

ロケットはなぜ飛ぶの？ ちょっと詳しい解説

1. “反動” と “作用・反作用” と “運動量保存則”

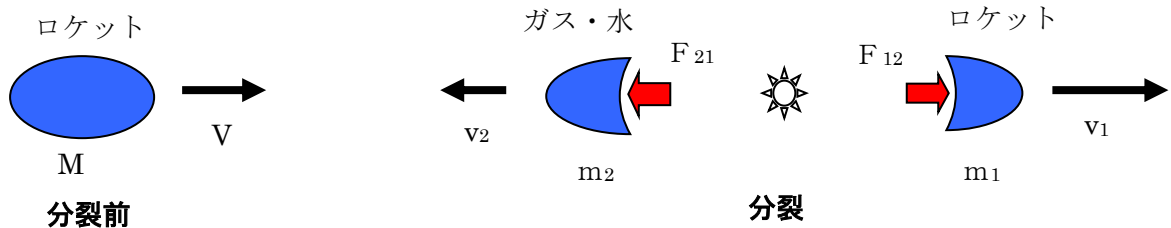


図1 物体の分裂前後の速度の変化

分裂前に質量 M で速度 V であった物体が、爆発後に、質量 m_2 の物体と質量 m_1 の物体に分裂して、それぞれ後ろに速度 v_2 と進行方向に速度 v_1 で進む物体になったとします。このとき、分裂の前後で総質量は変化しなかったとすると、

$$M = m_1 + m_2 \quad (1)$$

がなりたちます。さらに、分裂前後では“質量×速度”も変化しないのです。この“質量×速度”を“**運動量**”と呼びます。すなわち

$$MV = m_1 v_1 + m_2 (-v_2) \quad (2)$$

が成り立ちます（ v_2 は向きが反対なので負の値であることに注意して下さい）。これはいつもどんなときにも成り立ちます。これを“**運動量保存の法則**”と呼びます。すなわち

“**全体の運動量は保存される**”

のです。たとえば m_1 がロケット、 m_2 がロケットから噴出されるガスまたは水ロケットから噴出される水だと思って下さい。このときロケット本体の速度 v_1 は、式(2)、(1)から、

$$v_1 = \frac{MV + m_2 v_2}{m_1} = \frac{(m_1 + m_2)V + m_2 v_2}{m_1} = V + \frac{m_2}{m_1} (V + v_2) \quad (3)$$

となるので、分裂後のロケット本体の速度 v_1 は必ず分裂前の速度 V より速くなります。これはロケットがガス・水（すなわち m_2 ）を押し出した“**反動**”で速度が増したのだと考えることができます。つまりガス・水を速度 v_2 で押し出した向きと反対向きに自分の速度が増したわけです。

このとき、ロケット本体（ m_1 ）の速度が、 V から $V + (V + v_2) m_2 / m_1$ に増加しているということは、ロケット本体が分裂時に加速する力を受けたことを意味しています。この力とは分裂時にロケット本体（ m_1 ）がガス・水（ m_2 ）を押し出した力 F_{21} の“**反作用**”として受けた力 F_{12} です。このとき F_{12} は F_{21} と同じ大きさで向きは反対です。ガス・水が壁や外の空気を押した力の反作用ではないことに注意して下さい。

2. “推力”

ロケットの推力は上記の説明においてロケット本体に働く力 F_{12} (ロケット本体がガス・水を押し出す力の反作用) です。この力がどのような条件から出てくるのか考えます。上記の説明において、ロケットは分裂前に質量 M で速度 V であったものが、分裂後には、質量 m_1 で速度 v_2 になりました。従って、ロケットのみに注目すると運動量 (質量×速度) が変化しています。この運動量の変化は、分裂後の運動量 $m_1 v_1$ から分裂前の運動量 MV を差し引いた量；

$$m_1 v_1 - MV \quad (4)$$

です。この運動量の変化は、ロケットに働いた力 F_{12} と分裂にかかった時間 (運動量が増える間の時間) Δt との積 (この力×時間を力積と呼びます) に等しいのです。一般に

“物体の運動量の変化はその物体に働く力積に等しい”

と言います。従って、

$$m_1 v_1 - MV = F_{12} \Delta t \quad (5)$$

が成り立ちます。ここで、分裂時に放出したガス・水 (m_2) まで考慮に入れると上記 1. で説明したように全体では運動量保存の法則 (式 (2)) が成り立つので、式 (2) から、

$$m_1 v_1 - MV = m_2 v_2 \quad (6)$$

が成り立ちますから、式 (6) と式 (5) より、

$$m_2 v_2 = F_{12} \Delta t \quad (7)$$

が成り立ちます。従って、ロケットの推力 F_{12} は、この式 (7) から、

$$F_{12} = \frac{m_2}{\Delta t} v_2 \quad (8)$$

となります。この式 (8) の $\frac{m_2}{\Delta t}$ は、“単位時間あたりのガス・水の放出質量” を意味しますので、式 (8) から、

$$\text{ロケットの推力} = \text{単位時間あたりのガス・水の放出質量} \times \text{ガス・水の放出速度} \quad (9)$$

となることがわかります。

高校の物理の時間に“力＝質量×加速度” とならったと思いますが、質量が時間的に変化する場合 (いま考えているロケットの場合がこれにあたります) も含めて、

$$\text{“物体に働く力} = \text{単位時間あたりの物体の運動量の変化”} \quad (10)$$

と考えるといつでも成り立ちます。