

### 試験によりわかってきたこと

航空の分野でハイブリッド成形法を使うためには、プロセス以外にも解決すべき課題があります。航空の分野で使われるCFRPにはとても高い特性と安定した品質が求められるため、高い圧力を加えてしっかりと焼き固めるような工夫がされています。現時点では、大気圧下での成形が可能な航空主構造用プリプレグは存在しません。そのため、今回のプロセス確立では、大気圧下での硬化が可能な産業用プリプレグで代用しています。今後は、“航空機主構造に適用できるほど高性能で、なおかつ大気圧下でも成形できるプリプレグ”の開発が必要です。

また、“界面強度”も課題のひとつです。引張や圧縮などの面内（二次元平面内）の強度については、計算通りの強度が得られています。しかし、プリプレグと、ドライプリフォームに樹脂を含浸した部分とが接する面、いわゆる「界面」の強度はまだ十分ではありません。界面強度を上げるために、接合方法を更に工夫したり、ハイブリッド成形法に適した特性を持つような樹脂を開発することなどを考えています。

JAXAでは、ハイブリッド成形法を航空機の主構成形成に適用し、オートクレーブ成形法に比べて50%のコスト低減を目指しています。今後も研究を進め、次世代の旅客機開発に役立つ技術の開発に繋げていきたいと考えています。



【複合材グループ】

(左より) 武田 真一、青木 雄一郎、永尾 陽典、杉本 直

## 熱に強い新材料をつくる

### 高耐熱性CFRP開発による可能性

航空宇宙の分野では、炭素繊維とプラスチックを組み合わせた「炭素繊維強化プラスチック（CFRP）」と呼ばれる複合材料が多用されています。プラスチック（合成樹脂）には様々な種類がありますが、航空宇宙用CFRPでは、強度と成形性に優れた「エポキシ樹脂」が一般的です。エポキシ基CFRPの耐熱温度は120℃程度ですが、耐熱性を更に高めることができれば、エンジン部分などの耐熱性を理由に金属材料が主流となっている部分への使用も可能となり、機体の軽量化に繋げることができます（図1）。

高い強度を持ち、耐熱温度も優れた樹脂として、携帯電話やパソコンの回路基板などに使われている「ポリイミド」が広く知られています。ポリイミドを使えば、比強度を保ちつつCFRPの耐熱性を更に高められるため、JAXAではもちろんのこと、アメリカ航空宇宙局（NASA）などでも研究が進められています。

### 簡単に高耐熱性CFRPをつくれるように

航空機、宇宙機の機体構造をCFRPで成形する場

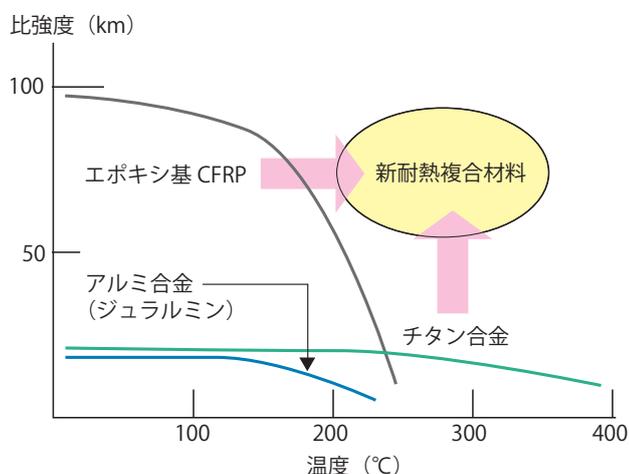


図1 高耐熱性CFRPの位置付け

合、炭素繊維に樹脂を含浸させた「プリプレグ」を重ね合わせて望みの形をつくり、高温・高圧下で固めます（P.02参照）。プリプレグの状態にするとき、炭素繊維へ含浸しやすくするために樹脂を有機溶媒に溶かすのですが、従来のポリイミドは有機溶媒にはほとんど溶けないという問題がありました。

ポリイミドは、有機溶媒に良く溶けるアミド酸という樹脂を加熱し、化学反応を起こさせることで生成できます。そのため従来の方法では、アミド酸プリプレグを積層し、高温・高圧下で固める時の熱によって化学反応を起こさせてポリイミド基CFRP構造を成形しています。しかし、アミド酸がポリイミドに変化する（イミド化する）際に水が発生するため、できあがった構造にはボイド（空隙）ができしまう恐れがあります。従来の手法では、発生した水を外に除去するために複雑な工程が必要でした。

そこで、「TriA-PI」というポリイミドを基に、溶解性を飛躍的に向上させたポリイミドを開発しました。その結果、プリプレグの段階でポリイミドを使うことが可能となり、成形中に水を発生しない成形法の開発に世界ではじめて成功しています（『空と宙』第8号参照）。

### 将来の航空機、宇宙機に使えるように

水が発生しなくなったとは言え、その他の要因でも成形中にボイドができて強度が下がってしまう恐れがあります。そのため、安定して一定レベルの構造が作れる技術を確認するため検証が欠かせません。開発当初は、10cm四方、厚さ2mmの試験片から検証を始めました。現在は、30cm四方で厚さ4mmの大きさでもボイドやクラック（ひび割れ）のない試験片を成形できるようになりました（図2）。今後は、更に厚みを増やし、成形性と耐熱性の評価を続ける予定です。

## 耐熱複合材用ポリイミドの研究開発

CFRPの耐熱性の向上は、航空機と宇宙機の可能性を広げてくれます。JAXAでは静粛超音速機技術の研究開発を進めており、実験機を使った飛行実証を行いたいと考えています。この実験機は音速の1.6倍（マッハ1.6）を想定しており、主翼や胴体などの表面温度は43℃程度になりますが、さらに速い速度であるマッハ2で飛ぼうとするとその表面温度は約100℃に上がります。機首先端や翼前縁部分は更に高温となるため、超音速機の軽量化を考えると、CFRPの耐熱性向上は欠かせません。

日本にはまだ独自の宇宙往還機は存在しませんが、これまでに様々な研究開発や飛行実証を行っています。宇宙往還機が地球に戻るため大気圏に再突入する際、大気との摩擦によってその表面は大変な高温に曝されます。その状態から機体を守るため、断熱材でしっかりと覆う必要があるのですが、機体の構

表1 新規ポリイミド樹脂の創出

	NASA PMR15	NASA PETI-5	JAXA TriA シリーズ		
			TriA-PI (1999年)	TriA-SI (2005年)	TriA-SI-2 (2008年)
力学特性	×	◎	◎	◎	◎
高温強度 (250℃以上)	△ (Tg 330℃)	×	◎ (Tg 340℃)	○ (Tg 320℃)	◎ (Tg 370℃)
溶解性	モノマーは可溶	不溶	～20%	～33%	～33%
成形の容易さ	×	△	△	◎	◎

造材料に耐熱CFRPが利用できれば、構造材料自体の軽量化のみならず断熱材も薄くすることができるため、機体の大幅な軽量化に繋がります。

2008年には、強度や成形性はそのままに370℃というさらに高耐熱性を有するポリイミド「TriA-SI-2」の開発に成功しました（表1）。\* 今後は、この材料についても成形性と耐熱性の評価を進めます。

\* TriA-SI-2は（株）カネカとの共同研究により開発しました。



図2 ポリイミド基CFRP（左）と断面の顕微鏡写真（右）



【複合材グループ】

（左より）加藤 久弥、石田 雄一、小笠原 俊夫

# CFRP — プラスチックと炭素のこども

## ■いいところ取りを目指しています

木材、ガラス、プラスチックにアルミニウム…世の中にはとてもたくさんの材料があります。材料は、大きく「有機材料（有機化合物でできた材料）」と「無機材料（無機化合物でできた材料）」に分けられます（図1）。<sup>\*1</sup>

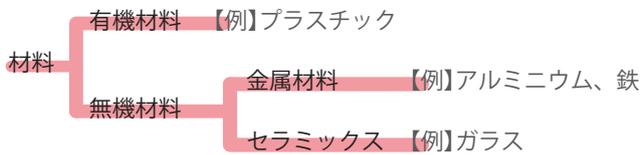


図1 有機材料と無機材料

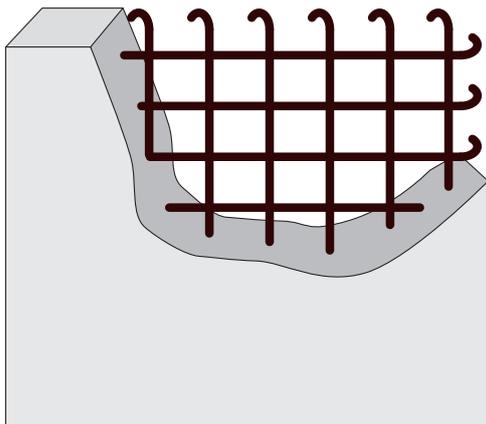
材料（物質）は原子からできています。原子には様々な種類があり、原子の組み合わせや結合の仕方によって性質が異なります。性質の異なる材料をいくつか組み合わせてひとつにすると、各材料の性質を兼ね備えた新しい材料をつくることができます。そのような材料は「複合材料」と呼ばれています。鉄筋とコンクリートを組み合わせた鉄筋コンクリートは有名な複合材料です（図2）。航空宇宙の分野では、炭素繊維とプラスチックを組み合わせた「炭素繊維強化プラスチック（CFRP）」という複合材料が、航空機や宇宙機の構造材料として使われています。

## ■プラスチックってどんな材料？

ペットボトルや文房具、食器類など、私たちはプラスチック製品に囲まれて生活しています（図3）。ところで、「プラスチック」とはどのような材料なのでしょう？

プラスチック（合成樹脂）の原料は、石油です。原油を精製する過程でできる「ナフサ」を分解したり、重合<sup>\*2</sup>したりすることで様々な種類のプラスチックをつくることができます。一般的に“軽く強い”という性質を有しています。しかし、熱にはあまり強くありません。

プラスチックは、熱に対する状態によって「熱可塑性プラスチック」と「熱硬化性プラスチック」とに分類されます。熱可塑性プラスチックはよくチョコレートに例えられます。熱を加えると徐々に柔らかくなり、ある温度（ガラス転移温度）を超えると流動性を示します。冷やすと流動性が低くなり、ガラス転移温度よりも低くなると硬くな



コンクリートは圧縮力（押しつぶされる方向の力）には強いのですが、引張力には弱いという性質を持っています。そのため、鉄筋を中に埋め込んで強化することで圧縮にも引張りにも強い材料を実現しています。

図2 鉄筋コンクリート

ります。

熱硬化性プラスチックは、熱を加えると硬くなります。一度硬くなってしまつと、温度を変化させても軟らかくなることはありません。これは、熱を加える前と後ではその分子構造が変化しているためです。熱を加えることで化学反応が起こり、温度を変化させても流動性を示さない物質に変化しているのです。そのため、熱硬化性プラスチックは熱可塑性プラスチックよりも耐熱性が高くなります。

### ■炭素繊維ってどんな材料？

炭素繊維とは、ほとんど炭素だけからできている繊維のことです（図4）。プラスチックの一種である「アクリル樹脂」、もしくは石油の一種である「ピッチ」などを繊維化し、高温で加熱して黒鉛化することで生成します。“軽くて、強くて、腐食しない”という優れた特性を有する材料です。低熱膨張性や電気伝導性にも優れています。他に

も様々な特性を有しているのですが、炭素繊維単体で使われることはほとんどありません。プラスチックや金属、セラミックスなどの基本となる母材と組み合わせることで、自身の機能を付加し、その材料を強化します。

プラスチックを炭素繊維で強化したCFRPは、プラスチックの軽さと炭素繊維の丈夫さを兼ね備えた材料です。軽量化が重要な航空機や宇宙機にとって欠かせない材料となっています。その他にも、テニスラケットやゴルフクラブなどの様々なスポーツ用品や、自動車や鉄道の胴体などにも使われています。

※1 有機化合物とは、炭素原子を構造の骨格としている物質のことです。それ以外の物質は無機化合物になります。ただし、例外もあります。グラファイトやダイヤモンド、一酸化炭素や二酸化炭素などは炭素原子を構造の骨格としていますが無機化合物に属します。

※2 重合：同種の分子がいくつか結合して、分子量の大きい化合物になること。



図3 プラスチック製品あれこれ



図4 炭素繊維

# 空 宙 情 報

## 大型風洞試験技術の多様な研究開発への応用

### —消防飛行艇の放水空力現象の把握

風洞技術開発センターでは、航空技術の発展に寄与するため、風洞の性能を最大限発揮し続ける着実な設備運営を行うとともに、風洞の持つポテンシャルを最大限に生かした各種試験への応用、適用を行っています。そのひとつの例として、新明和工業(株)および(財)日本航空機開発協会との共同研究により、消防飛行艇の放水風洞試験を実現しました。

震災時の大規模火災や山火事などの消火には空中からの放水が有効であり、特に、取水が容易で大量放水が可能な消防飛行艇が注目されています。ところが、高速の航空機から放水された水塊は、複雑に変形、分裂し、飛散してゆくため、狙い通りの放水には気流中の水の挙動を知る必要があり、風洞試験でのデータ取得が非常に有効です。しかし、風洞は本来空気の流れを調べる設備であり、また機械設備であることから水を用いた試験は想定されていません。このため、蓄積された風洞運用の経験や技術に基づき、防水や排水の措置や設備への悪影響の予測と予防、適切な模型設計などが必要になります。これに加え、多様で先進的な計測技術を適用することで、価値のあるデータを獲得できます。今回、国内最大の航空機用風洞である6.5m×5.5m低速風洞に、これらの対策、適用を行い、飛行艇の胴体模型から数十回におよぶ放水試験を円滑に実施しました。高速度カメラ映像、PIVによる水滴の速度計測、影写真法による水滴径計測(図)、降水量計測による散布密度分布の把握などを実現しました。



図 放水試験の様子

から数十回におよぶ放水試験を円滑に実施しました。高速度カメラ映像、PIVによる水滴の速度計測、影写真法による水滴径計測(図)、降水量計測による散布密度分布の把握などを実現しました。

本風洞は、この試験を通じてこれまでにない試験データの取得や数多くの貴重な知見を得ることを可能とし、新たな航空機の技術開発に大きく寄与しています。

(風洞技術開発センター 伊藤 健)

## 東大ー JAXA 航空宇宙工学ワークショップ

### 【開催案内】

JAXAでは、高密度で円滑な研究協力を活発に展開する目的で、東京大学と研究協力の包括的協定を締結しています。その成果を発表する場として「東大ーJAXA航空宇宙工学ワークショップ」を開催いたします。

### ■ 開催日時

2009年12月14日(月) 13:00~18:00

### ■ 場 所

東京大学 本郷キャンパス 工学部2号館213号講義室  
東京都文京区本郷7-3-1

### JAXA窓口

宇宙航空研究開発機構  
研究開発本部 研究推進部 広報  
TEL: 0422-40-3960 FAX: 0422-40-3281