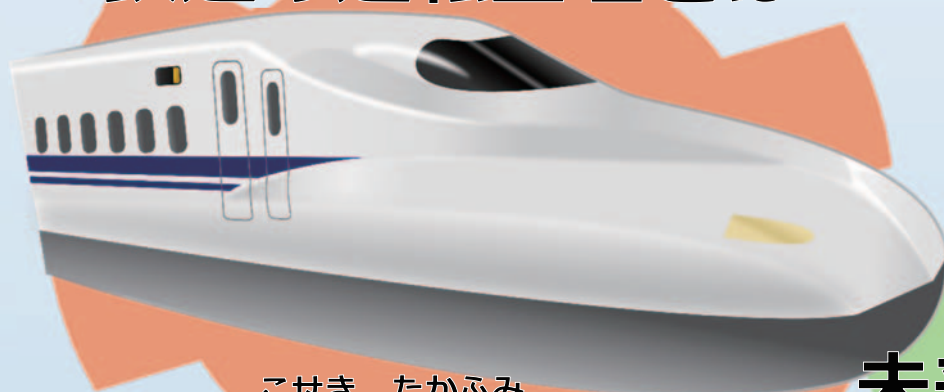


特集

航空宇宙工学科・電気系学科

「乗り物と工学」

鉄道の運転整理とは？

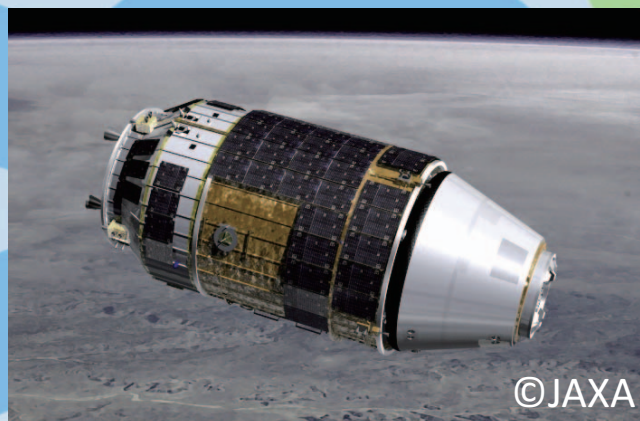


こせき たかふみ
古関 隆章 教授

未来の航空機
設計最前線！



JAXAでつくる
航空宇宙開発の未来



©JAXA

OB取材



りのいえ けんいち
李家 賢一 教授



鉄道の運転整理とは？

皆さんは、何故ある線での電車の遅延が他の線を走っている電車にまで影響を及ぼしているのかと疑問に思ったことはありませんか？

今回、こうした鉄道の運転整理について研究をなさっている古関隆章教授にインタビューを行いました。

まずは鉄道の運転整理について簡単に教えてください。

電車で遅れが生じて一度ダイヤ（列車の運行スケジュール）に乱れが生じたとき、最も効率のいいダイヤを再計画することを運転整理といいます。この運転整理の仕方ですが、駅のホームの混雑などで生じる数分の遅れと、人身事故などで生じる大きな遅れとは大きく手法が異なってきます。

運転整理は現在どのように行われているのですか。

意外かもしれませんが、現在は主に、職人のように引き継がれてきた運転士の経験と勘によって運転整理が行われています。もちろん、この状況にはこの手法を用いるといった定石のようなものはいくつか存在しているようですが、それらをどう組み合わせるに実際にダイヤを立て直すかについては各運転士の経験に基づいて決められています。そこで私は、人間の勘や経験に頼るのではなく、数理的な手法や人工知能を用いたより正確な運転整理法の確立を目指しています。

運転整理の手法について、ぜひ詳しく教えてください。

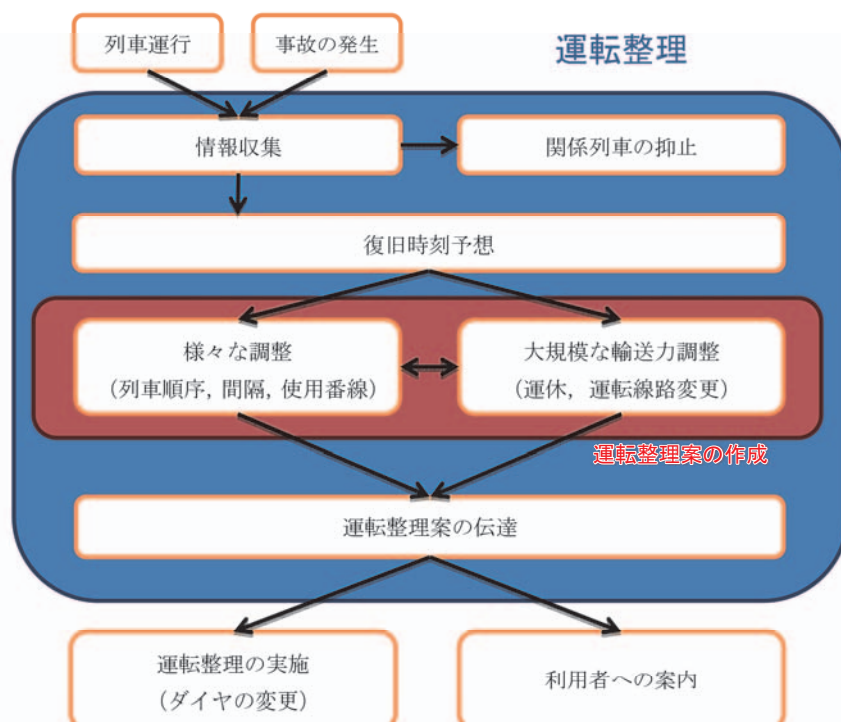
では、まずは小さな遅れに対する運転整理について説明します。皆さんには、後方の電車の数分の遅れにより自分の乗っている電車が一時停車した経験はありませんか。その時は「なんで後ろの電車が遅れているのに待たなきゃいけないんだよ」と思ったかもし

れませんが、これはダイヤの乱れが拡大するのを防ぐのに必要なことなのです。仮にもし、後方の電車の遅れを待たずに前方の電車を走らせ続け、前方の電車との間隔が開いたままにしておくと、駅のホームで後方の電車の到着を待つ乗客の人数も増えるため、遅れが生じた後方の電車への乗客数が通常よりも多くなります。すると、乗車にかかる時間もいつもより多くなって、更なる電車の遅れへとつながってしまい、ダイヤがより乱れてしまうのです。これに対して、人身事故などによる大

きな遅れに対しては、もっと大規模なダイヤの再計画が必要となってきます（下図参照）。現在は元のダイヤになるべく近い形に戻すことを目標にダイヤを立て直しているのですが、私は乗客の損失が最小限になるようなダイヤの立て直しをすることを提案しています。

乗客の損失を最小限にするとは具体的にどのようにして実現できるのですか。

現在は Suica などの交通系 IC が十分に普及していますので、改札の記録をみれば各駅でどれくらいのお客が乗り



図：ダイヤが乱れた場合における運転整理の流れ

降りするのが確認できます。そして、その乗客数データに合うように乗客の移動についてシミュレーションを行うと、乗客がどのように行動するかが再現できます。

ここで、このシミュレーションがどのようなモデルであるのかを簡単に説明します。このシミュレーションでは、全ての乗客はそれぞれ十分な情報を持っており、その情報を元に、目的地に到達するまでに生じるコストが一番小さくなるような選択をすると仮定されています。ここでいうコストとは、目的地までかかる時間、乗り換えで生じる手間、車内の混雑により感じる苦痛度などです。例えば、階段の上り下りを含む乗り換えコストには、乗り換えに必要な時間の他に、階段を上ることにより感じる苦痛度（抵抗値）を付加しています。そして、乗り換えにより短縮できる時間がそうした抵抗値を上回る場合においてのみ、乗客は乗り換えを行うように設定されています。

そして、途中で事故が生じた場合のシミュレーションを行って、通常時と比べて余分にかかるコストをすべての乗客について計算し、その合計が最小となるようなダイヤを採択すれば乗客の被る損失が最小となる運転整理を実現することが理論上可能です。しかし、実際に最適な運転整理の解を求めるにはまだ至っておりません。

なぜ最適な運転整理法を求めることができていないのでしょうか。

一番の大きな原因は、このシミュレーションにおいて乗客が事故の発生を予測できてしまうということです。つまり、始めから事故が起きることを前提としてお客が行動を選択してしまうため、実際の流れとは大きく異なってしまうのです。この問題を解決するには、事故が生じた時に一度シミュレーションを中断し、中断した時の条件を初期条件として新たにシミュレーションをし直す必要があります。しかし、この他にも電車が停車している段階や、何分後に電車が動き

出すのが明らかになった段階など、全部で7段階くらいの分割を行う必要があります、これだと複雑すぎて数理的に解くことができないのが現状です。

ところが近年、混合整数計画法とよばれる最適化手法を応用したモデル化を行うことにより、効率のいい運転整理案の作成が可能となりました。

混合整数計画法とは一体何でしょうか。

整数値を取る変数と実数値を取る変数が混在している問題で最適な解を求める手法を混合整数計画法と呼びます。一般に、この問題の解を求めるのは困難だとされているのですが、近年、精度の高い近似解を求めるアルゴリズムが考案されたため、大まかな解を求められるようになりました。

そして、それぞれの駅において、ある列車が他の列車よりも先に発車するかどうかを0または1の変数、お客が被る損失を連続量の変数で表したモデルを考えます。例えば、駅 s において列車 i が列車 j より先に発車する場合に、変数 $x_{ij}^s = 1$ と表現します。このように列車の動きを0または1の整数、乗客の被害を実数とした混合整数問題の近似解を求めることで、有効な解を得ることができます。

鉄道のシステムについて、運転整理の他に改善すべき所はありますか。

鉄道の分野ではシステムの電子化があまり進んでいないため、もっと効率化を図れるところがたくさんあります。例えば、運転士への伝達を未だ電子でなく紙ベースで行っている鉄道会社がありますが、これを電子メッセージで行うだけでも大きな時間と手間の短縮になります。また、こうしたシステムの電子化の他にも、出来るだけ消費電力の少ない運転方法を採用することや、電車の運動エネルギーや位置エネルギーを電気に変換して再利用するシステムを構築することにより、省エネを促進することができます。

最後に学生に向けたメッセージをお願いします。

実社会で役立つモノを作るまでには自分で多くのことを学ばねばならず、決して平坦な道ではありません。古関研究室では、常に学ぶことに貪欲であり、自分の知識と知恵を活かして社会貢献をしたいという志を持った学生が訪れるのを心待ちにしています。

（インタビューー 和田 崇史）



こせき たかふみ

古関 隆章 教授

工学系研究科 電気系工学専攻

図 1

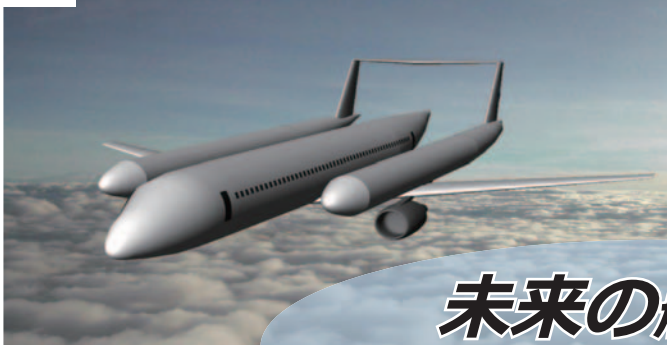


図 2



未来の航空機 設計最前線！

図 3



図 4

図 1：水素燃料航空機。胴体の横に 2 つの大きな水素燃料タンクがついている。図 2：超音速機の例。三角形の主翼が特徴的である。図 3：超音速水素燃料旅客機の外形。図 4：図 3 の機体の設計図。機体前方部に客席があり、機体中央から後方にかけて水素燃料タンクが積まれている。

航空機設計家というと宮崎駿監督作品「風立ちぬ」中の主人公、堀越二郎の姿が記憶に新しい。

今回お話を伺った航空宇宙工学科・李家賢一先生も、小学生の頃にテレビで見たジャンボジェットやアポロ宇宙船の月面着陸に心を動かされ、航空の道を志した一人である。

現代の航空機設計研究者である李家先生に現代版の航空機と、その設計法についてお話を伺った。

水素燃料航空機について教えてください。

飛行機に求められる要素として高速性や安全性など様々な要素が挙げられますが、今重要になりつつあるのが「音が静かで地球を汚さない」という要素です。私たちはこれを環境適合性と呼んでいます。この環境適合性に適う飛行機の候補として、水素燃料を使って飛行機を飛ばすようになるかということを、設計を研究する立場から考えてみました。水素燃料を使うとどのようなメリットがあるのでしょうか。まず、水素は燃やしても水蒸気のみを排出するので温室効果ガスの排出が無くなります。さらに水素は大変軽いので、現在使われている石油燃料と比較すると、飛行機に積む燃料の重さが圧倒的に軽くなるという利点もあります。そこで、ちょうど日本の国内線を飛んでいるようなジェット旅客機を想定して水素燃料航空機を設計した結果が図 1 で

す。胴体の左右に着いているのが水素燃料タンクになります。水素は低密度なので燃料タンクがこんなに大きくなってしまいうんですね。そうすると抵抗が増えてしまうという欠点もありますが、計算上は充分飛ぶことができる設計になっています。「計算上は」と付け加えたのは、現時点では水素燃料自体の値段が高いのでコスト的には成立しないという背景があるからです。もしこれから水素燃料がどんどん安くなっていけば、それを航空機に使うこともあり得る話だと思います。これは将来の話ですね。

超音速航空機について教えてください。

ご存じの方もいるかと思いますが、以前はコンコルドという超音速機が飛んでいました。現在ではもう飛ばなくなりましたが。最大の問題点はとにかくお金がかかることでした。音速を超えると流体

力学的な物理が変わる（数学的には方程式の形がかわる）ところがあって、飛行時の抵抗が増えるんですね。そうすると燃料をものすごく食うわけです。燃費が悪いので運賃も当然高くなります。そこで、超音速で飛ぼうとすると、とにかく抵抗を減らす努力をしなければならない。私たちが設計した超音速機の例が図 2 にありますが、通常の航空機とは異なり三角形の主翼をもっています。このように主翼の形を設計すると、超音速飛行時の抵抗が低減されるのです。しかし、空港に行ってもこのような三角形の主翼を持った旅客機を見かけることはありませんよね。実はこの三角形の翼、離着陸の性能がものすごく悪く、その際の騒音が非常に大きいという負の側面を持っています。コンコルドではこの離着陸時の騒音も大きな問題となりました。さらに超音速機にはソニックブームと呼

ばれる飛行時の騒音も存在します。上空を超音速で飛ぶと、機体が出す音が地上にくるまでに集約して爆音になるという超音速に特有の現象です。以上の話を航空機設計の観点からまとめますと、超音速機を設計する際には、超音速飛行時の抵抗の低減、離着陸性能、そしてソニックブームの低減という3つの要求を満たす必要があります。しかしこれら3つは互いに相反する要求になっていて、そのマッチングをいかにとるかというのが、超音速機を設計する際の腕の見せ所になります。

私たちは超音速機と水素燃料を組み合わせたらどうなるか検討してみました。先程、水素燃料を用いると燃料タンクが巨大になるため抵抗が増してしまうというお話をしました。うまく機体の形を工夫すると超音速飛行時は逆に抵抗が減り、かつソニックブームの低減も同時に行うことができるということが分かりました。軽くて環境にやさしく音も静かな超音速機になる可能性があるということです。私たちが設計した超音速水素燃料旅客機が図3、図4です。機体の形としてはこういう三角形のもので、胴

体の中に燃料を積み、前のところだけにお客さんが乗るという設計になっています。

どのように設計を行っているのでしょうか？

ここでは実際に機体の形を決定していく作業について説明しましょう。設計の際には、まず図5のような絵を書いて最適点を探します。この図では縦軸と横軸が2つの変数を表しています。

斜線が引かれた領域は設計要求を満たさないため、それ以外の領域から設計に適する点を探すと、例えば真ん中にあるD点が見つかるという具合です。これは古典的な図式解法ですが、現在でも航空機設計の初期の段階で使われています。このように、つじつまのあう飛行機を探していく作業が飛行機の設計になります。

とにかく最初はこれで目検討をつけるわけですが、「一番軽い機体」とか「燃費が一番いい機体」を探すにはこれだけでは不十分です。例えば図6に飛行機の主翼の絵がありますが、いろいろな形が存在しますから、人間が頭で考えて一番

良い物を探そうとすると、とても探しきれないんですね。なので、このような場合にはコンピュータを用いて、しらみつぶしに探すということを行います。いろいろなケースにとにかくあたって、一番いいところを探すというそんなイメージです。図7が実際の例です。コンピュータを用いて機体をしらみつぶしに設計し、その機体の重量（横軸）と航続距離（縦軸）をプロットしました。機体は軽くて（横軸左方）長い距離飛べる（縦軸上方）方が望ましいため、プロットされた点の中で、目安としてできるだけ左上に位置する点を設計として採用します。

しかし、コンピュータを使えば機体の設計全部できるようになるかというと、それはあり得ないはずです。飛行機はそんなものではなくて、空気の流を感じながら設計しないといけなはずなんです。それは計算機上に出てこないことです。こういった定量化できないことは人間の価値判断で判断していく。それをやらないといい飛行機にはならないはずですよ。

（インタビュアー 岡田 彪利）

図5

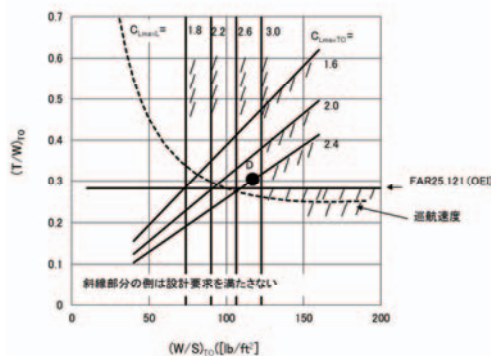


図5：図式解法の様子。

図6：様々な主翼の形。この中から最適な形の主翼を探すためにはコンピュータによる探索が必要。

図7：コンピュータによって機体をしらみつぶしに設計。これらの点の中から、できるだけ左上に位置する点を設計として採用する。

図6

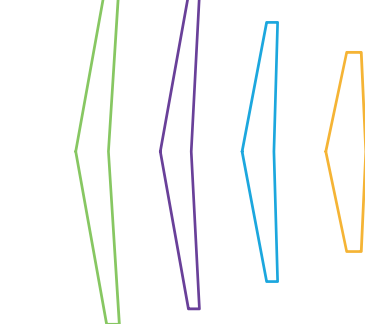
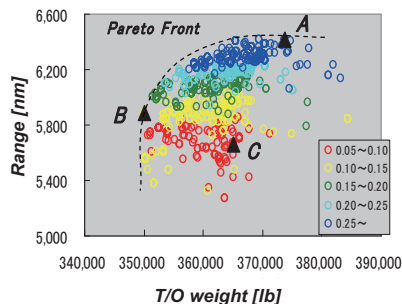


図7



りのいえ けんいち

李家 賢一 教授

航空宇宙工学科

・学生さんへのメッセージ

「学生とか若い人が例えば航空に興味をもってくれたとしたら、その興味を持ち続けてほしいですね。最初に見た夢を追いかけてもらいたいな。それを忘れちゃうと寂しいですから。」

JAXA でつくる航空宇宙開発の未来

日本における航空宇宙の最先端技術を開発する JAXA（宇宙航空研究開発機構）で働いていらっしゃる、また東京大学 OB である古賀さんにインタビューを行いました。JAXA って名前はよく聞くけど、実際にどんな人が働いていて、どのような研究をやっているのだろう…という方は必見です！

古賀さんの研究はどのようなものですか？

JAXA では、国際宇宙ステーション（ISS）に物資を運ぶ HTV（通称、こうのとりの）という補給機に、新たに回収機能を付加することを検討しています。現在、HTV は物資を運んだ後、ごみなどを詰めて地球の大気圏に再突入し、ほとんど燃え尽きてしまいます。しかし、実験の成果物を持ち帰りたいとか、将来的には人も帰還させたい場合には、再突入しても燃え尽きない乗り物が必要になってきます。そこで、再突入カプセルを付けた HTV-R を開発しようとしていて、私は、カプセルが再突入する際の空力に関する研究をしています。ちなみに、HTV-R の R は回収（Recovery）の頭文字です。

HTV-R の再突入カプセルの新しいところは何ですか？

HTV-R の再突入カプセルは、今まで日本になかった新しい技術を使います。有名な小惑星探査機「はやぶさ」も再突入カプセルを使っていますが、これは弾道カプセルと呼ばれる、カプセルの対称軸に重心があるタイプのカプセルです。しかし、弾道カプセルは再突入時の減速が急激で、その分だけ内部の負荷も高くなります。また、着陸、または、着水までの精度もあまりよくありません。そのため、アポロやソユーズといった、人が乗る宇宙船の再突入カプセルは、揚力カプセルと呼ばれるカプセルを使っています。これは、重心を対称軸から少しずらすことによって、再突入カプセルが傾き（迎角）を持ち、上向きの力（揚力）を生みだすカプセルです。これで飛行を制御して、目標地点までの誘導制御精度を向上させます。私たちは、この揚力カプセルを日本で初めて開発しようと研究しています。とはいえ、アポロと同じ再突入カプセルを作ればよいわけではありません。再突入カプセルは形状が変わると特性が変わってしまいますが、私たちは、日本のロケットである H-II B で打ち上げるときに、ロケット先端にあるフェアリング内の空間を最大限に利用できる形状で、HTV-R の再突入カプセルを開発しようとしています。

揚力カプセルの難しいところはどこですか？

一般的なカプセル型の形状は、音速に近い速度（遷音速）において、揺れが収まらない傾向を持つことがあります。この動的不安定性と呼ばれる特性のため、最悪の場合はカプセルがひっくり返ってしまいます。最終的に、カプセルはパラシュートを開いて地上にゆっくり降りてきますが、ひっくり返ったり、振動が大きすぎたりすると、パラシュートが正常に開かず、地面や海に激突してしまうことになりかねません。そのようなことが起こらない

ようにするために、カプセルが飛行中にどのような動きをするのかを、空気力学の試験で検証する必要があります。

古賀さんはどのような研究手法を使われていますか？

私は風洞という試験設備を使って、再突入カプセルの空力特性を把握するための風洞試験をしています。風洞試験とは、巨大な装置を用いて人工的に風の流れを作り出し、その中に置かれた模型に働く力や空気の流れを計測したりする方法です。空気力学における形状の検討方法は、大きく分けて三種類あり、風洞試験の他にも、飛行試験やコンピュータを使った数値解析があります。まず、飛行試験は実際に物を飛ばす実験ですが、実物大の模型を使った試験はコストが膨大になりますので、ここでは、縮尺模型をバリスティッククレンジという射出装置で飛ばして実験します。また、コンピュータを使った解析は数値流体力学（CFD）と呼ばれていて、コンピュータ上でシミュレーションします。これら三種の手法にはそれぞれ長所と短所があるので、連携して相互補完しながら、検討しています。最近では CFD がどんどん発達していますが、まだ、計算に用いるモデルでは実際の物理現象をきちんと表せないこともありますので、風洞試験によって検証することが必要です。

風洞試験は計画が大事です。実際の試験は数週間で行いますが、その前の準備は数か月前から始まります。試験したいケースは数多くありますが、限られた時間の中、どのケースを選択するかを考え、模型の仕様を決定して業者さんに発注します。試験が終わった後も、実験結果の解析があります。効率的な試験を行うには、綿密な計画や作業が必要です。

こが せいご
古賀 星吾 さん

独立行政法人 宇宙航空研究開発機構
航空本部 風洞技術開発センター





古賀さんの左隣に見えるのが極超音速旅客機の模型。音速の5倍の速度で飛行し、太平洋を2時間で渡ることができる JAXA が開発中の機体である。

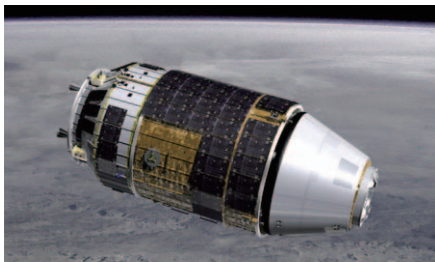
古賀さんが右手に持っているのは、数値流体力学（CFD）を用いて、飛行機にかかる圧力を可視化した模型だ。赤い先端部分にかかる圧力が高い。

左手に持っているものが3D プリンターで製作した再突入カプセルの縮尺模型。将来的に、このカプセルで宇宙飛行士は地球に帰還することができるのだ。



JAXA 調布航空宇宙センターには実際の実験で使われた機体があったところに飾られている展示室もある。これらは一般公開されているので、誰でも見学することができる。三鷹駅などからバスでアクセスできるので、東京在住の方は訪問してみてもいいだろう。

HTV-Rの外観。先端にある銀色の部分が再突入カプセルだ。(C) JAXA



古賀さんは小さいころから航空宇宙工学を志されていたそうですね。

はい、地球と宇宙をつなぐ乗り物を作ることが長年の夢です。そこで、大学では、研究テーマの中に、宇宙まで行ける飛行機「スペースプレーン」があった航空宇宙工学科の土屋先生の研究室に行きました。そして、論文テーマは極超音速機に関する研究でしたが、実は、今でも土屋先生の研究室とは共同研究で関わっています。現在、私の業務は、先程のカプセルに五割、一般的な飛行機の研究に三割、残りの二割が極超音速機の研究といった感じです。カプセルも地球と宇宙を結ぶ乗り物なので、とてもやりがいを感じていますが、将来的には、飛行機のように、一般の人でも気軽に乗って宇宙に行ける乗り物が実現できたらなと思っています。

大学で学んでいてよかったと思うことはありますか？

たくさんあります。まず、私の場合、大学の講義で学んだ「力学」や「航空機力学」などは今も役に立っていて、その当時の教科書を使ったりしています。研究を論文にまとめ、学会発表すること、今の仕事に通じるところがありますね。また、航空宇宙工学科の四年生がやる卒業設計や、有志参加の飛行ロボットコンテストや ARLISS といった大会に出場したことも、モノ作りの楽しさ、チームワークの大切さを体感した良い経験でした。そして、学業だけではなく、人との繋がりが貴重な財産となっています。航空宇宙工学科の同期の人たちが、色々な業種で働いていて、全然違う業界の人もいるのですが、逆にそれが面白い話につながることもあります。少し前に、JAXA 内の有志によるイノベーション創出検討会という活動の中で、様々なサービスを行っている人達と情報交換して、コラボレーションすることもありましたが、大学での交友関係のおかげで「一緒にやらない？」となることができました。

JAXA には多様なプロジェクトがあるんですね！

JAXA で働く人にはそれぞれの業務があり、責任を持ってそれらを遂行しています。しかし、与えられた業務だけではなく、他に何かできないかと考えている人も多くいます。そのような、現時点で業務ではないけど、面白いこと、社会に貢献できることを仲間と一緒に考え、それが芽になって、ゆくゆくは JAXA のプロジェクトになっていくようなになればと思います。要求されたことをやるだけでなく、将来に向けたイノベティブなこともやっていきたいですね。

(インタビューアー 伊藤 秀剛)

風洞の模式図。この機械が50年以上も前に作られたとは驚きだ。





「乗り物」研究室紹介

電気系の乗り物に関する研究をさらに3つご紹介します！



横山研究室では、新たな電力システム「ユビキタスパワーネットワーク（日本型スマートグリッド）」の中で、電気自動車を蓄電池として使用する試みがなされています。

「ユビキタスパワーネットワーク」では、既存の電力供給システムのネットワークに、需要（ビルや家庭）側の蓄エネルギー設備（小型蓄電池や電気自動車など）を組み込んで、それらを情報通信技術でコントロールします。

大崎研究室では、車両に超電導コイルを搭載した超電導磁気浮上鉄道の浮上推進特性や車両運動、および高温超電導技術の適用可能性について研究してきました。超電導体は直流電気抵抗がゼロで、大電流を流すことができます。これにより強磁界が発生可能で、その強さは永久磁石の数倍です。この強い磁界を浮上力あるいは推進力として利用したのが超電導磁気浮上鉄道です。最近では超電導技術を在来鉄道に応用する研究も進めています。



©Central Japan Railway Company.
All rights reserved.

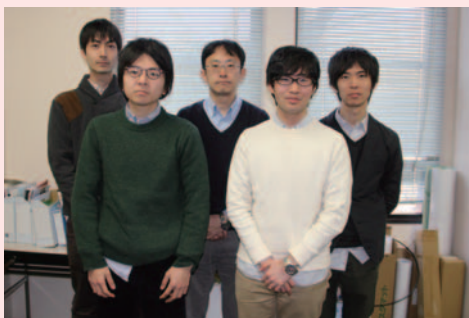


堀・藤本研究室では、バッテリー電気自動車や（プラグイン）ハイブリッド車、燃料電池車など広義の電気自動車の「制御技術」の研究を行っています。電気モータの制御応答はエンジンよりも100倍程度速いことから、高速なフィードバック制御をかけることができ、雪道でも安定に走行する自動車を作ることができます。また車輪の中にモータを搭載し各輪を独立に制御することや、路面状態を正確に把握することもできます。これらの利点をいかし、電気自動車ならではの自動運転制御や緊急衝突回避システムの研究を行っています。

編集後記

今号は航空宇宙工学科と電気電子工学科を、「乗り物」という視点からご紹介しました。工学の研究は、車・電車・飛行機のような身近な乗り物から、再突入カプセルのような宇宙の乗り物まで、様々な乗り物の基盤となっています。乗り物に乗るときはぜひ、それが動く仕組みを意識してみてください！
(企画担当者一同)

(訂正) 2014年8月号 (Vol.61) の裏表紙に記載された「学科名の変遷」に関して一部記載内容に誤りがありました。物理工学科の設立年は1963年、マテリアル工学科の設立年は1999年です。読者の皆様並びに関係者の方々にご迷惑をおかけしましたことをお詫び申し上げます。



<広報アシスタント>

企画：伊藤 秀剛、兼古 寛之、星野彰太郎
伊藤 秀剛、上田 倫久、上野美希子、岡 功、岡田 彪利、
兼古 寛之、勝野 真輝、櫛田 峻裕、黒川 大地、柴山翔二郎、
澁谷 崇、徐 夢荷、白畑 春来、新谷正太郎、龍田 誠、
土屋 美樹、富永 華子、名和 愛乃、花村 奈未、星野彰太郎、
真弓 智裕、本山 央人、森西 亨太、諸隈 夕子、柳本 史教、
柳光 孝紀、和田 崇史

<広報室>

大澤 幸生（広報室長・工学系研究科 システム創成学専攻）
近藤 高志（副広報室長・工学系研究科 マテリアル工学専攻）
今村 太郎（工学系研究科 航空宇宙工学専攻）
川瀬 珠江、永合由美子

<表紙・裏表紙> 星野彰太郎

Twitter、Facebookでも情報を配信しています。

Ttime! Web版もお楽しみください

<http://ut-ttime.net>

Ttime! バックナンバーがご覧いただけます

http://www.t.u-tokyo.ac.jp/public/t_time.html



@UTtime
Follow me



工学部広報誌 Ttime!