

宇宙開発利用の新潮流と宇宙 ビジネスの現状と今後

中須賀 真一

皆さん、こんにちは。東京大学の中須賀でございます。

今日のお話をする前に、最近良いニュースがあったのですが、皆さん覚えておられますか。今年の一月にSLIM（小型月着陸実証機）が見事に月面着陸に成功しました。これまで月面着陸に成功していたのはアメリカ、ソ連、中国、インドの四カ国で日本は五番目の着陸国になりました。着陸後、タカラトミー社がつくった小さなロボット、月の上を動き回るローバーが写真を撮って、別のローバーを経由して画像を地球に送ってきました。

した。タカラトミー社は玩具メーカーですが、宇宙開発にも乗り出している。これも一つ、日本のおもしろい特徴ではないかと思えます。

SLIMはあまり大きくありません。一七〇kg程度の衛星で、燃料があまりないものですから、月へ行くまでに非常に複雑な軌道を通り、地球や月の重力なども使いながら何とか近づいていて、最後は着陸に成功しました。小さな衛星でも月に着陸できるということを証明したのです。

もう一つ嬉しかったニュースは、今年の二月一七日、一年間待ちましたH3ロケットの二号機の

打ち上げが成功したことです。去年三月の一号機はうまくいきませんでした。その改修を経てようやく成功しました。日本政府はロケットの打ち上げが失敗すると、なかなか次を上げません。アメリカのスペースX社は、失敗しても、一ヶ月でどんどん次を上げていくのですが、日本の場合は一ヶ月待つてようやく打ち上げとなりました。僕は時計の針が止まるといいます。ロケットがないと日本の宇宙開発は動きません。それがまた動き始めたということで、非常にありがたいニュースでした。

また、これも成功して、三連勝となればよかったのですが、今年の三月にスペーススワン社というベンチャー会社がカイロスというロケットの打ち上げを行いました。和歌山県の串本町に自分たちで設置した初めての民間射場から打ち上げましたが、残念ながら打ち上げ後五秒で爆発しました。

これは、もともと何か変なことが起こったら爆発するという命令が入っていたからです。何が変だったかを、今、一生懸命解明しています。それを解明したら、今年度中には次の打ち上げがあるだろうと期待しています。

なぜ大事かという点、小さなロケットがないと、日本のたぐさんのベンチャー会社が抱えている衛星を打ち上げられないからです。H3ロケットやイプシロンロケットも、打ち上げは止まっています。こうしたロケットではなかなか打ち上げができないとすると、海外に頼まざるを得ませんが、スペースX社やロケットラボ社などの海外のロケット会社に、日本政府のお金や民間のお金が流れていくことは非常にもったいないです。政府のロケット以外なかった状態で、スペーススワン社が民間でロケットを作ろうという心意気を出してくれたことは非常に大事だったので

が、残念ながら初号機は失敗しました。

ただ、失敗してもどんどん次を打ち上げていく中で信頼度を上げていくという活動を今一生懸命やっています。ぜひ応援いただければと思います。

このようなニュースをきっかけに、今年度の活動がスタートしました。本日は、まず日本の宇宙開発利用の全体像をお話しし、今大きな変革が起こっているという話をします。その中心になっているのがベンチャーです。そういったベンチャーの技術の源は、実は大学発の超小型衛星の技術なのです。最後は、少し補足のお話をして終わりにしたいと思います。

一、日本の宇宙開発利用の全体像

御存じのように、宇宙開発利用に関する政府の

予算は増えており、この予算をもとに活動を進めています(図表1)。分野ごとに見ると、輸送系では基幹ロケットであるH-IIAロケットはあと三機ぐらい打ち上がります。イプシロンロケットは二年前の十月に打ち上げが失敗したため、その後の打ち上げが止まっています。H3ロケットは、先ほどお話ししたようにようやく打ち上げが成功しました。

測位衛星では、日本版GPSである準天頂衛星「みちびき」があり、地球観測目的ではJAXAが手がけているALOSシリーズのほか、温室効果ガスを観測する衛星であるGOSAT、さらには気象衛星の「ひまわり」は、今は八号、九号が動いています。大気中の様々な粒子を観測するGCOMというシリーズもあります。

宇宙科学衛星、宇宙探査衛星など、地球周りの衛星で星や銀河を調べることは世界の中でも日本

図表 1

日本の宇宙開発利用の全体像

- 輸送系(基幹ロケット:H-IIA,Epsilon→H3打ち上げ成功!)
 - 測位衛星(日本版GPS:準天頂衛星)
 - 地球観測衛星(光学、レーダー:ALOSシリーズ)
 - 温室効果ガス観測:GOSAT, 気象衛星:ひまわり
 - 水蒸気、大気中の粒子等観測:GCOMシリーズ
 - 通信放送衛星(実証衛星:ETS-9計画中)
 - 宇宙科学衛星(X線:XRISM, 赤外:SOLAR-C, LightBird)
 - 宇宙探査衛星(はやぶさ、月SLIM、火星MMX2024年)
 - 国際宇宙ステーションISS→月のGatewayへ
 - アルテミス計画参加、HTV-X、月面上与圧ローバ
 - 安全保障ニーズ:SSA(デブリ等)、早期警戒、通信
- 令和6年度宇宙予算は8945億円。宇宙産業の官需率92%

は非常に高く評価されています。加えて御存じの宇宙探査衛星「はやぶさ」が、二〇一〇年に一号機、二〇二〇年に二号機がそれぞれ帰還しました。どちらも小惑星から採取した物質を持って帰ってきていて、世界中で分析が進められています。有人の宇宙開発、国際宇宙ステーションでは、アメリカを中心に運用されていて、今は有人の月探査計画である、アルテミス計画が進められています。

安全保障としても、例えば宇宙を飛んでいるデブリというごみを調べるためのSSA (Space Situational Awareness) 最近SDA (Space Domain Awareness) という取り組みがあります。また、デブリだけではなく、衛星破壊兵器や、衛星のそばに寄っていったって、悪さをする衛星が現れないか警戒しなければなりません。ですので、防衛省も関わっています。加えて、ミサイルが発射さ

れる前に探知したり、発射したらずぐに軌道が分かるとか、こういったことを観測する衛星も大事です。

今、宇宙開発予算は大きく増えて、数年前は三六〇〇億円ぐらいでしたが、今は九〇〇〇億円程度になりました。宇宙というものの大きさが非常に認識されてきたと言えると思います。

地球観測プログラムの一つであるJAXAのALOSは何機か打ち上げられていて、そのうち奇数番号が光学カメラで地球を観測し、偶数番号は合成開口レーダといって、衛星から出たマイクロ波が地面に反射して返ってくるものを観測するといった役割があります。これによって、夜でも、雲があっても、二四時間、地上を見ることができません。残念ながらH3ロケット初号機の打ち上げ失敗によりALOS-3が消失してしまったので、今後はもう一回大きな衛星を作るのはやめて、小さ

な衛星複数機に替えていこうという議論をしています。そのほうが頻繁に観測できるためです。

これまで日本の地球観測衛星は、まず衛星を作って「はい、使ってください」という形でした。ですが、本来はどんなニーズがあつて、どういうスペックの衛星を作れば政府も使えるし、産業にもつながるか、これをしっかり考えた上で作らなければなりません。ですので、今はCONS EO（地球観測コンソーシアム）というコミュニティを作つて、この中で、次の衛星はこういう目的を持った、こういうスペックであるということをしつかり議論しようとしています。

衛星の話に戻りますと、ALOS-2は現役です。

この間の能登半島地震でも大活躍しましたが、電波で観測する衛星で、雲があっても地面の様子が分かります。また、干渉計測といって、二回、同じ場所を計測し、そのデータを比較することに

よって、一回目と二回目の間に地面がどれぐらい動いたかを検証することができます。その分解能は、約六〇〇kmの高度から観測して、何と五mmの動きが分かるほどです。例えば、火山が噴火する前に圧力でわずかに膨らむ様子も観測できて、噴火の予知などにもつなげられます。また、インフラの調査、例えば、橋がちょっと動いているとか、地面が地盤沈下しているとか、空港の滑走路がすり減っているなど分かりますので、今後の応用が期待されます。世界では今、この精度は1mmに向かおうとしています。この後継機で、さらに機能が向上した「だいち四号」が今月末にいよいよ打ち上げられます。これはH3ロケットの三号機で、二号機は成功しましたから、三号機も連続成功するかどうかが注目されます。

測位衛星の分野では、アメリカのGPSは、精度が大体三〜五mぐらいしかありません。農業な

どに利用するといっても、これを使って耕運機を動かしたら、あぜ道に乗り上げてしまいます。ところが、日本の準天頂衛星、日本版GPSは今四機体制ですが、特別な電波を使うと精度が6cmになります。今、これを使いたいいろいろな利用が起こりつつあります。私はその利用を展開する委員会の委員長を務めていて、自動運転、農業の自動耕運、ドローン、港湾クレーンの運転といったものはセンチメートル精度の位置情報が必要で、これがとても役に立っています。

もう一つ大事なことは、時刻の情報を提供することです。例えば、今の証券取引はプログラムで売買されることがあり、マイクロ秒、さらにナノ秒の単位で注文が繰り返されます。そういった時刻の標準は、もちろん地上ベースの標準もありますが、GPSや準天頂衛星システムのような高精度の時刻情報の提供が貢献する面が大きいです。

気象衛星に関して、気象衛星「ひまわり」が、地球全体の写真を一〇分に一回、日本近海だと二分半に一回の頻度で撮影しています。この撮影した画像を用いることで、非常に精度の高い気象予報ができるようになりました。我々が小さいときは、気象庁が晴れと言っても雨かもしれないとか、そんなことを言っていました。今はほとんど外れません。それぐらいモデルが正確になってきました。また、次期の「ひまわり一〇号」では赤外サウンドを搭載することになっています。今、線状降水帯による被害が各地で発生していますが、この予測や観測はまだ十分にできていません。それを補うのが赤外サウンドで、開発がスタートしています。あと四〜五年後には、「ひまわり一〇号」の時代になるでしょう。

国際宇宙ステーションにも大きな変革がありました。これまではNASAが中心となって五カ国

で運用してきました。ロシアも入っています。ところが、NASAは、「二〇三〇年になったら、お金も大変だから、我々はもう運用しない」と言ったのです。ではどうするかというと、民間の会社が建設した宇宙ステーションを、NASAはお金を払って利用するのです。まさに官から民に、いろいろと移っているところです。今、アメリカでは、宇宙ステーションの建設について三社が企画競争をしていて、その中で良いプランを提案した会社に、二〇二五〜二〇二六年ぐらいからNASAがお金を出して開発をスタートし、民間は自分たちのお金でも開発を行い、二〇三〇年以降はNASAがお金を払って借りる、このような予定です。日本も商社が投資を始めていますが、日本がどういう立ち位置でこの宇宙ステーション計画に参加するか、大きな検討課題だと思います。

また、月周りの宇宙ステーションの開発がスタートしました。これまでのように、月へ行くための道具全てを地上からロケットで運搬するのではなく、こういったところを経由して、そこに滞在している着陸機に乗り移ることができれば非常に楽になります。このようなインフラを作ることを目指しているのが現在の大きな流れです。その一つのノードとして、この宇宙ステーション(Gateway)が、今、開発されつつあります。

それを中心とした月の探査計画は、今、大変な勢いで官民ともに展開しています。例えば、水や空気を循環、再生するための装置は日本が強いので、これを提供したり、あるいは「こうのとりの後継機を使って荷物を運ぶという形でアメリカに協力していくことも検討されています。日本独自の月計画としては、SLIMがピンポイント着陸をしましたが、実は当初の予定は二〇二一年で

あったので、二年半ほど遅れています。今後は、インドと連携して、月の南極に無人の着陸機を送り込み、採掘を行う計画があります。月は、水があるかもしれないとわかった瞬間に価値が大きく上がりました。もし月で水を見つけると、燃料としても使えますから、ロケットの発射基地として利用できます。さらに将来は与圧ローバー車、つまり宇宙服を着なくても乗れる宇宙基地のようなローバーを作ろうということで、トヨタがJAXAと検討をスタートしています。日本はこのように独自の宇宙開発をし、与圧ローバーはアメリカのアルテミス計画などにも使われていく予定です、このあたりが日本としての大事な貢献となっていくでしょう。

さて、日本の宇宙政策は、政府の活動はどんどん盛んになってきているものの、残念ながら、実は世界からは遅れ始めています(図表2)。去年

図表2

政府内での宇宙政策の新しい動き

- 中大型衛星、ロケット技術、宇宙利用は世界から周回遅れ
- 官需が92% 政府投資が宇宙産業の拡大につながらない
- 防災などの公共利用も不十分。東北大震災では翌日に初観測
- 防衛三文書改訂。宇宙をどう使うか、本腰いれた検討必要

2023年宇宙基本計画

- 経済安全保障プログラム(宇宙分野だと1次3件、2次3件)
 - 光通信で衛星取得dataの高速ダウンリンクを目指す
 - AISIに代わる新しい海洋情報システムVDESと海洋情報把握(MDA)
 - 多波長赤外線センサーの研究開発と実証
- スターダスト計画(2021年~宇宙開発利用加速化戦略プログラム→宇宙戦略基金)
 - 内閣府が獲った資金を各省に配し、各省提案で研究開発・実証
- 宇宙戦略基金
 - 研究開発を強化すべく10年で1兆円のJAXA基金化を目指す
- 宇宙技術戦略の策定
 - 世界の技術の徹底的調査に基づき、強化する分野の選定、産業化強化

六月に第五次宇宙基本計画が策定され、私もこれまで計画の策定に携わってきましたが、ロケットあるいは衛星を確実に作ることに重点が置かれて新しいことにチャレンジしていかないの、技術的にはアメリカなどからは周回遅れになりつつあります。それから、官需が非常に大きく、民需が起こっていませんので、国が一投資したら、産業は一・一ぐらしか発展していません。民需、外需をもっと増やしていく必要があります。

防災も、宇宙というのは防災の役に立つと言いつつながら、なかなか本当には役に立っていません。この点も改善が必要です。防衛三文書は、防衛省が一昨年、改訂し、簡単に言えば宇宙をもっと使っていくとされています。今後、防衛、安全保障分野と宇宙との連携も重要となるでしょう。

それ以外にも幾つか活性化するための策が行われていて、一つは経済安全保障プログラムです。

非常に大事な技術開発、例えば光通信や、VDES (VHF Data Exchange System)、多波長赤外線センサーといったものにお金をつけて、数年かけて世界と勝負できる技術を作っていくこうとするものです。

宇宙戦略基金はJAXA基金ともいい、一〇年間で一兆円規模となります。これを活用し、JAXAの人ではなくて、民間企業や大学がどんどん新しい技術開発をすることも想定されています。世界の中で技術開発の力が一周遅れぐらいになってきたことに対応するために、このような策がとられています。

また、どの技術を伸ばすべきか、という検討は、そういった委員会をしっかりと立ち上げて、日本の中のアカデミアの人たちなども巻き込んで、この分野が今大事だ、やるべきだということを通じて定していくための宇宙技術戦略を去年から作って

います。この中で、日本が遅れているところ、まだまだ頑張れば対応できるところが大分見えてきました。これをしっかりとやっていくために、この技術戦略はずっと改定し続けていきます。

二、世界における宇宙開発利用の大変革

今、世界の宇宙開発利用の現場で起きている二つの大きなゲームチェンジがあります(図表3)。

一つ目は、小型衛星コンステレーション(衛星群)が出てきたことです。小さな衛星を一機ではなくたくさん打ち上げて、頻繁にサービスを提供するものです。

二つ目は、ベンチャー企業の研究開発が活発化していることです。彼らは自分たちで資金を集め、技術を向上させています。そうすると、政府

図表3

世界の宇宙開発利用における 2つの大きなゲームチェンジ

宇宙開発利用の現場で起きている2つの大きなゲームチェンジ

- ▶ 小型衛星コンステレーション（衛星群）による低価格化、データ量の飛躍的増大による新しい価値創造（通信、地球観測分野中心に）
- ▶ 国家機関主導による研究開発に加え、ベンチャー主導による研究開発が活発化（SpaceX社による有人宇宙船打上げ、CLSPなど）

<戦略面でのTrend>

- ・民生利用と防衛ニーズの連携による横通しの戦略と技術開発（米）
- ・拡大する通信ニーズへの官民一体となった戦略的な技術開発と実証（欧州）

<技術面でのTrend>

- ・Digitalization, Digital Transformation、ソフトウェアベースでの柔軟性確保
- ・技術進化のスピード加速、多品種少量生産への対応のためAgile開発
- ・大量生産技術（OneWeb:800、Starlink:12000、Planet:200、Spire:50など）

が研究開発資金を投資するのではなく、出来上がった技術あるいはサービスを購入する、サービス調達というシステムがアメリカを中心に登場しています。

これは、政府にとっては、全てのお金を投資しなくても、民間が自分たちで頑張ってくれるので投資額が少なく済み、楽です。民間側としては、政府がお客になってくれますから定常的な収益が上がるると同時に、信頼度が上がるといふ利点があります。この流れに日本もどう乗り込んでいくかということが大きな鍵だと思います。

技術的に大事なことは、地上でも同じですが、デジタルトランスフォーメーションです。特に宇宙においては、打ち上げた衛星をそのまま最後まで使うのではなく、地上の技術進歩に合わせてどんどん進化させていかなければいけません。ソフトウェア・デファインド・サテライトのような固

有の概念を作って、衛星をソフトウェアで進化させる、これもデジタルトランスフォーメーションの一つです。それから、開発をよりアジャイルにする。世の中の変化に合わせて必要なものを作っていくことも大事なテーマです。

さらに、大量生産です。これまで、衛星の打ち上げは何年に一機、あるいは一年に一機程度だったものが、スペースX社が運用している衛星インターネットサービスのスターリンクは、トータルで一万二〇〇〇機から四万二〇〇〇機打ち上げると言っています。この実現のためには、大量の打ち上げに対応したシステムエンジニアリングが必要で、技術面での新しいトレンドに、日本も対応していかなければいけません。

官から民への動きの典型的な例は、Crew Dragon というスペースX社が提供するビークルです。これまでNASAの専売特許だった宇宙飛行

士を運ぶ仕事も民間が担うようになりました。政府やNASAはお金を払って運んでもらうようになり、日本の宇宙飛行士も乗っています。ビークルの中は小さなボタンや配線が散漫としているようなことはなく、シンプルかつゴージャスであり、洗練されていたと言っていました。なぜかという、スペースX社は、将来これを宇宙旅行に使うことを計画しているのです。非常に洗練されたビークルで、かつ信頼性も高く、宇宙へ行って帰ってきました。

官民の役割が、いわゆるサービス調達になってきたことの一つの例として、アメリカのDOD（国防総省）やNRO（国家偵察局）が民間と組んで、大きなお金を数年にわたって継続して与えることによって、アンカーテナンシーを実現していることが挙げられます。特にロシアのウクライナへの軍事侵攻を受けてNROがリモートセンシ

ング三社、うち二社がベンチャーですが、一〇年間で総額五〇〇億円の契約をしています。一社当たり一年で一五〇億円〜二〇〇億円ほどの規模ですから、企業としては大変心強く、また、さらに投資が進む材料にもなっています。

このようなアメリカと日本はどうやって対抗していくのか、日本のベンチャーをどうやって支援していくのかは、大きな課題になっています。

世界における宇宙産業をフェーズごとに見ると、第一世代（〜第二次世界大戦）は、ある種、趣味や研究でやっていた世代です。第二世代（〜一九五〇年代）は、特にロケットはとても大事だということ、政府がてこ入れをしてNASAのような政府機関が中心になっていった時代です。その次の第三世代になると、民間が成長してきたので、国が民間にお金を出して、ロケットや衛星を作ってもらい、それを政府が使うようになりま

した。これが今、世界中で行われているやり方です。そして、アメリカはもう第四世代にきていて、民間が民間の投資で開発・運用を行い、政府がそのサービスを購入しています。このサイクルの有効活用によって、官民ともにウイン・ウインの関係を作ろうとしています。日本はまだ第三世代ですが、どうやって第三世代と第四世代をベストミックスしていくかということが、今、政府の中でも大きな課題になっていて、少しずつ第四世代に向けた施策も打たれています。

大きなゲームチェンジの二点目は小型衛星コンステレーションです。ここでは、どれぐらいの数の衛星を打ち上げてビジネスをしようとしているかがポイントになります。スペースX社はスターリンクという宇宙空間にインターネット網を作ろうというプロジェクトがスタートしていて、もう六〇〇機打ち上げています。最終目標が一万二

〇〇〇機と想っていたら、この間、さらに三万機を登録して、四万二〇〇〇機を目指しているとのことです。これぐらいの数がないと、常に地上局から衛星が見えていて、二四時間のサービス提供ができません。

プラネット社は、3Uサイズという、一〇cm×一〇cm×三〇cmで五kgぐらいの小さな衛星を使って地球観測をするビジネスを進めています。こちらは一機だけでは二〇日に一回ぐらいしか見られないですが、たくさん打ち上げることで五時間一回ぐらいは見えています。このデータが世界中に売られています。

スパイア・グローバル社はGPS掩蔽観測により、気象事業を展開しています。大気中を通過するGPS電波は少し曲がって距離が伸びるため、時間がわずかにずれます。このずれを調べることで大気中の水蒸気の量が分かります。今はたくさ

んのGPS衛星が打ち上がっていますから、この電波を使えば、地球上の三次元空間の水蒸気量の分布が分かります。雲になる前だと気象衛星「ひまわり」では見えないものの、水蒸気の密度が高くなると、急に雨雲が発達してゲリラ豪雨をもたらすこともあるので、水蒸気の分布情報はとても大事なのです。同社は、このようなデータをNOAA（アメリカ海洋大気庁）などに販売しています。

プラネット社はSkySatとこう地球観測衛星を運用しています。サイズは少し大きく一二〇kg程度で、二〇一三年に打ち上げた一号機の分解能は八六cmほどでしたが、今は五〇cmまで高分解能化されています。将来的にはこれを三〇cmにするそうです。既に五〇cm分解能の衛星が二機打ち上がっていて、頻繁に世界各地の様子を見られるので、ウクライナへの軍事侵攻で一番使われた衛星

とも言われています。DODも、民間がたくさん打ち上げる衛星に非常に期待しているようです。

振り返って日本は、安全保障でそこまで多くの衛星が必要になってはいませんが、防災の観点からは衛星が重要となります。防災科学技術研究所の話では、「発災後一二時間で危ない地域全体の写真を撮ってくれ。どこに人を送り込めばいいか、それを見て決めたい」ということで、一二時間というのが一つのスレッシユホールドなのです。この後は、危ないところがわかれば、そこを継続して監視する。これは六時間間隔ぐらいで見たい。ただ、非常にローカルにここだけ見たくれというのが言えるという状況です。

これに対応できる日本の衛星は、ALOS-2があります。今度はALOS-4が打ち上がりますが、いずれも非常に広い幅で観測できるのでとても役に立つ衛星であるものの、一機だけだと一二時間に

一回、場所によっては三六時間に一回ぐらいしか観測できず、発災後一二時間を確実にできるとは言えません。

ですから、この衛星だけでなく、民間の小型衛星のコンステレーションを進めようという会社が出てきたので、この衛星もあわせて使っていくことがとても大切です。逆に言えば、民間の小型コンステレーションを研究する会社は、政府の防災ニーズをお客にすることができるとはならないということです。

安全保障の世界では、アメリカはPWSA (Proliferated Warfighter Space Architecture) というコンセプトです。一〇〇〇機を超える衛星を打ち上げて、ハイパーソニック・グライド・ビークル、超音速でマニューバーしながらターゲットに向かって飛んでいくミサイルを監視しなければいけません。そのために、高精度で見られる低高度

な衛星、広域を見られる高い高度の衛星で監視したデータを、通信衛星網の衛星のどれかに送れば、あとは衛星間の通信でバケツリレーで送信され、地上局の上に来る衛星から地上にすぐダウンロードできます。つまり、データをとったら遅滞なく地上に送ることも大事なので、そういうファンクションを担うために大量の小さな衛星を打ち上げるべく、既に開発をスタートさせている状況です。

日本におけるコンステレーションの会社は、今、三社あります。一つは光学カメラで地球を見るアクセルスペース社、私の研究室発のベンチャーです。分解能は二・五mで、いずれは一mを切ろうと頑張っています。シンスペクティブ社とQPS研究所は、合成開口レーダで地球を二四時間見られる衛星を扱っています。

これらは実はまだ三〜四機しか上がっていない

て、全然数が足りていません。その理由は、政府の中でアンカーテナンシーをしてくれるところになかったのです。これを今後どうしていくかということが、大きな課題です。

New Space (宇宙スタートアップ) と安全保障業界の関係としては、時間分解能、つまり頻繁に観測をするためには、衛星の数が三〇〜四〇機は当たり前で、二〇〇機ぐらい打ち上げる必要があります。しかし、コストの面で、大きな衛星をそれだけ打ち上げることは無理であるため、小型・超小型衛星のコンステレーションにせざるを得ません。そうすると、やはりベンチャーが担い手になるわけですが、「ベンチャーの衛星は分解能がまだまだ一mに達していない。衛星の機数も少ないから、我々が必要なスペックを全然満たしていない」と安全保障業界から指摘されます。ベンチャー側は、「安全保障業界から、こういうス

ペックで作ったらくさん買うよと言ってくれないから、なかなか機数を増やすことができない。

一生懸命、民間の需要を集めて何とかスペックを作って打ち上げようとするから、どうしても数がたくさんは出てこない」ということになってしまっています。つまり、お互い立ち会いの見合いをしている状態で、どちらも動かないのです。

ベンチャー側は、日本の場合には民間の投資が少ないので、自分たち民間の投資だけで大きなことはできないから、できれば安全保障業界から、ベンチャーを育てるというマインドでそういうことを言っただけだと思いますが、それが起こっていません。

これがアメリカとの大きな違いです。アメリカはベンチャーを育てる風潮がありますから、様々なスタートアップ企業はみんなアメリカに行っていて、アンカーテナンシーを獲得しようとしています。

す。下手をすると、日本のこういったベンチャー企業もアメリカに行ってしまうかもしれません。

この点は、政府として何らかの施策が必要だと思います。

また、衛星を多く打ち上げることの大きなメリットは、繰り返し回数が増えること（図表4）。技術の向上度を式にすると、 $(1+a)^N$ と言えます。aは、一回の打ち上げでどれだけ技術や信頼度が上がるかで、Nはその回数です。我々は衛星を作っているからわかりますが、aが大きいと、とてもしんどいのです。「前の衛星の二倍の性能を出してくれ」と、一気に二倍と言われると、その衛星がきちんと動くかどうかを確実にものにするために冗長系をたくさん組み、複雑になっていきます。当然、試験の回数も増え、人手もかかり、結果、衛星の開発コストが増加、あるいは時間が伸びて衛星の打ち上げの機数が減り

図表4

「多数」のメリット：開発スピードの加速効果

- 世界の開発スピードに遅れないためには、技術実証と結果のフィードバックを、早いサイクルで繰り返していくことが必要。

$$\text{技術の向上度} = (1 + a)^N$$

1回の実証の技術向上度


実証の頻度

Nの向上がスピードアップの鍵
(指数関数的な向上)

- スペースXが、創業から20年弱で有人ロケットまで到達した理由の一つに、失敗をおそれず、実際に造って試すことを重視したことが挙げられる。

<ギャレット・リースマン氏のインタビュー（スペースX顧問、元NASA宇宙飛行士）>

- ✓スペースXでは、机上で何年も考え込んで素晴らしい設計図を描くことよりも、実際に造って試してみ、描いた設計図が本当に機能するかどうかを試すことを優先。
- ✓設計の問題点をすべて修正し、また実際に試してみると、今度は別の問題が見える。これをスピーディーに繰り返すことで、どんどん成功に近づいていく。失敗を早く重ねることこそが、短期間で高い技術力を身につけられた一歩の要因。
- ✓コストも、実際にやってみて失敗したほうが安くつく場合が多い。失敗を恐れて実験をしなければ、もっと長い年月がかかる。高給で優秀な技術者を長期間、雇い続けなければならない。



2020.12.5(5)試験で機体するスターシップ（ロイター）

日経新聞のインタビュー記事（2020.12.29）を要約
<https://www.nikkei.com/article/DGXZQ9K248FPOU0A221C200000/>

“If things are not failing, you are not innovating enough”
「失敗していないとすれば、イノベーションを起こしていないということだ」（イーロン・マスク）

ます。Nは機数、あるいは頻度とも言えます。このNが下がってしまうのが、日本のこれまでの宇宙開発です。

一方、アメリカは今、何をやっているのでしょうか。特にスターリンクは、もう六〇〇機打ち上げています。毎回六〇機ほど打ち上げることを、一〇〇回以上繰り返しています。当然、故障も多く発生していますが、その故障をフィードバックして、どんどん故障しない衛星に改良していきます。Nが大きいと、相当な速さで技術が伸びていくことがわかります。

実は、日本は、これまでこういったことをやってきました。例えば、トヨタのカイゼン方式は、現場の人をはじめとして、いろいろな人が改善のアイデアを出して、実験を多く行い、次々に改善を行っており、こういったことを経て世界に冠たる車が登場しました。今は日本が得意であったも

図表5

如何にN(繰り返し数)を増やすか？

- 1企業の中で、衛星開発数を増やす(Starlink方式)
 - コンステや標準バス化により「同一」「同型」の衛星を多数開発
- 企業連合を作り、衛星開発企業をサイズごとに1社に絞る(専門企業化戦略)
 - 3から12Uサイズ、100kg弱、200-300kgのサイズごとのバス開発メーカーを作る
 - 他企業はそれを購入し、ミッション系開発と利用・ビジネスに注力できる
- 宇宙に打ち上げないでも「疑似」実証を増やす方法は？(模擬実証方式)
 - 地上での宇宙環境を模擬したデジタルツインにより、コンピュータ内で衛星開発を繰り返す中で衛星を洗練化
 - モデル化難しいところだけ、地上でのハードウェア試験を実施
 - 「こんな地球観測画像がこの頻度で撮れるけどどうですか？」のユーザー評価までフィードバックする
 - このようなデジタルツインを総力をあげて日本で一つ作ってはどうか？

のをアメリカにやられてしまっている状況です。

これは非常に残念なことで、何とか日本の中でNを増やす方法を考えていかなければいけません。

ですが、これはなかなか難しい問題です。政府のお金で作る衛星は失敗したらまずいと思ってしまうからです。民間もそれほど大きな投資額がないから、Nをそこまで増やすことはできない、スペースX社のようににはできないのです。

解決策として、完全ではないものの三つぐらい方法が考えられます(図表5)。一つ目は、課題はあっても一社の中でたくさん衛星を受注して、数を増やしていくスターリンク方式です。

二つ目は、企業連合を作り、同じサイズの衛星を作る企業は1社に絞ることです。その会社がいろいろな会社の衛星を作り、その衛星を使ってビジネスをしていけば良いのですから、必ずしも皆がばらばらに衛星を作る必要はないだろうという

考え方です。

三つ目はすごく大事かと思いますが、デジタルツインという、地上で非常に高精度なシミュレーションを作って、この中で打ち上げ実験をしてみようという手法です。実際に打ち上げることがなくても、シミュレーションの中でどんどん打ち上げることで、衛星がどのように動作するか、どういう画像が撮れて、お客さんはこれで満足するかどうかを検証します。コンピュータの中で出来れば、費用は大きく抑えることができます。

こういった形式を整えて、皆が乗り込んで各々自分たちのコンセプトを実証する。何度か試行し、良いコンセプトになったら、初めて衛星を作り始めれば良い。このような模擬実証方式をやっているってどうかということ、今いろいろなところにお声がけしています。アメリカのように繰り返し回数が得られないなら、いっそのことやっ

てみたらどうかという考えです。

加えて、海外展開も重要です。日本国内では、通信・放送のインフラは出来てしまっていますし、国土面積が小さいので、地球観測の画像と見に行つたほうが早いと言われてしまうのです。ですので、やはり海外へ行かなければなりません。海外には、例えばアフリカのように、地上インフラが確立しきっていない国があります。そのような国では、通信・放送で教育をするとか、自分の国の土地がどのように使われているのか知りたいと必ず政府は思うので、どんどん売り込んでいっただらどうかということを常に考えています。

でも、日本人はなかなかそれができません。それは、英語力が不足しているだけではなく、交渉力や人的ネットワークの問題です。新興国へ行く人も減っているので、日本は弱体化しています。

これらの課題をもう一度、政府中心に掘り起こして、これから伸びていく国々に地上インフラとして宇宙を売っていったらどうかと思います。僕は大学の中で UNISEC-GLOBAL という組織を作って、日本が兄貴分になって、今は七〇カ国参加していますが、いろいろな国に宇宙の授業をしています。こういう活動も有効活用できると思います。

三、宇宙産業の拡大とベンチャー企業の登場

アメリカでは、ロケットのコストが低下しつつあります。スペースX社は、現状のコストの二〇分の一〜四〇分の一を目指していて、四〇分の一程度になると、衛星の作り方が変わるぐらい大きな変革が起こると思います。また、二〇二一年、

アメリカでは三社が宇宙旅行に成功しました。これは実験ではなくビジネスに成功したということ、これから宇宙旅行が増えていくだろうと思います。

国内のベンチャーは、先ほど申し上げたアクセルスペース社、シンスペクティブ社、QPS研究所のほかに、宇宙のごみを掃除するアストロスケール社があります。同社は今年六月五日に上場し、社長の岡田君は東大農学部を卒業して大蔵省出身という経歴です。アメリカのベンチャーの立ち上げなどにも関わった後、日本に帰ってきて宇宙のベンチャーを手掛け、世界で手本になるような活動を行っています。スペースデブリを掃除するというのは、世界の中でまだルール化されていないので、今の状態だと市場がありません。ですので、ごみを掃除することをルール化しましょうと、世界中に呼びかけています。そうすると自分

たちのビジネスが広がるわけです。昨年五月に開催された広島サミットでも、それぞれの国が認めたコミュニケーションの中にデブリ除去に関する記述が含まれています。これも、彼が頑張つて動いたからです。技術だけでなく、そういう活動をする日本人はなかなか現れませんが、本当にすばらしい活動をしていると思います。

宇宙ロボットを開発しているGITA社は、日本だとビジネスができない、お客もいないというところで、アメリカに乗り込んで、アメリカの政府やNASAなどを相手にしています。非常に高い技術力があるので、彼らはビジネスをすることができています。

インフォステラ社は、貸し地上局ビジネスを展開しています。衛星と通信する地上局の稼働率は一日のうち一時間ぐらいしかないので、残りの時間、地上局アンテナを他の企業あるいは大学の

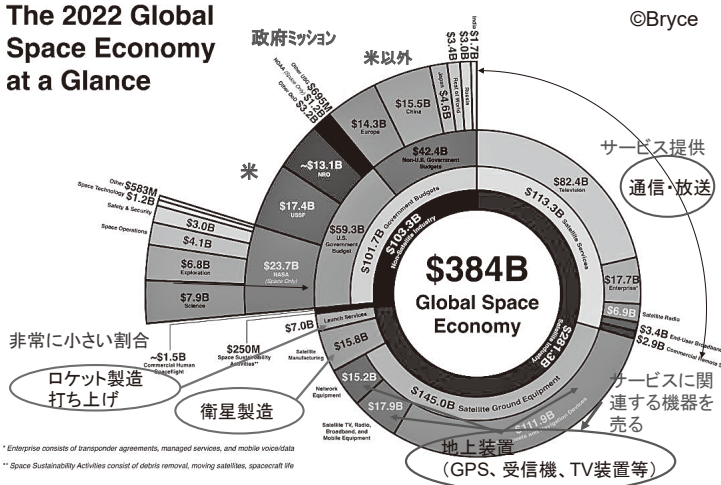
などが行う宇宙衛星の運用とシェアリングするという、非常にもしろい活動をしています。

スタートアッププレイヤーは、去年の暮れで九八社、それからさらに増えて一〇〇社になって、宇宙データ、衛星インフラ、宇宙旅行、輸送、軌道上サービス、探査、こういった様々な分野に広がっています。投資額も、二〇二三年の年末までいくと三〇〇億円を超えています。三〇〇〜四〇〇億円ぐらいの投資が毎年行われていて、IPOをしたのが三社です。今後、他にも上場するかも知れません。

世界の宇宙産業規模は、二〇二二年でおおよそ五〇兆円です（図表6）。五〇兆円というと、一つの産業規模としてはまだまだ大きくありません。ただ、これから増えていくだろうという期待感が非常にあります。官需では、アメリカが七割ぐらいを占めています。民需では、ロケットや衛星は

図表6

世界の宇宙産業規模 50兆円(2022年当時)



実は規模が大きくなり、ロケット製造、衛星製造を入れても全体の一〇%に届きません。企業の方などが「ここをやりたいから教えてくれ」とご相談に來られますが、「こんな小さいところに乗り出すんですか」とお話しすることがあります。今後大事なことは、サービスや、サービスに関連する機器を売る産業を増やすことです。ここが増えないと、衛星製造の発注につながらず、衛星製造が増えないとロケットも増えません。

さらに、その他の新しいビジネスの動きもあります。例えば、宇宙に人が行くことになると、食が大事なので、食に関するもの。宇宙と行ったり来たりするビークルが出てきたら港が要るので、宇宙港というコンセプト。宇宙ホテルや、有人宇宙旅行の話もアメリカを中心に起こっています。

地上でも、長距離を極めて短い時間で人を運ばう、地球上の二地点間を最大でも二時間でつない

でいこうという構想が出てきました。これを宇宙の輸送と合わせてやっていくことを目指し、民間と文部科学省が一緒になって開発を行っています。

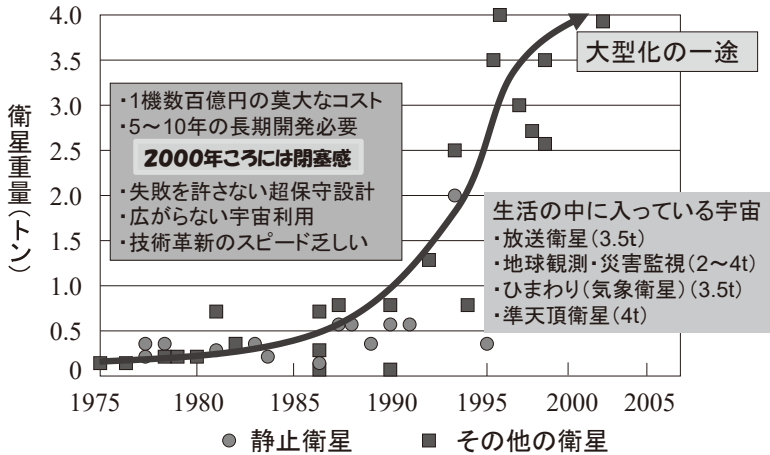
加えて、デブリ除去等のサービス、3Dプリンターを活用した軌道上での衛星製造、組み立て、さらには月周りのいろいろな計画がありますから、それに関連した多くのビジネスが起ころうとしています。今はまだ、月にたくさん人が行く状況ではありませんので、ビジネスを政府や民間に売るのは大分先ですが、それに向けて多くの企業が研究開発を行っています。安全保障関係でも、先ほどのデブリの監視をビジネスにしようと考えている企業も出てきたということで、数年前には想像できないほどに、ありとあらゆるビジネスが出てきました。宇宙を使ったエンターテインメントなども大事な産業になりつつあります。

今後の宇宙産業の世界的な市場規模に関して、二〇五〇年には一・八兆ドル程度になる可能性があるとの予想があります。このうち、ロケットや人工衛星といったプロパーの宇宙産業ではなく、宇宙と組み合わせることによって、それ以外の産業も規模が大きくなると考えられています。割合としては、今は一〇〜一五%ぐらいのものが、二〇五〇年になると五五%ぐらいになるということです。アイデア駆使して、非宇宙産業と宇宙をいかに結びつけるかが大事です。

非宇宙産業の巻き込みという点では、「宇宙との関連で〇〇がより売れる」のようなビジネスが考えられます。例えばGPSをつなぐことによって携帯電話がより売れる、精密農業の情報を提供することで農機具や肥料を売る、さらには衛星を活用して、より適切な作物の刈り入れ時期を検証し、ブランド化に繋げることも出来るかもしれま

図表7

中・大型衛星中心の宇宙開発の課題



せん。このように、他の産業に貢献する宇宙の使い方
をイネーブラーといいます。宇宙は主役になっ
てはいけない、裏方として陰で支えていく、
こういう考え方で非宇宙産業の規模が拡大する。
この世界を開拓することが、これからとても大事
になるだろうと思います。

四、「大学発」超小型衛星が 宇宙開発を変えた

これまでの宇宙開発は、中・大型衛星が中心で
した。しかし、衛星の機能を上げるために大きく
なることは仕方ないけれども、値段が高く、開発
に時間がかかる。そうすると、政府しか宇宙開発
に乗り出せないものの、数が少なく技術開発のス
ピードも遅いといった課題がありました(図表
7)。このような閉塞感がある中、何とかしなけ

ればいけないと世界中でいろいろな人が考え、二〇〇〇年ぐらいから、小さくて安い、早い衛星を作りましょうという超小型衛星の概念が出てきました。

最初は教育衛星が中心で、これが様々なニーズに使われるようになりました。大学やベンチャーが研究の担い手でしたが、大事だということで国も投資を始めたので、世界で大きな流れになったのです。ビジネスを手掛ける企業も増え、政府の施策も、中・大型衛星ではなく、何とかして小型衛星で世界と協力、競争していこうというのが一丁目一番地に今なりつつあるというのが、世界の状況です。

小型衛星は一〇〇～五〇〇kgまで、超小型衛星は一〇〇kg未満と分類されていますが、少しサイズを大きくした六〇〇kgまでの衛星が、二〇二二年には二四〇〇機打ち上がりました。二〇一九年

までの打ち上げは五〇〇機ぐらいだったものが、二四〇〇機になったのです。六〇〇kgよりも大きな衛星は大体一〇〇機ぐらいですから、トータル二五〇〇機ぐらいが打ち上がっていることになりました。この衛星の主力がスペースX社です。その他にも、イギリスのワンウェブ社も八〇〇機を目指していますので、衛星の打ち上げ数が拡大しています。

この中で、日本はどういう役割をしたかということ、二〇〇三年に、世界で初めての1kgの超小型衛星の打ち上げに成功しました。東京大学と東京工業大学が開発したものです。

値段は大体三〇〇万円ほどで、秋葉原で買った部品で作りました。宇宙開発に関する部品は高く、例えば宇宙ステーションの蛍光灯は一本一〇〇万円するそうです。なぜかというと、特別なラインでつくった蛍光灯で、絶対に壊れない。

壊れないということは、最初に作って打ち上げたら、予備を入れても一年に三〜四本作れば良いことになります。そうすると、工場の維持費を三か四で割った値段を一本当たりにチャージしないと、その工場はもたない。そういう考え方で値段が決まってきたので、値段が高くなってしまいません。しかし、もっと安くても宇宙で使える部品はあるので、それを見つけたらこっちのものです。

我々は秋葉原から部品を調達して、宇宙のいろいろな環境試験をして、使えるものを見つけてきました。そのおかげで、部品費だけなら三〇〇万円でした。普通、大きな衛星なら三〇〇億円、小さな衛星でも一〇〇億円ぐらいします。これが三〇〇万円できたというのは非常に大きな発見だったと思います。

さらに、部品には寿命について記載がありませんので、半年持てばいいかなと思いましたが、

我々が頑張って設計したので、実は二一年経った今でもまだ動いています。秋葉原で買ってきた部品でも、きちんと設計すればこの年月の間使えるということ、我々は示してきました。これが、世界中の超小型衛星の大きな発展の基礎になったと言えると思います。

宇宙空間は地上と同じ環境ではないので、いろいろな工夫をしなければいけません。真空であること、放射線があること、また、熱環境も極端です。例えば太陽の正面にアルミニウムを置くと四〇〇度を超え、地球の裏側に入ると放射冷却でマイナス七〇度になります。この温度変化をどう耐えるか考えなければなりません。さらに、打ち上げ時はロケット側から非常に激しい振動、加速度、衝撃などが発生しますから、これに耐えることも必要です。

秋葉原から調達する部品でこういった条件に耐

えられる衛星をどのように作るかというところ、まずは試験をすることです。たくさん買ってくると余計にお金がかかりますが、それでも少しお金が高くなるぐらいで、非常に高額となるものではありません。買ってきたものの中から試験をして、使える部品を見つけていくことがまず大事です。

二つ目は、システムで強くすることです。一個の部品が壊れたら、衛星が動かなくなるといってはダメです。人間の体は、手にけがをしても何とかでき、傷はやがて治ります。あるいは、右手が使えなくても左手で頑張れることもできます。衛星にもこういうシステムを目指して、工夫を山のように入れることによって、宇宙で生き残らせています。これには、設計技術がとても大事です。安い衛星であるからこそ技術を培ったことで、結果的に我々の最初の衛星は二一年間動いていると言えると思います。

我々の衛星は二〇〇三年六月三〇日にロシアから打ち上げました。このとき、この衛星に関わった人たちが、今、社会ですごく頑張っています。

例えば、ロケットから衛星を放出する機構をつくった人は、我々の研究室の准教授として頑張っている船瀬先生です。二〇一四年に世界初の五〇kgの超小型探査機の打ち上げ運用に成功しました。これも世界に大きなインパクトを与えました。この衛星を打ち上げるときにロシアに滞在して、ロシアから今の状況を伝えてくれた中村友哉君は、アクセルスペース社の社長になり、次々と衛星を作っています。これもやがて上場するのではないかと期待しているところです。

学生のプロジェクトマネージャーも二人いました。一人は津田雄一君。彼は「はやぶさ二」のプロジェクトマネージャーとして大活躍して有名になりました。もう一人、酒匂君は、キャノン電子

に入社しました。キヤノン電子は衛星を作ったことともなかったのですが、二〇一七年に打ち上げ運用に成功しました。当時、皆修士や博士の学生でした。頑張って作った衛星も元気にまだ動いていますが、彼らもその後、大変な活躍をしています。学生の間にごういった経験をするのが大事だと非常に強く示していただきました。特に中村友哉君は、衛星を打ち上げた後、衛星から送信された画像をいろいろな人に配信するサービスを始めました。これが非常に好評で、五〇〇〇人ぐらい登録がありました。実はこれが、彼が会社を作ったモチベーションになったと後で言ってくれました。

この後、我々はだんだん大きめの衛星を作ってきて、二〇〇三年に教育・実験衛星からスタートして、宇宙科学に挑戦して天文台と一緒に作った「Nano-JASMINE」、いろいろな地球観測に挑戦

した「ほどよし」一、三、四、それから、いくつかの技術を試す技術実証を行った「TORICOM-IR、AQT-D」などがあります。

衛星の開発を進めると、海外から、「衛星を作りたいので教えてくれ」という声が届くようになります。全ては対応できませんが、「MicroDragon」をベトナムと、「RWASAT-1」をルワンダとそれぞれ一緒に作り、二〇一九年に打ち上げました。最近は宇宙探査に挑戦して、「PROCYON」を二〇一四年に打ち上げ、二〇二二年には「EQUULEUS」をアメリカのNASAのロケット、アルテミスIで打ち上げていただきました。さらに、去年の一月にはソニー社と一緒に小さな衛星を作って打ち上げました。ソニー社は、お客さんに、撮りたいところの写真を撮らせてあげるサービスを提供したいということで衛星を打ち上げて、今もこのサービスを継続しています。我々

はこれまで、一五機の衛星を打ち上げました。ベンチャーも幾つか立ち上げて、いろいろな賞を受賞するなど頑張ってきました。ここで育った学生が外へ出て一生懸命活躍してくれているというのはうれしい限りです。

衛星の値段は大体どれぐらいなのか、知りたい方は多いと思います。我々が得意なのは、世界で初めての衛星が1U（縦10cm×横10cm×高さ10cm、1kg程度）からスタートして、その後、50kgの衛星に挑戦しました。それが、先ほどご紹介したほどよし衛星です。これはとても使い勝手のいい衛星で、そこそこ分解能の高い地球観測の画像もでき、そこそ良い宇宙科学もできるのです。製作費は二〜五億円、打ち上げ費は一億円超で、開発期間は二年ほどです。

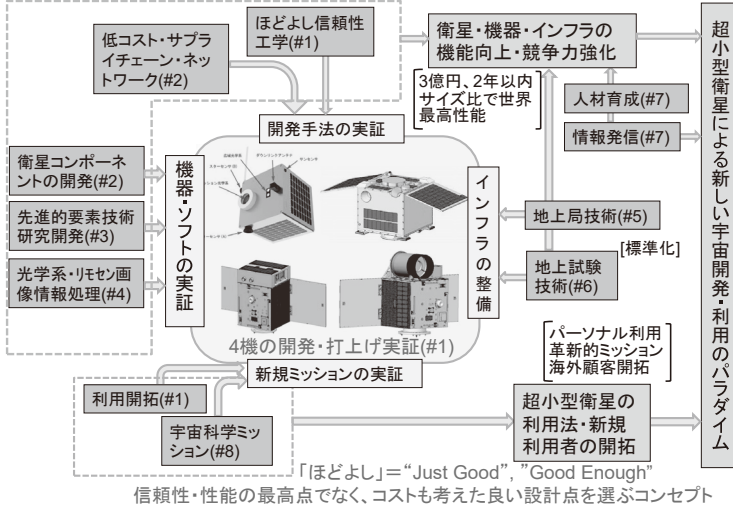
さらに、最近、6U（縦10cm×横20cm×高さ30cm、10kg程度）という少し小さめの衛星

に移ってきました。技術が進歩してきて、これぐらいでも十分な地球観測や宇宙科学ができるようになっていきます。値段は、製作費が5000万円、打ち上げ費が3000万円超、開発期間は一年半くらいです。今、我々はこういった衛星を主力としています。

二〇一〇年から、内閣府から50億円という非常に大きなお金をいただきました。この資金を使って、私がリーダーとなり、日本の一二大学、一七〇社ぐらいの中小企業と組んで、ほどよしプロジェクトを進めました（図表8）。これは、50kgクラスの超小型衛星で、いろいろな宇宙開発利用のインフラを作っていきますというプロジェクトです。プロジェクトでは、衛星を四機開発したほか、地上局や試験設備といったインフラを整備しました。このクラスの衛星の様々なコンポーネントは日本にはほとんどなかったのです

図表8

ほどよしプロジェクト(2010-2014)の全体像



が、これ以降、日本のどこかの企業は作って
 いるという状況になっています。

JAXAや政府の衛星は too much なのです。
 これは政府の衛星だからやむを得ないですが、
 信頼度もすごく高くて、その結果、とても高く
 開発に時間がかかる。そんな衛星を作ってい
 ら、ビジネスにもならないし、大学にできるわ
 けがないということ、もう少し、いいところに設
 計の目標点、信頼性、あるいは性能の目標点を置
 いて、コストパフォーマンスの良い衛星を作りま
 しょうというのが、本プロジェクトのコンセプト
 です。これを一つのキーワードとして、我々は開
 発を続けました。いろいろな企業と組んだ成果が
 今も残っていて、この中からベンチャーが立ち上
 ったり、あるいは企業が作った衛星機器を非常
 に安く購入することができる状況が続いていま
 す。

衛星を作るときには、机の上に並べた衛星を学生がワイヤーでつないで性能試験をします。これをテールサットといいます。ここでうまく動いたら、衛星インテグレーションといって、構体の中に詰め込んでいきます。それが終わると、直ぐに打ち上げるのではなく、宇宙の環境試験をします。放射線、熱真空、振動試験、いろいろなことをやらなければいけません。ほどよしプロジェクトでは、三億円以下、二年以内の開発を目標として行っており、結果的に成功しました。当時としては非常に競争力のあるスペックだったと思います。

打ち上げは、ロシアから行いました。二〇一四年、クリミア紛争の最中ですが、ウクライナのロケットがロシアへ送られ、ロシアから打ち上げる便に乗ろうということで、ドニエプルロケットに載せるために、Yasny (ヤンスイ) というロシア

の基地へ持っていきました。ロケットが上がるの、だろうかと本当は最後まで不安だったのですが、予定どおり打ち上げが行われました。

打ち上がった後は、一日大体四回、東京の上空を一〇分程度通過するので、一〇分×四回の間、衛星からの電波を受けて、衛星の現在の状況を知るとともに、衛星に命令を送り、次はこの写真を撮りなさいというやりとりをしました。実際に収集した写真のうち、例えばブラジルの写真からは、煙のようなものが出ていました。これは、本当に煙が出ていて自然災害、あるいは焼き畑だったかもしれません。こういった災害を見つけるのに、例えば二〇日に一回撮影をしている話にはなりません。頻繁に見つけるためには、ある程度のスペックを持った衛星を多く打ち上げる必要があります。また、千葉県を撮影した写真は、分解能が六mと良く、田畑が一枚単位で見られる程度に

綺麗です。これを毎日見ていれば、水が足りないとか、病虫害が発生していることが分かるほか、収穫高の予測もできたりします。山間部では、土砂崩れや道路の状況がわかりますから、災害監視、あるいは農林水産業の把握にも使えます。これも大事なことは、毎日観測できるようにたくさん衛星を打ち上げることです。およそ一五機あれば毎日観測することができます。今、台湾と一緒に次の衛星、「LONGLAISAT」を開発しています。これも6Uサイズです。台湾が作った特殊なカメラを登載して、我々がそれ以外の部分を全部作り、非常に小さなカメラですが二・六mぐらいの分解能の高い写真が撮れます。これはもうでき上がってシップメントしました。今、海外のロケット会社へ送られて、やがて打ち上がる予定です。

宇宙開発で大切なことは教育です。我々大学で

は、なかなかこういった衛星開発をはじめから行うことは難しいので、Cansatというジュース缶サイズの衛星を教育目的で作っています。ジュース缶ほどの衛星を五〜六人のチームで半年ぐらいかけて作り、アメリカの砂漠で打ち上げるという実験です。毎年行っていて、衛星作りだけではなくプロジェクトマネジメントのとてもよい勉強になっています。

この活動は、一九九九年、私がスタンフォード大学に在籍していた時に、現地のアマチュアロケットグループに何とか我々のCESPがある高度まで打ち上げてくださいたいとお願いして始めました。年ごとに参加大学が増えています。もちろん失敗も多く、失敗率は五〇%程度です。ですが、これがとても大事で、失敗の中で学生が学んでいくというプロセスを実現することができています。

図表9

CanSat・超小型衛星の教育的意義

- 宇宙開発プロセスの実践的教育・工学教育：
 - 学生が衛星プロジェクトのすべて(ミッションの構想、シナリオ、設計、製作、試験、打ち上げ、運用)を経験する
 - 何が重要かを肌で知る！
 - 何もないところから、アイデアを起こし、システムおよびその利用につなげるプロセスの重要性
 - 作ったものの現実世界からのフィードバックを得る(宇宙ではこれまで難しかった！)
- 学生によるマネジメント：
 - プロジェクトマネージャー、実験主任は学生が行いマネジメントやチームワーク等の経験を得る
 - 4つの管理:時間、人間、コスト、そしてもう一つは？
 - 効果的な会議、ドキュメンテーションの試行錯誤的習得

CanSat や超小型衛星は、教育的な意義が大きいと考えています(図表9)。なぜかというところ、学生は宇宙開発のプロセスを短期間に全て勉強することができるからです。それから、幾つかのマネジメントも勉強することができます。

具体的には、四点大事な項目があります。一つは人の管理、人を適材適所に割り当てることです。二つ目は時間の管理、打ち上げまでに完成させなければなりません。三つ目は予算の管理です。そして、最後はリスクマネジメントです。

例えば、とてもいいCanSatを作ったけれども、前の日に不注意で落として壊してしまったらどうでしょうか。二〇〇点のCanSatが一〇〇点にとどまらず、動かなければ〇点になってしまいます。だから、何とか一〇〇点、あるいは八〇点で留めるためには何をすべきか、学生は痛い思いをしながら勉強することができます。

こういう失敗は、机の上で幾ら「気をつけなさい」とか「しっかり考えなさい」と言ってもダメなのです。実際に失敗をして学んでいく。だからこそ、この失敗を小さなプロジェクトの中で経験することが大事です。例えばJAXAの三〇〇億円のプロジェクトに初心者加わり、経験が無いために不注意で三〇〇億円の衛星が壊れてしまったとしましょう。そうすると、「三〇〇億円は痛いけれども、僕にとっては大きな勉強になった」と、その人が言ったとしても、三〇〇億円の規模ではきついものがあります。一方、CanSatは、一機作るのに一〇〜二〇万円ぐらいなので、失敗したとしても、まだ許容範囲と言えます。ですから、小さいときにちゃんと失敗しておくことが大事なのです。こういったことが、今の宇宙開発ではなかなかできていないので、我々大学を中心に教育的な活動も行っています。

これまでご紹介したように、我々が様々な衛星を開発する中で培ってきた技術は、我々だけに持っていては仕方がないので、ベンチャー会社にトランスファーしています。ベンチャー会社がこの技術を使ってビジネスをする、あるいはファンドからお金を集める。そのお金の一部が大学に戻ってくると、我々は次のフェーズの研究開発ができます。政府の資金は、大体四〜五年ぐらいで終わってしまいます。そうすると、雇っていた人をどうするのかなどの問題がありますが、それらは自分たちで解決しなければなりません。そのよな時のために、企業と組むことが大事で、これを我々はエコシステムと呼んでいます。現在、二〇社を超える企業とエコシステムを作っています。

その例がアクセルスペース社です。これは我々の研究室発のベンチャー会社ですが、こういった

衛星を作って、やがて一五機にしようと計画しています。また、シンスペクティブ社とも非常に密に連携していて、我々が衛星のバス（基本部分）を作りました。これが今、四機打ち上がってビジネスがスタートしていて、ここもやがて上場するのではないかと期待しているところです。アークエッジ・スペース社は、数年前に我々のドクターの学生八名が立ち上げた一番若い会社です。6Uサイズの小さな衛星を作って、政府からも多く発注を受けて活動しています。

今、小さな衛星は、政府の中でもトッププライオリティーになっています。お金はものすごくつくけれども、残念ながら人が追い付いていないので、少ない人数の中でいかに政府からたくさん来る受注に対応していくかということに、四苦八苦しているところですが、この機会に技術を伸ばしていきたいと思っています。

衛星の大事な使い方は、地上からの情報を集めることです。地上には、センサーをたくさん置きます。例えば水位センサーです。しかし、水位が増えてきたら警告を発するセンサーを置いて、通信網がなければ、センサーの近くに行かなければなりません。当然、洪水のときは危ないですし、広い世界だとしても時間がかかるので、センサーに送信機をつけて、送信機が電波を宇宙に送り、衛星がセンサーの上を通過するときに集めて回っています。これをStore&Forwardとって、我々はその技術を作ってきました。二〇一八年には「TRICOM-IR」という3kgの衛星で、八ミリワットという地上の非常に弱い電波を軌道上で受け取ることも成功しています。こういったものをルワンダなどにも売り込み、ルワンダと組んで彼らの最初の衛星「RWASAT-1」を作りました。ルワンダのように地上インフラの無いところ

ろで、通信衛星の代わりとしてこういった衛星を使ってくださいということで、今アフリカを中心に展開しているところです。

また、大学の活動をサポートする組織として、二〇〇二年に UNISEC を立ち上げました。とても良い働きをして、日本の大学の中では全部で六〇機以上の大学衛星が作られました。様々なリーガルのサポートや共同開発あるいは共同実験などを行っています。そして、このコンセプトを世界に広げようというのが UNISEC-GLOBAL です。いろいろな国に、日本の UNISEC のような組織をつくってはどうかということでも広げたら、あつという間に七〇カ国が手を挙げてくれました。日本は今、議長国になっています。ずっと私が委員長をやっていて、日本が兄貴分を持っている。こういう組織は宇宙の世界ではなかなかありませんので、日本が大学連携を中心にいろいろな

国を引っ張って活動してほしいと思います。

最後に、超小型衛星の重要な役割を振り返ります。本日お話ししたとおり、我々が超小型衛星の開発を行ったことによって、敷居が下がりました。そして、いろいろな人が宇宙に乗り出してきました。こういった世界を作ることが超小型衛星の役割ということで、キーワードは「宇宙で何かをやらうと考える人の数を一〇〇倍にする」です。

それから、宇宙開発利用は人材育成の格好の場です。失敗も含めて学生にとつてとても良い問題解決の鍛錬の場であると考えています。また、産業化するチャンスが増えています。さらには、国際的な宇宙コミュニティを今作っているので、世界連携の中で日本がリーダーシップを発揮していきたいと思うところでございます。

御存知のとおり、一九六九年にアポロ一一号が

月面に着陸しました。私が今、宇宙開発に携わっ

ている理由でもあります。これに先立ち数年前に打ち上がったアポロ八号は、初めて月の裏側を通って地球の写真を撮影しました。真つ黒な宇宙の中に浮かぶ極めて美しい地球です。地球を大事にしようというメッセージを世界中に出してくれました。哲学的には、これがアポロ計画の最大の成果だとも言われています。皆さん、宇宙に御興味がありましたら、ぜひお声がけいただきたいと思うところでございます。地球を大事にしようというメッセージをもって、講演を終わりにしたいと思えます。どうもありがとうございます。

○森本理事長 中須賀先生、宇宙に関する話を広範かつわかりやすく我々に御説明いただきまして大変ありがとうございます。それでは、質問を

お受けしたいと思えます。

○質問者A 今日には本当にありがとうございます。ひとつの研究室からこれだけのビジネスや有用な人材が出ているというのは、A Iの松尾先生の研究室と、中須賀先生くらいではないでしょうか。お話にありましたように、五〇億円でこれだけのプロジェクトを行い、成果を上げたことは大変立派なことと感じました。

予算の面からは、各国でも防衛関係で資金を投入しているかと思えます。古い考えの方も多いのでなかなか難しいと思えますすけれども、そこでやっていくとかなり発展するような気がするのですが、どういう手段があるとお考えでしょうか。

○中須賀 今、政府の中でも防衛三文書に宇宙を利用すると書き込まれました。その中で、防衛省としても宇宙を使わなければならぬと、非常に危機感を持っています。ところが、宇宙というの

はこれまで使ったことがありません。ですので、ベンチャー会社などは今、一生懸命、防衛省と対話をして、こういうふう宇宙を使ってはどうかと伝えていきます。これがある程度進めていく中で、ベンチャーでもこういう使い方をすればすぐ自分たちの役に立つということが大分わかってこられたので、これからベンチャーと防衛省との間での連携が始まると思います。

大学はなかなかそれができません。防衛と大学の連携は容易ではないので、ベンチャーが連携をして、先ほどご説明したような小型コンステレーションを提供する。こういう世界が大分出来つつありますし、これから増えていくと思います。

○森本理事長 衛星コンステレーションを築くことによる有効性についてお話がありました。例えばスターリンクに対抗するサービスを日本で提供することは難しいのではないかと思います。そ

うだとすると、日本はどういうところを目指したいのでしょうか。

○中須賀 いわゆるインターネットのデータ通信の世界に関しては、既に衛星が六〇〇〇機打ち上がっており、サービスもスタートしていて、費用も月六〇〇ドル程度です。実際、ある程度使えるので、日本でもあちこちで使われていて、山の中でもどこでもアンテナさえあれば使うことができます。そこに今から入っていくのは確かに相当難しいでしょう。

ただ、それでもスターリンクの軍門に下るのは嫌だとおっしゃる企業が日本にはたくさんいて、例えば政府が音頭をとって、ある業界は日本製の衛星コンステレーションのデータを使ってやりましょうというお声かけをして、そこである種の護送船団ということになってしましますが、艦隊を作ってみんなで頑張るということは、まだ可能性

があるのではないかと思つていきます。そうすると、その業界においては、まさに日本製の通信コンステレーションが使われていくでしょうだろう。私は、そういうことをやるべきだと思つていきます。

一番可能性があるのは、自動車だと思ひます。自動車は世界中で売つています。宇宙は世界中同じように使えるわけですから、世界中のどの国でも、特定の車を買えば通信サービスを受けることができるようにして、それによって、例えばエンターテインメントのサービスを受けたり、各国の地上インフラを介さなくても、自分の国に安心してデータを送れるといったことが考えられます。

特に、インターネットを使う場合はセキュリティの問題がありますので、自動車を介して日本のシステムを使い、セキュリティの高い通信ができる、こんなサービスを世界中で展開したら、う

まくやれば自動車業界は乗ってきてくれるのではないかと思ひます。あとは、誰が、どうやってやるかを考えていくことだと思ひます。こういったことが、通信においては食い込んでいけるところかと思ひます。

○質問者 B 今日は大変勉強になりました。ありがとうございます。

今日は日本のお話でしたが、アメリカは非常に進んでいるということですが、ほかのヨーロッパの国や中国、ロシアなどとの関係や競争の状況はどうなつているのでしょうか。

○中須賀 まず、今はアメリカが突出して高い技術力と予算でカバーしていますが、中国が大分近づいてきました。ある分野では中国のほうが進んでいるものも出てきています。将来、月の裏側に着陸地を作つて、人を送り込むことも考えていると思ひます。ヨーロッパは、一カ国ではなかなか

対抗できないの（い）、European Space Agency という共同体を作ってアメリカと対抗しています。

しかし、全部まとめても中国には勝てません。アメリカ、中国に次いで三番目です。

日本はその次ぐらいでしょう。中国からは、残念ながら相当遅れました。そういう意味では、日本は今、本当に頑張らなければいけないところです。現在、日本の中でもベンチャーが台頭しているので、今後に期待したいです。

また、次に出てきているのがインドです。インドは、もうそろそろ日本を抜くかもしれないぐらい、ロケット、人工衛星ともに今元気がいいという状況です。

○森本理事長 中須賀先生、我々によくわかるように説明していただきまして本当にありがとうございます。以上で、本日の「資本市場を考える会」を終わりにします。（拍手）

（なかすか しんいち・東京大学大学院 工学系研究科
航空宇宙工学専攻 教授）

（本稿は、令和六年六月一七日に開催した講演会での要旨を整理したものであり、文責は当研究所にある。）

中須賀 真 一 氏

御 略 歴

(東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻教授)

1988年東京大学大学院博士課程修了、工学博士。同年、日本アイ・ビー・エム東京基礎研究所入社。1990年より東京大学講師、助教授を経て、2004年より航空宇宙工学専攻教授。

日本航空宇宙学会、SICE、IAA 等会員、IFAC 元航空宇宙部会部門長、および UNISEC-GLOBAL は設立時より委員長。

超小型人工衛星、宇宙システムの知能化・自律化、革新的宇宙システム、宇宙機の航法誘導制御等に関する研究・教育に従事。2003年の世界初の CubeSat の打ち上げ成功を含む超小型衛星15機の開発・打ち上げに成功。いくつかの宇宙ベンチャー会社数社の設立に貢献し、アジアをはじめ多くの国の超小型衛星をベースにした宇宙工学教育も実施。2012年～2022年に政府の宇宙政策委員会委員。現在も複数の省の宇宙関連プログラムの委員長も多数務める。