

JAXAアカデミー

飛行機×無重力=? 飛行力学から考えよう!

Q&A

セミナー中に参加者からたくさんいただいた質問に講師が回答しました。

Q

舵角をつけると、無重力空間でどんな投げ方で投げた場合でも円運動が起こるのでしょうか?

A

前半の講義で説明があったように、舵角を付けた場合、舵角と迎角の釣り合い条件がありますので、その条件を満たすように舵角を調整できれば円運動が作れます。

Q&A

未回答分

Q

今回使ったスカイキングではなく、普段私たちがつくる簡単な紙飛行機でも、ISSで今回のような飛び方になるのでしょうか?

A

舵角と迎角の釣り合い条件を満足させられれば、どんな紙飛行機でも可能です。

Q

紙飛行機のサイズを大きくする
or 小さくすると、実験結果は
どう変わりますか？

A

小さくすると流体力学的な流れの状態が粘性が非常に卓越したものになり、その場合、空気力は速度の2乗に比例するのではなく、速度そのものに比例するようになります。そうすると円運動ではなくもっと大きな曲線的な運動になると考えられます。大きい場合は同様の結果が想像されます。

Q&A

未回答分

Q

もっと小さな紙飛行機で飛ばせば、
壁にあたらずに2周も3周も円運動
するのではないのでしょうか？

A

今回の舵角調整は、ISS内で壁にぶつからずに円運動になるような調整を行いました。そのため、今回のサイズで問題ないと考えていましたが、予想以上に抵抗増加と速度低下が生じていたようですので、もう少し工夫が必要だということがわかり、大変教訓的でした。

Q

薄い金属で折られた同型の紙（金？）
飛行機を飛ばした場合、質量の違いによる
飛び方の違いは発生しますか？

A

形や大きさが同じままで質量が大きくなると、異なる飛び方になります。具体的には、ISS上で飛ばす場合は、旋回半径が質量に比例して大きくなります（ちなみに、地上で下投げする場合も、最初の縦の旋回運動の半径が同様に大きくなります）。また、慣性が大きくなるため、抗力による減速が緩やかになります。

Q&A

未回答分

Q

今回のお話をお聞きする限り、JAXAでは固定翼の研究を盛んにされているのかと思いますが、回転翼の研究などはどのようなことをされているのでしょうか？

A

回転翼機（ヘリコプター等）の性能向上や新分野の開拓に向けた研究を行っています。
詳しくはこちら↓
JAXA航空技術部門WEB
<https://www.aero.jaxa.jp/>

Q

迎角が最初からあること前提でお話しされていますが、紙飛行機は投げた瞬間、空気抵抗が減るように迎角0度で飛ぶと思います。

そこからある程度の迎角になるのは、どのような仕組みでしょうか？

A

投げた瞬間の迎角は、そのときの紙飛行機の姿勢と速度ベクトルの与え方（投げるときの力の伝え方）で決まり、迎角は最初から任意の角度にすることができます。一方、紙飛行機を投げる際、多くの方が、機体の軸を進行方向に合わせ、紙飛行機を通して感じる揚力や抗力をできるだけ小さくしようとする傾向があると考えられます。すなわち、手を離れた瞬間の迎角が0度付近となるように投げることは確かに多いと考えられます。手を離して以降の紙飛行機は、抗力（空気抵抗）が減るように飛ぶのではなく、安定性によって迎角が釣り合い迎角（これがご質問にある「ある程度の迎角」に該当）に収束するように飛びます。なお、重心と空力中心の間の距離が短いと、釣り合い迎角に戻すためのモーメントが小さくなるため、着地するまでに釣り合い迎角へ収束しないことがありますし、速度が速いと、空気力によって飛行中に舵角が変化することで釣り合い迎角そのものも変化してしまうことがあり、投げたら必ず当初想定される釣り合い迎角になるというわけではありません。

（以下、余談）

紙飛行機の競技など、真上に近い角度で投げ上げるような場合は、抗力最小となるように迎角0度で投げるのが距離や時間を稼ぐ上で有利です。これにより最高到達点を高くできるからです。また、最高到達点まで上昇する過程において早くに釣り合い迎角とならずできるだけ小さい迎角を保てるよう（収束を十分遅らせるよう）、重心と空力中心の間の距離をある程度短くするのが有利と思われます（ただし、安定性が損なわれない程度の距離は必要です）。その上で、最高到達点から降下する過程では釣り合い迎角に収束し、その状態を保って滑空するため、この釣り合い迎角が揚抗比最大となるように投げ上げ時の舵角を調整しておくのが有利と思われます。

Q

講師のお二人の好きな飛行機を教えてください!

A

横山:

古い機体だと、SR-71が好きです。独特の見た目や世界最速のジェット機であることに魅力を感じます。また、いま仕事で関わっているeVTOL (electric Vertical Take-Off and Landing: 電動垂直離着陸) 機、いわゆる空飛ぶクルマも一般的に好きです。低騒音であり、離着陸場の制約が小さく、空をもっと身近にしてくれる可能性を大いに持っているからです。

村山:

今は幻になってしまった国産旅客機MRJ(MSJ)です。

設計初期型のスリムでシャープな胴体先頭形状がとても美しいと感じました。

また、ボーイング787ドリームライナーもとても好きです。

炭素繊維複合材を機体構造に大幅に採用することで軽量化と燃費向上を実現し、機内与圧を上げ、湿度も高め、快適性を向上させている点に感銘を受けました。エンジンのジェット騒音を減らすためのギザギザがついたシェブロン・ノズルの採用や、とても大きな窓とボタン操作で透明度を調整できる電子式シェードなど、新技術が数多く盛り込まれて、とてもわくわくしました。

また、超音速旅客機コンコルドにも子供のころに強い憧れがありました。

商業的には成功しなかったと言われていますが、音よりも速く飛ぶ旅客機と聞いて、子供のころにとってもわくわくしました。

Q

学生時代のどんな研究や学びが一番役立ちましたか？

A

横山：

大きな国際学会で研究発表をする経験が一番役立ったように思います。

研究の目的や成果のエッセンスを伝えるための準備作業や、聴衆の反応やフィードバックを踏まえて研究内容のブラッシュアップなどを頑張ることで、研究者として成長できたように思います。

村山：

大学で取り組んだ数値シミュレーションに関する研究です。

複雑な飛行機のまわりの流れをスーパーコンピュータでシミュレーションし、機体性能を予測する新しい技術の開発を行いました。現在、航空機設計のデジタル化が進む中で、この数値シミュレーション技術に関する知識と経験は、今でも自分の強みとなる専門分野の一つとして最も役に立っています。また、横山さんと同じく、国際学会で研究発表を行う経験も非常に大きな学びでした。世界中から研究者集まる場で世界最先端の技術を知るとともに、その中で自分の研究の意義・価値、改善すべき点を見つめなおすことができました。また、国際的なつながりの重要性を実感すると共に、英語でのディスカッション能力が足りてないことを痛感し、その後の成長につながる大きな気づきとなりました。

Q

私は中学生なのですが、今、職業について調べています。
自分のなりたいものを見つけるときにお二人はどんなことを意識していますか？

A

横山：

中高生の頃はなりたい職業が明確にはなかったのですが、「面白いかも」「気になる」の積み重ねで航空宇宙を学ぶことになり、大学の研究室で本格的な面白さに目覚めてこの職業にたどり着きました（最初から航空宇宙が大好きだったわけではなく、何となくからスタートしました）。このように、意識的に何かをしたとは言えないのですが、「面白いかも」「気になる」と思えそうな機会を意識的に増やすこと（その職業の魅力や大変な点についてネットで調べたり実際に仕事をしている人に魅力を聞いてみたりする、機会があれば実際に職業体験をする等）は、なりたいものを見つける近道なのではと思います。

村山：

自分は、これ面白そうとか興味を持ったことを調べたり、学んでいくうちに、少しずつイメージをはっきりとさせながらなりたい職業やなりたい姿を見つけってきました。私自身は、色々なことに興味を持つタイプだったので、これになりたかったものは一つではなく、いくつもあったと記憶しております。実は、自分は大学生になるまで飛行機に乗った経験はほとんどありませんでした。そのため、最初は航空機に対する憧れは持ちつつも、自分の生活にとって身近であった自動車の研究開発にも興味がありました。しかし、大学で機械系の学科に進み、学ぶ中で航空分野により興味を惹かれ、機械航空工学を学ぶようになりました。そこで、航空工学の楽しさ、航空輸送が社会を支える重要な役割、航空工学・産業の技術が他の分野にも広がっていくことを知り、興味が深まっていきました。また、インターネットや本などで情報を得るだけでなく、実際にその仕事をしている人の話を聞くことも、具体的なイメージを持つために、とても大事だと感じました。是非、積極的に大学のオープンキャンパスや職場見学、職業体験など色々なイベントに参加して、いろいろな人の話を聞くと良いと思います！

Q

私はスペースプレーンのような飛行機で宇宙へ行く技術に関心があるのですが、そうした研究においてJAXAが世界をリードする立場となったり、将来ロケットに代わる宇宙への移動手段として活用されていくことはあるとお考えですか？

A

可能性はあると思いますが、課題は沢山考えられます。ですので、JAXA単独ではなく世界的に協力して、それぞれが役割分担して対応していく必要があると考えます。
とにかく挑戦する姿勢が大切だと思います。

Q&A

Q

風切り音が低減すると、その分エネルギー効率も上がるのですか？

A

その通りです。
風切り音は機体が空気にエネルギーを与えた結果として生じますので、その音が下がるということは与えたエネルギーが小さいことを意味しますので、その分抵抗が少なく働いたことになります。よって、エネルギー効率が良くなったと言えます。

Q

空気抵抗による燃費の向上、運動性、安定性の向上について教えてください。

A

航空機の空気抵抗には揚力が働いたときに生じる渦抵抗というものがあります。渦の代表例は翼端渦ですが、その抵抗を下げるための工夫の一つがウイングレットです。従って、ウイングレットは燃費向上に役立ちます。運動性と安定性は相反する側面があります。旅客機は安定性を求め、戦闘機は運動性を求めますので、それらに応じた主翼と尾翼の設計が必要になります。安定性を追求するには、尾翼による釣りあい状態の確保を高めることが大切です。一方、運動性を追求するには、むしろ安定性を下げて操縦性を高めるように設計するのが普通です。なお、ウイングレット自体は、運動性・安定性への影響はほとんどありません。

Q&A

Q

つくばの実験映像、迫力満点でビックリしました！
ISSでは、空気の流れはどのくらいあるのですか？

A

場所により速さは異なるのですが、「ものをなくしたらまず吸気口を探せ」という飛行士もいるそうです。

Q

電動推進機の取り付け場所について質問です。
胴体の尾部や、胴体の上部に取り付けているのはなぜですか？
燃費向上のためとの事ですが、具体的にどのような原理で燃費向上に繋がるのでしょうか？

A

一般にエンジンの推力は流入空気の色度と流出空気の色度の差に関係します。電動ファンでできるだけ大きい推力を得るには、流入空気の色度を少しでも小さくできると効果が出るようになります。胴体後方では胴体面上に発達する境界層と呼ばれる色度の変化する薄い層が発達し、その層の厚さが大きくなります。その層内の色度は壁近傍ではかなり遅くなりますので、その流れをファンに流入させれば、上記の効果の増加につながります。後部に配置する最大の理由はここにあります。またBWBのような胴体と主翼が一体化した形態では幅広い胴体上面に渡って上記の薄い層が広がりますので、その領域を広くカバーするように比較的小さい直径のファンを多数配置できれば、推進効率を改善できる可能性が生じます。

Q&A

Q

紙飛行機の色積も関係しているということは、舵面の舵角だけでなく舵面の色積も速度に関係するのでしょうか？

A

とても良い質問です。
舵面の色積によって舵効きが変わります。大きな色積なら少しの角度でモーメントが大きく変わります。

Q

ISSからほぼ水平にしっかり作った紙飛行機を飛ばしたとき地球には無事に着陸するのでしょうか？
少しでも吸気抵抗を受けると紙飛行機は減速するので空気抵抗で燃え尽きないのではと思うのですが？

A

ISSから飛ばした場合には、そもそもISSの飛行速度(秒速7.7km)から投げた速度が加わることになります。「ほぼ水平」というのがISSの進行速度と同じ方向だとすると、ISSより高い高度に移る軌道に入ります。空気抵抗などの外乱が加わらない場合には、ISSから射出した位置に必ず戻ってきます。一方、進行速度と逆向きに投げた場合には、ISSより低い高度に移る軌道に入ります。この軌道が大気の影響が強い高度に入る場合には、燃え尽きると考えます。

Q&A

Q

揚力、重力が釣り合っている設計をすると、航空機上は安定している(墜落しにくい)安心な飛行機と思いましたが、例えば、操縦がしにくくなる等のデメリットはありますか？

A

釣り合っているとは、操縦しないで安定していることを意味します。機体の操縦とは、今の状態を何らかの理由で変えるために行う動作なので、安定性が強すぎる機体では操縦し難いことになります。ただし、旅客機のような機体では大きな状態変化を作ることには少ないので、安定性を高めておくことが第一で、その次に必要に応じて適切な操縦ができるような操舵面の配置等の設計を行っておけば良いと考えます。なお、旅客機は飛行中、燃料を消費しますので重量が減って行く関係で揚力も変化していくことになります。

Q

最初に説明があったFQUROHプロジェクトやサメ肌をヒントに考案されたりブレットであったり、生き物から着想を得た騒音改善や燃費削減に向けた取り組みは今、他にどのようなものがあるのでしょうか?

A

一例に、イルカの表皮から出る液体による抵抗低減の仕組みを利用するようなideaもあります。飛行機の世界は鳥や魚のような自然界からヒントを得ることが多いです。まだまだ考えられるideaはあると思いますので、今後も挑戦は続けていくべきと考えます。

Q

ISS内の空調は、実験に影響しないように、弱めたり、止めたり、コントロールできるのでしょうか?

A

残念ながら、今回の実験では止められませんでした。

Q&A

Q

円運動をするということですが、飛行機が上に到達した際は揚力は下向きに働くのですか?

A

はい、その通りです。
今回は迎角が付いていますので翼面の下面側から流れが来ます。その時の揚力は上面側に働きます。つまり上面を上方に引っ張る方向に働きます。この状態は円運動して真上に来ても同様に、揚力の向きは常に上面方向になります。ただし、真上では上面が下を向いていることになっている点が異なります。

Q

無重力で真空の場合、
下投げした時に、揚力が働き続けて
上に行き続けるのですか？

A

真空の場合には揚力が働きませんので、
下投げした場合は(どの方向に投げた
場合でも)、その方向に同じ速度で飛
び続けます。

Q&A

Q

宇宙空間にそのまま紙を出すと
どうなるのでしょうか？

A

宇宙空間といっても、宇宙空間のどこかによつて変わります。
ISSのように地球の重力が支配的なところの場合、紙(に限らずどんなものでも)を最初に出した状態(地球から見た位置と速度)に応じて、その点を通る地球を回る軌道上を移動します。その軌道上に地球やその周りの大気があれば、速度が遅くなって地球の中心に向かって引き寄せられます。

Q

今回は紙飛行機が対称翼とみなせるという条件だったので、完全に水平に飛ばすことが出来たと思うのですが、上に凸の翼型を持った模型を飛ばした場合はかならず上方向に向かって飛んで行ってしまうという認識で良いでしょうか？

A

上に凸の翼型でも舵角を調整すれば水平に飛ばすことができるはずですが。前半の講義でも説明がありましたように、釣り合い時の迎角と舵角の調整をうまく行えば良い、ということになります。

Q&A

Q

油井宇宙飛行士の実感としては、速度で半径が変わっていたのでは？

A

円運動になるのは揚力が速度の2乗に比例し、一方遠心力も速度の2乗に比例することから、その半径が速度に無関係になることから導かれます。しかし、抵抗が大きくなりすぎて速度がかなり低下すると、流体力学的に非常に遅い流れの状態に移り、その場合、空気力は速度そのものに比例するようになるため、遠心力とのバランスが崩れて円運動の半径がズレていく結果になったものと考えられます。