

ジュール・ヴェルヌ時代に月へ行くためのロケットの研究

土井 里江子, 谷 佐衣子, 山中 朝加, 佐藤 堯, 城取 健人, 遠藤 暢彦 (日大・ロケット研)

坂井 祥子, 笹木 隆史 (日大・理工・院), 桑原 卓雄 (日大・理工)

1. 研究背景

1.1 ロケット研究会

日本大学理工学部未来博士工房として航空宇宙工学科には衛星工房と人力飛行機工房の2つがあり, 衛星工房の付属としてロケット研究会が誕生した. 1年目の2012年度では, ロケットに関する基礎知識の勉強をするとともに, ジュール・ヴェルヌの「月世界へ行く」⁽¹⁾という本を読んだ. 2年目の2013年度では, 化学平衡計算ソフトNASA-CEA⁽²⁾を用いた推進性能の計算や, 実験, 解析および考察を行った.

1.2 「月世界へ行く」

ジュール・ヴェルヌの「月世界へ行く」(1864年初版)は, 1860年代に3人の乗組員が, 大きな大砲で打ち上げられ, 砲弾に乗って月周回軌道を回って地球へ帰ってくるというものである. この時の打ち上げには大砲を用いている. 表1に本の中に登場する大砲及び砲弾の諸特性を示す.

表1 「月世界へ行く」の砲弾の諸特性

砲弾の直径	2.74[m]
砲弾の重さ	8.73[t]
砲弾の構造物の厚さ	0.35[m]
砲弾の材料	アルミニウム
砲身	274[m]
大砲の材料	鋳鉄製
発射薬: 綿火薬	181[t]

2. 研究目的

私たちは, 「月世界へ行く」を読み, 1860年代(明治初期)に月へ行けたのだろうかという疑問を抱いた. 従って本研究の目的を次のように設置した.

・ジュール・ヴェルヌの時代に当時の材料を推進薬に用いて, 月へ行くためのロケットの検討を行う.

3. 推進薬の決定

3.1 推進薬組成

先ず本研究では, 当時存在していた材料を用いることをふまえて, 酸化剤として硝酸カリウム(KNO_3), バインダーとしてパラフィン($\text{C}_{35.8}\text{H}_{73.6}$)を用いた. KNO_3 は黒色火薬の原料として以前から使われていた. また, パラフィンは蠟として広く使われており, さらに融点が低く, 熱可塑性の物質であるため, 融かし固めることが容易に出来る. 従って, 推進薬の成型を容易に行うことが出来る. 続いて, KNO_3 とパラフィンの組成比を決めるため, 化学平衡計算ソフトを使用して推進性能の計算を行った. 計算条件は圧力5 MPa, 最適開口比(8.3~8.6)で KNO_3 の混合量を変えた結果を図1に示す. 図1より KNO_3 が85 parts, パラフィンが15 partsの時にIspが最も高くなった.

次に, KNO_3 /パラフィンと混ぜる金属燃料は, 当時存在している材料の中で燃焼熱の高いものとして, アルミニウム(Al), マグナリウム(Mg-Al), マグネシウム(Mg)が候補として挙げられる. 金属燃料の添加量を増加させるとIspも大きくなる傾向にあるが, 小型のロケットモーターにおいてAlを20 parts以上入れるとノズルが詰まるため, 金属燃料の種類を決定する際の予備実験においてAl,

Mg-Al, Mg の添加する最大の量を 20 parts とした。推進薬組成は, KNO₃ が 85 parts, パラフィンが 15 parts, 金属燃料が 20 parts とした。

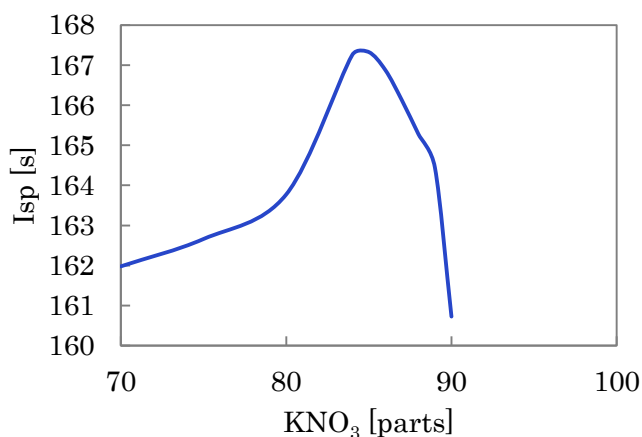


図 1 KNO₃ の添加量と Isp の関係

4. 予備実験

添加する金属を選定するため, Al, Mg-Al, Mg の 3 種類を含む推進薬で予備実験を行った。実験により, Al, Mg-Al は 1 MPa においても着火しなかった。従って今回使用する金属燃料は, Mg とし, 推進薬組成を表 2 に示す。また, この時の理論 Isp は 191 s である。

表 2 推進薬組成

	酸化剤	バインダー	金属燃料
名称	硝酸カリウム	パラフィン	マグネシウム
化学式	KNO ₃	C _{35.8} H _{73.6}	Mg
添加量 [parts]	85	15	20

5. 推進薬形状の決定

5.1 燃焼速度測定実験及び結果

今回の検討において, ロケットモーター内燃焼圧力を 5 MPa とした。推進薬の形状を求めるためには, この時の燃焼速度が必要である。従って 5 MPa の時の燃焼速度を求めるため, 燃焼速度測定実験を行い, 圧力と燃焼速度の関係を求めた。まず, 実験装置の概略図を図 2 に示す。ストランドバーナー(燃焼器)内に推進薬をセットし, 点火装置を用いて推進薬の上面に設置したニクロム線を用い, 電気的に加熱して推進薬に着火した。また, 燃焼の様子は観察窓を通してカメラで撮影した。この時, 同時に圧力センサを PC に接続して燃焼時の圧力履歴を取得した。実験条件を表 3 に示す。

表 3 実験条件

撮影速度	30[fps]
燃焼器内圧力	0.1, 0.5, 1.0[MPa]
燃焼器内温度	常温 20[°C]
燃焼器内雰囲気	窒素(N ₂)
実験回数	3 回

カメラで撮影した映像から推進薬の燃焼時間を求め, 予め計測しておいた推進薬の高さと燃焼時間から燃焼速度を求めた。また, 取得した圧力履歴から燃焼時の平均圧力を求め, 燃焼時の平均圧力と燃焼速度との関係を図 3 に示す。図 3 の実験値を累乗近似すると, 近似線は

$$r = 2.1Pc^{0.27}$$

となった。Vieille の法則より, 定数は 2.1, 圧力指数は 0.27 であった。実験結果より, 圧力 5 MPa

における燃焼速度は、3.40 mm/s であった。

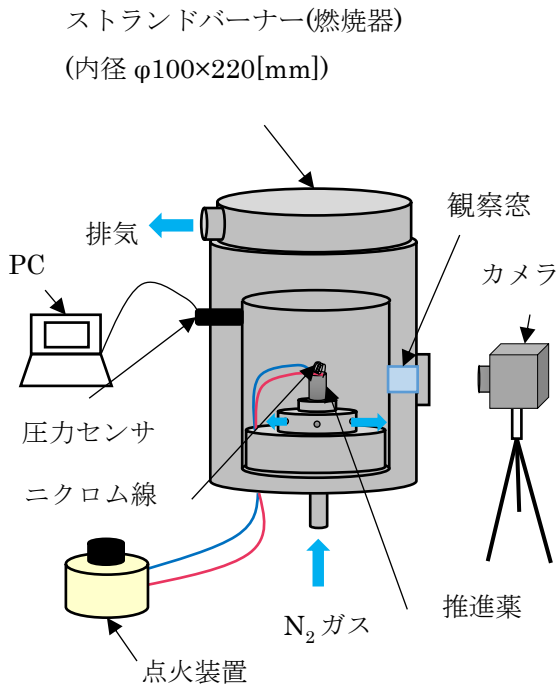


図 2 燃焼速度測定装置

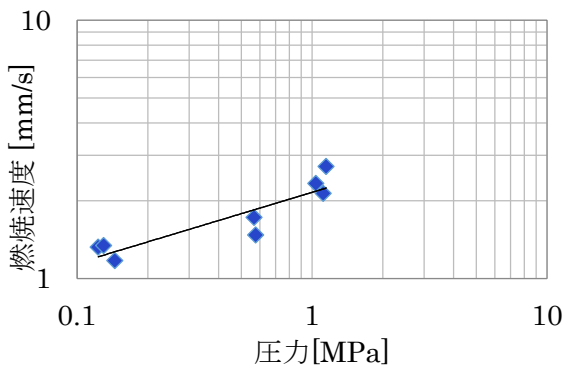


図 3 圧力と燃焼速度の関係

5.2 解析結果及び考察

今回想定している諸条件を以下に述べる。最終

速度は 11.2 km/s とし、ペイロード質量は 3 t、乗員は「月世界へ行く」と同じ 3 人、飛行時間は、打ち上げから地球への帰還までを 168 時間(7 日間)とした。さらに、化学平衡計算ソフトにより I_{sp} を求め、初期質量と I_{sp} の関係を図 4 に示す。初期質量は I_{sp} が増大するにつれて減少する傾向にある。今回使用する推進薬の I_{sp} は 191 s であることから、初期質量 M_0 は 1156 t となった。

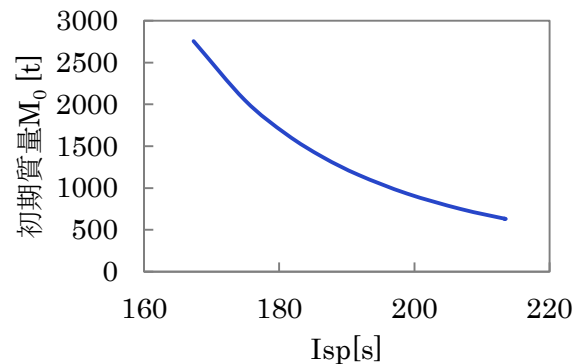


図 4 I_{sp} と初期質量の関係

さらに、燃焼速度および初期質量などから解析を行った結果、燃料充填率 80 %、段数は 4 段、燃料流量は 6024 kg/s、燃焼表面積は 1056 m² となった。なお今回の計算では、推力は重力加速度 9.81 m/s² による下向きの力を差し引いた最小値で計算している。

また、推進薬の形状を端面燃焼と仮定すると、推進薬外径が 36.7 m と非常に大きく製造するのは困難と考えられるため、今回は内面燃焼方式を使用するものとした。

続いて、内面燃焼を行うために、燃焼表面積および初期質量に対する推進薬の質量から、推進薬の外径、内径および推進薬高さを算出した。M-V の推進薬質量の割合を参考に、各段の推進薬質量、

推進薬高さを計算した結果を表4に示す。推進薬は第1段目を基準に内径を計算している。以上より、推進薬は外径5m、内径3.9m、推進薬高さ71.9mの円筒形で内面燃焼を行うものとし、ロケットは全体の高さが100mのものを想定する。

表4 各段における推進薬質量及び高さ

	第1段	第2段	第3段	第4段
推進薬質量[t]	562	258	85.8	19.5
推進薬高さ[m]	43.6	20.0	6.7	1.6

6. 構造の検討

実験結果および解析結果を踏まえてロケットの構造について検討した。まず、居住区、倉庫、帰還カプセルの構造質量は、ペイロード質量の50%とし、残りの50%にあたる約1.5tは、乗組員の食糧や衣類などに使うものとした。1人当たり500kgの内訳を表5に示す。人が生きていくために必要な空気や、7日間過ごすための飲料水、食糧、衣類など、日用品をそれぞれ仮定して質量を計算すると、7日間で1人最低321kg使用するという計算結果となった。

表5 1人分の生活必需品の質量

名称	1日分	7日分
空気	約24[kg/日]	168[kg]
水(飲料水・他)	約17.3[l/日]	121.1[l]
食糧	約2.1[kg/日]	14.7[kg]
衣類	約1.67[kg/日]	11.7[kg]
日用品・他	約0.72[kg/日]	5[kg]

また、今回想定したロケットに使用する推進薬の形状(内面燃焼方式)を図6に示し、実際に月へ行くことを想定したロケットの概略図を図5に示す。

ロケットの第1~4段までは推進薬、第5段(i~iv)は居住区および計器類を設置しておく場所としている。

まず、第5段目上部(i, ii)には居住区がある。3人で暮らすために最低限必要な空間を参考に、居住区は宇宙空間で展開し、約100m³に広がることを想定している。船内居住区にトイレや、往復時に過ごす最低限のスペースを作り、宇宙空間では基本的に展開したスペースで過ごすことを想定している。

第5段目の中間部分(iii)には、計器類および生命維持に必要なもの、日用品などの荷物が搭載されている。

第5段目の下部(iv)には地球へ帰還するための帰還カプセルがある。

また、各段の切り離しには「切り離し用ナット」を作動させることで分離させることを想定している。

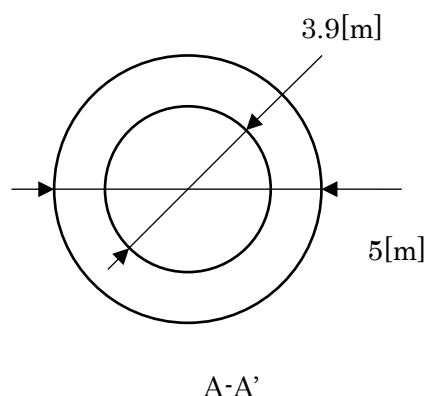


図6 推進薬形状(内面燃焼方式)

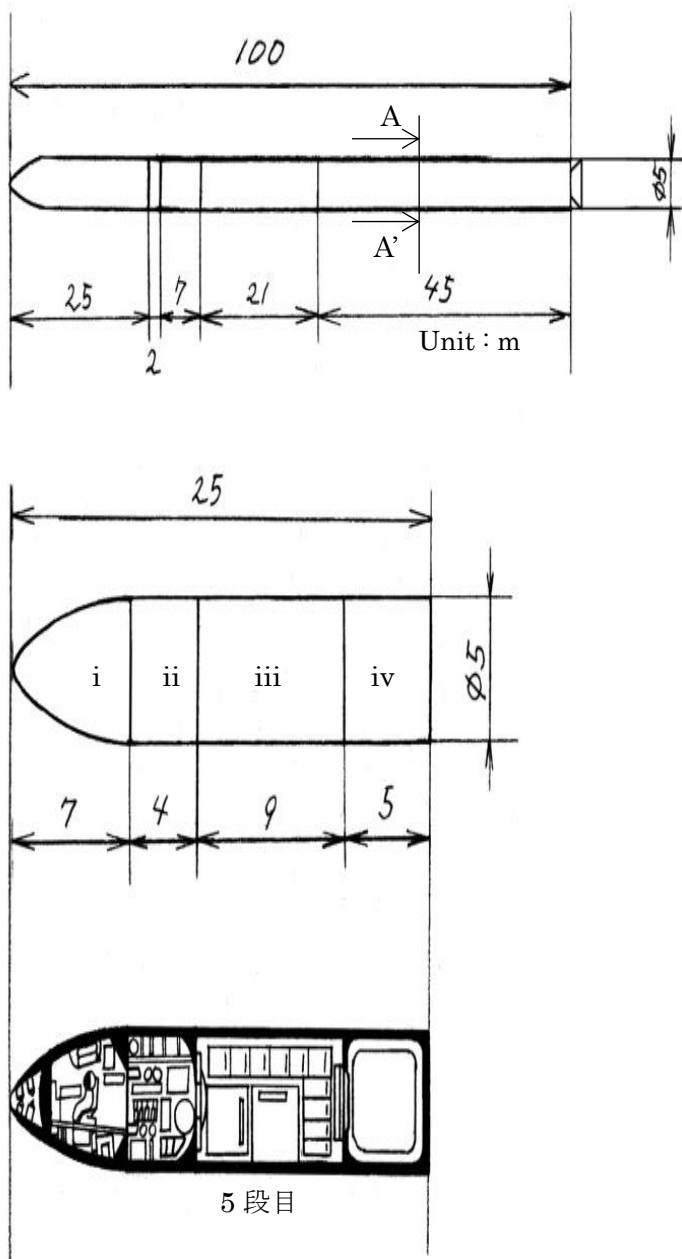


図5 想定しているロケットの概略図

7. 結論

今回想定しているロケットは、推進薬の製造性から外径5mとし、ロケットの形状を考えたが、実際に打ち上げるロケットの構造や材料、飛行計

算は行っていない。以上のことから、今回の結論は以下の通りである。

・ジュール・ヴェルヌの時代において、推進薬に KNO_3 / パラフィン / Mg を用いた、外径5m、高さ100mのロケットは、内面燃焼であれば、燃焼速度が3.4 mm/s(5MPa)で月へ行くことは可能であり、さらに端面燃焼を行うと仮定した場合、燃焼速度が183 mm/s以上あれば、月へ行くことが可能である。

8. 参考文献

- [1] 桑原卓雄，“ロケットエンジン概論”，産業図書，2009
- [2] ジュール・ヴェルヌ，訳：江口，“月世界へ行く”，東京創元社，1864
- [3] P. George Sutton，“ROCKET PROPULSION ELEMENTS Eighth Edition”，JOHN WILEY & SONS, INC, 2010
- [4] S. Gordon and B. J. McBride, Computer program for calculation of complex chemical equilibrium compositions and applications, *NASA Reference Publication*, NASARP-1311,1994
- [5] ダイキン工業,
http://www.daikin.co.jp/html/d_1.html
- [6] 厚生労働省,国民健康・栄養調査,
<http://www.mhlw.go.jp/bunya/kenkou/eiyou/h23-houkoku.html>, 2011
- [7] 奈良信雄，“看護師のための検査値・数式辞典”，秀和システム，2009
- [8] 東京水道局,
<http://www.waterworks.metro.Tokyo.jp/customer/ife/g-jouzu.html>