

ロケットや人工衛星は 高校数学&物理で案外飛べる!

宇宙の数式

第5回 ロケット・エンジンの設計…数列・極限の利用

森下 直樹

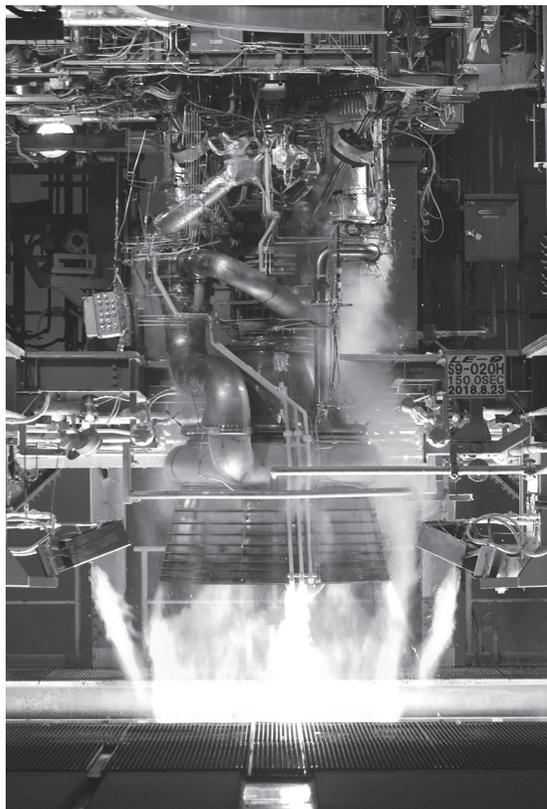
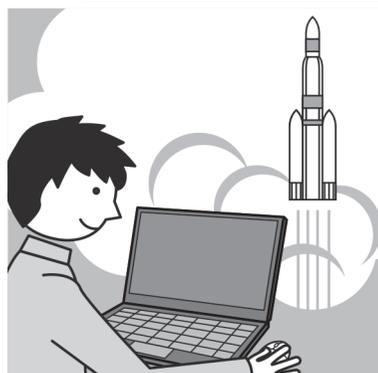


写真1⁽¹⁾ LE-9エンジン燃焼試験 (©JAXA)

今回の記事では、ロケット・エンジン(写真1)のノズルの広がり具合と圧力の複雑な関係を、極限と数列の考えを利用した数値計算法で求めます。

● ロケット・エンジンで推進力を得る仕組み

ロケット・エンジンは、図1のように高温・高圧のガスを発生させる燃焼室と、燃焼ガスをエンジンの外に排気するノズルから構成されます。

燃焼室で発生したガスが、流路が最も狭くなるスロートに達すると、燃焼ガスの流れの速さはちょうど音速(=マッハ1)に達し、それより下流では、ノズル

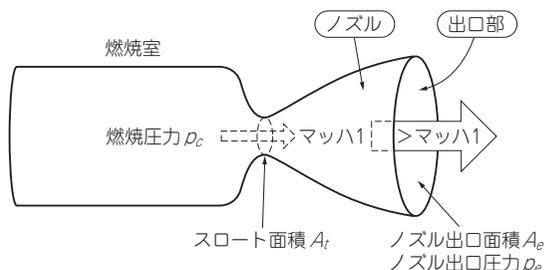


図1 ロケット・エンジンのノズル「ラバル・ノズル」の形状
流路を一度狭めてから広げることで排気ガスの速度を上げる

が拡大するにつれて燃焼ガスはさらに加速されて超音速(マッハ1を超える速さ)の流れとなり、最終的に出口部から排気されます。このように、流路を一度狭めてから広げることで排気ガスの速度を上げるノズルを、収縮拡大ノズル、または開発者の名前にちなんで、ラバル・ノズルと呼びます。ロケット・エンジンは、ラバル・ノズルによって燃焼ガスの持つ内部エネルギー(温度・圧力)を運動エネルギー(速度)に変換することで、大きな推進力を得ることができます。

ノズル開口比設計のポイント

● 設計のキモは出口部の大きさ

ラバル・ノズル設計時の重要なポイントは、ノズルの出口部の排気ガスの圧力を正しく見積もることです。ノズル出口部を大きく広げるに従って、排気ガスのノズル出口速度が上昇する代わりに圧力は低下します。ノズル出口部で周辺の圧力(例えば大気圧)とちょうど釣り合うときが、適正膨張と呼ばれる状態です[図2(a)]. 排気ガスのノズル出口圧力と周辺圧力が同じなので、十分に加速された排気ガスが安定してノズルから出ていきます。これが、エンジンの性能を最もよく引き出せる設計です。

出口部を大きくしすぎると、ノズル出口部の圧力が周辺の圧力より低くなる過膨張の状態となります[図2(b)]. そして、過膨張の度合いがあまりに大きくなると、排気ガスがノズル周辺の圧力に押し負け