

大気のアシストで宇宙輸送システムを革新する
～ ISAS ロケット軍団の「やってみなはれ」活動計画～

宇宙飛翔工学研究系 野中聡

スプートニクが世界初の人工衛星を打ち上げてからまもなく 70 年、アポロが人を乗せて月に着陸してから半世紀以上、スペースシャトルの初飛行からもまもなく 45 年が過ぎようとしています。日本では糸川先生がペンシルロケットを飛ばして 70 年、おおすみさんが日本初の人工衛星として打ち上げられてから 55 年です。最近では、米国の民間企業を中心として、一部を再使用できるロケットが実用化され、打ち上げ頻度も上がり、ようやく本格的な宇宙事業が世界各国で展開され始めたことはみなさんご存知の通りです。

ISAS では、宇宙輸送システムの革新を目指して、高頻度で再使用できるロケットの実践的な研究に取り組んできました。100 回以上の繰り返し使用が可能な液体水素／液体酸素ロケットエンジンを開発するとともに、安全かつ効率的な繰り返し運用に必要な技術を小型の実験機などで獲得してきました。これらの技術は再使用ロケット実験機 RV-X に搭載され、いま飛行実証の準備を進めています。ここで得られる成果は、今後基幹ロケットの 1 段再使用化に向けた活動に引き継がれるとともに、国内の民間による再使用ロケット開発の礎となり、「再使用できるロケットの研究」は一定の技術レベルまで達成できたと考えます。では、次に ISAS ロケット軍団が一丸となって取り組むべき輸送系研究の柱とは何でしょうか？

物や人を宇宙に届ける乗り物であるロケットは、使い捨てから繰り返し使えるものへ、あるいは、使い捨てでも 3D プリンタの活用などにより低コストで製造するなど、その運用方法や製造技術において、特にこの 10 年ほどで大きな変化が見られるようになりました。一方で、ロケットの中で最も重要な構成要素である加速するための推進システム、いわゆるロケットエンジン（ここでは液体ロケットとする）は、性能や耐久性の向上を目指した改良などは行われているものの、その仕組み自体は、半世紀以上前から大きな変化はなく、古い技術を少しずつ良くしながら使っています。

液体ロケットには燃料と酸化剤が積まれ、それらをエンジンで混ぜ合わせて燃焼させ、そのガスを噴き出すことで推力を得ます。液体水素を燃料とする場合には、液体酸素を酸化剤とし、それぞれをタンクに入れてロケットに載せます。ロケットでは宇宙に到達するのに必要なすべての酸化剤を搭載しますが、もしこの酸素を大気から取り込むことができれば、搭載する液体酸素の量を大幅に減らすことが可能となります。大気中を航行する航空機は、燃料だけを搭載して空気中の酸素で燃焼させて推力を得ていますが、その考えを宇宙輸送機に

も適用する、ということです。この仕組みによるエンジンを宇宙輸送システムでは「空気吸い込み型エンジン」と呼びます。このエンジン（エアブリーザ）が実用化できれば、ロケットエンジンの燃費を表す比推力は飛躍的に向上し、機体規模の大幅なコンパクト化が可能になります。

古臭いロケットエンジンを革新して、大気を利用することで推進効率を飛躍的に向上させ、スペースプレーンによる宇宙輸送を実現する。実は、考えとしてはもう何十年も前からあるのですが、実用化どころか、実証機でさえ数えるほどしか飛んでいません。これまでに考えられてきた空気吸い込み型エンジンはラムジェットやスクラムジェットなどの高いマッハ数（ >5 ）での作動を狙うものが中心です。高速で飛行しながら空気中の酸素を取り込み、エンジンで適切に燃焼させて十分な推進エネルギーを得るためには、技術的なハードルが高いというのが現状です。また、高速域だけが作動範囲となれば、離陸からの低速域での加速をどうするか、という運用面での課題もあります。

ロケットはほぼ垂直に離陸上昇し、できるだけ早く空気の層を抜けて、空気抗力によるエネルギー損失を少なくするという飛び方をします。一方、空気吸い込み型エンジンを載せた輸送システムは、大気中を適切な高度でほぼ水平に揚力飛行しながら加速する、という考え方が一般的です。もし、垂直に上昇するロケットでも、離陸から空気吸い込み型エンジンを作動させて加速上昇し、ある高度でロケットエンジンに切り替えてさらに加速するという運用ができれば、ロケットの打ち上げ性能の飛躍的な向上が期待できます。離陸から低速域でも作動できる空気吸い込み型エンジンができないか。低速域での作動であれば、高いマッハ数域での技術的な困難を伴わず、システムを簡素化して早期に実現できるのではないか。それをロケットエンジンと組み合わせることで、推進性能を大幅に向上した新しいロケットができないか。垂直離着陸型の再使用ロケットにこの空気吸い込み型エンジンを載せれば、コンパクトで高性能な新しいシステムを構築できるのではないか。これまでの発想をちょっと変えるだけで、ワクワクするアイデアが浮かんできます。

そこで我々は、大気をうまく使うことで宇宙輸送システムを革新することを目指した「再使用型宇宙輸送システムにおける大気アシスト飛行の実証研究」を立ち上げました。垂直発射方式のロケットに対して、空気吸い込み型エンジンを本格的に導入し、地上から宇宙まで、宇宙から地上までをつなげる新しい推進システムを構築することにより、打ち上げ能力の飛躍的な向上と効率的な繰り返し運用を目指した世界初の挑戦です。

現在、この研究の鍵となる、空気吸い込み型エンジンであるエアターボエンジンとロケットエンジンを組み合わせた ATRIUM エンジン（Air Turbo Rocket for Innovative Unmanned Mission engine）の開発に取り組んでいます。例えば、高度 100km 以上まで到達するサブ

オービタル型の再使用ロケットを想定した場合、総推力 20kN の ATRIUM エンジンを 4 基搭載し、高度 0～5km までの低高度はエアターボエンジンで、高度 5～30km の中高度はエアターボとロケットの両エンジンの併用で、高度 30km 以上ではエアターボをカットオフしてロケットエンジンで加速する、という運用を考えています。また、宇宙から帰還の際には低高度でエアターボエンジンを再着火して減速し、地上に軟着陸します。エアターボは、推進効率の向上だけでなく、ロケットエンジンと比較して音響の影響が小さいため、再使用ロケットの離着陸時の振動環境条件も大幅に緩和できます。このエアターボ／ロケット複合エンジンである ATRIUM エンジンを実現するにあたっては、既にロケットエンジンは成熟した技術があるため、まずは再使用ロケットの垂直離着陸フェーズで作動させることができる空気吸い込み型エンジンであるエアターボの開発を進めることが重要です。

これまではエンジンの開発を中心に取り組んできましたが、もちろんエンジンだけ作っても意味はありません。低速域で作動し、推力調整も可能なエアターボエンジンを構築し、それを実験機（FTB：Flying Test Bed）に搭載して飛ばしてみる。「飛ばすためのエンジンを作る」、機体に載せて「飛ばしてみせる」、当たり前のように聞こえるかもしれませんが、これがロケット屋の仕事としてとても重要です。地上で性能が出ればいいや、ではダメです。そこでいま開発を進めているのが、小型の FTB に搭載するための推力 10kN 級の ATRIUM エンジンです。高い比推力を目指すだけでなく、着陸時に必要な応答性の高い推力制御機能を持たせるとともに、機体に搭載できるように軽量かつコンパクトで整備性の高いエンジンに仕立てます。

このエンジン（エアターボ）を使った小型 FTB の最初のステップとして、ほんのちょっともいいので機体を浮上させる実験を、能代ロケット実験場で来年度までに実施する計画を立てています。飛行環境でエンジンが正常に作動するのか、環境条件がどの程度改善するのか、効率的な運用ができるのか、などを実際に飛ばすことで確かめます。ATRIUM エンジンは複数の民間企業からも開発が期待されており、実用化に向けた早期の実証が求められています。この小型 FTB による実験では、これまでの再使用ロケットの研究で獲得してきた技術を応用するとともに、RV-X で開発してきた既存コンポーネントや地上設備も最大限活用して、スピーディーに実行します。取り扱いやすい「小型」の FTB で ATRIUM エンジンの有効性を実証することが、その先に繋がる技術を短期に獲得するためのキーポイントです。この小規模かつ実践的な活動をシリーズ化し、次のステップではより高い高度までの垂直離着陸飛行による飛行自在性の実証、さらにはより高速域での空気吸い込み型エンジンの実証に繋がる水平揚力飛行の実験に発展させ、ステップバイステップで短期に技術を獲得できる計画とします。

これまでの ISAS の将来輸送系の研究では、大きく分けて「再使用組」と「エアブリーザ組」

が、それぞれが思い描くシステムの最終形態に向けて、それぞれが信念を持って研究に取り組んできました。再使用組は「既存技術最大活用」により「垂直離着陸」で「高頻度運用」を、エアブリーザ組は「革新的エンジン」により「水平揚力飛行」で「極超音速飛行」を、実現するそれぞれのシステムを目指してきました。見方によっては、輸送系はそれぞれが好きなことをやって、仲良くやっていないように見えたかもしれません。実際には全然そんなことはないのですが（たぶん…）、将来へのアプローチの違い、それを主導するリーダーの考え方の違い、などにより、ひとつにまとまった大きな柱となるような活動ができずにいた、というのは事実としてあると思います。

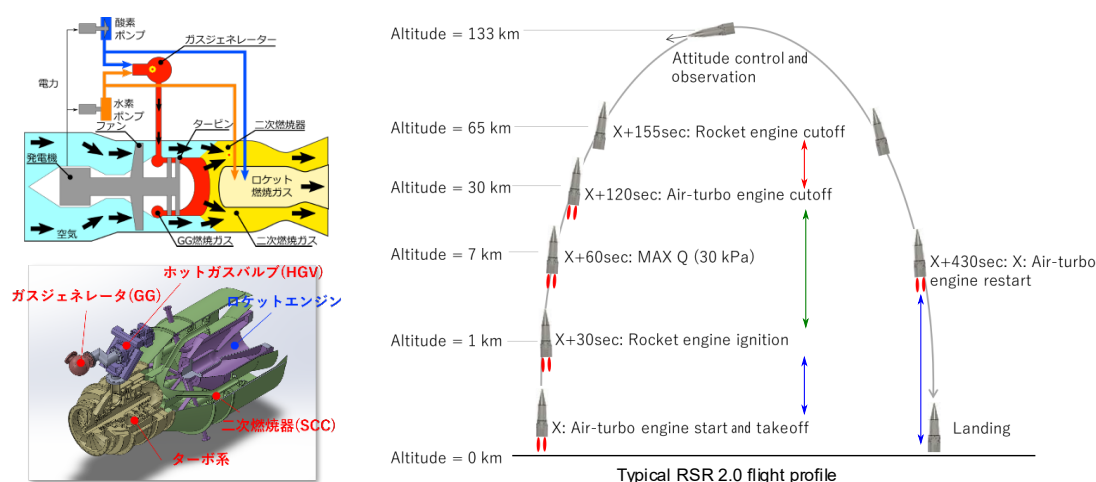
再使用組は、あるレベルまで技術の獲得が進み、より高効率、高頻度など、性能を上げるシステムを作りたい。一方でエアブリーザ組は、エンジン単体での実験しかできておらず、飛ばせるエンジンを作りたい、それを飛ばして実証したい。そういうタイミングで（やっと）輸送系メンバーが思い至ったのが、垂直離着陸の再使用ロケットに、エアブリーザを組み込めば、これまでの再使用組とエアブリーザ組が別々に考えてきたことを一つにまとめてできるのではないかと、お互いが目指しているシステムの実現に向けた技術獲得をみんながやりやすい方法でできるのではないかと、という考えです。エアブリーザ組の再使用組に対する「垂直離着陸が高頻度運用のための究極の姿なのか」という疑問。再使用組のエアブリーザ組に対する「そんなこと言ってエンジンを作っているだけでは何も始まらないではないか」という疑問。こういうモヤモヤをお互いずっと感じていたものの、いま、「とにかくやってみせる」「やってみなはれ」という機運が ISAS 全体で高まっている中、そこに合流して我々の活動をスタートしてみよう。ISAS ロケット軍団が一枚岩で、新しい一步を踏み出してみようとしている所以がここにあります。この活動を、私自身が宇宙飛翔工学研究系の研究主幹として、良い意味でわがままにいろいろな考え方を持つ輸送系メンバーをまとめ、大学アカデミア、JAXA 他部門、民間含め、みんなが楽しめる輸送系研究の大きな柱とします。

国内でもベンチャーを中心に民間が次々に新しいロケットを開発しようとしている今、さらにその先に必要となる宇宙輸送技術を早期に獲得して、「新しい技術の種まき」をすることが ISAS 輸送系のやるべきことです。民間では取り組めない、将来性があるハイリスクの新しい課題に挑戦し、スピード感をもって技術を獲得する。これを実行するために、小さな実験機で、短いサイクルで、効率的に技術を獲得するための実験に取り組みます。ISAS としてのこの活動のゴールは、ちゃんと飛ばせるエンジンを作れるのか、そのエンジンを使って意味のある再使用が本当にできるのか、それをこの小さな実験機で「やってみせる」ことです。我々が、静かで信頼性の高いエンジンを作り、それを使って安全かつ効率的にロケットを何度も飛ばしてみせれば、「訓練なしで優しく宇宙へ」人・ものを届けるための次の本格的なステップに確実に繋がります。

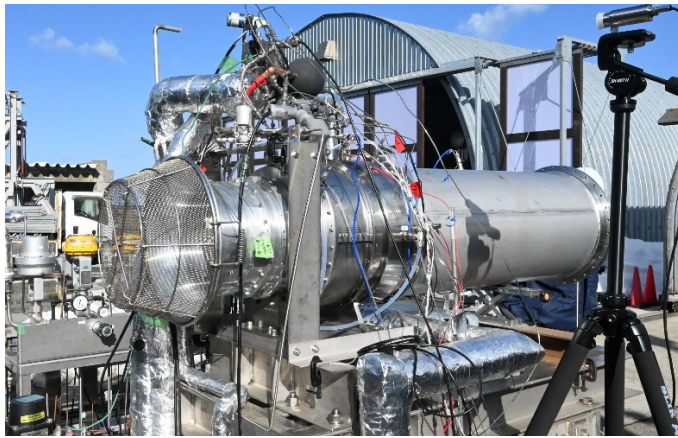
インハウスでの開発を中心に、2～3年の短いサイクルで実験機を構築・技術実証することで筋力トレーニングに励みつつ、成果を次々に民間へ移転する。我々自身の技量を磨きながら、ステップバイステップで技術を獲得し、産業振興支援とともに将来の本格的なミッションへ繋げていくというやり方を、この小型のFTBによる飛行実験で「とにかくやってみせる」ことこそ、いま我々が取り組むべきことです。この活動はISASの大学共同利用の枠組みを活用して、大学アカデミアを先導し、その知見や萌芽的なアイデアを積極的に取り入れて進めます。もちろんJAXA他部門との連携も重要です。ここで得られる技術が将来の輸送システムへどのように繋がっていくかを共有し、協力体制を構築したいと考えます。

この計画の実行においては、実験場をうまく活用することも重要です。特にいま能代ロケット実験場は、これまでにISASが培ってきた水素技術のノウハウにより、様々な水素関連の実験で盛り上がっています。我々の活動が実験場と連携することにより、新しい水素技術のロケットへの適用とロケットで獲得した技術の水素社会研究へのスピノフ、新しく構築された水素設備の最大活用とロケット開発に適した機能の拡充など、実験場のさらなる活性化、さらには水素社会構築に向けた貢献にもつながる活動にしていきます。能代だけでなく、内之浦や大樹町などの実験利用の可能性についても検討したいと考えています。

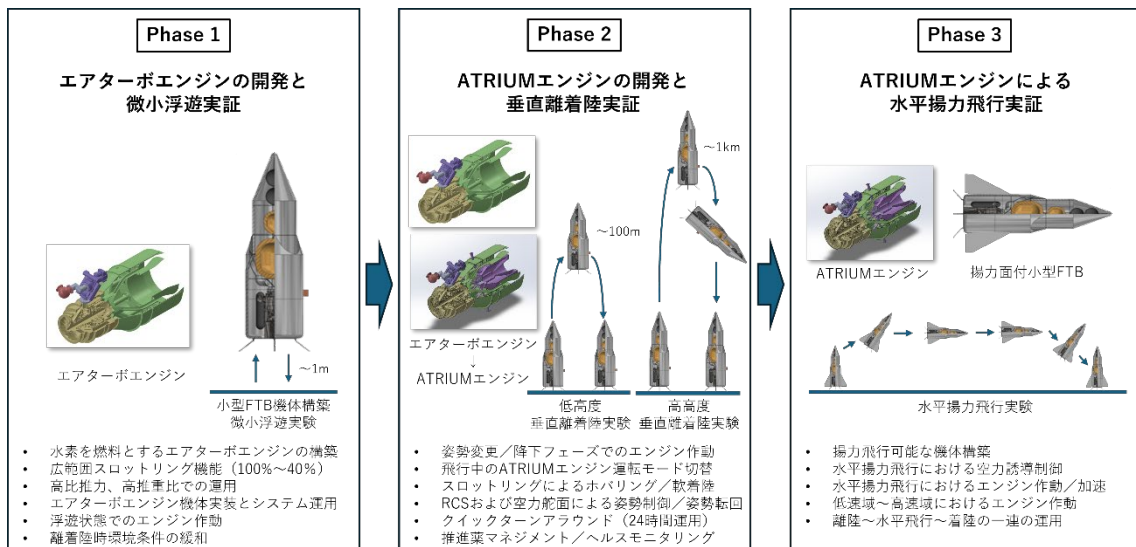
この活動で獲得する「大気のアシストによる飛行技術」により、小型のサブオービタルロケットを構築すれば、高頻度で繰り返し運用できる観測ロケットの早期に実現できるとともに、新しい宇宙科学の創出も期待できます。その先には、軌道まで頻繁にものを輸送できるシステム、そして、「訓練なしで優しく宇宙へ」の世界に発展します。日本独自の革新的なエンジン技術の獲得に挑戦し、宇宙輸送のパラダイムシフトに繋がるような、小さいけれど斬新で面白いISASらしい実験に取り組めます。



ATRrium エンジンと大気アシストによるサブオービタル飛行の例



ATRIUM（エアターボ）エンジン燃焼試験の様子と小型 FTB 実験機の概要



小型 FTB による飛行実証計画（案）