

〈3〉 Critical and Emerging Technologies List (2) 宇宙関連技術 その1

テクニカルライター 井上 孝司

アメリカ政府が202年2月にリリースした「Critical and Emerging Technologies List」で取り上げている各種技術分野のうち、今回は「Space Technologies and Systems」を取り上げる。この分野では、以下に示す8種類のサブカテゴリを取り上げているが、今回はまず、前半の4項目について個別に解説していく。

- On-orbit servicing, assembly, and manufacturing
- Commoditized satellite buses
- Low-cost launch vehicles
- Space propulsion
- Sensors for local and wide-field imaging
- Resilient positioning, navigation, and timing (PNT)
- Cryogenic fluid management
- Entry, descent, and landing

■ On-orbit servicing, assembly, and manufacturing

On-orbit とは、「軌道上にある」という意味。通常、人工衛星や宇宙ステーション、探査機などといった各種の宇宙機は、地上で組み立てと動作試験を済ませてから、ロケットに載せて打ち上げるものである。それに対して「軌道上でのサービス、組み立て、製造」とは、すでに打ち上げて宇宙空間にある宇宙機を対象として、何らかの作業を行うという意味にな

る。

異なる宇宙機同士がドッキングを行う事例なら、すでに数多の事例がある。たとえば国際宇宙ステーション (ISS: International Space Station) は、各国で個別のモジュールを製造してから個別に打ち上げを行い、それを軌道上で連結することで構成している。ISS は規模が大きく、最初から一体のものとして製造して打ち上げるには非現実的なサイズ・重量であるため、こうした方法がとられている。

しかし、人工衛星は一般的に、最初から完成品にした状態で打ち上げを行っている。そして人工衛星の寿命は、本体や、そこに搭載して各種の機能を提供する機器 (ペイロード) のハードウェア的な寿命によって制約される。

ところが実際には、それ以外の制約要因もあり、中でも軌道修正用ロケットの燃料が問題になる。燃料を使い果たせば軌道の修正は不可能になり、何か問題が生じたときに対処不可能になるおそれがある。そこでリスクを冒すことはできないので、ハードウェアが寿命に達していなくても、軌道修正が不可能になった人工衛星を処分する場面は発生し得る。

また、一部のハードウェアに機能不全が生じただけで、衛星をまるごと捨ててしまうのは、もったいない話である。機能不全が生じたハードウェアだけを交換することで延命できるのであれば、その方が望ましい。

低高度の周回軌道（LEO:Low Earth Orbit）に載っている衛星であれば、スペースシャトルのような有人宇宙機を送り込んで、船外作業によってメンテナンスを行う方法は考えられる。現時点でこうした有人宇宙機は稼働していないが、理屈の上では可能であろう。しかし、静止衛星（GEO:Geosynchronous Earth Orbit）は軌道高度が約36,000kmと高く、そんな高いところまで有人宇宙機を送り込むことはできない。そのため、静止衛星はいったん打ち上げたら「もはやそれまで」である。

こうした事情から、「すでに軌道上にある人工衛星のところに無人の宇宙機を送り込んで、燃料補給や機器の交換を行えないか」「地上で組み立てておくことができない大がかりな構造物を、軌道上で無人の宇宙機を使って組み立てられないか」といった発想が出てきた。具体的なプログラムとしては、以下のものがある。

- ・RSGS (Robotic Servicing of Geosynchronous Satellites)
- ・STMD (Space Technology Mission Directorate)
- ・EROSS+ (European Robotic Orbital Support Services)

RSGSは、米国防高等研究計画局（DARPA:Defense Advanced Research Projects Agency）のプログラム。人工衛星のところまでロボット宇宙機を送り込んで、マニピュレータ・アームを使って修理などの作業を行おうというものである。

2016年7月に、マニピュレータ・アームを米海軍研究所（NRL:Naval Research Laboratory）、それを搭載する宇宙機をスペース・システムズ・ローラル社（SS/L）が担当する体制で作業を開始した。ところがSS/Lは2019年1月末にDARPAに対して、「より利益につながる事業にリソースを集中するため」との理由をつけて、RSGS計画からの撤退を通告した。

その後、この件は担当を変えて継続することになった。

そして2020年3月4日に、ノースロップ・グラマン傘下のスペース・ロジスティクス社が、RSGSを担当することが明らかにされた。マニピュレータを2基備えるペイロード部分は引き続きNRLが担当して、それをDARPA経由でスペース・ロジスティクスに支給する。それを、スペース・ロジスティク

スのバスに搭載するというのが新しい枠組み。2022年11月には、コンポーネント・レベルの試験がすべて完了したとの発表がDARPAからなされている。この後は、2023年にバスへの搭載を実施、2024年の打ち上げを予定している。

なお、ノースロップ・グラマン社と合併する前のオービタル ATK社が2019年10月に、ドッキング試験用の宇宙機MEV-1 (Mission Extension Vehicle-1)を打ち上げた。これは2020年2月25日に、静止軌道上でのドッキング試験を成功させていた。このMEV-1も、RSGSの下敷きとなっている。

一方、STMDは米航空宇宙局（NASA:National Aeronautics and Space Administration）のプログラム。こちらは、既存の衛星に対するサービスではなく、宇宙空間でロボットによる組み立て作業を行うというものである。

STMD計画で想定しているのは、「小型衛星の電力供給源となる10mのサイズを持つ太陽電池アレイを、軌道上で組み立てる」という内容。こうすると、打ち上げに使用するロケットのペイロード搭載区画よりも大きい太陽電池アレイを用意できる。それに加えて、分割して打ち上げてから軌道上で組み立てを行えば、個別のペイロードが小型軽量化できて、打ち上げコストの低減につながるの考えもある。

STMD計画が始動したのは2016年のこと。当初のフェーズ1に続いて2019年7月に、ノースロップ・グラマン社がフェーズ2分の作業についてMIS (Made In Space)社への下請契約を発注したことを明らかにしている。また、同じ7月に、積層造形とロボット組み立ての地上試験を成功裏に済ませている。

EROSS+は、ヨーロッパで進められている同種のプログラム。担当メーカーはタレス・アレニア・スペース社だが、以下のように多数の欧州企業が参画している。

- ・タレス・アレニア・スペース（仏）：システム全体、誘導・航法・制御機能
- ・タレス・アレニア・スペース（伊）：ミッション・デザイン

- ・DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt。独)：ロボティック技術
- ・GMV (西)：自律ロボティクス・システム
- ・PIAP Space (ポーランド)：グリッピング・メカニズム
- ・SINTEF (諾)：ソフトウェア・アーキテクチャ

タレス・アレニア・スペースへの発注は2021年1月。まず、技術熟成と主要構成要素の熟成度を高める作業を実施する。2021年2月から24ヶ月の予定で作業を進めて、それが順調に進めば2026年までに実証試験を行うこととしている。

いずれをとっても、有人の宇宙機を送り込むことができない場所で、ロボットを用いて自律的に作業を行うところが、最大のチャレンジとなる。単にマニピュレータ・アームを制御するだけでなく、目の前にいる操作対象の衛星について、状況を把握するという課題もある。さまざまな分野で無人化した自律システムの開発が進められている現在、こうした技術の取り扱いには注意を要するだろう。

■ Commoditized satellite buses

バスという言葉にはさまざまな意味があるが、宇宙関連でバスといった場合、人工衛星のプラットフォーム部分を指す。人工衛星は一般に、通信や写真撮影などの機能を実現するための機器(ペイロード)と、それを搭載する本体の部分に分かれており、後者をバスという。バスにはペイロードに電力を供給する機能や、前述した軌道修正用ロケット、姿勢制御、熱制御などの機能が組み込まれている。

バスは主要な宇宙関連企業がそれぞれ、独自のものを開発している。そこに搭載するペイロードを変えることで、さまざまな用途の人工衛星を構成できる。以下に、バスの例をメーカーごとに示す。

- ・ロッキード・マーティン：A2100、LM2100、SmartSat、LM400
- ・ボーイング：702X
- ・エアバス・ディフェンス & スペース：EuroStar、EuroStar Neo
- ・三菱電機：DS2000

たとえば、ロッキード・マーティンのLM2100バスは、ミサイル早期警戒衛星のSBIRS GEO (Space Based Infrared System Geosynchronous Earth Orbit) や、GPS (Global Positioning System) ブロック III F 衛星で使われている。ミサイル早期警戒衛星とGPS衛星ではペイロードはまったく別物だが、それが載るバスは基本的に同じものだ。

このように、ペイロードは用途ごとに専用のものを用意する必要があるが、バスを共通設計にできれば、衛星全体としての製造コスト低下を期待できる。それが“Commoditized satellite bus”の意味である。これを実現することで、軍民双方の衛星を、より安価かつ迅速に製造できる可能性を期待できる。ただし、「共通化」と口でいうのは簡単だが、実行するのは意外と難しいだろう。

まず、ペイロード収容部のサイズが過小では、搭載できるペイロードが制約される。逆に過大では、無駄な重量や空間を抱え込むことになりかねないし、大きすぎると打ち上げに使用するロケットを制約することにもなる。大形のロケットが必要になれば、それは打ち上げ経費を押し上げる。したがって、まずバスの規模を適切に定めることが容易ではない。

また、バスが汎用品である以上、そこに収容するペイロードはバスに合わせた設計にする必要がある。バスの側でも、さまざまなペイロードを受け入れられるようにするための配慮が求められる。そして、バスとペイロードの間では電力供給などのやりとりが発生するので、その部分の物理的・電氣的インターフェイスを規定する必要もある。

■ Low-cost launch vehicles

先に衛星の打ち上げコストに言及したが、近年、大きな変化が生じているのがこの分野である。ロケットそのもののコストダウンを図るだけでなく、大きく高価な1段目ロケットを回収して再使用する事例もある。

ロケットの回収・再使用を初めて成功させたのが、スペースX (Space Exploration Technologies Corp.) のファルコン9ロケットで、2015年に初めて、使用後のロケットを垂直着陸させる試験に成功した。その後の2017年から、同社は1段目ロケットを再使用す