

技術動向レポート

月への旅行が身近になる時代は来るか？

～ロケット技術開発レビュー～

サイエンスソリューション部
コンサルタント 今野 彰

1. はじめに

2018年に大手旅行代理店が実施した調査⁽¹⁾によると、「宇宙旅行が実現されたら、行ってみたいですか？」という設問に対し、約64%が「行きたい」と回答している。この調査が実施されたのは、ちょうどアメリカの新興企業が民間月旅行計画を発表し、その最初の搭乗者に日本人実業家が選ばれた⁽²⁾ことで話題になった時期ということもあり、多くの人々が宇宙旅行に興味を示した。また先ほどの設問で「行きたい」と回答した人のうち半分以上が、宇宙旅行をするならば「月」へ行きたいと答えている。1969年にアメリカのアポロ11号が人類初の月面着陸を成功させた日から50年経ったが、今なお人々は「月」に対し憧憬の念を抱いていることが伺える。一方で、「宇宙旅行に行くとしたら、いくらなら旅行を検討しますか？」という設問に対しては、70%近くの人が「100万円未満」と回答している。

周知の通り、現状では100万円で月へ旅行するのは難しい。例えば、1960年代のアポロ計画では現在の価値にして約13兆円が費やされたとされている⁽³⁾。また、過去にNASAがロシアからソユーズへの搭乗を購入した際には約90億円を支払ったとされている⁽²⁾。いずれにせよ現に宇宙へ旅行するならば、理想の1万倍近く、あるいはそれ以上の費用がかかることになる⁽⁴⁾。

月へ旅行するにしろ、人工衛星を打ち上げるにしろ、宇宙への唯一のアクセス手段はロケットである。かつてのロケット開発は国が主導して進めてきたが、現在は国内外の多くの民間企業がロケット開発に参入し、低コストでも高性能なロケットを開発している^{(5) (6) (7)}。ロケット開発には多くのノウハウが必要だが、民間企業がロケットを開発できるようになったのは、基本に則って、足元から技術を固めてきた結果であると考えられる。そこで本稿ではこの技術に重きを置き、ロケット分野でよく見かける基本原理や専門用語を分かりやすく網羅的に解説した。より詳細な内容についても注釈を付したので、適宜参照されたい。本稿により、近年のロケット開発・打ち上げのニュース記事が、技術の観点から理解できることとなるだろう。

2. ロケットの原理

まず初めに、「ロケットが飛ぶ原理」、「ロケットに必要な速度」、「ロケットが速度を生み出す仕組み」というロケットの基本的な物理について触れることにしよう。

そもそもなぜロケットは飛ぶのだろうか。これは「大量の燃焼ガスを進行方向と逆向きに高速で噴射するから」で、身近なもので例えるならばジェット風船と仕組みは同じである。ジェット風船は、ゴム風船が縮む際、中の空気が出口へ押し出されることによって、その反動で飛ぶ

ことができる。ロケットも同様で、燃料を燃焼させることによって発生する大量の燃焼ガスを噴射口(以下、ノズルと呼ぶ)から高速で噴射させることで、反動によりロケットは速さを獲得し飛ぶことができる。

では、ロケットを宇宙へ飛ばすためにはどの程度の速さが必要だろうか？これは、「ロケットが地球に落下せずに周回するためにはどの程度速さが必要か？」とも言い換えられる。これは、地球を周回する物体に働く「遠心力」と、その物体を引っ張る力である「地球の重力」の釣り合いから求めることができる。2つの力が釣り合うためには物体は秒速7.91km(時速に換算すると約28,400km)の速度が必要であり、宇宙へ行くためには想像を絶するほど高速である必要があることが分かる⁽⁸⁾。

次に疑問に思うのは、秒速7.91kmという途方もない速度を生み出すためにはどうすれば良いか、である。先述した通り、ロケットが飛ぶのは「大量の燃焼ガスを進行方向と逆向きに高速で噴射するから」であるが、「どの程度の量のガス」を「どの程度高速に噴射」すべきだろうか。ロケットがそれだけの速さを持つには、ガスの噴射速度も同程度(秒速約3~4km)必要である。この速度は噴射ガスの音速を超えた「超音速」であり、この超音速を生み出す仕組みが、ノズルの形状にある。様々なロケットのノズル部分を観察すると、ラッパのような形状をしていることが分かる。通常、このような先が広がった形状の管に(低速の)ガスが流し込まれると、出口へ行くにつれて減速される。しかしここに超音速のガスを注入すると、この現象が逆転し、ガスの速度がさらに加速されることが知られている⁽⁹⁾。このような直感に反する物理現象を利用することで、ガスを高速に噴射させるのである。

そして必要な噴射ガスの量だが、ある時間ご

とに噴射されるガスの量が多いほど(すなわち燃料が大量に消費されるほど)、より速いスピードでロケットを打ち上げることができる。したがって、打ち上げ前(燃料の消費前)と打ち上げ後(燃料の消費後)のロケットの重量の比と、打ち上げ後のロケットの速度には相関関係があると言える。この関係を定式化したのが「ツィオルコフスキーの公式」と呼ばれるもので、ロケットの分野において最も重要な基本式として知られている⁽¹⁰⁾。なおツィオルコフスキーとは、この式を1897年に導出したロシアの科学者コンスタンチン・ツィオルコフスキーの名前から取られている。

以上がロケットの基本物理だが、本節の最後に、ロケットエンジンの能力にかかわる用語を整理する。まずロケットを飛ばすための重要な要素は、燃焼して発生したガスの「噴射量」と「噴射速度」であった。これら2つを掛けたものが「推力」と呼ばれ、その名の通り、ロケットを推し進めるための力の大きさを意味する。また「噴射速度」を地球に働く重力の強さ(重力加速度という)で割ったものが「比推力」と呼ばれる。比推力は、ある量の燃料を燃焼させた時に生じる推力を維持できる時間を意味し、いわゆる燃費に相当する量である。推力も比推力もその数字が大きいほど、より性能の良いロケットを意味する。そしてツィオルコフスキーの公式で出てきた打ち上げ前後のロケットの重量の比を「質量比」と呼び、燃料以外のロケットの機体などの軽さ(質量比が大きいほど機体が軽い)を表す。現在使われている多くのロケットの質量比は6~20で、これはロケットの全重量のうち83~95%と殆どが燃料で占められていることになる。

3. ロケットの構造

前節でロケットの原理を理解したところで、

本節ではロケットを宇宙へ飛ばすためのシステムを見てみることにする。まず前提として、航空機とロケットではエンジンの仕組みが違う。どちらもエンジンで燃料を燃焼させることで空中を飛行することには変わりはないが、燃焼させるために必要な酸素の取り込み方が異なる。航空機のジェットエンジンは周囲にある空気を取り込んで燃料を燃やすが、同じ仕組みをロケットに適用すると、空気の少ない宇宙では燃料が燃やせない。したがってロケットには燃料の他に酸化剤と呼ばれる物質も積載され、この酸化剤をロケットエンジン内部で燃料と混合させて点火すれば、宇宙でも燃焼させることができる。この燃料と酸化剤をまとめて「推進剤(あるいは推進薬)」と呼ぶ。

では、日本の基幹ロケットである H-IIB を参考に、ロケットの構造を詳しく見てみよう。先の尖った頭の部分は「フェアリング」と呼ばれ、ここに人工衛星などの宇宙に運びたいものが格納される。この宇宙に運びたいもの(もしくはその重さ)のことを「ペイロード」といい、ロケットの打ち上げ能力を表す指標となる。フェアリングより下は主にエンジンと推進剤で構成され、H-IIB ではロケットが2段に分かれている。2節で登場した「ツィオルコフスキーの公式」によると、仮にロケットが1段だけだと大量に推進剤を積載しないと宇宙へ行くことができないことが分かっている。これでは効率が悪いので、ロケットを2段に分けて、まず1段目のエンジンを使って推進し、1段目の燃料を使い切ったところでそれを切り離すことでロケットを軽くする(質量比を上げる)。その状態で2段目のエンジンを使えば、ロケットは効率良く速度が得られる。これを「多段式ロケット」と呼び、現在運用されているロケットはほぼ全て多段式ロケットで、その多くは2段、あるいは3段である。

第1段主エンジンの部分にはノズルが2つ付

いているが、これは LE-7A というロケットエンジンが2基並んでいる。このように複数のエンジンを束ねたロケットのことを「クラスターロケット」という。クラスターロケットは、性能が安定し且つ信頼性の高い小型のロケットエンジンを束ねているため、大型ロケットエンジンを1つ作るより費用と開発期間を削減できるメリットがある。

また第1段部分には、「液体水素タンク」と「液体酸素タンク」があり、それを取り囲むように4つの「固体ロケットブースタ」が配置されている。ロケットエンジンは、推進剤が液体か固体かによって「液体燃料ロケット」と「固体燃料ロケット」の2種類に分かれる。液体燃料ロケットでは、液体水素などを燃料、液体酸素などを酸化剤として別々のタンクに貯蔵し、エンジン内部の燃焼室で両者を混合、燃焼させることで、大量の燃焼ガスを発生させて推力を得ている⁽¹¹⁾。一方固体燃料ロケットは、燃料と酸化剤が粘土のような状態で混ざっていて、これを燃焼させている(なお、この状態は花火の火薬と同じなので、原理的に固体燃料ロケットはロケット花火と同等であると言える⁽¹²⁾)。液体燃料ロケットと固体燃料ロケットの特徴、燃焼方法、長所と短所を図表1に整理した。

以上でロケットの構造を概観したが、ロケットの物理と同様、構造もシンプルに見える。しかし液体燃料の燃焼方法や固体燃料の製造方法などで、先人による様々なアイディアやノウハウが凝縮されていて、これがロケット打ち上げ成功の鍵を握っているのである。

4. ロケットの運用

ここではロケットの打ち上げから最終目的である軌道への投入までの流れを見ることにする。ロケットの打ち上げ方法には大きく分けて①地上発射、②空中発射、③海上発射の3つがある。

図表1 液体燃料ロケットと固体燃料ロケットの特徴、燃焼方法、長所と短所

	液体燃料ロケット	固体燃料ロケット
燃料＋酸化剤の組み合わせ	液体水素＋液体酸素、炭化水素系燃料（ケロシンやエタノールなど）＋液体酸素 エアロジン-50＋四酸化二窒素など	合成ゴム系（ポリウレタンやポリブタジエン）＋過塩素酸アンモニウムなど
燃焼方法	高圧ヘリウム（あるいは窒素）ガスで推進剤を燃焼室に押し入れる加圧式と、タービンとポンプを使って機械的に推進剤を燃焼室に送り込むターボポンプ式 ⁽¹³⁾ がある	円筒形の固体燃料を、底面から燃やす端面燃焼型、円筒中心軸から燃やす内面燃焼型、円筒側面から燃やす側面燃焼型がある ⁽¹⁴⁾
長所	比推力が大きい（300～500秒） 燃焼の量を調整できるため、細かな制御が可能 打ち上げ前の燃焼実験も容易 大型化しやすい	長期保存が可能 発射作業が容易 部品数が少なく構造がシンプル 小型ロケットに適している
短所	推進剤の長期保存と温度管理が難しい 四酸化二窒素などのような酸化剤は有毒 構造が複雑になりやすく、高い技術力が必要	比推力が小さい（200～300秒） 固体燃料の製造に多くのノウハウが必要 一度着火したら燃焼を止められないため、制御が難しい

各種資料に基づきみずほ情報総研により作成

①地上発射

ロケット打ち上げで最もオーソドックスな手法である。地上発射のためには、ロケット専用の打ち上げ施設である射場が地上に必要である。有名どころでは、アメリカのケネディ宇宙センター／ケープカナベラル空軍基地、フランス領ギアナにあるギアナ宇宙センター、カザフスタンにあるバイコヌール宇宙基地、そして日本の種子島宇宙センターと内之浦宇宙空間観測所がある⁽¹⁵⁾。これらの射場は、効率性と安全性の観点から幾つかの地理的条件を満たしていることが多い。1つ目が「赤道に近いこと」である。なるべく赤道近くからロケットを打ち上げると、地球の自転由来の遠心力がロケットに最も強く働くため、高緯度で打ち上げるより少ないエネルギーで済ませられる。また、地球は西から東に向かって自転しているため、赤道付近で東の方角にロケットを打ち上げれば、地球の自転が「追い風」となり、さらに効率の良いロケット発射を実現できる。2つ目が「周りが開けていること」である。先述の通り、ロケットは東の方角に打ち上げれば効率的だが、投入する軌道（例えば後述する太陽同期準回帰軌道など）によっては北あるいは南の方角に打ち上げることもある。したがって周囲の環境の安全性から、射場の近

辺、特にロケットが飛行する北、東、南のいずれかの方角は人里離れた、海や砂漠などに覆われていることが多い⁽¹⁶⁾。

②空中発射

2節でロケットに必要な速度（秒速7.91km）について触れたが、実際は空気抵抗等で減速させられるため秒速7.91kmでは宇宙へ飛ぶことができず、実質秒速10kmほどの速度が必要である。空気抵抗という「向かい風」の影響をなるべく取り除くために、この空中発射のアイデアが生まれた。具体的には、まずロケットを航空機（場合によっては気球）に乗せて、通常の空港から出発する。そして飛行機が高度10km程度に達した時に、ロケットを発射する。空中発射の利点として、空気抵抗や重力の影響を低減できる他に、地上で射場を整備する必要がないことが挙げられる。一方で、航空機に搭載できるほどの小さなペイロードでは限界があるという欠点もある。

③海上発射

今後、ロケット開発が進み、特に小型ロケットが高頻度で打ち上げられるようになる未来を見据えた発射方法もある。それが海上発射であ

り、地上の射場が不足した際の補完的な役割を果たす。海上での打ち上げは、地上に固定された射場からの発射とは異なり、発射地点をある程度自由に移動させることができる。したがって地上発射では実現できないような安全性が高く、効率の良いロケットの打ち上げを実施できる。実際、2019年6月には中国で、民間船舶を移動式発射台としてロケットの打ち上げに成功している⁽¹⁷⁾。一方、海上発射も地上の射場と同様に発射台を整備する必要がある。この整備を効率的に行うため、日本の新興企業では、海底油田の掘削リグを発射台として活用する事業が進められている⁽¹⁸⁾。これが実現できれば、従来種子島と内之浦の2か所しか無かった射場の選択肢が増え、小型ロケット発射の需要に応えられることになるだろう。

射場から打ち上げられたロケットは宇宙を目指す、その際ロケットが目的の位置と時間に正確に到達するために、事前に決められたコースを飛行するよう誘導、制御する必要がある。誘導では、地上からのレーダやロケットに搭載されたセンサ(ジャイロや加速度計、GPS受信機など)によって、予定のコースと実際のコースのずれを検出し修正させる。ここでレーダを使う場合を電波誘導、センサを使う場合を慣性誘導といい、後者が使われることが多い。コースのずれを修正するとき、ロケットの姿勢や進行方向を細かく制御する必要がある。制御の方法としては、ロケットエンジンそのものを動かすジンバル(首振り)システムが採用されることが多く、他にもメインエンジンの周りに取り付けられた小型エンジンで制御する副エンジンシステムなどがある。

さて、人工衛星などを積載したロケットはこうして宇宙へ向かうが、人工衛星は最終的に地球を周回する「軌道」に到達する。この軌道に

も様々な種類があるが、例えば、気象衛星「ひまわり」などは「静止軌道」に配置されている。静止軌道は赤道上空36,000kmで、地球の自転と同期するように周回することで、常に日本とその周辺上空に留まることができる。他にも、太陽光が常に同じ角度で当たり、かつ数日～数週間周期で同一地点を観測できるような「太陽同期準回帰軌道」(多くの地球観測衛星はこの軌道をとる)や、特定の地域上空に一定時間留まることができる「準天頂軌道」(日本の測位衛星システム「みちびき」はこの軌道をとる)などがあり、どの軌道を選ぶかは衛星の目的に依る。

5. まとめ

本稿を通して、ロケットの基本原則から構造、打ち上げ、運用まで幅広く解説した。1節で月旅行とその困難性について触れた。ロケットの仕組み自体は単純である一方で、それを実現するための一つ一つの細かな要素に対して様々な知見が含まれているため、技術とコストがかさみ、ロケット開発(そしてその先にある月旅行)のハードルが上がるのである。そのハードルを下げるためには2つの考え方が重要になるだろう。ひとつが「過去の技術の引継ぎ」である。アメリカの新興企業では、過去に開発されたロケットエンジンの技術がうまく継承され、低コストでも高性能なロケットを生み出すことに成功している⁽¹⁹⁾。もうひとつが「最新の技術の取り込み」である。最近では3Dプリンタや炭素繊維強化プラスチックをロケット開発に導入している民間企業⁽²⁰⁾も存在し、既存の技術にとられない斬新なアイデアもロケット開発にとって肝要になるだろう。設計最適化における人工知能の活用なども「最新の技術の取り込み」に含まれるだろう。「過去の技術の引継ぎ」と「最新の技術の取り込み」という一見相対する考え方の融合がロケット開発のさらなる隆盛に繋がる

と考えている。

とは言え、月旅行はまだまだ先と思われるだろう。そんな中2020年1月、アメリカの新興企業が、開発中の有人宇宙船の緊急脱出テスト(ロケットに異常が発生した際に乗組員の安全を確保させるための試験)に成功したと発表した⁽²¹⁾。同時に、2名の宇宙飛行士を搭乗させた有人宇宙船の初飛行が2020年4月～6月に行われる予定であることも発表された。民間企業による有人宇宙飛行計画は着実に歩みを進めている。月への旅行が身近になる時代は案外すぐそこかもしれない。

注

- (1) <https://www.atpress.ne.jp/news/168399>
- (2) <https://news.yahoo.co.jp/byline/akiyamaaayano/20180918-00097322/>
- (3) <https://gigazine.net/news/20180724-nobody-visited-moon/>
- (4) 月までは到達しないものの、放物線を描くように高度100kmの宇宙空間まで上昇し、数分ほどの無重力状態を体感しながら青い地球を見下ろせる弾道宇宙飛行もあるが、それでも数千万円程度の費用が必要とされている。(出典：<https://diamond.jp/articles/-/169669>)
- (5) <https://natgeo.nikkeibp.co.jp/nng/article/news/14/6880/>
- (6) <https://www.itmedia.co.jp/business/articles/1606/17/news041.html>
- (7) <http://www.istellartech.com/>
- (8) なおこの速さのことを「第一宇宙速度」と呼ぶ。第一宇宙速度は物体と地球中心との距離の1/2乗に反比例するため、厳密には第一宇宙速度は、物体が海抜ゼロの状態を保ったまま地球を周回するために必要な速度と定義され、物体と地球中心までの距離は地球の半径として計算される。また「第一」宇宙速度があるならば、「第二」・「第三」宇宙速度も存在し、それぞれ地球重力を振り切って脱出するために必要な速度(秒速11.2km)、太陽重力を振り切って太陽系を脱出するのに必要な速度(秒速16.7km)である。
- (9) 19世紀のスウェーデンの技術者の名に因み、この形状のノズルを「ラバール・ノズル(あるいはラバール管)」と呼ぶ。気体が高速で流れるような圧縮性流体に見られる現象である。
- (10) 厳密に言えば、打ち上げ後の速度は、打ち上げ前後のロケットの質量比だけでなく、ガスの噴射速度に

も依存するため、ツィオルコフスキーの公式には噴射速度も含まれている。またツィオルコフスキーの公式では、ロケット打ち上げ後の速度は、ガスの噴射速度に比例し、ロケットの質量比(通常6～20程度をとる)の自然対数に比例するため、ロケットの質量比を倍にするよりガスの噴射速度を倍にした方がロケットの速度を大きくすることができる。

- (11) 燃焼室やノズルでは高温のガス(約3,000度)に晒されるため、壁面を厚くしたり、断熱材や再生冷却システムで冷やしたりすることで、エンジンが高温に耐えられるようにしている。
- (12) このため固体燃料ロケットは日本では「火薬類取締法」の対象となり、法的な観点でもロケット花火と同等である。これが管理コストの増加に繋がるとされている。(出典：<https://ascii.jp/elem/000/001/131/1131534/>)
- (13) ターボポンプ式には、タービンを回す方法として「ガス発生器サイクル」「2段燃焼サイクル」「膨張サイクル」「電動サイクル」などがある。
- (14) ロケットの推力は燃焼される固体燃料の量(表面積)に比例するため、端面燃焼型・内面燃焼型・側面燃焼型ではロケットが得られる推力の大きさの時間変化がそれぞれ異なる。端面燃焼型では一定の推力は得られ、内面燃焼型では徐々に推力が大きくなり、側面燃焼型では逆に徐々に推力が小さくなる性質がある。どの方法を適用するかはロケットの目的に依存し、その燃焼方法にも多くの知見が潜む。
- (15) 日本では他に、北海道大樹町や和歌山県串本町でもロケット射場の整備が進んでいる。いずれの射場も海(太平洋)に面している。
- (16) イスラエルは西にしか海が開けていないため、西の方角へロケットを打ち上げたことがある。また、海のある方角に打ち上げるとしても地元の漁業関係者の協力も安全性の観点から必要である。(出典：NASAの日本人エンジニアのウェブサイト：<http://hiroono.com/ja/2018/10/27/> %E3%83%AD%E3%82%B1%E3%83%83%E3%83%88%E6%89%93%E3%81%A1%E4%B8%8A%E3%81%92%E3%81%AE%E9%81%A9%E5%9C%B0%E3%81%A8%E3%81%AF%EF%BC%9F/)
- (17) <https://www.sankeibiz.jp/macro/news/190611/mcb1906110500003-n1.htm>
- (18) <https://s-net.space/special/frontrunner/15.html>
- (19) アメリカのロケットエンジン部品製造会社のウェブサイトより引用：<https://www.barber-nichols.com/products/rocket-engine-turbopumps/>
- (20) <https://idarts.co.jp/3dp/rocket-lab-launch-electron-rocket/>
- (21) <https://gigazine.net/news/20200120-spacex-crew-dragon-escape-demonstration/>