

資料1-1

宇宙戦略基金の
推進に関する検討会
2025.3.11

宇宙輸送系の本質的課題と重点技術

1. 宇宙輸送の特性
2. 宇宙輸送を取り巻く世界動向
3. 輸送系の本質的課題と重点技術マップ
4. 今後の議論にあたって

2025年3月11日

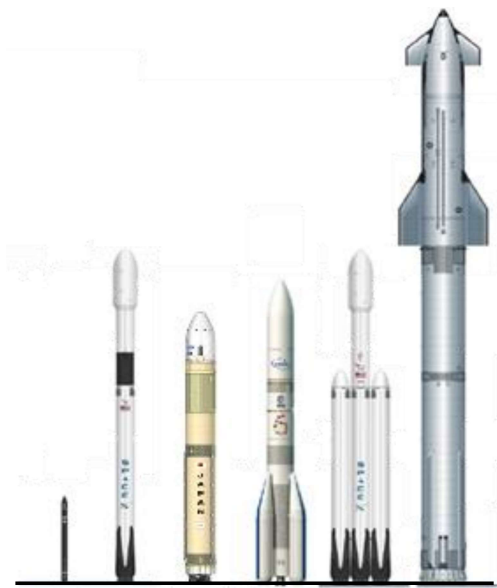
東京理科大学 創域理工学部
宇宙旅客輸送推進協議会



小笠原宏



一社)宇宙旅客輸送推進協議会, <https://spaceliner.jp/> (accessed 2025.03.02)



©JAXA

US Comparing the Size of The World's Rockets,
<https://www.visualcapitalist.com/comparing-the-size-of-the-worlds-rockets-past-and-present/> (accessed 2025.03.02)

1.宇宙輸送の特性

✓ 宇宙輸送の特性が本質的課題に直結している。

- 「加速(打上)」 → 質量比 (軽量化、スケール) とエンジン性能
- 「耐熱(帰還)」 → 軽量化、耐熱材料、形態
- 「システム成熟度」 → 安全性、コスト・プライス、頻度・柔軟性

加速(打上)

加速量

加速量
↓
 $\Delta V = u_E \ln \left(\frac{W_0}{W_i + W_{PL}} \right)$

↑
燃焼ガス速さ (燃料種類)

質量比

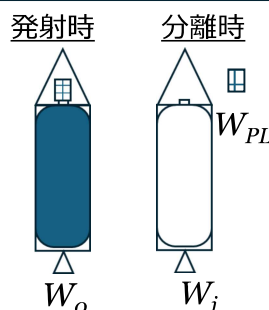
↑
空虛重量比
 $\frac{W_{PL}}{W_0} = \exp \left(-\frac{\Delta V}{u_E} \right) - \frac{W_i}{W_0}$

↑
空虛重量比はスケール大ほど小
∴ $W_0 \propto L^3, W_i \propto L^2$

↑
ペイロード重量比 燃料と投入軌道で決定

キー技術

- ✓ 空虛重量の軽量化
- ✓ 燃焼ガス速さ向上 (燃料、エンジン性能)
- ✓ ペイロード効率向上にはスケール大が有利
→ 輸送単価(\$/kg)は大型が有利
まとめて運べば安価になるはず



耐熱(帰還)

淀み温度

↑
大気温度
 $T_0 = T_{air} (1 + 0.2M^2)$
↑
飛行マッハ数

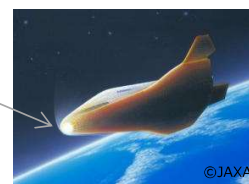
帰還機 ; 淀み温度 ≒ 2万℃ (@M=20)
航空機 ; 淀み温度 ≒ 10℃ (@M=0.8)

重量/面積比

$\frac{W}{S}$
有翼型 (ひらひら落下) ⇒ 熱はラク
カプセル型 (弾道落下) ⇒ 熱は厳しい

キー技術

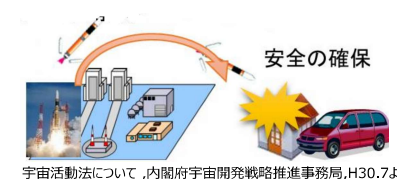
- ✓ 帰還重量の軽量化
- ✓ 高温材料・耐熱材 (耐熱性能向上)
- ✓ システム形態の選定
→ ミッションに整合した形態選定



システム成熟度

安全性

- ✓ 地上安全
- ✓ 乗員・乗客安全



宇宙活動法について、内閣府宇宙開発戦略推進事務局、H30.7より

コスト・プライス

- ✓ サービス提供コスト
(地上系/支援系含めた全体運用コスト)
- ✓ 競争力ある価格設定



頻度・柔軟性

- ✓ 使いやすさ (能力、適時性、制限...)
- ✓ 変更要望への対応 (時期、軌道...)

2. 宇宙輸送を取り巻く世界動向

- ① 既存宇宙輸送ニーズが拡大；過去10年間で14倍に、今後さらに拡大。衛星コンステ、月面拠点なども。
- ② 新しい輸送ニーズの立ち上がり；**高速2地点間輸送（安全保障）、サブオービタル宇宙旅行（民間事業）**
⇒ SLAスタディによれば、宇宙輸送の民間利用は2040年で770万人、14兆円規模へ。
- ③ 宇宙輸送**価格の低減傾向；\$/kgの劇的低下**（背景にはSpaceXの再使用、超大型化）
⇒ 輸送価格以外の価値提供で対抗が必要（頻度、柔軟性）
- ④ スタートアップによる小型・中型ロケット開発への参入が顕著
⇒ 参入顕著だが**玉成数は限られ中止も多数**。大型は**開発投資規模が参入障壁**。

参考1

参考2

参考3

参考4

【宇宙基本計画】

民間企業・大学等による複数年度にわたる宇宙分野の**先端技術開発や技術実証、商業化を支援**するため、宇宙航空研究開発機構（JAXA）に10年間の「宇宙戦略基金」を設置

【宇宙戦略基金 輸送分野 第1期テーマ】

輸送分野においては、今後増加が見込まれる**多様な打上げ需要**に対応することが喫緊の課題であり、**宇宙輸送システムの低コスト化、高頻度化等に向けた技術開発**に重点的に取り組む必要がある。

参考5

3. 輸送系の本質的課題と重点技術マップ

「技術戦略」記載の技術テーマ
【SLA案技術分野】重点テーマ候補

参考6

基金：第1期テーマ領域

【(Ref)基金：第1期テーマ】

- 1 宇宙輸送機の革新的な軽量・高性能化及びコスト低減技術)
- 2 将来輸送に向けた地上系基盤技術
- 3 固体モータ主要材料量産化のための技術開発
- 4 宇宙輸送システムの統合航法装置の開発

システム

機体系

要素

システム

地上系

要素

【推進】

ロケット推進
高度化

エアブリーザ
進化

デトネーション
エンジン

低毒推進薬

4 アビオニクス小型化

【軽量構造材】

複合材(機体・タンク)
3Dプリンティング
再使用タンク

複合材
タンク・配管
非火工品
分離機構

【再突入帰還飛行】

耐熱材料
軽量化・耐性向上

耐熱材整備性

試験設備整備

オンボード制御再突入

【再使用高頻度運航】

帰還時誘導制御
着陸機構

熱防護

寿命管理設計

ヘルスマニタ

ヘルスマニタ

【有人輸送技術】

インタクトアポート
システム

アポート
システム

自律飛行安全

2 洋上回収

汎用テレメトリ

環境予測向上

射場安全確保

地上局共同利用

再使用運航・
ターンアラウンド

点検整備

極低温
推薬制御

有人輸送機
安全基準

加速(打上)

耐熱(帰還)

システム成熟度

4. 今後の議論にあたって

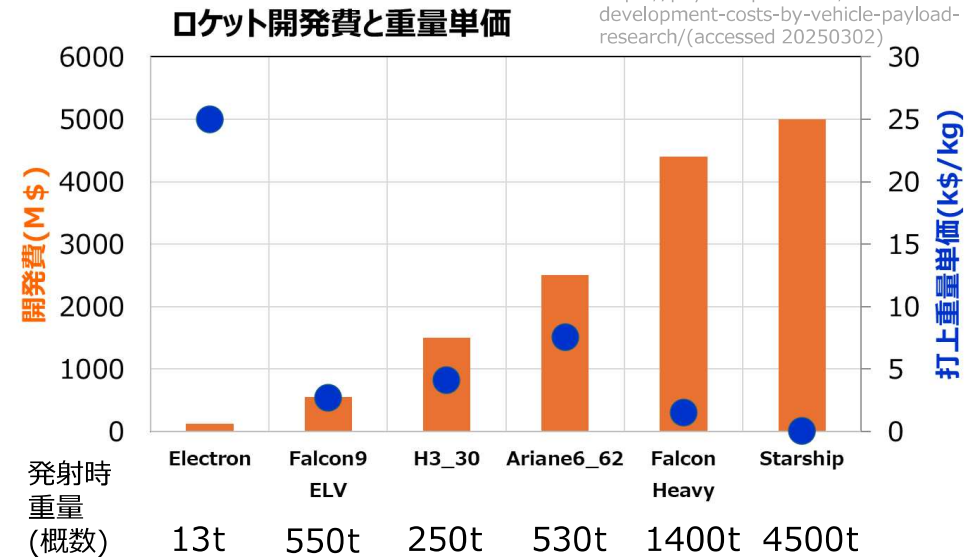
【技術戦略の評価軸（輸送系）】 参考7

- (1)技術的優位性 : 能力、価格低減、頻度、国際市場で勝ち残り
- (2)自律性 : 調達自在性、コア技術
- (3)多様なニーズ対応 : 柔軟性、信頼性、市場発展性、射場強化

【議論に盛り込みたい視点】

- ①国際市場で勝ち残りを目指すには？
 - ・重量単価での競争は現実的か.別価値へ特化が必要ではないか？
 - ・技術テーマ選定はどう配慮すべきか.
ex)柔軟性に特化、頻度に特化、有人輸送に特化、
- ②技術や施設の共用／相互活用をどう考えるか？
 - ・技術テーマはビジネス構想と関連。獲得成果の横断的活用を極力妨げないためにどうすべきか。（Biz Secret vs 公開範囲）
 - ・射場/地上設備共用化は自然な発想.安全保障Missionの民間射場共用は？射場Spec/技術に影響.
- ③民間事業の持続性をどう強めるか.
 - ・一般に民間事業は長期投資に慎重、事業性次第でAgileに撤退.持続性を高めるには基金後の予見性担保、調達計画提示(アンカーテナント)などを考えるべきではないか.

開発費出典は以下、発射時重量は公開情報をもとに筆者が概算。
<https://payloadspace.com/rocket-development-costs-by-vehicle-payload-research/> (accessed 20250302)



機体規模大 → { 重量単価安価へ
開発投資巨額へ



©JAXA
 US Comparing the Size of The World's Rockets,
<https://www.visualcapitalist.com/comparing-the-size-of-the-worlds-rockets-past-and-present/> (accessed 2025.03.02)

参考

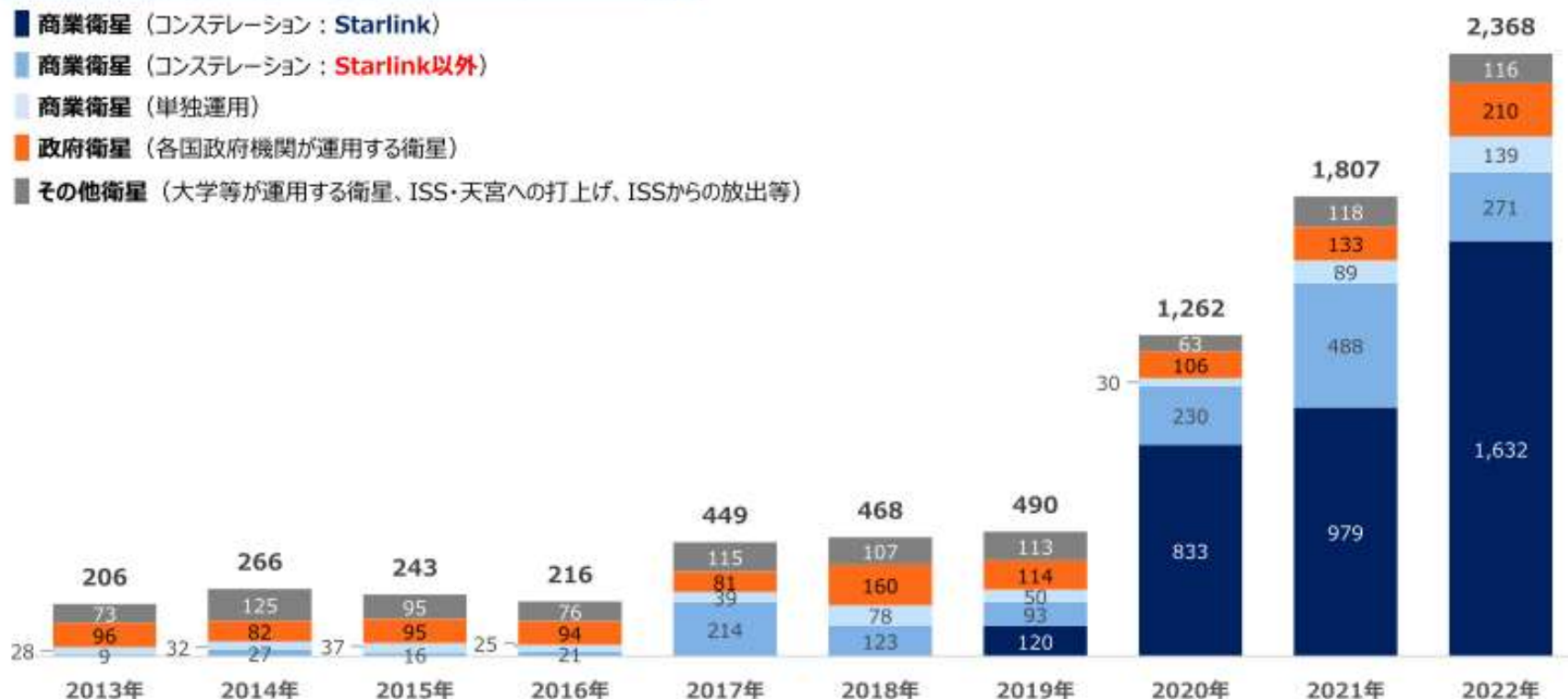
1. 過去10年間の人工衛星等の打ち上げ数の推移
2. 2040年の宇宙輸送マーケット市場規模推定
3. 打上げ価格の低減について
4. 世界で進む小型ロケット開発
5. 宇宙技術戦略概要（詳細） 宇宙輸送
6. 民間主導の宇宙輸送の革新のための技術課題の抽出と重点化
7. 宇宙技術戦略概要（詳細） 宇宙輸送 ～重要技術の評価軸～

■ 過去10年間の人工衛星等の打上げ数の推移

- ・ 2022年に軌道に打ち上げられた人工衛星等の機数は過去最大の2,368機。過去10年間で約11倍に増加。
- ・ 増加の中心を占めるのは商業衛星であり、その内Starlinkは4年間で3,564機を打上げ（人類がこれまで打上げた衛星機数の2割強）。
- ・ 加えて、数十機から数百機規模のコンステレーション構築にむけ、複数の欧米企業や中国政府・企業が、衛星の打上げを活発に進める。

人工衛星等の打上げ数の推移（2013年-2022年）

- 商業衛星（コンステレーション：Starlink）
- 商業衛星（コンステレーション：Starlink以外）
- 商業衛星（単独運用）
- 政府衛星（各国政府機関が運用する衛星）
- その他衛星（大学等が運用する衛星、ISS・天宮への打上げ、ISSからの放出等）

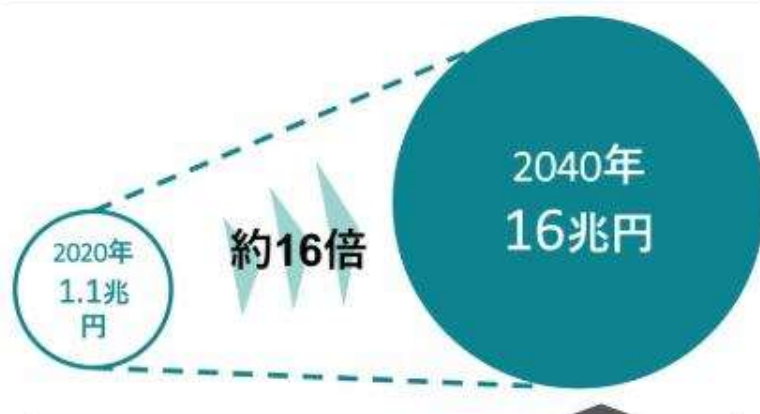


出所：JAXA情報及び報道発表資料に基づき内閣府が作成。打上げ数の中に打上げ失敗と軌道投入失敗は含んでいない。

【出典】
宇宙輸送を取り巻く
環境認識と将来像
2023年6月27日(火)
内閣府
宇宙開発戦略推進事務局、P2

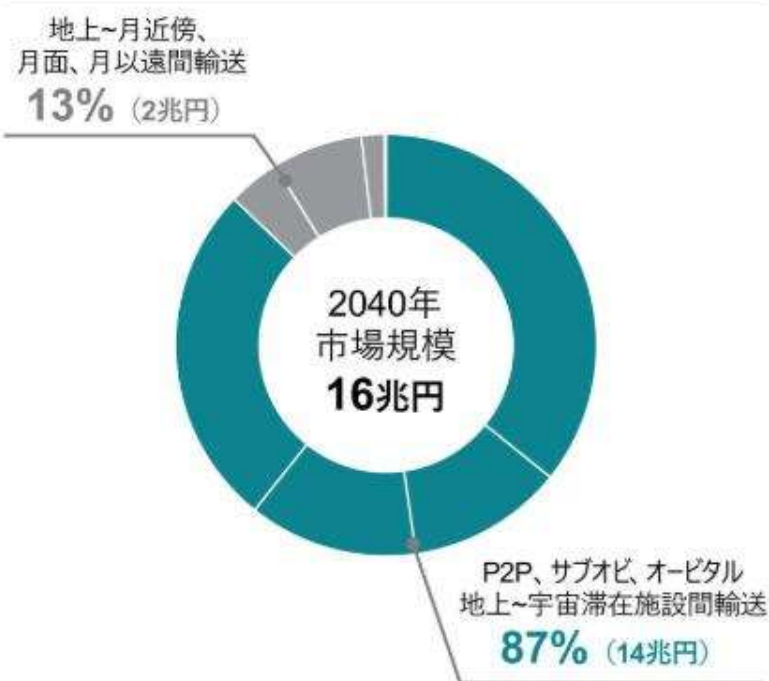
2040年時点の宇宙輸送マーケットの市場規模は16兆円にまで成長し、 P2P、サブオビ、オービタル、地上~宇宙滞在施設間輸送の市場が全体の87%を占める

宇宙輸送マーケットの市場規模推移



宇宙輸送マーケットの市場規模は2040年に16兆円となり、
客数は780万人、輸送重量は18万トンまで成長すると想定

宇宙輸送マーケットの市場規模推移



2040年時点の宇宙輸送マーケットはP2P、サブオビ、
オービタル、地上~宇宙滞在施設間輸送が全体の87%を占める

【出典】
一社)宇宙旅客輸送協議会,
<https://spaceliner.jp/>
(accessed 2025.03.02)

^{*1}: 2020年度に打上げられた政府の宇宙飛行士の人数、^{*2}: 2020年度のリプライミッションにおける輸送重量 (内訳: Cygnus(2t/回)×2回、Dragon(6t/回)×2回、Progress(2.5t/回)×2回、こうのとり×1回)

出典: Allied Market Research「Space Launch Service Market Statistics (2020)」及び各種公開情報を基に宇宙旅客輸送推進協議会作成

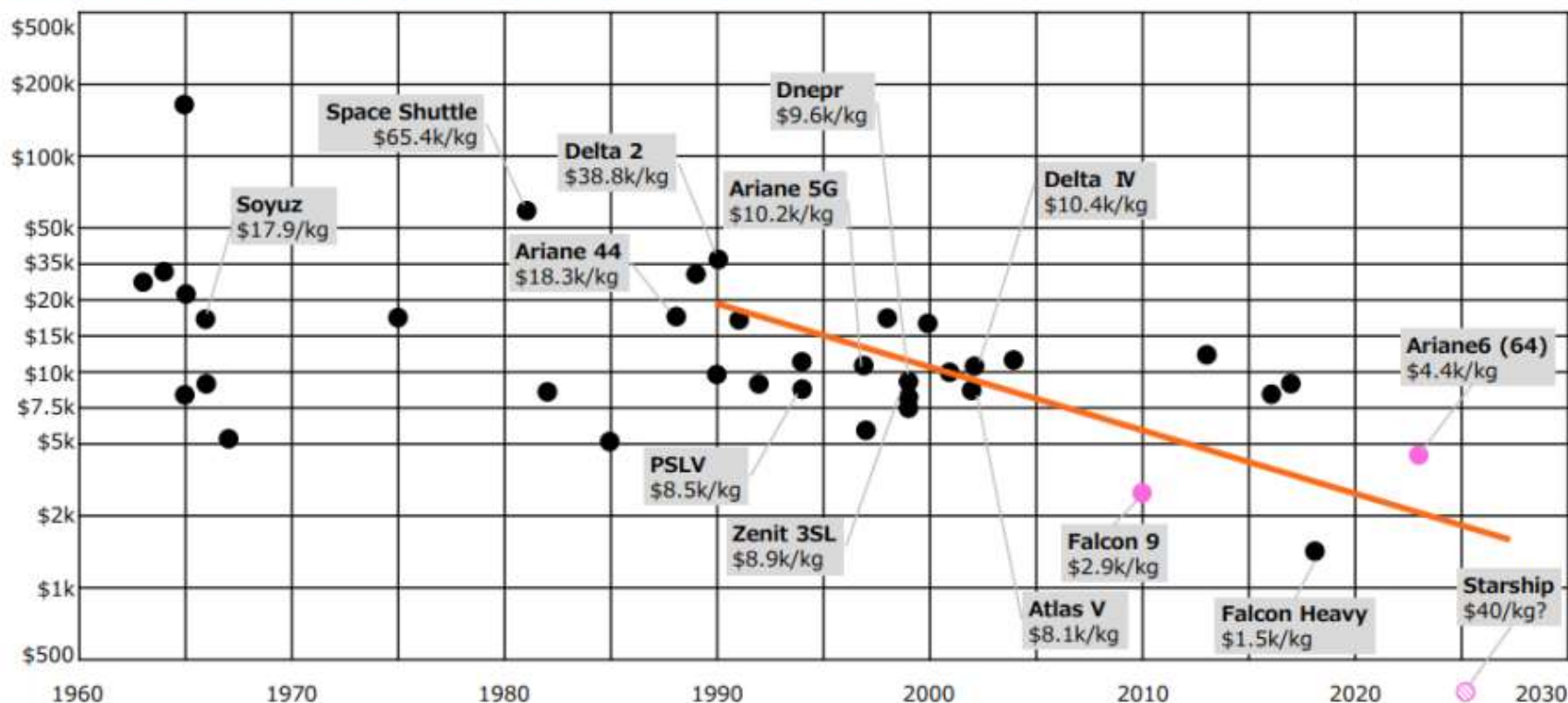
打上げ価格の低減について

参考3

- 大型ロケットの打上げ価格（単位質量当たりの打上げ価格）は低減傾向にある。打上げ価格は、2000年代までは10,000USD/キログラム水準だったが、SpaceXのFalcon9が2,900USD/キログラムを実現。
- 打ち上げ価格の低減に伴い、宇宙へのアクセスが拡大している。

大型ロケットの地球低軌道への打上げ価格（単位質量あたり）の推移

（●はそのロケットが初めて打ち上げられた年を示す）



【出典】
 国内外の宇宙産業の動向を踏まえた
 経済産業省の取組と今後について
 令和6年3月
 経済産業省 製造産業局
 航空機武器宇宙産業課
 宇宙産業室、P10

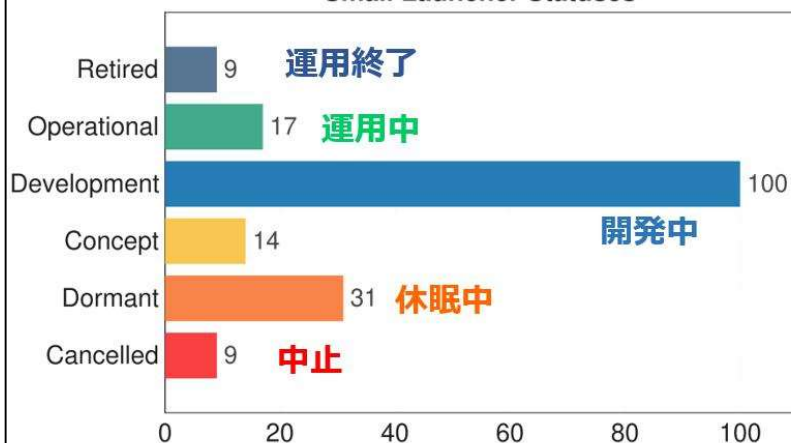
2.世界の宇宙輸送状況

世界で進む小型ロケット開発

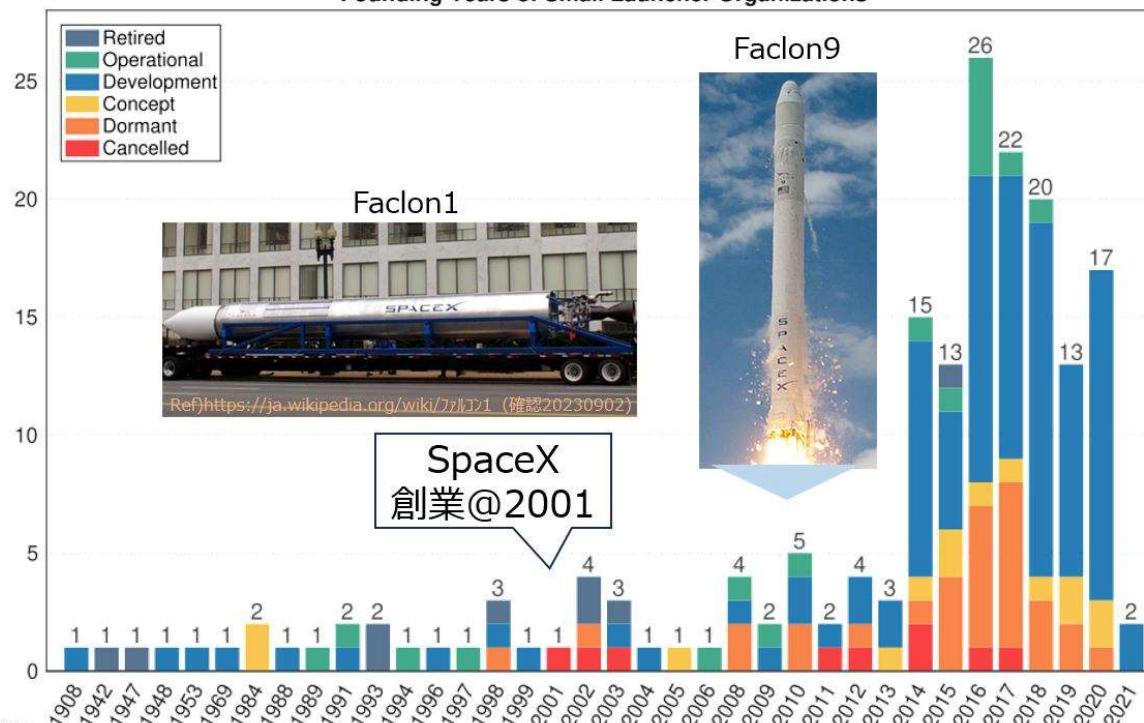
- ✓ 2001年に創業したSpaceXは初度開発の小型ロケットFalcon1では1～3号機失敗、4,5号機が成功。
- ✓ その後大型ロケットFalcon 9 開発と段階的发展を続け、商業的に成功。
- ✓ SpaceXの成功を受け、小型ロケットを狙う事業者が激増。2016年以降で180社。(2021年時点)
(打上能力2t以下)

- ✓ 開発玉成し事業化につなげている例は限られる

Small Launcher Statuses



Founding Years of Small Launcher Organizations



Ref) E. Kulu, Small Launchers - 2021 Industry Survey and Market Analysis, IAC-21-D2.9-D6.2.3, 2021
https://space.skyrocket.de/doc_lau_det/falcon-9_v1-0.htm (参照20230902)

8

【出典】

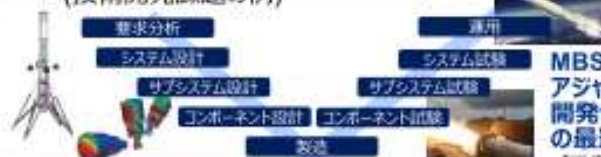
国立国会図書館、科学技術に関する調査プロジェクト2023シンポジウム「日本の宇宙政策を考える—今後10年のために何をすべきか—」2023年9月22日

宇宙輸送

システム技術

システム技術はロケット開発に関わる技術とノウハウの塊。これまで我が国が蓄積・継承した本技術に、民間ロケットの開発を加え、我が国の技術基盤を確立させ、宇宙輸送システムに関わるイノベーションを促進させる。

(技術開発課題の例)



MBSEにより
アジャイルなロケット
開発や全体プロセス
の最適化を実現。

【画像出典】JAXA

重要な技術開発：

- ・システムインテグレーション技術
- ・MBSE技術
(Model-Based Systems Engineering)

構造系技術

機体の製造期間短縮や機体軽量化を実現し、製造コストの低減や打上げ能力の向上へ繋げる。

(技術開発課題の例)



3Dプリンタを活用した大型機体製造技術による、製造期間短縮、製造コスト低減

重要な技術開発：

- ・3D積層技術
- ・複合素材成型技術 等

推進系技術

打上げ能力を強化し、運用性を向上させることで、ロケットの再使用化や月・火星等への大型貨物の輸送、その先の完全再使用化や高速二地点間輸送へ繋げる。

(技術開発課題の例)



液化メタンエンジンを用いたロケット開発が世界中で進展

重要な技術開発：

- ・液化メタンエンジン、エアブリージングエンジン、固体モータ量産化技術 等

その他の基盤技術

再使用型ロケットや自律飛行安全技術など、新たな宇宙輸送技術の導入により、打上げの高頻度化や打上げコストの低減へと繋げる。

(技術開発課題の例)



【出典】JAXA

機体の再使用にむけた日・仏・独との共同プロジェクト (CALLISTO)

重要な技術開発：

- ・オンボード自律飛行安全技術、再使用型ロケットに関わる技術 等

輸送サービス技術

宇宙における活動領域が拡大するにつれ、ペイロードが大型化・多様化することを見据え、軌道間輸送や高速二地点間輸送など多様な輸送ルートを実現し、輸送ニーズに対応する。

(技術開発課題の例)



【出典】JAXA

顧客ニーズに応じて、様々な搭載方式で打上げができる衛星搭載技術の開発

重要な技術開発：

- ・多様なペイロードへの対応、軌道間輸送、高速二地点間輸送 等

射場・宇宙港技術

射場・宇宙港では、高頻度打上げが実現。さらに、ロケット・宇宙機の帰還拠点としても重要な役割を果たす。他産業とのオープンイノベーションにより、価値創造や地方創生を進展させる。

(技術開発課題の例)



宇宙ステーションからの往還機の着陸拠点として、国内空港の活用を検討

重要な技術開発：

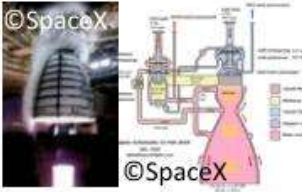
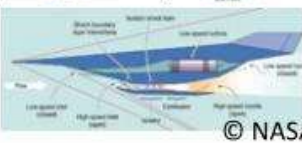
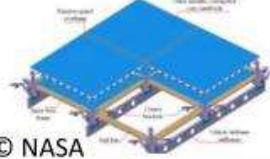
- ・打上げ運用、追跡管制、地上支援に関わる技術、宇宙港価値創造技術 等

【出典】
宇宙技術戦略の概要
2024年3月28日
宇宙政策委員会 P4

SLA 5. 民間主導の宇宙輸送の革新のための技術課題の抽出と重点化

Space Liner Association

- 3項および4項で述べた2040年代の輸送マーケット創出への段階的発展と、輸送の分野で高い競争力を持つために、取り組みが必要な技術課題を以下の5つの分野に整理。
- これらは大規模宇宙輸送事業を行う未来の乗り物として、性能面のみならず高頻度運航や安全性の意味で、格段に高いレベルが要求されるものであり、この抽出された課題を米国の先行者との差別化や競争力の源泉と捉え、戦略的に日本の勝ち技を追求することが重要。

推進系の高度化	軽量構造材料	再突入帰還飛行	再使用高頻度運航	有人輸送の技術
ロケット推進の高度化 高圧フルフロー化 2段燃焼複合推進 高推重比化 エアブリーザの進化 推進系対応のシステム構築	機体の複合材化 ホットストラクチャ 極低温複合材タンク 再使用タンク断熱技術 AMなど製造方法の革新 材料技術の進化	旅客輸送の再突入システム 耐熱材料・構造の軽量化と耐久性、整備性の向上 極超音速再突入帰還飛行高頻度再突入運航技術 試験設備の整備	寿命管理設計と点検整備 ヘルスマニタ・予兆整備 再使用運航とターンアラウンド性 極低温推進剤の地上運用 荒天耐性・定時運航 環境負荷への配慮	インタクトアポートのシステム 高頻度往還型 有人輸送機の安全基準 故障許容設計と耐空性 有人輸送の社会の受容と必要な制度整備
 © SpaceX  © SpaceX	 © NASA  © NASA	 © NASA  © NASA	 © SpaceX  © SpaceX	 © Virgin Galactic  © Virgin Galactic

：現在の時点で重点化して取り組むべき技術課題をさらに抽出

【出典】
 新たな宇宙輸送システムの確立に向けた
 民間動向と重点技術について
 宇宙輸送旅客推進協議会、
 2024年10月28日、P13
 (第91回宇宙開発利用部会)

4. 宇宙輸送 ～重要技術の評価軸～

i. 技術的優位性	宇宙輸送能力（打上げ能力）の強化
	安価な宇宙輸送価格の実現（打上げ価格の低減）
	打上げの高頻度化
	技術を保有又は保有しようとする企業等の国際市場で勝ち残る意思とビジネスモデル
	技術成熟度が低い技術であっても、競争力の強化にむけて、先行開発が必要な技術かどうか
ii. 自律性	サプライチェーン上の代替困難度
	調達自在性のリスク
	システム構築上のコア技術であるかどうか
	技術成熟度が低い技術であっても、将来的に自律性確保の観点から先行開発が必要な技術かどうか
iii. 多様な宇宙輸送ニーズへの対応	様々なペイロードへの対応（衛星、実験機材、食料、燃料、構造物、ローバ、宇宙飛行士、ロボット等）
	多様な宇宙輸送ルートの実現（高速二地点間輸送、軌道間輸送、洋上打上げ、宇宙旅行、月・火星等）
	柔軟かつタイムリーな打上げ機会の提供
	信頼性の高い宇宙ロジスティクスの提供
	当該技術にかかる市場セグメントの市場性や将来性が期待できるかどうか
	宇宙輸送ハブとしての射場・宇宙港の機能強化

【出典】
宇宙技術戦略の概要（詳細版）
2024年3月28日、
宇宙政策委員会,P21