

本田財団レポート No. 186

第 153 回 本田財団懇談会（2024 年 6 月 14 日）

「宇宙×ロボット×AIが変革する未来を目指して」

東北大学 大学院工学研究科 航空宇宙工学専攻 教授

吉田 和哉

本田財団レポート No. 186

第 153 回 本田財団懇談会（2024 年 6 月 14 日）

「宇宙×ロボット×AIが変革する未来を目指して」

東北大学 大学院工学研究科 航空宇宙工学専攻 教授

吉田 和哉

公益財団法人 本田財団

講師略歴

吉田 和哉（よしだ かずや）

東北大学 大学院工学研究科
航空宇宙工学専攻 宇宙システム講座
宇宙探査工学分野 教授



《略 歴》

- 1986年 東京工業大学 大学院理工学研究科 修士課程修了
- 同年 東京工業大学 工学部 助手
- 1990年 工学博士（東京工業大学）
- 1994年 米国マサチューセッツ工科大学 客員研究員
- 1995年 東北大学 工学部 助教授
- 2003年 東北大学 大学院工学研究科 教授（現在に至る）
- 1998年 （兼）国際宇宙大学 客員教員（継続中）
- 2018年 （兼）東北大学 機械科学技術国際共同大学院プログラム 代表（継続中）
- 2024年 （兼）東北大学 宇宙ビジネスフロンティア研究センター長（継続中）

《主な受賞》

- 1991年 計測自動制御学会論文賞
- 1993年 日本ロボット学会論文賞
- 2001年 IEEE International Conference on Robotics and Automation Award for Best Conference Paper
- 2004年 日本航空宇宙学会論文賞
- 2009年 工学教育賞文部科学大臣賞
- 2010年 「はやぶさ」功労者感謝状（宇宙開発戦略本部および文部科学省）
- 2014年 科学技術分野の文部科学大臣表彰・科学技術賞（研究部門）

《主な著書》

- Space Robotics: Dynamics and Control, Kluwer Academic Publishers, 1992（分担）
- Springer Handbook of Robotics 2nd edition, 2016（分担）

《主な会員等》

- 米国電気電子学会（IEEE）
- 日本ロボット学会、日本機械学会、日本航空宇宙学会、計測自動制御学会



The SPACE
ROBOTICS
LAB

2024年6月14日
第153回本田財団懇談会

宇宙×ロボット×AIが変革する未来を目指して

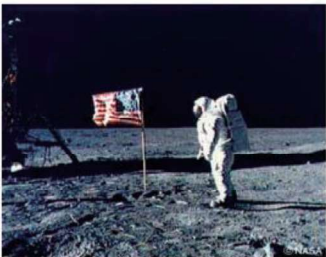
東北大学 大学院工学研究科

航空宇宙工学専攻 教授

吉田 和哉

皆さん、こんばんは。本日は多数お集まりいただきましてありがとうございます。本田財団の皆さん、本日はこのような機会をアレンジいただき、講師としてお招きいただきましてありがとうございます。ただいまご紹介いただきましたように、本日は「宇宙×ロボット×AIが変革する未来を目指して」というタイトルでお話をしたいと思います。まず冒頭に私の略歴を図-1に示します。

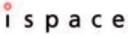
■ はじめに



よしだ かずや
吉田 和哉：私の略歴

- 1960年 東京生まれ
- 1979年 千葉高校卒業
- 1984年 東京工業大学卒業
- 1986年 東京工業大学大学院修了
- 1986年 東京工業大学助手
- 1994年 米国マサチューセッツ工科大学 客員研究員
- 1995年 東北大学助教授
- 1998年～ (兼務) 国際宇宙大学非常勤教員
- 2003年～ 東北大学教授 (航空宇宙工学専攻)

「機械科学技術国際共同大学院プログラム」代表
「宇宙ビジネスフロンティア研究センター」センター長
(兼務) 株式会社 ispace テクノロジーアドバイザー
(兼務) シスルナテクノロジーズ株式会社 取締役 CTO



1969年7月20日 アポロ11号月面着陸：私は宇宙好きな少年でした。

図-1

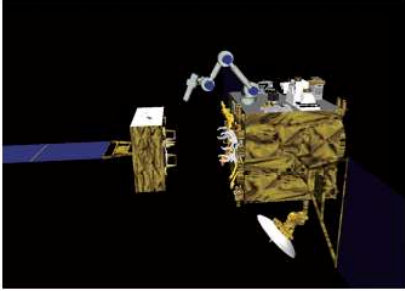
<図-1> 本田財団との繋がりですが、昨年（2023年）の夏にインド工科大学カンプール校からの留学生、Aditya Prakash 君が、本田財団のY-E-S (Young Engineer and Scientist's) プログラムで日本に来て、私どもの研究室で3ヶ月間お世話をさせていただきました。そのご縁でこういう繋がりができ、今日の懇談会に至ったという経緯です。

この後、1時間程度お話をさせていただきますが、いろいろな話題がたくさんあり、5つほど話題を用意していますので、1トピック10分ぐらいで少し駆け足の講演にはなりますが、ぜひお話を聞いていただければと思います。

■Topic 1：大学院での研究：宇宙ロボットの力学と制御

Topic 1: 大学院での研究：宇宙ロボットの力学と制御

東京工業大学大学院在籍中に「宇宙ロボット」のテーマに出会う。
「宇宙へ飛んでいく研究」を行おうと決心する。
大学院での研究成果が、博士論文(1990年)、ETS-VII(1999年)での軌道上実験につながる。



- ・微小重力環境でのロボットアームの制御
- ・軌道上衛星への推薬補給
- ・スペースデブリの捕獲などの応用に道を拓く技術

技術試験衛星VII型 (ETS-VII)
「おりひめ・ひこぼし」 by NASDA
1997年に打ち上げられた無人のロボット衛星。世界に先駆けて軌道上でのランデブ、ドッキング、ロボットアームの制御実験が行われ、学術的観点のロボット実験に参加した。

ETS-VIIでは**世界初**の軌道上ロボット実験が行われた

図ー2

<図ー2> 私が大学院生だった1985年から宇宙ロボットの研究を始めました。その頃からロボット研究では非常に人気の研究室で、なかなか入れなかった東京工業大学の梅谷・広瀬研究室に入ることができ、そこから研究がスタートしました。その中で、今日のタイトルの前半部分の、宇宙×ロボットというテーマをいただき、それがどんどん発展し、実際に宇宙へ飛んで行くロボットの研究へと発展していきました。

この図はそのサマリーになるのですが、1990年に工学博士の学位を取ることができ、そこで取り組んだ研究成果を、9年後の1999年に日本の技術試験衛星「おりひめ・ひこぼし」という衛星ミッションにて軌道上で試すことができました。いま振り返ってみると世界初の軌道上ロボット実験と言えますが、そういう機会に繋がっていきました。

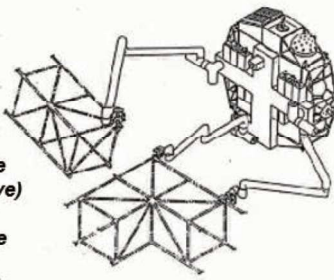
Challenge to Satellite Servicing in the Early Days of Space Shuttle Missions



1:01:57 X4

STS-14(51A), 1984
Retrieval of malfunctioning Westar-6 satellite ©NASA

Satellite Servicing by a Free-Flying Space Robot



- Capture (Retrieve)
- Refuel
- Replace
- Repair
- Reorbit
- Assemble

NASA ARAMIS Report, 1983
Space applications of Automation, Robotics, And Machine Intelligence Systems

図ー3

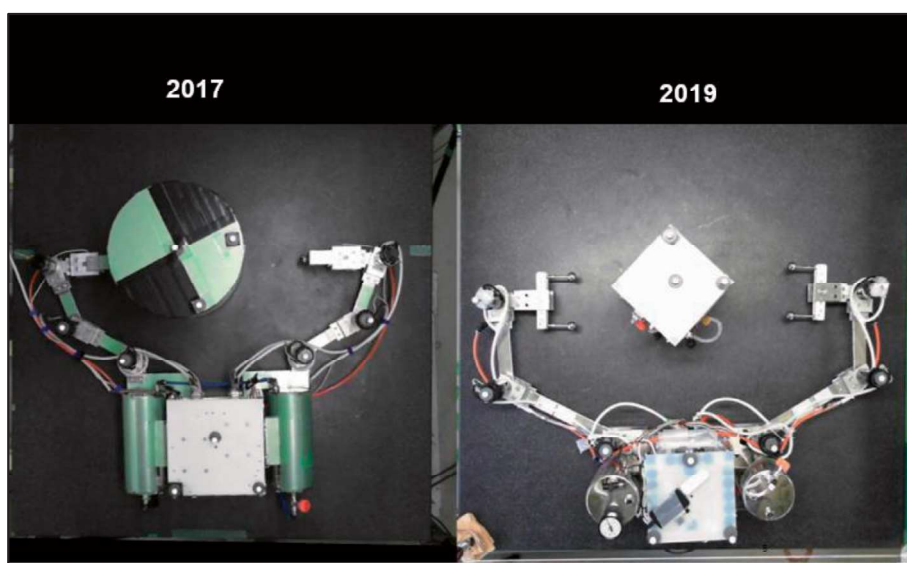
<図ー3> 私が研究を始めた1985年前後というのはどういう時代だったかと言いますと、アメリカでスペースシャトル計画というのがありました。最初のフライトが1981年で、2011年に退役するまでの間に計135回打ち上げられました。スペースシャトルというのは同時に最大7人の宇宙飛行士が乗り、地球周回軌道まで飛んでいって最後はグライダーのように滑空して地球へ帰ってきて、それを繰り返し使うという全く新しいコンセプトの宇宙往還機と呼ばれるもので、2号機からロボットアームも搭載

されていました。

「では、宇宙で何をするか」というと、有人宇宙ステーションを作るというのが大きな目標でした。米国NASAが主導して、人が宇宙空間に長期滞在するような時代を切り開くという意欲的なプログラムです。そのような背景で、最初の数年間は非常に意欲的な実験がされています。今ではなかなかこのようなことはできないのではないかと思います。宇宙飛行士が安全ロープ、命綱を繋かず、背中に背負った推進系を、手元のジョイスティックで操縦しながら近付いていき、回転している人工衛星に飛びついて、それを回収しようと、そのようなことが実際、1984年にスペースシャトルの14番目のフライトで行われました。

なぜこのような命がけのことをする必要があったかという、実はこの人工衛星、打ち上げ直後に少し不具合があることが分かり、1カ所修理すれば使えるという状態でした。軌道の上に打ち上げたのに故障してうまく機能しない人工衛星を、無駄にしないで修理して使う、そういうコンセプト（サテライトサービシング＝打ち上げられた衛星に対して、それをサービスするというコンセプト）がこの当時議論され始めました。ちょうどその1年前に、NASAから図の右側に示すようなレポートが出されました。無人のロボットが軌道上でいろいろな作業をする、例えば宇宙ステーションを作ることや、既に飛んでいる衛星にアクセスして、それを修理しようという議論が始まり、それをスペースシャトルのプログラムの中で実証しよう、試験しようというようなことが始まった時代でした。

残念ながら1986年に、チャレンジャー号の事故があり、人命が一番大事ということで、急に安全に対する意識が高くなり、命懸けのミッションはその後全くできない空気感になってしまいました。やはりこれは明らかに人のやるべき作業ではなく、これを置き換えるロボットを作るべきという、そういう時代背景の中で、私はそれを実現するようなロボットシステムを作りましょうという研究を始めました。



図—4

<図—4> これは地上実験の動画です。先程お見せした1984年のNASAミッションの動画に似たようなイメージの実験で、もともとスピニングしている、ぐるぐる回転している対象物が、宇宙空間で、微小重力環境で浮いている状況を模擬しています。そこにロボットが近付いていき、両手ではさみ付けてキヤッチする、単純に言うと、そういうタイプの研究成果です。

このような研究をすすめていき論文博士をいただいたのが1990年で、その後ずっとこんにちに至るまで継続しておりますが、比較的最近（上記の動画は2017年および2019年に撮影）でもこの動画のような実験を繰り返しております。断面が円形ならば、どこでもかまわず挟み付けばよいのですが、断面が矩形、四角形になるとタイミングが大事になります。ちなみに、これらの実験では捕獲対象物が元々回転しており、これをつかむのですが、角運動量が保存されるという自然の法則があり、捕まえて一緒に合体した後も、ロボット全体がゆっくりと回転し続けます。これは高校の物理や大学の初等力学で習う「角運動量保存」という物理法則そのものであります。このような物理法則を理解した上で宇宙ロボットを制御する、ということが私の研究の原点であるといえます。

■Topic 2：小惑星探査機「はやぶさ」プロジェクトへの参加

Topic 2: 小惑星探査機「はやぶさ」プロジェクトへの参加

未踏探査＝まだ見ぬ世界への挑戦
ブレインストーミング → 開発&地上検証 →
→ フライトミッション → サンプルリターンの成功（世界初！）
未知環境での様々な可能性を考え抜いた工学的挑戦が、サイエンスに貢献する成果につながる。



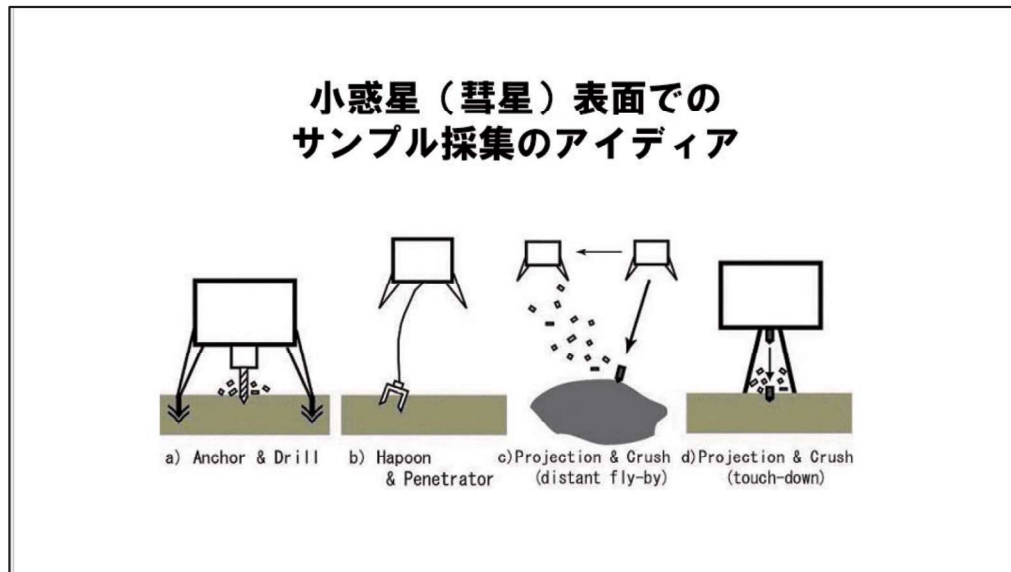
小惑星探査機「はやぶさ」
2003年に打ち上げられた「はやぶさ」の開発に、1996年のプロジェクト開始時から参加し、小惑星イトカワ表面での岩石サンプル最終技術の開発と検証を担当した。

図—5

<図—5> その後、縁があって小惑星探査機「はやぶさ」の開発プロジェクトにお声がけいただきました。現在のJAXA（日本の宇宙機関）という組織は、3機関が統合されてJAXAとなったわけですが、その前身のひとつである文部省宇宙科学研究所（宇宙研）にて、このはやぶさプロジェクトは立ち上がりました。相模原にある宇宙研という組織は、研究者集団で、サイエンティスト＝理学的研究者とエンジニア＝工学的研究者が集まり、新しい宇宙科学研究を切り拓くミッションをやりましょうという、チャレンジングな空気に満ち溢れた世界です。その中で未踏探査、まだ誰も見たことがない世界に行き、岩石の欠片を取って地球へ持ち帰ろうという壮大なプロジェクトが動き始めました。私も宇宙ロボットを研究している端くれでしたので、何かの役に立つかもしれないということで呼んでいただいた訳です。日本中の様々な大学からいろいろな先生方や研究者が参加し、このミッションを作り上げていきました。

最終的に「小惑星イトカワに行って、岩石の破片を取って帰ってくることをなんとか達成できたわけですが、いかにしてサンプルを取るかということ自体、誰もやったことがなく、NASAでさえやったことがない。誰も正解を知らない世界でどういう風にこの探査機を設計するか、そこからスタートしました。

打ち上げが2003年で、地球に帰ってきたのは2010年ですが、開発プロジェクトは1996年にスタートし、私は開発の最初から参加させていただきました。ちなみに、そもそも小惑星から岩石サンプルを持ち帰るというコンセプト自体は、宇宙研にて1990年代初めから検討されており、チーム全員が、NASAもまだやっていない未踏領域に挑戦するんだという高い志をもって動き始めました。



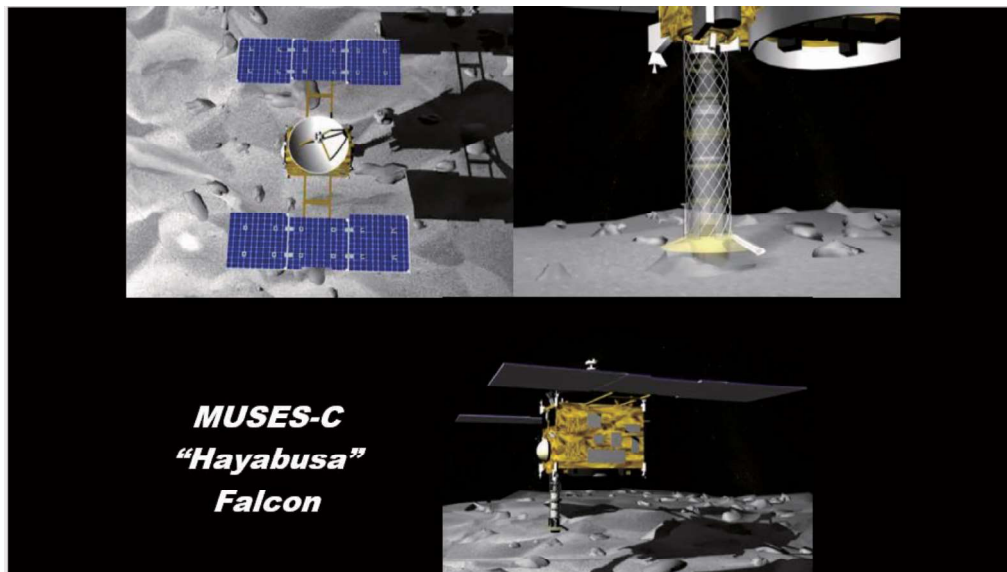
図—6

<図—6> この図は「はやぶさ」初号機開発の過程で、開発チームにて検討した代表的なサンプル採集のアイデアをまとめたものになります。

このミッションの目的は、小惑星の表面から岩石のサンプルを採って、地球に持ち帰ることです。しかしながら、探査機の開発を始めた時点では、ターゲットとなっている小惑星がどんな天体なのか詳細情報は全然分かっていなかったのです。

そもそも小惑星というのは小さな惑星ですが、主に地球と火星の間に分布している、岩石の破片のような大小さまざな天体です。惑星のような大きな天体になれなかった、太陽系の原物質、原材料となるような物質が残されているというようなものです。地上でどんな最高性能の望遠鏡を使っても、本当に光の点、数ピクセルの点にしか見えません。光の反射のスペクトルを見れば、これは岩石質だとか、カーボンが多いのではないかなど、そういうことはわかるのですが、形も分からず、具体的な地形も全然分かりません。探査機を設計して現地に着いてみたら「歯が立たない」では話になりませんので、いろいろな可能性を考えました。

たとえば着陸してドリルでガリガリやる…というのは、真っ先に思いつくアイデアかもしれませんが、複雑すぎてうまくいきません。では、他にはどのような方法があるのか、ブレインストーミングをしてアイデア出しをしました。みんなでいろいろなアイデアを持ち寄り、ディスカッションを重ね「これでいきましょう」というように、探査機のスタイルは決まっていきました。

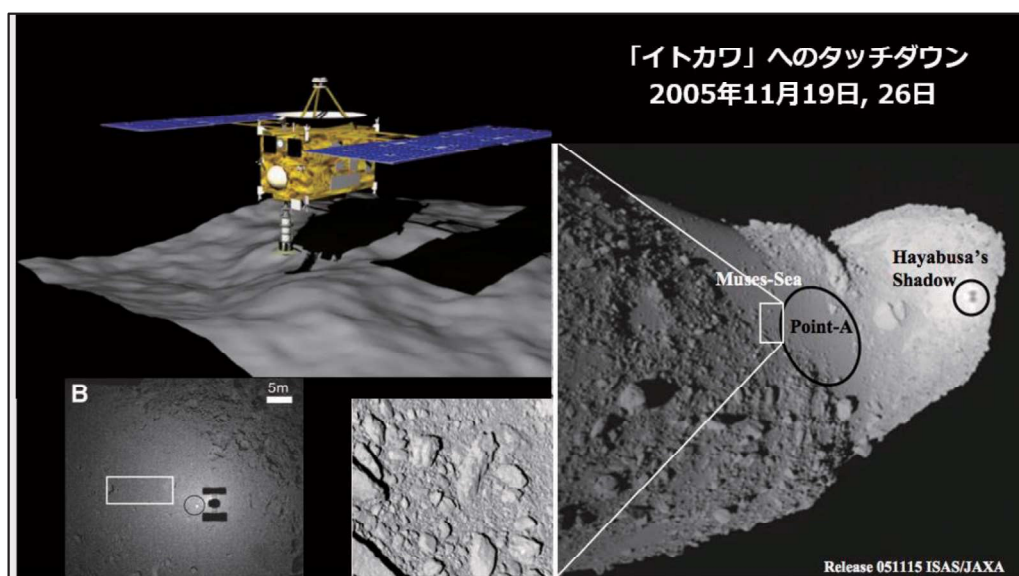


図—7

＜図—7＞ 探査機の形が見えてきたら、シミュレーションを作成し、具体的な探査機の動きを視覚化しました。この視覚化の作業（シミュレーション動画作成）は、私が担当しました。

天体が小さいということは、重力場がほとんどありません。1万分の1G（重力加速度の大きさが地球表面の1万分の1）のような世界で、数10メートルぐらいの高さから自由落下しても終端速度が秒速10センチメートルになるかならないかというぐらいの重力場ですので、着陸した後、その場に立ち続けることもうまくできないのです。足が触れたら、その反動で跳ね返って飛び上がってきてしまいます。そのように接触できる時間が非常に限られている中で、サンプルを取るにはどうしたらいいか。「アンカリングしてガッチリつかむ」ではなく、「タッチアンドゴーで触れた瞬間にサンプルを採る」。いろいろなケースを想定した中で、それが一番うまくいくのではないかとということで、こういうデザインになりました。

タッチダウンの瞬間には、秒速数100メートルぐらいの高速で弾（プロジェクタイル）を発射し、表面をクラッシュします。砕かれた破片はおそらくいろいろな方向に飛び散りますが、垂直方向に上がってきたものの一部が自然にカプセル内に到達し、これを集めて持ち帰ることができれば大成功という作戦です。



図—8

＜図—8＞ 打上げから2年後の2005年、「はやぶさ」は「イトカワ」と名付けられた小惑星に到着しま

した。「イトカワ」がこのような姿であることは、実際に行ってみて、写真を撮って初めてわかったことです。表面がゴツゴツしていたり、大きな岩が転がっていたり、場所によっては細かな砂利がザラザラしているように見えたり、そういうものが混ざり合った世界でした。私たちはゴツゴツの世界からフラットな世界までいろいろなケースに備えて表面のモデルを考えて、打上げ前からいろいろとシミュレーションしてきました。小惑星表面に触れるサンプラーホーンという部分は、バネのように柔軟性のある構造となっています。その先端が何かに触れるとバネが変形し、物理的に「本当に小惑星に触れた」ということが検出できます。「触れた」というシグナルをトリガーにして弾を発射し、後は安全のために上昇用の推進系を使うというシンプルな設計にしました。紆余曲折はありましたが、結果的にこの設計方針はうまくいきました。

タッチダウンサンプルを終えた「はやぶさ」は、地球への帰還の際にいろいろなトラブルがあり、本当に帰ってくるの、来ないのと、日本国民の多くがハラハラドキドキし、いろいろ擬人化されたキャラクターが作られたりということもありましたが、最終的に何とかサンプルを地球に持ち帰ることができました。

その後、映画が3本作られました。タッチダウンの瞬間は一番の見せ場ですので、それぞれの映画でCGを駆使した格好いいシーンが制作されました。しかし、私がここにお見せした動画は、実際にタッチダウンが行われる前に作っています。映画の中の格好いい映像は細かく見るといろいろ間違っているというのを指摘できるのですが、私たちは純粹にプロジェクト遂行の目的で、きつこうなるに違いない、しかし条件が変わるとこうなってしまうかもしれないなどと模索、検討する中で、このような絵を作ったというのが、私の経験であります。



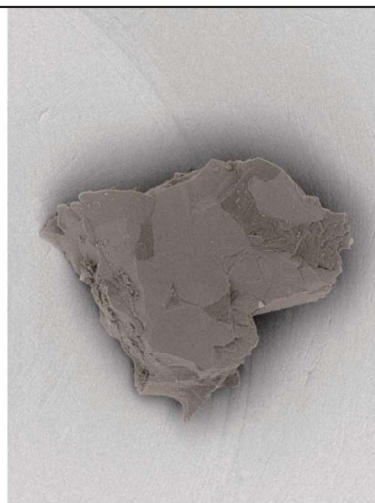
図—9（画像クレジット：JAXA）

<図—9> 実は初号機では、タッチダウンがどのように実行されたかというシーンは誰も見ていないのです。実際にイトカワに行ってサンプルを採って帰ってきたことは事実ですが、タッチダウンの瞬間を誰かがカメラで見てくれたという訳ではないのです。それが心残りというわけでもないですが、2号機では、探査機に実際にカメラを搭載し、タッチダウンの瞬間の動画を撮ることに成功しました。この動画をご覧くださいと、確かに、小惑星表面に触れた直後に細かな破片がたくさん舞い上がっている様子が鮮明にわかります。私たちが考えてきたことが、こうやってうまく動くのだという証拠も撮ることができ、私のシミュレーションで想像するしかなかった世界が、実際、リアルの動画でも撮れたというのは、私にとって非常に嬉しいことでした。探査機の影がちゃんと映っているわけですが、こういう形で1号機、2号機と成功し、地球以外の天体、特に小惑星と呼ばれるタイプの天体から岩石を持ち帰るということに成功したわけです。

平成23年8月26日 東北大学発表

東北大学大学院理学研究科・理学部地学専攻中村智樹(なかむらともき)准教授らは、高解像度電子顕微鏡や大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構と大型放射光施設SPring-8の放射光X線を用いて小惑星探査機はやぶさ搭載の帰還カプセルにより持ち帰られた微粒子サンプルを分析し、小惑星イトカワの物質構成と形成の歴史を世界で初めて解明しました。。

『イトカワの母天体の大きさは直径20km程度と考えられ、中心部分の温度は約800℃まで上昇し、その後、ゆっくりと冷えた。その後、大きな衝突現象が起き、飛び散った破片が再集積したものが現在のイトカワとなった。』



イトカワの微粒子 ©JAXA

図—10

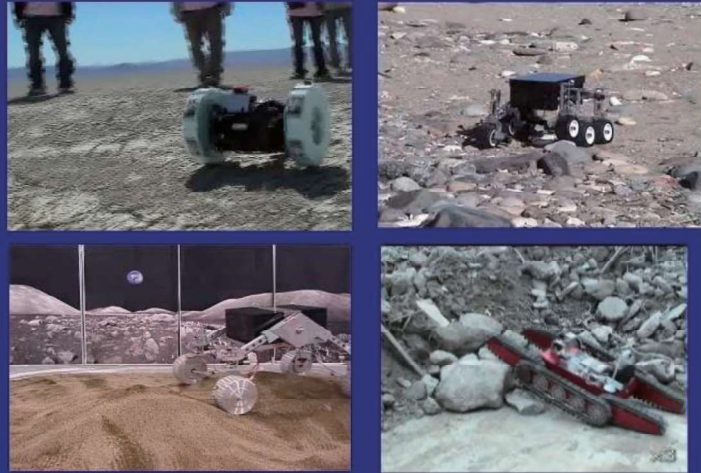
<図—10> 実は、初号機ではミッションの途中でも様々な試行錯誤があり、うまくいかなかったことが多くありました。採れたサンプルの量も非常に限られていて、個数としては2000個に達するのですが、大きさ的にはそれぞれが100ミクロンくらいの細かな破片しか採れませんでした。が、そういった小さな破片でも地球に持って帰ることができれば、世界最高性能の分析装置、たとえば日本のSPring-8という放射光施設を使うと、ミリグラムの単位の物質であっても、その結晶構造がどうなってるか、太陽系形成期のどういうプロセスを経て現在に至っているかということが、専門家が見ると手に取るようにわかるのです。

ちなみに今はNanoTerasuという放射光施設の次世代版が東北大学の青葉山キャンパスに出来上がっていますので、今後のさらなる分析に貢献することができるかもしれません。

分析の結果、現在の小惑星「イトカワ」は、宇宙空間のダスト（星間塵）が集まってまず直径20キロメートルぐらいの母天体が形成され、中心が摂氏800度程度まで温まり、その後別な小天体と衝突して破片となり、その破片が集合して現在の姿になったという変遷を経てきたことがわかりました。凝集して温度上昇したが800度が上限であるとか、小天体同士の衝突の際に瞬間的に熱が加わった痕跡があるというようなことも、この100ミクロンの破片から読み取ることができるのだそうですが、そこがサイエンスのすごいところだと思います。

私はサイエンティストではないのですが、探査機をみんなで考えて作って実現するということによって、サイエンスに貢献することができたことは、やはり最大の喜びかなというふうに考えております。

東北大学における月惑星探査ローバーの研究
since 1997



図—11

＜図—11＞ 次に、月惑星表面を移動探査するロボットを見ていくことにします。宇宙×ロボットという観点で、火星や月面などの天体に、無人の探査ロボットを送り込んで移動探査をすることは、非常に魅力的なテーマです。この分野ではNASAが何歩も先を行っているわけですが、1997年にNASAの最初の火星ローバー（移動探査車）が成功しました。元々自分もそれにつながるような研究をしたいと思っておりましたので、1997年の火星ローバーに刺激を受けて、同じ年より自分の研究室でも本格的な月惑星探査ローバーの研究を始めました。ここに実験風景の動画を示していますが、部屋の中に砂場を作ったり、米国ネバダ州の砂漠や、仙台市内の広瀬川の河原であるとか、あるいは解体工場の現場を借りて震災現場に見立てた実験を行ったりと、チャンスを見つけて、いろいろな場所を使って、いろいろな自然地形や難しい地形の上を移動して探査するロボットの研究開発を進めていきました。

■Topic 3：月惑星探査ロボットの研究開発
Google Lunar XPRIZEへの挑戦



図—12

<図—12> そして、私の研究者人生にとって3つ目の大きなイベントがありました。月惑星探査ロボットの研究開発の中で、Google Lunar XPRIZE（グーグル・ルナ・エクスプライズ）と呼ばれる非常に大きな国際的なコンペティションに出会ったのです。科学技術の教育・研究においてロボコン（ロボットコンテスト）が重要な役割を果たしていることは既に皆さんご存知だと思うのですが、実はロボコン自体の発祥は東京工業大学で、森政弘先生が始められました。現在では、ロボコンの意義と重要性は、世界中で広く認知されております。これからお話しますのは、その国際版、しかも行き先は月面という、世界最大規模の国際コンペに参加させていただいたストーリーとなります。

このGoogle Lunar XPRIZEへの呼びかけがスタートしたのは2007年で、参加登録が2010年に締め切られました。情報としては私の耳にもすぐに飛び込んできたのですが、参加については、最初は躊躇しておりました。



図—13

<図—13> これを企画したのはアメリカにあるNP0のエクスプライズ財団という組織で、世の中にイノベーションを起こすような、様々なコンペを企画・実行している組織です。



図—14

<図—14> その中で最大規模となったのが、この月に行ってロボットを走らせるというコンペで、やらなければならないことは、ある意味単純です。月に探査機を送り込んで、その探査機からロボットの形は問わないのですが、月の表面で500m以上移動して、ハイビジョン規格の高精細な画像を地球に送る。それができれば賞金をもらえます。

賞金の冠スポンサーがGoogle社でしたので、このコンペは、Google Lunar XPRIZE (GLXP) と呼ばれました。



図—15

<図—15> 賞金の金額規模は、総額3,000万ドル。1ドル100円換算ですと30億円（1ドル150円のレートでは45億円）という高額ですので、みんなワアッとなりましたが、このあとお話ししますように、実は宇宙開発分野の常識に照らすと、これはほとんど呼び水にしかならない金額です。月面を走るロボコンの一種と捉えれば、ロボットを作れば主催団体が月まで連れて行ってきて、月面に行ってヨーイドンで走るということをイメージされるかもしれませんが、実はそうではないのです。月面に着陸する手段も含めてすべてを自分たちでやりなさい、各チームでやりなさい、ということで、チャレンジの度合いとしては全然レベルが違うのです。もはや単なるロボコンではありません。とても大掛かりなもので、しかも優勝して20億円や30億円の賞金をもらっても、決してペイしないのです。

「それでも皆さんやりますか？」というのがこの仕組みの面白いところで、それでもやりたいとい

う人たち、世界中から30を超えるチームが登録しました。残念ながら日本からは私たちのチームだけでしたが、特にアメリカやヨーロッパからは多く手が挙がって、各国でいろいろな活動が始まりました。

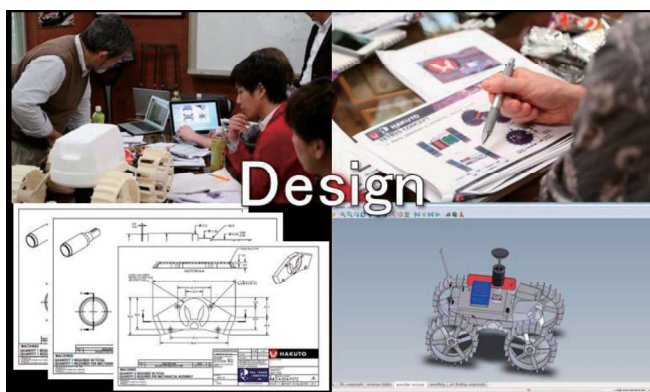
このコンペは、賞金をもらってそれでペイして終わるのではなく、賞金はあくまでも呼び水で、それをきっかけに、世界中から挑戦者が現れることによって、イノベーションが起こり、それが新しいビジネスを作り出す。そういう壮大なシナリオが背景にあるのです。ルールとして、「国の予算は使っちゃいけない」、「宇宙機関の人たちがプレイヤーになってはいけない」という条件もあり、例えば、お金を払ってロケットを購入し、JAXAのロケットと一緒に乗ります、というようなシナリオは認められますが、JAXAの人たちがJAXAのプロジェクトとして参加しますというのは認められません。

こういう問題設定というのは、つまり、宇宙機関ではないプレイヤーに対して「宇宙機関でなくても、あなたたち、できますか？」という問いかけを、私たちはいただいたということなのです。はたして民間でこういうことができるのか、いや民間でこういうことができる時代を作ろう、というのが、実は主催者側の一番大きな狙いで、その意義をきちんと理解した上で、それでもやろうといって挑戦した人たちが世界中で動き出しました。それは明らかに世の中を変えるイノベーションのきっかけとなったわけです。

私は大学の研究者として、もちろん技術を持って挑戦したわけですが、コンペに勝ち残るためには技術だけでは前進することはできないのです。「自分たちで新しいビジネスを起こして宇宙に行く、月に行くということが新しい経済圏をつくるんだ」ぐらいの構想を持たないと成立しない話で、仮にこれを宇宙機関がやろうとすると、おそらく500億や1,000億円、そういう規模感のプロジェクトです。それを国の力を借りなくとも、リターンが成立するような仕組みを自分たちで作るという、壮大なチャレンジに向かって動き始めたわけです。

開発が順調に進んでいるチームに対して、2015年1月に中間賞が与えられ、私たちのチーム「HAKUTO」も中間賞をいただくことができました。そして、レースの最終フェーズでは、優勝に近い有力チームとして、日本から私たちの「HAKUTO」、インドから1つ、アメリカから2つ、イスラエルから1つ、計5つが残りました。各チームとも最終的にいいところまでいったのですが、どのチームも与えられた期間の中では目標を達成できず、このコンペは2018年3月に優勝者なしで終わりました。

しかしながら先程申し上げましたように、私たちは賞金目当てでこのコンペに参加していたわけではなく、賞金が消えたからといってその活動を止めることはしませんでした。他の最終候補チームも同様です。コンペ終了後の活動については、少し先のスライドでお話します。



図—16



図—17



図—18



図—19

<図—16, 17, 18, 19> これらのスライドは、チーム「HAKUTO」の活動として、私の研究室の中で、ロボットを設計し、製造し、宇宙環境で適切に動作することを検証するために、振動試験や熱真空試験を行っている様子です。2018年までには、打ち上げ機会さえあれば、いつでも月に飛んで行けるローバーを作りあげました。



図—20

<図—20> この動画はまだその前段階、2014年時点でのコンセプトレベルのデモンストレーションです。月面に到達後、着陸船の扉がポンッと開いてロボットが登場し、それが表面を移動して探査をする様子のデモンストレーションを、静岡県浜松市の中田島砂丘で行いました。日本で最大の砂丘としては鳥取砂丘が有名ですが、中田島砂丘は2番目に大きな砂丘として知られています。私はこの地形がすごく好きで、ロボットが走っている様子をドローンで空撮し、色を白黒にすると、本当に月面世界

にいるのではと見間違えるぐらいの場所です。無線による遠隔操縦で、こういう探査ロボットを走らせるという実験を繰り返し行い、技術を磨いていきました。



図-21 (画像クレジット：株式会社ispace)

<図-21> さて、2018年3月をもってコンペとしては終了したXPRIZEのその後ですが、優勝候補のひとつであったイスラエルのチームが2019年4月に月面着陸を試みましたが、残念ながら成功しませんでした。私たちのチーム「HAKUTO」、それを運営するために設立した株式会社ispace (アイスペース) は、「HAKUTO-R Mission 1」と名付けた月着陸船を開発し、2022年の12月に米国フロリダ州よりスペースX社のロケットにより打上げました。そして月に向かって順調に航行を続け、2023年4月に月を周回する高度100キロメートルの軌道に入り、そこから着陸に向けて降下を開始して、この図に示した10段階のうちSuccess 8までいったのですが、着陸の最終フェーズのギリギリのところ（高度約5キロメートルの地点）で高度センサの値に読み違いが発生し、軟着陸には至らずに月面でクラッシュしてしまいました。民間企業による世界初の月面着陸成功になるはずだったのですが、本当に残念でした。ispace社は民間による月面への輸送手段の確立を目指していますので、この失敗で得られたデータを活かして、次の「Mission 2」着陸船へと進んでいく予定です。

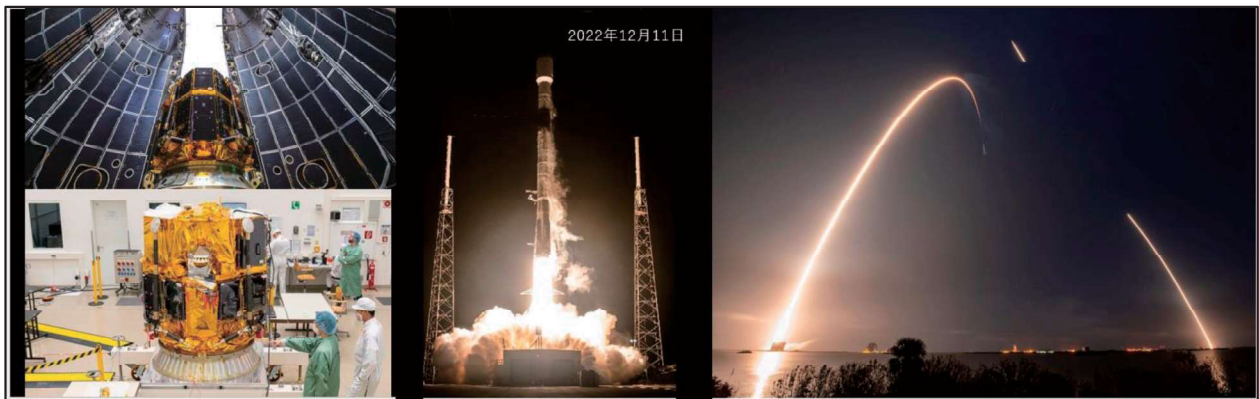
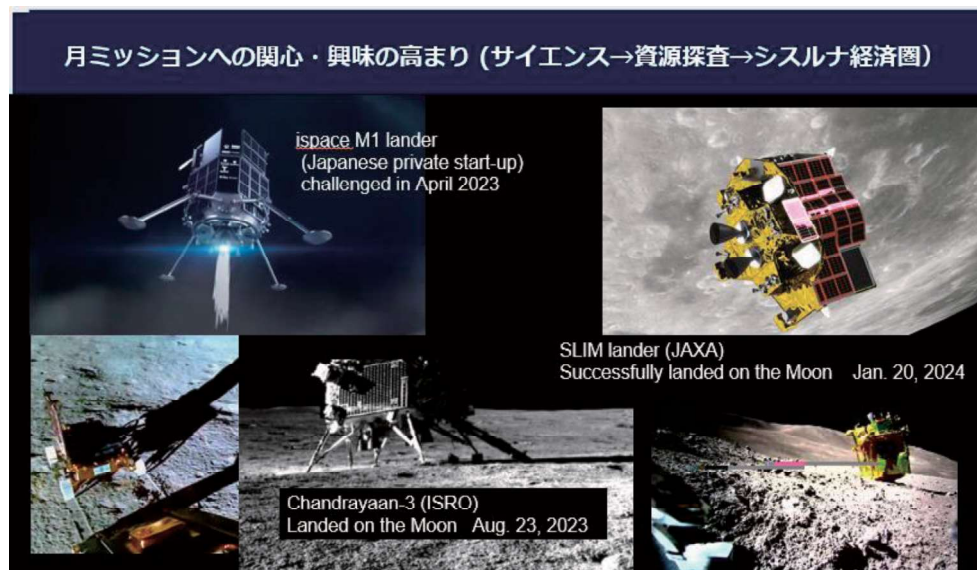


図-22 (画像クレジット：ispace, SpaceX)

<図-22> このスライドでは、「HAKUTO-R Mission 1」着陸船の打上げ前の姿とSpaceX社のロケットによる打上げの様子を示しています。



図—23 (画像クレジット：ispace, ISRO, JAXA)

<図—23> XPRIIZEが火付け役となり、民間のチーム、しかも老舗の大企業ではなく、NewSpaceと呼ばれるベンチャー企業が、自ら資金調達を行って月面着陸を目指すという時代が、確実に動き出したのです。イスラエルのチームも、ispaceも最初の試みでは成功に至りませんでしたが、このような挑戦を続けていくことが、大きなムーブメントへと発展しようとしています。

一方、各国の宇宙機関においても、月を目指すという動きが活発化しています。計6回12人の宇宙飛行士が月面着陸を成し遂げたアポロ計画から50年以上が経過し、米国を中心に「アルテミス計画」と名付ける新しい月面探査計画が動き始めています。

昨年から今年の動きを見てみますと、2023年8月にインドの宇宙機関ISROが、チャンドラヤーン3号と名付けた無人探査機の着陸に成功し、インドは月面着陸に成功した4番目の国となりました。そして2024年1月には、JAXA（日本）のSLIM (Smart Lander for Investigating Moon)の着陸に成功し、日本は月面着陸に成功した5番目の国となりました。このSLIM着陸船は、目標地点から100メートル以内にピンポイント着陸することを目指し、実際には10メートル以内の精度を達成しました。着陸直前のトラブルによりSLIMは逆立ちした姿勢での着陸になりましたが、それでも着陸後の姿を着陸直前に分離した小型ロボットによって撮影することに成功し、SLIM本体に搭載された分光カメラによる撮影にも成功して、さらに約2週間続く零下170度の極寒の夜を生き延びる「越夜」を3回達成するなど、大きな成果をあげました。そして、中国も着実に月ミッションを成功させています。

こうした動きの背景には、やや言い過ぎかもしれませんが、「民間でも月面まで飛んでいくことができます」という新しい潮流が、宇宙機関による月面探査を刺激し、加速することに繋がってきていると感じております。

■Topic 4：超小型衛星（マイクロサット）の研究開発

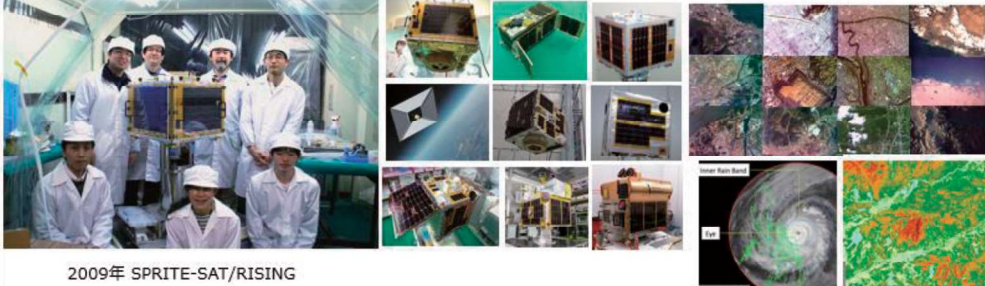
Topic 4: 超小型衛星(マイクロサット)の研究開発

大学発 50kg 級衛星 → 宇宙ビジネスの Game Changer

2009年から現在までに15機のマイクロサット (Cubesatを含む) を、開発、打上げ、運用
地球観測/リモートセンシング、高解像度、高精度指向制御、ハイパースペクトラム、気象、植生…
→ シスルナテクノロジーズ株式会社の創業

持続可能なシステム (エコシステム) への挑戦 人材育成/Capacity building
地球軌道→月軌道への挑戦





2009年 SPRITE-SAT/RISING

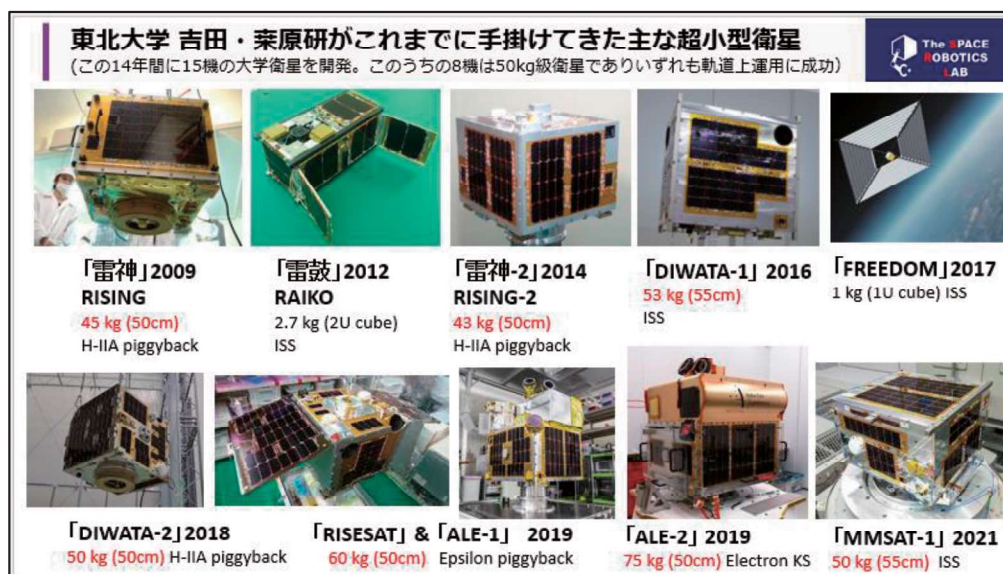
図ー24

<図ー24> それでは4番目のトピックに進みたいと思います。

「研究成果を宇宙へ飛ばす」という目標に、より直接につながる活動として、大学の研究室で人工衛星を作りましょうということにも、取り組んできました。

人工衛星の歴史を振り返ると、元々は小さい衛星からスタートしているのです。世界初の人工衛星「スプートニク」や、日本初の衛星「おおすみ」は小さなものでしたが、それがどんどん大型化し、こんにち宇宙機関が作る人工衛星は、高さ何メートルもあり重さが何トンもあり、1つ開発するのに10年がかりで数100億円かけ、打ち上げ費用もおおよそ100億円かかるという世界が構築されてきました。そのため「宇宙はお金がかかるし、時間もかかるし、大変」というふうに世の中でずっと思い込まれてきましたが、それに風穴を開けようという動きが1990年代から2000年代に入る頃に世界的に出てきました。そのひとつが大学発の超小型衛星です。小さな人工衛星であれば、大学の研究室でも一研究者の研究費でも作れるのではないかと、そして、学生も参加して一緒に手を動かして「ものづくり」を行う実践教育にもなるという観点です。

その源流はイギリスのサリー大学から始まりました。日本国内では、東京大学のチームが作ったCubeSat（キューブサット）あるいはサイコロ衛星と呼ばれる1辺10センチメートル、重さ約1キログラムの超小型の人工衛星の打ち上げに成功し、地球周回軌道上から地球の姿を撮影することに成功しました。搭載された機器には秋葉原で買ってきた電子部品も使用されており、人工衛星は特殊で、高価で、専門機関でしか作れないという常識が覆されました。超小型衛星の潮流は、世の中の宇宙開発のやり方を変えるゲームチェンジャーとして注目を集め、いまや広く普及する時代になっています。



図—25

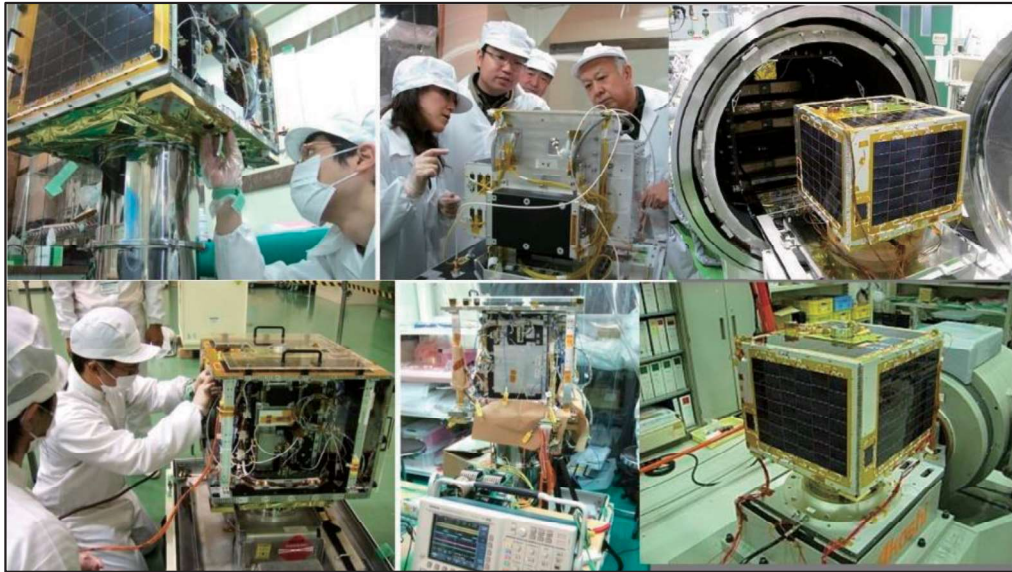
<図—25> 東北大学の私たちのグループは、1辺10センチメートルの CubeSat ではなく、最初から、もう一回り大きい1辺50センチメートル、重さが約50キログラムの衛星開発に取り組みました。私たちは、宇宙空間に到達することが目的ではなく、宇宙空間で意味のある仕事（科学ミッション）を行うことを目的としていたからです。

私たちにとって最初の人工衛星「雷神」は、2009年に宇宙空間に飛んで行くことができました。その後、この15年間に計15機の人工衛星をうちの研究室で作って打ち上げ、ほぼ全部が宇宙空間で動作し、長期間にわたって継続的に軌道上運用するという経験することができました。

図に示すように2009年の次は、2012年まで少しインターバルがありますが、2014年、2016年は1年おきに、そしてそれ以降は毎年1機、さらには2019年には60から75キログラムの衛星を3つも打ち上げる状態に至りました。

実はロボットもそうなのですが、作ることが目的ではないのです。作った人工衛星が宇宙で何をするか、そこが一番大事で、きちんと意味のあるミッションを達成して、初めてそれぞれのプロジェクトに価値が生じます。ロボットもそうで、ロボットを作ることは楽しいけれども、ロボットがどういうミッションをするかという点が一番大事です。衛星開発を経験することにより、ミッション中心に設計を進めることの重要性を学ぶことができました。

私たちの人工衛星は、当初、東北大学理学研究科の先生とともに、雷に由来する高高度での大気発行情象を観測しようという目的から始めました。そのため、衛星の名前を「雷神」としました。



図—26

＜図—26＞ このスライドでは、私たちの衛星作りの現場の写真を示しています。私自身も出発点は衛星作り経験値ゼロから始めたわけです。経験豊富なメンターの方にいろいろ教わって、学生と一緒に学びながら、1号機を作っていました。



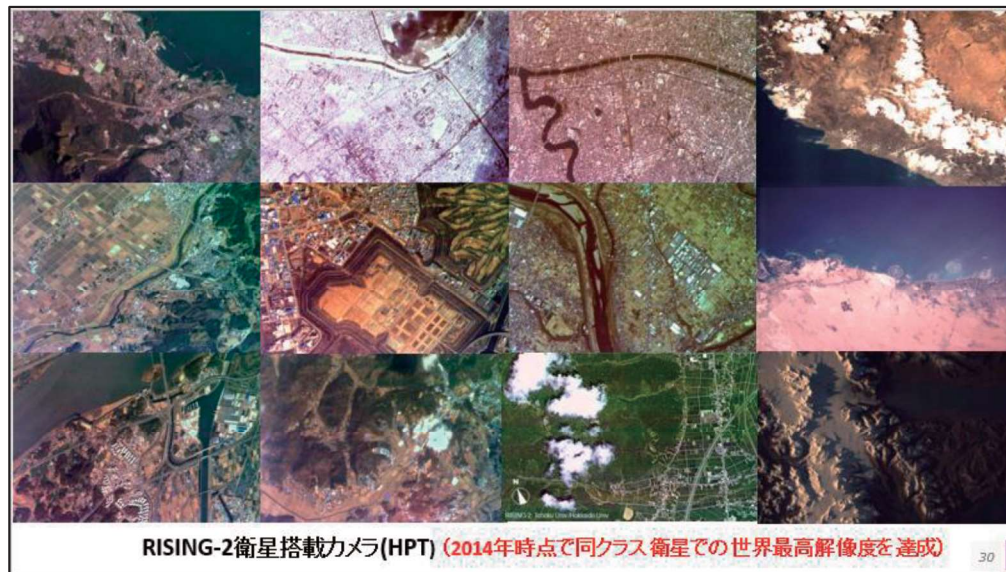
図一27



図一28

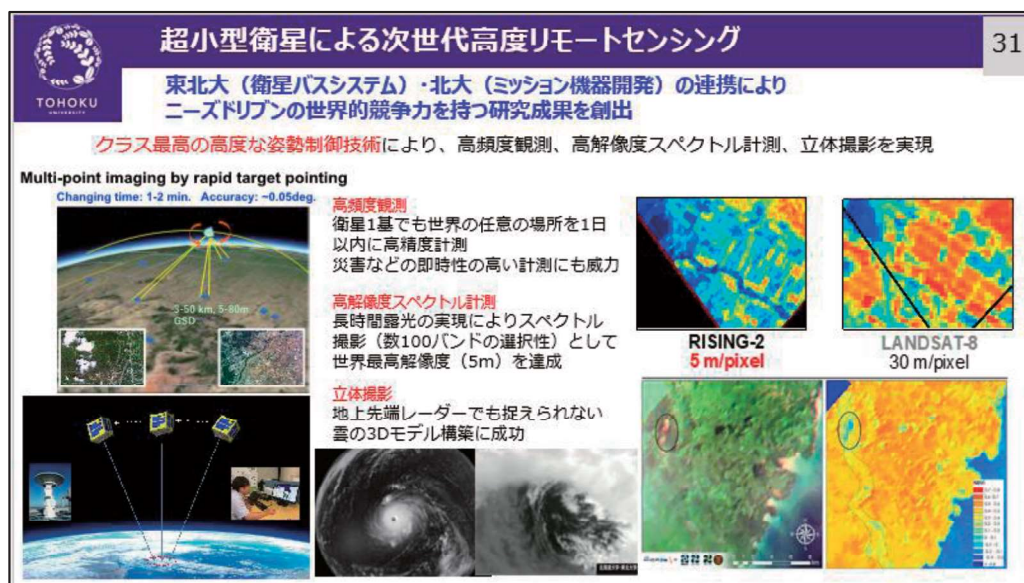
<図一27, 28> 私たちにとっての1号機である2009年の「雷神」、2014年「雷神2」の完成時の記念写真と、打上げの様子の写真です。

これらの衛星は、ともにJAXAのH-IIAロケットで打ち上げられました。左側の「雷神」打上げの写真ですが、真ん中の丸い穴、この輪っかの部分には重さ1トンを超えるようなJAXAの大型衛星「いぶき」が結合されており、それがちょうど切り離された直後、切り離された「いぶき」から振り返りざまに撮影されたものです。ロケットの最上段にバランスウェイトのように、小さな衛星が取り付けられていますが、私たちの衛星はこの中のひとつで、これらの小さな衛星がこのあと順次切り離され、地球を回る軌道に投入されました。このように、大きな衛星と一緒に軌道上に飛んでいくことを、相乗り打ち上げ（ピギーバックローンチ）というのですが、この2009年の打上げが、JAXAが超小型衛星の相乗り打ち上げを行った最初の機会であり、その1回目のチャンスをいただいて、私たちの衛星は宇宙空間へと飛んでいきました。



図—29

＜図—29＞ さて、宇宙へ飛んでいって何をやるかというミッションの話ですが、カメラを積んでいて、足元を見下ろせば地球の写真を撮ることができます。よって、広角レンズで地球全体を撮るといのが一番の入り口になります。これに対して2014年の「雷神2」では、高解像度の写真を撮るための望遠鏡のような光学系も積んでいて、地上のある1点を見つめるポインティング制御をして、いろいろな場所を撮影しました。そして、2014年時点でこのクラスの小型衛星の中では世界最高性能の解像度を達成するという成果を、幸いにして挙げることができました。



図—30

＜図—30＞ さらには、RGBのきれいなカラー画像だけではなく、特定波長を透過するフィルターを使ってマルチスペクトラム画像（多波長画像）が撮影できる装置も搭載して、様々な波長で切り取ることによって地上のいろいろな現象を見ることができるとも実証しました。たとえば、特定波長の画像を組み合わせることにより植物の葉で起きている光合成の度合いを知ることができ、作物の生育状況を知ることなど、宇宙からの情報に基づいて、農林水産業へ貢献する応用展開にも道をひらくことをしました。

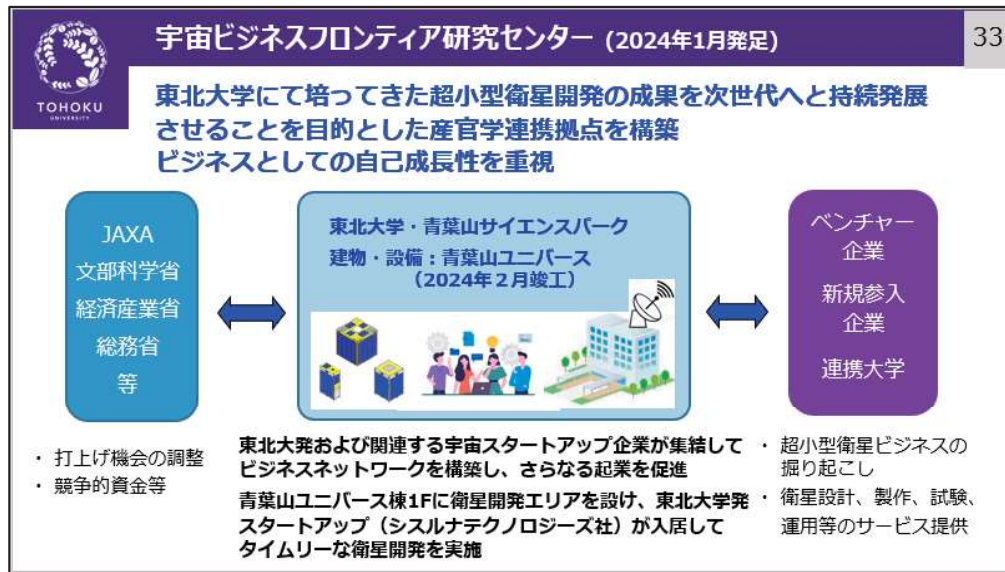
別の例としては台風。台風全体の姿を捉えることは当然として、台風の目の部分をポインティング制御で狙って拡大し、連続撮影することにより、目の立体構造を内側から明らかにすることにも貢献しました。これは世界初の試みでした。

これらは、その道を専門とするサイエンティストの人たちと一緒にやってきた成果です。大きなプロジェクトですと、どうしても最大公約数的なミッションになってしまう傾向がありますが、小型で短期間開発が可能な自分たちの衛星を持つことにより、自分たちが本当にやりたいことや、研究者やユーザーからのニーズに沿ってカスタマイズしたミッションを行うことができるのです。



図—31

<図—31> さらに、フィリピン政府からご要望をいただき、Capacity Building すなわち人材育成も行いました。Diwata-1, Diwata-2 と名付けた2つの人工衛星を、フィリピンから派遣された若い科学者やエンジニアの方々と一緒に開発することにより、衛星の作り方を伝授しました。2019年にフィリピンに宇宙庁ができたのですが、技術を学び取った学生さんたちが国に帰って、宇宙庁の初代メンバーとして活躍しています。



図—32



図—33

<図—32, 33> このような流れをさらに持続発展的に進めようということで、東北大の青葉山キャンパスの中に、この春、衛星開発に特化した新しい設備を作っていただくチャンスを提供しました。この建物の中に、衛星開発のための新しい拠点を今整備しているところです。



図—34

＜図—34＞ これは、経産省の産学連携拠点整備プログラムの一環で、今年の3月に出来上がったばかりの建物なのですが、その一階部分に衛星開発のためのクリーンルーム仕様の部屋をいただきました。人工衛星の製造や組み立て作業は、ほこりが入らないようにクリーンな環境で行う必要があります。

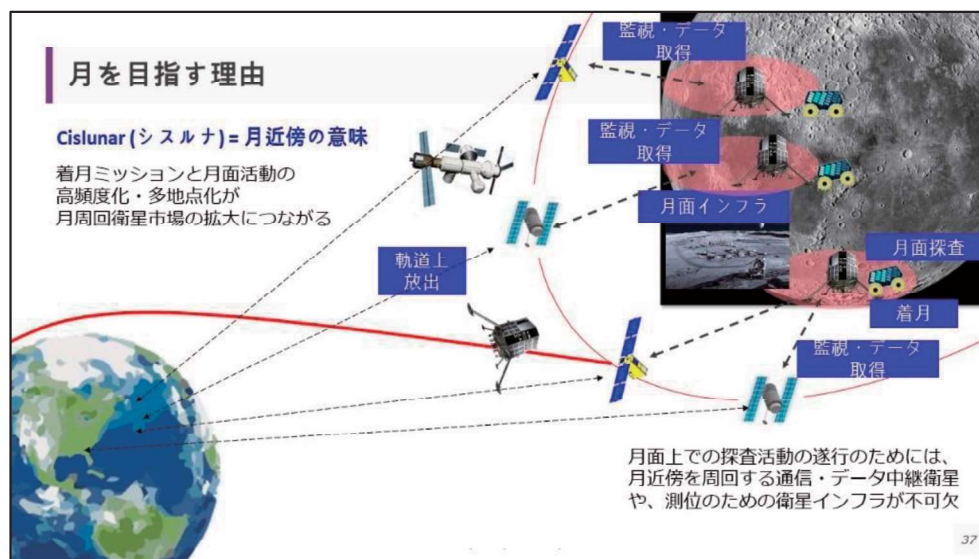
人工衛星の中身は、たくさんの電子機器が載っていて、配線だらけです。配線のオバケです。この1本1本が全部すべて機能しないと駄目ですし、宇宙空間に打上げてしまったあとに不具合に気が付いても修理しに行けないため、地上でしっかりと試験をしなければなりません。試験の仕方というのはチャンバーの中で真空や熱環境を模擬するなどがあるのですが、打ち上げ時の振動や衝撃で配線やネジが緩むことのないようにということにも気をつけなければならず、ひとつひとつの作業を丁寧に1品生産で作っていく、人工衛星を作るとはそういう作業の連続なのです。

ここは天井が高く、全体もクリーンルームになっており、出来上がった人工衛星をクレーンで吊りあげて専用のコンテナに入れ、シャッターを開けて運び出して、筑波や種子島の宇宙センターに輸送することを想定した設計になっています。そういった一連の流れが青葉山に拠点を置いてワンストップでできるような環境を、充実させていきたいと思っています。建物の名称として「ユニバース」（宇宙）という名前を付けていただきました。青葉山サイエンスパークにできたユニバース棟にて、実際に宇宙へ飛んでいく人工衛星を継続的に研究開発していきます。



図—35

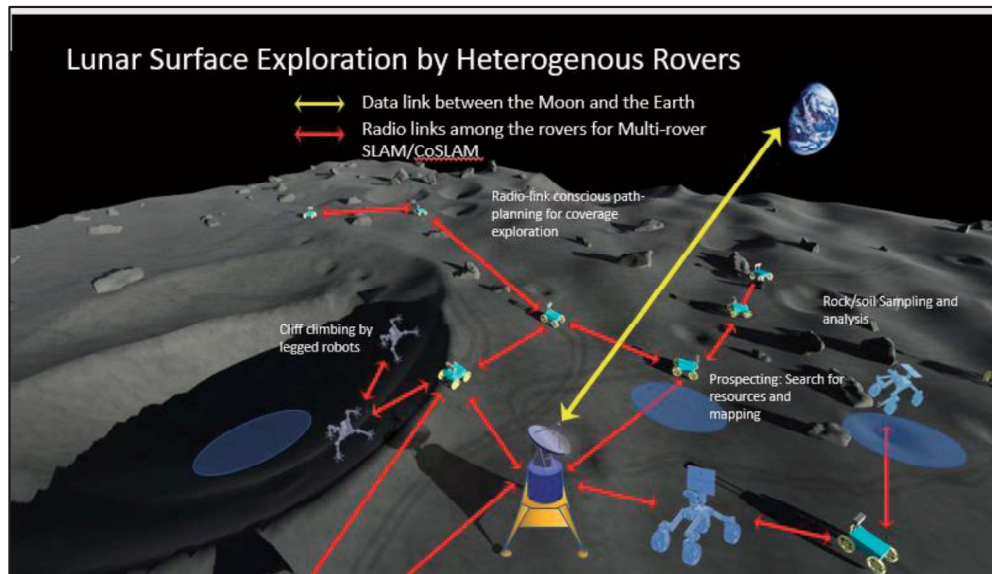
＜図—35＞ Topic 3でispaceというスタートアップを立ち上げた経緯についてお話ししました。そして、超小型衛星開発の分野でも、世の中のニーズに応え、人を育てながら、ビジネスとして回していくことを目指して、私にとっては2番目になる新しいベンチャー企業を作りました。シスルナテクノロジーズ株式会社という会社なのですが、「ルナ」は「月」、シスルナという言葉は「月近傍」という意味です。



図—36

＜図—36＞ 超小型人工衛星を作る会社がなぜシスルナと名乗るのかということ、この先、超小型人工衛星の活動領域は地球周回軌道に限らず、月近傍や月周回軌道へと展開していくと考えているからです。ispaceは月面への着陸をこの先メインビジネスにしていますが、月に降り立つ前も後も、月の周りにも人工衛星が必要です。月面活動を支援できるような人工衛星も含めて、地球周回の人造衛星と、月周回の人造衛星の両方にまたがる仕事をしようということで、シスルナテクノロジーズという社名にいたしました。

この背景として、より大きなフレームワークとしてはアメリカを筆頭とした国際協調で推進するアルテミス計画というのが今動いており、日本も含めてこの先、もっと月を目指していくという計画です。そこでは、官民が協力して月近傍に人類が長期滞在する時代が訪れ、シスルナ経済圏と呼ぶようなエコシステムへと展開していく未来像を見据えることができます。このような潮流の中で、小さな衛星が果たす役割も大きいと考えているところです。

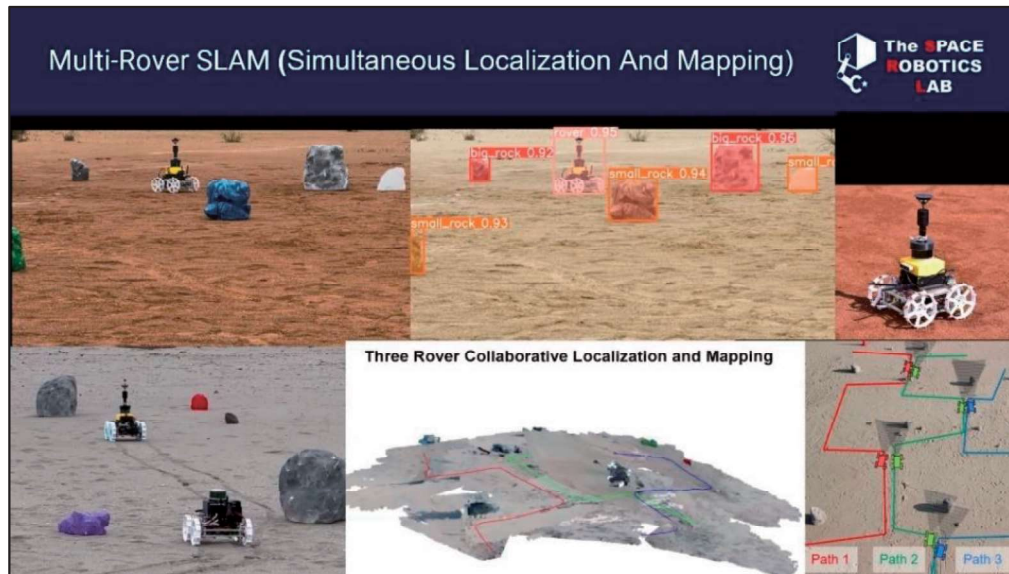


図—37

<図—37> 自分のロボット研究という観点で言うと、月に降り立った後、いかにロボットを展開して月面探査するか、一番そこがワクワクするところですし、ロボット研究者として一番やりたい部分です。その点は全く変わっていません。むしろ、探査ロボットの技術を深め、活躍の場を広げていく観点では、「単体の何でもできるロボット1台」を持っていくのではなく、比較的小型のロボットをたくさん展開し、それらのロボットが連携し、互いにネットワークして、エリアを広げながら探査していくことが重要だと考えています。

今、月に対する興味が一番大きいところは、月の日陰部分、特に北極・南極周辺の高緯度地方には永久日陰と呼ばれるような窪地があり、その永久日陰クレーターの内部に水氷、 H_2O が氷として存在している可能性が指摘されています。永久日陰は、摂氏-200度に迫る極低温の世界で、そういったところに水が気化せずに残っているのではないかと考えられています。ただし、水たまりが凍ったという状況ではないということもわかっており、おそらく土砂に混ざった凍土のような形であるのではないかとされています。

しかしながら、まだ誰も、無人探査機さえも、その場に行って水氷の存在確認はしていないのです。氷の存在が確認され、水を取り出して資源として使うことに道筋をひらくことができれば、科学探査から月面開発へと新しい世界が見えてきます。地球外で得られる資源として、鉱物資源を思い浮かべる方が多いかもしれませんが、実は水資源というのは非常に価値が高く、今みんなが注目しているところなのです。



図—38

＜図—38＞ ロボット技術をもって、未踏の月極域を探索し、水の存在を確認し、ゆくゆくは氷の採掘を行い、月面開発を担っていく、それに貢献できるようなロボットを開発したいとの思いで日々研究をすすめております。そこでは、車輪型や脚型などの形態が異なる複数のロボットが協力し、移動して探索範囲を広げながら情報を収集し共有し、未踏エリアの地図を作りながら、氷の存在場所をマッピングしていく（分布図を作る）という姿を想定して研究をすすめています。

今、この世界でもどんどんAIの技術が使われてきており、カメラ画像を入力すると、これは岩なので回避動作をしなければならないとか、この表面は軟弱な砂地で走行に注意が必要だなど、状況認識と動作経路計画ができるようになってきていますので、そういう最先端のAIを活用しながら、ロボット技術を高めていきたいと考えています。

■Topic 5：内閣府ムーンショットプロジェクト

Topic 5: 内閣府ムーンショットプロジェクト

ムーンショット目標 3 / JST

「2050年までに、AIとロボットの共進化により、自ら学習・行動し人と共生するロボットを実現」

研究開発プロジェクト「月面探査／拠点構築のための自己再生型AIロボット」(PM: 吉田和哉)

Moon Shot → 前人未踏で非常に困難だが、達成できれば大きなインパクトをもたらす、イノベーションを生む
 壮大な計画や挑戦のこと。

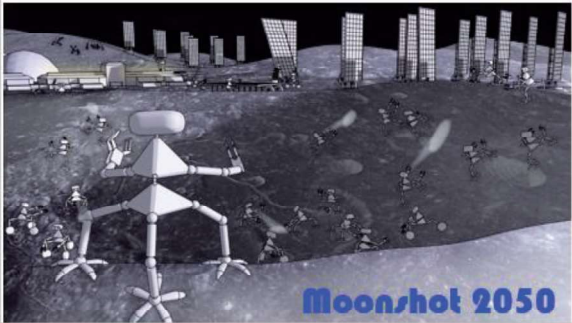
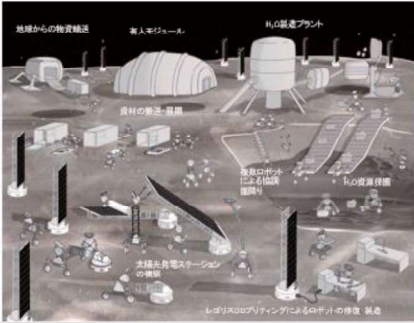
壮大な目標 → 実行計画をバックキャスト
 様々な技術革新、スピノフ

Here begins our new MIRAI



MOONSHOT
RESEARCH & DEVELOPMENT PROGRAM

宇宙 × ロボット × AI

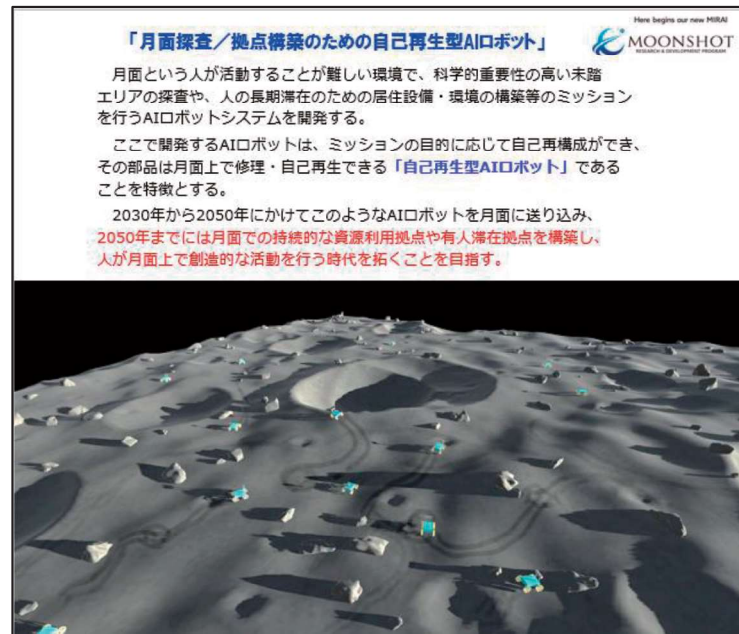



図—39

＜図—39＞ 破壊的イノベーションを創出することを目指して、内閣府がムーンショット型研究開発制度を推進しています。「ムーンショット」とは、前人未踏で非常に困難であるが、達成できれば大きなインパクトをもたらす、イノベーションを生むような壮大な計画や挑戦のことで、月を目指すかつてのアポロ計画のように、そして、ゴルフにおいて球が月まで届くぐらいの、普通では達成できないような壮大なことを示す言葉として使われています。

内閣府のムーンショットプログラムでは、2050年をターゲットとして、いろいろな分野、カテゴリーで大目標が設定されていますが、その中の1つに「AIとロボットの共進化」というカテゴリーがあります。私はその中で、すごく愚直にAIとロボットを使って月面探査・月面開発をしますというシナリオを掲げて提案させていただき、2022年に採択いただきました。

私はこれまで「宇宙×ロボット」の研究開発をしてきたわけですが、ムーンショットプロジェクトでは、これにAIを掛け合わせて、「宇宙×ロボット×AI」という切り口から、時代を切り拓くような新しい挑戦を続けていきたいと考えています。



図—40

＜図—40＞ 研究課題名として「月面探査／拠点構築のための自己再生型AIロボット」ということを掲げました。月面でのミッションとしては、探査の次には、人が長期滞在できる有人拠点を作ることが重要だと考えています。月面上で人が活動する時代を作り、そこに経済圏を生み出すことをイメージしています。ではどうやって月にそのようなインフラを作るかというと、これは宇宙飛行士がやるべき仕事ではなく、Topic 1で故障した人工衛星を回収するのは人がやるべき仕事ではないとお話したのと同じように、月面に何か作る、建設するというのも、ロボットがやるべき仕事です。しかも1台ではなく複数のロボットが協調して、そしてそれぞれのロボットが進化する知能(AI)を搭載して、大きな事業を展開するのです。

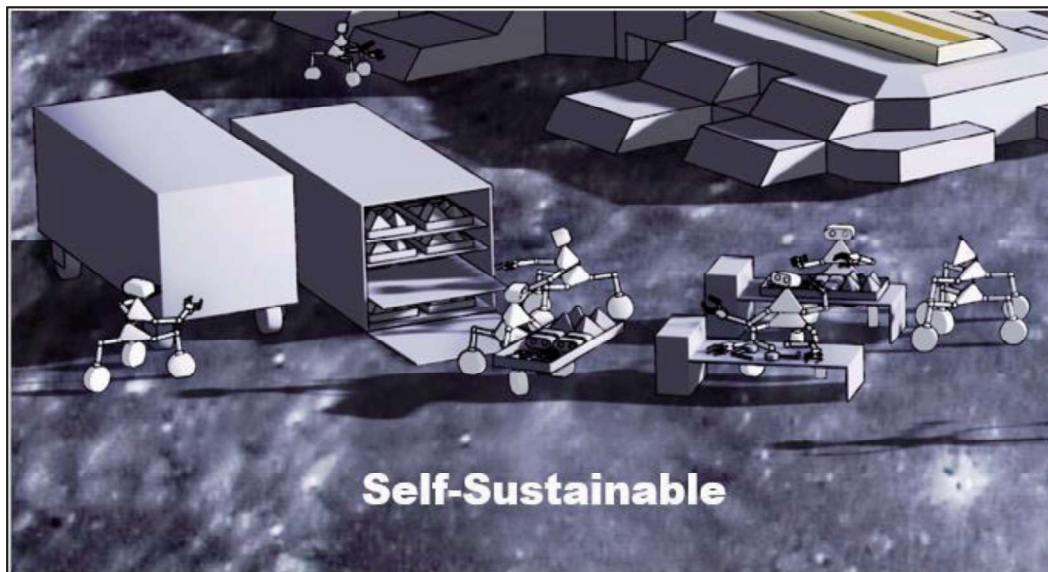


図—41

＜図—41＞ 2050年までに、月面上で現地の資源利用をベースとした持続可能な有人滞在拠点を、ロボットが作り上げていく、そのような未来像をブレインストーミングするところからプロジェクトをスタートさせました。

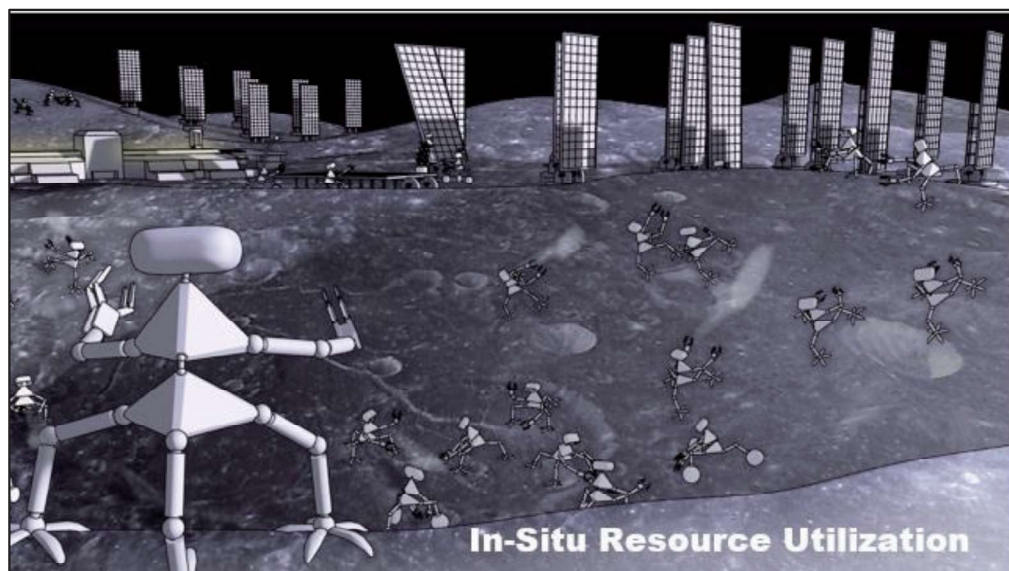
この図は、まさしく2050年の月面未来都市をイメージしたものになっています。人は与圧室（建物の中）で知的活動に従事し、危険なアウトドア環境で動いているのはすべてロボットです。手前のク

レーターの底では、ロボットが水氷を掘って、それを資源として活用する作業をしています。エネルギー源として電力が必要ですので、太陽電池パネルを垂直に立てた発電タワーを作り、通信のためのアンテナを設置し、いわゆるインフラを作る部分はすべてロボットが行います。



図—42

<図—42> これまでの宇宙探査ロボットは、一部を展開型として設計されているものがあるものの、最初から出来上がりの姿をしており、宇宙船により月、火星や、小惑星に運ばれて、現地で展開して活動し、ひとたび活動を始めたら最後まで形を変えない、というのが常識になっていました。ここでは、その考え方を転換し、腕や脚や車輪のような機能要素に分けてロボットを輸送し、現地で組み立てを行い、運用中もミッションに応じてロボットの形を組み替えることができ、また一部が故障した場合は故障した部分のみを交換して再生するという、モジュラーなロボットを実現することを目指しています。



図—43

<図—43> 再生の仕方は、モジュールを新規のものに置き換えるだけではなく、将来的にはモジュールそのものを月面上で採掘される資源を用いて製造することができれば、世界観が大きく変わるのではないかと思います。

ムーンショットプロジェクトにおける 技術挑戦課題

- ・ 現場でのニーズに応じてロボットを展開する
 - ロボットがロボットを組み立て
 - 必要に応じて部品を再利用
- ・ モジュラー機構+モジュラー制御系
 - Plug-and-Play AI システム
 - 階層型の機械学習と制御統合
- ・ 月面特有の環境条件
 - 真空、温度 (-150℃以下 ~+100℃以上)
 - 日照条件
 - ダスト (レゴリス) 環境
 - 1/6 重力






45

図—44

＜図—44＞ そのためには、現場でのニーズに応じて、ロボットがロボットを組み立てるという仕組みが必要です。汎用的な結合機構を使って、機械的なモジュラー性を実現することが一番ですが、電気的な制御系もモジュラーであること、つまり「Plug-and-Play」であるということが、このプロジェクトの中で大事なキーワードだと思っています。

私たちの身近で実用化されている「Plug-and-Play」システムの代表例は、コンピュータまわりのUSB機器です。USBという決められた規格のデバイスをパソコンに接続すると自動的に認識してシステムが動き出します。ロボットも同様に、腕モジュールや、脚モジュールをロボットボディーにカシヤンと差すと、その結合状態を自動的に認識してボディー+腕+脚という形態で意味のある動きを始める、そのような仕組みを作りあげていきたいと考えています。そこにAIや機械学習をうまく絡めた統合制御系が実現できれば、知的な動作を学習し、形を変えて進化するロボットの実現に迫ることができると思っています。

ハードウェアとしては、もちろん、月面という厳しい環境条件できちんと動くものを作らなければいけないと考えています。

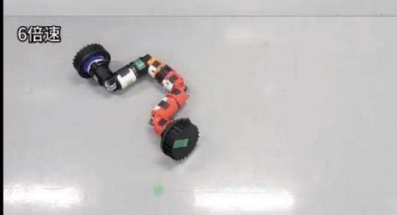
モジュラーロボットの基礎実験 1 (PI: Prof. Matsuno at Osaka Inst. of Tech)




6倍速



6倍速



4倍速



2倍速



視点 2

図—45

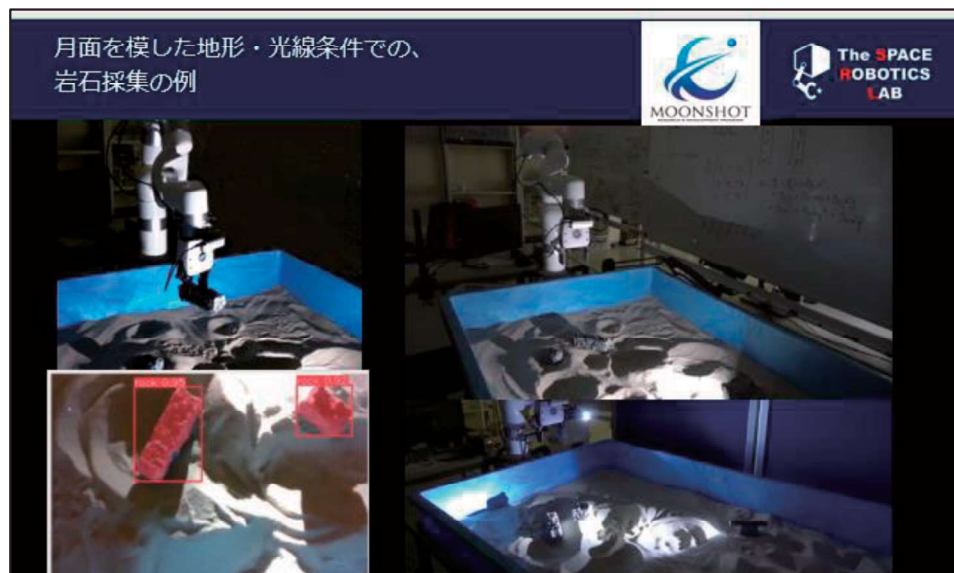
＜図—45＞ プロジェクト1年目の様子をお見せしたいと思います。モジュラーロボットの研究は実はロボット業界の中ではずいぶん昔からある話で、入口としてまず基本をおさらいしようということ

で、いくつかの関節からなる単純なメカが、うのようによと動いて、結合し、車輪をつけたり、ボディに結合するなどの実験ができるロボットを作りました。



図—46

<図—46> こちらは車輪ではなく脚で移動するタイプのロボットです。結合部分にマグネットを使ったおもちゃのようなロボットですが、モジュールの結合状態を認識すると、例えば2脚の場合にはこういう動き方をする、4脚だとかいう動き方をする、脚の部分のを腕（マニピュレータアーム）に変えるとかいう動き方をするなど、興味深い動作モードを実現することができます。



図—47

<図—47> 次に画像認識系の要素技術に関する演習問題的なものなのですが、月面を模した箱庭のような砂場を作り、そこにいくつか石を置いて、光を斜めから当てる。人間の目でも、どこに石が落ちているか識別するのは難しい状況の中でも、AIを使って適切な学習をすると、石を認識して、グリッパーの向きを合わせて拾い上げる、そして、大きいものから小さいものへと順番に積み上げていくなどの動作実験を行いました。今の画像認識系AIを使うと、比較的短い開発期間でこのような機能を作ることができます。



図—48

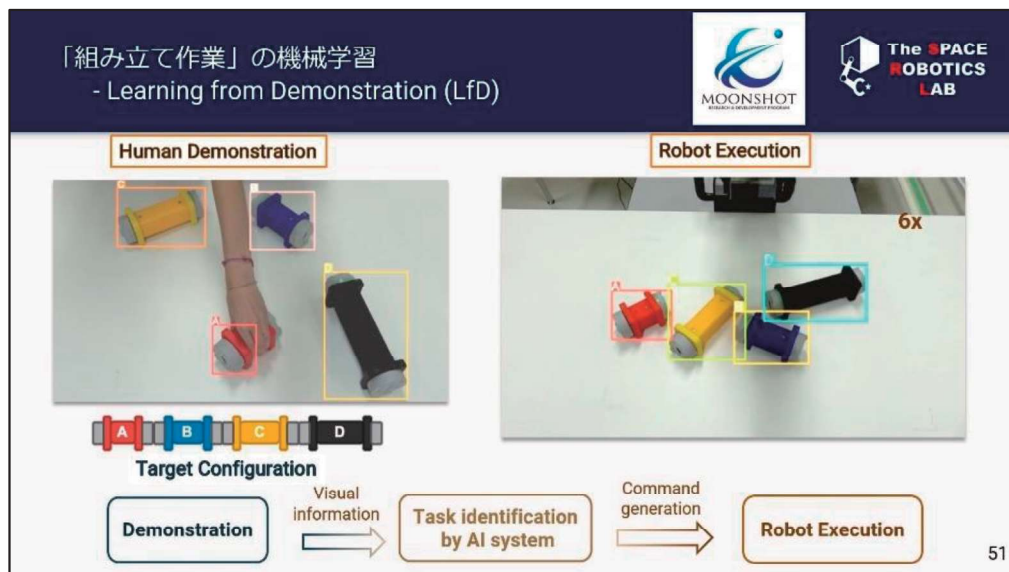
＜図—48＞ こちらは月面を安全にナビゲーションするための障害物（岩）の認識です。実は左側半分の画像は人工的に作り出したシミュレーション画像、右側半分は実験室での本物画像で、この両者をうまく結びつけることができれば、月面での本番前にシミュレーション世界で事前学習することが可能になります。リアリティーの高い月面シミュレーション画像をいかに作るかというところも、学生が頑張っています。



図—49

＜図—49＞ この動画では、ロボットがロボットを組み立てるというシナリオに向けたデモンストレーションを行っています。マニピュレーターアームがロボットの部品を拾い上げて結合し、モジュール間の結合が認識されるとロボットが歩き出すという流れを、実験で示しています。

出来上がったロボットを地球から慎重に運ぶのではなく、モジュール化された要素を現地で組み立てるというコンセプトが一番大事なポイントです。



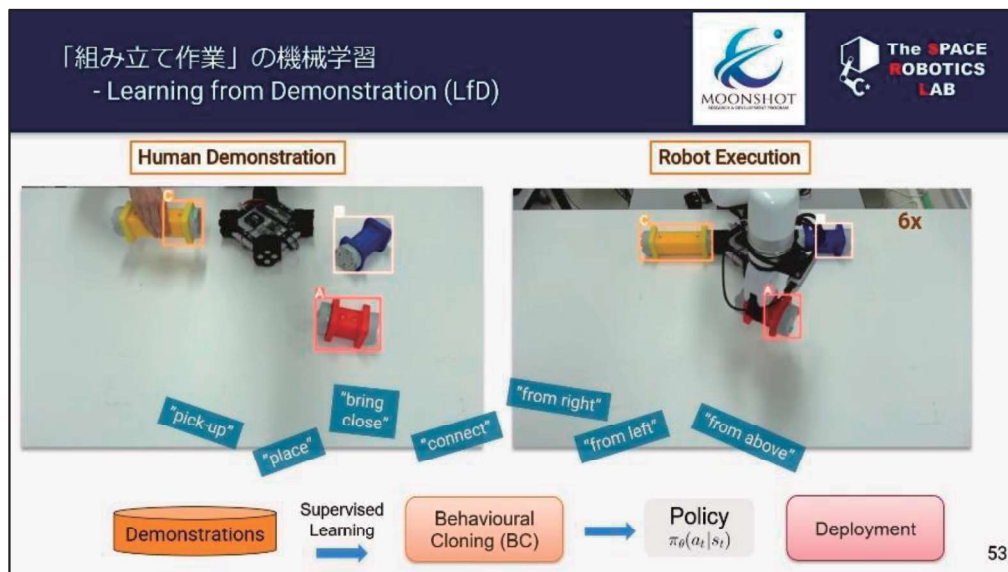
図—50

＜図—50＞ ロボットによる組み立てに関して、少しAI的な話をさせていただければと思います。今、機械学習の分野でホットトピックの1つになっているものに「Learning from Demonstration」というコンセプトがあります。人がお手本を見せて、それをロボットが真似をする。大人が子供に、あるいはコーチが選手に動きを教えるということに通じる考え方です。アイディアそのものは以前から議論されてきたものなのですが、今のAIを使うとこんなデモンストレーションができるという例を示しています。ここでは、非常に単純なおもちゃのブロックの組み立てを例にとりて、人が赤、青、黄色、黒の順番に組み立てる、というようなお手本を見せると、画像システムがABCDの繋がりを認識し、ランダムに置かれた初期状態からブロックを拾い上げて、同じ順序になるように組み立てることができま



図—51

＜図—51＞ ブロックの初期配置をいろいろ変えたり、あるいは目標とする配列を変えたりしても、同じシステムで同様の動作を実現できます。ロボットがお手本を真似るような動きをすることからイミテーション・ラーニングと呼ばれるのですが、これを深掘りしていくと非常に興味深いです。



図—52

＜図—52＞ これは少し形を変えて、黒いハブの周りに3つの違うコンポーネントを繋ぐというケースです。これらの動作では、画像認識を使ってオブジェクトの色や形を認識し、識別できるという点が出発点になっているわけですが、もう一步踏み込むと、今のAIでは色や形だけではなくそのオブジェクトが持っている特性、意味や目的、すなわちセマンティックなところも学習でき、オブジェクトだけではなく、「拾い上げる」や「結合する」、さらには「右側から結合する」や「左側から結合する」というアクションに対する意味付けも含めて学習することができるようになってきています。

部品箱にいろいろな部品が入っていて「私は今こんなロボットが欲しい」というタスクを与えると、ロボットが必要な部品を選んで拾い上げ、組み立ててくれる。そういう作業を、AIを駆使して自律的に実行できる可能性が、すぐそこまで迫ってきていると感じています。

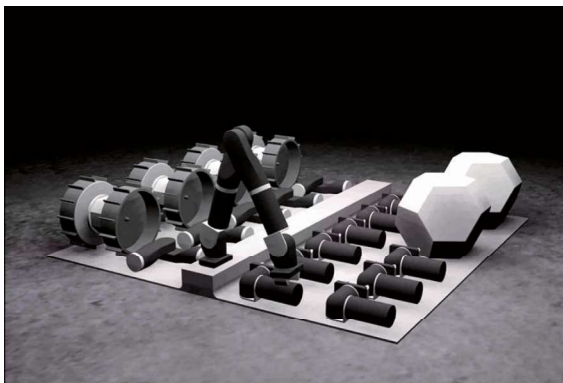
今、生成系AIという分野が非常に進んでいます。ChatGPTは文章を作れるわけですが、文章を作るという行為と、ブロックを組み立てる行為は基本的に同じであると私は考えています。文章というものは単語の組み合わせでできていて、人間が話す自然言語の中で、この単語の後には必ずこれが来なければいけない、この逆順は意味をなさない、などなど、人々が語る言語の最大公約数的な決まりごとの集大成が文法です。しかしながら、今のAIは文法のようなルールに基づいて作文するのではなく、膨大な実例データに基づいて、Aという単語の次にはBという単語が出現する確率が高いということを学習することを基本としています。

多数のパーツの中から意味のある機械を組み立てるという行為も同様に、何と何をどのように結合するとどういう動作をするメカが作れるのか、そのような機械部品の組み立てデータを膨大に蓄積していくと、先程申し上げたように、「こんな動きをするロボットが欲しい」という要求に対して、意味のあるものを産み出すことができるようになっており、機能を与えてモノをデザインするという世界にまで展開できるのではないかと夢見ています。

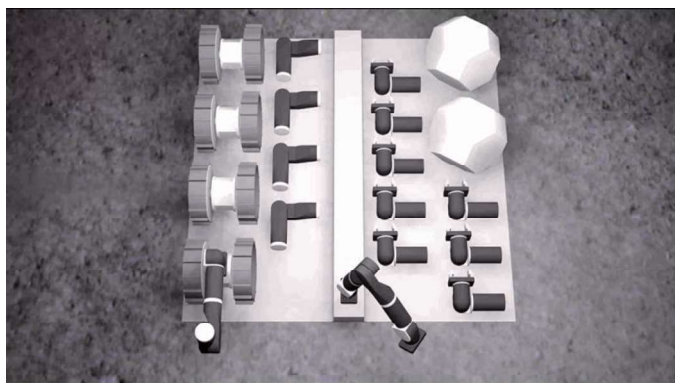


図—53

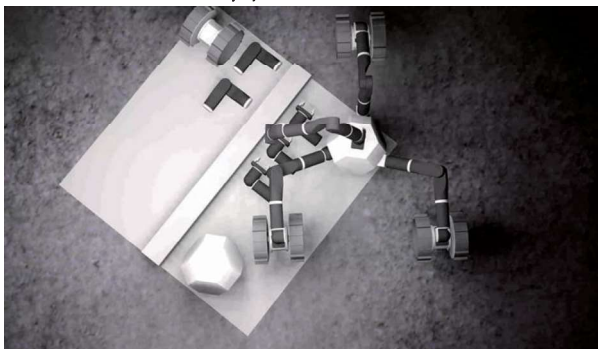
＜図—53＞ このデモは4脚ロボットの組立作業です。ロボットアームの動作を一つずつ指令しているわけではありませんが、まだ自律性がそれほど高いわけでもありません。現時点では、脚のこの端面と、ボディーのこの部分が結合しなければならないというレベルまでは、なんとか学習できたかな、という状態です。



図—54



図—55



図—56



図—57

＜図—54, 55, 56, 57＞ ロボットをモジュールに分割して月に持っていくことは、運ぶ時の輸送効率を高めるといった効果があります。パレットの上にモジュールを整然と配置した状態で輸送し、最初の1本のアームが親となって、手首や肘関節、車輪などいろいろなモジュールを組み合わせて意味のあるロボットを作っていく。こういう組み立て作業を自律的にやらせたいと思っています。組み上がった形として、例えば三輪車のベースの上にアームを搭載したロボットが完成し、これが走り出して月面の世界を走り回る。このようなシナリオを考えています。

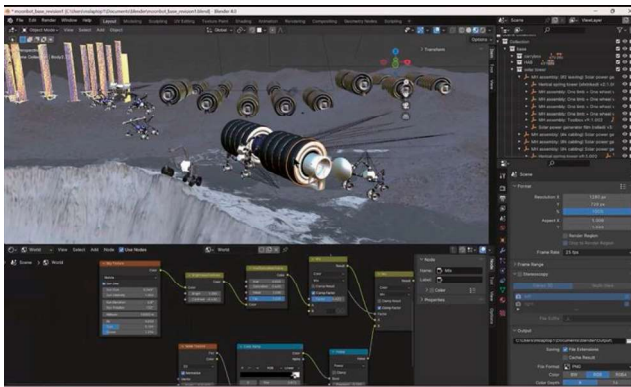
ちなみに、図-57では私たちの最新のシミュレーション技術を使っております、月面というのは非常に柔らかい砂で覆われており、車輪が回って、そこに轍を作りながら走る。テラメカニクスという分野の研究成果を反映したシミュレーション動画になっております。

これらのロボットは、まだ絵に描いた餅と思われるかもしれませんが、実は既にハードウェアの設計は進んでおり、メーカーさんに製造をお願いして、この夏には実物が出来上がってくる予定です。

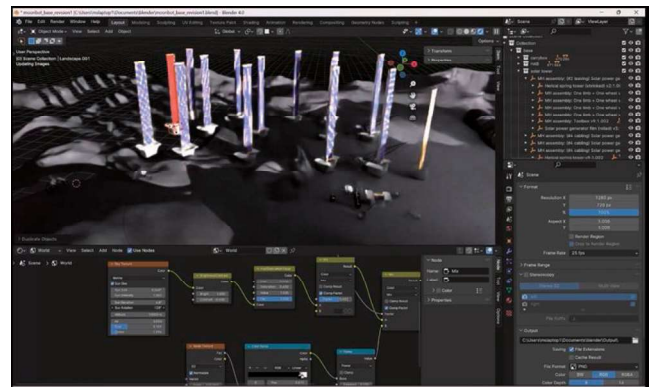


＜図—58＞

＜図—58＞ 出来上がってきたハードを実際に動かしていくことが次のフェーズになるわけですが、まずはその前に、様々な作業を想定したシミュレーションを学生さんたちに取り組んでもらっています。



図—59



図—60

＜図—59, 60＞ 繰り返しになりますが、「こういうロボットが何をするのか」というミッション・シナリオを考えていくことが一番大事です。例えば、人が住むような居住空間を作ろうと思ったら、月面上で大きく風船のように膨らむ、インフレータブル方式の円筒形の居住ユニットを作ることが有力なアイデアとなります。ロボットが必要な物資を運び、適切な場所に設置して、インフレータブル・ユニットを展開する。電力確保が重要なので、太陽発電タワーを作る。高緯度地方では太陽光の入射角が低いので、垂直に帆を掲げるような形で複数の太陽発電塔を立て、1基あたり数キロワット級の発電拠点を作る。クレーターの底ではロボットが水資源を採掘する。…などなど、こういうことがすべて全体システムとして機能するようなシナリオを描き、これをオールロボットで作っていく。そこにはAIが最大限に活用され、何か故障やトラブルが起きたら、故障箇所を認識して部品を組み替えたり、修理したりと、そういった世界観を実現しようと、今プロジェクトを推進しているところです。



図—61

＜図—61＞ 将来の月面探査を担う変幻自在なロボットを目指して、今年(2024年)の夏から地上実験を開始し、今後数年以内には宇宙実証へと開発を進めていく予定であります。

■さいごに



図—62

<図—62> 今日、5つのトピックをお話ししました。5つめのもの、内閣府のムーンショットプロジェクトは、まだまだ研究途上のものです。

私が学位を取った後、東京工業大学から東北大学に移り研究生活を始めたのは、1995年です。異動の際に助教授のポストをいただき、教授がいない研究室でした。それは非常にラッキーなことでした。自分で本当にやりたいことを、やりたいようにさせていただくというチャンスをいただきました。ただ学生数やリソースはとても小さくて、一番最初の年は、修士課程の学生1人、学部生2人、私を含め計4人という人数でやり始めました。右上は初期の頃の写真で、この時は少し増えて学生7人くらいの時のものですが、その時に思ったのは少人数でも最先端の研究はできる、いや少人数だからこそ楽しい研究ができる研究室を作っていきたい、と思っていました。

それが今、結果的には非常に巨大な研究室になっております。本田財団のご縁で出会ったAditya君というインドから来た学生さんも含めて、留学生もたくさん来ております。国際化のきっかけになったのが、世界中の人たちが集まって、宇宙のことをみんなで一緒に学ぼうという、国際宇宙大学（フランス・ストラスブールに本部を置く大学組織で、毎年世界各地でサマーセッションを開催している）でした。そういう斬新な大学教育を行う組織に、若い頃から教員としてコミットするチャンスをいただいたのも、私にとって大きな経験となっています。実はこの週末から、アメリカのヒューストンに移動し、現地で開催されている国際宇宙大学の今年のサマーセッションに参加する予定にしています。宇宙大学では、宇宙ロボットの講義に加えて、ロボットコンテストを短期間のワークショップとして実施しており、1998年よりほぼ毎年やり続けています。



図—63

＜図—63＞ 縁が巡り巡って今現在、私の研究室には、学生、スタッフ合わせて80名おります。その中で外国人は31名で、外国人の半分ぐらゐは交換留学生や研究生で、滞在期間が3ヶ月や半年、1年などの様々なプログラムで来ていただいております、それぞれのスケジュールで到着し、帰国していきますので、今日現在何人いるか私も即答できないぐらいです。1人1人手続きをすることはとても大変なのですが、いろいろな子が次々に来て、楽しい研究をして次々に巣立っていく、そういうダイナミックな状況で研究室をまわしています。写真はクリスマスパーティーの様子ですが、こういう規模感で多様なキャラクターが集まってダイバーシティに富んでいる、というのが私の研究室です。

少し乱暴な言い方ですが「来るもの拒まず」にいろいろな学生を受入れ、一緒に何かをやって、楽しいと思っていただいて国に帰ると、また次の人たちを呼び込んでくれるのです。そういうことで、どんどん輪が広がり、小さな研究室がどんどんと大きくなり、今日お話をしたような5つのトピックを、それぞれの研究チームに分けて同時進行で手がける、そういう規模感の研究室が今実現できているという状況です。



図—64

＜図—64＞ 私自身がしてきたことは、大きな夢に向かって本当に自分がやりたいことを、自分のやりたいように、直感を信じて自由自在に自由奔放にさせていただいたというのが正直なところですよ。

今日限られた時間の中ですが、その一端のお話をさせていただきました。本当にご清聴ありがとうございました。これにて終了したいと思います。

【質疑応答】

司 会： 吉田先生、どうもありがとうございました。では、ここから皆様のご質問を受け付けたいと思います。それでは先生にご質問のある方は挙手でお知らせください。

参加者 1： 今日いらっしゃる皆さんにはそういう方々が多いと思うので、ぜひ民間企業とかさまざまな分野で宇宙分野に関心を持たれている方も多い、最近進出を発表している企業あるいはコンソーシアムがたくさんございます。そういうものを含めて民間企業への期待ですとか、こういうところ、ぜひ参画してほしいという呼びかけ、メッセージをお願いします。

吉 田： 大変すばらしい質問をありがとうございます。申し上げたいことはいっぱいあります。基本的に私自身がJAXAの身分も持ったことは一度もないんです。ですので常にJAXAの外にいて、何ができるかというのを考え続けてきました。

宇宙はやはり非常にハードルが高い世界だと思います。宇宙へ行くのはそう簡単なことではないですし、ロケットひとつ打ち上げるためにも非常に大きなお金がかかる。いきおい、国のプロジェクトで本当に選び抜かれた人たちだけが、限られた機会にしか行けない世界というのが宇宙である、というふうにずっと思われてきたと思うんですが、私がやってきたことは、その世界観を変えたいというのが一番大きかったと思います。自分自身が宇宙機関の人間ではなかったのも、私のような大学研究者でも、自分のやった研究成果が宇宙に飛んでいくんだっていう時代を作りたい。ずっとそれをやってきたというところなんです。今はどんどんハードルが下がってきていると思います。いろいろな人が参加できるチャンスが増えてきていると思いますので、ぜひ一番の入り口は、宇宙が遠い世界だとかハードルが高い世界だと思わないでいただきたいと思っております。宇宙はもう手の届くところまで来てます、というのが一番大きなメッセージかと思います。

もうひとつ申し上げますと、JAXAがやっていることとか、アメリカでもNASAがやってきたことを「民営化」しますということが言われてきています。しかしながら、特に日本でこれまで言われてきた民営化に対しては、私は「ちょっと違うな」という違和感を持っています。国の財源が全てであるような宇宙プログラムを、民間企業にプレーヤーとして実施させるだけでは、官需に依存する体制が変わらない限り、持続性も発展性も期待できないというふうに私は思っています。

やはり自分がispaceやシスルナテクノロジーなどスタートアップや新しい会社を作ってオンゴーイングでやっていく中で感じていることは、官需に頼るのではなく、自分たちでそれぞれの企業が自活できるようなビジネス機会を探して、ペイするような仕組みを模索して作っていく、そうすることにより資金循環のパイが膨らみ、新しい経済を産み出していく。そのようなシナリオをみんなで真剣に考えていかないと、うまくいかないと思っています。そして国には、このような動きを作り出す呼び水として、政策的な資金を投下していただければと願っております。

そして今、幸いなことにそのような風が吹いています。その潮流が動き出したと感じていますので、繰り返しになりますが、宇宙は遠い世界でもないし、ハードルの高い世界でもなく、みんなが参加してどんどんこの先開拓していく。そこで、ビジネスオポチュニティが作り出せる世界だというふうにマインドを切り替えていただけると嬉しいなという風に感じております。

司 会： それでは、もうひとつ方程度ご質問のある方受け付けたいと思いますが、どなたかいらっしゃいますでしょうか。

参加者 2： ロボットをモジュール的に作るというお話で、それを生成AIの単語をつなげるイメージでおっしゃっていたんですけども、今の生成AIでLLM (Large Language Models) で実現する方式と、先生がおっしゃったロボットをモジュール的に作るもので考えた時に、どこが一番似ていて、どこが一番違っていて、どこが一番難しくていつ頃できるかということを、是非みなさん聞きたいのかなと思います。言語は簡単ですけど、みんなロボットというか動くものは難しいと思っているので、ぜひとも伺いたいです。

吉 田： 私も今オンゴーイングでやっているところなので、もちろん何か正解を持っているという訳ではないんですけども、私も学生時代からAIの潮流というのを見てきており、AI研究者とロボット研究者との間で結構距離感があった時代も知っています。AIの世界というのはコンピュータの中でのバーチャルな世界、あるいはサイバーな世界という言い方のほうがいいのかもかもしれませんが、その世界で閉じることができて、プログラムとか言語とかデータとか、そういう世界で完結するAIが現実に応用されてきているわけです。

ソフトウェアの世界では加速度的に進化してきているわけですが、ロボット研究者としては、AIはサイバーな世界だけでは終わらないと思っています。ロボットというのは物理世界で、現実世界で動かなければいけない。それはすごく大事で、動かないロボットは意味がないわけです。だから、どんなに言語能力が高くても、どんなに知能が高くても、「動かなければダメですよ」っていうのが、ずっとロボット研究者がAIを批判的に見ていた時の論点だったと思うのですが、今それがかなり歩み寄ってきています。今の、どんどん進化しているAIが、現実世界のロボットを動かすところにかかなりつながってきています。

一番の切り口はビジョン（画像処理系）だと思います。ビジョンで認識をするというところがかなり進んできていて、昔は「テーブルの上のグラスを取ってください」というコマンドはロボットの世界では解決できなかったんです。手先のXYZ座標を与えて、ここに動きなさいというコマンドであれば、問題なく動作します。しかしながら、「テーブルの上のグラス」といった概念をどのように記述して、あるいはモデル化してロボットの制御系に組み込んだらいいのか、あまりにも複雑すぎてできなかったのです。それが今のAI的なアプローチを使うと、画像による物体の認識はすぐにできるし、それぞれの事物の意味付けにも踏み込むことができるようになってきています。

ですから私はAIの成果をどんどん、物理世界でロボットがアクションをする世界に取り込んでいって、今までできなかったことをできるようにする。それが、ロボット工学者がやるべきことなんじゃないかと思っています。

生成AIの世界ではLarge Language Modelsがどんどん進化して、人と自然言語で違和感なくやりとりができるところまでできていますが、その成果をロボットを担い手として、物理世界に展開していくことが一番ホットで面白い領域だと思っています。つまり、ロボットがその行為を自然言語レベルで理解して動作するというのを、いかに実装していったらよいかという課題だと思います。私も是非いろいろアドバイスいただきたい立場ですし、一緒に研究する仲間を増やしていけたらいいなと思っています。お答えになれば、幸いです。

司 会： どうもありがとうございます。それではお時間の関係もございますので、これでご講演を終了いたします。吉田先生、本日はどうもありがとうございました。
(拍手)

■このレポートは 2024 年 6 月 14 日コートヤード・マリオット銀座東武ホテルにおいて行われた、第 153 回本田財団懇談会の講演の要旨をまとめたものです。本田財団のホームページにも掲載されております。

講演録を使用される場合は、事前に当財団の許可を得てください。

MEMO

[illegible]



発 行 所 **公益財団法人 本田財団**

104-0028 東京都中央区八重洲 2-1-1 YANMAR TOKYO 6 階

Tel. 03-3274-5125 Fax. 03-3274-5103

www.hondafoundation.jp

発行責任者 角 田 正 樹