

## ロケットとの関わり方

Postdoctoral Research Associate  
Center for Simulation of Advanced Rockets 大門 優  
University of Illinois at Urbana-Champaign

### なぜロケット？ —はじめに—

人生一度は星を眺めて宇宙人について考えたり、宇宙や生物の起源について考えたりしたことがあるのではないだろうか。また、宇宙を題材とした映画、ドラマ、漫画、アニメ、本などに触れたことがあるだろう。そのようなとき、宇宙から地球を見たり、月面に立ったり、遠くの惑星で宇宙人を探してみたいと思ったはずだ。そのような夢物語の世界に、私はどっぷり浸かってみたかった。

宇宙というのは人類に有益な可能性を秘めている。普段あまり実感することはないが、既に我々の生活の一部に宇宙は利用されている。代表的なものとして、一部の携帯電話、カーナビゲーションシステム、公共放送がある。これらは、宇宙に浮かぶ衛星を使用して通信している。その他にも天気予報、地球観測は観測衛星を利用している。科学的な見地からは、月・惑星探査、宇宙開発、天体観測などがあるだろう。そのどれにおいてもロケットなしでは、地球から宇宙へと飛び出すことはできない。いま挙げた産業、観測、探査に関わる多くの人たちの思いをロケット技術が支えている。私は、彼らの思いを実現しているロケットに興味を持った。

格好の良い建前はこれ位にして、私の最初の原点を振り返ると、宇宙ってなんだ？ それに行けるロケットってすごいのではないかと興味とミーハー気分だった。自分の持っている力を見極め、実現できそうな夢を選んだところ、研究者という立場でロケットに関わることになった。今思えば、別に研究者でなくても、空や宇宙に関する職業に就くことが出来ればよかった。

夢は何ですか？と小さい頃によく聞かれたが、

わからないので「チンドン屋さん」とか「お百姓さん」と答えていた。高校生の頃になると、夢がないことに怯えていた。そのときはまだ、夢を語れるほどの知識がなかった。知らないことが多すぎたのだと思う。高校生には、もし夢を持っていないのなら勉強しようと言いたい（机に向かうだけの意味ではなく広く知識を得て考えるということ）。別に夢にこだわる必要も、今持っている必要もないのだが、夢と好奇心が人を動かす原動力になっているのは間違いない。そして、夢と好奇心は自分だけでなく、周りの人も動かし、仲間を集め、皆で協力し合い成し遂げる源になる。その過程は非常に楽しいものである。夢破れても人間は頭が良いので、夢を方向転換したり形を変えたりして、夢に関わることができる。夢への関わり方はいろいろある。そして夢は1つじゃなくいい。よくばりでいいと思う。1つに縛られる必要はない。

私の場合、My ロケットを作って飛ばしたいというのが、いくつかあるうちの夢の1つである。先人たちは既にそれを成し遂げていて、それを自慢気に話す。私はそれが悔しい。今回は今まで携わってきた夢についてわかりやすく解説する（つもりである）。ほとんどが先人達の功績を解説するにすぎないのだが。

### ロケットはどうして飛ぶ？ —理論—

ロケットは、ガスを速い速度で吹き出すその反動で飛ぶ。簡単にイメージするならば、ゴム風船を膨らまして手を離すと、飛んでいく状態を思い浮かべてほしい。大量の質量を速く吹き出すために、ロケットの燃焼室とよばれる部分で燃料と酸化剤を混ぜ、高温高压のガスを作る。宇宙には酸

化剤の役割を果たす酸素がないため、燃料と酸化剤の両方をロケットは積んでいる。地球から宇宙へと飛び立つロケットは、大きく分けて2種類ある。科学者たちはその燃料と酸化剤の形態で分類している。燃料と酸化剤が固体のものと、液体のものがあり、それぞれを固体ロケット、液体ロケットと呼んでいる。最近では、燃料と酸化剤のどちらかが固体で、どちらかが液体というハイブリッドロケットというものもある。

ここで少しだけ数式を用いてロケット内部における流体の解説をしよう。完全気体、1次元定常等エントロピー流体を考える。基礎式は以下のように書くことができる。

$$\text{状態方程式} : \frac{dp}{p} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dT}{T} \quad (1)$$

$$\text{連続の式} : \frac{d\rho}{\rho} + \frac{du}{u} + \frac{dA}{A} = 0 \quad (2)$$

$$\text{運動方程式} : udu + \frac{1}{\rho} dp = 0 \quad (3)$$

$$\text{等エントロピーの式} : \frac{dp}{p} - \gamma \frac{d\rho}{\rho} = 0 \quad (4)$$

ここで、 $p$ ,  $\rho$ ,  $T$ ,  $A$ ,  $u$ ,  $\gamma$  は、それぞれ圧力、密度、温度、断面積、速度、比熱比を表している。音速を  $a$  と定義し、マッハ数  $M = u/a$  を用いて式(3)を変形する。そして、式(2)に代入すると以下の2式が得られる。

$$\frac{du}{u} = \frac{1}{M^2 - 1} \frac{dA}{A} \quad (5)$$

$$\frac{d\rho}{\rho} = \frac{M^2}{M^2 - 1} \frac{dA}{A} \quad (6)$$

式(6)を式(4)に代入すると、

$$\frac{dp}{p} = -\frac{\gamma M^2}{M^2 - 1} \frac{dA}{A} \quad (7)$$

さらに式(6)と式(7)を式(1)に代入すると、

$$\frac{dT}{T} = -\frac{(\gamma - 1)M^2}{M^2 - 1} \frac{dA}{A} \quad (8)$$

式(5)-(8)より、表1のようなことがわかる。

流体の速度を増加させたいとき、亜音速では断面積を減少させ、超音速では断面積を増加させる必要があることがわかるだろう。ロケットの燃焼室では流れは亜音速であるため、燃焼室の後ろ側には、縮小ノズルが設置され、マッハ数が1となったところから拡大ノズルを設置する。一番断面積が小さいところ(マッハ数が1)をスロートと呼ぶ。多少の式変形を行うと、等エントロピー流

表1 等エントロピー流れにおける断面積変化の影響

	断面積の減少 $dA < 0$		断面積の増加 $dA > 0$	
	亜音速 $M < 1$	超音速 $M > 1$	亜音速 $M < 1$	超音速 $M > 1$
速度 $u$	増加	減少	減少	増加
圧力 $p$	減少	増加	増加	減少
密度 $\rho$	減少	増加	増加	減少
温度 $T$	減少	増加	増加	減少

れにおけるよどみ点(速度0)の状態の温度とマッハ数の関係式を求めることができる。

$$\frac{T_0}{T} = 1 + \frac{(\gamma - 1)}{2} M^2 \quad (9)$$

燃焼室では速度がほぼ0であると仮定する。比熱比が1.4のときは燃焼室の温度とスロートの温度の比は0.833となる。燃焼室での温度は3,000度以上になるので、スロートでは2,500度以上と計算できる。マッハ数2の場合でも、1,600度を超える。このようにノズル壁面は高温のガスにさらされるため、熱的に厳しい条件となる。もし燃焼室の温度や圧力を下げると、ノズルでは大気圧以下になり、大気圧とのバランスをとるために衝撃波(圧力、温度、密度の上がる不連続面)が発生してしまい損失が大きくなる<sup>\*1</sup>。高性能のロケットを設計する場合は、燃焼室の温度・圧力を下げることは出来ない。そこで、高温高压に耐えることができる材料でノズルを設計する必要がある。ノズルは熱によってその表面が反応し変形する。その変形量を予測することが私の研究テーマの1つである。

### 何を研究しているのか? —実践—

ロケットは中身を見ることが難しい。ロケットの燃焼は前述したように高温高压であるため、燃焼中に中身を見ることは出来ないし、途中で止めて観察しても燃焼中の状態とは異なる。そこでシミュレーションを用いる。シミュレーションという言葉をよく耳にするだろうが、何をするか想像することが難しいと思う。前章の基礎式は仮定が簡単であるため、手計算することで温度を求めることが出来た。しかしこの温度はノズルの中心付近の温度であり、私の知りたいノズル変形において重要な壁面温度ではない。実際はロケット内部における燃焼、粘性、拡散、ノズル壁面とのエネ

ルギーの授受、ノズル壁面の反応、ノズル内部での反応と熱伝達などがあるため、すべて考慮しなければ、正確な壁面温度を求めることはできない。これは非常に複雑な作業である。そこで、コンピュータの力を借りてシミュレーションを行うのである。研究者の考える理論に基づいた式を立て、それを計算して答えを出す。理論に基づいた式は微分方程式であるため、微小変化を仮定することで答えを導くことが出来る。ただし、微小に設定すればするほど計算時間がかかる。そこで様々な簡略化を行い計算すると、計算値と実験値がずれる場合がある。なぜ実験と違うのか、どの簡略化が問題なのか、もっと簡単に現象を理解するためにはどうすればよいかということを研究者は常に考えている。図は計算結果の一例である。

ノズル壁面が変形した場合の壁面付近における流れの様子を示している。図には壁面の他にマッハ数1の面を示した。その面が複雑な形状をしているのがわかる。得られた結果をみて現象を理解し、不具合の理由や仮説をたて、回避する方法を提案していくのが研究者の仕事である。

このような研究成果を通してロケットの打ち上げ成功に関わり、夢の一端を実現する喜びを感じている。この原稿のお話をいただいた当初、「H2A ロケット」という難しい題名での依頼だった。残念なことに私の関わっているのは、H2A ロケットのメインエンジンではなく、打ち上げ後真っ先に切り離される横に着いている小さなロケット（固体ロケットブースター）である。JAXA

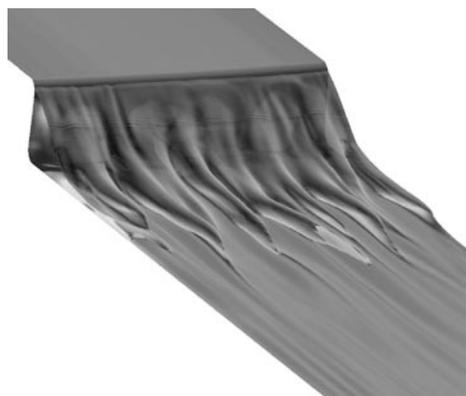


図1 ノズル壁面におけるマッハ数1の等値面

ウェブサイトに映像が載っているだろう。たった100秒間しか燃えない小さなものだ。しかも私の専門はエンジンの一部分。ノズル壁面のとても小さな領域である。その小さな領域で私とH2Aロケットは繋がっている。

### 研究者という立ち位置 —最後に—

ロケット研究・開発の先人たちは、私にとって神様のような存在である。その神様が知らなかったこと、予想したことと違う結果を、自分の力で示したときに快感を感じる。私はどうやら意地の悪い人間のようなのだ。だが、誰も知らないことを開拓していくことが研究の醍醐味である。常に想像し、その想像と現実、理論との相違を埋めていく作業が楽しい。想像通りでも、裏切られても楽しいものである。だから研究はやめられない。研究というが無機質なものを扱っているイメージがあるだろうが、私は先人達に勝ちたいという熱い思いを常に持っている。相手にしているのは物理だけでなくそれを考えた人間も含んでいる。先人達の常識を覆すことで、新たなものは生まれる。高校生にはぜひ研究者になって私に勝負を挑んでほしい。

### 謝辞

このような機会を与えてくれた編修者、そして友人でもある西村良太様に感謝します。私のためにおいしい料理を作ってくれて愛情を注いでくれる妻に感謝します。隣で研究している新婚イタリア人のFilippoとこれから生まれてくる彼の赤ん坊に祝福を。

(\*1実際のロケットでは、高度、すなわち外気の圧力が変化するため、常に衝撃波が発生しないノズルを作ることは出来ないが、損失の少ないノズルになるよう設計する。)

### 参考文献

- [1] 宇宙航空研究開発機構ウェブサイト, <http://www.jaxa.jp/>
- [2] 松尾一泰, “圧縮性流体力学 内部流れの理論と解析”, 理工学社, 1994
- [3] Daimon, Y., Shimada, T., Tsuboi, N., Takaki, R., Fujita, K., and Takekawa, K., “Evaluation of Ablation and Longitudinal Vortices in Solid Rocket Motor by Computational Fluid Dynamics,” *AIAA Paper*, AIAA-2006-5243, 2006.