

組み立てを終えて報道公開された小惑星探査機「はやぶさ2」。左の写真には再突入カプセル、右の写真にはイオンエンジンが見える。

宇宙科学最前線

燃料電池を使って CO₂を除去する

長岡技術科学大学 大学院工学研究科 教授
宇宙科学研究所 宇宙機応用工学研究系 客員教授
梅田 実

宇宙閉鎖空間における生命維持のためには、酸素の供給と二酸化炭素(CO₂)の除去が必要不可欠です。私たちの研究グループでは、燃料電池を用いてCO₂を有効利用する新しい研究を進めています。第一段階では、CO₂を還元しながら発電する新規な燃料電池の研究と、それをを用いる次世代空気再生システムの開発を行っています。第二段階では、CO₂を還元して資源化する究極の炭素循環システムを目指します。本稿では、私たちの取り組みについて紹介します。

宇宙閉鎖空間とCO₂の除去

CO₂は地球上ではほぼ無尽蔵に存在し、自然界で循環しています。CO₂固定化の典型例が光合成ですが、化石燃料の使用による大気中CO₂濃度の

増加は、CO₂固定化を上回る勢いです。それによる大気組成の変化が、地球温暖化の要因としてたびたび取り上げられていることは周知の通りです。

地上の生活空間におけるCO₂濃度は現状で0.03%程度ですが、これが数%を超えた場合、人間は頭痛、めまい、吐き気を催すようになります。さらに高濃度になると、意識を失い重篤な状態になるとされています。このことは、通常的生活空間では重要視されないCO₂濃度管理が、人間の活動を伴う宇宙閉鎖空間では、生命維持の観点から極めて重要な課題であることを意味します。

現在、宇宙閉鎖空間でのCO₂除去技術は、アルカリ性の水酸化リチウムに吸収させる方法や、ゼオライトと呼ばれる吸着材に吸収させる手法が採用されています。特に前者の場合は、吸着材が使

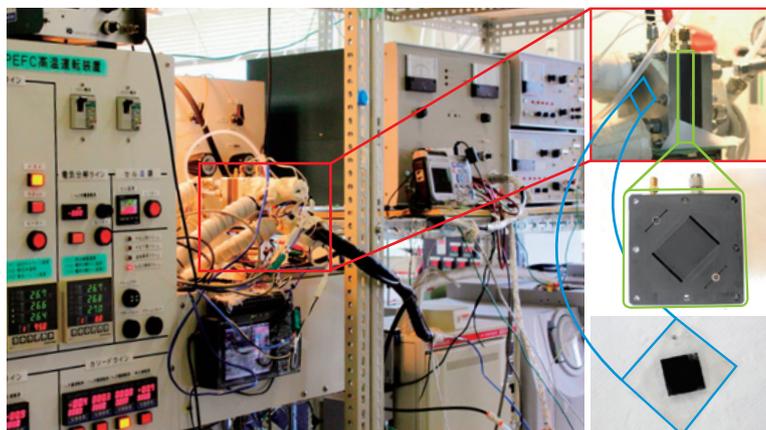


図1 水素—二酸化炭素燃料電池のための試験運転装置

ガス供給システム、燃料電池セル、電気化学測定装置、ガスクロマトグラフ質量分析装置で構成される。右上は燃料電池セルの外観、右中は燃料電池セル内のガス流路写真、右下は燃料電池内部の電解質膜（透明膜）と電極触媒層（黒色部）。

い捨てになってしまいます。

長岡技術科学大学の研究室と宇宙研の研究グループは共同で、宇宙閉鎖空間のCO₂を単に除去・廃棄するのではなく、リサイクルすることに取り組んでいます。そのためには、CO₂を還元する新しい技術開発が不可欠です。なぜなら、CO₂は炭素が最も酸化された安定状態にあるからです。

私たちは、独自の技術開発によりCO₂を還元しながら発電する新しい燃料電池の研究を行っています。第一の要点は、この燃料電池を利用した次世代空気再生システムの開発です。第二に、この技術開発が完成すれば、CO₂を資源として活用することが可能となります。これは、閉鎖空間におけるCO₂リサイクルに限らず、地球上あるいはCO₂を持つほかの惑星や衛星においてCO₂を炭素資源として利活用する革新技術になると期待されます。

CO₂還元はなぜ容易に進行しないか

一般にCO₂は化学反応に対して安定です。ここでは、熱化学方程式でCO₂が関わる反応を眺めてみましょう。メタン(CH₄)の燃焼は、



で表され、生成熱は890kJ/molです。つまり、酸素を使ってメタンを燃焼させると、890kJ/molの燃焼熱が得られます。

次に、CO₂の還元を考えるに当たり、CO₂にH₂を作用させると、次の(2)式が成立します。



この反応は、253kJ/molの生成熱を伴う発熱反応

であり、自発的に進行すると考えられます。しかし実際に発熱反応が起こることはなく、正反対の吸熱反応であることが経験的に知られています。

この(2)式をめぐる一見矛盾した反応は、式中に表記されない吸熱過程の存在で説明されます。その一つが、結合解離エネルギーです。具体的に、C-O解離させるためには、348kJ/molの熱エネルギーを外部から加える必要があります。この例が示すように、(2)式はいくつかの素過程に分解でき、その中で最も遅い(吸熱量が大きい)ものを律速過程といいます。

では、律速過程を解消する方法はないのでしょうか？この問いに対する解答は、触媒の利用です。

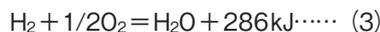
少し難しい説明になったかもしれませんが、適切な触媒を使用することで、律速過程は解消できます。もし、すべての素過程が触媒の使用で円滑に進行するなら、(2)式のCO₂還元反応は発熱反応として進行することになります。さらには、(2)式の生成熱の一部は、発電に使うことができます。

CO₂を用いて電気をつくる

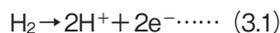
以上で述べてきたように、CO₂還元は経験的に実現が困難であるものの、理論上は容易に生ずるはずですが。私たちは、CO₂還元を、発電装置である燃料電池に託すことにしました。

ここで、燃料電池について少し説明します。通常の燃料電池は、水素を負極に、また酸素を正極に供給することで発電する装置です。通常の蓄電池(乾電池)が酸化剤と還元剤をパッケージに封入しているのに対して、燃料電池は酸化剤(酸素)と還元剤(水素)を外部から供給する仕組みになっています。このことから、燃料電池は水素と酸素を供給する間は発電し続ける「発電装置」といえます。

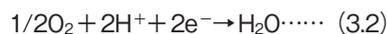
燃料電池の代表ともいえる水素—酸素燃料電池の全反応は、(3)式で表されます。



この負極反応は、



また正極反応は、



で表されます。この燃料電池においては、理論上(3)式の燃焼熱の83%(25℃)が電気エネルギーに高効率変換できるため、地上では家庭用途と自動車用途に実用化されています。

再度、(2)式に着目してください。私たちは、これに基づいて水素—二酸化炭素燃料電池を作製しました。燃料電池の構造を図1に示しますが、主要部分は極めて薄くコンパクトです。この構成は、固体高分子形燃料電池(PEFC)に分類されます。

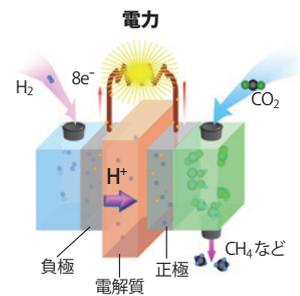


図2 水素—二酸化炭素燃料電池

左は概念図。右は発電試験の結果で、燃料電池の発電性能の指標となる「電流密度—電圧特性」と「電流密度—出力特性」を示している。

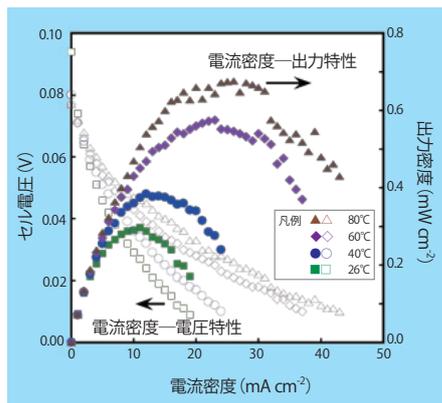


図2左は、水素—二酸化炭素燃料電池の概念図です。負極には水素を供給し、その反応は

$$4\text{H}_2 \rightarrow 8\text{H}^+ + 8\text{e}^- \cdots (2.1)$$

また正極にCO₂を供給した際の主要反応は



と考えられています。

水素—二酸化炭素燃料電池の発電試験結果を、図2のグラフに示します。グラフの横軸は正極—負極間の電流密度を示し、左縦軸は両極間の電圧、右縦軸は燃料電池出力を表しています。グラフより明らかなように、燃料電池が発電しています。また、発電出力の温度依存性が分かります。

私たちの研究において、水素—二酸化炭素燃料電池が発電できることが初めて見いだされました。これは、実験に用いた電極材料が電極触媒として正常に作動した結果と考えています。ただし、問題もあります。生成物がCH₄以外にも複数種類あること、生成物が電極に強く吸着して効率よく取り出すことが難しいこと、などです。現在、これらの解決に焦点を当てた研究を行っています。

次世代空気再生システム

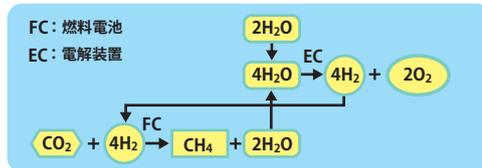
冒頭で述べたように、人間が活動する宇宙閉鎖空間では、CO₂の除去が必須となり、現行は吸収によるCO₂回収を行っています。しかし、長期的な視野に立てば、CO₂は積極的にリサイクルされるべきでしょう。ここでは、まず水素—二酸化炭素燃料電池を用いる閉鎖空間用の次世代空気再生システムについて述べることにします。

図3左上に、(2)式に基づくCO₂還元と、その生成物であるH₂Oの電気分解(3.1式と3.2式の逆反応)を組み合わせたシステムを示します。(2)式については、すでに図2で説明しているため詳細は省略しますが、生成物の一つであるH₂Oを電気分解に回します。水電解は(3)式の逆の吸熱反応であり外部エネルギーを必要とするため、これを太陽光発電で賄います(図3右)。H₂Oの電解で得られるO₂は生命活動(呼吸)に、H₂はCO₂還元再利用されます。ただし、(2)式を進行させるために不足するH₂は、外部からのH₂O補給に頼ることになります。CO₂還元によるもう一つの生成物であるCH₄は、システムの外へ排出します。

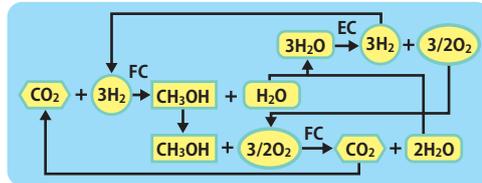
ここまで、CO₂還元の主生成物がCH₄である場合について述べてきましたが、ほかの還元体も副生されます。また、副生物の種類と量は、使用する電極触媒と燃料電池の運転条件によって異なります。そこで次に、生成物にメタノール(CH₃OH)を想定した別のシステムを図3左下に示します。

図3左下のCO₂還元とH₂O電解は、図3左上と同じですが、生成するCH₃OHは別の燃料電池の

CO₂還元燃料電池とH₂O電解を組み合わせた空気再生システム



CO₂還元燃料電池、H₂O電解、直接メタノール形燃料電池を組み合わせた空気再生システム



太陽電池発電に基づくH₂O電解

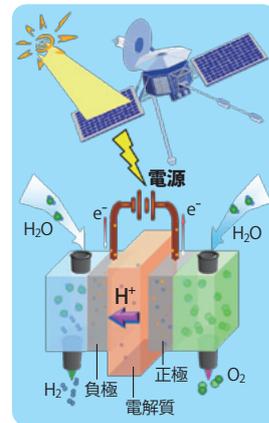


図3 燃料電池を利用した次世代空気再生システム

燃料として使用できます。これは、直接メタノール形燃料電池といい、地上では確立された発電技術です。つまり、三つのプロセスを合わせることで新しい空気再生システムを構成できます。さらに、CH₃OHを貯蔵に回すことで、太陽光発電ができない場合の予備発電としても活用が可能です。

宇宙用途に関する展望

本技術の実用化に向けて、いくつかの重要課題を解決する必要があります。一般の化学反応を速やかに進行させるには、適切な触媒の利用が有効であることは指摘した通りです。電極上の反応(電極反応)については、電極が導電材なら何でもよいわけではなく、エネルギーロスを最小とし、また生成物の種類を選択的にコントロールできる電極触媒の開発を行う必要があります。

一方で、長期的な宇宙滞在を視野に入れると、酸素循環に加えてさらに大きな炭素循環系を考える必要があります。ここまでの各反応に関与してきたCO₂、CH₄、CH₃OH、H₂O、H₂、O₂を中心として、有機合成や食料合成にまで目を向けることが肝要と思われます。太古の地球では、気体の大部分を占めていたCO₂が、微生物によってO₂と有機物に変換されました。それを人工的に、ほかの惑星や衛星でも行えるよう技術力を高めておくことは、決して無駄ではないでしょう。本研究の発展形が、遠い将来、何らかの形で宇宙開発の役に立つことを期待します。

むすび

リーマンショック以降、先端研究は全体的に縮小を余儀なくされているようです。その中において、宇宙研との水素—二酸化炭素燃料電池の共同研究は、近未来から中長期のテーマとして夢のある技術開発になると期待されます。

最後になりましたが、本研究は宇宙研との共同研究により現在も継続中です。また本研究の一部は、科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業 ACT-Cにより実施しました。関係各位に深く感謝申し上げます。(うめだ・みのる)

「はやぶさ2」搭載機器の動作試験

今年の冬に打上げ予定の小惑星探査機「はやぶさ2」のフライト用搭載部品を組み立て、熱環境や振動などの試験を実施し、完成品にするまでの工程である「総合試験」がいよいよ大詰めを迎えています。総合試験の中で、私たちサイエンティストの出番は科学搭載機器の動作確認試験です。ほかのバス機器（通信機や姿勢制御装置など）の組み付けや試験などもあるので、搭載機器の動作試験は時間が限られており、我々にとっては大変貴重な機会です。

搭載機器の動作確認の山場の一つ、「はやぶさ2」の最も難しくかつ重要なイベントである「小惑星に着陸し、サンプルを回収する」をシミュレーションした試験を、6月24日に実施しました。その一場面をお伝えしましょう。

21時20分、着陸シーケンスを開始。これからノンストップで試験が実行されていきます。私は手順書とQL画面（探査機の状態を監視するモニタ）を見ながらチェックをしていきます。21時51分、私も開発に加わってき

た中間赤外カメラの電源がON。その後、探査機の降下がスタートし（当然ながら衛星は動きません。あくまでもそのつもり）、観測機器は撮像を開始。計画に沿って観測プログラムのカウンタが一つずつアップしていきます。途中の様子は省略しますが、0時35分すぎには着地してサンプル収集のための弾丸発射（のつもり疑似信号）を確認。その後、試験終了シーケンスに入ります。

まさに固唾をのむ3時間、シーケンスを止めることなく無事終了。各観測機器は、衛星が収録したデータを取得して問題ないことを確認。私の手元の手順書のチェックシートもすべて問題なし。実にクール！ここまでうまくいくようになるまでの長い道のりが思い出されます。

機体の組み立ても完了して、8月31日に無事、報道公開を実施しました（表紙）。この後、搭載機器の動作試験がもう1回残されています。それが無事終われば、開発完了審査会を経て総合試験は終了。探査機を種子島に輸送し、いよいよ打上げオペレーションが開始されます。（田中 智）

観測ロケットS-310-43号機打上げ成功

観測ロケットS-310-43号機を内之浦宇宙空間観測所から打ち上げました。今回の実験は、液体燃料ロケットが宇宙空間で慣性飛行する環境を模擬し、極低温の液体の流れと熱の伝わり方を観測することが目的です。もともと昨年度の冬に打ち上げる予定でしたが、装置に流れる液体窒素が必要な状態にならず、改修のため延期。その後も次々と新たなトラブルが発生し、改修しては次の問題発生との繰り返しでした。本当にこの夏に打ち上げられるの？という声が聞こえてきましたが、何とか内之浦入りできました。

内之浦でもいろいろ起きるかなと覚悟していましたが、意外とすんなり当初の打上げ予定日を迎えてタイムスケジュール入り。しかし途中から雲行きが怪しくなり、遠くでピカピカしたと思ったら、あっという間に豪雨と落雷警報。安全な状態を確保して作業を中断し、天候の回復を待ちましたが、打ち上げは延期となりました。

S-310-43号機の後にはS-520-29号機と猛烈な台風11号が控えていたため、何としても打ち上げたい8月4日。天候



S-310-43号機の頭胴部とPI班

も良く、手際よく準備が進められ、23時ちょうどにロケットは轟音とともに飛び立ちました。本当に液体窒素入ってるかな、バルブ動くかな、など打ち上がったからも心配が尽きませんでしたが、「液、流れ始めました!」「見たことない流れができています!」などの指令電話越しの言葉に不安が一つ一つ解消され、気が付けば100点、いや120点以上の大成功となりました。液体と気体が混ざり合った二相流の状態もはっきりと捉えられ、将来の軌道間輸送機など

極低温推進剤を効率よく利用する推進システムの開発に必要とされる貴重なデータを得ることができました。

今回の実験では、チーフの更江涉さんはじめJAXA輸送本部を中心としたPI班の皆さんが長期にわたり大変な苦勞を重ねてきましたが、問題を解決するため実験班一丸となって協力し合い、成功を手に入れました。苦しみも喜びも参加したみんなで分かち合える観測ロケット実験はやはり素晴らしいと、しみじみ感じました。関係したすべての皆さまにお礼申し上げます。更江さん、次は液体水素でやる？（野中 聡）

観測ロケット発射装置完成，S-520-29号機打上げ成功

6月末、内之浦宇宙空間観測所に35年ぶりに新しい観測ロケット発射装置（新型ランチャ）が完成しました。8月17日には、初めてこの新型ランチャを用いて、観測ロケットS-520-29号機が打ち上げられました。搭載機器の観測結果は別の号での報告を予定していますので、そちらをお待ちください。

新型ランチャと旧型ランチャの変更点は大きく2つあります。1つ目はロケットの搭載方式をロケットつり下げ型に変更したこと、2つ目はランチャを自走式から固定式に変更したことです。従来はS-310型ロケットとS-520型ロケットはそれぞれ別のランチャを使用して打ち上げられていました。今回の変更により新型ランチャでは両方のロケットの打上げができるようになりました。また、ランチャに搭載されたロケットへのアクセス性や装置の機能拡張性が向上しました。

今回、新型ランチャの初号機となったS-520-29号機の打上げ条件には、天候と観測の2つがあります。観測条件は、スポラディックE層という突発的に発生する電離層が出現していることです。天候条件と観測条件の両方が満たされている間にロケットを打ち上げなければなりません。

しかし、この条件がなかなか満たされず、3回の延期の末の打上げとなりました。これまで新型ランチャについて各種試験を実施し、機能・性能に問題のないことを何度も確認してきました。しかし、実際のロケットを使った打上げ試験は実施できないため、S-520-29号機打上げはランチャ開発担当者たちにとって神経が張り詰める思いでした。4度目の挑戦でロケットが打ち上げられ、飛翔正常の報告を受けた瞬間は本当にホッとしました。今後は、すべての観測ロケットの打上げを新型ランチャで行います。初号機運用の結果を反映し、長期間運用できるように維持していきます。（下瀬 滋）



新型の観測ロケット発射装置とS-520-29号機と筆者

観測ロケットS-310-43号機，研修奮闘記

普段、国際宇宙ステーションの「きぼう」日本実験棟で行われている実験の運用や実験装置の開発に携わっている私にとって、ロケットはまったくの未知の領域です。「知らないものを知りたい!」という純粋な気持ちのほかに、「微小重力実験の場としての観測ロケット」に興味を持ち、実験機器側でなく輸送側の視点から見てみよう、観測ロケットS-310-43号機の打上げ研修に参加しました。

5月に行われた相模原での嚙合せ試験からロケットランチャ班に所属し、機体組み立てや動作チェック、ランチャまわりの配線取り回しなどに携わりました。実物のロケットは図面から想像していたものとまったく異なり、新しい発見があるたび、自分で見聞きし手を動かすことの重要性をあらためて痛感しました。作業の合間には、ほかの班の仕事も見せて



打上げ前のロケット（左）と打上げ後のランチャ（右）。黒いすずし目を見張る。

いただきました。打上げの一連の作業を自分の目で確かめることができたことは、小型ロケットならではの貴重な経験だったと思います。

試験中、実験装置の不具合や調整不足もありましたが、そのたびに皆で集まり、各分野の担当が議論を重ね、即座に対応が取られます。そのスピード感には、年齢に関係なく一丸となって作り上げていこうという気概を感じ、組織の柔軟性の違いに良い刺激

を受けました。

悪天候で打上げが延期された際は、激しい雷雨の中、すでにランチャドームに設置されていたロケットの安全を確保した後、ずぶ濡れになって退避しました。緊急性を要する事態でも冷静に対処するベテラン陣の判断力など、見習いたい人やものにたくさん出会えた研修でした。

実際の打上げの迫力は言わずもがな。その後のクイックレビューで先生方の興奮した報告を聞いているうちに実験側の求める打上げができたことが分かり、自然と安堵感が広がりました。

奮闘というよりは、目の前のイベントに日々食らいついていくのに必死だった気がします。得られたものは計り知れず。次は実験の当事者として観測ロケットに関われるよう、まい進していきたいと思えます。(田丸晴香)

第13回「君が作る宇宙ミッション」開催

8月4日から8日まで、高校生向け体験イベント「君が作る宇宙ミッション」(きみっしょん)が相模原キャンパスで開催されました。きみっしょんについては毎年この欄でも報告していますが、高校生が1週間泊まり込みで宇宙ミッションの検討・立案作業を行い、それを通して研究者としての基本的態度「自ら考え・自ら決定し・自ら作業する」を学ぶというものです。今年も、北は青森から南は福岡まで、作文選考で選ばれた24名の高校生が、大学院生スタッフのアドバイスのもと、ミッション立案に取り組みました。今年のみみっしょんでは、例年大きな時間を費やしているテーマ選定を加速し、技術的検討にしっかり時間をかけるという狙いで、テーマの方向性(天体観測、生命探査、月面基地、長期有人航行)をあらかじめ与えてのスタートでした。しかし、張り切って難しいテーマを選んでしまったためか、かえってそれを消化するのに時間がかかってしまい、時間切れになってしまった感のあ



宇宙研OBの先生と議論する高校生

る班もありました。どうすれば高校生の頭を最大限に回転させ、限られた時間の中で個性的なミッションを練り上げていくことができるかは、きみっしょんの永遠の課題です。運営スタッフも、さらに良いきみっしょんが実現するように努力を続けていきます。

きみっしょんは、1週間で終わりではありません。有志は、来年春の日

本天文学会ジュニアセッションに向けて、ミッション検討を続けます。帰宅直後から活発な議論が始まっている班もあるとのこと。それぞれのミッションをさらに発展させていくことを期待しています。そして何よりも、参加者の今後の進路に、きみっしょんの経験が生かされていくことを期待します。

きみっしょんの実施に当たっては、宇宙科学振興会の援助を頂きました。また、講義・見学対応・議論へのアドバイス、運営支援など、さまざまな形でご協力いただきました職員・関係者の皆さまにお礼申し上げます。(山村一誠)

第11回 アジア大洋州地球科学連合大会

夏の北海道といえば、青い空と広がる大地、爽やかな風とおいしい海の幸・山の幸、さらに札幌では大通りの広々としたビアガーデン……。近年ではアジア諸国からも魅力的なリゾート地として、多くの観光客がやって来るそうです。

そんな7月の札幌で、第11回を迎える「アジア大洋州地球

科学連合大会(AOGS)が開催されました。AOGSの大会は毎年夏、学会事務局のあるシンガポールとアジア大洋州諸国の持ち回りで開催されています。昨年は初めての南半球オーストラリア、そして今年は初めての日本での開催となりました。公式の

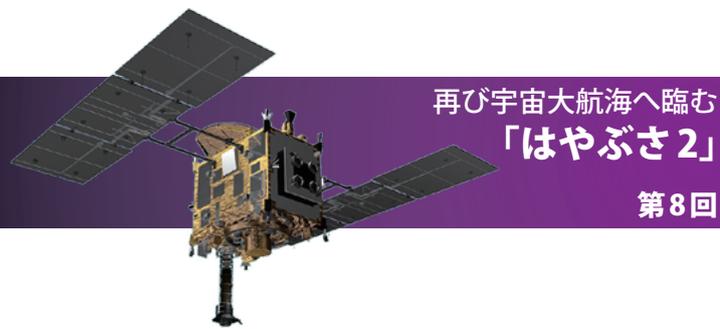
参加者数はまだ発表されていませんが、事前登録者数は初めて3000名を超え、AOGSの大会としては過去最多だそうです。約80の国と地域から参加があり、多い順に日本、韓国、台湾、中国、インドでした。欧米とアフリカ大陸からも多くの参加がありました。

開催セッションは、大気科学、生命地球科学、水文学、学際的地球科学、海洋科学、惑星科学、太陽・地球圏科学、固体地球科学の各分野に分かれ、合計で約170(合同セッションは1とカウント)でした。私は主に、自分が発表と司会を担当した惑星科学のセッションに参加して、月周回衛星「かがや」のデータを総合的に解析して初めて得られた月の進化モデルや、間もなく打上げ予定の小惑星探査機「はやぶさ2」の観測計画などについての熱い議論に加わりました。

次回は、3年ぶりのシンガポールでの開催。アジアの友人との再会や名物のチキンライスを楽しみにしつつ、来年も成果発表ができるよう頑張りたいと思えます。(岩田隆浩)



ポスターセッションに参加する筆者。奥では一般市民向けに太陽観測衛星「ひので」の紹介が行われている。



再び宇宙大航海へ臨む 「はやぶさ2」 第8回

近赤外分光計と 中間赤外カメラ

岩田隆浩 はやぶさ2プロジェクト 近赤外分光計担当

田中 智 はやぶさ2プロジェクト 中間赤外カメラ担当

小惑星探査機「はやぶさ2」が目指すのは、C型の地球近傍小惑星1999JU3です。地球近傍小惑星とは、その軌道が地球軌道と交わるか接近する小惑星のことです。火星と木星の間の小惑星帯を回っている大部分の小惑星に比べると、探査機が地球から少ないエネルギーで到達できるため、探査に有利です。一方、C型のCは炭素のことです。地球に降ってくる隕石には黒っぽい色をした炭素質隕石と呼ばれる種類があり、水や炭素など揮発性の高い成分を多く含みます。ちなみに初代「はやぶさ」が訪れたイトカワはS型小惑星で、主に石質の成分から成ります。S型小惑星は地球のような岩石惑星の地殻やマントルを構成する物質の供給源ですが、C型小惑星は地球の海や生命を構成する物質の供給源と考えられます。C型小惑星の物質がどのような化学的・物理的状態なのか、よく分かっていません。手掛かりとなる隕石は、地球大気圏突入時に激しく加熱され、ばらばらに破壊され、また大気に触れて変質してしまうためです。C型小惑星からのサンプルリターンを行う「はやぶさ2」は、世界で初めてその素性を探査します。

「はやぶさ2」は、小惑星1999JU3に到着後、高度20kmのホームポジションに滞在し、まずリモートセンシングによって小惑星の全体像を明らかにします。このとき、2種類の赤外線観測が重要な役割を担います。一つが近赤外分光計(NIRS3)で、近赤外の分光観測によって小惑星表層の鉱物の水質変成、すなわち鉱物が水とどのような化学相互作用を受けたかを調べます。もう一つが中間赤外カメラ(TIR)で、小惑星からの熱放射を撮像することによって小惑星表層の温度や熱慣性、すなわち温度に影響を及ぼす土壌の粒子サイズや岩塊の空隙率がどのような状態にあるかを調べます。

NIRS3はその名が示す通り、近赤外である波長 $3\mu\text{m}$ 付近の吸収バンドを調べる分光計です。水や氷、あるいは含水鉱物が存在すると、 $3\mu\text{m}$ 付近に吸収が見られます。特に、吸収が最大となる波長や吸収帯の波形は、物質中に含まれる鉱物や水質変成、熱変成の仕方によって異なります。その特徴を地域ごとに詳しく観測し、小惑星表層の化学的性質、特に含水鉱物の状態と分布を調べます。NIRS3は新規開発の128画素のInAsリニアアレイ(浜松ホトニクス製)を検出器に用い、グリズム(プリズムと回折格子を貼り合わせたもの)によって $1.8\sim 3.2\mu\text{m}$ を分光観測します。視野角は約 0.1° であり、小惑星のホームポジションからの解像度は約35mです。

TIRは小惑星サーモグラフを行う装置で、波長 $8\sim 12\mu\text{m}$ の熱赤外放射を2次元撮像します。微小重力下にある始原天体の物質の空隙率や圧密度は、よく分かっていません。C型小惑星はS型に比べて一般に低密度ですが、表層を薄く覆う堆積物だけ空隙が多いのか、それとも内部の岩塊まで空隙が多くもろい構造なのか、低密度の原因を調べることは重要で、衝突合体による惑星形

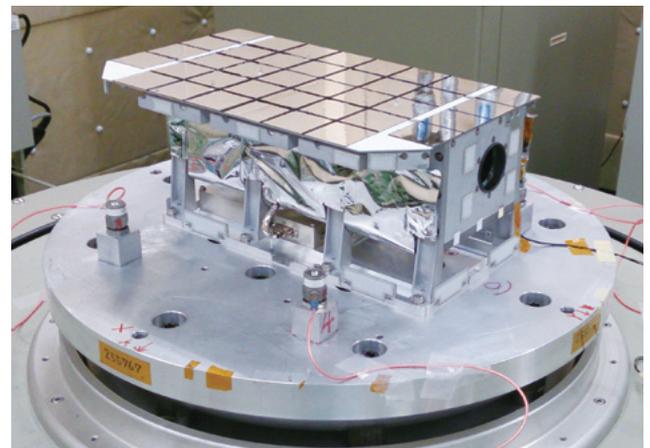


図1 振動試験中の近赤外分光計(NIRS3)分光計ユニット MLI(多層断熱材)取り付け前。2013年、明星電気にて。

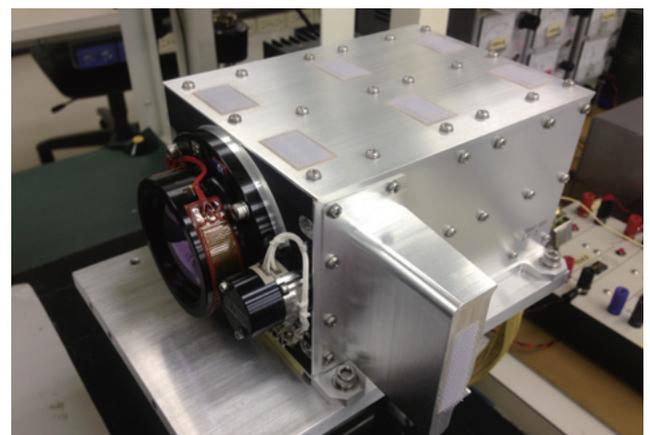


図2 中間赤外カメラ(TIR)の検出器部

成・進化史を理解することにつながります。表層堆積物の分布から微小重力天体下でのクレータ形成過程(衝突破砕物の堆積状態)、小惑星上での物質流動について知見が得られます。TIRは非冷却2次元ボロメータ(NEC製)を検出器に用い、ホームポジションから $16^\circ \times 12^\circ$ の広い視野で小惑星全体を、 0.05° (約20m)の解像度で撮像します。温度範囲は $-40\sim +150^\circ\text{C}$ で、小惑星の昼面を撮像できます。

小惑星表層は太陽風や微小隕石衝突による影響(宇宙風化)や太陽光照射による加熱を受けています。また堆積物が覆うと、リモートセンシングによる化学的・物理的性質に影響します。そのため「はやぶさ2」では衝突装置SCIを搭載し、高速度衝突によって小惑星内部物質を露出させ、化学的・物理的性質を調べます。

NIRS3とTIRは赤外観測によって小惑星の素性を調べるだけでなく、その観測結果はサンプル採取地点の選定にも役立ちます。また、小型着陸機MASCOTとの連携観測も予定されており、太陽系の始原天体の化学的・物理的性質について理解が深まるでしょう。(いわた・たかひろ、たなか・さとし)



流行りの服は嫌いですか？

南部陽介

大阪府立大学 大学院工学研究科 航空宇宙海洋系専攻 助教
超小型衛星 OPUSAT プロジェクト 実施責任者

BALUS 開発チーム (左から、五十嵐、
弓山、木村、三浦、吉澤、萩原、筆者)



今から5年前のこと。宇宙研には、サハラ砂漠からの熱く乾いた風のような映画が大好きな7人の大学院生がいました。卒業後、彼らはさまざまな業種に就きましたが、再び集い、BALUS*という名のソフトウェアの開発に取り組んでいます。

ものづくりの高速道路

私たちにとってBALUSとは、目つぶしの呪文ではなく、システム設計を支援するソフトウェアを意味します。ハードウェア設計にCADが導入されて久しいですが、近年、より上流のシステム設計もまた、コンピュータの支援を必要としてきています。

人工衛星づくりにはチームワークが欠かせません。人工衛星には、「地球の写真を撮影し、人々に届ける」など多種多様なミッションがあります。そして、ミッションを達成するためには、カメラを地上へ向ける、写真を撮る、地上へデータを送る、発電するなど、さまざまな機能が必要となります。衛星の機能をそれらの要素に分割し、分担をして同時並行で開発を進めます。そして、それぞれの要素が完成した後に統合し、人工衛星に組み上げます。

分割と統合をうまくやらないと、人工衛星は正しく動きません。例えば、カメラが必要とする電圧は5Vなのに、供給できる電圧が3.3Vだったとしたら、カメラは動きませんよね。分割と統合のガイドラインづくりをシステム設計といえます。

大阪府立大学の学生が開発した超小型衛星 OPUSAT の場合、15人程度の小さなチームで衛星づくりをしていました。毎日顔を合わせて議論をし、お互いが開発しているものがきちんと統合できるように調整しながら開発を進めていました。設計図は頭の中にしかありませんでしたが、何とか宇宙で動くものをつくり上げることができました。

しかし、システムやチームが大きく複雑になると、こうしたつくり方は難しくなります。人が入れ替わると、頭の中の設計図も失われてしまいます。近年のシステムは、複雑化を極め、関係するエンジニアの数も膨大です。人事異動もあります。優秀なエンジニアに良い仕事をしてもらうためにはシステムを理解してもらう必要がありますが、会話ベースでは限界があります。そこで、BALUSです。

BALUSでは、システムモデルを中心に、システムの設計・開発を行います。システムモデルとは、要素と要素間の関係を表した図の集合体です。図を用いる理由は、自然言語よりも俯瞰的に見ることが得意だからです。典型例では、3種類の図をコンピュータ上に描き、共有できるようにします。ミッションから定義される要求やサブシステム間の要求などを示す要求図、衛星の機能が動作する順番などを示す振る舞い図、情報やエネルギーの入出力を示す構造図です。これらの図は互いに関係づいており、タグづけや検索による情報の抽出や、過去の図との比較、再利用なども、お手のものです。

システムモデルを中心に、要求・仕様・タスク管理を行うとともに、双方向のコミュニケーションを行うことで、認識の齟齬をなくし、無駄のないシステム開発が可能となると期待しています。

出会いは、きみっしょん

BALUSの開発は、私たちの本業ではありません。みんな、普段は大学教員やソフトウェアエンジニアをしており、土日や深夜・早朝を利用して、BALUSの開発を行っています。正直、大変です。しかし、この7人で新しいものを生み出す活動自体が楽しいということ、BALUSは絶対世の中の役に立つという確信が、私たちを支えています。

意外と広い宇宙研の中で私たちをつなげ

たのは、毎年夏休みに行われている高校生向けの教育プログラム「君が作る宇宙ミッション」、通称「きみっしょん」です。私たちはみんな、高校生のミッションづくりをサポートするスタッフでした。月例会議の後には必ず懇親会があり、日付が変わるころになると、いつも話題は宇宙科学や宇宙開発への憂いでした。何を話したかは忘れましたが、熱気あふれる飲み会だったことだけは覚えています。この飲み会が、BALUSチーム誕生の下地だったと思います。

世にない新しいものを生み出そうという誘いに、二つ返事で応じてくれる友人は多くありません。今、宇宙研で学んでいる学生たちにも、その類いまれなる環境を十二分に利用して、自身の価値を高めることはもちろん、優秀で信頼できる人とのつながりを築いてほしいと願っています。

将来、子どもたちが宇宙科学を学ぶ機会を失わないためには、優れた研究成果だけでなく、研究を支える基盤が必要だと思えます。BALUSがそうした基盤の一端を担えば、存外の喜びと考えています。

(なんぶ・ようすけ)

*BALUS : Browser-based Assisted Library Universal System-design application

BALUS (バルス)は、もともと映画『天空の城ラピュタ』に登場する呪文。この記事のタイトルも同映画のセリフから。また、「サハラ砂漠からの熱く乾いた風」をイタリア語でGHIBLIという。BALUSについてより詳しい情報をお求めの方は、BALUSのWEBページ (<http://balus.me>) をご覧ください。

ISAS ニュース No.402 2014.9 ISSN 0285-2861

発行/独立行政法人 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所

発行責任者/ISASニュース編集委員会 委員長 山村一誠

〒252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台 3-1-1

TEL: 042-759-8008

本ニュースは、インターネット (<http://www.isas.jaxa.jp/>) でもご覧になれます。

デザイン/株式会社デザインコンピビア 制作協力/有限会社フォトンクリエイト

編集後記 きみっしょん、観測ロケット、「はやぶさ2」の関係者の皆さまは、「熱い」夏を送られたことと思います。私は角田宇宙センターにて再使用観測ロケットエンジンの試験で暑い夏を過ごしました。高校野球も熱かったなあ。(小川博之)

*本誌は再生紙(古紙100%)、植物油インキを使用しています。

