



2011

宇宙の歴史を読み解く



GIFU UNIVERSITY

2008年の8月の終わりにナミビアのコワリブ渓谷でみた星空はとても印象深いものでした。砂漠の真真中でキャンプ生活をしていた私たちのまわりにはまったく人工の照明はなく、地上は暗闇に包まれていましたが、空は澄んで雲ひとつなく、天の川が帯状に走るあたりは無数の星が輝いていました(図1)。地上に横になって見上げた星空は、私たちが宇宙の中に存在していることをとても強く実感させるものでした。夜が更けるころになると天の川は西の地平線に没し、かわって南の空に大小マゼラン星雲が昇ってきます。ほんやりした雲のような天体ですが、かすかに肉眼でもみつめることができました。

宇宙が誕生して137億年の年月が流れました。私たち、そして身のまわりのすべてのはこの宇宙の誕生と進化のなかで生まれた歴史的な産物ということが出来ます。自然界を注意して観察すると、宇宙の歴史を読み解く手がかりがいたるところにあることがわかります。夜空が暗いことも宇宙の歴史を物語るものでした。

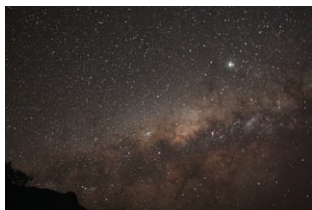


図1. ナミビアの星空

膨張する宇宙

宇宙が無限に広く、その中に無数の星が存在するとすれば、夜空は星で満たされ明るはずですが。しかし実際には夜空は暗く、肉眼で見える星の数には限りがあります。これは考えてみるととても不思議なことです。実際には宇宙は137億年前のビッグバンで始まり、膨張し続けていたのです。膨張する宇宙論は、アインシュタインの一般相対性理論の解としては知られていましたが、実際の観測データでそれを示したのはE. ハッブルでした。彼は、遠い銀河までの距離と、後退速度を調べ、遠くの銀河ほど速いスピードで遠ざかっていること、すなわちハッブルの法則を発見しました。1965年にペンジアスとウィルソンは、電波望遠鏡で宇宙からやってくる電波を観測し、ビッグバンの余熱ともいえる3Kの宇宙背景放射を発見します。その後、COBEやWMAPなどの宇宙探査機によって、宇宙背景放射が全天走査され、初期宇宙の温度の揺らぎが明らかにされました(図2)。その結果、宇宙は137億年前のビッグバンで始まったこと、宇宙は平坦であること、宇宙にはダークマターやダークエネルギーといった未知のエネルギーが存在することなどが明らか

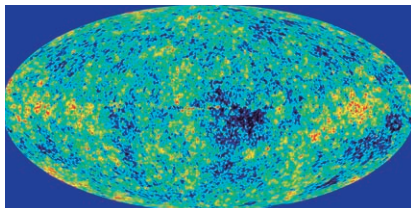


図2. wmap. 宇宙の3K放射のゆらぎ。

にされました。ビッグバン直後に宇宙は急激に膨張しました。これはインフレーションと呼ばれていて、高温だった宇宙は短い時間に冷却し、その結果水素とヘリウムが残されました。

星のエネルギー源と元素の合成

太陽からやってくるエネルギーの源はなんなのでしょう。これは19世紀から長いあいだ謎とされてきました。20世紀になって、水素原子核4個から質量数4のヘリウムになる熱核融合反応によってエネルギーが発生していることがわかりました。太陽は、ビッグバンのあとに宇宙に残された水素とヘリウムでできています。その水素がヘリウムに変化することで太陽は輝いていたのです。太陽系が形成されて46億年が過ぎましたが、あと50億年ぐらいうると太陽のエネルギー源である水素は尽きてしまい、太陽は末期を迎えます。その頃になると、太陽の中心部はヘリウムが多くなり、温度も1億度を超えるようになり、ヘリウムを原料にして、炭素、酸素、マグネシウム、珪素といった元素の合成が進みます。

太陽よりも質量の大きい恒星では、赤色巨星へと進化し、内部では熱核融合反応で鉄が合成され、さらにゆっくりとした中性子捕獲でピスマスまでの元素が合成されます。そして超新星爆発でウランまでの自然界の元素がすべて合成されると考えられています。

恒星の明るさと質量の関係からすると、質量の大きな恒星の寿命は数千万年程度で、太陽より質量の小さな恒星は数百億年という長い寿命をもっています。太陽系に自然界の92種類の元素が存在し、それらがさまざまな物質を作っていることは、それらの元素が爆発してしまった超新星で合成され、宇宙空間に撒き散らされた星雲状の物質から太陽系が形成されたことを物語っています。

太陽系の起源論

太陽系は、46億年前に宇宙空間を漂っていた星間雲が収縮し、原始太陽とそれを取り巻く原始太陽系星雲から生まれました。原始太陽系星雲は、太陽大気と同じような化学組成をもつガスでしたが、温度が冷えると固体微粒子ができ、それらが集まって微惑星と呼ばれる固体天体が多数でき、それらが衝突や合体を繰り返して、惑星が形成されたと考えられています(図3)。こうした太陽系形成のシナリオは、原始星の天文学的な観測、太陽系形成の理論、固体物質の衝突現象の実験的な研究、さらに原始的な隕石の研究など、さまざまな分野の研究を総合して構築されてきています。しかし、まだわからないことも多く残されています。

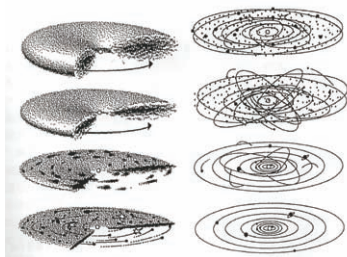


図3. 太陽系形成過程。(Levin,1972)

太陽系形成の理論、固体物質の衝突現象の実験的な研究、さらに原始的な隕石の研究など、さまざまな分野の研究を総合して構築されてきています。しかし、まだわからないことも多く残されています。

太陽系形成過程のシナリオでは、現在の太陽系の姿を合理的に説明できることが求められます。さまざまな隕石はいつどのように形成されたのか。とりわけ、始原的な隕石に含まれるカルシウムやアルミニウムに富んだCAIと呼ばれる粒子はいつどのようにできたのか。また、直径1～5mm程度の大きさのコンドリュールは、宇宙空間でケイ酸塩物質が融けてできた液滴が冷えて固まった粒子であると考えられています。融解のための熱源や過熱のしくみはまだ大きな謎に包まれています。

また、火星と木星の間には小惑星帯があり、無数の小さい固体天体が分布していますが、なぜ小惑星帯で大きな惑星が形成されなかったのかも大きな問題です。先に形成された木星の重量の影響によるという説がありますが、その説を裏づけるには、小惑星帯での微惑星の形成と木星の形成との時間の前後関係を解明する必要があります。

水惑星地球

地球型惑星のなかで、地球はほかの惑星にない特異な性質をいくつか備えています。まずは水惑星であることです。そして生命が発生し、長い年月をかけて進化してきたこと、さらに生命が光合成というしくみを発明し、有機物合成の副産物として分子状の酸素を発生させ、大気組成を大きく変えたことです。

なぜ地球だけ水惑星になったのか。この謎については、地球が誕生した場所が太陽からちょうどよい距離にあったからであると考えられています。太陽に近い金星では、地表温度が液体の水が存在できる温度を上回ったため、水蒸気になった。金星には固有の磁気圏が存在しないため、太陽から吹きつける太陽風によって、大気上空で大気分子が電離し、水蒸気は水素イオンや酸素イオンとして宇宙空間に散逸してしまったのではないかと考えられています。金星に固有の磁場が存在しない理由としては、243日という長い自転周期で公転とは逆向きに回転していることや、地球よりやや小型であり、中心核の固化が始まっておらず、中心核におけるダイナモ作用で磁場を生成・維持するためのしくみが欠けているからではないかという説があります。

いっぽう、火星は半径が3500kmで地球や金星よりもかなり小さな固体惑星です。大気圧も地球の7%程度しかありません。火星は地球よりも小さいため、内部が冷え切ってしまい、火山活動も衰えてしまいました。火星の初期には温暖な時期もあり、液体の水が流れてできた河川地形や水の存在下でできた堆積岩も発見されていますが、今は凍り付いてしまっていると考えられています。こうした寒冷な火星環境は、火星の大きさと太陽からの距離が遠いことが原因であると考えられます。

もし地球でも、温室効果ガスを含む大気が存在していないならば、地表は-30度ぐらになり、地球も凍結した惑星になってしまっていたでしょう。二酸化炭素などの温室効果ガスは、今日では地球温暖化の原因としてやっかいもの扱われていますが、もし二酸化炭素がなかったら地球環境は今日とは全く異なるものになってしまったでしょう。

太陽の進化モデルの計算によると、誕生してまもないころの太陽光度は現在の70%程度しかなく、地球史を通じて徐々に明るさが増してきたと考えられています。現在の大気組成で、太陽光度を下げると、やがて地表の温度は氷点下となり、地球表

面が全面的に凍ってしまいます。しかし、地質学的な証拠によると、地球では38億年前から液体の水でできた海があることがわかっています。暗い太陽光度にも関わらず地球表面が凍結しなかったという一見矛盾した状況は、暗い初期太陽パラドックスと呼ばれています。その理由としては、初期地球では、温室効果を示す二酸化炭素やメタンガスが大気中に多量に含まれており、地球表面が凍結するのを防いだという考えです。

地球史46億年

生命はどこからやってきたのでしょうか。生命の起源論は、科学が進歩した今日でも大きな謎のままです。生命自体が宇宙からやってきたという説、有機物などの材料物質が宇宙からやってきたという説、地球上で有機物合成があり、化学進化の結果生命が発生した説など、いまだに論争が続いています。

地球上で生命が発生していたことを示す地質学的な証拠には、生物の形態化石、有機物分子などのバイオマーカーがあります。これまでもっとも古い証拠としては、38億年前に西グリーンランドの地層から得られたグラファイトの炭素同位体比のデータがあります。これについては、今日でも論争が続いています。細胞状の化石としては、35億年前ごろの南アフリカや西オーストラリアの黒色のチャートからの発見があります。しかし、形態は単純であり、生物の細胞が化石化したものか、無機的にできたものであるのかを巡ってこちらも論争がつきません。

27億年前ごろの地層には、ストロマトライトと呼ばれる細かい縞模様の発達した地層が大規模に残されています。これらはドーム状の形態をしており、光合成を行って酸素を発生させるシアノバクテリアが作った地質構造であると解釈されています。その存在は、生命が発生し、しかも光合成という反応を行っていたことの確固たる証拠として注目されています。さらに、24億年前ごろの地層には、縞状鉄鉱床といって、酸化鉄鉱物と石英が交互に積み重なった地層が大規模に残されています。西オーストラリアのハマスレイ縞状鉄鉱床はもっとも有名で、地層の重なりは数百キロメートルにもわたって追跡できるといわれています。縞状鉄鉱床をつくる酸化鉄の層は、海水中に溶けていた2価の鉄イオンがシアノバクテリアが生み出した酸素分子と反応して、酸化沈殿してできたものであると考えられています。初期地球の大気には酸素が乏しかったのですが、光合成によって酸素が発生し、地球表層環境が酸化的になり、錆び付いた証拠だというわけです。

さらに、こうした地球表層環境の変化によって、生物細胞も進化し、それまでは細胞に核がない原核生物だったのが、遺伝子を核膜に包んだ真核生物になり、さらに細胞内共生によって、ミトコンドリアや葉緑体といった器官が成立しました。

化石記録によると、多細胞動物が出現するようになったのは、6億年前ごろからです。その直前に、地球環境には激変がありました。気候が徐々に寒冷になっていき、両極から張りだした氷床が赤道へと向かって前進し、やがて地球表面全体を多い尽くした出来事です。これは、氷河堆積物の世界的な分布、氷河作用による地層が赤道付近に形成されたことを示す古地磁気学的な証拠などをもとに、構築されたスノーボー

ル・アース仮説が登場し、大きく注目されるようになりました。この仮説は、地球史の大事件の真相を解き明かしたシナリオであり、現在でもその検証を巡って論争が続いています。地球史研究者たちは、この寒冷化事件と、その直後に起った多細胞動物の出現に因果関係があるのではないかということで、学際的な研究が進められています。

多細胞動物の出現以降の地球の歴史は、化石の変遷をもとに復元されています。化石の分類群の多様性からは、過去6億年間に、繰り返し生物大量絶滅事件があったことが明らかにされています。有名な出来事は6500万年前の恐竜絶滅事件であり、この事件では、メキシコのユカタン半島に直径10kmの小惑星が衝突したことがきっかけになったことが明らかにされています。2億5千万年前の古生代と中生代の境界における生物大量絶滅事件は、地球史最大の生物絶滅事件といわれていますが、そのときに堆積した黒色の有機質泥岩の地層が岐阜市の金華山の山麓で発見されており、当時海洋が酸素欠乏状態になったという説が提唱され、注目されています。

地球史のなかで、人類の時代は最近の500万年間です。人類が進化し、近代文明を築きあげたのは、そのなかでもごく最近の出来事です。46億年の地球史のなかで、さらに137億年の宇宙史のなかで、私たちの住む時代を考えると、これまでの遠い道のりと、その短い期間が浮き彫りになります。それと同時に、ビッグバン、恒星の進化、水惑星地球の誕生、生命の発生と進化、さまざまな地球環境の激変といった歴史を振り返ると、私たち自身の存在が奇跡のように思えてきます。

太陽系のロゼッタストーンを求めて

地球と生物の歴史を解説しようと、私たちは世界各地にでかけていって、初期地球でできた地層や岩石の産状を調べたり、岩石を持ち帰って詳しく研究したりしてきました。20億年前ごろに起った地球の大酸化事件やスノーボール・アースといった事件、そして生物の飛躍的な進化が浮き彫りになってきました。しかし、地球史解説作業のなかで、七大事件を取り上げてきましたが、地球と生命の誕生は、第1事件に上げられてきました。水惑星はどのように形成されたのか、そして生命はどこからやってきたのか。これらの謎を解き明かすには、地球史解説の作業を、太陽系形成まで遡って探究していくことが必要のように思われます。

地球史解説では、地球上の岩石や地層の研究が重要ですが、地球や生命の起源には、その前駆物質ともいえる隕石や小惑星物質を確保し、詳細に研究することが必要です。隕石は宇宙空間からやってくる固体物質で、その多くは46億年前に形成されてから融解することなく、形成期の宇宙での出来事を記録しています。しかし、水による鉱物変質、熱変成、衝突破壊といったその後の影響も受けています。さらに、大気圏に突入するときに磨耗して失われたり、地球に落下後の酸化的で水に富んだ地球環境で変質を受けたりしています。

太陽系の初期を探るには、地球に落下してきた隕石を探ると同時に、小惑星や彗星などの始原的天体を探査し、サンプルを地球に持ち帰ることが重要です。小惑星探査機はやぶさによるイトカワの探査とサンプルリターンは、小惑星に探査機を送

り、太陽系物質を固体天体にあったときと同じ状態で持ち帰ることの重要性や科学的意義を証明するものでした。



ハマスレイ縞状鉄鉱床の露頭。



マーチソン隕石。

1. はじめに

2010年6月、小惑星探査機「はやぶさ」が地球に帰還しました。探査機本体は大気中で燃え尽きてしまいましたが、切り離されたカプセルがオーストラリアのウーメラ砂漠に着陸し、無事回収されました。その後の調査により、このカプセルの中に「はやぶさ」が小惑星「イトカワ」に着陸し採取したサンプルが入っていることが確認され、詳細な分析が続けられています。このサンプル分析により太陽系の起源の解明が進むことが期待されています。

「はやぶさ」は2003年5月に打ち上げられてから地球に帰還するまで様々なトラブルを乗り越えてきました。この「はやぶさ」ミッションにおける宇宙航空研究開発機構(JAXA)の方々の努力は皆さんの感動を呼び多くの映画が製作されました。これまで有人飛行以外でこれほど宇宙ミッションが注目されたことはなかったように思います。

もちろんトラブルの克服自体も「はやぶさ」チームの大きな成果であると思いますが、もともとのミッションの目的である小惑星サンプルリターン(サンプルを採取して持ち帰ることを言います)は、人類史上初のミッションであり、今後の宇宙探査が新しい段階に進むことを意味する記念すべきミッションでした。ここでは、「はやぶさ」ミッションの意義、それを可能にした「燃費」の良いロケットエンジン技術、将来の宇宙開発への展望などについて簡単にご紹介していきたいと思ひます。

2. はやぶさの成果

「はやぶさ」は世界で初めて小惑星のサンプルを採取し地球に持ち帰ったミッションです。これまで地球外の天体について様々な宇宙探査が行われてきました。アポロ計画で宇宙飛行士が月の石を持ち帰った例は有名ですが、地球以外の天体のサンプルを採取して地球に持ち帰ったミッションは多くありません。アポロ計画では、人間を月に送ったことは非常に困難なミッションであったわけですが、この場合、サンプルを採取して持ち帰ることは宇宙飛行士が行いましたので必要とされる特別な技術は多くありませんでした。これに対し、「はやぶさ」のようにこれまで行っていない場所に無人探査機を送り、サンプルを採取し持ち帰ることは、宇宙ではもちろん、地上においてさえ非常に難しいということは理解していただけたと思ひます。

これまで実施された無人探査機によるサンプルリターンとしては、ソビエトのルナ計画で行われた月のサンプル収集、米国のNASAが実施したジェネシス計画における太陽風のサンプル収集とスターダスト計画における彗星のサンプル収集があります。このうち月に着陸したルナ計画以外は、探査機の「飛行中」にサンプルを収集したものであり、「はやぶさ」のように「天体に着陸」しサンプルを収集し持ち帰るという技術は月以外では初めてのこととなります。また、月は地球の近くにあつて引力も大きい天体ですが、「はやぶさ」の目的地である小惑星イトカワは500m程度の非常に小さな天体でありその引力によって引き寄せてもらうということはほとんど期待できませ

ん。したがって、「はやぶさ」自体が位置や速度を調整しながら着陸することが求められますので非常に精密な制御技術が必要となります。このことは、例えば家からラジコンの船を操作して遠い海に浮かんでいる小さな目標物にぴったりと並ぶ状況に似ているのではないかと思います。さらに、目的地であるイトカワは地球から何億キロも離れた位置にありますので電波が届くまで非常に長い時間がかかり「はやぶさ」と通信するのに数十分の時間が必要です。このような状態では、たとえ「はやぶさ」を無事イトカワの近くに運ぶことができて完璧に計算通りの位置、速度になっていなければ、地球からの指令が間に合わず、高速で飛行している「はやぶさ」はイトカワの横を通過してしまうか、最悪の場合激突して壊れてしまうかもしれません。そこで、「はやぶさ」にはイトカワとの距離などを測定し自分自身で速度、向きを変えることができる能力が与えられています。この能力を使って航行することを「自律航行」と呼びます。この能力により、地球から遠く離れたイトカワに着陸してサンプルを収集することができたわけです。

また、「はやぶさ」のミッションを支えたもう一つの大きな技術があります。それは「イオンエンジン」です。イオンエンジンは「電気ロケット」と呼ばれる新しいロケットの一種です。燃費の良い電気ロケットの中でも最も燃費の優れたイオンエンジンを採用することで「はやぶさ」ミッション自体を可能にしたばかりか、そのトラブルの克服に大いに貢献しました。次の章では、この「燃費の良い」ロケットである電気ロケットについて紹介していきたいと思います。

3. 「はやぶさ」を可能にした燃費の良いロケット「電気ロケット」

皆さんがニュースなどで良くご存じの日本のH-IIAロケットなど地上から打ち上げるときに用いるロケットは「化学ロケット」と呼ばれるロケットです。燃料を燃やすことによって発生するエネルギーを使ってガスを高速で噴射し飛んでいきます。白い煙をもうもうと噴射して浮き上がっていく様子からは大きな力を発生しているのが実感できます。この化学ロケットの原理は、ロケット花火とまったく同じで、それが大型でかつ精密になったものが化学ロケットになります。これまでは、地上から重力に逆らって打ち上げるだけでなく、探査機のメインエンジンや人工衛星の制御用エンジンに至るまで宇宙ミッションのほとんどの用途でこの化学ロケットが用いられてきました。

ところが、最近になって、より遠くへ出かけるミッション、より多くの測定機器を搭載するミッション、より長い時間運用する人工衛星ミッションなど、宇宙開発ミッションがより複雑に、そして長期化するにつれて「燃費の良い」ロケットの必要性が急速に高まってきました。自動車をイメージしていただければわかりやすいと思いますが、燃費を良くすることで「より遠くに行く」ことができ、同じ目的地に行く場合でも「より多くの荷物を運ぶ」ことができます。通常、ロケットには荷物として測定機器などがたくさん積まれています。これらの測定機器を多く積めれば積めるほど、観測などで多くの成果を上げることができます。ロケットを一回打ち上げるには多額の費用が発生しますから、一度のミッションでより多くの成果が得られれば宇宙

開発がそれだけ有意義なものになってきます。また、より遠くに行くことができれば「はやぶさ」のように人類がまだ手に入れていない貴重な発見をする可能性が高まります。

ロケットは周りの空気を使うことのできる自動車と違って燃料を燃やすために必要な酸素なども必要です。そこで、宇宙開発の世界ではこれらをすべてあわせて「推進剤」と呼びます。これ以降は推進剤と呼ぶことにしますが、簡単に自動車の燃料のようなものだと考えてください。ロケットの場合には自動車と違ってその大部分をこの推進剤が詰め込まれたタンクが占めています。そのため、この推進剤を少しでも減らせることができるかどうかは、測定機器の搭載量、飛行可能範囲に大きく関わってきます。化学ロケットについてはこれまでに十分な開発が行われてきていますので、推進剤をこれ以上大幅に減らすことはできません。したがって、化学ロケットではない別のタイプのロケットが必要になります。この推進剤が少なくて済むロケットとして最近注目されてきているのが「はやぶさ」に用いられた「電気ロケット」です。電気ロケットはその名の通り「電気エネルギー」で動くロケットです。電気力で推進剤をプラスのイオンとマイナスの電子に分けることで（これを「プラズマ」化といいます）、これらの電気を帯びたガスに電気エネルギーを与えてガスを高速で噴射させることができます。電気ロケットは化学ロケットに比べロケットの進む力である「推進力」は非常に弱いのですが、「燃費」は優れているという特徴があります。自動車で例えば、化学ロケットはレーシングカーかダンプカー、電気ロケットは軽自動車か最近ではそのまま電気自動車といったところでしょうか。

従来の化学ロケットと電気ロケットの2つのロケットについての比較を行う前に、まず、ロケットの基本的な能力である前に進む力「推進力」について説明したいと思います(図1)。ロケットは進行方向に逆向きの方向にガスを噴射することによって前に進む力である推進力を得ます(ロケットの分野ではこれを「推力」と呼びます)。手で壁を押すと反対に壁から手に力を受けるのが感じられると思いますが、ロケットもガスを後ろに押し出すときに、反対に、ガスから前の方向に押し返されることで推進力を得ます。この推進力は次の2つの場合に大きくなります。

- ①同じ時間でより多くのガスを噴射する。
- ②ガスをより速く噴射する。

人が重いものを投げる場合やものを速く投げる場合には大きな力が必要ですが、その場合、反対に人はものから大きな力を受けます。ロケットが大きな推進力を得るのは、このような場合と基本的には同じ理屈です。

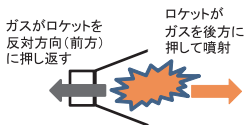


図1. ロケットが推進力を発生させる仕組み

次に推進力と燃費の面から化学ロケットと電気ロケットの比較をしていきたいと思います(図2)。化学ロケットは燃料を燃やすことでエネルギーを得ますので、径を大きくしてさえおけばたくさんのガスが同時に燃え、そのガスの量に比例してエネルギーが発生し、同時に多くの量のガスを噴射することができます。したがって、1秒間に数百キロのガスを噴射することができ、百トン以上の巨大なロケットを地球の重力に逆らって宇宙へ打ち上げることができます。これに対して、電気ロケットは電気力でガスを噴射するので、使える電力によって噴射できる量が決まってしまう。もし、日本のH-IIAロケットなどの大型の化学ロケットと同じように電気ロケットで打ち上げるとしたら数か所の発電所で発電するくらいの電力が必要になります。つまり実際には電気ロケットを地上からの打ち上げロケットとして使うことはできません。例えば、「はやぶさ」に用いられた「イオンエンジン」1基では地球の重力に逆らって持ち上げることができるのは一円玉1個程度になります。もちろん、荷物も推進剤もイオンエンジンもすべて含めてその程度の重さにしなればいけませんから、これは不可能です。このように電気ロケットは推進力が非常に小さいロケットです。

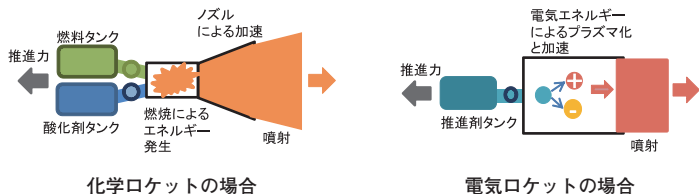


図2. 推進力を発生させる基本的な仕組みの違い

では、次に2つのロケットの「燃費」を比較してみましょう。実は、「ロケットの燃費」は「自動車の燃費」とは少し意味が違います。自動車の燃費は「燃料1ℓでどのくらいの距離を進むことができるか」という意味で使われます。しかし、ロケットは自動車と違って宇宙空間を飛行しますので近くの天体の引力が強いかどうかで進む距離が変わってしまいます。極端な例ですが、天体もなくて完全に無重力と言えるところでは動きを妨げるものがないので、最初にほんのわずかな推進剤で少しかだけ推進力を与えてあげれば、その後なにもしなくてもどこまでも飛行し続けることができることになります。逆に地球上から打ち上げる場合には、少しかだけの推進力ではびくともしないので飛行距離はいつまでも0のままになってしまいます。

それではロケットの「燃費」とはどのように決められるものなのでしょうか。ロケットの燃費(ロケットの分野では「比推力」と呼びます)は「同じ量の推進剤を使ってどのくらい大きな推進力を得られるのか」という意味で使われます。言い換えれば、「同じ大きさの推進力を得るのにいかに少ない推進剤で得ることができるか」という目安になります。宇宙ミッションでは、地球を含め様々な天体から引力を受けますが、推進力が大きければ、これらの引力を振り切って目的の天体に行くことができます。したがって、燃費が良ければ良いほど、つまり「同じ推進剤の量で大きな推進力が出

せれば出せるほど」、地球や太陽などの引力に逆らってより遠くの天体に行くことができるようになるわけです。このように結果的に、燃費が良いほど遠くの天体に行き易くなる、という点では自動車の燃費の意味に近いと言えるかもしれません。

また、燃費が良いと「同じ程度の大きさの推進力をより長い間出し続けることができる」ので、人工衛星などを長期間運用し続けることができます。地球の近くを回っている人工衛星は、宇宙空間とは言っても実際には少しだけ大気が存在していますので長い間運用していると、徐々に軌道がずれてきます。また、地球の自転と同じく1日で地球を一周することで常に地球上の同じ場所を観測できる「静止衛星」の場合、地球の半径の6倍程度の高い高度を回っていますので大気の影響はほとんど無視できますが、月や太陽の引力の影響を受けて少しずつ軌道が変わってきてしまいます。日本の静止衛星として有名なのは気象衛星「ひまわり」ですが、例えばひまわりを最初に正確に軌道に入れたとしても、そのままにもしなければ軌道が次第にずれ最後には日本の天気を観測できなくなってしまいます。そこで、この「軌道のずれ」を修正するためのロケットが積まれています。ロケットに推進剤が残っている間は、ずれてしまう方向と反対方向に推進力を得るようにロケットを噴射してあげれば、軌道を元に戻すことができます。ただし、このロケットの推進剤がなくなってしまうえば軌道を元に戻すことができませんので、たとえ測定機器が元気のままであったとしても人工衛星自体が使い物にならなくなってしまうこととなります。宇宙空間では船や飛行機のようにミッションの途中で推進剤を補給することはできませんので、観測を続けるためには常に新しい人工衛星（後継機）を大型の打ち上げロケットで打ち上げていく必要があります。もし「燃費の良い」ロケットを用いることができれば、軌道に戻すのに必要な推進力を従来よりも少ない推進剤で得ることができますので、結果として1つの人工衛星をより長期間運用することができます。その結果、地上からの打ち上げ回数、つまりコストを削減することが期待できます。

先にも述べましたように化学ロケットの場合には1秒間あたりに噴射できるガスの量はとても多いのですが、噴射には燃料自身が燃えるときに発生するエネルギーを用いています。したがって、ある量のガスを噴射する場合には、決まった量のエネルギーしか噴射に使うことができません。つまり、ガスを噴射する速さには限界があり、その速さは使用する推進剤によって決まってきてしまいます。実際に使用されている化学ロケット場合、ガスを噴射する速さは秒速4.5km程度が限界です。したがって、化学ロケットは先に紹介しました推進力を得るための2つの条件の中で、「②ガスをより速く噴射する」ことではなく、主に「①同じ時間でより多くのガスを噴射する」ことで大きな推進力を得ています。つまり、同じ大きさの推進力を得るためには多くの推進剤が必要になりますので、燃費は良くありません。

電気ロケットの場合には使える電力が限られていますので1秒間あたり噴射できるガスの量は非常に少なくなります。その代わり、電気エネルギーを用いてガスを噴射していることから、ガスを噴射するために使えるエネルギーの量はガスの量に関係なく与えることができ、噴射するガスの速さを大きくすることができます。つまり、電気ロケットは「①同じ時間でより多くのガスを噴射する」代わりに、主に「②ガスを

より速く噴射する」ことで推進力を得ています。したがって、電気ロケットでは、同じ大きさの推進力を得るために必要な推進剤は化学ロケットに比べて少なく済みます。つまり、電気ロケットは「燃費の良い」ロケットとすることができます。

例えば「はやぶさ」で用いられたイオンエンジン「 $\mu 10$ 」は秒速30km程度の速さでガスを噴射することができます。これは、化学ロケットの限界値である秒速4.5kmの約6倍程度の速さになります。実際に「はやぶさ」に積まれていた小型の化学ロケットの場合と比較すれば大体10倍の速さにもなります。このことは、 $\mu 10$ は約10倍燃費が良いことを示しています。もし「はやぶさ」のメインエンジンとしてイオンエンジンではなく従来の化学ロケットを採用していたとしたら、推進剤の量が大幅に増えますから、推進剤の重量が増える代わりに観測機器を減らす必要がでてきます。これでは多くの機器を必要とするサンプルリターンミッションに大きな影響を与えていたかもしれません。また、もし同等の機器を積もうとすればより大型の打ち上げロケットを用いる必要があったかもしれません。

つまり、「はやぶさ」のサンプルリターンミッションは、自分で判断して飛行する「自律航行」と燃費の良い「イオンエンジン」の両方が揃って実現したミッションであると言えます。電気ロケットは近年、人工衛星の制御用ロケットとして実用化が進められてきましたが、「はやぶさ」のようにメインエンジンとして電気ロケットを用いた例はほとんどありませんでした。つまり、今回の「はやぶさ」ミッションはサンプルリターンだけでなく「イオンエンジン」をメインエンジンとして使用したこと自体が非常に野心的であり、これらのミッションを達成したことで世界から大いに注目されています。今回の成功により、電気ロケットの探査機のメインエンジンとしての採用が進むことで宇宙探査範囲が拡大し、また幅広い用途の人工衛星に電気ロケットの搭載が進むことでより長期のミッションが実現していけば、今後の宇宙開発・利用の可能性が急速に広がっていくことが予想されます。

4. 今後の宇宙開発・利用の展望

これまでのように宇宙ミッションのすべてを化学ロケットで行うのではなく、例えば打ち上げには化学ロケットを用いるが探査機や人工衛星に電気ロケットを積極的に搭載する、などの選択肢が増えることで、今後の宇宙開発・利用は新たな段階に入っていくものと思われます。まず地球近傍のミッションとしては、これまでに実用化されている人工衛星による気象・通信・観測の更なる促進や、現在計画されている「宇宙太陽発電システム (SSPS)」などの大型のプロジェクトの実現が期待されます。特に、エネルギー問題が深刻化している現在では、SSPSのような計画が実現に近づくことで宇宙利用が人々の生活に与える貢献が飛躍的に増大するものと考えられます。このSSPSのような大型構造物の場合、地球上で組み立てて一度に宇宙に打ち上げることは困難です。そこで、多くのパーツを別々に打ち上げ軌道上で組み立てる方法が現実的ですが、この際、燃費の良い電気ロケットを各パーツに取り付け、組み立て時のパーツ間の移動用ロケットとして活躍することで建設コストを抑えられれば、計画が実現に向けて加速していくことが期待できます。

宇宙探査としては、まず「はやぶさ」のような無人探査ミッションの更なる探査範囲の拡大が期待できます。また、有人宇宙探査ミッションではアポロ計画で月に行った後長い時間足踏みが続いています。燃費の良い電気ロケットを用いることでコストの削減が可能になることから、さらに遠くの天体まで人間が行くことが可能になるでしょう。現在、国際共同ミッションとして、火星有人探査ミッションの検討が開始されていますが、そのミッションの一部を担うロケットとして電気ロケットが期待されています。火星有人探査自身はまだ先になる予定ですが、火星に行く前には再び月や小惑星を有人探査する計画も検討されています。

有人探査の場合、無人探査ミッションと違って宇宙飛行士が乗る宇宙船が大きくなるになりますし、宇宙飛行士に与える影響を考慮すると飛行時間が限られてきますから、現実的な問題として無人探査機のように燃費の良いロケットでゆっくりと時間をかけて行くわけにはいきません。そこで、「燃費が良くしかも推進力の大きなロケット」の開発が望まれます。ただし、3章で述べたように化学ロケットの燃費の改善はほぼ限界にきていますので、もともと燃費が良い電気ロケットの推進力を大きくする努力が必要になってきます。有人探査に限らず、最近ではこの「推進力の大きな電気ロケット」の開発に注目が集まっています。岐阜大学でもイオンエンジンに良く似たホールスラスタと呼ばれる電気ロケットの大推進力化のための研究を開始しています。次の章では、いくつかの種類の電気ロケットの紹介をしながら、岐阜大学で行われている研究開発についても簡単に紹介したいと思います。

5. 電気ロケットの種類と岐阜大学における研究開発

日本では、JAXAやいくつかの大学で電気ロケットの研究開発が進められています。岐阜大学においてもこれまで電気ロケットに関するコンピュータシミュレーション研究や実験研究が進められてきました。岐阜大学では、「はやぶさ」で用いられたイオンエンジンの他に、ホールスラスタ、パルス型プラズマスラスタ (PPT) というそれぞれ特徴の異なる電気ロケットの研究開発が進められています。この中でイオンエンジンとホールスラスタは仲間同士のロケットと言えますので、以下では、イオンエンジン、ホールスラスタ、パルス型プラズマスラスタの順で紹介していきたいと思えます。

5. 1 イオンエンジン (Ion Engine)

2章で紹介しましたように最も燃費の良い電気ロケットは「はやぶさ」にも用いられたイオンエンジンです。ここで、イオンエンジンが推進力を発生する仕組みについて簡単に紹介したいと思います (図3)。イオンエンジンでは、まず放電室と呼ばれるところで推進剤を電気力によってプラスのイオンとマイナスの電子に分けます。この状態を「プラズマ」といいます。このプラズマを作る放電室の出口にはプラスの電極が設置してあり、このプラスの電極から更に出口の方向に進んだところにマイナスの電極が設置してあります。イオンはプラスの電気を持っていますので、マイナスの電極に引きつけられて出口の方向に向かって加速します。その結果、イオンは出口から高速で噴射・排出されます (図3では右方向に噴射・排出)。3章で説明しましたよ

うにロケットでは、出口方向に高速で噴射されることで出口と反対方向に推進力が発生します(図3では左方向に発生)。ロケットの燃費は噴射されるガスの速さが速くなればなる程良くなる、ということも3章で説明しましたが、イオンエンジンでは、プラスの電極とマイナスの電極の間にかかる電圧を大きくすることでイオンを非常に速い速さで噴射することができるため燃費がとても良くなります。

ただし、イオンエンジンを作動するために、本体の他にもう一つ「中和器」と呼ばれる装置が必要になります。推進剤をプラスのイオンとマイナスの電子に分けた後に、一方のプラスのイオンを排出し続けると、残ったマイナスの電子だけが増えていき、本体が徐々にマイナスの電気を帯びていってしまいます。プラスのイオンだけでなくマイナスの電子も一緒に排出することができれば、こんなことにはならないのですが、電子はマイナスの電極とは反発し合うのでそうはいきません。このまま本体がマイナスの電気を帯び続けていくと、そのうちプラスのイオンがマイナスの本体に引き寄せられて戻ってきてしまいます。これでは推進力を発生できません。そこで、「中和器」というものを出口より下流に設置することで、マイナスの電極を避けるように「こっそり」と電子を放出します。これによりイオンエンジン本体がマイナスを帯びることなく、常にプラスマイナスゼロの状態に保つことができます。もし、この中和器がなければイオンを放出することも推進力を得ることもできません。つまり、イオンエンジンは、プラズマを生成しイオンの加速・噴出を行う「本体」と電子を排出して本体がマイナスに帯電しないようにする「中和器」がセットになって初めて作動することができます。

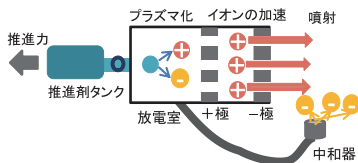


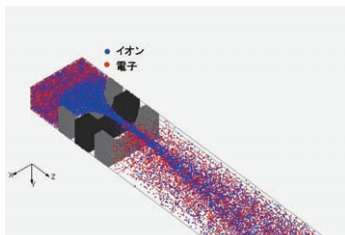
図3. イオンエンジンの基本的な作動の仕組み

「はやぶさ」にはイオンエンジンは4台積まれていました。しかし、地球に帰還する前に本体が不調になったり、中和器がうまく作動しなくなることで使えなくなったりしたのがありました。実際のミッションを成功させるためには推進力や燃費といった性能自体を良くすることももちろんですが、エンジンの寿命を予測することが非常に重要になってきます。「はやぶさ」のイオンエンジン μ 10も寿命評価のためミッション前の耐久試験が約2年間かけて行われました。イオンエンジンは特に燃費が良いことから今後更に長期のミッションへ用いられることが期待されますが、その場合ミッション期間に応じてさらに長い期間の寿命評価が必要になります。その場合に、実際に耐久試験を行い、その結果に基づいて一部改良し、更に耐久試験を行う、という過程は現実的ではありません。そこで、JAXAはイオンエンジン本体の寿命を評価できるコンピュータシミュレーションコードの開発を行いました。このコードはJIEDI

コードと呼ばれ、JAXAと大学等が連携して開発プロジェクトを実施しました。岐阜大学ではこのJIEDIコード開発プロジェクトに参加し、JAXAとの共同研究としてイオンエンジンに関するコンピュータシミュレーション研究を行ってきました。現在ではこの成果を基に、より実際の現象を含めたシミュレーションモデルの開発や、中和器のシミュレーションコードの開発などを進めています（図4）。



イオンエンジンシミュレーション研究の様子



イオンと電子運動のシミュレーション追跡の例

図4. 岐阜大学におけるイオンエンジン研究開発

5. 2 ホールスラスタ (Hall Thruster)

イオンエンジンは非常に燃費が良い反面、推進力が小さく、地球の引力が強い地球近傍のミッションにはあまり適していません。ここで紹介するホールスラスタはイオンエンジンに仕組みが良く似ていますが、イオンエンジンよりも大きな推進力が得ることができる電気ロケットです（図5）。そこで、地球近傍の人工衛星や有人惑星探査などにおいて活躍することが期待されています。イオンエンジンではまず放電室でイオンと電子に分け、次に電極によりイオンの加速を行います。ホールスラスタではこの過程を同じ場所で行う点がイオンエンジンとの大きな違いになります。しかし、ホールスラスタもイオンエンジンと同様、イオンのみを本体から噴射しますので中和器が必要になります。

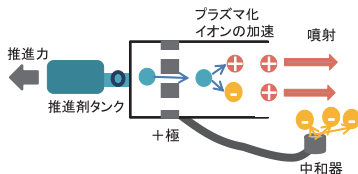


図5. ホールスラスタの基本的な作動の仕組み

岐阜大学では、このホールスラスタの安定作動研究や高出力化による推進力の向上を目的として、コンピュータシミュレーションと実験の両面から研究を進めています。ホールスラスタに限らず電気ロケットは一度に噴射できるガスの量が少ないので噴射ガスは非常に薄いガスになっています。そこで、もし地球上の大気の中で作動させて

しまうと、大気の圧力に負けて正常に噴射することはできません。つまり、電気ロケットを正常に作動させるためには宇宙空間のように非常に空気の薄い状態の中で作動させることが必要になります。そこで、真空ポンプで常に空気を排気しながら中を宇宙に近い状態に保っている「真空チャンバ」というタンクの中で実験を行います。岐阜大学では、直径1 m、長さ1.8mの大型の真空チャンバを使って実験をしています(図6)。大型の真空ポンプを稼働させると真空チャンバの中は圧力が大気圧の約500万分の1という真空状態にすることができます。図6には岐阜大学でのホールスラスト作動実験の様子を示しています。紫色に左方向に噴射しているのがホールスラスト本体から噴射されているガスです。また、その左側にあるオレンジ色の部分は中和器です。



岐阜大学・電気ロケット実験用真空チャンバ



ホールスラスト作動の様子

図6. 岐阜大学におけるホールスラスト研究開発

5. 3 パルス型プラズマスラスト (Pulsed Plasma Thruster)

パルス型プラズマスラスト、通称PPTは電気ロケットの中でも特別ユニークな構造を持っています。通常の電気ロケットは、H-IIAなどの化学ロケットと同様に推進剤はタンクの中に入れておき、バルブを通じて推進剤を供給し様々な方法で推進剤を加速させ後方に噴射します。ところがPPTはこのような推進剤を供給する部分を持っていません。なぜならPPTでは固体の筒型の推進剤を使っているからです。H-IIAロケットの横に補助の化学ロケットがついているのをご存じでしょうか。この化学ロケットは「固体ロケット」と呼ばれ、花火の火薬と同じようにタンクの中に固体の推進剤が詰められており、それに火をつけて燃やすことで推進力を得ます。PPTの場合はその固体の推進剤自身が「胴体」そのものを兼ねていますので化学ロケットと違ってタンクなどはありません。「穴の空いた固体の推進剤の後ろにノズルがついているだけ」、という非常にシンプルな形をしています(図7、図8)。つまり、この推進剤をすべて使い切ってしまったらPPTの「胴体」がなくなってしまうわけです。もちろん実際にはそこまで使いませんが、このシンプルな特徴を生かして小型衛星の制御への適用が期待されています。PPTでは、コンデンサーにためた電気を、電極を兼ねたノズルと推進剤の頭のあたりに設置された電極の間に一気に流します。つまり推進剤の穴の中に電流が流れます。この電流が流れる際に熱(ジュール熱)が発生し、推進剤の穴の周囲の壁を温めます。これにより壁付近の推進剤がガスとなって穴の中にとまります。

このガスは一部プラスのイオンとマイナスの電子に分かれています（プラズマ状態）が、このプラズマに更に電流が流れることで温められ、温められたプラズマがノズルによって膨張しながら後方に噴射し推進力を得ます。つまり、PPTではコンデンサーにためていた電気を放出している間だけ推進力が発生します。放出後、再びコンデンサーに電気をため、同じ過程が繰り返されます。

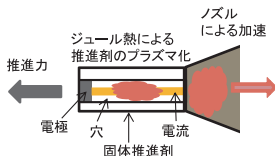
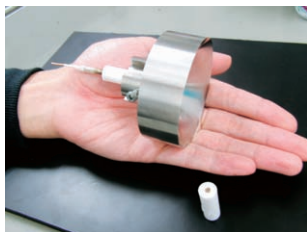
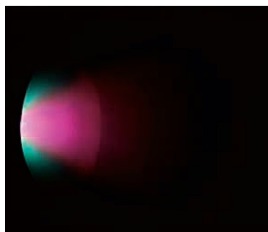


図7. PPTの基本的な作動の仕組み

このようにPPTは「パルス」的にプラズマを噴射して推進力を発生することから、「パルス型プラズマスラスタ」と呼ばれます。他のロケットでは、一度作動し始めると停止するまでのある程度の時間、推進力を発生し続けますので精密な作動の制御は難しいですが、PPTではパルスの回数を調整することで詳細な力の制御が可能です。そこで、小型の人工衛星制御だけでなく、一気に力を加えると歪んでしまうような複雑な構造を持つ大型建造物の繊細な制御にも向いています。このような理由から、PPTは今後の宇宙利用の本格化に伴い幅広く活躍することが期待されています。



岐阜大学PPT実験機



PPT作動の様子

図8. 岐阜大学におけるPPT研究開発

岐阜大学では、このPPTの推進剤をできるだけ無駄に使わないようにして作動させるための実験研究を進めています（図8）。ただし、PPTの一回のパルス作動時間は1万分の1秒という非常に短い時間ですので、人間の目で見ると一瞬の出来事にしか見えません。そこで、100万分の1秒まで現象を細かく撮影することが可能な高速度カメラなどを用いて研究を進めています。

5. 4 その他の電気ロケット、未来のロケット

岐阜大学で研究を進めている電気ロケット以外にもいくつかの電気ロケットがあり

ます。岐阜大学で研究しているものとは別のタイプのPPTもありますし、研究しているPPTのように推進剤をプラズマ化してジュール熱でエネルギーを与える、という仕組みは同じでも通常のロケットと同じくガス状の推進剤を使って作動するアークジェットスラスタと呼ばれるものもあります（地球上で用いられている「アーク溶接」の装置と基本的には同じ仕組みです）。また、電磁力を使ってプラズマを噴射するMPDスラスタと呼ばれる電気ロケットもあります。どの電気ロケットも化学ロケットに比べて燃費は良いという共通の利点を持っていますが、タイプにより推進力や燃費に違いがあり、これらの性能や特徴に基づいて用いられるミッションが決まってきます。

また、電気ロケットよりもさらに燃費の良い未来のロケットとして、レーザーを地上からロケットに送り、そのエネルギーを受けて推進力を発生させる「レーザー推進ロケット」の研究も盛んに進められています。エネルギーを地上から送るのですから、電力の制限を気にせずに作動させることができるので燃費をとっても良くすることができます。他にも太陽の光の圧力を使ってヨットのように進むソーラーセルや地球の磁場を使うものなど、様々なアプローチで燃費の良いシステムの研究が進められています。

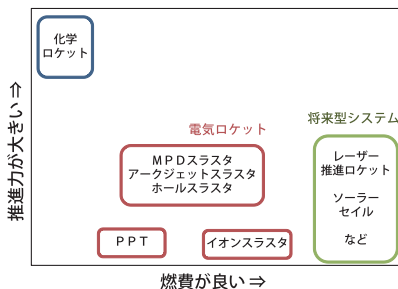


図9. 推進力と燃費によるロケットの分類

6. おわりに

第2次世界大戦後に本格化したロケット開発は、米ソ冷戦時代が始まると大型の化学ロケットの開発競争の時代を迎え、1960年代の終わりには人類を月に運ぶことができるまでになりました。その後、膨大な予算を必要とする大型の化学ロケット開発の時代から、再利用によるコスト削減を目的としたスペースシャトルの開発、スペースシャトルなどによる国際宇宙ステーションの建設と無重力環境下での実験など、宇宙開発の方向が地球周辺における宇宙利用へとシフトしてきました。今後、燃費の優れた電気ロケットの実用化が進むことでさらなる低コスト化が可能になれば、より本格的な宇宙利用の時代が到来するかもしれません。また、「はやぶさ」で小惑星サンプルリターンを可能にした電気ロケットを活用することで月の有人探査以降足踏みしてい

た有人探査の活発化や、無人探査機による探査範囲の拡大、などが期待できます。もちろん、これらはあくまで技術的な側面からみた話になりますので、時代の経済状況により大きく影響を受ける宇宙開発の行方を想像することは難しいというのが現状です。ただ、これからの宇宙開発において燃費の良い電気ロケットがその役割を増していくことは十分に予想されますので、皆さんが今後TVなどで何らかの宇宙開発のニュースに触れられた際には、このロケットはどんなロケットを使っているのだろうか、電気ロケットはどこかに使われているのだろうか、燃費はどうなっているのかな、などと興味を持って見ていただけたら幸いです。