再使用ロケットシステムの経済性について

稲川貴大
2021年12月3日

概要

再使用ロケットと使い捨てロケットのどちらが経済的かは多くの議論があり、定まっているとは言えない。宇宙へのロジスティックスと捉えるとkg単価と考えるのか、頻度が重要かとか、行き先の自由度が重要など様々な切り口があるために、そもそも目的自体がミッションによって定義されるべきである。本文書ではロケット1機あたりのコストは無次元化して、再使用ロケットと使い捨てロケットのkg単価での比較が可能な指標を作った。また、複数のケースでの比較を実施した。成功してる例に思えるSpaceX社のFalcon9であってもkg単価を安くするのは難しいことがわかった。さらにStarshipなど工夫を凝らした再使用システムであれば最大7割程度コスト低減できることがわかった。

１．背景・目的

2021年現在、SpaceXのFalcon9、Blue OriginのNew Shepard、Virgin GalacticのSpace Shipなど再使用ロケットの実用化が進んだ。その打上げ成功を受けて世界中で再使用ロケットの開発計画が進んでいる。しかし、使い捨てから再使用にすることによる経済性についての議論は定性的なものが多い。また、政策意思決定者や投資家に向けては着陸時の未来感のある映像を根拠に再使用ロケットが良いという方向に進んでいるように感じる。

必要なのは定量的な分析である。

ULAはSpaceXのコンペティターであるが、再使用ロケットについてはSpaceXと比較してネガティブな意見である。これはULA社の再使用ロケット経済性分析ツール[^1]を用いてFalcon9のような1段目再使用ロケットではコストメリットが無いとしている。このためULA社ではVulcanロケットの将来的な再使用についてSMART（The Sensible Modular Autonomous Return Technology） Reuseという、エンジンだけ回収するようなシステムを検討している[^2]。

このように、再使用ロケットの中でもどのような再使用ロケットにするかは純粋な技術だけではなく、経済性を考慮した上でシステムを考えなければならない。

デルフト工科大の研究によってFalcon9等のフライトパスなども含めた再使用ロケットの経済性の比較検討がされ、LEOなのか、GTOなのか、軌道傾斜角等に依存することが明らかになっている[^3]。

フライトパスなど詳細には立ち入らず、概念的なツールの中ではULA社のツール[^1]では不十分な点があることと、日本語での分析が少ないことから、ここでは定量的な議論が出来るための計算手法の確立とツールを作成し、いくつかのケース分析を行う。

今回作成のツールを用いることで、使い捨てロケットと再使用ロケットの損益分岐点と再使用ロケット開発の際の重要な点を明らかにする。

２．指標および計算手法

２．１ 前提

再使用ロケットと使い捨てロケットの2種類について、同一の宇宙輸送能力（ペイロー

ド能力）を持つものを考える。その際の製造及び運用のコストを比較することで2種類のペイロード能力あたりのコスト、つまりkg単価、もっと端的に言えばコスパを比較する。

再使用ロケットについて全部でα個のロケットを製造し、それぞれβ回再使用して打上げる。すなわち、全部でα・β回のミッションを行う。また、ミッション1回毎のペイロード輸送力をP_rとする。

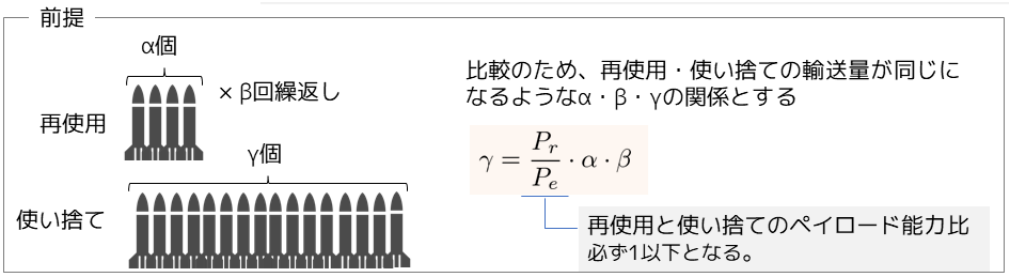
つまり、全体での輸送能力はP_r・α・βである。

使い捨てロケットについて、全部でγ個のロケットを製造して、それぞれ1回で使い捨てるとする。つまりγ回のミッションを行う。また、ミッション1回毎のペイロード輸送力をP_eとする。全体での輸送能力はP_e・γである。

ここで、再使用ロケットと使い捨てロケットの輸送能力を同一としたという前提により

$$P_r \cdot \alpha \cdot \beta = P_e \cdot \gamma$$

$$\gamma = \frac{P_r}{P_e} \cdot \alpha \cdot \beta$$



2．2 再使用指標

再使用ロケットと使い捨てロケットのkg単価の割合を再使用指標Iと呼ぶ。ここで再使用指標Iは1以上であれば使い捨てにメリットあり、1以下であれば再使用ロケットにメリットありとなる。

また、再使用ロケットのα個のロケットを製造し各々β回打ち上げるコストをC_rとし、使い捨てロケットをγ回の製造し打ち上げるコストをC_eとする。

Iは、Sを全体での輸送能力として

$$\mathrm{I} = \frac{(\$/\mathrm{kg})_{\mathrm{reuse}}}{(\$/\mathrm{kg})_{\mathrm{expend}}} = \frac{C_r/(S_r)}{C_e/(S_e)} = \frac{C_r}{C_e}$$

2．3 経験曲線効果

ここで経験曲線効果[^2]を考える。

経験曲線効果（experience curve effect）とは、経験と効率との間の関係を示す経験則である。単に経験効果とも呼ばれる。一般に個人や組織が特定の課題について経験を蓄積するにつれて、より効率的にその課題をこなせるようになることを指す。また累積生産量の増加に伴って、製品数量ごとの間接費を含めた総コストが予測可能な一定の割合で低下していくことを指す。

1930年代に米国カーチス・ライト社の技術者Wright氏によって航空機の製造数が増えることによって労働時間が下がることから発見され、ボストン・コンサルティング・グループ（BCG）社により経験曲線効果と名付けられた。

x個目のユニットのコストC_xは、1個目のコストをC_1として

$$\mathrm{C}_x = C_1 x^{\log_2(b)}$$

となる。
ここでbは習熟率と言い、各業界によって0.75~0.9程度の値を取る。また、ULA社では$b = 0.9$としている。

２．４ 累積コスト

経験曲線効果より、n個のロケットの累積コストA_nは

$$\mathrm{A}_n = \sum_{i=1}^{n} i^{\log_2(b)}$$

となる。

２．５ コスト構造と再使用指標I

コスト構造について説明する。大きく、部品製造費用と運用費用の2種類にわけて考える。再使用ロケットにかかるコストを部品製造費用のうち再使用可能部分$C(B)$、再使用不可部分の部品製造費用と運用費用のうち、再使用システムと関係なくかかる部分の費用の合計を$C(EB)$とする。また、再使用のための追加デバイス（例えば、着陸脚やグリッドフィン、パラフォイル等）の部品製造費用を$C(RHW)$（Reuse HardWareでRHW）とする。再使用のために追加でかかる回収や修繕などの運用費用を$C(RR)$（回収Recoveryと修繕RepairでRR）とする

それぞれコストに関しては回数・個数を下付き文字で記述する。例えば、$C(B)$部品をα回作る場合は$C_\alpha(B)$と書く、

つまり、使い捨てロケットのコストC_eは

$$\mathrm{C}_e = C_\gamma(B) + C_\gamma(EB)$$

再使用ロケットのコストC_rは

$$\mathrm{C}_r = C_\alpha(B) + C_{\alpha\beta}(EB) + C_\alpha(RHW) + C_{\alpha\beta}(RR)$$

したがって、再使用指標Iは

$$\begin{aligned} I &= \frac{C_\alpha(B) + C_{\alpha\beta}(EB) + C_\alpha(RHW) + C_{\alpha\beta}(RR)}{C_\gamma(B) + C_\gamma(EB)} \\ &= \frac{A_\alpha C_1(B) + A_{\alpha\beta} C_1(EB) + A_\alpha C_1(RHW) + A_{\alpha\beta} C_1(RR)}{A_\gamma (C_1(B) + C_1(EB))} \\ &= \frac{A_{\alpha\beta}}{A_\gamma} \cdot \frac{\frac{A_\alpha}{A_{\alpha\beta}} C_1(B) + C_1(EB) + \frac{A_\alpha}{A_{\alpha\beta}} C_1(RHW) + C_1(RR)}{C_1(B) + C_1(EB)} \end{aligned}$$

ここで

$$\mathrm{k} = \frac{C_1(B)}{C_1(B) + C_1(EB)}$$

とすると、Iは

$$\mathrm{I} = \mathrm{k} \cdot \frac{A_{\alpha\beta}}{A_{\gamma}} \cdot \left[\frac{A_{\alpha}}{A_{\alpha\beta}} \left(1 + \frac{C_1(RHW)}{C_1(B)} \right) + \frac{C_1(RR)}{C_1(B)} + \frac{1-k}{k} \right]$$

したがって再使用指標Iは$\alpha, \beta, \frac{P_r}{P_e}, \frac{C_1(RHW)}{C_1(B)}, \frac{C_1(RR)}{C_1(B)}, b$、kの7個の変数で変化する指標となる。

再度変数についてまとめると、

α：再使用ロケットの製造機数
β：再使用ロケットの繰り返し使用回数
$\frac{P_r}{P_e}$：再使用と使い捨てのペイロード能力比、必ず1以下となる。
$\frac{C_1(RHW)}{C_1(B)}$：再使用ロケットの再使用部分製造コストと回収用デバイス製造コストの比率。
$\frac{C_1(RR)}{C_1(B)}$：再使用ロケットの再使用部分製造コストと回収・修繕の運用コストの比率。
b：習熟率、0.75~0.9が製造業で典型的。ロケットの場合、0.8~0.9程度。
k：再使用可能部分の製造コスト割合

再使用・使い捨てロケットの宇宙輸送のkg単価の有利不利指標I
※1未満であれば再使用ロケットが有利

$$\mathrm{I} = \mathrm{k} \cdot \frac{A_{\alpha\beta}}{A_{\gamma}} \cdot \left[\frac{A_{\alpha}}{A_{\alpha\beta}} \left(1 + \frac{C_1(RHW)}{C_1(B)} \right) + \frac{C_1(RR)}{C_1(B)} + \frac{1-k}{k} \right]$$

- ロケット製造コストのうち、再使用可能部分の割合
- 習熟率bで量産効果のある製造物の累積製造コストのαβ個と　γ個の割合
- 習熟率bで量産効果のある製造物の累積製造コストの　α個とαβ個の割合
  - 0.75~0.9が製造業で典型的。ロケットの場合、0.8~0.9程度
- 再使用ロケットの回収用デバイス製造コストと再使用部分製造コストの割合
- 再使用ロケットの回収・修繕の運用コストと　再使用部分製造コストの割合

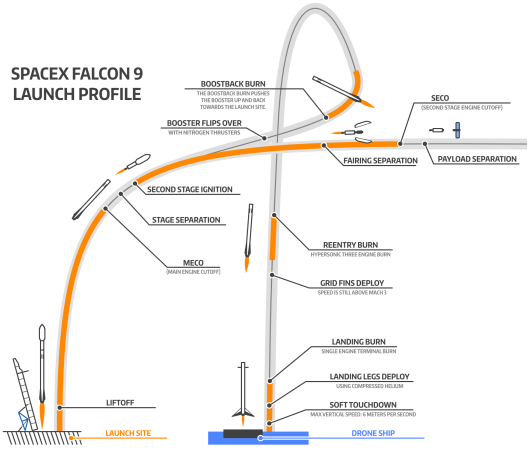
３．ケーススタディ

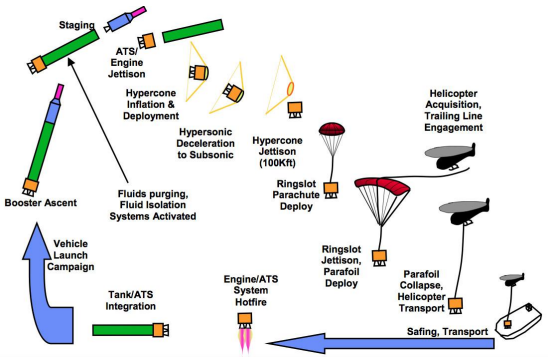
求めた再使用指標Iを用いて、３種類のロケットについて再使用ロケットの経済性について調べる。それぞれSpaceX社のFalcon9、ULA社のSMART　Reuse、SpaceX社のStarshipを想定したものになっている。

表：再使用指標の検討各ケース

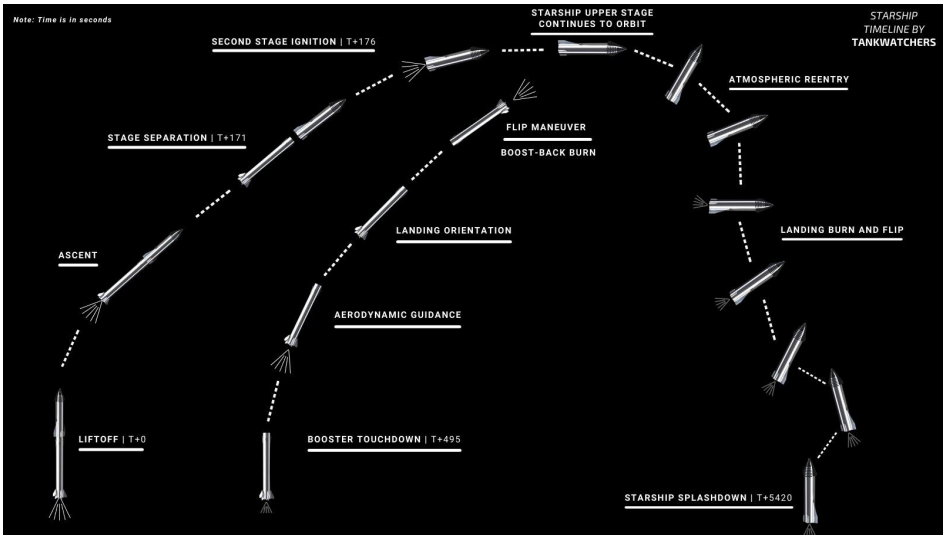
	ケース１	ケース２	ケース３
α：再使用製造機数	10	10	100
k：再使用製造割合	0.4	0.18	0.9
$\frac{P_r}{P_e}$：ペイロード能力比	0.7	0.95	0.9
$\frac{C_1(RHW)}{C_1(B)}$：回収コスト比	0.05	0.0	0.05
$\frac{C_1(RR)}{C_1(B)}$：運用コスト比	0.1	0.1	0.1
b：習熟率	0.9	0.9	0.9
参考	SpaceX, Falcon9 ULAのレポートより	ULA, SMART ULAのレポートより	SpaceX, Starship を想定して筆者が独断で適当な数字を入れている。

各ケースのフライトシーケンス

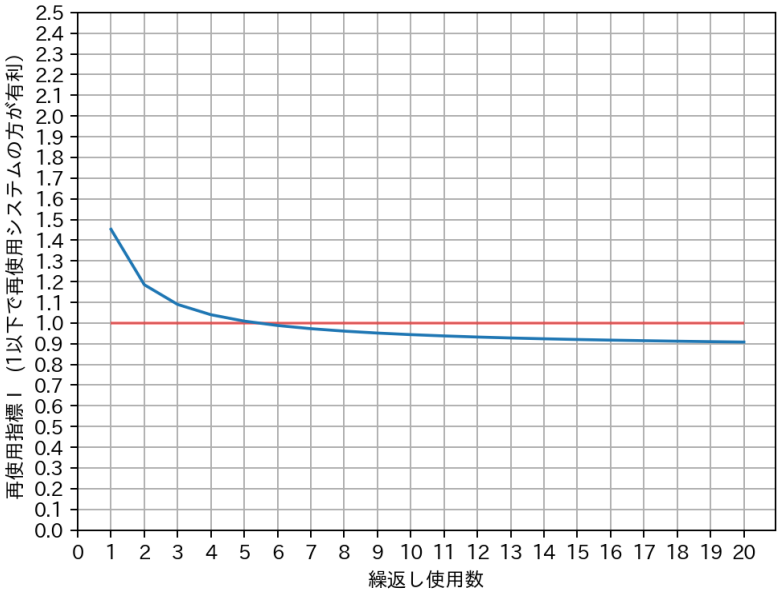




ケース１（引用：http://www.justatinker.com/Future/）　　ケース２（引用：ULA社）



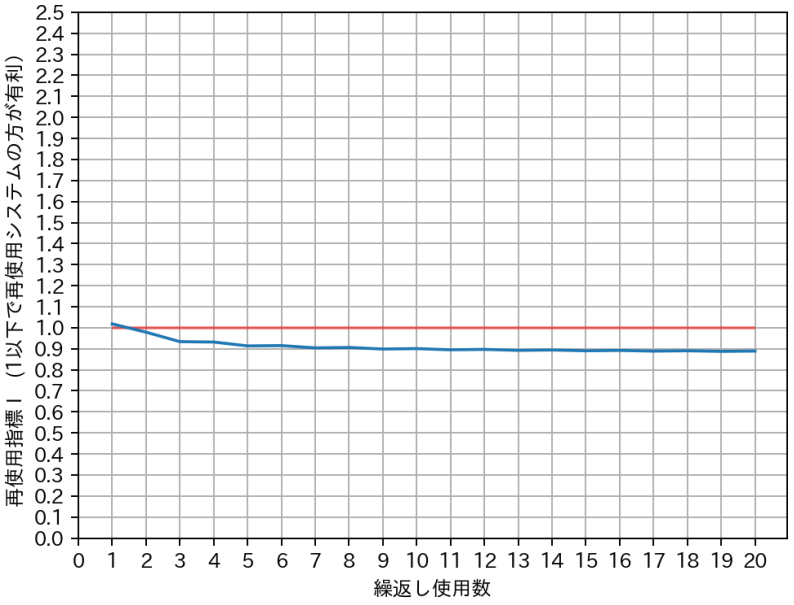
ケース３（引用：Twitter@WatchersTank氏）



ケース１

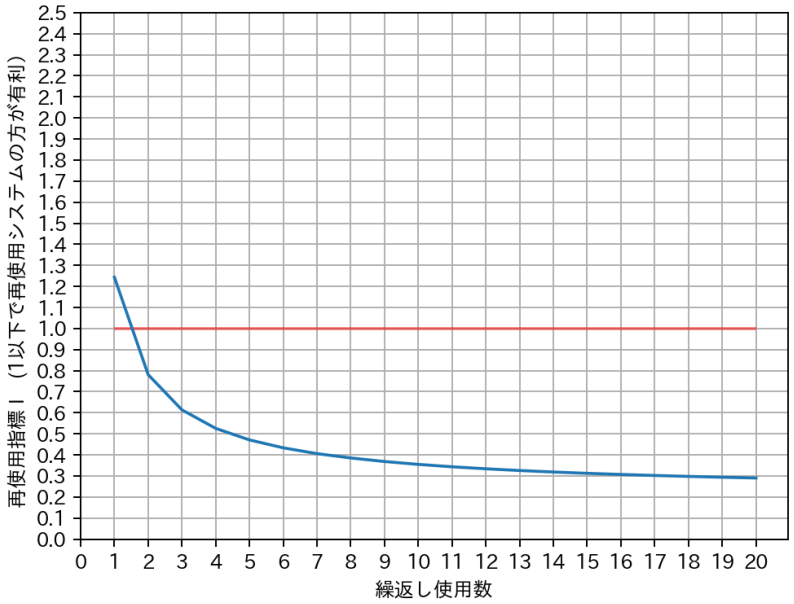
7回目ぐらいまで使い捨てが経済的。Falcon9の再使用回数は10回程度と言われているので、ほとんど使い捨てロケットと費用は変わらない。今後20回以上再使用したとしても使い捨て比較で宇宙輸送kg単価で10%程度のコスト削減にしかならない。
過去、SpaceX社から出た発言を真に受けて日本の新聞の1面に「ロケット再利用、発射費用100分の1に」というような記事が出たことがあるが、再使用技術だけではkg単価の100分の1は全く不可能であることがわかる。

1段目は最後の使用時に使い捨てることでペイロード能力増強することを考えると、このグラフ以上に再使用が有利になるが、射場整備や船などの初期費用を考慮すると、ここでは判断がつかない。



ケース２

このSMART Reuseの場合は、Falcon9比較で再使用経済性を向上させている。特に1回目2回目において使い捨てより高コストにならないような工夫になっている。複数回再使用した際にはやはり低コスト化は限定的で、10%程度しか安くならない。
しかも、Falcon9と異なり、再使用しない場合の能力増強効果も無いのでFalcon9の再使用よりも経済的には疑問である。



ケース３

　StarshipはFalcon9での再使用経済性の欠点を補うべく多くの変更を入れている。複数回再使用するとコスト70%減ぐらいになる。
とはいってもStarshipのようなプロジェクトが上手くいっても、使い捨てロケットに比べてコストは1/3程度にしかならない。
1/3でも十分すごいが、一般的に思われいてる再使用ロケットのインパクトに比べると小さいと思われる。

４．結論

　ロケットの大きさによらず、どの部分を再使用するかなどによらずコストだけで比較できる再使用指標を作った。3つのケーススタディをしたところ、Falcon9のような再使用方法ではほとんど低コストにはならないことがわかった。また、ULA社のSMART Reuseの方法でも低コスト化は限定的であることがわかった。Starshipクラスの場合は様々な工夫が入り、低コスト化に寄与していることがわかった。しかしそれでもコストは1/3程度になるという限界を示した。

５．参考

[^1]:https://forum.nasaspaceflight.com/index.php?topic=37390.0
[^2]:AIAA 2015-4490 "Launch Vehicle Recovery and Reuse"
[^3]:Rozemeijer Mark,"Launch Vehicle First Stage Reusability: a study to compare different recovery options for a reusable launch vehicle", 2020, TU Delft master thesis
[^4]:Wikipedia - Experience curve effects