



空と宙

2010 MAR/APR
<http://www.ard.jaxa.jp/>

隔月刊発行 ISSN 1349-5577

研究開発

まるでマジック!? 磁石の力で模型を浮かす
窒素の状態、今どんな?

横路散歩

風洞 — 最適なかたちを求めて

空宙情報

感圧塗料による圧力計測を飛行試験にて実施
「施設公開」開催案内

No. **35**

研究開発本部
Aerospace Research and Development Directorate

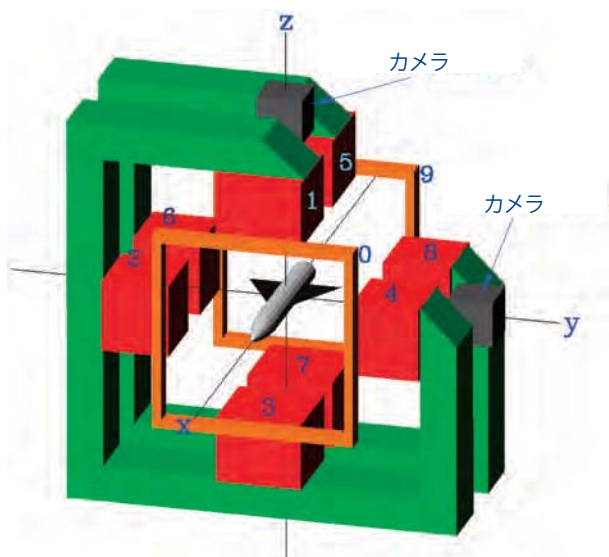
まるでマジック!? 磁石の力で模型を浮かす

磁力支持天秤装置とは？

飛行機をつくりましょう。飛行機は、翼の表裏に生じる圧力差により上向きの力である「揚力」を得て、浮いています。圧力差を生じさせるには空気の流れが必要なため、機体は大気中を前進しており、それに反する力である「抗力」も受けています。一般的に、揚力が大きく抗力が小さいほど性能の高い機体をつくることができます。

これらの力（空気力）を計測するため、機体形状を模擬した模型に対して人工的に空気の流れを作り出す設備である「風洞（P.07参照）」が使われます。風洞では測定部内の所定の位置に模型をとどめる支持棒などの装置が欠かせませんが、この支持部が気流と干渉し、計測値に影響を与えてしまう恐れがあります。

支持部を無くすことができれば、より正確な計測を行える可能性があります。そこで目を付けたのが、



模型を支持するため、測定部の周りには10個の電磁石が配してあります。赤とオレンジで示した部分が電磁石です。模型内部にも永久磁石が埋め込んであり、磁力により風洞内に模型を固定します。

JAXAの磁力支持天秤装置は60cm×60cmの測定部を持つ低速風洞用です。0～45km/sまでの計測が行えます。

電磁石を使った磁力による模型支持です。加えて、模型を支持するのに必要な電気量の変化から模型に作用する空気力も計測できる「磁力支持天秤装置」の研究開発を進めています（図1）。磁力支持天秤装置を使えば、気流中に支持部があることで正確な計測が困難になる場合、例えば飛行船の様な抵抗の大変小さい飛行物体の計測などが可能になります。また、電気量を変化させることで模型を自由に動かせるため、動きのある物の飛行特性などの試験も可能になると考えています。

一步一步、有用性の浸透を

磁力支持天秤装置は様々な試験への使用が期待できるのですが、まだ研究段階の技術のため、広く使われてはいません。装置を普及させるためには、その有効性を伝える必要があります。そのための取り組みのひとつとして、弓道の矢（和弓）の飛行特性に関する試験を実施しています。

和弓は軸が細長いため気流に対して曲がるなどの変形を起こしやすく、支持には工夫が必要です。そのうえ、“回転および正弦波振動をしながらの放物運動”という複雑な飛行運動をしています。和弓の複



一般的な風洞では、模型をスティンクと呼ばれる支持棒で支え、模型内などに取り付けられた天秤と呼ばれる装置で模型に加わる空気力を計測します。

図1 磁力支持天秤装置と一般的な風洞模型支持

雑な運動を模した風洞試験は、従来の模型支持法では不可能でした。磁力支持天秤装置で支持することにより、和弓の運動を模した試験を行い、その空力特性の基礎データを収集しました（図2）。

装置の普及はもちろん、磁力支持天秤装置を航空機や宇宙機の開発に使える技術にすることも私たちの目標です。そこで、有翼形状の標準模型として気流精度試験に用いられているAGARD-B標準模型による試験を行い、データを蓄積しています（図3）。

極超音速機の研究への利用

JAXAでは、音速の5倍（マッハ5）で飛行する極超音速機技術の研究開発を進めています。マッハ5で飛行することができれば、現在10時間ほどかかっている太平洋横断が2時間に短縮できます。

巡航時はマッハ5で飛行する極超音速旅客機（表紙参照）ですが、空港に安全に離着陸できる低速飛行特性も併せ持っていなければなりません。そこで、極超音速と低速の両方でバランス良く高い性能を発揮できる機体形状を数値解析で複数導き出し、風洞試験において最も特性のよい形を選定したいと考えています。通常の低速風洞試験では、模型を支える支持部の干渉によって発生する気流の計測誤差が大きいため、何種類かの支持方法で試験を行い、データを比較することで正確な値を得ています。そのため、全ての模型で飛行制御に必要な空力特性を評価するとなると、膨大な回数の風洞試験が必要になってきます。

磁力支持天秤装置は飛行制御に必要な空力性能を1回の試験で取得できる可能性があります。そのため、この装置を使えば極超音速機のような新しい形状の空力性能評価を効率的に進められる可能性があります。現在は、まだ極超音速機形状を適用した場合の磁力支持方法を試行している段階（図4）ですが、この方法が確立できれば、極超音速機の研究開発における強力な試験手段になると考えています。

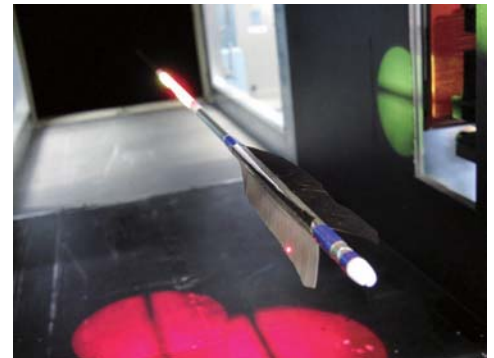


図2 和弓の空力特性データ収集

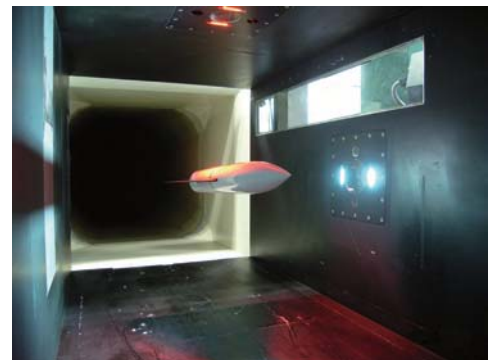


図3 AGARD-B標準模型試験

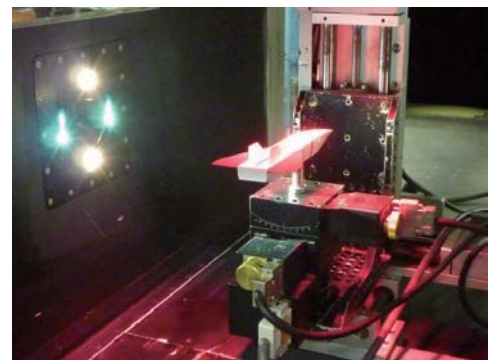


図4 極超音速機磁力支持風洞試験の準備状況



【流体グループ】

（左より）澤田 秀夫、杉浦 裕樹

窒素の状態、今どんな？

再突入を模擬する風洞設備

薄い大気のベールに包まれた青い星に、宇宙機が戻ってきます。宇宙機が地球大気に再突入すると、機体は高温の空気に包まれ、その表面は1000℃以上に加熱されます(空力加熱)。空気の成分である窒素や酸素はバラバラに分解し、一部はプラズマ状態^{*1}になっています。この様な過酷な環境から宇宙機を守るため、アメリカ航空宇宙局(NASA)が運用している再使用型宇宙往還機(スペースシャトル)の

機首や翼前縁部には、炭素系の熱防御材が使われています。

耐熱材料の性能を評価するためには、再突入環境を模擬できる装置が必要です。JAXAではそのための設備として「750kWアーク加熱風洞/110kW誘導プラズマ加熱風洞」を整備しています。

※1 プラズマ：固体、液体、気体に続く第4の物質の状態です。分子や原子からマイナスの電荷を持った電子が飛び出し、自由に動き回っているエネルギーの非常に高い状態ですが、全体的に見ると電気的に中性を保っています。

■ 750kWアーク加熱風洞

アーク加熱風洞は、プラスとマイナスの電極を使ってその間で放電(アーク放電)を起こし、その時発生する熱によって風洞内の気流を超高温に加熱します。

地球周回軌道から大気圏へ再突入しようとする宇宙機の速度は8km/s程度、運動エネルギー(エンタルピー)に換算すると、質量1kgあたり30MJ程度になります。アーク加熱風洞は最大気流エンタルピー約20MJ/kgの極超音速流を生成することができるため、実際に近い熱環境で熱防御材の評

価試験を行うことが可能です。しかし、放電現象として有名な雷が地上に落ちると大きな損傷を引き起こすように、アーク放電によって電極が破損し、気流中にゴミ(コンタミ)として溶け出してしまうという問題があります。

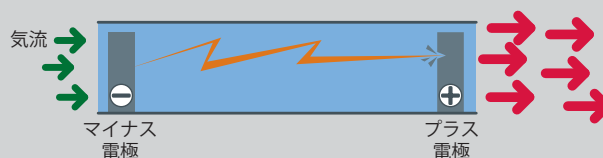


図1 アーク加熱風洞の加熱原理

■ 110kW誘導プラズマ加熱風洞

プラズマ発生装置に巻いたコイルに高周波電流を流し、装置内に誘導電磁場を発生させて誘導電流によって気体を加熱し、プラズマを発生させます。気流圧力が低いためアーク加熱風洞と比べると加熱率が比較的低く、気流速度も亜音速ですが、アーク加熱風洞で問題となる電極の溶融がないためコンタミは発生しません。そのため、再突入時

の実際の気体の振る舞いを模擬することができ、耐熱材料の触媒性^{*2}を調べることができます。

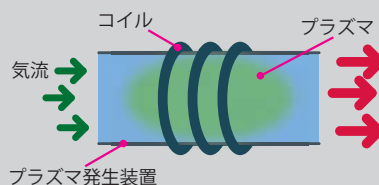


図2 誘導プラズマ加熱風洞の加熱原理

また、アーク加熱風洞に比べて維持管理が簡略化でき、風洞稼働率や機動性を向上することが可能です。

※2 触媒性：解離^{※3}した原子が再結合するのを促進する性質のこと。分子は再結合のときに反応熱を発生するため、気流が汚れていると余計な反応や反応の阻害などが起こり、触媒性を正しく評価することができなくなります。

ガス種をきちんと把握したい

アーク加熱風洞には、コンタミの他にもう1点、問題があります。電極を使って加熱された気流は計測室前方で急激に加速され、極超音速の流れになります。しかし、あまりに急激に加速されるため、気流の化学反応の予測が困難になってしまうのです。

空気の持つエンタルピが10MJ/kgを越えると、酸素分子はほぼ100%解離^{※3}します。しかし窒素は30MJ/kgでも解離しきらない状態です（図3）。しかも、気流を急速に加速すると、このモデル通りの値で窒素が存在しなくなります。つまり、計測部のガス種（窒素の解離や再結合のパーセンテージ）が予測できなくなってしまうのです。

アーク加熱風洞のガス種を正確に把握することは、試験結果の精度向上にも繋がります。耐熱材料の検証は、風洞を使った試験はもちろん、モデルを使った数値解析によっても行います。ガス種が正確に予測できるようになると、数値解析用のモデルを確立することができるため、解析精度を上げることができると考えられます。

そこで、レーザーを使った計測法である「レーザー誘起蛍光法（Laser Induced Fluorescence method：LIF法）」により窒素の状態を計測する研究を進めています。

※3 解離：酸素分子や窒素分子はそれぞれふたつの酸素原子や窒素原子が結合した構造をしています。解離とは、この原子同士の結合が壊れてしまうことです。

LIF法によるガス種計測試験

レーザーとは、原子や分子から発せられる特定の波長の光のことです。原子や分子は、余分に持っているエネルギーを光として放出します。白熱電球や蛍光灯はこの原理で光っており、「自然放出」と呼ばれています。これに対し、特定の波長の光を原子や分子にあて、その波長の光を放出させるのがレーザーです。自然放出に対しレーザーは「誘導放出」と呼ばれています。レーザーはスーパーのレジでのバーコードの読み込みやレーザーポインタなど、とても身近な場所でも使われています。

図4はアーク加熱風洞でのLIF法による窒素原子計測の概念図です。窒素分子は206.7nmの波長を持つレーザーを吸収し、740～746nmの光を発します。

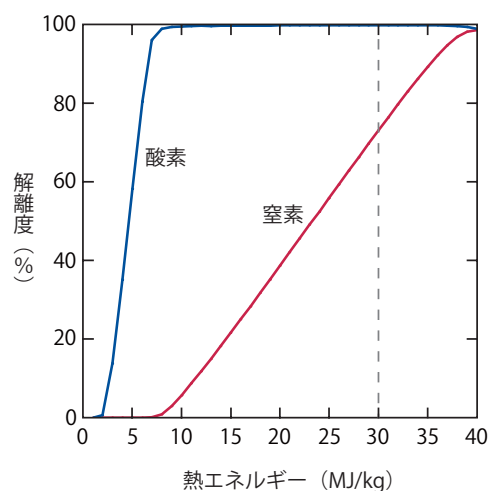


図3 エンタルピに対する酸素と窒素の解離割合

レーザー誘起蛍光法によるアーク加熱風洞内のガス種計測

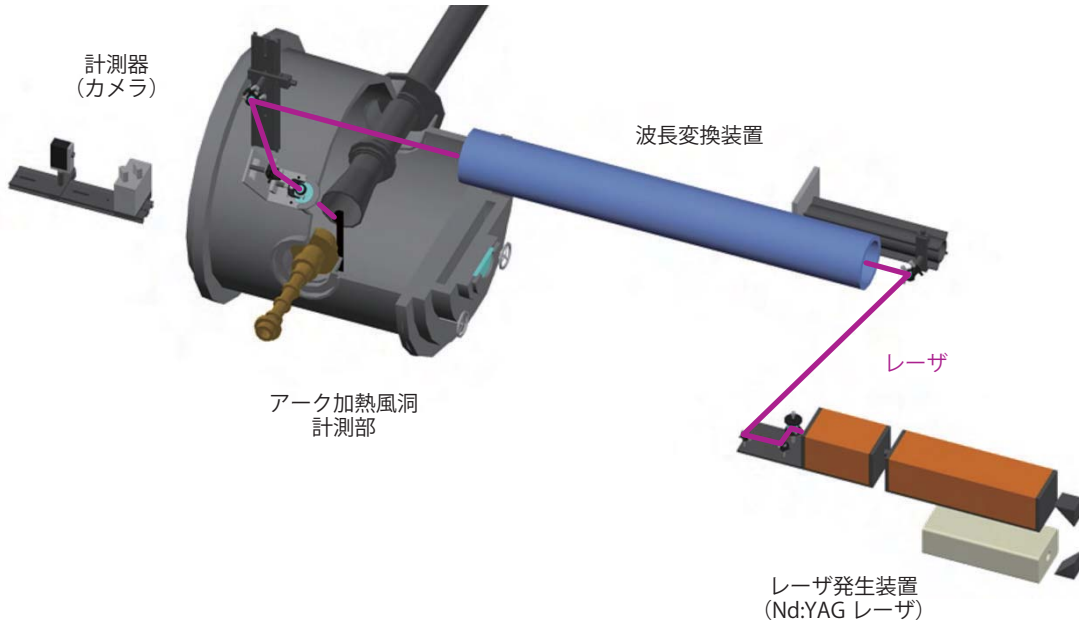


図4 LIF法による窒素計測の概念図

そのため、計測部に206.7nmのレーザーをあて、740～746nmの光を計測することで、気流中の窒素分子の割合を調べることができ、計測部のガス種を求めることができます。図5は計測結果と解析結果の比較図です。値が等しいとは言い難いのですが、グラフ形状はほぼ一致しているため、今後の計測および数値解析の向上により正確な値に近づけることができると考えています。

LIF法による窒素原子の計測はまだ始まったばかりです。今後は、ガス種のモデルが確立している誘導プラズマ加熱風洞にて同様の計測を行い、計測法の妥当性などを検証し、アーク加熱風洞に適用することで、より精度の高い計測を行いたいと考えています。

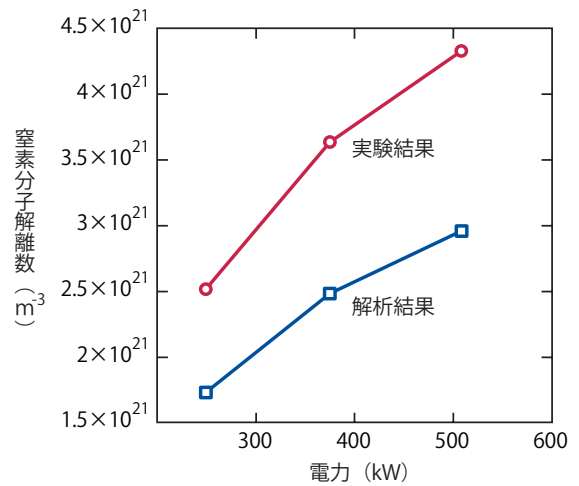


図5 LIF法による実験結果と数値解析結果の比較



【風洞技術開発センター】

(後列左より) 石田 清道、藤井 啓介
(前列左より) 高柳 大樹^{*}、吉田 哲生、水野 雅仁、長井 遵正

^{*} 流体グループ所属

風洞—最適なかたちを求めて

あなたは空飛ぶ乗り物の設計者です。さて、どんな形状にしましょうか？

航空機や宇宙機の形状は、「風洞」という設備を使って機体が空気中を飛んでいる状態を模擬し、その形状の特性を知ることによって決められます。通常、航空機は空気中を高速で飛行しています。風洞では逆に、模型が測定部に固定されており、そこに実際に飛んでいるのと同じ速さの気流を流し込みます。この方法により、離着陸時の低速から、大型旅客機の巡航速度である音速に近い速度、音速を超える速度と様々な飛行速度を模擬することができます。宇宙機が飛ぶ環境を模擬することも可能です（P.04参照）。

航空機、宇宙機の研究開発に使用するため、JAXAには様々な風速の風洞が整備されています。最も古い風洞は1960年に稼働し、それ以降に日本国内で開発された防衛省仕様の航空機など、ほとんどの国産航空機の空気力学特性試験やその評価を行ってきました。また、各種ロケットや宇宙往還機の性能評価試験（図1）でも活躍しています。「極超音速機開発技術の研究開発（P.02

参照）」など、近い未来に必要なになるであろう航空機、宇宙機の開発に必要な技術に関する研究にも使われています。

また、「消防飛行艇の放水空力現象の把握」のため、消防飛行艇を模した模型から実際に水塊を放出し、その振る舞いを調べることで狙い通りの放水が可能かを確認する試験などにも貢献しています（図2）。

風洞は航空機や宇宙機以外にも、自動車や電車などの乗り物や、高層ビルや橋などの気流に曝される建築物など、様々な物の形状を決めるために使われています。スポーツの分野もそうです。2010年2月、4年に1度の冬の祭典である冬季オリンピックがカナダのバンクーバーで開催されました。その競技のひとつであるリュージュ（そり）の空力性能の改善を図るため、JAXAの2m×2m低速風洞が活躍しました。

自転車から空飛ぶ乗り物、様々な大型構造物やスポーツ用品まで、風洞は私たちの身の回りにある様々なものの“かたちを決める”ことにとても役立っているのです。



図1 H-2ロケットフェアリングの性能評価試験



図2 消防飛行艇の放水試験

空 宙 情 報

感圧塗料による圧力計測を飛行試験にて実施

感圧塗料（Pressure-Sensitive Paint：PSP）は圧力に応じて明るさの変化する発光塗料です。PSPからの発光をCCDカメラなどで計測することで圧力分布を画像として計測できます。風洞技術開発センターでは大型風洞にPSP計測技術を整備し、多くの研究開発に活用しています。現在、このPSP計測技術を実際の航空機に搭載し、飛行時の翼の圧力分布を計測する技術を開発しています。航空機での圧力計測は構造強度や空力設計の確認に必要な技術です。通常の圧力計測では小さな孔を設け、圧力センサまでチューブを繋いで圧力を測りますが、航空機の翼内には燃料タンクなどがあり、このような圧力計測が可能な場所は限られます。PSP計測が使えるようになれば機体にPSPシートを貼ることで簡単に圧力を計測できるようになります。

飛行試験はJAXAの実験用航空機クイーンエアを用い、仙台空港を拠点に行いました。左主翼の一部にPSPシートを貼り（図1）、キャビン内に搭載したPSP計測装置で計測しました。PSPからの発光は非常に弱いので、飛行試験は夜間に行いました（図2）。3回のフライト試験を行い、飛行試験でのPSP計測を実用化するための基礎データを取得すると同時に、解決すべき技術課題も明らかになりました。今後、詳細なデータ解析とPSPシートや装置の改良を行い、2010年11月から12月にかけて計画している第2回試験に向けて技術改良を進めます。（風洞技術開発センター 中北 和之）



図1 左主翼に貼り付けたPSPシート



図2 発光するPSPシート

【開催案内】 施設公開

当本部では毎年、4月の科学技術週間に合わせて様々な設備を公開しています。今年もたくさんの方の施設・設備を公開します。各種イベントも開催しますので、みなさまお誘い合せのうえご来場ください。

詳細はJAXAのホームページで紹介しています。ご不明な点などありましたら、各センターに直接お問い合わせください。

JAXA HP <http://www.jaxa.jp>

※ イベントページ（2010年4月）をご覧ください。

筑波宇宙センター

所在地：茨城県つくば市千現2-1-1

開催日時：4月17日(土) 10:00～16:00

キャッチフレーズ

「つくばで発見！ 宇宙がみちびく新たなきぼう」

【お問合せ先】

筑波宇宙センター 広報 電話：050-3362-4881・6265

調布航空宇宙センター

所在地：東京都調布市深大寺東町7-44-1

開催日時：4月18日(日) 10:00～16:00

空への希望が詰ってる！

【お問合せ先】

調布航空宇宙センター 広報 電話：0422-40-3960