

2 宇宙産業と宇宙技術

【要 旨】

全世界の宇宙産業規模は約 39 兆円に上り、増加傾向にある。衛星産業はその 3 分の 2 に相当する約 25 兆円を占めている。衛星産業は地上機器、打上産業(ロケット製造業・打上サービス産業)、衛星製造産業、衛星サービス産業で構成されており、衛星サービス産業が衛星産業全体の約 6 割を占める。打上産業は衛星産業の 2.6% を占めるに過ぎない。

宇宙産業に関しては米国を中心にオールド・スペースとニュー・スペースという概念が生まれており、ニュー・スペースの代表例であるスペース X 社は安価な宇宙輸送手段を提供しているが、ニュー・スペースの活動はオールド・スペースの経験と資産(設備等)の上に成り立っているとの指摘もある。

宇宙技術のうちロケット打上技術は、ほぼ成熟しているが、課題としてコスト、信頼性、利便性がある。コスト面ではロケット再使用技術が注目されている。有人宇宙飛行に係る技術に関しては、宇宙観光事業を視野に入れた民間の取組が注目されている。また、人工衛星の軽量化等の技術、宇宙デブリ除去技術などの開発が課題となっている。

はじめに

本稿では、宇宙の開発と利用に関して、産業面と技術面において注目すべき点を中心に取り上げる。宇宙産業に関しては、全般的状況として世界の市場規模の趨勢を概観するとともに、近年活動が活発化している主な宇宙ベンチャーの状況を紹介する。

宇宙技術に関しては、宇宙輸送の分野で最近注目されているロケット再使用、有人準軌道飛行、宇宙ステーションで利用されるモジュール技術について、また、人工衛星における軽量化、大電力化、衛星バス⁽¹⁾の技術について、さらに人工衛星や宇宙ステーションに被害を及ぼすおそれのある宇宙デブリ(スペースデブリ、宇宙ゴミ)⁽²⁾の除去技術について、それぞれ取りまとめた。

I 世界の宇宙産業規模

米国宇宙財団(Space Foundation)⁽³⁾によると、世界全体の宇宙産業の市場規模(2015年)は、2014年より若干減少したものの、全体としては増加傾向にあり、約 3200 億ドル(約 39 兆円)⁽⁴⁾に達している(図 1)。その内訳は大きく 4 つに分けられ、民間インフラ及び関連企業が約

* 本稿におけるインターネット情報の最終アクセス日は、2017年2月5日である。

(1) 電源など人工衛星に共通する基本的機能に係る機器。

(2) 何らかの有用な機能を喪失した後も地球軌道上に留まっている人工物体であり、多くは使用済みとなった人工衛星、ロケットの一部、それらの破片等である。

(3) 米国における非営利の財団。宇宙に関する啓発等の活動を行っている。“About the Space Foundation.” Space Foundation website <<https://www.spacefoundation.org/about/about-space-foundation>>

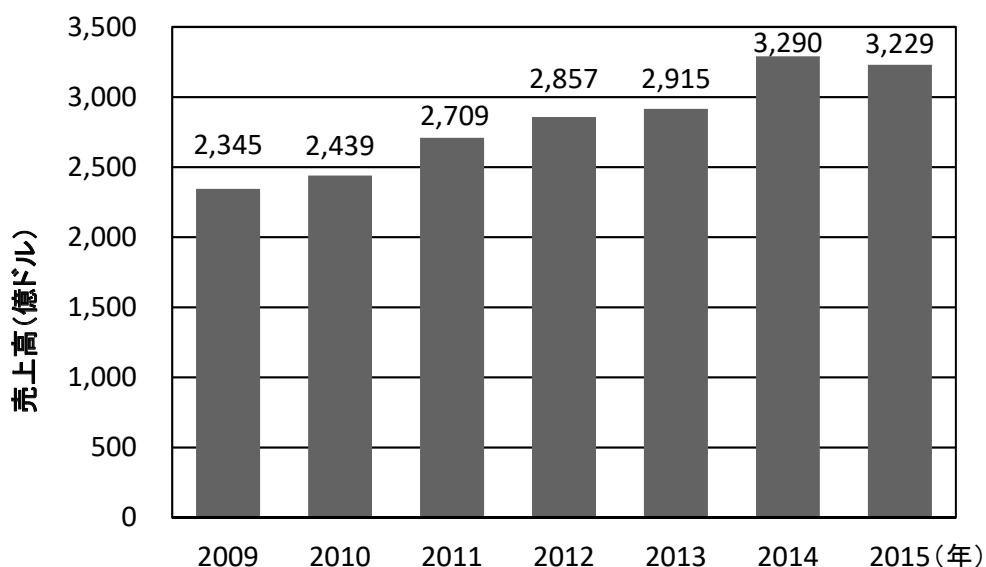
(4) 本稿では、2015年の年間平均為替レートに基づき、1ドル121.04円として換算した。OECD, “Exchange rates.” <<https://data.oecd.org/conversion/exchange-rates.htm>>

1200億ドル、民間宇宙関連製品及びサービス産業が約1260億ドル、米国政府宇宙予算が約450億ドル、米国以外の政府予算が約320億ドルとなっている。⁽⁵⁾

宇宙産業のうち、衛星産業の市場規模（2015年）は約2100億ドル（約25兆円）であり、宇宙産業全体の約3分の2を占めている。衛星産業は、地上機器産業、打上産業、衛星製造産業、衛星サービス産業に分けられる。このうち、地上機器産業は一般消費者向けの衛星放送テレビ受信器、カーナビ等の測位衛星情報受信器、ネットワーク機器等を扱う。打上産業はロケット製造及び打上げを担う。衛星製造産業は衛星製造及び衛星管理を行う。衛星サービス産業には、通信・電話サービス（衛星放送を含む。）を提供する産業、航空情報、海洋情報、交通情報などを提供する産業、地球観測データ（農作物、災害、気象等）や、地球科学、宇宙科学、安全保障に関する情報などを提供する産業が含まれる。

図2に示すように衛星サービス産業の市場規模（2015年）が衛星産業全体の約6割となる約1300億ドル（約16兆円）を占め、地上機器産業、衛星製造産業が続いている。一般によく知られている打上産業は衛星産業の約2.6%、宇宙産業全体の約1.7%であり、その市場規模は非常に小さい。

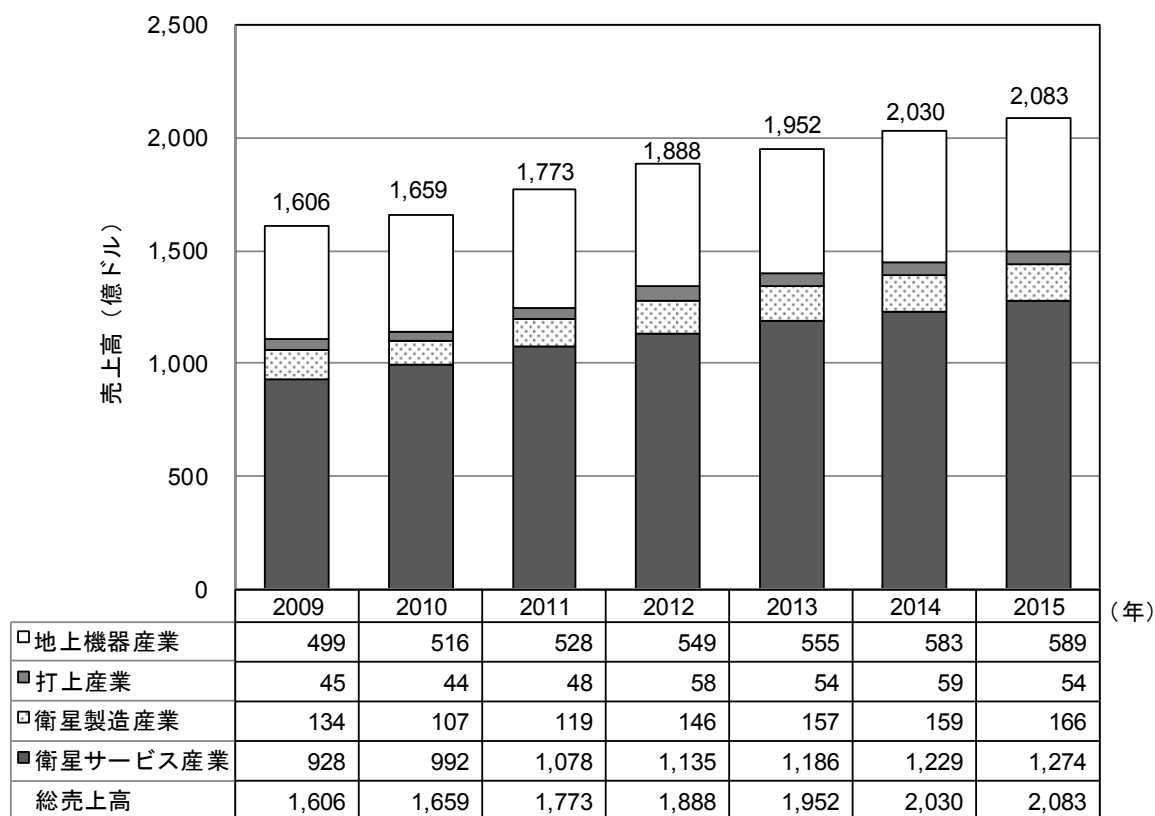
図1 世界の宇宙産業規模



(出典)2012年までは「世界の宇宙産業動向」『航空と宇宙』740号, 2015.8, p.12; 「世界の宇宙産業動向」『航空と宇宙』753号, 2016.9, p.9; 2013年以降は Space Foundation, *The Space Report 2016*, 2016, p.37 を基に筆者作成。

(5) Space Foundation, *The Space Report 2016*, pp.37-38.

図2 世界の衛星産業の市場規模と分野別内訳



(出典) Tauri Group, “State of the Satellite Industry Report,” June 2016. The Satellite Industry Association website <<http://www.sia.org/wp-content/uploads/2016/06/SSIR16-Pdf-Copy-for-Website-Compressed.pdf>>; Tauri Group “State of the Satellite Industry Report,” September 2015. The Satellite Industry Association website <<http://www.sia.org/wp-content/uploads/2015/06/Mktg15-SSIR-2015-FINAL-Compressed.pdf>> を基に筆者作成。

II 宇宙ベンチャーの活発化

宇宙産業の動向において特に目立っているのは、米国における宇宙ベンチャーの活発化である。2016年9月に開催された米国航空宇宙学会の宇宙コンファレンス(AIAA SPACE 2016)には、米国航空宇宙局(National Aeronautics and Space Administration: NASA)、伝統的な航空宇宙産業に加え、初めて宇宙ベンチャーが参加した。⁽⁶⁾

米国では2013年頃から「オールド・スペース」、「ニュー・スペース」という概念が論じられている⁽⁷⁾。オールド・スペースとはボーイング(Boeing)社やロッキード・マーティン(Lockheed Martin)社のような伝統的な航空宇宙産業であり、NASA等の要請に基づき、これまでにスペースシャトルを135回打ち上げたほか、宇宙輸送システムの開発、国際宇宙ステーション(International Space Station: ISS)の建設、多数の人工衛星の打上げなど多くの成果を挙げてきた。

(6) Michael Smart, “Old vs New: the next generation of the space industry,” September 26, 2016. The Conversation website <<http://theconversation.com/old-vs-new-the-next-generation-of-the-space-industry-64793>>

(7) Keith Cowing, “Old Space / New Space: Its Just Name Calling,” November 24 2013. NASA Watch website <<http://nasawatch.com/archives/2013/11/old-space-new-s.html>>

これらの事業はNASAを中心として行われたため、事業の推進には煩雑さを伴うものの、民間企業は開発期間やコスト面のリスクをある程度回避することができた。しかし、結果としてコストは非常に高くなったといわれている。⁽⁸⁾

これに対し、ニュー・スペースは、開発期間の短縮等を図り、それによって生じるリスクを負うことにより、オールド・スペースより大幅にコストを下げることを目指している⁽⁹⁾。ニュー・スペースの代表例はスペース X (Space X) 社である。スペース X 社は2002年に設立された米国のロケット製造・打上企業である。ファルコン9ロケット⁽¹⁰⁾を自社で開発し、衛星打上事業に乗り出してきた。また、同社は第1段ロケットを回収し再利用することで打上げの低価格化を図ろうとしており、2015年12月に第1段ロケットを陸上に着陸させ、回収することに成功している⁽¹¹⁾。

同社は、ISSへの物資補給などにおいてオールド・スペース企業と争っている。米国空軍の認証を得て⁽¹²⁾、これまでオールド・スペース企業が担っていた全地球測位システム (Global Positioning System: GPS) 衛星の打上げを受注したほか、有人宇宙飛行のための宇宙船の開発も行っている⁽¹³⁾。また、インターネット配信のために4,425機の人工衛星を低軌道に打ち上げる構想を示している⁽¹⁴⁾。

従来型の宇宙利用を大幅に低いコストで実現しようとしている企業も少なくない。プラネット (Planet) 社は「鳩 (Dove)」と呼ばれる長さ30センチメートル、重さ数キログラムの超小型衛星を打ち上げ、地球全体を毎日観測して解像度3メートルの画像を、オンラインTV⁽¹⁵⁾のネットフリックス (Netflix) 社を通じて提供する⁽¹⁶⁾。画像は地形情報、耕作地情報、港湾情報など多様であり毎日更新される。2015年7月時点で既に90個の超小型衛星が軌道上を周回し、サービスを提供している⁽¹⁷⁾。

ワンウェブ (OneWeb) 社は、648機の小型衛星を低軌道に打ち上げ、全世界に衛星高速インターネットを提供することを目指している⁽¹⁸⁾。小型衛星は欧州のエアバス (Airbus) 社との共同で米国フロリダ州に新工場を設けて製造を開始し、欧州のアリアンスペース (Arianespace) 社がソユ

(8) Smart, *op.cit.*(6)

(9) *ibid.*

(10) スペース X 社が開発している2段式のロケット。“Falcon 9.” Space X website <<http://www.spacex.com/falcon9>>

(11) 陸上への着陸は2015年12月21日、海上施設への着陸は2016年4月8日に成功した。“Falcon9.” SpaceX website <<http://www.spacex.com/falcon9>>

(12) Tom Roeder, “Upstart rocket builder gets Air Force certification,” Jan. 31, 2016. Gazette News website <<http://gazette.com/upstart-rocket-builder-gets-air-force-certification/article/1568941>>; Stephen Clark, “Air Force stays the course with SpaceX rocket certification,” July 2, 2015. Spaceflight Now website <<https://spaceflightnow.com/2015/07/02/air-force-stays-the-course-with-spacex-rocket-certification/>>

(13) “Completed Missions.” SpaceX website <<http://www.spacex.com/missions>>

(14) Dave Mosher, “SpaceX just asked permission to launch 4,425 satellites - more than orbit Earth today,” Nov. 16, 2016. Business Insider website <<http://www.businessinsider.com/spacex-internet-satellite-constellation-2016-11>>

(15) インターネット経由で配信されるテレビ。

(16) “5 Space Companies To Watch in 2016,” Nov. 16, 2015. SpaceNews website <<http://spacenews.com/5-space-companies-to-watch-in-2016/>>; Harneet Singh, “Satellite Internet Users Can Finally Watch Unlimited Netflix,” Jun 2, 2016. Aterlo Networks Inc. website <<https://www.gonightshift.com/2016/06/satellite-internet-users-can-finally-watch-unlimited-netflix/>>

(17) Elizabeth Howell, “CubeSats: Tiny Payloads, Huge Benefits for Space Research,” Oct. 6, 2016. Space.com website <<http://www.space.com/34324-cubesats.html>>

(18) “Satellites Make It All Possible.” OneWeb website <<http://oneweb.world/#solution>>

ズロケットで2018年から打ち上げる計画である⁽¹⁹⁾。今後、衛星製造、打ち上げのために25～30億ドル(3000～3600億円)の資金が必要となる見込みであり、2016年12月には日本のソフトバンク社が12億ドル(1440億円)の資金を提供することを決定した⁽²⁰⁾。なお、前述したようにスペースX社も同様のインターネット通信事業を計画しており、今後は競合状態になるといわれている⁽²¹⁾。

また、超小型衛星コンステレーション⁽²²⁾を用いた地球観測事業を手掛けるスカイボックス・イメージング(Skybox Imaging)社は、2014年、IT大手のグーグル(Google)社に買収され、2016年3月に社名をテラ・ベラ(Terra Bella)社と改名した。さらに2017年2月、グーグル社はテラ・ベラ社をプラネット社へ売却すると発表しており、宇宙ベンチャーをめぐる買収・売却の動きも活発である。

一方、ビゲロー・エアロスペース(Bigelow Aerospace)社の宇宙ホテル構想⁽²³⁾や、ディープ・スペース・インダストリーズ(Deep Space Industries)社の小惑星からの鉱物採掘構想⁽²⁴⁾のように、ニュー・スペースにはこれまでになかった宇宙利用を目指す企業もある。

このように、米国では新しい宇宙ベンチャーの動きが活発になっている。しかしながら、ニュー・スペースは単独で存在できるわけではなく、50年以上にわたるオールド・スペースの経験とその射場などの設備を利用することで成り立っており、オールド・スペースはニュー・スペースの育ての親とでもいえるべき存在であるといった指摘もある⁽²⁵⁾。

宇宙ベンチャーの状況は国・地域によってかなり異なっている。ロシアや中国でも宇宙ベンチャーの動きが見られるが⁽²⁶⁾、依然として国と大企業を中心とする従来型の宇宙開発が主流である。前述したワンウェブ社は主に米国で事業展開しているが、英国で企業登録された企業であり、エアバス社など欧州企業との関係も深い⁽²⁷⁾。日本ではベンチャー企業参入の動きが

(19) Emily Calandrelli, “OneWeb will mass-produce historic number of satellites with new Florida factory,” Apr. 19, 2016. TC website <<https://techcrunch.com/2016/04/19/oneweb-will-mass-produce-historic-number-of-satellites-with-new-florida-factory/>>

(20) Caleb Henry, “OneWeb gets \$1.2 billion in SoftBank-led investment,” Dec. 19, 2016. Spacenews website <<http://spacenews.com/oneweb-gets-1-2-billion-in-softbank-led-investment/>>

(21) “SpaceX Wants FCC Approval to Launch a Gigantic Satellite Internet Network,” Nov. 17, 2016. Fortune website <<http://fortune.com/2016/11/17/spacex-satellite-network-fcc-global-internet/>>

(22) コンステレーション(constellation)とは、複数の人工衛星を連携させて1つの機能やサービスを実現する方法をいう。

(23) ビゲロー・エアロスペース社の膨張式モジュールを利用した宇宙居住区を宇宙に設置して、宇宙観光のためのホテルにする構想。Dinah Eng, “Robert Bigelow Is Building Hotels in Space (No, Really).” May 19, 2016. Fortune website <<http://fortune.com/2016/05/19/robert-bigelow-hotels-space>>; Jacob Aron, “Inflatable space hotel to be tested by space station crew.” 4 April 2016. New Scientist website <<https://www.newscientist.com/article/2083006-inflatable-space-hotel-to-be-tested-by-space-station-crew>>

(24) 資源の豊富な小惑星を発見し、そこで必要な大きさの鉱石を採集し、さらに精製して鉱物資源とする構想。“Asteroid Mining.” DSI website <<https://deepspaceindustries.com/mining/>>

(25) Smart, *op.cit.*(6); “NASA Spinoff – About.” NASA website <<https://spinoff.nasa.gov/about.html>>

(26) “Kazakhs, Russians Create Space Venture,” Apr 05, 2005. Space Daily website <<http://www.spacedaily.com/news/launchers-05z.html>>; “Russian Venture Firms Launch \$60 Million Space Tech Investment Fund,” Jan 24, 2017. The Moscow Times website <<https://themoscowtimes.com/articles/russian-venture-firms-launch-60-million-space-tech-investment-fund-46495>>; Stephen Chen, “Space the final frontier for Chinese start-ups and venture capitalists,” 20 May, 2016. South China Morning Post website <<http://www.scmp.com/news/china/article/1947369/space-final-frontier-chinese-start-ups-and-venture-capitalists>>

(27) Jonathan Amos, “OneWeb satellite operator eyes huge rocket campaign,” 25 June 2015. BBC website <<http://www.bbc.com/news/science-environment-33268180>>

見られるものの、米国に比べると小規模に留まっている⁽²⁸⁾。

III 宇宙輸送・モジュールに関する技術

宇宙輸送については、米国、欧州、ロシア、中国、インド等、世界各国で大型ロケットが打ち上げられ、日本においても、H-IIA、H-IIB ロケットが高い信頼度で打ち上げられている。このように、ロケット打上技術はほぼ成熟している。今後の課題はコストの低減や利便性の向上であり⁽²⁹⁾、日本でも、コストの半減が次世代 H3 ロケットの開発における目標の1つとされている⁽³⁰⁾。また、人間が宇宙空間で滞在する施設（モジュール）についても低コスト化に向けた技術開発が進められている。

以下では、こうした観点から注目されている技術として、ロケット再使用技術、有人準軌道飛行技術を紹介する。また、モジュールを低コストかつ容易に設置できるとされる膨張式モジュール技術についても紹介する。

1 ロケット再使用技術

米国のスペース X 社はファルコン 9 ロケットの第 1 段ロケット回収実験を行い成功した⁽³¹⁾。着陸させたロケットを整備し再度打上げに使用することにより、従来の使い捨てに比べてコストが低減される可能性があり、その成否が注目されている。ただし回収及び整備にもコストが発生するので、その費用対効果には懐疑的な見方もある。欧州のアリアンスペース社は、スペース X 社が進めるロケット回収・再使用について、①再使用される機体の信頼性が不明、②回収のために追加の燃料が必要⁽³²⁾、③再使用のために整備が必要などとし、再使用によって本当に安くなるのか分らないと指摘している⁽³³⁾。つまり、再使用される機体の信頼性確保と、回収・再整備に伴うコストや利便性への影響について精査する必要がある。

アリアンスペース社は、使い切り型のアリアン 6 ロケットの開発を進めており、エンジンと機体を一貫生産するエアバス・サフラン・ランチャーズ (Airbus Safran Launchers) 社を新たに設立するなどコスト削減に取り組んでおり、再使用については言及していない⁽³⁴⁾。日本では、

(28) 米国のスペース X 社は独自に開発したロケットで人工衛星を打ち上げ、ビゲロー・エアロスペース社は膨張式モジュール(「III 3 膨張式モジュール技術」を参照)を用いた宇宙居住区を打ち上げて ISS で実験を行っているが、日本のベンチャー企業は小型ロケットの打上げでさえ未実施であり企業規模も小さい。スペース X 社の従業員は 4,000 人以上 (“Company.” SpaceX website <<http://www.spacex.com/about>>)、ビゲロー・エアロスペース社の従業員は 100 人規模 (Jeff Foust, “Layoffs Hit Bigelow Aerospace,” January 7, 2016. Spacenews website <<http://spacenews.com/layoffs-hit-bigelow-aerospace/>>) であるのに対し、例えば日本のインターステラテクノロジズ社 (民間ロケット開発会社) の社員数は 7 名 (松本佳代子「ホリエモンの作ったロケットベンチャー インターステラテクノロジズの勝算とは」2016.3.11. ASCII ウェブサイト <<http://ascii.jp/ele/000/001/131/1131534/index-3.html>>)、PD エアロスペース社 (民間ロケット開発会社) の社員数は 4 名 (PD エアロスペース社ウェブサイト <<http://www.pdas.co.jp/company.html>>) である。

(29) 岡田匡史「2020 年—H3 ロケットの目指す姿—」2015.7.8, p.18. ファン!ファン!JAXA! ウェブサイト <http://fanfun.jaxa.jp/jaxatv/files/jaxatv_20150708_h3.pdf>

(30) 「H3」JAXA ロケットナビゲーターウェブサイト <<http://www.rocket.jaxa.jp/rocket/h3/>>

(31) 前掲注 (11) を参照。

(32) ロケットを地上に着陸させる際にも燃料が必要であり、その分の燃料も搭載して打ち上げる。

(33) 鳥嶋真也「CEO が語る、商業ロケットの雄・欧州「アリアンスペース」の過去・現在・未来」2016.4.22. マイナビニュースウェブサイト <<http://news.mynavi.jp/articles/2016/04/22/arianespace/>>

(34) “Our Products and Markets.” Airbus Safran Launchers website <<http://www.airbusafran-launchers.com/en/our-products-and-markets/>>

ロケット再使用の検討は、現在開発中の H3 ロケットの次の段階になるとの議論がなされている⁽³⁵⁾。

再使用可能な航空機タイプの宇宙船として単段式宇宙往還機 (Single-Stage-to-Orbit: SSTO) が研究されている。単段式とは、ロケットが 1 段のみという意味であり、2 段式の宇宙往還機 (Two-Stage-to-Orbit: TSTO) と区別されている。具体例としては、米国の国防高等研究計画局 (Defence Advanced Research Projects Agency: DARPA)⁽³⁶⁾ を中心とした「XS-1」⁽³⁷⁾ の研究と英国における「スカイロン (Skylon)」⁽³⁸⁾ の研究が挙げられる。航空機タイプの宇宙船は、通常の航空機と同様の信頼性、利便性が期待されているが、実用段階には至っていない。

また、SSTO に必要とされる超音速燃焼ラムジェット (Supersonic Combustion Ramjet: SCRAM) エンジン⁽³⁹⁾ の開発は、米国、日本等で長年にわたり研究が進められているが、未だ基礎研究段階にあり⁽⁴⁰⁾、実用化にはかなりの期間を要すると見られる。なお、SCRAM エンジンに代わるエンジンとして、爆轟 (ばくごう)⁽⁴¹⁾ という現象を利用することで効率を高めた回転デトネーションエンジン⁽⁴²⁾ などが提案されているが、やはり基礎研究段階である。

2 有人準軌道飛行技術

地球周回軌道より低い高度 (高度 100 キロメートル程度) となる準軌道 (suborbital) を飛行する方法 (弾道宇宙飛行) によって、低コストな有人宇宙飛行を実現するための技術開発が行われている。

代表的な事例として、米国のスケールド・コンポジット (Scaled Composites) 社が開発した「スペースシップワン (SpaceShipOne)」と呼ばれる宇宙船が挙げられる。この宇宙船は航空機に搭載されて高度 15 キロメートルまで運ばれたあと、ロケットエンジンに点火して高度 100 キロメートル⁽⁴³⁾ まで上昇し、短時間の宇宙飛行を行うものである。同社は、2004 年に高度 100 キロメートルでの飛行に初めて成功した⁽⁴⁴⁾。

(35) 「第 18 回宇宙産業・科学技術基盤部会 議事録」(宇宙政策委員会宇宙産業・科学技術基盤部会第 18 回会合) 2016.5.19, p.7. 内閣府ウェブサイト <<http://www8.cao.go.jp/space/committee/27-kiban/kiban-dai18/gijiroku.pdf>>

(36) 米国軍のために新技術開発および研究を行う米国国防総省の機関 (大統領と国防長官の直轄組織)。“About DARPA.” DARPA website <<http://www.darpa.mil/about-us/about-darpa>>

(37) Jess Sponable, “Experimental Spaceplane (XS-1).” DARPA website <<http://www.darpa.mil/program/experimental-spaceplane>>

(38) Evan Ackerman, “BAE Systems, UK Gov’t Invest \$120 Million in Skylon Space Plane Engine Prototype,” November 3, 2015. IEEE Spectrum website <<http://spectrum.ieee.org/tech-talk/aerospace/aviation/bae-systems-uk-invest-120-million-in-skylon-space-plane-engine-prototype>>

(39) マッハ 4 以上の高速で飛ぶ飛行機や宇宙船に使用するエンジン。高速で飛行するため、エンジン内に取り込む空気の圧縮方法に工夫が施される。

(40) 「スクラムジェットエンジン正味推力、マッハ 8 飛行条件で世界で初めて実証—極超音速エンジンへ一歩前進—」2002.5.23. JAXA ウェブサイト <http://www.jaxa.jp/press/nal/20020523_jetengine_j.html>; 「スクラムジェットエンジン推力を従来の 3 倍以上に増強」2003.2.4. JAXA ウェブサイト <http://www.jaxa.jp/press/nal/20030204_engine_j.html>

(41) 爆轟は燃焼の一形態であり、デトネーション (detonation) ともいう。秒速 2 ~ 3 キロメートルの極超音速で伝わる衝撃波が生じる。

(42) 笠原次郎「デトネーション波を用いた航空宇宙用推進機関の開発と実証研究」『科研費 NEWS』2016 年度, Vol.1, p.13. <https://www.jsps.go.jp/j-grantsinaid/22_letter/data/news_2016_voll/p13.pdf>

(43) 国際航空連盟 (Fédération Aéronautique Internationale: FAI) は、高度 100 キロメートル以上を宇宙空間と定義している。ただし、国際条約によって明文化された定義は存在しない。

(44) 鳥嶋真也「「神の顔に触れた」—スペースシップワン、宇宙空間への到達から 10 年—」2014.6.21. Sorae.jp ウェブサイト <<http://sorae.jp/030201/5213.html>>

米国のヴァージン・ギャラクティック (Virgin Galactic) 社はスケールド・コンポジット社から技術提供を受けて、無重力を一時的に体験するなど宇宙観光を実現させようとしている。費用は宇宙飛行と3日間の準備訓練費用を含め、一人当たり25万ドル(約3千万円)である⁽⁴⁵⁾。

3 膨張式モジュール技術

米国のビゲロー・エアロスペース社は、膨張式モジュール実験装置「BEAM (The Bigelow Expandable Activity Module)」を開発した⁽⁴⁶⁾。これは、現在運用しているISSの居住モジュール、実験モジュール等の外殻構造に相当するものであり、折りたたんだ小さな状態で打ち上げ、宇宙空間で展開・拡張させるため、各種モジュール建設の低コスト化が期待されている。

同社は、2016年5月にISSで初の膨張実験を実施し成功させた⁽⁴⁷⁾。こうした膨張式モジュール技術は、安価で容易な宇宙観光の実現に貢献する技術としても注目されている。

IV 人工衛星に関する技術

人工衛星に関しては、打上コストや製造コストの低減、人工衛星そのものの性能の向上などに向けた技術開発が進められている。また、近年問題となっている宇宙デブリ⁽⁴⁸⁾を除去する技術の開発も始まっている。

1 人工衛星の軽量化及び大電力化

人工衛星の打上時重量は、人工衛星の目的(ミッション)に係る機器の重量(ペイロード重量)に、衛星バス⁽⁴⁹⁾の重量と、推進に必要な燃料の重量を加えたものとなる。このため、ペイロード重量以外の重量をできるだけ軽減し、人工衛星打上げの効率化を図ることが求められている。

日本では、通信・地球観測衛星において、オール電化⁽⁵⁰⁾による軽量化やコスト削減の方向性が政府によって示されている⁽⁵¹⁾。具体的には、打上時重量に占めるペイロード重量の割合(ペイロード比率)を、従来の20%程度から、オール電化衛星の実現により40%に高めることや、大電力化による通信容量の増強などを目指している⁽⁵²⁾。また、人工衛星の大電力化を実現するため、軽量かつ大電力を供給できる太陽電池、高効率なリチウムイオンバッテリー等が研究されている⁽⁵³⁾。今後、通信衛星の分野でオール電化、大電力化の機器を搭載し、技術実証を行う計

(45) “Ready to become an astronaut?” Virgin Galactic website <<http://www.virgingalactic.com/human-spaceflight/fly-with-us/>>; 「宇宙旅行の概要」クラブツーリズムウェブサイト <<http://www.club-t.com/space/>>

(46) “BEAM.” Bigelow website <<http://www.bigelowaerospace.com/beam/>>; 前掲注(23)も参照。

(47) “Bigelow Aerospace Provides Updates on the Process to Expand Its BEAM on ISS,” May 27, 2016. Business Wire website <<http://www.businesswire.com/news/home/20160527005800/en/Bigelow-Aerospace-Up-dates-Process-Expand-BEAM-ISS>>

(48) 前掲注(2)を参照。

(49) 前掲注(1)を参照。

(50) 人工衛星の推進方法を化学燃料ロケットエンジンから電気推進エンジンに置き換えること。

(51) 情報通信国際戦略局「通信・リモートセンシング衛星の現状と動向について」2016.9.12, p.21. 総務省ウェブサイト <http://www.soumu.go.jp/main_content/000439192.pdf>

(52) 「オール電化衛星時代の通信衛星の競争力強化」JAXA 研究開発部門ウェブサイト <<http://www.ard.jaxa.jp/research/allelectric/allelectric.html>>

(53) 文部科学省「バス分野の具体的な研究開発課題」(宇宙政策委員会宇宙産業・科学技術基盤部会第10回会合資料4-2) 2015.9.29, p.8. 内閣府ウェブサイト <<http://www8.cao.go.jp/space/committee/27-kiban/kiban-dai10/siryoku4-2.pdf>>

画であり⁽⁵⁴⁾、平成 33 年度の打上げを目指して、平成 28 年度から技術試験衛星の開発が始まっている⁽⁵⁵⁾。

2 衛星バス技術の確立

衛星バスは電源や燃料など人工衛星に共通する基本的機能に係る機器のことである。この部分に係る技術を確立し、標準化するなどにより製造コストの削減や信頼性の確保が期待される。衛星バスの技術を確立しておけば、それぞれの人工衛星に固有の目的（ミッション）に係る機器の開発に専念することができ、人工衛星の国際競争力を高めることにつながる。

欧米の人工衛星メーカーは衛星バスの分野で既に多くの実績がある⁽⁵⁶⁾。日本でも、三菱電機の DS2000 衛星バスなどの実績がある⁽⁵⁷⁾。

3 宇宙デブリ除去技術

軌道上を周回する宇宙デブリが増加⁽⁵⁸⁾しており、今後の宇宙活動を阻害する懸念がある。国連の宇宙空間平和利用委員会（Committee on the Peaceful Uses of Outer Space: COPUOS）は、法的拘束力はないものの「国連 COPUOS 宇宙デブリ低減ガイドライン」⁽⁵⁹⁾を作成し、その発生を少なくしようとしている。しかし、仮にこれが遵守されて宇宙デブリの発生が減少したとしても、軌道上にある宇宙デブリ同士が衝突することによる「自己増殖」が既に始まっていると考えられている。したがって、宇宙デブリの発生を少なくするだけでは不十分であり、既存の宇宙デブリを除去する必要性が生じている。

特に高度 700～1,000 キロメートル及び 1,400 キロメートルの軌道付近に人工衛星等が多いとされ、これらの軌道から年間 5～10 個の宇宙デブリを除去すれば、宇宙デブリの増加を抑制できると考えられている⁽⁶⁰⁾。

各国は、宇宙デブリを大気圏に突入させる、ネットで捕獲する、太陽風を利用してその飛行速度を落とす等、各種の除去方法を研究している⁽⁶¹⁾。NASA は宇宙デブリ除去（Space Debris

(54) 同上

(55) 情報通信国際戦略局 前掲注 (51), p.22.

(56) 本報告書の「資料集」における「各国・地域の代表的な静止衛星用衛星バス」を参照。

(57) 「三菱電機衛星プラットフォーム：DS2000」三菱電機ウェブサイト<<http://www.mitsubishielectric.co.jp/society/space/satellite/platform.html>>;「標準衛星システム NEXTAR」NEC ウェブサイト<<http://jpn.nec.com/solution/space/technology/bus/nextar.html>>

(58) 1957 年 10 月に人類初の人工衛星「スプートニク」が打ち上げられるまで宇宙空間には人工物体は存在しなかった。稼働中の人工衛星に加え、打上ロケットの残骸、爆発したロケットの残骸、機能を停止した人工衛星、破壊された人工衛星などが軌道上を回っている。2016 年 1 月時点で、人工衛星を含め軌道上に存在する物体の数はソフトボール大（10 センチメートル）以上のもので約 17,000 個と言われている。“Recent NOAA-16 Satellite Breakup,” *Orbital Debris Quarterly News*, Volume 20, Issues 1&2, April 2016, p.14. NASA Orbital Debris Program Office website <<https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/quarterly-news/pdfs/odqnv20i1-2.pdf>>

(59) “Space Debris Mitigation Guidelines of the Committee on the Peaceful Uses of Outer Space,” United Nations, *Report of the Committee on the Peaceful Uses of Outer Space*, General Assembly Official Records, sixty-second session, Supplement No.20 (A/62/20), 2007, pp.47-50, <http://www.unoosa.org/pdf/publications/st_space_49E.pdf>

(60) 「デブリ除去システム」JAXA 研究開発部門ウェブサイト<http://www.ard.jaxa.jp/research_fy27/mitou/mit-removal.html>

(61) Elizabeth Howell, “Space Junk Clean Up: 7 Wild Ways to Destroy Orbital Debris,” March 3, 2014. Space.com website <<http://www.space.com/24895-space-junk-wild-clean-up-concepts.html>>

Elimination: SpaDE) システムの研究を行っている⁽⁶²⁾。欧州では欧州宇宙機関 (European Space Agency: ESA) が宇宙デブリに関する様々な解析や予測を行っている⁽⁶³⁾ ほか、デブリ除去に関しては、宇宙デブリを捕捉するための人工衛星を打上げ、宇宙デブリとなった人工衛星 (ESA 所有の機能停止した衛星) を捕捉した後、両衛星を大気圏に落下させ、燃え尽きさせる「e- デオービット (e.Deorbit)」という計画を進めている⁽⁶⁴⁾。

日本では、宇宙航空研究開発機構 (Japan Aerospace Exploration Agency: JAXA) が導電性テザー (ケーブル) を用いた宇宙デブリ除去システム構想を示している。除去システムと除去すべき宇宙デブリとの間を導電性テザーで連結し、これに電気を流すことで地球の磁場との間に生じる力を利用して宇宙デブリの飛行速度を落とし、大気圏に落下させ、燃え尽きさせる方法である。この方法は比較的大型のデブリの除去に適しているとされる⁽⁶⁵⁾。一方、理化学研究所では、小型の宇宙デブリを除去する方法として、レーザーを宇宙デブリに照射してプラズマを発生させ、それに伴って生じる力によって宇宙デブリの軌道を変更させる方法を研究している⁽⁶⁶⁾。

執筆：公益財団法人未来工学研究所 研究参与 にしやま じゅんいち 西山 淳一 (I～II)
同 上 研究参与 こばやし みのる 小林 実 (III～IV)

(62) ガス状のパルス人工衛星軌道上に発生させ宇宙デブリを減速させるなどの技術。Daniel Gregory, “Space Debris Elimination (SpaDE),” February 16, 2013. NASA website <https://www.nasa.gov/directorates/spacetech/niac/gregory_space_debris_elimination.html>

(63) “Space Debris.” ESA website <http://www.esa.int/Our_Activities/Operations/Space_Debris/Analysis_and_prediction>

(64) “Clean Space.” ESA website <http://m.esa.int/Our_Activities/Space_Engineering_Technology/Clean_Space/e.Deorbit>

(65) 「導電性テザー (EDT)」 JAXA 研究開発部門ウェブサイト <http://www.ard.jaxa.jp/research_fy27/mitou/mit-edt.html>; 本方式については、2017年1月29日、ISS への輸送を終えた後の HTV6 号機を用いて実証実験「KITE (カイト)」を実施したがテザーの伸展は、放出機構の不具合により成功しなかった。「宇宙航空研究開発機構「宇宙ステーション補給機「こうのとり」6号機 (HTV6) の大気圏への再突入完了について」2017.2.6. <http://www.jaxa.jp/press/2017/02/20170206_kounotori6_j.html>

(66) 「高強度レーザーによるスペースデブリ除去技術」2015.4.21. 理化学研究所ウェブサイト <http://www.riken.jp/pr/press/2015/20150421_2/>

コラム③：商業宇宙輸送の動向について

アリアンスペース社東京事務所代表 高松聖司

1. 再使用型ロケットに関する見解

米国スペース X 社のファルコン 9R ロケット（再利用可能なファルコン 9 ロケット）は商業打上げだけでなく、政府の打上需要や自前の衛星コンステレーションなどを含めた総打上回数を前提として採算性を考えているのではないか。

再使用型ロケットが商業的に成立するかどうかは需要規模に依存する。1 機種が年間 40 ～ 50 機の人工衛星を打ち上げるなら成立する可能性はある。しかし近い将来における商業打上市場の規模は年間 20 機ほどであり、この規模でロケットを再使用化するとロケット製造に係る設備や人材を維持できない。したがって近い将来における再使用型ロケットの商業的な優位性は明確ではない。

スカイロンなどの宇宙往還機は、現在の商業打上市場とはかなり異なるものを目指していると感じている。これらが目指しているのは低軌道への打上げであり、静止軌道への打上げを主とする現在の商業打上げとは大きく異なる。また、このような往還機を衛星打上げに使うのは技術的に困難であろう。

2. 超小型衛星打上げに関する見解

小型衛星の需要が爆発的に増えるという話は 1990 年代からあるが、現実にはなかなかそうなっていない。小型衛星は大型衛星のピギーバック（大型ロケットの打上能力の余剰分を利用して大型衛星と相乗りで打ち上げること）という形で打ち上げられるので、大型衛星の打上スケジュールに左右されることが多い。つまり、無料で打ち上げてもらえる代わりに打上スケジュールに関わる権利がない。そこで小型衛星を多数搭載できるディスペンサー（人工衛星をロケットから分離する機器）を大型ロケットに搭載し、小型衛星のユーザーから出資を募って打ち上げる方法を JAXA に提案したことがあるが、採用されなかった。米国スペースフライト・インダストリーズ（Spaceflight Industries）社が同じようなことをしようとしており、インドも同様の方向性を考えている。

超小型衛星の打手段としての超小型ロケットは、技術的に面白いとは思っている。しかし、衛星コンステレーションを行う場合は人工衛星の数が必要になるため、超小型ロケットも大量に必要となり効率が悪い。コンステレーションを構成する一部の人工衛星が機能不全になったとき、その穴を埋めるギャップフィラーとしてなら超小型ロケットには需要があると思うが、大型ロケットの補完手段に留まるであろう。

3. 欧州における商業打上げの状況

日本と欧州は似ている。どちらも平和利用原則があり、軍需や政府発注が少ない。アリアン 1 ロケット開発の目的は商業利用ではなく、欧州が独立性を保つために自前の宇宙輸送手段を保有することであった。独自の宇宙アクセスを保証するために確実に飛ぶことが重要であり、実証された技術を積み上げて実現できる機体構成とした。例えば技術難度の

高い再着火が必要ないように赤道直下の仏領ギアナに射場を置き、ロケットと射場を一体のシステムと考えるアプローチを採用した。

ロケットの信頼性を維持するには、規則的かつ安定した打上げを継続的に行うことが必要であるが、欧州にはそれを支えるだけの政府需要がなかった。そこで当初は考えていなかった商業打上市場の創造を目指し、ロケットの運用と商業打上げに特化したアリアンススペース社を設立し、ファイナンスや保険手配の仕組みも整えた。

同社は年間12機程度のロケットを打ち上げているが、アリアン5ロケット（静止軌道への2衛星同時打上げ）、ソユーズロケット（非静止軌道への中型衛星打上げ）、ヴェガロケット（小型衛星打上げ）と3種類もあり、同時運用による相乗効果もない。政府衛星の打上げの多くはソユーズロケットに依存している。将来はアリアン5ロケットとソユーズロケットのミッションはアリアン6ロケットに統合し、ヴェガロケットはヴェガCロケットという発展型になる。ロケットを大小2つに集約し、両ロケットの固体燃料ブースタを共通化することで相乗効果が期待できる。

アリアン6ロケットでは民間の主導権と責任が大きくなる。新しい体制に対応できるよう、エアバス社のロケット部門と、サフラン社のロケットエンジン部門を切り離し、50%ずつ出資してロケットに特化したエアバス・サフラン・ランチャーズ（ASL）社を作った。また、打上能力に応じてバリエーションを用意するのではなく、政府ミッション（主に非静止衛星の単独打上げ）用と商業ミッション（静止衛星2機の同時打上げ）用の2つのバージョンを用意した。ハードだけでなくソフトも含めて全体を最適に設計するという考え方である。

4. 今後の商業打上市場の展望について

商業打上げはフルコミットするか、やらないかのどちらかであり、日本のように政府需要の不足分を数機だけ商業打上げで穴埋めするというのは中途半端に思われる。打上市場で生き残ることができるロケットの数は歴史的には3機種程度であり、商業打上げに参入するということは、そのうちの1つを提供することを意味する。これまでは商業打上市場の約半分はアリアンスペース社が確保し続けており、残りを2社のどこが取るかという競争であった。

将来に目を向けると、政府に対する責任を果たす義務がありながら政府需要の少ない日欧の基幹ロケットが一騎打ちして競争力が弱ったところに中国、インド、ロシア、ベンチャーが漁夫の利を得るとするのが最悪のパターンであろう。その意味では日欧の基幹ロケット開発には連携の意味がある。米国の基幹ロケットは商業打上げに積極的ではないので、日欧は米国を刺激せずに協力することが可能であり、そうした協力は市場の活性化にもつながると思う。

（注）本コラムはヒアリング内容をまとめたものである（2016年10月7日実施）。