

# 宇宙観光の振興とハイブリッドロケット技術に関する考察

嶋田 徹

JAXA 宇宙科学研究所

## Study on Promotion of Space Tourism and Hybrid Rocket Technology

Toru SHIMADA

Institute of Space and Astronautical Science, JAXA

### ABSTRACT

Space development began with a dream of space travel. Currently, with regard to non-human space transportation, such as launch of micro-satellites into orbits, investment in New Space startups is actively promoted, and a market economy is being built progressively. On the other hand, investment in space tourism is still weak due to its high risks, but it is expected to lead to significant prosperity of the future global space economy. Comparing space travel with air travel, the biggest challenge of space tourism promotion is concluded to be realization of resilience against hazards in space travel. By analyzing the resilience of two types of developing space tours, the non-explosive nature inherent in hybrid rockets is extracted as the key to the resilience. Furthermore, minimum use of rockets and maximum use of aircraft technology will enhance resilience, whereas use of explosive propellants in emergency escape systems reduces overall resilience.

**Keywords:** Space Tourism, Hybrid Rocket, Resilient Space Travel

### 概要

宇宙開発は、宇宙旅行の夢から始まった。現在、超小型衛星の軌道投入など人間以外の宇宙輸送に関しては、New Space の新興企業への投資が盛んになっており、市場経済化が進行中である。一方、宇宙観光への投資はリスクが高いため現在のところ弱い。これが進めば、世界の宇宙経済の顕著な発展につながると予想される。宇宙旅行と航空旅行を比較することにより、宇宙観光振興の最大の課題が、宇宙旅行の強靱化(レジリエンス)の実現であることが分かる。現在開発中の2種類の宇宙旅行形態の強靱性を分析することにより、ハイブリッドロケットに固有の非爆発性があることがそのためのキー技術であり、さらにロケットの使用を最小化し、航空機技術を最大限に取り入れることでより一層強靱化が向上することが分かる。一方、緊急脱出システムで爆発性推進剤を使用すると、全体の強靱性は低下する。

### 1. ここまでの経緯と現状

1865年、フランス人ジュール・ヴェルヌが創作した小説「月世界旅行」<sup>1)</sup>が出版されると、その後それに感化された3名の天才が出現した。1897年に有名なロケット方程式を発表したロシア人コンスタンチン・ツィオルコフスキー<sup>2)</sup>、1923年に「惑星間宇宙へのロケット」を著したドイツ人ヘルマン・オーベルト<sup>3)</sup>、1926年に世界最初の液体燃料ロケットを打ち上げた米国人ロバート・ゴダード<sup>4)</sup>である。さらに1931年ソビエト連邦では反動推進研究グループ *Gruppa izucheniya reaktivnogo dvizheniya (GIRD)*<sup>5)</sup>が設立され、ロケットエンジンや飛翔体の組織的な研究が始まった。後にスプートニク計画の主導者となったロシア人セルゲイ・コロリョフ<sup>6)</sup>は当時この研究グループの中核にいた。GIRDには複数のプロジェクトが動いていたが、そのうちのGIRD-9はハイブリッドロケット(液体酸素/ゲル化石油)であり、GIRD初のロケットとして、1933年8月17日に打ち上げられた。これが世界初のハイブリッドロケットの打ち上げと言われる。この時点ではハイブリッドロケットも液体ロケットも同レベルの技術開発状況であった。この状況を大きく変えたのがドイツ人ヴェルナー・フォン・ブラウン<sup>7), 8), 9)</sup>である。フォン・ブラウンはオーベルトに師事してロケット工学の数学的側面を会得しつつ、それを現実の工業製品として作り上げることに強烈な才能を発揮した。彼が第2次世界大戦時にパーネミュンデ陸軍実験場において設計開発を指導しドイツ軍によって運用されたV2ロケット(A-4ロケット)は液体ロケットの一つの完成形であり、現在に至る液体ロケット系譜の基本をなすものである。ドイツの敗戦後、パーネミュンデの研究者らは二分され米国とソ連に移ってそれぞれロケットの開発に従事した。フォン・ブラウンは米国に移り、米

陸軍およびNASAにおいて米国のロケット開発を指導した。月旅行を実現したサターンV型ロケット(1967-1972)はフォン・ブラウンのロケットの究極である。一方、ソビエトにおいてはドイツのV2技術を踏まえつつも、コロリョフがR-7ロケットを独自に完成させた。1957年には世界最初の人工衛星スプートニク1号が、R-7ロケットにより打ち上げられた。米国は1958年、フォン・ブラウンらがまとめたジュノー1ロケットによって米国初の人工衛星エクスポローラ1号を打ち上げた。こうして米ソの宇宙開発競争が始まった。そして1961年、ユーリイ・ガガーリンが搭乗したボストーク1号がR-7ロケットによって軌道に打ち上げられ、有人宇宙旅行の幕開けとなった。同年、米国ではアポロ計画が開始された。1969年にはサターンV型ロケットを用いたアポロ11号が打ち上げられ、同年7月20日、ニール・アームストロング船長およびバズ・オルドリン飛行士が月面に降り立った。その後は、スペースシャトル、ボイジャー探査機、ハッブル宇宙望遠鏡、国際宇宙ステーションや、国内では固体ロケットによる宇宙観測・探査、液体ロケットを用いた実用衛星打ち上げなど、様々な宇宙開発が行われてきた。これらについては割愛するが、ここでは、「宇宙旅行への夢を実現する」ためにロケット開発が始められた事を再度強調しておきたい。

さて、現在に目を移すと、コンステレーション<sup>10)</sup>形態運用のための超小型衛星の大量打ち上げの需要が高まり、商用小型衛星の打ち上げ数が顕著に増加している(図1)<sup>19)</sup>。また、それに応えるために民間のロケット打ち上げ企業への投資が活況を呈しており、2000年から2018年の間に、220以上の新しい宇宙会社が設立され、資金供給を受けている(図2)<sup>20)</sup>。これらはSpaceX<sup>11)</sup>、Blue Origin<sup>12)</sup>、Rocket Lab<sup>13)</sup>、Virgin Orbit<sup>14)</sup>、国内では、スペースワン<sup>15)</sup>、Interstellar Technologies<sup>16)</sup>などのNew Spaceと呼ばれるスタートアップ宇宙企業である。スタートアップ宇宙企業の側面として、垂直統合、製造者と事業者の統合、小製作チームによる技術革新、市販部品(COTS)の活用、倉庫保管・在庫維持、再使用性の追求、積層造形の活用、などの特徴がある。垂直統合とは、SpaceX社のように部品製造～システムインテグレーション～打ち上げビジネスを1社で実施することであり、製造者と事業者の統合とは、事業を複合的に行うことであり、これに関しては、Planet Labs社<sup>17)</sup>のように2014年以来100以上の衛星を製造する一方で、衛星を運用して得たデータを製品にして販売している事例や、SpaceX社やRocket Lab社やVirgin Orbit社のように打ち上げロケットを製造する一方で、衛星打ち上げも行う等の事例がある。小製作チームによる技術革新としては、Planet Labs社やSpire Global社<sup>18)</sup>などに見られる、超小型衛星の寸法規格CubeSat Form Factorに合ったオプション提供が可能な打ち上げロケットの開発などが挙げられる。市販部品(Commercial Off-The-Shelf, COTS)の活用とは、モバイル機器のような他産業で信頼性が証明されている部品を宇宙で用いる

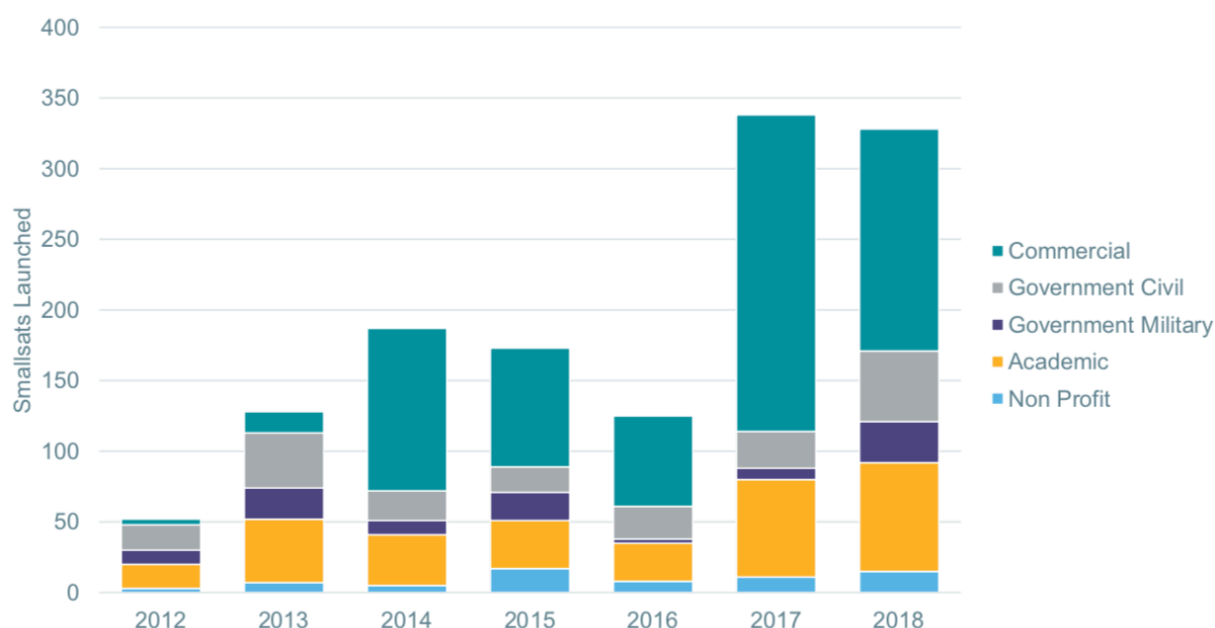


図1 超小型衛星打ち上げ数の推移(ユーザー別)<sup>19)</sup>



図2 スタートアップ宇宙企業の設立と投資の規模の推移<sup>20)</sup>

ことでコストを低減することである。倉庫保管・在庫維持とは、かつての「職人」の受注生産産業から、自動車産業のような業態への転換が進んでいることを意味する。再使用性の追求はSpaceX社やBlue Origin社が進めるロケットブースターの再使用であり、積層造形の活用とはRocket Lab社のエンジンのように積層造形(Additive Manufacturing)を多用した製品を使うことである。以上のようにスタートアップ宇宙企業は何らかの新しい挑戦を導入することで、従来に比べて格段に高い供給力を獲得し、それによって打ち上げ需要の急拡大に対応しようとしているように見える。

BRACE space and technologyによると<sup>21)</sup>、2018年の全世界の宇宙経済の歳入は前年度比+3.4%の38.8兆円である（2019年8月末での円ドル為替換算による）。そのうちの77%を占める衛星利用産業が前年度比+3.3%の29.9兆円、残り23%にあたる8.9兆円のほとんどが政府宇宙予算(8.7兆円)で、それ以外の0.19兆円が商用有人宇宙飛行、すなわち宇宙観光である。世界の宇宙経済の4分の3以上を占める衛星利用産業の内訳は、衛星サービスで13.6兆円、地上設備で13.5兆円、衛星製造で2.1兆円、ロケット打ち上げで0.67兆円となっている。Goldman Sachs社<sup>22)</sup>やMorgan Stanley社<sup>23)</sup>の予測によると、宇宙経済全体は2040年には100兆円を超える巨大産業に成長すると見られている<sup>24)</sup>が、ロケット打ち上げが健全で持続的な経済発展をすることが大前提となっている。ロケット打ち上げの経済規模は宇宙経済全体の1.7%にすぎないが、それが無ければ全体が無くなるという存在である。まさにロケット打ち上げは宇宙経済の運命の鍵を握る極めて重要なインフラストラクチャである。人類の宇宙旅行への願望を叶えるために始まったロケット開発であるが、商用有人宇宙飛行は未だ全体の0.5%以下であり、将来の成長が期待されている。

## 2. 宇宙観光の振興について

現在、宇宙の境界に関して2通りの定義が使われている。一つは米国空軍やNASAによる定義で、宇宙を高度50マイル（約80km）より上空とするもの。もう一つは、国際航空連盟(FAI)で定義するカルマンライン（高度100km）より上空とするものである。

宇宙旅行と宇宙観光の違いはその呼び方の違いだけではない。宇宙旅行とは文字通り人が宇宙に行って帰ってくるものの総称であるが、宇宙観光と言う時、それは娯楽と感動を伴う非日常的体験や冒険、心地の良さ・快適さ、無事に家に帰れる安心と安全などの要素を持つものでなければならない。宇宙観光を振興する意義は、少なくとも次の二点で宇宙経済の発展に寄与することにあると考えられる。一つは、宇宙観光自体が新しい宇宙空間利用を促し、多角的なビジネスを生み出すというもの。もう一つは、宇宙観光を支えるインフラである宇宙輸送の強靱化による結果、宇宙経済全体の発展が促進されるというものである。

1969年アポロ11号で人類は月旅行を実現した。そしてアーサー・C・クラーク<sup>25)</sup>やスタンリー・キューブリック<sup>26)</sup>による「2001：A Space Odyssey」(1968年)<sup>27)</sup>等に感化され、パンアメリカン航空(PAN AM)<sup>28)</sup>は月旅行サービスが西暦2000年までに始まると予測し、宇宙旅行のチケット販売を開始した。このとき、98,000人がサインアップしたと言われている。しかしながら、その後NASAは月計画を打ち切り、PAN AMはその待機リストを閉鎖することになった。1991年にはPAN AM自体が倒産に追い込まれた。

1990年、ソ連のソユーズTM11号・10号でミール宇宙ステーションをTBS秋山豊寛<sup>29)</sup>記者が往復し、世界初の商用宇宙軌道飛行が実現した。その後、2001年、デニス・チトー<sup>30)</sup>がソユーズTM32号・31号でミール宇宙ステーションまで旅行し、初の個人自費宇宙旅行となった。2018年12月3日の時点で、有人の軌道打ち上げは318回、延べで1,319人が軌道に往き来したことになる<sup>31)</sup>。

一方、サブオービタル飛行に関してはどうか？一般にサブオービタル宇宙旅行の特徴としてよく持ち出されるのは、LCRATS: Low-Cost and Reliable Access to Spaceであり、頻繁なフライト数、妥当なコスト、簡単に宇宙に行ける、低G荷重、クイックオーバーホール&ターンアラウンド、ペイロード/ユーザーフレンドリー、科学観測や実験にも使える等が挙げられる。表 1に有人サブオービタル宇宙旅行の実績を示す。フライト回数は23回、延べで27名が行き来したことになり、軌道宇宙旅行に比べると、サブオービタル有人宇宙旅行の数は少ない。

表 1 有人サブオービタル宇宙旅行の実績<sup>32)</sup>

年	名称	場所	宇宙基準	乗員数	遠地点km
1961	マーキュリー・レッドストーン3	ケープ カナベラル	FAI	1	187.50
1961	マーキュリー・レッドストーン4	ケープ カナベラル	FAI	1	190.39
1962	X-15 フライト 62	エドワード空軍基地	US	1	95.94
1963	X-15 フライト 90	エドワード空軍基地	FAI	1	106.01
1963	X-15 フライト 91	エドワード空軍基地	FAI	1	107.96
1963	X-15 フライト 77	エドワード空軍基地	US	1	82.81
1963	X-15 フライト 87	エドワード空軍基地	US	1	86.87
1965	X-15 フライト 138	エドワード空軍基地	US	1	85.53
1965	X-15 フライト 143	エドワード空軍基地	US	1	82.60
1965	X-15 フライト 150	エドワード空軍基地	US	1	90.10
1965	X-15 フライト 153	エドワード空軍基地	US	1	81.23
1966	X-15 フライト 174	エドワード空軍基地	US	1	93.54
1967	X-15 フライト 190	エドワード空軍基地	US	1	85.50
1967	X-15 フライト 191	エドワード空軍基地	US	1	81.08
1968	X-15 フライト 197	エドワード空軍基地	US	1	81.53
1975	ソユーズ 18a	バイコヌール宇宙基地	FAI	2	192.00
2004	スペースシップワン フライト 15P	モハベ航空宇宙空港	FAI	1	100.10
2004	スペースシップワン フライト 16P	モハベ航空宇宙空港	FAI	1	102.90
2004	スペースシップワン フライト 17P	モハベ航空宇宙空港	FAI	1	112.00
2018	ソユーズ MS-10	バイコヌール宇宙基地	US	2	93.00
2018	スペースシップツー VSS Unity VP-03	モハベ航空宇宙空港	US	2	82.70
2019	スペースシップツー VSS Unity VF-01	モハベ航空宇宙空港	US	3	89.90

サブオービタル宇宙飛行が最初に行われたのは、1961年にフォン・ブ라운らのレッドストーンロケットによって米国ケープカナベラルから打ち上げられたマーキュリー3号<sup>33)</sup>である。同年にはマーキュリー4号も打ち上げられた。その後、USAFの基準（高度80km基準）に従えば、1962年のX-15<sup>34)</sup> (NASA-USAF-USN)のフライト62が続く。高度80km基準にすると、X-15ロケット飛行機によるサブオービタル飛行は1962年から1968年までの間に、13回実現したことになる。

X-15が1968年に退役して以降は、ソユーズロケットの打ち上げ失敗の2回を除けば、2004年のANSARI X PRIZE<sup>35)</sup>をスペースシップワン<sup>36)</sup> (SpaceShipOne, 以下SS1と略す)を擁するスケールド・コンポジット (Scaled Composites) 社<sup>37)</sup>が受賞するまでサブオービタル有人飛行はなかった。このように見ると、SS1が空中発射方式の宇宙飛行機であることなど、X-15との共通点が多い理由について頷けるのである。X-15もSS1も母機の飛行機に懸架されて水平離陸し、上空で切り離された後にロケットエンジンに点火し宇宙に到達する。X-15の母機はB-52爆撃機であり、SS1の母機はWhiteKnight1であった。X-15のロケットエンジンは液体アンモニア/液体酸素による液体ロケットであるのに対し、SS1では末端水酸基ポリブタジエン固体燃料と液体の亜酸化窒素を用いたハイブリッドロケットを用いた。

有人弾道宇宙飛行のためのX Prizeは1996年に開始され、以来世界中から26チームが参加してコンテストが行われた。その結果、SS1が2004年10月4日（米国時間）に規定の条件を最初にクリアし、賞金の1,000万ドルを獲得した。X Prizeの受賞条件は以下のような画期的なものであった。

- 宇宙空間（高度100 km以上）に到達する
- 乗員3名（操縦者1名と乗員2名分のバラスト）相当を打ち上げる
- 2週間以内に同一機体を再使用し、宇宙空間に再度到達する

最後の2つの要件は、商用宇宙旅行あるいは宇宙観光の振興を意図して行われたものと思われる。

SS1がX Prizeを受賞した翌年（＝2005年）、Futron社は、「サブオービタル市場では宇宙観光の需要が高まっているため打ち上げが急増し、ニューメキシコの宇宙港からの打ち上げ可能数は2010年の61から2020年には426に増加するだろう。」や「宇宙港はニューメキシコ州で約4億6,000万ドルの追加の経済活動を創出するための基盤を提供する可能性があり、2015年には約3,460人の新たな雇用が生まれる」などと予測した<sup>38)</sup>。これが見事に外れたのは、スタートアップ企業のビジネスリスクに関する読みが甘かったためと言える。サブオービタル宇宙観光のビジネスを立ち上げるということの現実には予想以上に厳しかった。2007年スケールド・コンポジット社はスペースシップ2 (SpaceShipTwo<sup>39)</sup>, 以下SS2) のエンジンを開発する途上であったが、酸化剤である亜酸化窒素をタンクに充填する作業で、爆発事故を起こし3名の命が奪われてしまった。その後Virgin Galactic社<sup>40)</sup>によってSS2の試験飛行が開始され、動力飛行試験も成功するようになったが、2014年、テストパイロットの人的ミスによって空中分解を起こし、1名が重症で1名が死亡してしまった。

そのような困難を乗り越えて、2019年現在ではSS2の2号機 (VSS Unity)によって、US基準ではあるが2度サブオービタル宇宙旅行を達成している。2018年12月13日のVSS Unity VP-03で82.72km、2019年2月22日のVSS Unity VF-01で89.9kmを達成。VF-01においては、2名の飛行士に加え、1名のテスト乗客が搭乗した。

### 3. 宇宙観光とハイブリッドロケットに関する考察

#### 3.1. 資本獲得の問題

Gibson, et al.は、宇宙観光投資に関する具体的な障害として、資本金、法規制、人の意識、協同連合に必要性、市場の欠如、リスクなどの具体的な障害を指摘している<sup>41)</sup>。この中で、資本金の障害として最大の問題は、「投資家が現れるかどうか」であると述べている。投資家にとって、収益を生み出していないものへの投資は困難である。また宇宙観光は有人宇宙輸送であり、そのための輸送手段を開発しなければならない。Berinsteinはその著書の中で、“Space travel is dangerous. Despite forty years of space flight, we have little experience on which to base design for ordinary passenger travel. And in order for space tourism to attract investment and consumers, every aspect of it will have to be safe. It takes a long time to prove that something is safe.” 「宇宙旅行は危険である。宇宙観光が投資と消費者を引き付けるためには、そのあらゆる側面が安全でなければならない。安全なものであることを証明するには長い時間がかかる。」<sup>42)</sup> と述べた。すなわち、宇宙観光は資本集約型産業であり、投資の回収に多くの年月を擁する。それらのために、一部のエンジェル投資家（ビジネスエンジ

エル)を除いて、基本的に投資家は宇宙観光への投資には興味を示していない。投資が不十分のためにプロジェクトが中止された例としては、1980年代のPhoenixやSangerやVentureStarなどが挙げられる<sup>43)</sup>。

### 3.2. 宇宙輸送産業の動向

昨今、宇宙輸送産業の市場経済化の動きが見られる。すなわち、これまでのような国毎の独占・寡占的状況からグローバル競争への変化が見られる。表2に示されるように単位質量あたりのLEO打ち上げ価格の格差は拡大する傾向が見られ、超小型衛星打ち上げの分野を起点にして今後その傾向が強まる可能性があると思われる。

表2 LEO 打ち上げ価格 (公称値から著者が推定したもの)

機体	LEO ペイロード 重量 (トン)	打ち上げ価格 (億円)	1トン当たりの打ち 上げ価格 (億円)
ファルコン9	13	50	4
ファルコンHeavy	63.8	100	2
ドニエプル	4.5	30	7
イプシロン	1.5	40	27
VEGA	2.3	35	15
デルタIV Heavy	28.9	450	16
H-IIA	10	80	8
アリアンV	21	170	8

宇宙利用産業を全体的に見れば、産業・市場構造は競争市場的であるが、打ち上げ産業だけに限って言えば、寡占的／独占的である。図3に示すように、一般に寡占市場、独占市場においては企業数は少なく、価格と生産量を決めるのはコストである。一方、企業数が増加すると、競争的市場となり、市場（需要と供給）が価格と生産量を決める。そして今後の打ち上げ産業の動向としては、寡占・独占市場から競争的市場へのシフトが進行すると考えられ、販売量は各社がつける価格に依存する価格に依存して決まることになる。ここで、価格(プライス)の定義は財やサービスに対する対価であり、決して費用(コスト)ではないことに注意しなければならない。競争市場において価格は需要・供給の法則によって、需用量と供給量が一致する価格で均衡する。打ち上げの需要曲線とはペイロード側の希望としての「高価格ならば打ち上げ回数は少なめにしたい」や「低価格ならば打ち上げ回数を増やしたい」ということを反映して、横軸打ち上げ回数、縦軸打ち上げ価格としたときに右肩下がりの曲線となる。一方、打ち上げの供給曲線とは、ロケット側の希望としての「低価格ならばあまり打ち上げたくない」や「高価格ならばたくさん打ち上げたい」という思いを反映して、横軸と縦軸を同じようにとったときに、右肩上がりの曲線となる。需要曲線と供給曲線の交点が均衡価格、均衡打ち上げ回数となる(図4参照)。

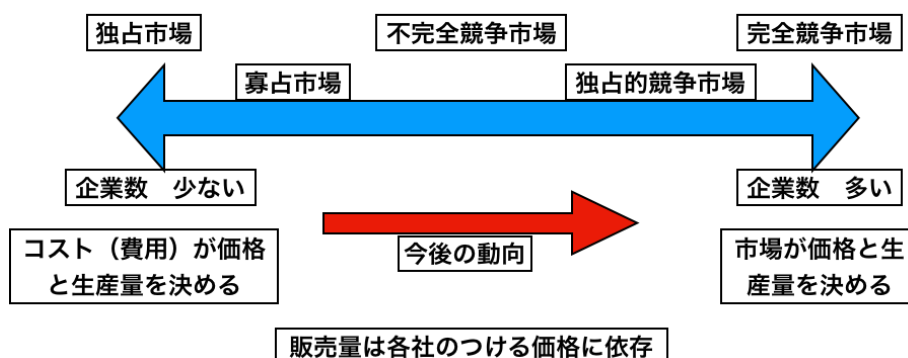


図3 産業・市場構造の特徴



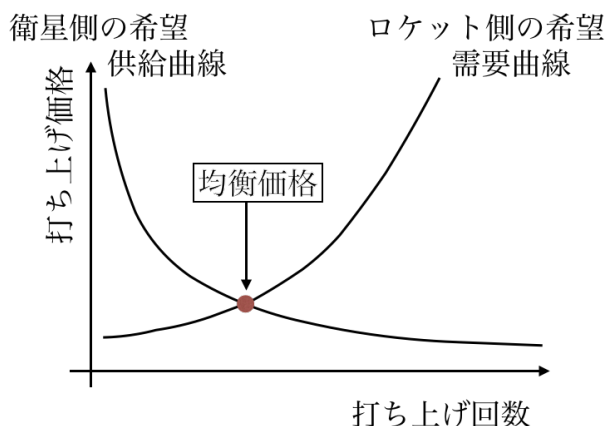


図4 需要・供給の法則に基づく均衡価格と打ち上げ回数

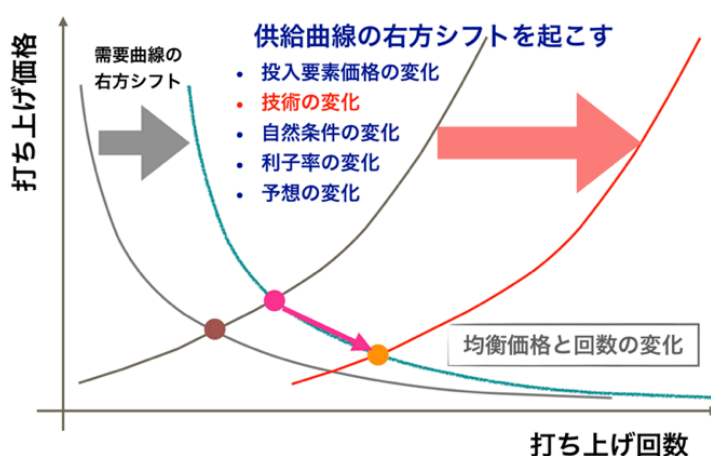


図5 需要・供給曲線の右方シフトと均衡価格と打ち上げ回数の変化

先に述べたように宇宙産業全体の市場規模は拡大傾向にあるため、現状、ロケット打ち上げ市場の需要曲線は右方シフトを起こしつつあると見ることができる。図5に示すように、需要曲線が右方シフトする際、供給曲線が元のまま、すなわち、ロケット打ち上げの供給能力が変わらないのであれば、均衡の打ち上げ価格は上昇してしまう。これでは健全な経済成長はままならない。打ち上げ回数を増やしつつ打ち上げ価格を抑制するためには、需要曲線の右方シフトだけではダメで、同時に供給曲線の右方シフトが伴わなければならない。供給曲線が右方シフトするための要因は色々あるが、技術の変化（技術革新）が最も重要な要因と考えられる。以上まとめると、宇宙輸送経済の健全で持続的な発展のためには、ロケット打ち上げ供給能力を向上させる必要があり、そのために、技術革新が不可欠なのである。

### 3.3. 宇宙輸送と技術革新

以前著者は宇宙輸送の技術革新への挑戦として三次元印刷、再使用化、強靱化を挙げた<sup>44)</sup>。これらは、3次元印刷ロケット、再使用ロケット、ハイブリッドロケットに対応する。そしてここでは航空技術の活用を追加する。(図6参照)。現在活動しているニュースペース・スタートアップ企業では、各社各様の技術革新が追求されており、供給力向上への取り組みがきちんと追求されていることが分かる。例を挙げると、Rocket Labの3次元印刷ロケットエンジンであるラザフォードエンジン<sup>45)</sup>、SpaceXやVirgin GalacticやBlue Originの再使用ロケット、Reaction EnginesのSABRE極超音速複合予冷空気呼吸ロケットエンジン<sup>46)</sup>、Virgin GalacticのハイブリッドロケットRocketMotorTwo<sup>47)</sup>、そして、Virgin Orbitの空中発射ロケットLauncherOne<sup>48)</sup>、Virgin GalacticらのスペースプレーンSS2がある。国内でもPDエアロスペース<sup>49)</sup>のペガサス、SpaceWalker<sup>50)</sup>のスペースプレーンなどがある。

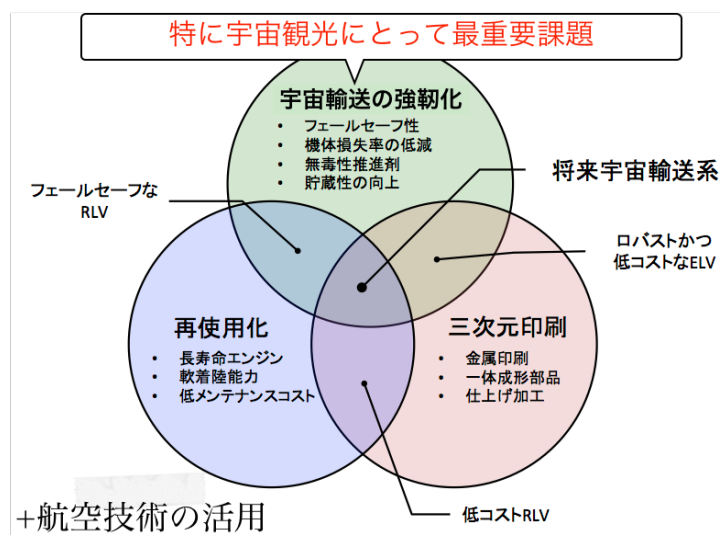


図6 宇宙輸送に求められる技術革新

### 3.4. 宇宙輸送とレジリエンス

数年前、Virgin Galacticの創始者Richard Branson<sup>51)</sup>がスタートレックのカーク船長役の俳優William Shatner<sup>52)</sup>をSS2就任フライトの乗客として招いた。これに対して、Shatner氏は”I do want to go up but I need guarantees I’ll definitely come back.”と述べ、これを辞退したという逸話がある<sup>53)</sup>。この話しかから伺える様に、宇宙旅行にリスクは付き物という観念は、お金を積まれても拒否するぐらいに、固定的で強迫的なものとなっている。したがって、宇宙観光の振興にとっては、図6に示す宇宙輸送の技術革新の中でも、宇宙輸送の強靱化（レジリエンス）が極めて重要である。

レジリエンス<sup>54)</sup>と安全は必ずしも同じではない。これは次のような例によって明らかである。JAXAが打ち上げた超小型打ち上げロケットSS-520-4号機は、極めて安全に運用されていたにもかかわらず、1本のハーネスの切断が原因となりミッションと機体の全損失に至った<sup>55)</sup>。一方、Southwest航空1380便(2018年4月17日)はエンジン1基が爆発し、急減圧を起こしたが、パイロットの判断で緊急着陸し、149人中1名死亡（窓側に座っていた女性の上半身が窓から吸い出され、引き戻されるまでの間に破片が直撃した上に、短時間でも機外に放り出されたため低酸素症にかかったと見られている）、148人が生還（うち負傷者7）した<sup>56)</sup>。前者、後者共、正常に運用された場合にはどちらもミッションを安全に達成することができる。しかし、異常が発生した場合に如何にして回復できるかに関する特性が両者で極めて大きく異なる。無論、Southwest航空機のレジリエンスが高く、SS-520-4号機のレジリエンスは低い。このようにレジリエンスはハザードが起きても回復する力を意味している。宇宙観光では如何なるハザードが起きても無事帰還することができる特性が求められる。すなわち宇宙観光は極めてレジリエントな宇宙旅行でなければならない。そのためには宇宙輸送が航空輸送並みにレジリエントでなければならない。

しかしながら、宇宙輸送を航空輸送と比較した場合、両者のレジリエンスは大きく異なる<sup>54)</sup>。使い捨てロケット打ち上げ失敗率はこの40年間5%程度で推移している<sup>57)</sup>。ロケットの失敗はほぼ100%近くが機体損失に繋がってしまう。将来再使用ロケットが定着した場合でも、機体損失率は5%程度で推移するのではないかと予想される。何故なら、40年間新品ロケットで5%の失敗率であることに鑑みれば、再使用ロケットを新品同様に品質管理できたとしても、その失敗率が大きく新品のそれを下回るとは考え難いからである。一方、過去5年の航空機の機体損失率は百万フライトに0.45回程度である<sup>58)</sup>。このように宇宙輸送と航空輸送のレジリエンスの格差は極めて大きく、宇宙観光にとって、いかにして宇宙輸送のレジリエンスを航空輸送のそれに近づけるかが最大の挑戦課題なのである。

### 3.5. 二つの宇宙観光ミッションのレジリエンスに関する考察

NASAは有人宇宙輸送に求められる要件を、システム安全、システム制御、乗務員の生存とミッション中断に区分してまとめている<sup>59)</sup>。それから抽出された要求事項には、故障許容性の確保、障害の検出、乗務員による監視・操作・制御・ミッション実行・防止などの他、緊急脱出やアボ



ート機能等がある。詳細は別にまとめたのでそちらも参照されたい<sup>60)</sup>。

以下はそれと重複するが、サブオービタル宇宙観光を目的に開発中の二つのミッション形態について、それらのレジリエンス特性について考察する。一つはBlue Origin社が開発中のNew Shepard<sup>61)</sup>（第1の形態と呼ぶ）であり、他方は、Virgin Galactic 社が開発中のSpaceShipTwo（第2の形態と呼ぶ）である。第1の形態では、自律飛行制御システムを備えた推進モジュール（PM）と旅客用カプセル（PC）で構成される、完全に再利用可能な垂直離着陸の単段ロケットを使用する。PMは、消火／再着火、および推力調整機能を備えたLO<sub>2</sub> / LH<sub>2</sub>エンジンを使用する。PCは乗客6人を乗せることができる与圧されたカプセルであり、固体モーターを用いたフルエンベロープ緊急脱出システムを搭載し、パラシュート回収システムとレトロジェットを備えている。図 7に第1の形態のミッションを示す。ロケットは射場から垂直に打ち上げられ、約100秒間主エンジンによって加速され、その後、慣性飛行に変わり、重力により徐々に減速する。PMから分離されたPCは、カルマン線を越えて遠地点に到達し、無重力状態になってから4分後に大気圏に再突入し、パラシュートを開いて着陸する。着陸時には、レトロジェットを併用する。一方、PMはPCを分離後、カルマン線に到達することなく弾道飛行を行い、空力ブレーキとメインエンジンの再点火により減速し、打ち上げ後約10分で射場近くの着陸地点に垂直に着陸する。合計ミッション時間は約60分である。

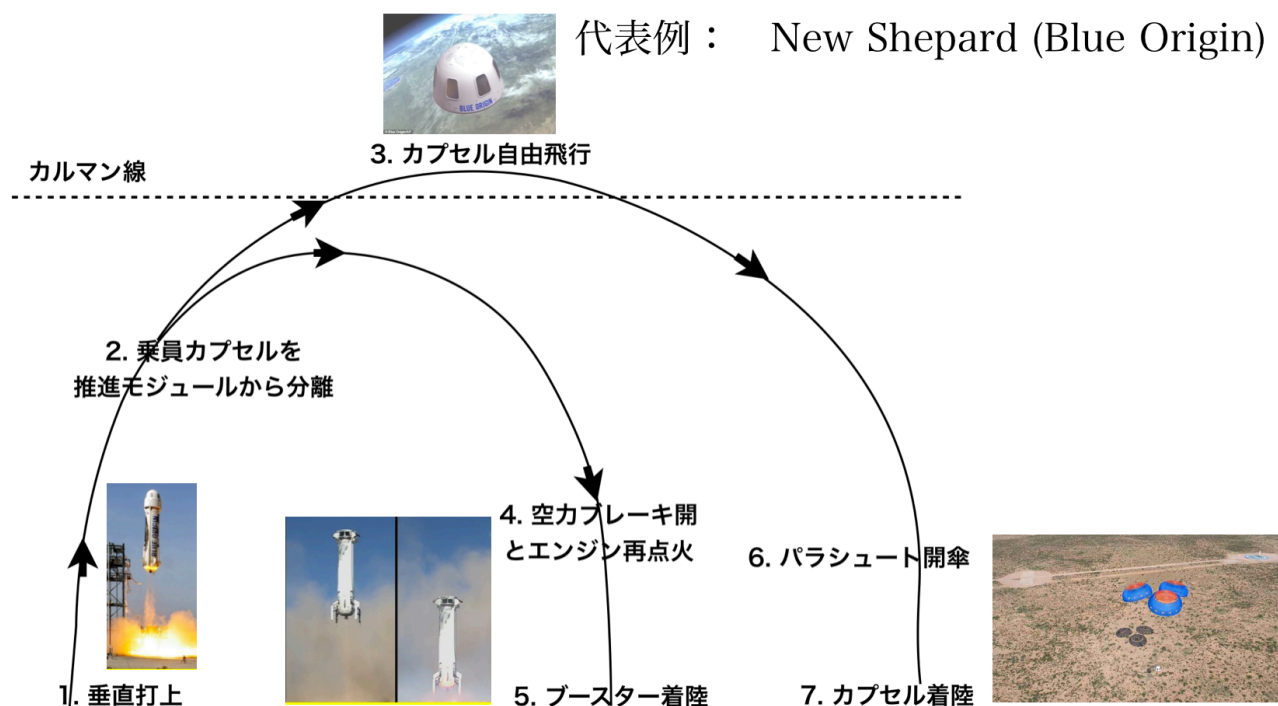


図 7 第1形態のミッションプロファイル

第2の形態では、飛行機とスペースプレーンを組み合わせたシステムを用いる。スペースプレーンに搭載されたメインロケットエンジンには、ハイブリッドロケットが採用されている。ハイブリッドロケットのみが消耗品であり、他のものは再利用される。スペースプレーンは、約60度傾けることができる特別なフェザ翼を使用している。このメカニズムのおかげで、スペースプレーンは大気圏再突入時に高い迎え角でトリムして弾道係数を抑えて、受動的な姿勢制御や熱防御を用いたシステムを可能としている。図 8に第2の形態のミッションを示す。スペースプレーンはジェット輸送機によって吊り下げられ、宇宙港から水平に離陸し、離陸から約45分で高度約15 kmに上昇する。その後、スペースプレーンは母機から分離され、ハイブリッドロケットに点火し、急速に垂直に上昇し、推力制御なしで約1分間ロケットを噴射して高度約60 kmに到達する。その後、慣性飛行によりカルマン線を越えてアポジに到達する。スペースプレーンには6人の乗客と2人のパイロットが搭乗し、約4分間無重力を経験する。高度が約90 kmまで降下した時点で、フェ

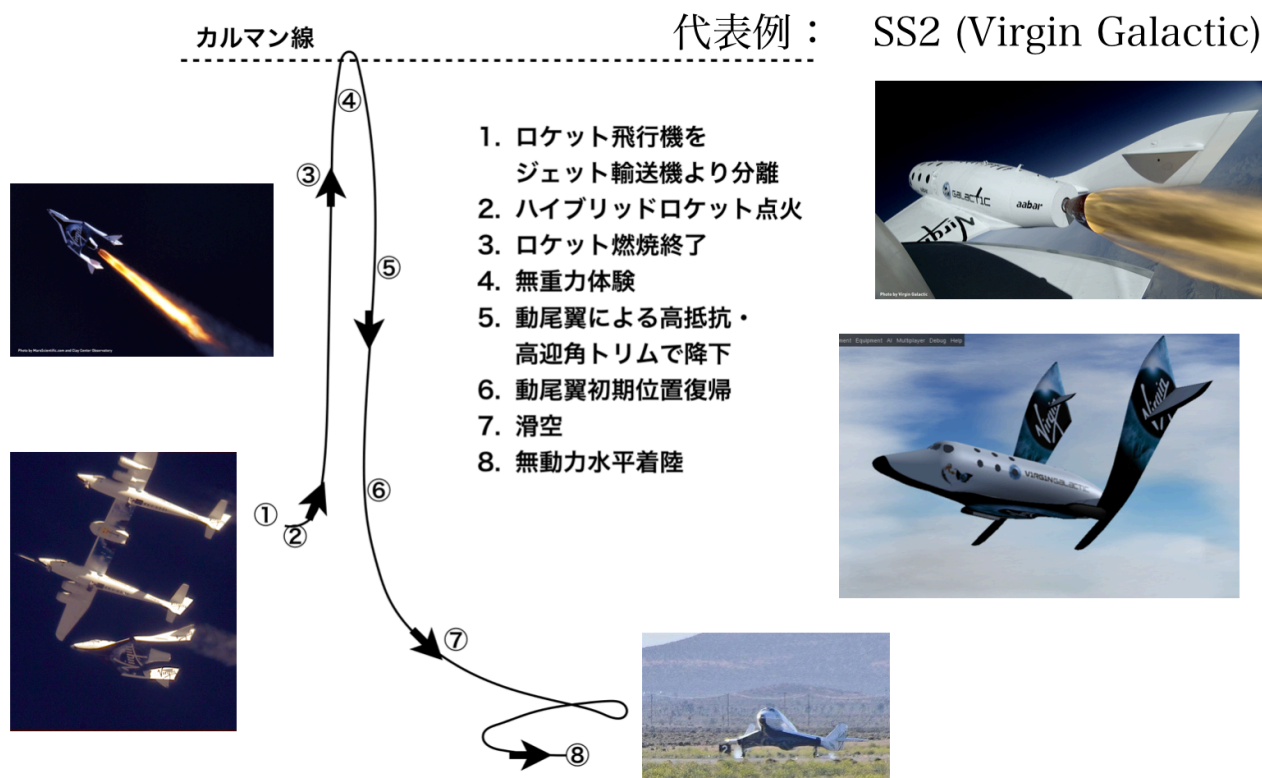


図8 第2の形態のミッションプロファイル

ザー翼を60度傾斜させてトリム角を高くし、空力抵抗と安定性を高める。高度約20 kmまで降下した時点でフェザー翼を初期位置に戻し、高度約12 kmから滑空によって無動力で宇宙港に着陸する。母機もその間に宇宙港に戻る。合計ミッション時間は約100分である。

第1の形態では、PMに搭載される $\text{LO}_2/\text{LH}_2$ の主エンジンの爆発ハザードに対処するために、緊急脱出システム（EES）が不可欠である。またPCがPMから予期しない分離が起きる危険な場合にも、EESによる緊急脱出が必要となる。このような場合には、アクティブなPMとの衝突ハザードがあり、EESはそれに対応する設計も必要である。EESは、打ち上げ前の水平速度ゼロおよび垂直速度ゼロの状況から、PCがPMから分離される高高度高速飛行時に至るすべての運用フェーズにおいて、緊急脱出を自律的に行えることが要求される。この場合のEESは自動車のエアバッグと同様に、最後の安全化手段として用いられる。Blue Originの具体例ではこれを達成するために、PCに固体ロケット（1～2トンの推力で約2秒間燃焼）を搭載しているのだが、乗員6名を載せるPCに爆発ハザードを有する固体ロケットを使用し、これの爆発ハザードのリスクは、発生確率を極力ゼロに抑えることでしかこのシステムの安全性は保証できない。すなわちレジリエンスの観点からは低いポイントと言わざるを得ない。固体ロケットをハイブリッドロケットに変更することで、爆発ハザードのリスクを低減し、EESのレジリエンスを高めることが可能と考える。

一方、第2の形態ではハイブリッドロケットが使用され、爆発の危険性は非常に小さい。実際、2014年10月31日のSS2の空中分解事故では、パイロットの誤操縦によるフェザー翼の早期展開が原因であり、その際もエンジンの爆発は観測されなかった<sup>62)</sup>。一方、2007年7月26日のモハベ航空宇宙港での亜酸化窒素フローテスト中に爆発が発生<sup>63)</sup>し、亜酸化窒素の爆発危険性が示された。亜酸化窒素や過酸化水素など自己分解を伴う酸化剤はそれ自体が爆発ハザードを持っていることに注意が必要である。亜酸化窒素は社会一般で頻繁に使われているものであり、正しく取り扱うことでこのようなハザードの発生率はゼロに抑えることが可能である。そのようにして現行のSS2のハイブリッドロケットのレジリエンスを高めることが可能である。さらに酸化剤に $\text{LO}_2$ を使用すれば上記の爆発ハザードはなくなり、システムのレジリエンスをより高めることが可能である。さらに $\text{LO}_2$ を最適なO/Fで用いること亜酸化窒素の場合に比べて比推力を顕著に高くすることが可能となる。この場合の技術課題は $\text{LO}_2$ の加圧供給系の重量増と比推力向上のトレードオフというシステム設計である。

第2形態のスペースプレーンは、高度15kmまでは航空機輸送、その後2分間用いるロケット推進システムは本質的に非爆発性のハイブリッドロケット、その後は無動力で滑空して帰還する。ロケットの爆発ハザードのリスクは小さいが火災は起きる可能性がある。火災の場合には消火し、酸化剤を捨てて、滑空により帰還の可能性は残される。このように見ると第2形態は宇宙観光に向けたレジリエンスの高いシステム／ミッションであると言える。ただし、フェザリングシステムについては次のような課題が残されているのではないと思われる。

- 再突入時にフェザリングメカニズムが機能しない場合、空力加熱に耐えられるか？
- フェザー翼が初期位置に戻らない場合に滑空できるのか？

これらのハザードに対してレジリエントな解決策が示されているかは定かではない。

#### 4. 結言

衛星小型化技術の発展を梃子にしてNew Space スタートアップ企業への投資が活況となった宇宙経済は2018年には全世界で40兆円規模の歳入となり、2040年には少なくとも100兆円を越す予想されている。人類の宇宙開発は「宇宙旅行実現」への夢から始まったが、「宇宙観光」が庶民の宇宙旅行となり得るかどうかについては、現状では賛否両論存在する。しかし必ず言えることは、宇宙観光が発展するための必要条件は「宇宙旅行のレジリエンスの確保」だということである。言い換えれば、宇宙観光はレジリエントな宇宙旅行でなければならない。さもなければ、宇宙観光スタートアップ企業への投資は進まないし、顧客のニーズも満たせないだろう。ハイブリッドロケットの特徴は爆発ハザードを最小化する化学ロケットであることである。宇宙観光には、空中発射や空力を最大限に利用することでロケットの使用を最小限に抑えつつ、強力な加速にはハイブリッドロケットを用いて爆発ハザードのリスクを最小化し、どのタイミングからでも安全に帰還できることが望ましい。さらに、宇宙観光の快適さ、将来の複数地点移動のために、ハイブリッドロケットの可制御性は好ましく、その能動的制御が将来重要な技術となるだろう。

#### 謝辞

JSPS科研費 JP16H04594の助成を受けた。またハイブリッドロケット研究ワーキンググループの皆様のご支援に感謝します。

#### 参考文献

- 1) Wikipedia contributors, *From the Earth to the Moon*, Wikipedia, The Free Encyclopedia, [https://en.wikipedia.org/wiki/From\\_the\\_Earth\\_to\\_the\\_Moon](https://en.wikipedia.org/wiki/From_the_Earth_to_the_Moon), 2019年8月22日閲覧
- 2) Wikipedia contributors, *Konstantin Tsiolkovsky*, Wikipedia, The Free Encyclopedia, [https://en.wikipedia.org/wiki/Konstantin\\_Tsiolkovsky](https://en.wikipedia.org/wiki/Konstantin_Tsiolkovsky), 2019年8月22日閲覧
- 3) Wikipedia contributors, *Hermann Oberth*, Wikipedia, The Free Encyclopedia, [https://en.wikipedia.org/wiki/Hermann\\_Oberth](https://en.wikipedia.org/wiki/Hermann_Oberth), 2019年8月22日閲覧
- 4) Wikipedia contributors, *Robert H. Goddard*, Wikipedia, The Free Encyclopedia, [https://en.wikipedia.org/wiki/Robert\\_H.\\_Goddard](https://en.wikipedia.org/wiki/Robert_H._Goddard), 2019年8月22日閲覧
- 5) Wikipedia contributors, *Group for the Study of Reactive Motion*, Wikipedia, The Free Encyclopedia, [https://en.wikipedia.org/wiki/Group\\_for\\_the\\_Study\\_of\\_Reactive\\_Motion](https://en.wikipedia.org/wiki/Group_for_the_Study_of_Reactive_Motion), 2019年8月22日閲覧
- 6) Wikipedia contributors, *Sergei Korolev*, Wikipedia, The Free Encyclopedia, [https://en.wikipedia.org/wiki/Sergei\\_Korolev](https://en.wikipedia.org/wiki/Sergei_Korolev), 2019年8月22日閲覧
- 7) Wikipedia contributors, *Wernher von Braun*, Wikipedia, The Free Encyclopedia, [https://en.wikipedia.org/wiki/Wernher\\_von\\_Braun](https://en.wikipedia.org/wiki/Wernher_von_Braun), 2019年8月22日閲覧
- 8) 日下実男, *宇宙への挑戦者: フォン・ブラウン*, 文研出版, 1971.
- 9) 佐貫亦男, *宇宙への野望—フォン・ブラウンその栄光と挫折*, 1978.
- 10) Wikipedia contributors, *Satellite constellation*, Wikipedia, The Free Encyclopedia, [https://en.wikipedia.org/wiki/Satellite\\_constellation](https://en.wikipedia.org/wiki/Satellite_constellation), 2019年8月23日閲覧
- 11) Wikipedia contributors, *SpaceX*, Wikipedia, The Free Encyclopedia, <https://en.wikipedia.org/wiki/SpaceX>, 2019年8月23日閲覧
- 12) Wikipedia contributors, *Blue Origin*, Wikipedia, The Free Encyclopedia,

- [https://en.wikipedia.org/wiki/Blue\\_Origin](https://en.wikipedia.org/wiki/Blue_Origin), 2019 年 8 月 23 日閲覧
- 13) Wikipedia contributors, *Rocket Lab*, Wikipedia, The Free Encyclopedia, [https://en.wikipedia.org/wiki/Rocket\\_Lab](https://en.wikipedia.org/wiki/Rocket_Lab), 2019 年 8 月 23 日閲覧
  - 14) Wikipedia contributors, *Virgin Orbit*, Wikipedia, The Free Encyclopedia, [https://en.wikipedia.org/wiki/Virgin\\_Orbit](https://en.wikipedia.org/wiki/Virgin_Orbit), 2019 年 8 月 23 日閲覧
  - 15) Space One ホームページ, <https://www.space-one.co.jp/>, 2019 年 8 月 23 日閲覧
  - 16) Wikipedia contributors, *Interstellar Technologies*, Wikipedia, The Free Encyclopedia, [https://en.wikipedia.org/wiki/Interstellar\\_Technologies](https://en.wikipedia.org/wiki/Interstellar_Technologies), 2019 年 8 月 23 日閲覧
  - 17) Wikipedia contributors, *Planet Labs*, Wikipedia, The Free Encyclopedia, [https://en.wikipedia.org/wiki/Planet\\_Labs](https://en.wikipedia.org/wiki/Planet_Labs), 2019 年 8 月 23 日閲覧
  - 18) Wikipedia contributors, *Spire Global*, Wikipedia, The Free Encyclopedia, [https://en.wikipedia.org/wiki/Spire\\_Global](https://en.wikipedia.org/wiki/Spire_Global), 2019 年 8 月 23 日閲覧
  - 19) BRAYCE space and technology, “Smallsats by the Numbers 2019”, [https://brycetek.com/downloads/Bryce\\_Smallsats\\_2019.pdf](https://brycetek.com/downloads/Bryce_Smallsats_2019.pdf), 2019 年 8 月 8 日閲覧.
  - 20) BRAYCE space and technology, “START-UP SPACE Update on Investment in Commercial Space Ventures 2019”, [http://brycetek.com/downloads/Bryce\\_Start\\_Up\\_Space\\_2019.pdf](http://brycetek.com/downloads/Bryce_Start_Up_Space_2019.pdf), 2019 年 8 月 8 日閲覧.
  - 21) BRAYCE space and technology, “2018 Global Space Economy”, [https://brycetek.com/download.php?f=downloads/2018\\_Global\\_Space\\_Economy.pdf](https://brycetek.com/download.php?f=downloads/2018_Global_Space_Economy.pdf), 2019 年 8 月 8 日閲覧.
  - 22) Wikipedia contributors, *Goldman Sachs*, Wikipedia, The Free Encyclopedia, [https://en.wikipedia.org/wiki/Goldman\\_Sachs](https://en.wikipedia.org/wiki/Goldman_Sachs), 2019 年 8 月 23 日閲覧
  - 23) Wikipedia contributors, *Morgan Stanley*, Wikipedia, The Free Encyclopedia, [https://en.wikipedia.org/wiki/Morgan\\_Stanley](https://en.wikipedia.org/wiki/Morgan_Stanley), 2019 年 8 月 23 日閲覧
  - 24) Brian Higginbotham, “The Space Economy: An Industry Takes Off”, Oct. 2018, <https://www.uschamber.com/series/above-the-fold/the-space-economy-industry-takes>, 2019 年 8 月 8 日閲覧.
  - 25) Wikipedia contributors, *Arthur C. Clarke*, Wikipedia, The Free Encyclopedia, [https://en.wikipedia.org/wiki/Arthur\\_C.\\_Clarke](https://en.wikipedia.org/wiki/Arthur_C._Clarke), 2019 年 8 月 23 日閲覧
  - 26) Wikipedia contributors, *Stanley Kubrick*, Wikipedia, The Free Encyclopedia, [https://en.wikipedia.org/wiki/Stanley\\_Kubrick](https://en.wikipedia.org/wiki/Stanley_Kubrick), 2019 年 8 月 23 日閲覧
  - 27) Wikipedia contributors, *2001: A Space Odyssey (film)*, Wikipedia, The Free Encyclopedia, [https://en.wikipedia.org/wiki/2001:\\_A\\_Space\\_Odyssey\\_\(film\)](https://en.wikipedia.org/wiki/2001:_A_Space_Odyssey_(film)), 2019 年 8 月 23 日閲覧
  - 28) Wikipedia contributors, *Pan American World Airways*, Wikipedia, The Free Encyclopedia, [https://en.wikipedia.org/wiki/Pan\\_American\\_World\\_Airways](https://en.wikipedia.org/wiki/Pan_American_World_Airways), 2019 年 8 月 23 日閲覧
  - 29) Wikipedia contributors, *Toyohiro Akiyama*, Wikipedia, The Free Encyclopedia, [https://en.wikipedia.org/wiki/Toyohiro\\_Akiyama](https://en.wikipedia.org/wiki/Toyohiro_Akiyama), 2019 年 8 月 23 日閲覧
  - 30) Wikipedia contributors, *Dennis Tito*, Wikipedia, The Free Encyclopedia, [https://en.wikipedia.org/wiki/Dennis\\_Tito](https://en.wikipedia.org/wiki/Dennis_Tito), 2019 年 8 月 23 日閲覧
  - 31) BRAYCE space and technology, “Human Orbital Spaceflight Statics”, [https://brycetek.com/downloads/Human\\_Spaceflight\\_Statistics\\_2018.pdf](https://brycetek.com/downloads/Human_Spaceflight_Statistics_2018.pdf), 2019 年 8 月 20 日閲覧.
  - 32) Wikipedia contributors, *Sub-orbital spaceflight*, Wikipedia, The Free Encyclopedia, [https://en.wikipedia.org/wiki/Sub-orbital\\_spaceflight](https://en.wikipedia.org/wiki/Sub-orbital_spaceflight), 2019 年 8 月 22 日閲覧
  - 33) Wikipedia contributors, *Mercury-Redstone 3*, Wikipedia, The Free Encyclopedia, [https://en.wikipedia.org/wiki/Mercury-Redstone\\_3](https://en.wikipedia.org/wiki/Mercury-Redstone_3), 2019 年 8 月 23 日閲覧
  - 34) Wikipedia contributors, *North American X-15*, Wikipedia, The Free Encyclopedia, [https://en.wikipedia.org/wiki/North\\_American\\_X-15](https://en.wikipedia.org/wiki/North_American_X-15), 2019 年 8 月 23 日閲覧
  - 35) Wikipedia contributors, *Ansari X Prize*, Wikipedia, The Free Encyclopedia, [https://en.wikipedia.org/wiki/Ansari\\_X\\_Prize](https://en.wikipedia.org/wiki/Ansari_X_Prize), 2019 年 8 月 23 日閲覧
  - 36) Wikipedia contributors, *SpaceShipOne*, Wikipedia, The Free Encyclopedia, <https://en.wikipedia.org/wiki/SpaceShipOne>, 2019 年 8 月 23 日閲覧
  - 37) Wikipedia contributors, *Scaled Composites*, Wikipedia, The Free Encyclopedia, [https://en.wikipedia.org/wiki/Scaled\\_Composites](https://en.wikipedia.org/wiki/Scaled_Composites), 2019 年 8 月 23 日閲覧

- 38) Futron Corporation, *New Mexico Commercial Spaceport Economic Impact Study for State of New Mexico Economic Development Department*, December 30, 2005,  
<https://www.rymdturism.se/images/pdf/Futron-New-Mexico-Commercial-Spaceport-Economic-Impact-Study-Dec-2005.pdf>, 2019 年 8 月 21 日閲覧.
- 39) Wikipedia contributors, *SpaceShipTwo*, Wikipedia, The Free Encyclopedia,  
<https://en.wikipedia.org/wiki/SpaceShipTwo>, 2019 年 8 月 22 日閲覧
- 40) Wikipedia contributors, *Virgin Galactic*, Wikipedia, The Free Encyclopedia,  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Virgin\\_Galactic](https://en.wikipedia.org/wiki/Virgin_Galactic), 2019 年 8 月 23 日閲覧
- 41) Dirk C. Gibson, et al., “Public Relations: The Key to Development of Space Tourism”, AIAA 2007-6224, AIAA Space 2017 Conference & Exhibitions, September 2017, Long Beach, California.
- 42) Paula Berinstein, “Chapter 3: Harvey Wichman: You Can’t Throw Your Socks on the Floor in a Spacecraft”, *Making Space Happen: Private Space Ventures and the Visionaries Behind Them*, Plexus Publishing, Inc., Medford, New Jersey, USA, 2002.
- 43) Dirk C. Gibson, “Chapter 4 The Primary Impediments to Space Tourism Industrial Development”, *Commercial Space Tourism: Impediments to Industrial Development and Strategic Communication Solutions*, Bentham E-Books, eISBN: 978-1-60805-239-4
- 44) Toru Shimada, Tomoaki Usuki, Akiyo Takahashi, Koki Kitagawa, Kohei Ozawa, “Mission Requirements for Highly-Functional Hybrid Rocket Demonstration”, Space Propulsion, SP2016\_3125289, 2016.
- 45) Wikipedia contributors, *Rutherford (rocket engine)*, Wikipedia, The Free Encyclopedia,  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Rutherford\\_\(rocket\\_engine\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Rutherford_(rocket_engine)), 2019 年 8 月 23 日閲覧
- 46) Wikipedia contributors, *SABRE (rocket engine)*, Wikipedia, The Free Encyclopedia,  
[https://en.wikipedia.org/wiki/SABRE\\_\(rocket\\_engine\)](https://en.wikipedia.org/wiki/SABRE_(rocket_engine)), 2019 年 8 月 23 日閲覧
- 47) Wikipedia contributors, *RocketMotorTwo*, Wikipedia, The Free Encyclopedia,  
<https://en.wikipedia.org/wiki/RocketMotorTwo>, 2019 年 8 月 23 日閲覧
- 48) Wikipedia contributors, *LauncherOne*, Wikipedia, The Free Encyclopedia,  
<https://en.wikipedia.org/wiki/LauncherOne>, 2019 年 8 月 23 日閲覧
- 49) Wikipedia contributors, *PD AeroSpace*, Wikipedia, The Free Encyclopedia,  
[https://en.wikipedia.org/wiki/PD\\_AeroSpace](https://en.wikipedia.org/wiki/PD_AeroSpace), 2019 年 8 月 23 日閲覧
- 50) Wikipedia contributors, *SPACE WALKER*, Wikipedia, The Free Encyclopedia,  
[https://ja.wikipedia.org/wiki/SPACE\\_WALKER](https://ja.wikipedia.org/wiki/SPACE_WALKER), 2019 年 8 月 23 日閲覧
- 51) Wikipedia contributors, *Richard Branson*, Wikipedia, The Free Encyclopedia,  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Richard\\_Branson](https://en.wikipedia.org/wiki/Richard_Branson), 2019 年 8 月 23 日閲覧
- 52) Wikipedia contributors, *William Shatner*, Wikipedia, The Free Encyclopedia,  
[https://en.wikipedia.org/wiki/William\\_Shatner](https://en.wikipedia.org/wiki/William_Shatner), 2019 年 8 月 23 日閲覧
- 53) Erik Seedhouse, *Suborbital: Industry at the Edge of Space*, Springer International Publishing, Switzerland and Praxis Publishing, Chichester, UK, 2014, p.89.
- 54) 高橋晶世, 嶋田徹, “宇宙輸送におけるレジリエンス・エンジニアリング”, 日本機械学会 2017 年度年次大会 講演論文集, G1700304, 2017
- 55) 宇宙航空研究開発機構, *SS520-4 号機実験失敗の原因究明結果および対策について*, 2017 年 2 月 13 日, [http://fanfun.jaxa.jp/jaxatv/files/20170213\\_ss-520-4.pdf](http://fanfun.jaxa.jp/jaxatv/files/20170213_ss-520-4.pdf), 2019 年 8 月 22 日閲覧
- 56) Vince Lattanzio, Alicia Victoria Lozano, Denise Nakano and Brian X. McCrone, *Woman Partially Sucked Out of Jet When Window Breaks Mid-Flight; Plane Makes Emergency Landing in Philadelphia*,  
<https://www.nbcphiladelphia.com/news/local/Airplane-Makes-Emergency-Landing-at-Philadelphia-International-Airport-480008613.html>, 2019 年 8 月 22 日閲覧
- 57) Ed Kyle, *Space Launch Report*, <http://spacelaunchreport.com/log2017.html>, 2019 年 8 月 22 日閲覧
- 58) International Air Transport Association, *Safety Report 2018 issued April 2019*,  
<https://libraryonline.erau.edu/online-full-text/iata-safety-reports/IATA-Safety-Report-2018.pdf>, 2019 年 8 月 22 日閲覧
- 59) NASA, *NASA Procedural Requirements, Human-Rating Requirements for Space Systems*, NPR 8705.2C, Effective Date: July 10, 2017, Expiration Date: July 10, 2022.
- 60) 嶋田徹, “レジリエントな宇宙旅行のためのロケット”, 第 62 回宇宙科学技術連合講演会講演集, 2S08 (JSASS-2018-4351), 2018.
- 61) Wikipedia contributors, *New Shepard*, Wikipedia, The Free Encyclopedia,  
[https://en.wikipedia.org/wiki/New\\_Shepard](https://en.wikipedia.org/wiki/New_Shepard), 2019 年 8 月 22 日閲覧



- 62) Mike Wall, *Virgin Galactic Spaceship's 'Feathering' Descent System Eyed in Deadly Crash*,  
<https://www.space.com/27637-virgin-galactic-spaceshiptwo-crash-feather-system.html>, 2019 年 8 月 22  
日 閲 覧
- 63) Alicia Chang, *Explosion at Mojave Airport Kills 3*, The Associated Press, 2007.