

空と宙

2010 NOV/DEC
<http://www.ard.jaxa.jp/>

隔月刊発行 ISSN 1349-5577

研究開発

宇宙空間で電子をシンプルに放出
どんな環境でも円滑に動く

設備紹介

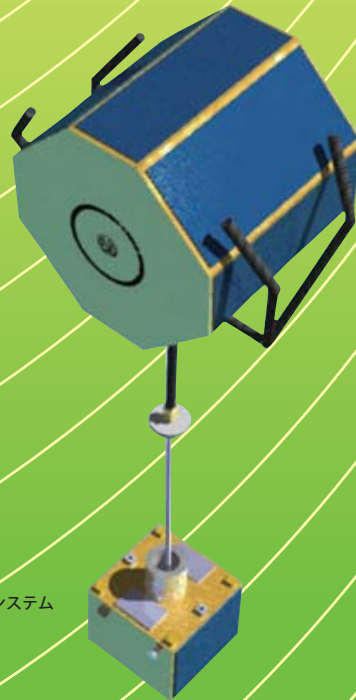
宇宙トライボロジー試験設備

横路散歩

イオンエンジン

空宙情報

極超音速で太平洋をひとつ飛び、離着陸時には安定した低速飛行
・・・そんな「極超音速旅客機」の機体形状を求めています。



小型衛星型除去システム

No. **39**

研究開発本部
Aerospace Research and Development Directorate

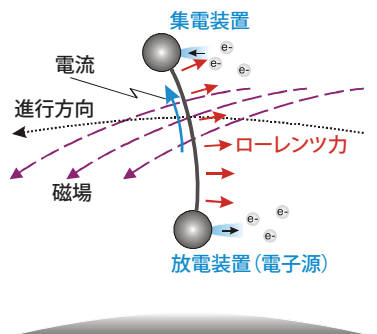
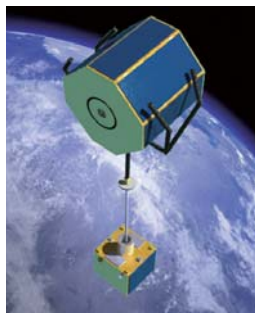
宇宙空間で電子をシンプルに放出

宇宙では電子源が大活躍

2010年6月13日に7年の時を経て地球へ戻ってきた小惑星探査機「はやぶさ」は、陽イオンを放出した反力によって推力を得る「イオンエンジン (P.07 参照)」で宇宙空間を航行していました。イオンエンジンなどの電気推進の動作には、噴き出した陽イオンを電気的に中和するための電子源 (中和器) が欠かせません。

宇宙空間では希薄なガスがプラスとマイナスに電離したプラズマ状態になっており、様々な高エネルギー粒子や紫外線の影響も受けて、人工衛星が電気を帯びることがあります。この「帯電」によって衛星の部位間に高い電位差が生じると、放電を起こして瞬間的に大量の電気が流れ、機器の故障や誤作動などに繋がります。このようなトラブル対策のために、溜まった電子を安全に放出できる電子源が役立ちます。

地球周回軌道上には、役目を終えた人工衛星などの不要な人工物 (宇宙デブリ) が多量に浮遊しています。JAXAでは宇宙デブリを除去するためのお掃除衛星 (図1) の研究開発を進めていますが、この衛星の移動手段である導電性テザーには電子源が欠かせません。



導電性テザーは金属でできており、地球磁場内を横切ることによって誘導起電力が生じます。この起電力を利用してテザーに電気を流し、磁場との相互作用によって力 (ローレンツ力) を発生して速度を変え、高度を変更します。その際、宇宙プラズマとの間で電子のやりとりを行う装置が必要です。

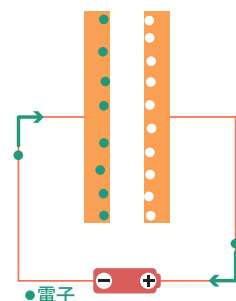
図1 小型衛星除去システムと導電性テザーの原理

シンプルに電子を放出する

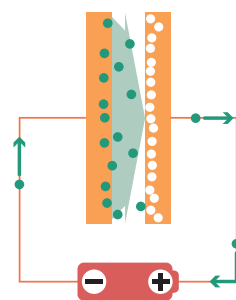
物質に熱を加えると電子を取り出すことができます。電気的な力で物質から電子を引き抜く方法もあります。宇宙機への熱負荷を考えると、電気的な力で電子を引き抜く「電界放出型電子源 (Field Emission Cathode : FEC)」の実現が望まれます。

金属の様な電気伝導性の高い物質でできた板を2枚、平行に配置して電界を加えると、電位の低い方から高い方の板へ電子 (自由電子) が流れ込みます (図2a)。電界を更に高くすると、溜まった電子が放出する「トンネル効果」という現象が起こります (図2b)。放出側に尖った構造を持たせると、低い電位差でも高電界を達成できるため、電子が放出しやすくなります (図2c)。つまり、どれだけ微細な構造を作れるかがカギとなります。

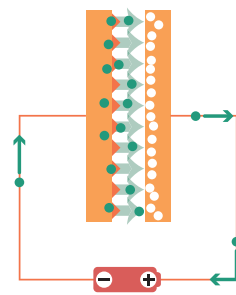
1991年、「カーボンナノチューブ」という、直径1ナノ (10億分の1) メートルから数十ナノメートル、長さは数マイクロ (100万分の1) メートルという微細サイズの炭素原子で構成された物質が発見されました。カーボンナノチューブには、電界をかけるとチューブ先端から容易に電子が放出されるという特性があります。この特性を利用した電子源の研究開発を進めています。



a 導電性の高い物質でできた板を2枚繋げて電界を加えると、電位の低い方から高い方へ電子が移動する。



b 高電界を加えると溜まった電子が板から放出される (トンネル効果)。



c 放出側に微細な尖った構造を持たせると、低い電圧差で高電界を達成させることができ、トンネル効果が起こる。

図2 トンネル効果

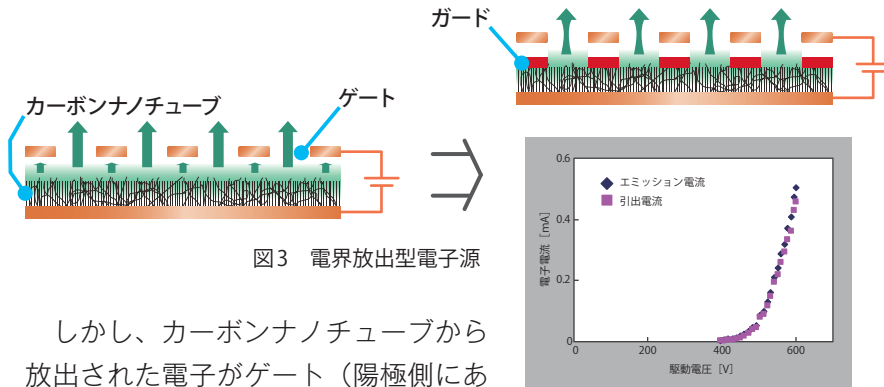


図3 電界放出型電子源

しかし、カーボンナノチューブから放出された電子がゲート（陽極側にある電子が抜けるための微細な孔）を通り抜けずに陽極にぶつかることで電子源内に電気が流れ、電力効率の低下や熱の発生による電極の変形などが心配されます。そこで、陰極側にガードを置くことで放出場所を制限すると共に電子軌道を適正化し、ロス電流が生じるのを防ぐ手法をとりました（図3）。これにより、従来技術よりも効率良く電子を得られることが分かりました。

現在は、この手法による電子源を搭載した導電性テザーの宇宙空間での実証実験を目指して研究開発を進めています。

更なる高効率化を目指す

低電圧下で多量の電子を放出するためには、電極間隔を狭めることが有効です。現在は金属ネジによって電極間を空間保持していますが、電極間に絶縁物を挟む手法（重ね合わせ法）が電極間隔縮小と構造簡素化に有効と考えられます。しかし、電極間の距離があまりに近いと、間の物質の表面を通して電気が流れてしまう「沿面放電」という現象が起こります（図4a）。そこで、絶縁体フィルムをできるだけ

- a 電極間に何かを挟むと、たとえそれが絶縁物であっても、表面を通して電子が移動する（電流が流れる）「沿面放電」が起こってしまう。
- b 電極間に挟む絶縁物を多層構造かつ表面を凸凹にすることで「沿面放電」を防ぐことができると考えられる。

図4 重ね合わせ方の工夫により沿面放電を防ぐ

薄くし、多層にすることで沿面放電を抑えようと考えています（図4b）。

図5は重ね合わせ法によって得られた結果です。従来の電極空間保持方法（図3）と比較して、必要電圧が大幅に低減されており、本方式が有効な低電圧化手段となることが分かります。一方、加えた電力に対して半分しか電子を放出できていないことも見てとれます。これは、電極や絶縁体フィルムを重ね合わせる際に微小なずれが生じているためと考えられます。今後は、組立精度を向上して重ね合わせ法FECを改良すると共に、新たなナノカーボン素材の適用による性能向上を進めていきます。

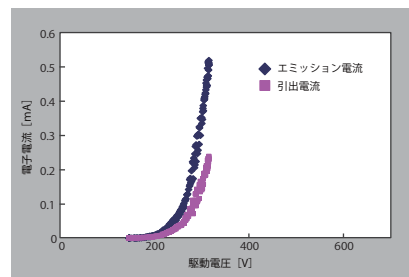


図5 重ね合わせ法による電子放出結果



【未踏技術研究センター】

（左より）松本 康司、大川 恭志、河本 聡美、北村 正治

どんな環境でも円滑に動く

宇宙の機械にも潤滑剤が使われている

床の上に押しでも引いても動かない重い荷物が置かれています（図1左）。同じ荷物が丸い棒を並べた上にも置かれています。そちらを押ししてみると、今度は簡単に動かすことができました（図1右）。この時、棒は潤滑剤の役割を果たしています。

歯車などの様々な部品を組み合わせて作られている機械では、各部品間の摩擦を抑えて動きをスムーズにするための潤滑剤が欠かせません。宇宙でも、それは同じです。宇宙用の潤滑剤には「液体潤滑剤」と「固体潤滑剤」があります。液体潤滑剤としては、地上と同様に油やグリースが使われます。ただし真空かつ無重力と言う特殊な環境のため、蒸発しづらいこと、その量や供給の仕方に対する工夫などが必要です。固体潤滑剤としては、真空中で摩擦係数の低い軟金属や二硫化モリブデン、PTFEという高分子材料が主に使われています。固体潤滑剤を部品の表面に被膜として形成することで摩擦を減らし、スムーズな動きを実現しています。

低軌道は低真空な宇宙

地球の周り、高度2000km以下の「低軌道」と呼ばれる高度では、地球観測衛星などの人工衛星が仕事をしています。様々な国の宇宙飛行士が長期間滞在し、実験や観測を行っている「国際宇宙ステーション



押しでも引いてもびくともしなかった荷物も（左）、床との間に丸い棒を挟んで摩擦を減らすことでスムーズに動かせるようになります（右）。

図1 潤滑剤の概念

（ISS）」も高度400kmの低軌道に建設されています。低軌道では地上と比べて大気もだいぶ薄く、紫外線が多量に飛び交っています。酸素は原子同士の結合が壊れた原子状酸素になっており、コンタミネーション*も多い環境です。このような過酷な環境でも潤滑剤はきちんと役目を果たすことができるのでしょうか。

2001年10月から2005年8月まで、固体潤滑剤を含む様々な宇宙機に使われる材料を搭載した実験装置を3式、ISSのロシアサービスモジュールに載せ、一定の期間毎に回収する宇宙曝露実験を行いました（『空と宙』第14号参照）。

ISSの日本実験棟「きぼう（JEM）」船外実験プラットフォームでも同様の宇宙曝露実験を約8ヶ月間行い、その実験装置は2010年4月に山崎宇宙飛行士と共に地上へ帰還しています。ロシアサービスモジュールがISSの進行方向後方にあるのに対し、JEMは前方にあるため、コンタミネーションの少ない環境になります。各実験結果を比較することで、コンタミネーションなどの宇宙環境が潤滑剤を含む宇宙用材料に及ぼす影響を解明できると考えています。JEM



宇宙曝露実験の結果と地上実験の結果を比較することで、地上模擬実験の最適な手法を得られると考えています。

図2 JEMで宇宙曝露実験を行った固体潤滑剤

曝露実験の各種試料は現在、地上で解析が進められています。

宇宙環境での実験はそうやすやすとは行えません。そのため、宇宙環境の特徴である原子状酸素や紫外線を固体潤滑剤に照射し、その状態などを評価しています。シリコン系の材料がコンタミネーションの原因のひとつと目されているため、固体潤滑剤の表面に付着させ、同様の評価実験を行っています。これら地上実験の結果と宇宙での曝露実験の結果とを比較することで、最適な地上模擬実験の方法を評価できると考えています（図2）。

月の砂は結構厄介

月面は「レゴリス」と呼ばれる細かい砂で覆われています。地上とは異なるこの砂が駆動部分に入り込んだ時でも、潤滑剤がちゃんと機能し機械が動くのが懸念されています。そこで、レゴリスを模した砂（レゴリス・シミュラント）による地上実験を行っています。

図3は実験の概念図です。固体潤滑剤を施した面とローラーとの間にレゴリス・シミュラントを入り込ませ、ローラーを押し付けながら回転させることでレゴリスが固体潤滑剤にどのような影響を及ぼすか評価しました。その結果、従来の固体潤滑剤ではレゴリスによりすぐに摩耗してしまうことが分かりました。そのため、セラミック材料や高分子材料との複合材料などで、硬さや靱性（粘り強さ）の高い材料が新たな潤滑剤として使えないか、宇宙トライボ

レゴリス・シミュラント

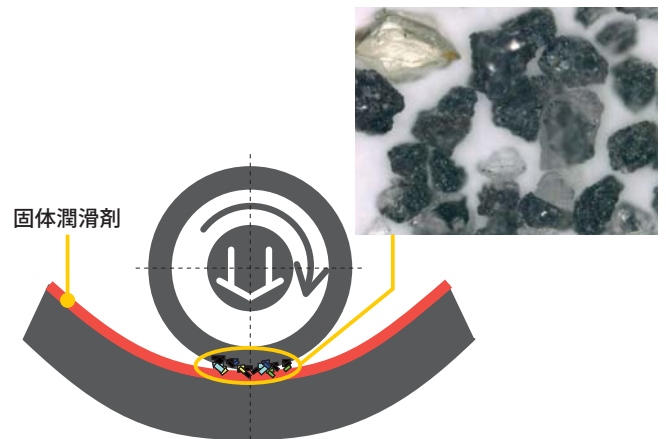


図3 レゴリスが固体潤滑剤に及ぼす影響を調べる実験

ロジー試験設備（P.06参照）を使った評価試験を行っています。

月面には太陽の光が一年中あたらない場所があるなど、地上と比べて大変過酷な熱環境にあります。その様な熱環境でも固体潤滑剤が機能するのかを調べるため、極低温環境による評価試験も進めています。

※ コンタミネーション

水を入れたコップを置いておくと自然とその水が蒸発して行くように、宇宙空間に曝された宇宙機表面からは徐々にガス状の分子が放出されていきます。このガス状の分子はアウトガスと呼ばれ、放出後しばらくは宇宙機の傍に漂っており、計測センサやカメラ、太陽電池パネルなどに再付着してコンタミネーションとなります。コンタミネーションは人工衛星の機器の感度や性能を劣化させてしまいます。



【衛星構造・機構グループ】

（左より）野木 高、松本 康司、鈴木 峰男、塩見 裕

設備紹介

宇宙トライボロジー試験設備

宇宙トライボロジー試験設備は数多くの装置から構成されており、その役割により大きく4種類に分類できます。まず始めに使われるのは、宇宙潤滑剤の膜を供試体に生成させる「潤滑被膜生成装置」です。そして、潤滑剤の付着した供試体は、「摩擦試験装置」で軸受のボールなどの金属を押し付けてこすり合わせる“摩擦試験”を行うことでその摩擦係数や摩擦量を調べられます。さらに、軸受や歯車の様な実際の

機械要素の試験が行える「機械要素試験装置」によってより実用に近い試験を行います。摩擦試験・機械要素試験の後は、X線や電子線を使って供試体の状態を調べる「観察・分析装置」の出番です。

これらの宇宙トライボロジー試験設備を使い宇宙用潤滑剤を総合的に評価しています。その中からいくつかの試験、分析装置を紹介します。



真空ボールオンディスク摩擦試験機・
真空軸受試験機

最も簡便な摩擦試験方法は、ディスク表面にボールやピン形状の試料を押し付けて動かす「ボールオンディスク試験」です。真空ボールオンディスク摩擦試験機では、真空中で潤滑油・グリースを塗布したディスクや固体潤滑被膜を生成したディスクとボールのすべり摩擦における摩擦係数や摩擦によって出てくるアウトガスを測定することができます。

真空軸受試験機では、実際に潤滑剤が使用される主な機械要素である玉軸受の摩擦や寿命を調べることができます。現在はこれらの試験機によって、新しい潤滑剤として期待されているイオン液体^{*}や、イオン液体を基油として試作したグリースの性能評価を行っています。

※ イオン液体は陰イオンと陽イオンのみからなる「塩」の一種で、通常の「塩」は食塩のように固体ですが、イオン液体は常温で液体です。真空中でも蒸発しにくく、潤滑剤としても優れていることがわかってきています。



真空粉塵環境摩擦試験機

宇宙空間が真空であることから、潤滑剤の評価は主に真空中で行われますが、宇宙環境には他にも様々な要素があります。この試験機は、月面の環境を模擬するため、月面の砂を模擬したレゴリス・シミュラントを入れて摩擦試験ができる装置です。その他、温度を低温から高温まで変えて試験ができます。



走査プローブ顕微鏡および組み込み摩擦試験機

走査プローブ顕微鏡はサブミクロン程度の極微小な領域の凹凸をはじめとする様々なものの測定をすることができます。それを真空中で行うこと、また低温から高温まで温度を変化させて測定できることが大きな特徴です。また、摩擦試験装置と一体化されており、試験から測定までの一連の動作を真空状態に保ったまま行うことができます。大気に触れないため、水蒸気やゴミなどが付着する心配がありません。



光電子分光分析装置

X線を試料に照射し、そこから放出される光電子のエネルギーを分析することにより試料表面に存在する元素、化学結合状態を分析します。分析深さは表面から数nmの範囲です。このため、イオン銃でエッチングして表面を削り、深さ方向の分析も行っています。この分析装置で潤滑剤そのものや、摩擦試験後の摩擦痕の表面分析を行い、宇宙用潤滑剤の性能を様々な面から評価しています。

イオンエンジン

■宇宙機には様々な推進系がある

2010年9月11日、準天頂衛星 初号機「みちびき」が種子島宇宙センターからH-IIAロケットで打ち上げられました。重力に逆らい宇宙空間まで人工衛星を運ぶためには、大きな推力を得られる推進系が必要です。H-IIAは燃料(液体水素)と酸化剤(液体酸素)を混ぜ合わせて燃焼することで得られる膨張したガスを噴射し、その反力です。この様に化学燃焼によるエネルギーを利用する推進系を「化学推進系」と言います(図1a)。

化学推進系に対し、物理的な力によって推力を得る推進系を「非化学推進系」と言います。非化学推進系には様々な種類があります。例えば、2010年5月21日に打ち上げられた小型ソーラー電力セイル実証機「イカロス」は、超薄型の帆(ソーラーセイル)を広げ、太陽光による圧力を受けて進む「太陽帆推進系」です(図1b)。

2010年6月13日に地球に帰還した小惑星探査機「はやぶさ」は電気力で推進する「イオンエンジン」を搭載していました。

■イオンエンジンの仕組み

イオンエンジンはイオンを生成する「放電室」とそのイオンを加速する「イオン加速系」、電子を放出する「中和器」で構成されています(図2)。

放電室内をキセノンなどの原子で満たし、電子を衝突させて陽イオン化します。グリッドシステム

には適当な電位が与えられており、陽イオンはそこで加速されて下流に噴射されます。その反力として、推力を得ることができるのです。

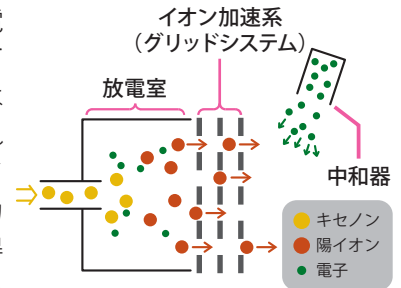


図2 イオンエンジンの原理

噴射された陽イオンに対し、それと等価な電子を宇宙空間に放射することで、宇宙機の電気的中性を維持するのが中和器の役目です。噴射イオンを中和することで安定なプラズマ状態として宇宙空間に滞在させる機能も受け持っています。

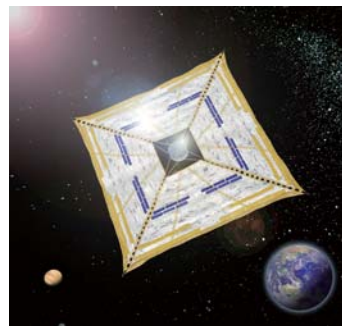
■イオンエンジンは高燃費

推力は“1秒間に噴射される推進剤の量×推進剤の噴射速度”によって決まります。つまり、噴射速度をあげれば、同じ推力を得るのに必要な推進剤の量は少なくて済みます。化学推進系は推進剤が持つ化学エネルギーの量によって噴射速度が決まるため、その速度には限界があります。イオンエンジンは電気力により、化学エネルギーで得られるよりも10倍以上速い噴射速度を可能としました。

同じ推力を得たい場合、噴射速度が速い方が推進剤の消費を抑えることができるため、“燃費の良いエンジン”になります。推進剤の量が同じであれば化学推進系よりも長時間作動させることができるため、長時間噴射することで宇宙機を高速化でき、遠く太陽系の外側までも航行できると考えられています。ただし、発生できる推力そのものは大きくないため、重力に逆らって人工衛星を打ち上げるといった一瞬に必要な推力が大きい場合には使えません。



a H-IIAロケット 轟音を響かせながら高く昇ってゆくH-IIAロケット。打上げ用ロケットは化学推進系の代表です。



b イカロス 縦横20m、厚さ0.0075mmの大きく極薄な帆を広げ、太陽光からの圧力を受けて金星の方向へ進んでいます。

図1 様々な宇宙推進系

空 宙 情 報

極超音速で太平洋をひとつ飛び、離着陸時には安定した低速飛行 ・・・そんな「極超音速旅客機」の機体形状を求めています。

日本を出発してアメリカのロサンゼルス空港へ。現在のジェット旅客機では10時間以上の長旅です。この長旅を2時間に短縮できたら、素敵だと思いませんか？

現在のジェット旅客機は、音速より少し遅い速度（マッハ0.8～0.9）で太平洋を横断しています。JAXAが研究を進めている「極超音速旅客機」は、太平洋を2時間で横断するために、音速の5倍であるマッハ5で飛ぶことを想定しています。それだけ速く飛ぶためには、解決すべき課題がたくさん出てきます。そのひとつに「安定した低速飛行」があります。高速で飛ぶのに低速



私たちが極超音速旅客機の低速性能を調べています。

飛行？ と思うかもしれませんが、低速でも安定して飛べることは「既存滑走路の利用」や「離着陸の安全確保」という観点で、とても重要です。

JAXAではこれまで、マッハ5で飛行するのに適した機体形状の研究を進めてきました。その結果、機体胴体でも揚力を発生する「リフティングボディ形状」の機体を提案しています。この形状では、低速飛行では空気の流れに対して大きな角度をつけて揚力を出すことを想定しています。この場合、空気の流れが機体から剥がれたり、複雑な渦流れが発生したりするため、風洞試験や数値解析を駆使して実際の現象を把握する必要があります。そこで、JAXA 2m×2m低速風洞において、この機体形状の低速域での飛行性能を確認する風洞試験を行っています。

この風洞試験では2つの模型を用意しました。図1の模型では、低速飛行時の操縦性を評価するために、操舵翼の角度を変えて機体に加わる空気力を計測しました。計測した空気力には支持装置が受ける空気力も加わっているため、データを補正する必要があります。そのため、支持装置が受ける空気力も別に計測してデータを補正し、設計に反映できる状態にします。図2は低速飛行時の空力性能を向上させるため、様々な形状を試験するために設計、製作した模型です。この模型では空力現象をより深く把握するため、機体に加わる空気力だけでなく、機体表面の圧力計測も行いました。また、糸（タフト）を模型に付けて流れを可視化するタフト法による流れの可視化試験も行いました。

このように風洞試験技術を駆使して、機体の性能や複雑な空力現象を把握することで、機体開発を進める上での重要な情報を得ることができます。今後は、低速風洞試験によってデータを蓄積し、機体形状設計や飛行制御に反映させることで、極超音速はもちろん低速でも安定して飛行できる機体形状の実現を目指します。



今回の試験では、低速飛行状態での操縦性を確認するために、操舵翼の操作が行える模型を使用しています。機体の姿勢や操舵翼の角度を変え、30m/sの風速で試験を行いました。将来的には、この模型を使った自律飛行による飛行制御試験に繋げて行く予定です。

図1 JAXA 2m×2m低速風洞における極超音速旅客機の低速性能確認試験



高揚力装置である「ストレーキ」や「尾翼」の形状を変えることで低速時の性能がどう変化するかを調べるための模型です。一般的な風洞模型は金属の削り出しによって作られますが、この模型は光造形という方法で作られています。光造形には複雑な形状の模型を低コストで製作できるといった利点があります。

図2 低速風洞試験用極超音速旅客機模型