

# 空と宙

2011 MAY/JUN  
<http://www.ard.jaxa.jp/>

隔月刊発行 ISSN 1349-5577

## 研究開発

遷音速風洞を丸ごと解析する

振動する翼の表面圧力をくまなく計測する方法

## 設備紹介

複合荷重式自動天秤較正装置

## 横路散歩

マッハ数って何だろう？

## 空宙情報

「第10回 宇宙環境からの材料保護に関する国際会議」開催案内  
JAXA 編集の新刊書『航空機研究開発の現在から未来へ』  
をぜひあなたの本棚へ。



「ベストCFDグラフィックアワード」受賞作(P.03)

No. **41**

研究開発本部  
Aerospace Research and Development Directorate

## 遷音速風洞を丸ごと解析する

## 壁や支持が無ければ良いのに

新規に飛行機を設計する際に「風洞」は欠かせません。風洞とは、風を作る装置です。中にある計測部に機体模型を設置し、作った風を流すことで実際の飛行の様子を模擬し、機体に加わる力や表面圧力などを求めることができます。

風の流れ（気流）を一定にするため、計測部は壁で覆われています。模型を宙に浮かせるために支持も必要です。そのため、風洞試験で得られた力や表面圧力の値には壁や支持の影響が入っています。正確な値を得るためには、計測値を補正する必要があります。

壁や支持の影響を調べるには、壁や支持が無い状態で試験をするのが一番です。風洞では困難な試験ですが、コンピュータ上であれば可能です。そこで、JAXAのスーパーコンピュータを使い、JAXA2m×2m遷音速風洞の計測部を丸ごと数値解析しました（図1）。

## 多孔壁と言う名の壁

支持された模型の解析はこれまでも行っています。しかし、「多孔壁」の解析は初めてです。飛行中、飛行機にぶつかった空気は機体を回り込むように曲げられます。風洞の計測部は壁で囲まれているため、通気性が無いと、曲げられた空気の動きを再現することができず、それが計測結果に影響を与えてしまいます。そこで、壁に無数の孔をあけ、その孔を通して気流が自由に行き来できるようにすることで、実飛行に近い気流状態を模擬できるようにしたのが「多孔壁」です。しかし、この多孔壁が数値解析ではネックになってしまったのです。

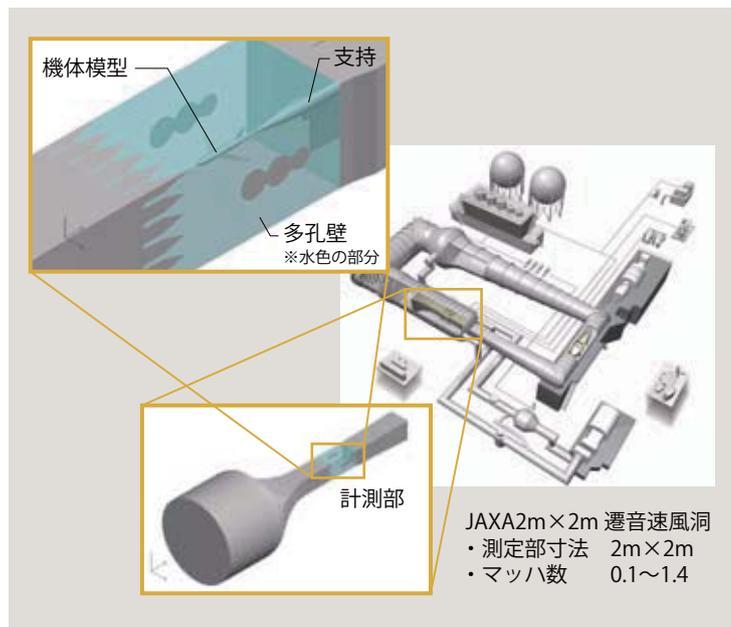


図1 JAXA2m×2m遷音速風洞の解析部分

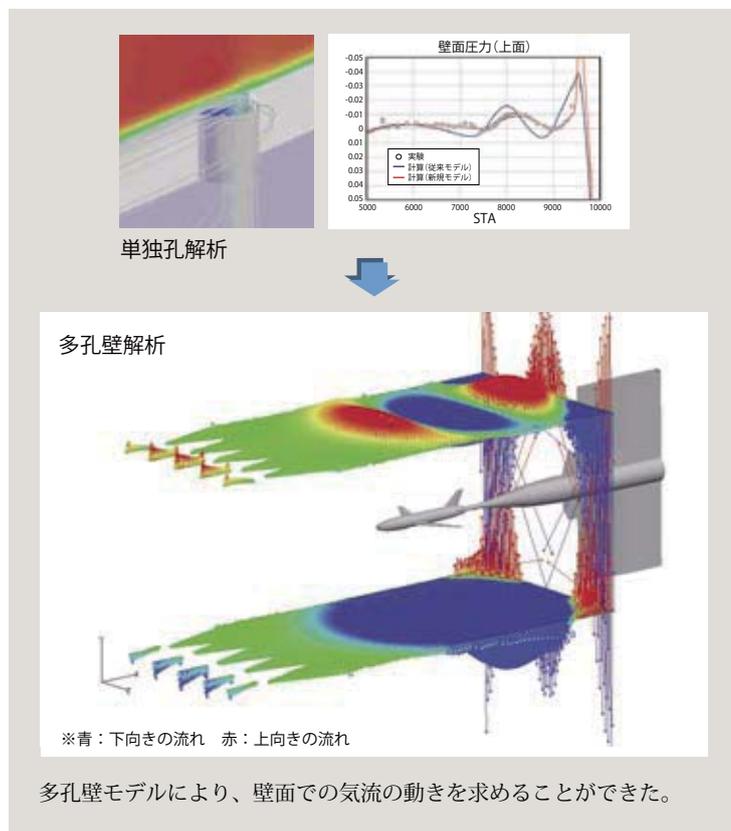


図2 多孔壁のモデル化

この問題を解決するために、まず多孔壁の「モデル化」を行いました。

多孔壁をモデル化するためには、単独孔に対する気流の動きをモデル化する必要があります。そのモデル化は早稲田大学に、それを検証するための実験は名古屋大学に委託しました。単独孔モデルを基に多孔壁の気流の動きをモデル化し、遷音速風洞丸ごと解析の“多孔壁部分の解析”に組み込むことで、風洞全体を丸ごと数値解析できるようになりました(図2)。

### 壁と支持の影響が明るみに

図3は模型のみ(A)、模型と支持(B)、模型と支持と壁(C)がある状態での解析により得られた模型表面圧力を示した図です。(B)から(A)を引くことで支持の影響(D)を、(C)から(B)を引くことで壁の影響(E)を求めることができます。また、(C)から(A)を引くことで壁と支持両方の影響(F)を求めることもできます。この様に、壁や支持の影響を把握するためには数値解析が有効な手段となります。

今回の解析により、壁と支持それぞれの影響のみならず、壁と支持の相互干渉とその干渉量も求めることができました。壁と支持とが相互干渉をしていることは風洞試験を通して予想していたのですが、今回の解析によって初めて確認できました。

今後は、壁や支持の影響を風洞試験の計測値から正確に取り除くためにこの結果を利用し、高精度な風洞試験計測技術の開発に繋がりたいと考えています。

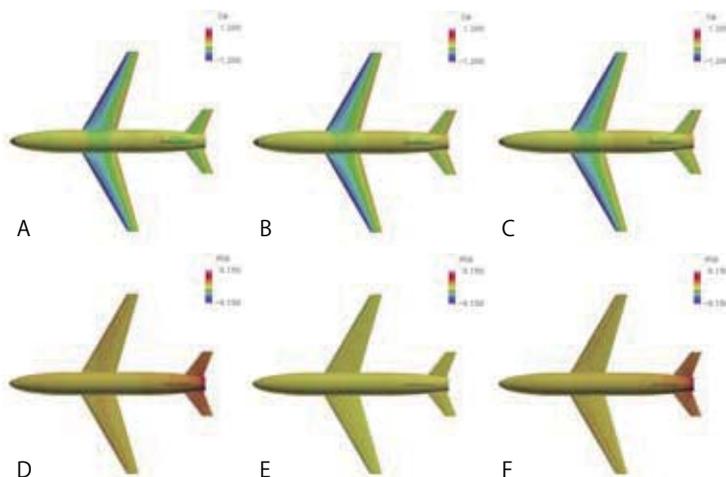
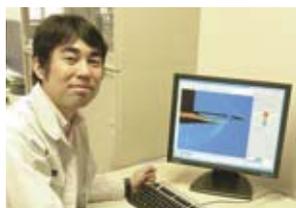


図3 模型表面圧力の比較

### ベストCFDグラフィックアワード受賞



2010年12月、日本流体学会が毎年開催している第24回数値流体力学シンポジウムにて「ベストCFDグラフィックアワード」を受賞しました。この賞は、グラフィックの美しさとその技術力の高さを競うものです。解析結果と画像を組み合わせる表現の新しさと、風洞の壁や支持も含めた解析という技術の高さが評価されての受賞となりました。



【数値解析グループ】橋本 敦



【風洞技術開発センター】古賀、上野、須谷、香西



【国産旅客機チーム】(前左) 山本、(前右) 村山、(後左) 平井、(後右) 田中

## 振動する翼の表面圧力をくまなく計測する方法

### 表面圧力をくまなく計測する方法

従来より、風洞試験にて模型表面の圧力を計測する方法として「圧力センサ」が使われています。圧力センサは点計測な上に、模型に組み込める数も限られています。そこで私たちは、模型全体の表面圧力をくまなく計測することを目指し、「感圧塗料 (Pressure-Sensitive Paint : PSP)」による計測技術の研究を進めてきました。

PSPとは、紫外線などの光を当てることで発光する色素を使った発光塗料です。空気の約21%は酸素で占められているため、酸素が多くなるほど色素の発光が弱くなる性質(酸素消光)を利用し、模型表面の圧力の大小を求めます(図1)。PSPを模型全体に塗装して計測用カメラで撮影することで、圧力を測ることができます。JAXAでは既に、PSPによる圧力計測技術を実用化しています。

### そうだ、PSPを使おう！

風の強い日には、窓に掛かったブラインドがブーンと音を立てて振動することがあります。これと同じ様な振動現象が飛行機の翼でも起こることがあり、「フラッタ」と呼ばれています。フラッタを起こした飛行機の翼は最終的には破壊に至ることもある、危険な現象です。そのため飛行機の翼は、どんなに速く飛んでもフラッタが起こらないよう、十分な余裕を持って設計されています。この余裕の見積もりが正確に行えれば、飛行機の更なる軽量化および高効率化に繋がります。そのためにはまず、翼に働く空気の圧力の状態を計測し、フラッタという現象を詳細に知ることが大切です。

JAXAでは、実際に激しく振動する「フラッタ模型」を使った風洞試験を通してフラッタの解明を進めています。今回、この振動する模型に対してもPSPで圧力を測ってみようと考えました。フラッタが起きた時の翼全体の圧力が可視化できれば、フラッタの発生を予

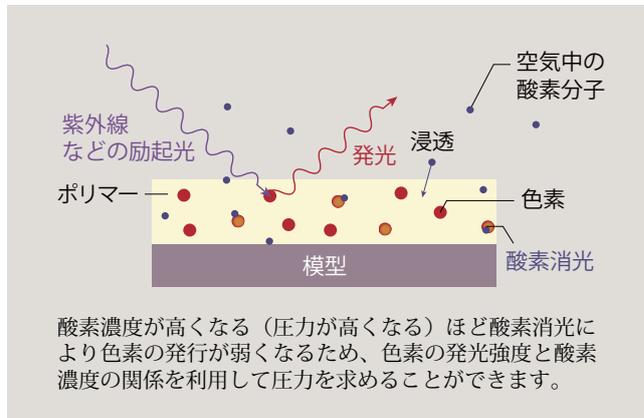


図1 感圧塗料の原理

測するためのシミュレーションに必要な数値解析モデルの確立にも役立ちます。

### フラッタ発生時の翼表面圧力の可視化に成功

風洞試験ではフラッタ発生時の翼は、1秒間に100回以上も上下に振動することがあります。つまり、翼が1周期振動するのにかかる時間はわずか1/100秒とすることです。翼が1周期振動する際の表面圧力を詳細に調べるためには、更に短い時間で圧力変化を計測できなければなりません。つまり、PSPがどれくらい短い時間で圧力変化に反応できるかが鍵となります。

従来のPSPでは、発光色素をポリマーと混ぜて模型に塗装しているのですが、このポリマーが壁となり圧力変化に反応する時間が数秒かかってしまいます。ポリマーを使わず、化学反応を利用して直接模型に発光色素をコーティングする方法も開発されており、この種類のPSPであれば1/1000秒以下という非常に短い時間で圧力変化に反応することができます。フラッタ試験ではこのPSPを使用しました。

カメラに関しては、翼が1周期振動する間に何枚もの画像が撮影できる高速度カメラを使っています。しかし、1枚の撮影時間が非常に短いために画像が暗くなるという問題があります。そこで、強力なレーザー光を使う

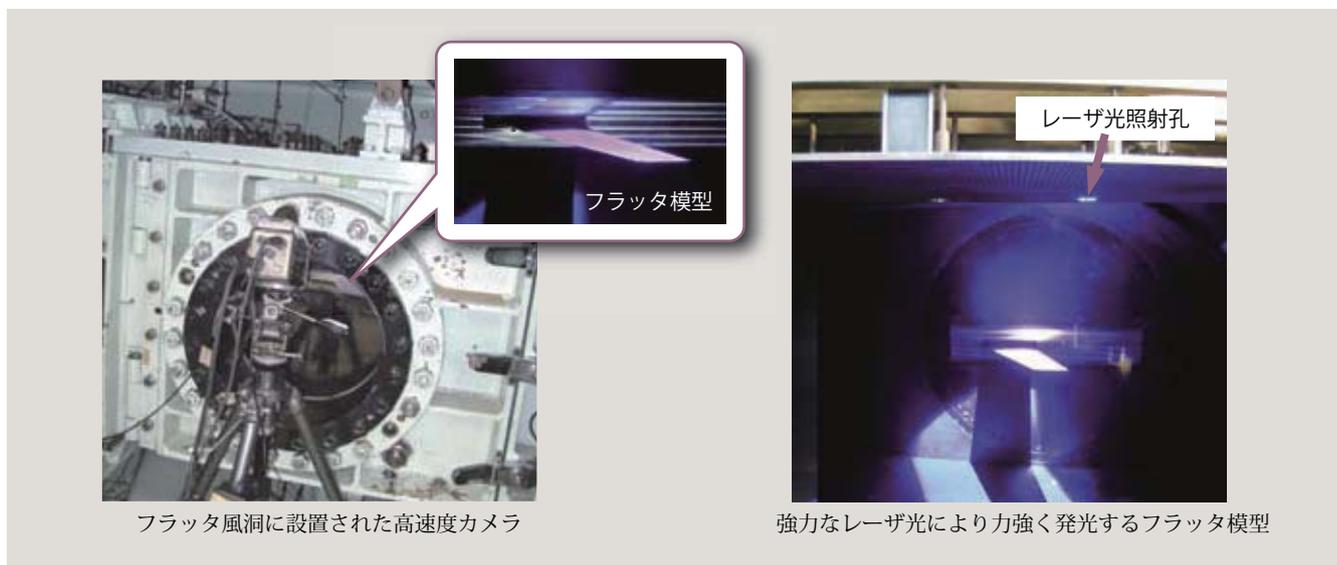


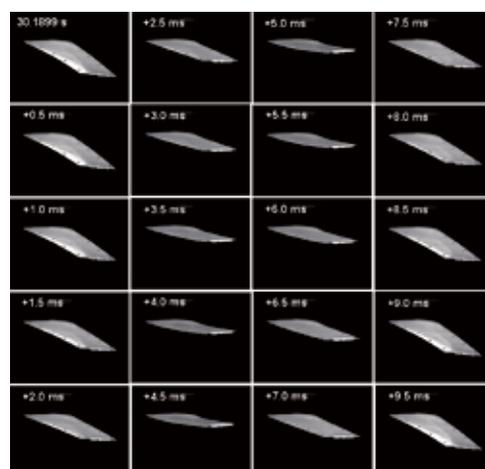
図2 試験の様子

ことで、PSPを従来よりも明るく光らせています(図2)。これらの組み合わせにより1/4000秒という非常に短い間隔での連続撮影を可能とし、フラッタによる圧力変化の様子を捉えることに成功しました(図3)。

PSPによるフラッタ計測の難しさは「速さ」だけではありません。PSPは温度や湿度によっても発光が変化してしまうため、これら圧力以外の影響を補正する必要があります。また、模型の変形による補正も忘れてはいけません。現在はそれらの作業に取り組んでいます。

今回得られた結果はフラッタ発生時の翼表面圧力の変化を良く捉えています。今後は計測技術を確立すると共に、フラッタを予測するための数値解析モ

デルの確立へと繋げることを目指して研究を進めていきます。



白い部分は圧力が低く、黒い部分は圧力が高くなっている。  
図3 PSPによるフラッタ発生時の翼表面圧力の様子



【風洞技術開発センター】【機体構造グループ】

(後列左より) 中島 努、吉本 周生、齊藤 健一  
(前列左より) 中北 和之、玉山 雅人、菊池 孝男  
(右上) 有菌 仁

## 設備紹介

## 複合荷重式自動天秤較正装置

風洞試験で模型が気流から受ける力は、模型内に挿入された「天秤」で計測します（図1）。模型に力が加わると天秤が変形し、その変形量を天秤に貼った「ひずみゲージ」で計測することで模型に加わる力を知ることができます。

模型に加わる力は上下、左右、前後、各軸周りの回転力の6つの力（六分力）に分けることができます。天秤の変形量から六分力を正確に求めることは、航空

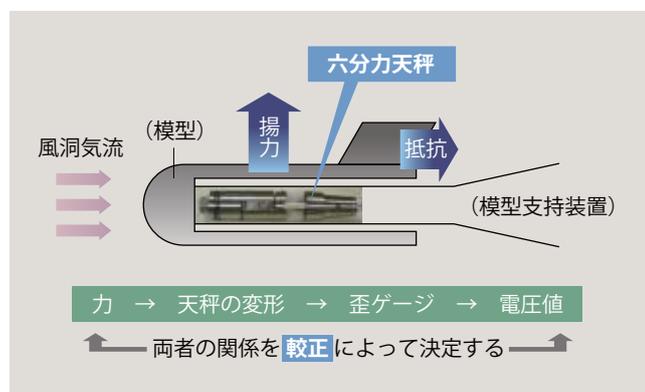


図1 天秤計測の仕組み

機の設計にとって非常に重要です。そのため、それぞれの力の加わり具合と天秤がどの程度変形するかを事前に関連付けておく必要があります。この作業を天秤の「較正」と言います。「複合荷重式自動天秤較正装置（図2）」は較正を全自動で行う装置です。六分力の組合せパターンは無数にあるため、これまでは較正に1ヶ月ほどかかっていましたが、装置の導入により3日程度での較正が可能となりました。

JAXAの複合荷重式自動天秤較正装置の特長のひとつに、「高い精度での温度管理能力」があります。天秤は温度によっても変形するため、装置全体の温度を厳しく管理しています。また、天秤自体の温度は10～50℃の間で調整できるようになっています。これによりJAXA2m×2m遷音速風洞の通風時の温度変化を模擬できるため、実際の風洞試験に近い状態での較正が可能となりました。これらの工夫により、世界トップレベルの較正精度を実現しています。

**高精度の温度調節機能**  
JAXA2m×2m 遷音速風洞試験での使用を想定し、試験中の温度状態を模擬することが可能です。10℃から50℃の範囲で温度を変えることができ、天秤への温度の影響を調べることができます。

**天秤及び較正金具**  
当センターで使用されるほとんど全ての天秤を較正することができます。

**高精度の位置制御機構**  
負荷時の天秤のたわみ分を高精度で戻すことが可能です。位置及び角度の制御精度はそれぞれ ±0.01mm 以下、±0.001° 以下です。この制御機構の工夫により、世界トップレベルの高精度・高効率の実現が期待できます。

**世界トップレベルの高精度／高効率を実現**

**荷重負荷装置**  
六分力の荷重を電動アクチュエータにより複合的に負荷することができます。

最大荷重：垂直力1トン  
変位復元機構有り  
24時間全自動較正  
精度：0.1%FS以下

**作業安全性の確保**  
作業の安全性、容易さを重視した設計になっています。

図2 JAXA複合荷重式自動天秤較正装置

## マッハ数って何だろう？

### ■ マッハ1=音速

「マッハ数」って何でしょう？ “数” と付くから、何か数えられるものでしょうか？

“マッハ1の壁を超える” “巡航速度マッハ0.8” など、飛行機の飛ぶ速さを表す言葉として「マッハ」は良く使われます。マッハ数は“音の速さの何倍の速さか” ということを表しています。“飛行機がマッハ1で飛んでいる” と言えば“飛行機が音の速さで飛んでいる” ことを表します。

音には、気温が低くなると進む速さが遅くなる、という性質があります。飛行機が巡航している高度10kmは地上に比べてとても気温が低く、マッハ1と言った時の速さは地上付近とは異なります。地上付近のマッハ1は時速にすると約1220キロですが、高度10kmでは約1070キロと遅くなるのです。

### ■ 空気の性質は音速に依存

マッハ1と言った時、地上と上空とでは速度が違うなんて不便じゃないのでしょうか？ なぜ、

マッハ数で表すのでしょうか？

空気の性質は、物体の動く速さによって決まります。ある程度の速さで動くとき物体の周りの空気は圧縮されるのですが、空気の性質はこの圧縮に左右されます。物体の動く速さがマッハ数0.3以上になると、圧縮の影響が出てきます。特に音速付近では、その影響が顕著になります。音速を基準とするマッハ数と言う単位は、空気の性質を理解する際に非常に分かりやすい単位なのです。

### ■ マッハ1が重要な理由

飛行機がマッハ0.8で巡航している時、進行方向前方の空気は圧縮されます（図A）。更にスピードを増して音速を超えると、飛行機の前方には「衝撃波」と呼ばれる高圧力の空気の壁が発生します（図B）。この波が地上に届くと「ドンッ」という大きな音（ソニックブーム）が発生します。2003年まで就航していた超音速旅客機「コンコルド」はマッハ2での飛行が可能でしたが、ソニックブームが問題となり大陸上空の飛行が制限されていました。

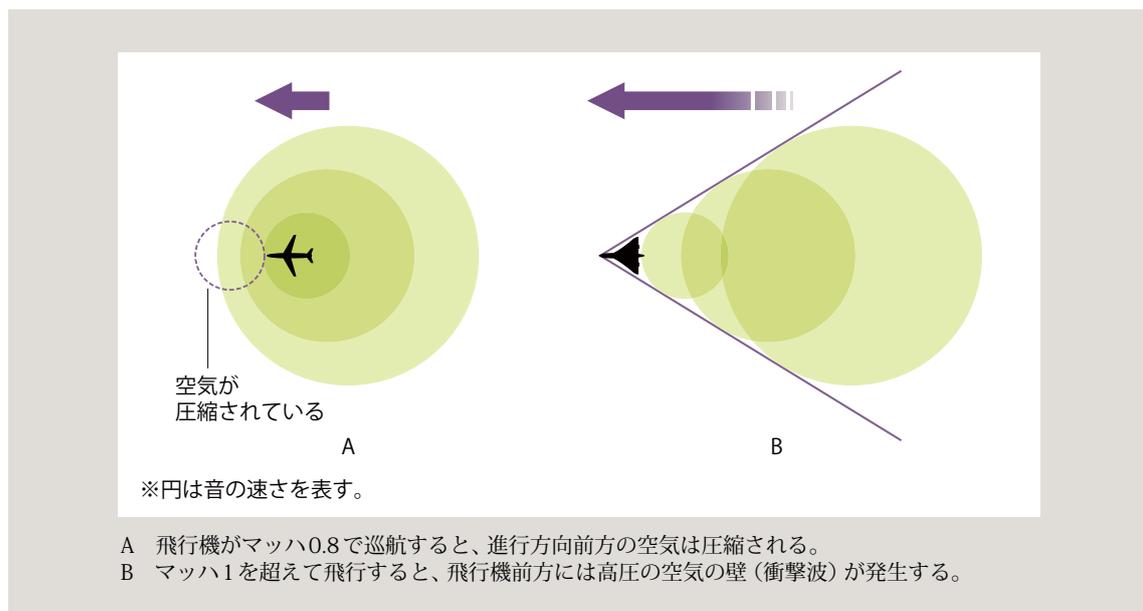


図 マッハ数と空気の圧縮の関係

# 空 宙 情 報

## 第10回 宇宙環境からの材料保護に関する国際会議 「ICPMSE-10J」

### 【開催案内】

スプートニク1号の打上げ（1957年）から50余年が経ちました。宇宙開発にとって材料技術は大変重要であり、各国で研究開発が進められました。

「宇宙環境からの材料保護に関する国際会議（ICPMSE：International Space Conference on “Protection of Materials and Structures from the Space Environment”）」は、主に宇宙材料の分野に携わる技術者、研究者間で知見を交換・共有することによる、世界の宇宙材料技術の発展を目的とした国際会議です。1992年より2年毎に開催されてきました。本会議には、アメリカ、アジア、ヨーロッパの宇宙機関、宇宙関係企業、研究機関から多くの技術者、研究者、マネージャ等が参加しており、宇宙材料に関する国際会議として世界的に主要な会議です。設立の経緯上、北米（カナダ）または欧州（フランス、オランダ）で行われてきましたが、節目となる第10回目をアジア（日本）で開催する方向でJAXAが主導的に調整してきました。

震災の影響はありませんので予定通り開催いたします。詳細はホームページをご覧ください。

（電子部品・デバイス・材料G 木本雄吾）

日時：2011年6月12日～2011年6月17日（6日間）

会場：沖縄県名護市 万国津梁館

ホームページ

<http://www.k-svr.net/icpmse10j/index.html>

## JAXA編集の新刊書『航空機研究開発の現在から未来へ』 をぜひあなたの本棚へ。



2011年3月31日、1冊の本が発行されました。『航空機研究開発の現在から未来へ—技術はどこまで到達しているか』と題されたこの本は、JAXAが発行する「航空分野の本」です。この本の執筆者は、JAXAの研究者たちです。彼らが彼らの言葉で「最先端の航空機研究開発の今」を語っています。

次世代を担う若者に向けた熱いメッセージを、ぜひその目で確かめてください。

編集

宇宙航空研究開発機構

航空プログラムグループ/研究開発本部

定価 1,400円＋税

空と宙 2011年5月発行 No.41

【発行】宇宙航空研究開発機構 研究開発本部 〒182-8522 東京都調布市深大寺東町7丁目44番地1

電話：0422-40-3000（代表） FAX：0422-40-3281

ホームページ <http://www.ard.jaxa.jp/>

【禁無断複写転載】「空と宙」からの複写もしくは転載を希望される場合は、広報までご連絡ください。



古紙パルプ配合率100%再生紙を使用  
リサイクル適正への表示：紙へリサイクル可