

JAXA 航空マガジン



# FLIGHT PATH

新たな空へ 夢をかたちに  
*Shaping Dreams for Future Skies*

No.23  
航空技術部門  
[www.aero.jaxa.jp](http://www.aero.jaxa.jp)



特集

## JAXAの構造・複合材研究

2 特集 JAXAの構造・複合材研究

産業界のニーズに応え、かつシーズを生み出す  
研究開発の拠点を目指す

8 航空技術部門へのメッセージ

大学や産業だけではできなかったことが、  
JAXAと一緒にだどできる

11 リレーインタビュー

世界と戦えるエンジン作りを目指し、数値シミュレーションの環境を整えたい

4 特集 関連技術

究極の最適設計で次世代の  
航空機材料を生み出す技術

10 ソラの技

「光ファイバーセンサー編」

# JAXAの 構造・複合材研究

## 産業界のニーズに応え、かつシーズを生み出す 研究開発の拠点を目指す



**中村俊哉**

構造・複合材技術研究ユニット  
ユニット長

### ブラックメタルから脱却し、 低コストの複合材へ

——構造・複合材技術研究ユニットでは  
どのような研究に取り組んでいますか。

複合材は軽く強いという航空機構造に適した特性を持つため、民間では1980年代から少しずつ航空機に使われるようになり、2010年代初めに登場したボーイング787によって、航空機の1次構造材料としての地位を確立しました。ただ、現在の複合材の使われ方は、極論すれば、従来の金属材料を複合材に替えただけ、すなわち複合材を「ブラックメタル」として使っているだけです（CFRPは黒色）。航空機にとって複合材は金属材料に比べて新しい材料ではあるけれども、複合材の良さを活かし切れていないのが現状です。さらに、複合材の低コスト化が世界の流れになっており、安くないと機体メーカーに使ってもらえません。海外ではロボットを使って複合材のコストダウンに取り組んでおり、日本の企業も対応が必要になっています。私たちの研究ユニットは、こうした複合材料の低コスト化など産業界からのニーズに応える研究に加え、次世代の材料・構造技術を

構造・複合材技術は、JAXAの基礎的・基盤的技術の研究において柱の一つとなる研究です。CFRP（炭素繊維強化プラスチック）などの複合材が航空機に使われており、その研究は新たな段階に入りました。その現状と今後の見通しをJAXA構造・複合材技術研究ユニットの中村俊哉ユニット長に聞きました。

見据えた先進的な研究にも取り組んでいます。産業ニーズに応えるとともに、シーズを生み出す構造・複合材技術の拠点となることを目指しているのです。

——産業ニーズに応える研究としては、SIP（戦略的イノベーション創造プログラム）<sup>\*1</sup>の「統合型材料開発システムによるマテリアル革命」での研究がありますね。

SIPのように初めからメーカーが入っている国のプロジェクトに参加することで、研究が出口に直結し、産業ニーズに応えられるのではないかと考えています。これらを踏まえ、航空技術部門としての基礎的・基盤的技術の研究から要素技術の研究開発、そして将来の実用化までを意識した研究開発に取り組む基本姿勢を基に、これからの戦略を検討してきました。かつての航空宇宙技術研究所（NAL）の時代からJAXA航空技術部門に至るまで連続と受け継がれてきた、常に先を見据えて取り組んできた航空技術の研究開発の方向性を、将来に向けて新たに示していくものだと思っています。

### 研究拠点として 自動積層技術に取り組む

——SIPでJAXAはどのような研究に  
取り組んでいますか。

一つは複合材の自動積層技術です。CFRPはプリプレグ（炭素繊維樹脂含浸シート）を積層し、オートクレーブという窯で

圧力をかけながら加熱して成形しますが、最近海外ではロボットを使って自動積層することでコストダウンを進めています。日本はその部分が強くないので、SIPで高品質な自動積層技術を獲得しようとしているわけです。例えば、複合材には空隙などの欠陥が生じることがあります。そのため、自動積層で作った材料にどのような欠陥が発生するか、強度はどのくらいになるかを、まずコンピューターによる数値シミュレーションで予測し、改善策を見いださなければなりません。大学が持っている理論やモデルとシミュレーション技術をうまく融合させ、メーカーにつないでいくのがJAXAの役割です。実際にできた材料の試験や、特に実大規模の構造試験を精密に行うことができるのはJAXAの強みです。JAXAで試験をすれば、プロジェクトに参加している各メーカーや大学がその結果を知ることができますから、結果的に日本の技術がレベルアップしていきます。これがJAXAが目指す研究拠点という意味につながっていくと思います。

### 薄層化CFRPと自動積層

——SIPでは薄層の技術も研究して  
いますね。

はい。JAXAは第3期中期計画が始まった2013年度からCFRPの薄層化を研究してきました。プリプレグを薄層にするというアイデアは日本に限らずあるのですが、薄層を作るには炭素繊維を一度開かなければ

※1 総合科学技術・イノベーション会議が主導する国家プログラム。従来の府省や分野の枠を超え、研究開発課題ごとにプログラムディレクターを選定し、基礎研究から実用化・事業化までを見据えて推進していく

ればならず、その技術を持っているのが福井県工業技術センターなのです。私たちが福井県とずっと一緒に研究をしています。これは日本独自の技術で、かなりチャレンジングな技術でもあります。薄層のメリットとしては、強度はもちろんですが、例えば複合材の板厚の設計自由度が上がるのが期待できます。シートが薄ければ薄いほど板厚の変化をなだらかにできます。ただし、薄くて取り扱いが難しい薄層シートをたくさん積層する必要があるため、自動化しなければならぬのです。

## バイオニックエアフレームや熱可塑性CFRPへの挑戦

——複合材の特性を活かすための研究は、さらに広がっていくのでしょうか。

複合材の特性を最適化して活かしていく技術を突き詰めようとしているのがバイオニックエアフレームです(本誌5ページ参照)。これまでとは異なる新しい形態の航空機が出てくれば、こうした技術は間違いなく必要になると思います。例えば空飛ぶ車とか電動航空機などを開発するとすると、今までの航空機にはなかったニーズが出てくるはず。そうしたニーズにフレキシブルに対応できる技術を作っておくことが重要だと思っています。

——熱可塑性CFRPにも取り組んでいるようですが。

はい、取り組んでいます(本誌6ページ参照)。ボーイング787やエアバスA350XWBでは軽量化のために複合材がたくさん使われていますが、それらを接合するために多数の金属ボルトが必要で、その分重くなっています。つまり、軽くて強いという複合材の特性を十分に発揮できて

いないのです。現在使われている複合材は熱硬化性CFRPで、熱を加えると硬くなります。一方、熱可塑性CFRPは加熱すると柔らかくなるため、加工がしやすい、成形しやすい、また衝撃にも強いという特徴もあります。そこで熱可塑性CFRPの溶着や接合による部材の一体化技術を開発しています。

## 材料と構造が一体となる連携が不可欠

——JAXAの構造と複合材の研究分野が一緒になったことによる強みは、どのようなところにあるのでしょうか。

複合材の研究では材料だけでなく、構造の要素が入ってきます。金属と複合材の一番大きな違いはそこにあると思います。つまり、金属材料は均質なので、良い材料があれば、それを使うだけでいいのですが、複合材は力の方向に対して繊維の方向を合わせるといった使い方ができるので、そこに構造の要素が入ってくるわけです。材料と構造が連携しないと、複合材の今後の研究は難しいのです。

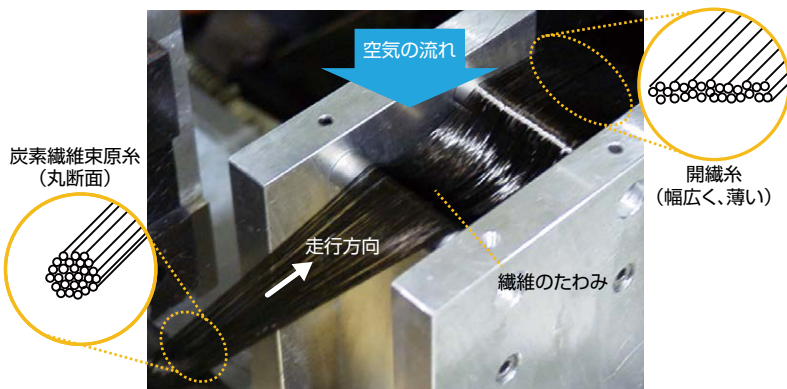
——研究ユニットとして一緒になる前から、そうした考えはJAXAにあったのでしょうか。

ありましたね。ボーイング787でとにかく複合材が構造材として使われるところまで来たわけです。それでは次は何ですかといった時に、産業ニーズに応えるために複合材を早く安く品質の良いものを作るという研究に取り組みましたし、SIPも基本的にその方向です。しかし、やはり研究者としてはそれだけでは物足りないところがある。その先を研究しようとする、材料と構造が連携することがどうしても必要になってきたので

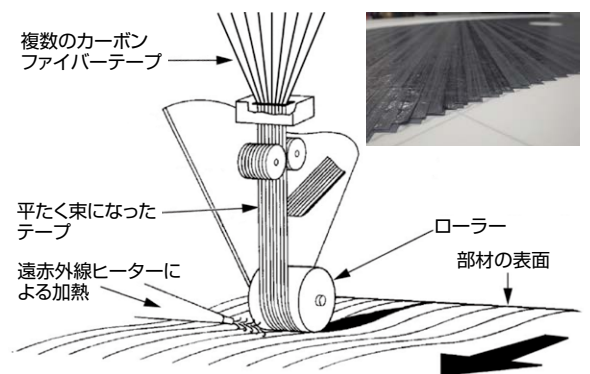
す。そうした考えや研究は昔からあるのですが、シミュレーション技術や自動積層などの最新の技術を積極的に活用することによって、新たな試みができると思っています。

——研究ユニットには若い研究者も多いと思います。産業ニーズに応えるための研究と、先進的な研究の両方を実現するための、研究ユニットの今後の目標は何ですか。

以前からJAXAの複合材の研究は大学や産業界とうまく連携して日本の複合材技術の発展に大きな役割を果たしてきたと思っています。その実績とSIPの場をうまく活用して、JAXAが産官学の研究拠点として成長できればと考えています。また、JAXAの研究者が中心となって新しいものを生み出していきたい。そのために大事なのは、新しいアイデアの芽をつぶさないことです。新しいアイデアがあったとしても、私がそれを意識しすぎると制約がかかってしまうので、若い研究者にある程度のところまでは自由にやらせてもらうくらいつもりです。もう一つ忘れてはいけないのは、JAXAの他の部署やユニットとの連携です。宇宙分野はもちろんですが、航空技術部門内でも、コアエンジン技術実証(En-Core)プロジェクトでは、耐熱性に優れたCMC(セラミックス基複合材料)を使うことになっており、この部分について私たちが果たさなければならない役割があります。また、超音速機や電動航空機といった新しい機体も出てきますから、そうした部署やユニットともコミュニケーションを取りつつ、必要な役割を果たしていきたいと思っています。私たちの研究ユニットで出た新しいアイデアや自動積層の技術が超音速機に使えとか、そういった相乗効果が出てくるといいですね。



開織技術の原理。炭素繊維束を走行の工程でたわませ、空気の流れにより繊維を外側(幅方向)に広げる。(画像提供:福井県工業技術センター)



自動積層装置のヘッド部分の拡大図。イラスト上部から出ている約6mm幅の複数のカーボンファイバーテープを、遠赤外線ヒーターで加熱しながらローラーで圧着する(イラスト<sup>\*2</sup>)。テープの層を重ねて成形していく(写真)

\*2 P. Debout, H. Chanal, E. Duc, Tool path smoothing of a redundant machine: Application to Automated Fiber Placement, Computer-Aided Design, Volume 43, Issue 2, February 2011, Pages 122-132

# 究極の最適設計で次世代の航空機材料を生み出す技術

## 海外に対抗する最適設計技術と、機体構造を変革するバイオニックエアフレーム

複合材の良さを活かすために必要となる「最適化」。金属材料と同じ設計ではなく、そこから脱却して最適設計を行う技術研究について、自動積層技術へ適用可能な設計技術、航空機の構造自体を変革するバイオニックエアフレームの事例を聞きました。

### 製造プロセス自動化によるコスト削減が世界的な流れ

——航空分野で使われる複合材について、世界の動きを教えてください。

複合材は航空機を作る標準材となっていますが、そのボーイングやエアバスが今、考えているのは、複合材機体の製造コストを安くすることです。特に最近LCCにも人気があり、世界中で1万2,000機以上飛んでいるといわれる単通路機では、機体価格のコストダウンへの要求が非常に強くなっています。そこで機体メーカーは複合材機体の製造プロセスのほとんどを自動化しようとしています。さらに、機体の設計自体を自動生産技術と組み合わせることで、複合材のメリットを最大化していくことを考えています。こうした大きな流れがあります。

——これまでの日本の製造プロセスでは対応できなくなるということでしょうか。

できなくなってくると思います。複合材はプリプレグと言われる繊維強化プラスチックシート(繊維を並べて樹脂を含浸した中間素材)を積層して作ります。厚くするところはたくさん枚数を重ね、薄いところは枚数を少なくすることで最適な形状を作っていきます。従来の複合材部品の製造プロセスでは、かなりの部分を人の手で作業する必要がありますが、最近では、工作機械メーカーが製造した自動積層機をボーイングやエアバスが自社の工場に積極的に導入しています。自動化すれば複雑な形状にも対応できますし、かつ人件費も劇的に下がります。ところが日本にはこの自動積層技術がありません。そこで今、国家プロジェクトであるSIP(戦略的イノベーション創造プログラム)で

これを研究しているわけです。

### 最適設計には自動積層技術が必要

——複合材に合わせた最適な設計というと、具体的にはどのようなことを考えているのでしょうか。

金属材料はどの方向にも一様な特性を持っていますが、複合材はプリプレグを積層する順序や、重ねる方向をアレンジすることで、特定の方向に強い、あるいは特定の方向には柔らかいといった異方性を持たせられます。この複合材ならではの特性を活かすのです。例えば主翼を考えた場合、上曲げや下曲げの荷重にはすごく強いけれども、ねじれに対しては非常にフレキシブルであったり、あるいは、曲がると特定の方向にねじれたりといった今までにないような機能を持った主翼の設計が可能で。もう一つ例を挙げれば、今の機体は、メンテナンスホールなどの穴を作らなければいけない場所のまわりは部材の板厚を増しています。穴のまわりに応力が集中するので、強度を確保するためです。しかし、複合材を使えば、強化繊維の割合の調整や、最適な板厚分布の設定などによって、重量を



自動積層装置によるテーラード積層の試作



青木雄一郎

構造・複合材技術研究ユニット  
主任研究開発員

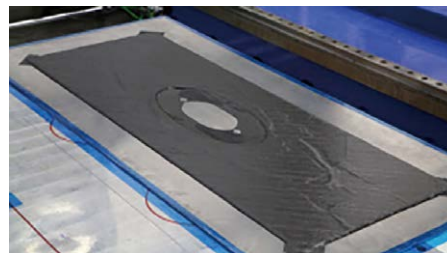
増やさずに強度を確保することができます。

——こうした最適設計の考え方が自動積層技術につながっていくと。

そうですね。SIPでは日本が自動積層技術を持つことが目的の一つですが、JAXAではさらに最適設計と自動積層技術をリンクさせたトータルとしての設計・製造技術の確立を目指しています。ただし、少し基礎的な話をすると、複合材の代名詞でもあるCFRP(炭素繊維強化プラスチック)という材料は分かっているようで分かっていないところがあるのです。例えば、強度劣化のメカニズムが完全には明らかになっていません。そのため、CFRPの強度を予測するシミュレーション技術がまだ確立されていないのです。CFRPの試験にはコストがかかるので、できるだけシミュレーションに置き換えたいのですが、これが大きな課題になっています。そこで、まずきちんと強度を予測できるシミュレーション技術を作り、それを使って飛行機に求められる要求値を満たす材料や機体を設計する技術を研究しています。これをやらないと、本当の最適設計はできません。

——SIPでは薄層技術にも取り組んでいますね。

これは非常に重要な技術です。通常の



試作した最適積層パネル。板厚分布の最適化と自動積層により、重量を約40%減らすことができた

CFRPプリプレグのシートは厚みが0.15～0.2mmくらいで、わりと厚いのです。薄層というのは、これをもっと薄く、従来のシートの3分の1とか4分の1にしたものです。例えば、これまでシート10枚で作っていたところを、薄層だと30枚重ねられます。繊維の向きをいろいろな順序の組み合わせで重ねることで、これまでになかったさまざまな特性が得られます。私たちはテーラリングと呼んでいますが、テーラーメイドの洋服のように、思い通りの物性値を出すような積層の仕方ができるのです。ただ、これまでよりも積層の数が増えるので、手作業ではなく自動積層技術で作っていきます。また、薄層を重ねて作った複合材はひびが入りづらくなり強度が上がります。強度が増した分、これまでよりも板厚を薄くすることができます。

## バイオニックエアフレームは究極の最適設計

——複合材の最適設計を究極まで突き詰めたというバイオニックエアフレームは、どのような技術ですか。

バイオニックエアフレームとは、生体の構造に学んだ最適な構造体のことです。バイオニックにはもう一つ、「超人的な」とか「並外れた力の」という意味もあります。この二つを兼ね備えた究極の最適構造を作りたいと考えています。航空機の構造にバイオミメティクス(生物模倣)の考え方を取り入れていこうということです。生物の身体の構造は全て何かの機能を備えています。それがおそらく最適な形だからそうなったのだと思います。そこで、航空機の胴体にバイオミメティクスを導入し、設計にフィードバックさせると、例えば恐竜の翼竜のあばら骨のような構造ができたりするのです。私たちはこうした生物の骨格からヒントを得た構造を適応することによって、現在よりもっと軽くて高機能な機体ができないかと考えています。

——主翼などもこの考え方で新しい構造を作ることができるのですか。

実は現在のターゲットは主翼なのです。主翼を生体の骨組みのような構造体にして、どれだけ強度を保てるかを解析し、そのデータを自動積層機にインポートして主翼を作っていく。そういった試みを2018年から研究しています。

——JAXAでは形状が連続的に変化するモーフィング翼の研究をしています。バイオニックエアフレームの技術でモーフィング翼を実現できますか。

はい、できると思います。例えば、主翼の

真ん中の部分は荷重を支えるために硬くて剛なものにする必要がありますが、翼後縁は柔らかくして舵面の機能を持たせたい。バイオニックエアフレームの技術を使えば、それを一枚の板で解決できると考えています。真ん中には荷重方向に繊維をたくさん入れ、端は柔軟な構造になるように非常にフレキシブルになる方向の繊維だけを入れるのです。一つの板の中で柔らかい部分と硬い部分を作ることができるわけです。

——つまり、フラップなどの動く箇所が主翼本体と一緒にになると。

現在の主翼はフラップが分離して作られていて、結合のためのヒンジやフラップを動かすアクチュエーターなどがありますが、それを一体化して作ってしまいます。主翼の端に小さなモーター駆動のアクチュエーターを入れて翼端を動かす具体的なアイデアもあります。そうすると、一体翼ではあるけれど、部分的に曲がって操舵ができる。そういったモーフィング翼を作ることができます。

——そうした最適化を求めていくと、航空機の形はもう従来のTube & Wingではなくなるかもしれません。

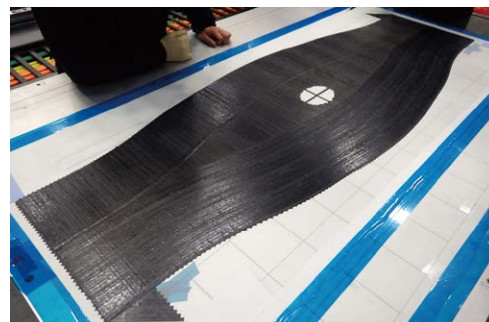
そうですね。本当に新しい構造様式とか、

コンセプトの機体を考えるのであれば、従来とは全く異なる形の機体が面白いのではないかと思います。例えば、モーフィング技術を使うと、飛行速度に合わせて最適な形状になる機体ができます。鳥は飛ぶ時に微妙に翼の形を変えています。それと同じように、飛んでいる時の状態に合わせて最適な機体の形にする。そうすれば、航空機はかなり高機能になっていくはずです。

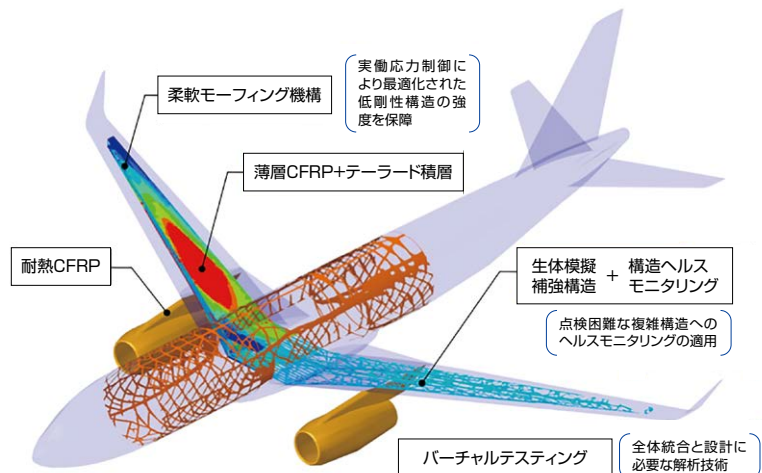
## マンボウやハヤブサなど生物の進化に学ぶ

——生物に学ぶとなると、実際の生物の研究も必要ではないですか。

はい。私たちは現在、マンボウの骨格を模倣した機体構造を考えています。そのため、魚類の専門家に話を聞いたり、国立科学博物館からマンボウの標本を借りてきて、X線で撮影し、どのような骨格になっているかを調べたりしています。ゆくゆくは、マンボウを飼育して動きを観察したりといったことも必要になるかもしれません(笑)。



自動積層装置によってカーボンファイバートープを曲線的に積層した供試体



航空機開発の新たなニーズに対応するJAXAのバイオニックエアフレームの取り組み

バイオメティクスの考え方を  
用いた3Dプリンターによる航空機  
の胴体部分模型



——そもそもバイオニックエアフレームの発想はどのようにして出たのでしょうか。

生物の構造や機能を観察して新しい技術の開発に活かすバイオメティクス自体は以前から知っていましたが、これが自分の研究に役立つとは思いませんでした。ところが、5年くらい前に航空技術部門の将来ビジョンを考えようというタスクチームができ、チームの一員としていろいろ考えました。今の設計技術の延長線で先端技術をやっているとしても、なかなか新しいことはできない。であれば全く異なる分野を学んで、そこからアイデアをもらってはどうかと考えたのが発端です。それで生物に注目しました。鳥は強い風の中でも墜落することなく飛んでいます。ハヤブサは上空から急降下して、獲物を捕る時に急停止します。その時、身体に十数倍ものGがかかる。ハヤブサはそれに耐え得るだけの骨格と筋肉を持っています。これは現在の航空機では絶対無理です。彼らは生き残るためにそのように進化してきたので、そこから学ぶことがあるのではないかと考えたのです。実際に生物の専門家にいろいろ教えてもらうととても勉強になりますし、何か新しいことができるかなという気持ちになります。

——海外では航空分野でのバイオメティクスの研究はどうなっていますか。

海外にもバイオメティクスを研究している人はいます。しかし主にやっているのは、空力特性や飛行力学の分野です。航空機の構造そのものを刷新しようという研究はあまりありません。ですから、JAXAが

非常に画期的な研究ができる可能性があると思っています。

## 中長期的な観点で機体への適用を目指す

——どのようなスケジュールで研究を進めることになりますか。

今年1年間で研究の詳細な計画を立て、その後5年間で小さなモデルを作って実際に飛ばすか、地上での実証試験をしてモーフィング機能や強度をきちんと確かめてみるまで進めていければと考えています。

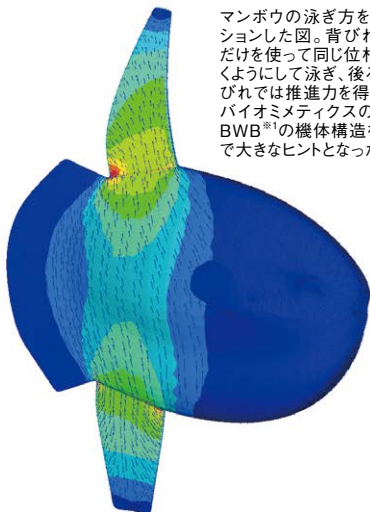
——複合材だけの研究から、機体の構造まで考えるという展開ができますね。

今までは素材は素材だけで研究して、強度などを測っていたのですが、これからは素材を活かすための設計技術と組み合わせたいと考えています。

——バイオニックエアフレームをもとにした技術が実際の機体に使われるには、どのくらいかかりそうでしょうか。

先ほどお話ししたテーラリングや最適積層といった技術が実現するのに5年くらい、モーフィングはさらに10年後くらいになると考えています。少し中長期的な観点が必要です。ただし、空飛ぶクルマや電動航空機が出てくれば、航空輸送のシステムそのものが大きく変わります。そうすると、モーフィングや一体化構造などの技術が適用できます。それほど遠くない時期に、バイオニックエアフレームの技術を適用できる機会もあると考えています。

マンボウの泳ぎ方をシミュレーションした図。背びれと尻びれだけを使って同じ位相で羽ばたくように泳ぎ、後ろにある舵びれでは推進力を得ていない。バイオメティクスの考え方はBWB<sup>\*1</sup>の機体構造を考える上で大きなヒントとなった



構造・複合材研究を適用した将来の航空機イメージの一例。従来にはない、機体と翼などが一体となったBWBのような機体形状の設計も考えられている

## 次世代の航空機材料として有望な熱可塑性CFRP

航空機に低コスト化が求められる中、熱硬化性のCFRPに代わる次世代の航空機材料としてクローズアップされたのが熱可塑性のCFRPです。どのように研究を進めているのか、そして今後の課題について聞きました。

### 技術進歩で再び注目される熱可塑性CFRP

——JAXAが研究する熱可塑性CFRPについて教えてください。

現時点で機体の主要構造材(1次構造

材)となっているのは、熱を加えると硬くなって元に戻らなくなる熱硬化性のCFRP(炭素繊維強化プラスチック)ですが、成形工程や設備にコストがかかり、しかもすでに成熟した技術であるためにコスト削減が容易ではありません。そこで、航空機に低コスト化

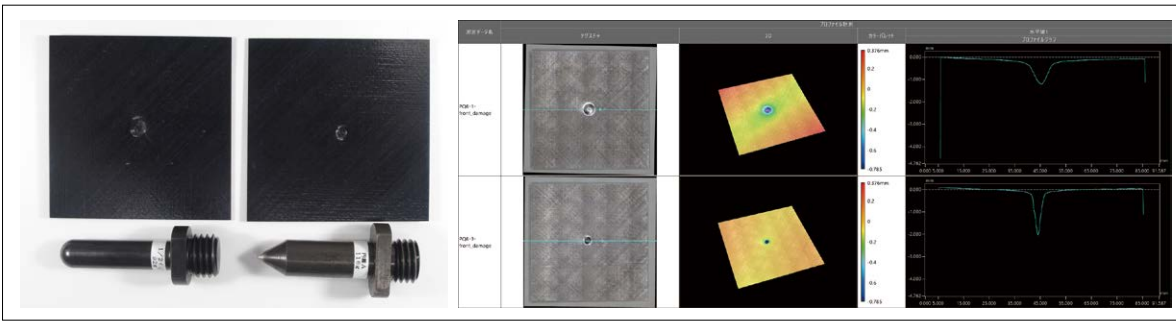


武田真一

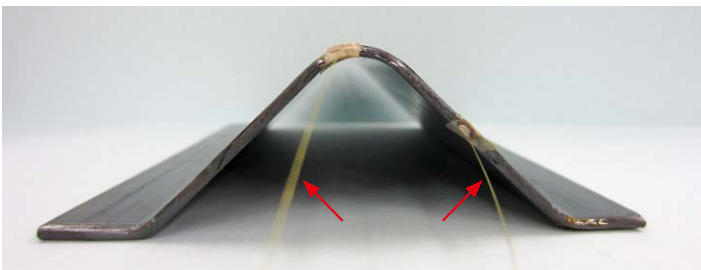
構造・複合材技術  
研究ユニット  
主任研究開発員

が強く求められる現在、新しい技術として浮上したのが、自動車産業などで多く用いられる熱可塑性のCFRPです。これは、熱を加えると柔らかくなり、冷やすと固まる樹脂を使っています。JAXAは30年ほど前の航空宇宙技術研究所(NAL)時代に熱可塑性複

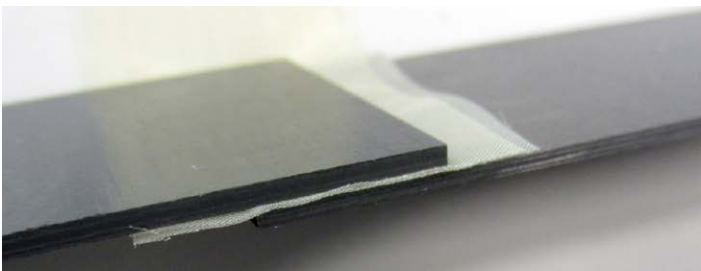
※ 1 プレンデッド・ウィング・ボディ (BWB: Blended Wing Body)



熱可塑性CFRPの板に同じ速度で形状の異なる衝突物を当てた試験。板の内部で発生する損傷の違いから、部材に求められる物性や構造を検討する



熱可塑性CFRPを加熱し、プレス金型で押し曲げた供試体。光ファイバーセンサー(矢印部分)を埋め込み、材料が変形する瞬間の内部ひずみ変化を調べる



PEEK樹脂CFRPを超音波溶着した試験片。上下に重ねた複合材の間に樹脂メッシュシートを用いて溶着する

合材に取り組み、その利点を見い出していました。例えばPEEK(ポリエーテルエーテルケトン樹脂)などを用いた熱可塑性CFRPは、衝撃に非常に強いいため損傷が起きにくく、航空機材料として熱硬化性CFRPより優れています。熱可塑性CFRPは、さまざまな成形法が採用でき二次加工がしやすい上、熱硬化性CFRPが冷凍庫など低温環境での保存が必要なのに対して管理コスト面でも優れています。ただ、熱硬化性CFRPに比べて成形時に高い温度が必要で、設備などのコストがかさむ課題があつて、航空機への応用は遅れていました。近年、素材の特性向上や成形温度の低下など技術が進展して、いま再び熱可塑性CFRPに注目が集まり、エアバスA380の主翼前縁などで二次構造材としての利用も始まっています。

——熱可塑性CFRPの研究はどのように進めていくのですか。

当面の課題は1次構造材への応用可能性を高めることですが、その研究開発の要件として、JAXAではまず耐損傷性の解析に注目しています。新材料を航空機の1次

構造材に採用するには、安全性を始めとした材料としての成熟が必要です。熱可塑性CFRPは柔らかくへこんで衝撃を逃がすため熱硬化性CFRPより丈夫ですが、そのメカニズムを重点的に調べていく必要があります。また、衝撃を受けた時の部材の損傷を検知する方法も、材料が新しくなれば修正が必要かもしれません。そのためにも素材の特性解析と検討が重要です。

海外と異なるアプローチで接合技術を追求

——熱可塑性CFRPが普及するための課題はありますか。

航空機用の大型部材を製造するには、接合技術の開発も重要となります。熱硬化性のCFRPでは部材の間に熱硬化フィルムを挟んで再加熱し接合しますが、熱可塑性のCFRPでは部材界面を溶着して接合します。エアバスなどで二次構造材を製造する際は、電磁誘導で発熱する素材を部材の中に埋め込んで成形し、外部から高周波磁場で加

熱して接合する方法がとられました。しかしこれには、発熱材が強度に影響を与える懸念や、加熱に多大な電力を必要とする課題があります。そこで注目したのが、自動車や医療用品製造で用いられている超音波溶着です。圧着しながら超音波で接合面を加熱溶着する技術で、電磁誘導溶着の課題が原理的に解消できます。これまで行った基礎的な試験では、熱硬化性のフィルム接着剤接合と遜色ない強度が得られました。大型構造へ応用するという難しさはありますが、熱可塑性CFRP普及のカギは超音波溶着にあると見えています。

——超音波溶着は海外で研究されていますか。

欧米各国も取り組んでいます。JAXAは海外とは少し異なるアプローチを試みています。シート状の樹脂を間に入れて接合する方法で、安定して高強度が得られる上、熱硬化性CFRPで行われてきた方法と共通点があるので技術的な親和性が高く、導入も容易になるだろうと考えています。品質を下げることなく接合領域を拡大する技術も模索しています。

——今後どのように研究を進めていくのでしょうか。

熱可塑性CFRPは挑戦的なテーマであり、多くの難しさを抱えています。次世代の航空機材料としてたいへん有望です。課題はやはりトータルコストですが、製造プロセス全体で総合的なコストダウンを図れば、日本の航空機産業が国際競争力を向上させることに寄与できると期待しています。軟らかくへこんで内部の損傷を減らす耐衝撃メカニズムの詳細を把握すること、普及のカギとなる超音波溶着など接合技術の高度化、そしてコスト低減につなげるには材料や試験方法を規格化すること、この三つを同時並行で進めていく必要があります。将来的には、熱硬化性で進んでいる自動化とも融合していくと思います。そのような技術を提案して実証するのが、私たちの重要なミッションです。

# 大学や産業だけでは できなかったことが、 JAXAが 一緒だとできる

東京大学名誉教授

(大学院新領域創成科学研究科先端エネルギー  
工学専攻、工学部航空宇宙工学科)

武田 展雄 氏

(現・国土交通省 運輸安全委員会 委員長)



JAXA第4期中長期計画の策定に向け、構造・材料戦略検討ワーキンググループにも参加された東京大学名誉教授の武田展雄氏に、海外動向を踏まえた日本の構造・複合材技術の今後やJAXAへの期待などについて伺いました。

## 構造と材料を融合し、 新しい複合材を世界へ

—— JAXAの構造・複合材技術研究ユニットに対して、どのようなことを期待していますか。

JAXAの複合材の研究部門と構造の研究部門が一緒になったのは、まさにタイムリーで、非常に賢明な選択だったと思います。複合材と構造の人が一緒に研究できるのはJAXAの強みになり、今後これをもっと活かすことが重要です。複合材の研究では、新しい複合材をただ作るのではなく、それが構造として安全であることが必要で、構造部門が安全性を証明するのに貢献した複合材を世界に提供するのが日本のあるべき姿です。

—— 材料と構造を一緒に研究する必要性について、いつ頃からお考えでしたか。

これは40年以上前に複合材に関わった時から考えていました。私の専門は航空機の材料・構造ですが、「この材料は駄目だ」と材料屋さんに文句を言っているだけでは問題は解決しない。構造として必要な材料を材料屋さんと作り上げていくことで、金属との競争や複合材の世界レベルでの競争に勝ると考えました。

—— 世界で勝つために、現在、SIP(戦略的イノベーション創造プログラム)で行われているのが、産官学が一緒になった複合材技術の研究「統合型材料開発システムによるマテリアル革命」ですね。JAXAも参加しています。

航空機には日本の複合材が多く使われ

ています。それは、日本製品の信頼性が高いからです。しかし、現在は大幅なコストダウンを求められています。このまま素材としての複合材を安く作っているだけでは、日本の産業は、仕事は多少あるけれど、イノベーションがほとんどなくなってしまふ。私はそれを非常に危惧していました。一方、航空機メーカー側の事情は、シングルアイル(単通路)の小型機の需要が今後、非常に高まると予想され、1カ月に数十機というような大量生産が必要になります。その時に、日本が高生産性・ローコストで、これまで以上の高性能な複合材構造を作る技術を開発し、それを提案できれば、ボーイングもエアバスも使ってくれるでしょう。そういう提案ができないと、日本は勝てないと認識しています。



## ものづくりの信頼性を サイエンスが支える

—— ボーイング787以来、複合材が多く使われるようになりましたが、その後目立ったイノベーションがない状況を脱却するのが、SIPでの研究目的というわけですね。

そうです。SIPの第1期「革新的構造材料」では主に高生産性材料の開発を行いました。一方、第2期「統合型材料開発システムによるマテリアル革命」では、一歩進んで、優れた複合材構造を作り上げるための自動成形法の開発に挑戦しています。自動成形のマシン自体は欧州が強く、日本は後塵を拝しています。しかし自動で作るので、テープの重なり部分に空隙や重複ができてしまうといった問題が出てきます。そういう時に、どのような影響が出るのか、信頼性のある構造を達成できるのなどを学問的にきちんと押さえて説明する。その裏付けを持って、自動成形できるようになれば国際的にも高い競争力となります。

—— その時にJAXAの果たす役割は、どのようなものなのでしょうか。

私が大学でメーカーと一緒に研究をしてきて思ったのは、材料開発やものづくりへのサイエンスの導入が必要ということでした。この作り方をしたら、なぜこうなるのか。同じ性質の材料を再現するにはどうしたらいいか。信頼性を上げるにはどうすべきか。こうした問いに答えるには、学問が必要です。そこでJAXAにも手伝ってもらって、学内に複合材の研究組織を作りました。大学と企業が一緒に研究する際には、どうしても基礎と応用の間にギャップが生じます。しかし、JAXAがそこをつないでくれます。ですからSIPでもJAXAが中に入れば、産業界に役に立つ一方で、基礎科学にも貢献できる。しかもJAXAは国立研究開発法人というパーマネントな組織であり、先生や学生が入れ替わる大学と

違って成果や人材がその後も残っていきます。そう考えたのです。

—— 大学だけでは基礎研究に限界があると。

研究の広がりを持たせるには、やはり大学だけでは限界があります。理論やシミュレーションのプログラムは残りますが、実際の機体の構造を作るために使うところへはなかなか行きません。大学で行っている基礎研究よりももう少し産業に近い部分で、試験法の開発やシミュレーションコードの開発をJAXAが行い、そこに大学や産業界も参加する。それが一番だと思います。複合材の研究は材料開発だけではないのです。JAXAには材料と構造の両方の研究者がいるので、こうした役割が可能です。つまり、大学や産業だけではできなかったことが、JAXAが一緒だとできるのです。

## 日本の複合材研究には 「産産官学」が必要

—— 一方、JAXAも、自分たちの研究がいかにかに社会に役立つかを考えていました。当時、先生も加わってJAXA構造・材料戦略検討ワーキンググループの報告書をまとめた際には、いろいろ議論をされたのですか。

そうですね。JAXAに招聘され、JAXAを外から見てきた立場から意見を出しました。JAXAの研究者それぞれが進めている研究はそれでいいですが、さらに皆で新しいものを作るところに少し入り込んでどうかと議論しました。お互いの連携でフィードバックが入った方がいいですし、それによって、JAXAの技術がもっと活きると思うのです。論文を書くだけでなく、社会の難しい問題に対応したソリューションを提供するとなればと思いますし、JAXAの研究者にはそういう能力があるはずですよ。少し厳しい言い方ですが、そう考えてもらえば、もっといろいろなものに貢献できます。

—— ワーキンググループでの議論を経て、今はJAXAも変わってきたとお考えですか。また、JAXAの今後に対する要望はありますか。

JAXAは随分変わってきました。そして、それぞれの研究者に日本を率いていく気概を持ってほしいと思います。自分だけでやるのではなく、メーカーや大学をチームとしてうまく使ってほしい。JAXAにはリーダーや調整役をしてもらいたいですね。日本の複合材研究の場合は、1社だけでなく素材メーカー・製造メーカーなどの企業が参加する「産産官学」が必要です。JAXAは、その中心にいてほしい。そうすることで、今JAXAが行っているそれぞれの研究が社会に生きてきます。一方で、バイオニックエアフレームのような将来を見据えた研究も大事です。バイオミメティクス(生物模倣)は最適構造を目指す複合材の技術に近いのです。そこに目を付け、今の研究の究極を目標にしているのは、非常に良いと思います。すぐに産業に結び付くわけではないかもしれませんが、それがきちんと使えるようになっていくと信じています。



# ソラの技

## 『光ファイバーセンサー編』

飛行中の航空機において機体各部のひずみや損傷などの状態を的確に把握することはとても重要です。そのためのベースとなる画期的な光ファイバーセンサーの可能性が「HOTALLW」の飛行実証で見えてきました。

### 波長の変化を“面”でとらえる

JAXAが開発を進めている「光ファイバー歪み分布計測システム(OFDR-FBG)」は、光ファイバーを利用して航空機の機体のひずみ具合を測定するものです。機体各部に作用する荷重や応力などの検知には綿密なセンサーシステムが不可欠ですが、ひずみゲージと呼ばれる従来型のセンサーは、取り付け位置だけの“点”で計測するため、膨大な数のデバイスと複雑なケーブル網が必要でした。これに対して、光ファイバーでのセンシングは1本で多点を同時に計測でき、複数の光ファイバーにより“面”でとらえることも可能です。航空機の各部に張り巡らし、いわば生体の神経系のように機体状況を把握するシステムを構築できます。

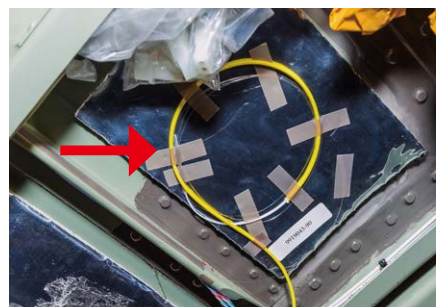
センサーデバイスに相当するのは光ファイバーの中に多数作り込んだFBG<sup>※1</sup>で、屈折率がごくわずかに異なる0.5μm間隔のしま模様です。ファイバーに投入した光はFBGの屈折率が異なるしまの部分でごくわずかに反射し、入射地点に戻ります。反射はしまの間隔に対応する波長の光だけで発生するため、センサーのしまの間隔が変化すると反射光波長のずれが発生します。JAXAは反射光波長のずれの量を連続的に観測して応力や変形を測定するOFDR<sup>※2</sup>技術を開発しました。

### 「飛翔」でリアルタイムにデータ取得できたHOTALLWの成果

2017年に実験用航空機「飛翔」で行った、光ファイバーセンサーで機体のひずみを検知する技術の実証「HOTALLW」<sup>※3</sup>では、2系統の光ファイバーセンサーを主翼下面に設置して、実際の飛行環境下での機能を確認しました。使用したのは2009年からブラッシュアップを進めてきたシステムで、空間分解能(計測点の間隔)1.6mm、時間分解能151Hz(毎秒151回計測)で、26.5mの長さで多点計測を行います。その結果、通常のひずみゲージでの計測値や理論解析で得た値とほぼ一致したデータが得られ、さらに回転時などでの応答性が高くリアルタイム性に優れていることも確認できました。

この技術は空間分解能で1mm以下のポテンシャルがあり、コストの問題を別にすれば計測距離も延長できます。時間分解能も、さらなる開発で演算処理やデータローディング速度などを高速化すれば向上できます。そして、HOTALLWにおける技術的なポイントは、前述した時間分解能や空間分解能などの性能を、計測できる長さに対して十分に発揮させつつ、かつ運用性の高いセンサーシステムとして構築できたことです。実運用への適合性はスペック面に増して重要であり、今回の実証でその方向性が見えました。

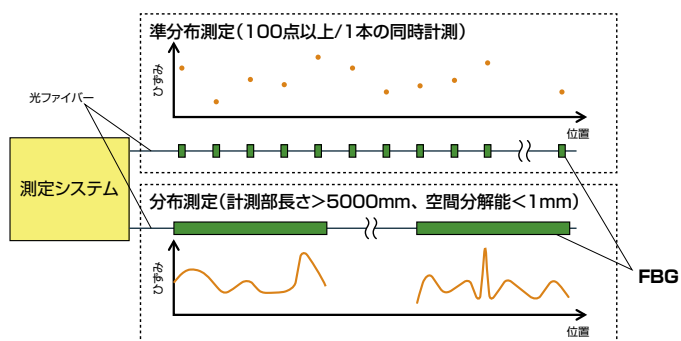
飛行中の機体の詳細なデータが取得で



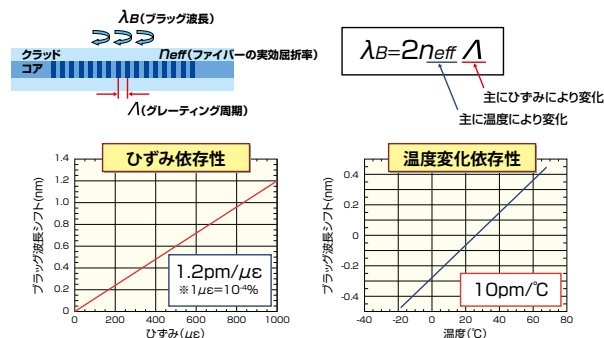
実験用航空機「飛翔」で行ったHOTALLW実証の様子(上)、機体内部に配置された光ファイバー(赤矢印で示した黄色い線)

ければ、機体設計の際に強度などをそれに合わせて最適化でき、将来の機体構造軽量化などに役立てられます。また、航空機の機体状況を常時モニタリングできれば、機体の損傷や変形があってもすぐ把握でき、機体の保守点検作業や航空機運用の効率化にもつながります。

同様のセンサーシステムは海外でも開発が進められていますが、他に先駆けて実際に人が乗るビジネスジェット機での実証に成功した点で、国際的な最先端領域を開拓できたと言えます。



構造物の変形を詳細にモニタリングできるOFDR-FBGを用いた高性能ひずみ計測。100点以上の準分布計測(上)と空間分解能1mm以下の高性能分布計測(下)



FBGを用いたセンシング。部材のひずみに応じてグレーティング部分が伸縮し、反射光の波長が変化する

※1 FBG : Fiber Bragg Grating

※2 OFDR : Optical Frequency Domain Reflectometry (光周波数領域反射測定)

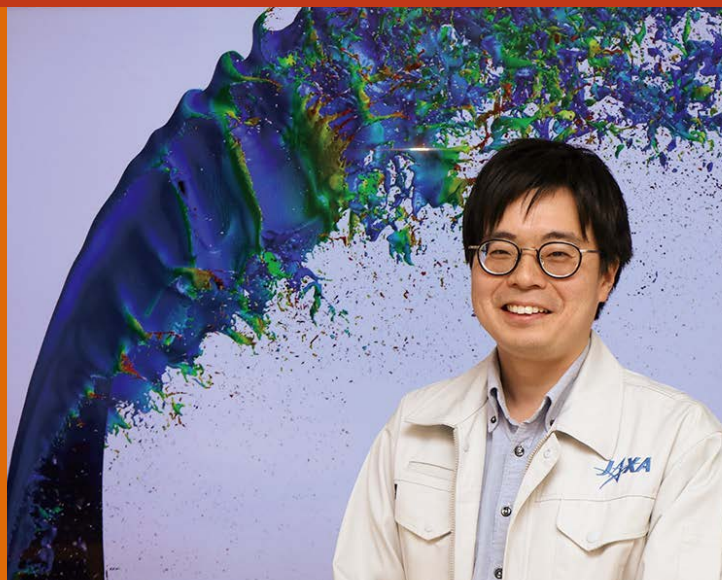
※3 HOTALLW: High performance Optical fiber sensor flight Tests for AirPlane Wing (光ファイバー分布センサーによる航空機主翼構造モニタリング技術の飛行実証)。2016年と2017年に2回実施した

## 世界と戦える エンジン作りを目指し、 数値シミュレーションの 環境を整えたい

数値解析技術研究ユニット 燃焼・乱流セクション  
研究開発員

南部 太介

1987年生まれ。2014年10月早稲田大学大学院基幹理工学研究科博士後期課程修了、日本学術振興会PDを経て、2015年宇宙航空研究開発機構入社。大学では数値シミュレーションを用いた風洞壁干渉の研究に従事。入社後、燃焼器を対象とした数値シミュレーション技術の研究に従事。



エンジン燃焼器のノズルから噴射された燃料の微小な粒の様子をとらえた数値シミュレーションの前に

### ——現在の研究内容について教えてください。

航空機エンジン内の燃焼や乱流現象の数値シミュレーション技術を研究しています。特に力を入れているのは、エンジン燃焼器のノズルから噴射された燃料が細かい粒になっていく過程のシミュレーションです。燃料の粒の大小は燃料の蒸発速度に大きく影響します。噴射された燃料がどのくらいのサイズの粒になり、どのように空間に分布するかを予想することは、理想的な燃焼を実現する上で非常に重要になります。しかし、このあたりの現象はまだよく分かっていない部分が多いです。特に、燃料の噴射口の近傍は実験で計測することは難しく、シミュレーションでの解明が期待されています。ただし、気体と液体が混在した流れであることや、細かく速い現象を扱うため、シミュレーションとしての難易度は非常に高いです。

もう一つ、国の戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)の「革新的燃焼技術」という非常に大きなプロジェクトの中で、航空機やロケットの研究で培ってきた数値シミュレーション技術を活かし「HINOCA」という自動車エンジン用解析ソフトのコアプログラム部分の開発を行っていました。自動車業界の研究現場では非常に短時間で解析結果を出すことが求められており、これは精度を追い求めるサイエンシ的な数値シミュレーションとはまた違った難しさが伴います。しかし試行錯誤の上、従来の手法で

非常にコストがかかっていた計算格子作成に関わるコストをほぼゼロとした、低コストの解析ソフトを作ることができました。

### ——JAXAを目指したきっかけは何ですか。

航空宇宙の研究室に進んだ大学4年の時に、JAXAの技術研修生として風洞の壁の干渉を研究したのがきっかけです。風洞には壁があるので、計測の結果から壁の影響を取り払わないと、実際に航空機が空を飛んでいる状態をつかめません。そこで、壁を含む場合と含まない場合の数値シミュレーションを比較して壁の影響を見るという研究が行われていました。しかし、当時研究対象とした風洞の壁は多孔壁となっており、その影響が大きかったので、私は多孔壁のモデル化をまず担当しました。そこで開発した多孔壁モデルを用いて風洞の壁を含むシミュレーションを行った時、その結果が風洞の測定結果とピタッと一致しました。この時、研究をとても楽しいと感じ、その後、この研究で博士論文を書き上げることとなりました。

### ——今後の目標はどのようなものですか。

航空機エンジンの開発において、予算と時間が潤沢にあれば試作エンジンをどんどん作って試行錯誤ができますが、予算にも時間にも限界があるためそうはいきませ

ん。そこで、開発の初期段階で数値シミュレーションが特に重要な役割を果たします。シミュレーションである程度の当たりをつけてから、実際の詳細な設計に入ると効率的だからです。ただし、航空機形状のシミュレーションなどに比べると、エンジン内のシミュレーションは実際の開発現場で用いようにはまだまだなところが多く、課題はたくさんあります。私の大きな目標は、世界トップレベルのエンジンシミュレーション環境を整備し、日本のエンジン作りが世界と戦っていけるような開発環境を作るということです。航空機エンジンの研究開発の未来については、エンジンを研究している他の若手研究者たちと勉強会をしながら、いろいろな議論を重ねています。

また、良い評判を得ているHINOCAですが、まだ改善の余地があります。HINOCAをより使いやすいものとし、日本の自動車業界に貢献できるようなプログラムにしていければと考えています。

### ——航空技術部門を目指す後輩へのメッセージをお願いします。

JAXAの特に航空技術部門では入社1年目から即戦力として期待されますし、比較的自由に研究できる風土があります。もちろんプロの研究者としてシビアな要求もされますが、私はとてもやりがいを感じています。また、数値シミュレーションの研究者としては、日本有数のスーパーコンピューターで研究ができる環境はとても魅力です。



実験用航空機「飛翔」の主翼下面に直径0.2mm程度の光ファイバーセンサーを貼り付け(写真のオレンジ色フィルムの内側)、実際に飛行して主翼の変形を計測しました。飛行中の機体の詳細なデータは将来の機体構造軽量化などに役立てられます。また、航空機の機体状況を常時モニタリングできれば、機体の保守点検作業や航空機運用の効率化にもつながります。(写真は2017年に撮影したもの)

# H O T A L W

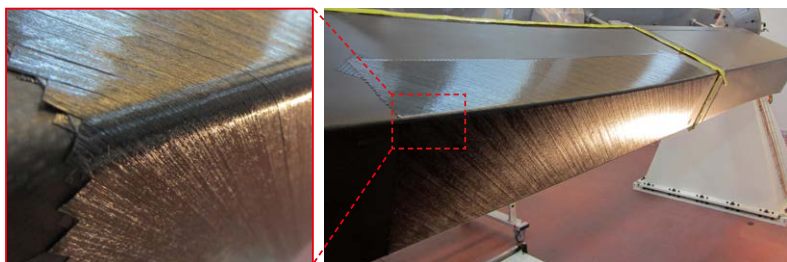
HOTALW(ホタル:High performance Optical fiber sensor flight Tests for AirPlane Wing)

光ファイバー分布センサーによる航空機主翼構造モニタリング技術の飛行実証

<http://www.aero.jaxa.jp/research/ecat/ecowing/hotalw/>

### Cover Photo:

複合材の繊維を束ねたカーボンファイバーテープを、層のように重ねて部材を成形していく。主翼の桁を模擬した型に沿って曲げながら自動で積層するには、高度な技術が求められる(表紙写真は赤色点線部分に寄ったもの)



JAXA航空マガジン  
FLIGHT PATH No.23  
2019年6月発行

【禁無断複写転載】JAXA航空マガジン[FLIGHT PATH]からの複写もしくは転載を希望される場合は、航空技術部門までご連絡ください。

発行:国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構(JAXA) 航空技術部門  
発行責任者:JAXA航空技術部門事業推進部長 西澤 敏雄  
〒182-8522 東京都調布市深大寺東町7丁目44番地1  
TEL 050-3362-8036 FAX 0422-40-3281  
ホームページ <http://www.aero.jaxa.jp/>



古紙/ハルブ配合率80%再生紙を使用



この印刷物は、印刷用の紙へリサイクルできます。



VEGETABLE OIL INK