SSTO—ロケットのゴール

—宇宙旅行は可能か?—

Space Tourism and Rocket Goal

稲谷 芳文

Yoshifumi Inatani

1953年6月生まれ

1977年大阪府立大学工学部航空学科卒業

1983年東京大学工学系研究科博士課程修了

■主として行っている業務・研究
・宇宙輸送システム, 高速空気力学

■所属学会および主な活動

日本航空宇宙学会, 日本ロケット協会,
アメリカ航空宇宙学会

■勤務先

文部省 宇宙科学研究所 宇宙推進研究
系 助教授

(〒229-8510 相模原市由野台3-1-1)

1 はじめに

宇宙へものを運ぶ手段としてのロケットは出来上がってから何十年にもなるが、質的な意味も含めてさらに進化させることは可能であろうか。地上から地球をまわる軌道に達するために必要な速度は毎秒8 kmほどで、この速度まで積み荷を加速するのがいわゆるロケットの仕事である。小さな衛星を宇宙に送り出すために打ち上げる現在のロケットは、地上から飛び立つときは大きな図体をしているから、地上の

設備なども含めて宇宙への輸送の費用のかなりの部分は地上から飛び立つことが占めている。将来宇宙への輸送が手軽にできるようになるかどうかは、この地上からの輸送が鍵を握っている。

2 ロケットの性能

ロケットの性能について少し説明する。ロケットは高温のガスを噴き出す反動で進むから、ガスを噴き出す前の質量と吹き出し終わった後の質量をそれぞれ $M_{初}$ と $M_{終}$ として噴き出す速度を $V_{ガス}$ とすると、このときに吹き出し終わった後でロケットが達成する速度 ΔV は次のように表せる。

$$\Delta V = V_{ガス} \times \ln(M_{初}/M_{終})$$

噴き出すガスの元になる燃料の質量は $M_{燃料} = M_{初} - M_{終}$ である。この式から $V_{ガス}$ が大きい方がロケットの速度が大きくなる（性能がよい）ことが分かる。実際の数字はどれくらいになるかという、ガスの燃焼温度は2500℃から3000℃で、排出速度 $V_{ガス}$ は固体ロケットの場合で毎秒約3 km、液体水素と液体酸素を燃やす性能のよい液体ロケットで毎秒4.5 kmの程度である。ものを燃やすなどといった化学反応を用いたエンジンでは実用としてはこのあたりが上限で、これ以上となると、原子力エネルギーや、反物質の反応などといった革新的なエネルギーを使えばもっとよい性能になることは分かっているが、実際にものを作るレベルに達するのはもっと未来のことである。

数字がそろったのでグラフにしてみる（図1）。これはさっきの式の燃料を燃やす前と後の重さの比を横軸に、

加速した後に達成される速度を縦軸にしてある。一方、地球を周回するための速度は、地球を回るときに遠心力と自分の目方が釣り合う関係から毎秒8 kmの程度となる。実際は高度を上げるためとか空気の抵抗とかのロスがあるからロケットとしてはこれに1 km毎秒くらいの余分の加速が必要である。今のグラフでこれを見てみると液体ロケットの場合でこの比が10位のところに答えがあることになる。この話は一段式のロケット（打ち上げたものを全部軌道に入れる）に対して当てはまる話で、今までのロケットはこのように軽くはできないので、これを2段式や3段式にして燃え終わった下の段を次々に捨てて身軽にしていくことで、やっと宇宙に到達する。

この重さの比が10ということは $M_{初} = M_{燃料} + M_{機体} + M_{荷物}$ （乗客）であるから全部の重さのうち燃料が9割、残り1割を機体と荷物（乗客）で分けることになる。たとえばジャンボジェットと同じくらいの重さ（300 t）の機体を考えると機体を25 t、荷物が5 tなどといった配分の機体を作ることに相当する（ジャンボの機体の重さは100 t以上ある）。機体の重さが30 tになってしまったら荷物はゼロになる。30 t以上になったら荷物もクソもなくて地球に落ちてしまう。ちなみに自動車と飛行機とロケットについてこの比を比べてみるとおおむね図2のようになる。他の乗り物に比べて全体に占める荷物の量がいかに小さいかとか、一段式で宇宙に行くためにはいかに機体を軽くしなければならないかなどといったことが見て取れると思う。

3 ロケットの課題と現状

現在の形式のロケットが改革されなければならないとされる重要な動機は輸送にかかるコストが高いということである。世界には現在大きいものから小さいものまでいろいろなロケットがあるが、だいたい10tの荷物を軌道に入れるロケットの値段は100億円のオーダーであるから、1kgあたりにするとだいたい100万円のオーダーである。高い開発費をかけてぎりぎり軽く作ったロケットを1回しか使わない今のような使い捨て型ロケットの形式では、画期的なコストダウンをはかることは困難で、次の時代に目標とすべき数字は1桁とか2桁のコストダウンといわれる(後で述べる)。我々を含めて宇宙の仕事をやっている人達は「捨てること」が当たり前となっているのだが、乗り物を捨ててしまうことになんの疑問も抱かないようなことではなく、この辺で発想を変えてみるべきでは？あるいは車や飛行機を目的地に着いたからと捨てる人はいないから、普通の乗り物と同じように考えては？ということがここで述べる将来の宇宙輸送システムを考える視点である。

アメリカのスペースシャトルはこのような目標を掲げて開発された部分的な再使用型のシステムである。しかし実際はいろいろな問題に直面しあまりコストは下がっていない。ただし何事も出来上がってから批判するのはたやすいことで、輸送コストを下げたための一つの試みとして得られた経験はとても大きいと考えたほうが前向きである。

捨てるということとはとりもなおさずいったん宇宙に行ったものがもう一度帰ってくる訳であるから、行くためと帰るために必要な技術と何回でも使うための技術があればよい訳である。行くためにはロケットを加速するエンジンのよいものを作ることと機体を軽く作ることが最も大事なことは既に説明した。帰ってくることは行きで与えた速度をまたゼロに減速するわけであるが、幸いに地球では行きで獲得したエネルギーを空気との摩擦で全部熱に変えてしまえるのでエンジンなしでこれがタダでできるわけである。このような考えで、将来の輸送システムとして既にいろいろの形式のものが提案されている。軽く作る話については新しい複合材料や合金が開発されて、この

ような先進的な材料で機体の骨組みやタンクや表面の耐熱材を作れば、多段式にしくなくてもよくてどこも捨てない一段式のロケット(SSTO; Single Stage To Orbitと言う(図3)。図2で説明したグラフのロケットに相当する)も既に可能であるという人もいる。帰ってくる時の話はスペースシャトルのように翼をもって飛行機のように軌道から大気突入してさらに飛行場に水平に着陸するものから、デルマのようなロケットをそのまま垂直に地上に下ろすものまでこれもいろいろな提案がある。

4 宇宙旅行

ロケットの技術の話はひとまずおいて、輸送の需要としての宇宙旅行について紹介する。ここでの旅行は地上から地球をまわる軌道を周回し、再び地上へ帰還する旅行のことに限る。図4(a)は最近国内で行った調査の結果であるが、これは「宇宙旅行をするのに費用がいくらだったらお金を払って行く気になりますか」というアンケートの結果から推定したものである。一世代で需要が一回りするとして年間の需要は総需要の1/25としている。まず

図 5

図 4(a) はこれから推定した一回の飛行の費用（切符の値段）と国内の年間の需要（旅客数）の関係を示している。これによると 500 万円以上の値段でも年間に 1 万人の乗客が存在することになる。切符の値段と旅客数がわかると総収入が計算できるからこれをやってみると図 4(b) のようになる。商売のセンスでいうと切符の値段の設定は 100 万円から 200 万円の間くらいで収入が最大になり、年間収入が 1 兆 3 000 億円くらいになることを示している。この数字は日本全体に対してである。

これから分かることは、需要の側から合理的に決められる切符の値段の適正値は 150 万円ほどで、年間の売り上げが約 1 兆 3 000 億円の市場があると言うことである。今、日本人の海外旅行の需要は年に何百万人のオーダーで、かりに一人が 50 万円使うとするとその市場は何千億円とか 1 兆円とかであるから、要するにこれと同じかより大きな市場が存在するということである。さらに切符の値段を 150 万円としたときの総旅客数は図 4(a) から 100 万人と読みとれるから、年間にこれだけの人を輸送するロケットを作ればよいということで、ロケットの輸送能力や開発や運用の費用を見積もることができる。かりに 1 機に 50 人の乗客とし、1 日 1 回の宇宙への往復飛行を考えると機体は 100 機もあれば十分で、たとえば 25 年の間に開発費用を償却するとして、機体 1 機の値段を数百億円としても運用を工夫すれば商売は成立することになる。等々といった損得勘定を展開して宇宙旅行を現実の問題にすることが可能になってくる。今のロケットの輸送費用は荷物 1

kg 当たりで 100 万円のオーダーであるから、先ほどの切符の値段との比較を考えると、輸送のための費用はこれを 1/100 にすればこの商売は成立することになる。ここに「2 桁の輸送コスト削減を目指すべきだ」との目標に根拠を与えることができたことになる。

ここで日本ロケット協会のグループが考えている例を紹介する。図 5 は上で述べたような背景のもとに概念設計を行った KANKO-MARU（観光丸）という旅客輸送のための完全再使用型ロケットである。乗客は 50 人で短期間の軌道滞在の後地上に帰還することを前提にして設計してある。地上への帰還は垂直に降りる形式を採っている。今の技術ですぐにできるかという、エンジンや超軽量の機体の構造材料などの開発すべき要素はあるが、ある程度の先行投資的な研究開発をやれば実現の見通しは暗くない、というのが現状である。ロケットの性能の意味や技術的な問題だけでなく、旅客輸送の意味でも多くの課題がある。たとえば、飛行機や電車に乗るときには乗客に対して訓練はもちろんのこと審査も全くないが、ロケットの打ち上げや無重力環境に耐えられる乗客のある種の選抜は必要で、これをいかに簡単に行うか？とか軌道上ではどういうサービスやアトラクションが提供できるか？などといったソフト面での検討も欠かせない（何しろ一般の人を相手にするのであるから）。もちろんこの機体を作るだけではだめで、前に述べた現在のロケットの打ち上げのようなスタイルではなく、飛行場で離陸着陸を繰り返すような運用ができる地上の設備を

作ることも重要な課題である。このあたりの全体像を、税金にたよるのではなく事業としての投資の対象と考えられるようにするために定量化しておこうというのが、このグループの当面の目標である。

5 おわりに

飛行機に乗るようにして宇宙に行けたらとてもよいのだが、現在のロケットはやつとの思いで宇宙に出かけるので、無駄なものはいっさいのせられないから、自分で地上を走ることもできないし、自分で飛び立つ準備をすることもできない。このためにロケットの打ち上げというおおげさなことの代名詞になるわけである。宇宙輸送の改革の方向とは要するにロケットの打ち上げを年に一度の祭りのようなスタイルから、飛行機や自動車のような日常的な乗り物のスタイルに変革させることにつける。このことを「打ち上げの文化の変革（Change Launch Culture）」という人もいる。技術的には性能の良いエンジンと軽い機体を作ることが本質的であるが、地上設備も含めた運用の方法も今のスタイルではだめで、高頻度の離着陸に対応する飛行場のようなシステムを構築することが必要である。飛行機は既に成熟した乗り物であるから 100 円や 1 000 円で乗れるようになるとは思えないが、このように未熟なロケットはまだ改善の余地があつて、2 桁のコストダウンも可能と思って頑張らないと宇宙の時代はやってこない。この話のように改善が進めば旅行も現実となるということを経験とする。コンセプトを現実に変えるのが我々の仕事である。