

SS-520-3号機観測 ロケット頭胴部

電離大気流出の原因となるイオンの加速・加熱機構の解明を目指しているSS-520-3号機観測ロケットは2017年度から打上げが延期となっていました。本年の11月3日から16日の間にノルウェーのスパールバル諸島スピッツベルゲン島のニーオルスンロケット実験場から打ち上げられる予定です。写真左は、実験延期から4年ぶりに組み上がったSS-520-3号機観測ロケットの頭胴部です。写真右は、ダイナミックバランス試験の際にノーズコーンが取り付けられた頭胴部です。



The Forefront of Space Science

宇宙
科学
最前線

迫れ、あかつきの星! (2) ～金星大気モデリングの最前線～

京都産業大学 理学部 教授 高木 征弘(たかぎ まさひろ)

はじめに

金星探査機「あかつき」の観測によって、熱潮汐波の赤道向き運動量輸送 [1] や雲頂の子午面循環 [2] といった、多くの興味深い現象や事実が見いだされつつあり、金星気象学に進展がもたらされています。しかしながら、観測の制約のため、大気スーパーローテーションを維持しているのが南北の温度差に起因する大気の循環(子午面循環メカニズム)なのか、太陽加熱によって作られる大気中の波(熱潮汐波メカニズム)なのか、あるいはその両者なのか、といった問題の解決には至っておらず、運動量の鉛直輸送や雲頂以外(特に下層大気)の子午面循環なども依然として不明です。私たちは、「あかつき」や地上観測の結果を手がかりに金星気象システムを解明するとともに、金星という地球と対照的な条件での気象を理解することで惑星気象全体の理解を深めるために、大気大循環モデル(GCM)を用いて研究を進めています。本稿ではその取り組みの一部として、京産大の安藤 紘基さん・鈴木 杏那さん、慶應大の杉本 憲彦さん・藤澤(山田)由貴子さんとの研究を中心にご紹介したいと思います。金星

気象の概要とこれまでの研究の歴史、今後の金星気象学の展望について興味をお持ちの方は、松田・高木(2021)[3]をご覧くださいと幸いです。

熱潮汐波の数値シミュレーション

熱潮汐波は太陽加熱によって励起される大気中の波で、東西波数1のものが一日潮、2のものが半日潮と呼ばれます。金星では高度約50~70kmの大気が太陽光吸収によって強く加熱され、そこで励起された熱潮汐波が上下に鉛直伝播すると考えられています。鉛直伝播に伴って運動量とエネルギーが輸送されるため、熱潮汐波はスーパーローテーションの生成・維持メカニズムの有力候補の1つです。この熱潮汐波の3次元構造や力学的性質が「あかつき」観測によって初めて明らかになってきました[1, 2, 4, 5]。これまでの惑星探査では得られなかった画期的な成果といえるでしょう。

「あかつき」の中間赤外カメラLIRによる観測で得られた雲頂付近の温度分布[5]を私たちの開発している金星GCM(AFES-Venus)の結果[6]と比較すると、分布パターンはよく似ているものの、位相が東西方向に大きくずれていること

が明らかになりました。波の鉛直伝播に伴って位相が東西方向に変化することを考えると、波の励起はモデルでうまく再現できているものの、鉛直伝播に問題がありそうです。熱潮汐波の鉛直構造は成層度*に強く影響されます。そこで成層度分布を改良した数値シミュレーションを試みました(Suzuki et al., in prep.)。

図1は得られた風速と温度を「あかつき」による観測と比較したものです。温度分布にみられた東西方向への位相のずれがかなり改善されました(図1a)。LIR観測による雲頂付近の風速(図1c)と比較すると、昼側での極向きの流れや夜側での赤道向きの流れなど、特徴がよく再現されています。図1bと1dは低緯度における温度偏差(温度の東西平均からのずれ)の東西・鉛直分布です。高度60km付近で位相の傾きが逆になる(温度偏差の分布が>型になる)ことや、40~60kmで一日潮、60~80kmで半日潮が卓越するといった特徴がよく再現されています。ただし、全体的に15°~30°程度の東西方向のずれが残っています。これは成層度分布の再現性(特に50~60km付近の弱成層領域)に問題があるためと考えられます。

図1e、fはモデルで得られた熱潮汐波による運動量の南北・鉛直輸送です。運動量輸送は正(赤)が北向き・上向き、負(青)が南向き・下向きを表します。「あかつき」の紫外線カメラUVIによる観測から、雲頂スーパーローテーションの維持に対する熱潮汐波の赤道向き運動量輸送の重要性が示唆されていますが[1]、モデルにも低緯度の高度70~76kmに赤道向き運動量輸送がみられ(図1e、赤道を挟んで北半球側に負の領域、南半球側に正の領域があり、運動量輸送は両半

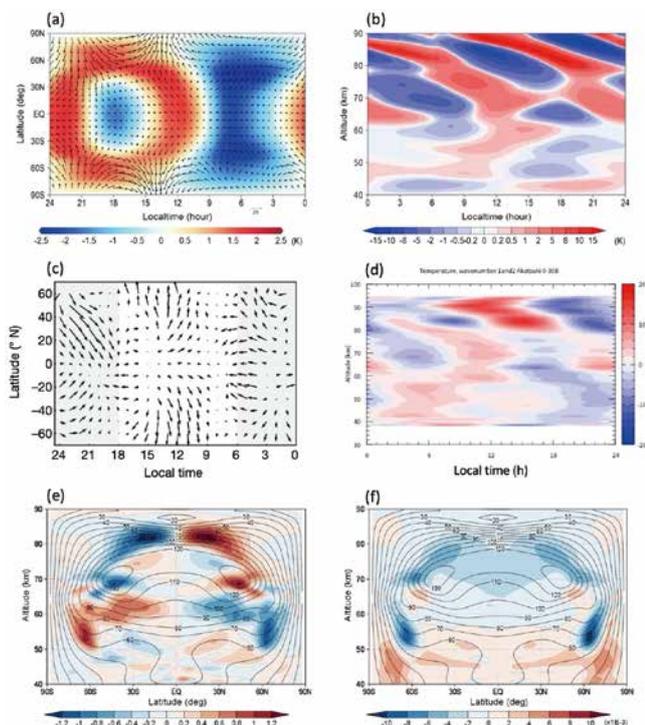


図1: GCMで得られた熱潮汐波の構造と「あかつき」観測の比較 (Suzuki et al., in prep.). (a) 「あかつき」LIRの荷重関数を考慮した雲頂付近の温度の東西平均からのずれ(温度偏差、カラー)と水平風速(矢印)、(b) 低緯度で緯度平均した温度偏差の東西・鉛直分布、(c) 「あかつき」LIR観測で得られた風速分布 [2]、(d) 「あかつき」電波掩蔽観測で得られた低緯度の温度偏差 (Ando, Noguchi, Imamura et al., in prep.)、(e, f) GCMで得られた南北方向 (e) と鉛直方向 (f) の運動量輸送(フラックス、単位は $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-2}$)。

球で赤道向き)、観測結果と整合的です。ところが、運動量輸送の方向は高度によって異なり、50km付近と65~70km、80km以上では極向きであることがわかりました。鉛直輸送(図1f)は高度60km付近のスーパーローテーションを加速し、過去の研究 [7] と整合的です。スーパーローテーションの理解には子午面循環の効果を明らかにすることも必要ですが、「あかつき」LIR観測によると雲頂の子午面循環は低緯度でごく弱い赤道向き、中緯度で弱い極向きです [2]。GCMで得られている子午面循環は顕著な時空間変動を伴う複雑な構造をしており、モデル間の相違も大きく、観測結果の解釈は明らかではありません [3]。熱潮汐波や子午面循環の構造はスーパーローテーションや成層度の分布、放射輸送にも強く影響されるため、現在のモデルがどこまで現実を捉えているかわかりませんが、それらによる複雑な運動量と熱の輸送がスーパーローテーションの維持にどのように寄与するのか、3~10日程度の周期をもった短周期擾乱などの効果も含め、現在研究を進めています。

硫酸雲のモデリング

金星大気の高高度約45~70kmには濃硫酸の液滴からなる厚い雲層が存在し、全球を完全に覆っています。この雲は太陽放射の散乱・吸収と高温の下層大気からの熱放射の吸収を通じ、金星大気の運動と温度分布に強く影響すると考えられています。雲について、これまでに多くの研究がなされてきましたが、3次元的な大気運動の効果が十分考慮されておらず、雲の全球的な分布がどのようにして作られるのかが分かっていませんでした。また、「あかつき」が観測する金星画像はさまざまな高度の雲分布を反映しています。数値モデルの中で現実的な雲分布が再現され、その結果と「あかつき」による観測を直接比較できるようにになれば、観測データから引き出せる情報量は飛躍的に増えるものと期待されます。そこで我々はAFES-Venusに簡単な雲モデルを導入し、雲分布の形成・変動について調べました [8, 9]。

モデル中で考慮する雲材料物質は水蒸気と硫酸ガスのみです。水蒸気は高度0~30kmの混合比を固定することによって与えます。硫酸ガスは昼面の60~64kmにおいて一定の速度で生成され、38km以下で熱分解されるものとし、水蒸気と硫酸ガスは大気運動によって移流され、飽和したところで凝結し雲を作ります。雲は移流されると同時に、仮定された沈降速度で落下し、不飽和になったところで蒸発します。

図2は雲なしの状態から40地球年ほど数値積分して得られた雲分布です。高緯度に厚い雲、低緯度にやや厚い雲が作られています。こうした緯度分布は「あかつき」などによる観測でも指摘されており [10]、金星雲分布の特徴をよく再現しています。雲分布の形成過程を調べたところ、高緯度と極域の43~55kmに成層度の小さい大気層が存在しており、そこで生じる強い鉛直流によって高緯度の厚い雲が作られていることがわかりました。一方、低緯度のやや厚い雲の形成には子午面循環による硫酸ガスの移流が寄与しています。また、低緯度の下部雲層には東西波数1(図2b)と2(図2c)の構造が存在し、周期約5.5地球日の顕著な時間変動を示すことが見いだされました。この結果も過去の観測結果をよく再現しています。従来、こうした変動は雲底付近の鉛直流によって作られると考えられてきましたが、本研究の結果、東西波数1の

* 空気塊を鉛直方向に少しだけ動かしたとき、元の位置に戻ろうとする強さの程度。

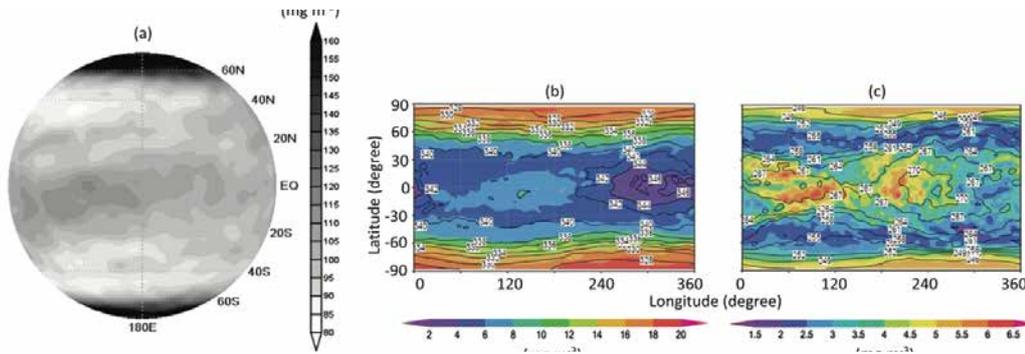


図2：GCMで再現された雲分布 [8]。(a) 鉛直積算した雲密度の水平分布、(b、c) 雲密度(カラー)と温度(等値線)の水平分布。(b)は高度50km、(c)は60km。

構造は赤道ケルビン波(赤道域に存在し、自転と同じ方向に伝播する特殊な重力波)に似た惑星規模波動に伴う温度変動が原因であることがわかりました。また、東西波数2の構造には熱潮汐波が寄与しているようです。

今後は「あかつき」のUVI(紫外線)で観測される雲頂付近の雲分布の再現を目指してモデルを改良したいと考えています。

大気重力波の超高解像度シミュレーション

近年、大気大循環モデルを利用した金星研究が盛んに行われていますが、主な関心がスーパーローテーションや熱潮汐波などの惑星規模現象の再現にあつたため、天気予報のような高解像度シミュレーションはこれまで行われていませんでした。しかし、地球の成層圏の循環には、大気重力波とよばれる比較的小規模な波が重要な役割を果たしています。金星でも重力波と思われる波が観測されており、大気大循環に関与している可能性があります。そこで私たちはAFES-Venusを用いて金星大気全体の超高解像度シミュレーションを実施しました [11]。解像度はT639L260(水平約20km、鉛直約460m)です。重力波に対する熱潮汐波の寄与をみるために、現実的な太陽加熱分布を用いた場合(nominal case)と、東西一様な太陽加熱分布を用いた場合(Qz case)の2通りで実験を行いました。前者には熱潮汐波が含まれますが、後者には熱潮汐波が含まれません。

結果を図3に示します。カラーで示されているのが重力波に伴う鉛直流(赤が上昇流、青が下降流)で、赤青の模様

の連なりが重力波の伝播の様子を示しており、色の濃い部分は重力波の振幅が大きい領域です。図3a、bの比較から、図3aにみられる低緯度の小規模な重力波(水平波長約250km)の励起源が熱潮汐波であることがわかります。赤道での断面図(図3c)をみると、熱潮汐波(コンター)と重力波に伴う鉛直流の振幅(色の濃淡)に相関があることがわかります。この結果は、熱潮汐波に伴って重力波が励起されており、その励起メカニズムは重力波の自発的放射であることを示唆しています。地球大気でみられるジェットの出典での重力波励起と共通性があり、非常に興味深い結果です。一方、中高緯度では熱潮汐波の有無に関わらず重力波が励起されており、励起源は傾圧不安定や順圧不安定であると推定されました。

スーパーローテーションの加速・減速に対する重力波の寄与を調べたところ、重力波は励起領域で熱潮汐波の効果を半分程度打ち消すこと、高度80~85kmまで鉛直伝播した重力波はそこでも顕著な加速・減速をもたらすことがわかりました。この結果は金星上層の大気大循環に対する重力波の重要性を強く示唆しています。今後、「あかつき」UVI観測などが捉えた小規模な波の構造を詳しく調べることで、重力波の分布や励起過程が観測的に明らかになるものと期待されます。

これからの展開

今回は紹介できませんでしたが、金星大気大循環モデル用の放射輸送モデルの開発も進んでいます(東京海洋大・関口 美保さん、京産大・佐川 英夫さん、東京学芸大・松田 佳久先生との共同研究)。また、「あかつき」観測を利用したデータ同化に関する研究も進んでおり [12、13]、観測とモデルの利点を最大限に活かした研究の進展とともに、将来の金星探査計画検討のためのツール(Fujisawa et al., under revision)としての活用が期待されています。

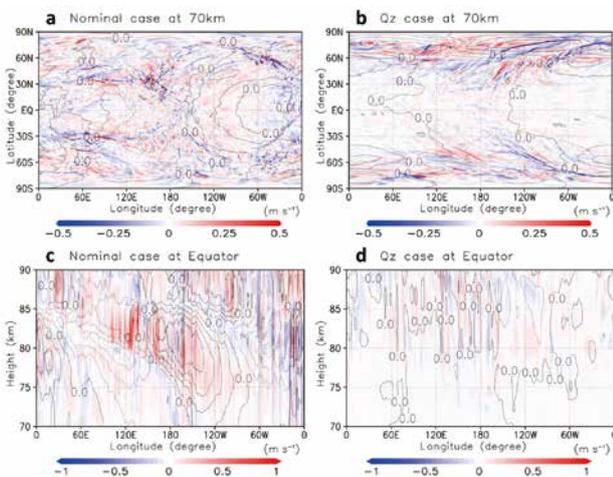


図3：超高解像度GCMで得られた金星大気重力波 [11]。鉛直速度をカラー、高度場偏差を等値線で示す。(a)、(b)は高度70kmでの水平分布、(c)、(d)は赤道での東西-鉛直分布。(a)、(c)は熱潮汐波を含む場合、(b)、(d)は熱潮汐波を含まない場合の結果。

- [1] Horinouchi et al., 2020, Science, 368, 405–409.
- [2] Fukuya et al., 2021, Nature, 595, 511–515.
- [3] 松田 佳久・高木 征弘, 2021, 天気, 68 (2), 67–83.
- [4] Ando et al., 2018, JGR Planets, 123, 2270–2280.
- [5] Kouyama et al., 2019, GRL, 46, 2019GL083820.
- [6] Takagi et al., 2018, JGR Planets, 123, 2017JE005449.
- [7] Takagi and Matsuda, 2007, JGR, 112, D09112.
- [8] Ando et al., 2020, JGR Planets, 125, e2019JE006208.
- [9] Ando et al., 2021, JGR Planets, 126, e2020JE006781.
- [10] Peralta et al., 2020, GRL, 47, e2020GL087221.
- [11] Sugimoto et al., 2021, Nature Communications, 12:3682.
- [12] Sugimoto et al., 2017, Scientific Reports, 7:9321.
- [13] Sugimoto et al., 2019, GRL, 46, 2019GL082700.

2021年度気球実験

5月中旬から8月末まで、大樹航空宇宙実験場にて気球実験を実施しました。

気球は動力を持たず風に乗って移動するエコな乗り物です。大樹での気球実験を毎年この時期に実施しているのは、夏季の典型的な風パターンである「高度10数kmの偏西風（いわゆるジェット気流）」と、より高高度の成層圏で吹く東風」の組み合わせを利用することでブーメランのように気球を往復させる飛行運用を実現できるからです。しかし、近年は地球温暖化の影響なのか、過去の典型的な描像とは全く異なる風が吹いて実験を実施できない日が頻発しており、深刻な問題となっています。

この課題に対する（中長期的な視点とは別の）当面の対策としては、実験の準備を速やかに終えて飛行機会を待ち、限られた

機会を逃さないことが重要です。そこで、計画した5つの実験のうち早いものは6月上旬に大樹での最終準備を整えました。今夏も「ジェット気流の蛇行」などの極端な気象が発生し、日本各地でも猛暑や大雨などとなって現れました。それでも、その合間で気象条件が適合する機会を得ることができ、7月4日に「極薄ペロプスカイト太陽電池の気球飛行」を目的としたBS21-07実験、7月9日に「高精度変位計測装置の実証」を目的としたB21-08実験、8月5日に「成層圏における微生物捕獲実験」を目的としたB21-06実験をそれぞれ実施して、計画通りの飛行を実現できました。現在、実験で得られたデータの詳細な解析が進められています。一方で、「火星探査用飛行機の高高度飛行試験」を目的としたB21-05実験と「気球VLBI実験」を目的としたB21-07実験は、飛行機会を得られず、今年度の実施を見送ることになりました。

なお、今期に限らず、気球実験は概して、最先端の宇宙科学研究に資するだけでなく、若手や学生がミッション遂行の本番を経験できる貴重な場でもあります。今期は、JAXAに入ったばかりの新人を含む11名が短期研修などの目的で参加しました。今後も同様の取り組みを継続し、人材育成にも貢献していきます。

昨年に続いてコロナ禍の中での気球実験実施となりましたが、昨年以上に感染拡大防止に努め、また、地元の自治体や住民の皆様にも暖かく迎えていただき、無事に完了することができました。実験実施にご協力いただきました関係者の皆様に深く感謝します。

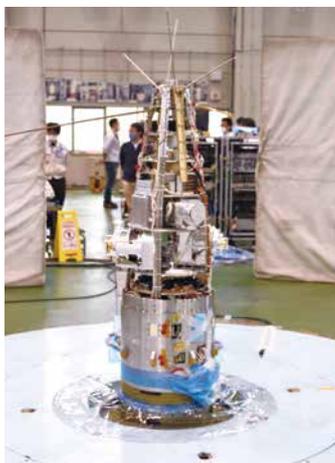
（福家 英之）



放球直前の大気球B21-08号機

SS-520-3号機合せの状況について

電離大気流出の原因となるイオンの加速・加熱機構の解明を目指すSS-520-3号機観測ロケットは当初は2017年の12月に、ノルウェーのスパールバル諸島スピッツベルゲン島のノーオルスロケット実験場から打ち上げられる予定でしたが、2017年に実施された噛み合わせ試験の最終段階で搭載のタイマーに不具合が見つかり、延期となっていました。その後、タイマーの不具合は解決したものの、なかなか打ち上げが実現せず、昨年度は、今年こそは打ち上げることができる、と思ったところが新型コロナウイルスの感染状況悪化に伴ってまた延期となってしまいました。新型コロナウイルスの感染状況はまだまだ厳しいと言わざるを得ませんが、感染対策を含め、非常に多くの方々からのご支援を頂き、本年度11月の打ち上げ



スピントイマー試験後のSS-520-3号機観測ロケット頭胴部

に向けて準備を進めているところです。PI班一同を代表して感謝申し上げます。

さて、2017年の打上げ延期に伴い、中断となってしまった噛み合わせ試験ですが、昨年度末の3月と本年度の4月の2回に分けて、飛行体環境試験棟と構造機能試験棟で再開されました。3月には、2017年の打上げ延期の決定後、頭胴部から外されて各機器担当のところで保管されていた機器が再度頭胴部に組み付けられました。噛み合わせ再開までの3年を超える保管期間中に、問題が生じていないかどうかの確認を行い、一部部品を新しくするなどの処置を行った後、再噛み合わせ試験に臨みました。機器の再組みつけについては、2017年の噛み合わせ試験の際に撮った写真を見ながら作業することで、スムーズに作業を進めることができたと思います。4年ぶりに組み上げられた頭胴部を見て、ようやく打ち上げることができるという実感が湧いてきました。その後の噛み合わせ試験も順調に進み、最後のスピントイマー試験（写真）で一部の観測装置の伸展物がうまく伸展しなかった事を除いて、大きな問題も無く予定通りに試験を終了することができました。当初の計画からは4年遅れとなってしまいましたが、SS-520-3号機観測ロケットは11月3日から16日の間に打ち上げられる予定で、その成果に期待が高まっています。

（齋藤 義文）

第2回「ISAS惑星探査ワークショップ」開催

2021年9月21、22、24日の3日間、第2回ISAS惑星探査ワークショップ (ISAS Planetary Exploration Workshop) をリモート開催しました⁽¹⁾。本ワークショップは、(現行ミッションの状況報告ではなく)十数年・数十年先の新しいミッション提案に繋がるような理工学を交えた学際的な発表および議論の場を設けることを狙って企画されました。また、ミッションを実現していくための分野横断的・大学-JAXAの横断的なグループ構築(プラットフォーム作り)のきっかけ作りも狙いの1つです。若手研究者が企画し、また発表者・参加者もポスドク・博士課程学生を含む若手研究者をメインターゲットとしました。

開催は、昨年に引き続き完全リモート・原則英語で行いました。その利点を活かし、Keynote/Invited Speakerとして国外等の遠方からの参加者を積極的に巻き込みました。一方で日本語の発表も認めたことで、日本の若手研究者にも参加しやすい雰囲気を作れたのではないかと思います。リモート開催ならではの「気軽に参加できる」という利点もあり、発表者41名に対し、約70の所属から、学生からシニアにわたる183名の参加登録(瞬間同時最大参加人数は約86名)がありました。今年着陸に成功したMars 2020や今後のMars sample return、そしてMars Ice Mapperをはじめとした将来探査など、火星に関する議論が豊富だったことも今回の特徴と言えます。一方でリモート開催の欠点である「人脈構築の機会が限られている」という点は、依然として改善の余地が残りました。このあたりはリモート開催の限界もあるかもしれません。

第2回ISAS惑星探査ワークショップの参加者(一部)の集合写真(2021年9月21日撮影)



本ワークショップは、発表と数分のQ&Aというよくある形ではなく、探査対象毎(「内惑星(金星・水星)」「火星」「外惑星(木星以外)」「月」「小天体」)にSplinter Meetingを開催し、「数十年先の日本の宇宙探査が目指すべきサイエンスゴールは何か?」「何をどのように探査するのか?」「どのような技術課題があるか?」という問いに対する議論をじっくり行うことが大きな特徴でした。昨年開催した第一回のワークショップにおける議論を基盤に⁽²⁾、将来に繋がる更なる一步を踏み出せたと考えています。議論の着地点をよりはっきりさせるためには、将来探査を考える上で必要不可欠な幅広い工学分野や、宇宙研で今まさに進められようとしているトピックス(例えばフロントローディング研究など)の包括が望ましいと思われました。今後とも本ワークショップを継続的に開催していきたいと考えています。

最後に、紙面の都合からお名前の記載が叶いませんが、ワークショップに参加・発表して下さった皆様、Splinterの皆様、事前準備に時間を費やして下さったSession Organizing Committeeの皆様、心より敬意の気持ちを表したいと思います。

(木村 駿太/尾崎 直哉/村上 豪)

(1) ISAS 惑星探査ワークショップ 2021 HP: <https://www.isas.jaxa.jp/researchers/symposium/pew/fy2021.html> (2) ISASニュース 2021年10月号: https://www.isas.jaxa.jp/outreach/isas_news/files/ISASnews475.pdf

火星の砂嵐研究成果が続々と

火星大気の特徴的な特徴の1つが、地表から絶えず供給される大気中の塵(ダスト)です。ダストは大気中に常に存在しており、太陽からの光を吸収して大気の熱構造を決定するため、火星気候や気象で重要な役割を果たすことが知られています。また、ダストを巻き込んだ砂嵐(ダストストーム)が頻繁に観測されています。砂嵐は小規模なものから大規模なものまで様々ですが、「グローバルダストストーム」と呼ばれる惑星規模の砂嵐は、約10年に一度しか起こらず、発生メカニズムや火星気象や気候変動への影響はよくわかっていませんでした。

そんな中、2018年6月に2007年以来はじめてとなるグローバルダストストームの発生が確認されました。この機会を捉えようと、火星を周回する欧米の複数の探査機によって大気観測が盛んに行われました。現在、その解析結果が続々と報告されています。私が参加するESAのExoMars-Trace Gas Orbiter (TGO) は、科学運用を開始してまもなく、砂嵐の観測の機会を得ました。観測データを解析すると、砂嵐で巻き上げられたダストが太陽からの光を吸収することで大気温度が上昇し、氷雲の生成を妨げることで、水蒸気が少なくとも高度100kmまで到達することがわかりました。火星にはかつて大量の水が存在し、その水は宇宙空間へ消失したと考えられています。砂嵐によって水蒸気がより高い高度まで到達すれば、水の宇宙空間への消失を加速するため、火星気候変動に重要な役割を果たしている可能性があります。

2001年に発生したグローバルダストストーム時の火星(右)と静音時(左)。Image credit: NASA/JPL-Caltech/MSSS.



さらに、2019年1月にも、小規模でありながら強い砂嵐が火星で再び発生しました。私はこの砂嵐の発生を、コロラド大学・Mike Chaffin博士からの連絡で知りました。コロラド大学のチームは、NASAのMAVEN火星探査機に搭載された紫外線分光計を担当しています。彼らの観測で、宇宙空間へ消失する水素原子が急激に増えている、との一報をうけ、TGOで大気下層のデータを確認すると、予想通り小規模の砂嵐が発生しており、前述の原理で水蒸気が高い高度まで到達していました。その連絡は他の国際チームにも共有され、NASA-MRO火星探査機では大気昇温とダスト量増加を、ESA-TGOの他の観測器でも水蒸気の増加を確認しました。

火星では現在、8つの探査機と、4つの着陸機が探査を続けており、このような突発的な大気現象に対して複数の探査機による観測結果を結合することが可能になりました。2025年に火星到着が予定されているJAXAの探査機MMXもその仲間に加わり、火星圏の科学を発展させることが期待されています。

(青木 翔平)

國中所長が服部報公賞を受賞

服部時計店(現セイコーホールディングス)の創業者服部金太郎氏の浄財にて設立された財団法人服部報公会様より、「電子サイクロトン共鳴放電式プラズマ源の研究開発と小惑星探査機への宇宙実用並びに産業への応用展開」として、服部報公賞を授与いただきました。マイクロ波放電式イオンエンジンの研究と成果が、財団の設立趣旨「国家および社会に対し有用なる発明発見または研究を成就」として評価いただきことに、たいへん感謝申し上げます。栗木研究室のメインテーマとして大学院学生時代より長らく、各種電気推進の研究を行ってまいりました。それがマイクロ波放電式イオンエンジンとして結実し、主推進として応用され「はやぶさ」小惑星探査機に続き「はやぶさ2」が2度目の地球~小惑星間往復航行に成功しました。3度目の宇宙航海を目指し「DESTINY+」が現在開発中です。軽量小型・非力な宇宙機であっても、電気推進の高比推力性(推進剤消費に対して推力が大きい性質)を持ってすれば超遠距離飛行を可能にして、宇宙科学研究所の惑星探査の触手を太陽系内に拡大できることを証明し実践しているとの感慨です。また、プラズマ源として小型堅牢でメンテナンス・フリーという特徴を活かし、真空炉内で部材やワークへの静電気帯電を緩和する装置を、宇宙探査イノベーションハブ研究として開発し、産業機器

として民間企業から上市することができました。

過去顕彰された方々には、宇宙開発のレジェンド齋藤 成文先生(1953年受賞)、気体放電分野で土手 敏彦先生(1968年)、流体力学分野の高山 和喜先生(1999年)がいらっしゃいます。齋藤先生がおまともになった開発黎明期を著した歴史書がございます。私が学生から助手の時に、土手先生の論文を読み漁り、プラズマ計測技術を勉強したことを思い出しました。直接ご面識のない諸先輩であっても論文や文献を介して交流し、さらに同じ受賞者リストに名前を連ねることができましたことを光栄に存じます。



日本工業倶楽部での表彰式にて

(國中 均)

「はやぶさ2」拡張ミッションでの科学観測

「はやぶさ2」は、地球に再突入カプセルを帰還させた後も、「拡張ミッション」として運用を続けています。目的地は、1998 KY26という大きさが30mくらいの非常に小さな小惑星。この小惑星に到着するのは2031年の予定です。これは大変な長旅となりますが、「はやぶさ2」にはONC-Tという望遠の光学航法カメラが搭載されていますから、ONC-Tを使って行うことができる科学観測として黄道光と小惑星に向かうクルージング期間中に観測を行うことにしました。「はやぶさ2」に搭載されたONC-Tは、太陽系内を移動する小型宇宙望遠鏡と言うことができます。

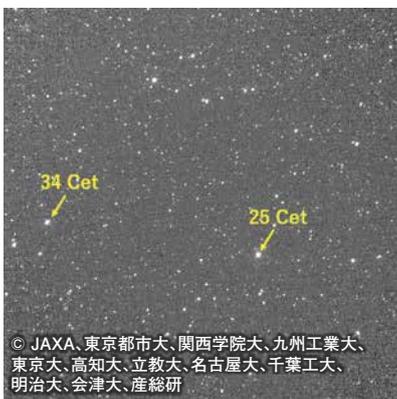
まず、黄道光観測についてです。黄道光とは惑星間塵による太陽光の散乱光のことで、その観測から惑星間塵の組成や分布等を調べることができます。しかし地球からの黄道光観測では常に地球のそばにある惑星間塵の散乱光が視線に入ってしまうので、惑星間塵の分布を調べる精度には限界があります。一方で拡張ミッションでは太陽からの距離が0.7-1.5 auの範囲で観測位置が変化することを利用して惑

星間塵の分布をより良い精度で決定できるのです。これまでONC-Tで行った黄道光観測のデータを解析したところ、黄道光と考えられる信号が確かに得られています。今後も月に1回程度の頻度で黄道光の観測を継続していく予定で、積み重ねたデータを入念に解析することで惑星間塵の分布を明らかにしたいと考えています。長期にわたり太陽系の様々な位置から黄道光を観測できるまたとない機会を最大限に活かして良い成果が得られるように頑張りたいと思います。

次に、系外惑星観測についてです。系外惑星とは、太陽以外の恒星の周りを公転している惑星のことですが、現在、すでに約5000個の系外惑星が確認されています。「はやぶさ2」では、探査機がクルージングを行っているときに、ONC-Tを用いて、トランジット法という手法で系外惑星を観測することを計画しています。トランジット法では、系外惑星が主星の前を横切るときに主星がわずかに暗くなる現象を利用して、惑星の大きさや主星からの距離などを求めます。ONC-Tは小口径であるので、高感度の地上望遠鏡では不向きな明るい恒星の観測に適しています。また、宇宙空間から系外惑星を観測する試みは日本では初めてのことであり、世界的にも最小口径の望遠鏡での観測となりますので、超小型衛星搭載光検出器による系外惑星の観測技術の開発にも資するデータの取得が期待されます。

黄道光と系外惑星の観測は、拡張ミッションの長いクルージング運用の時間を利用した観測になりますが、何が分かるか楽しみです。

(津村 耕司/東京都市大学、松浦 周二/関西学院大学、杉田 精司/東京大学)



© JAXA, 東京都市大, 関西学院大, 九州工業大, 東京大, 高知大, 立教大, 名古屋大, 千葉工大, 明治大, 会津大, 産総研

2021年8月23日にONC-Tで取得した黄道光観測データ。検出された恒星をマスクし、何も写っていない「暗い夜空の明るさ」を測定することで黄道光の明るさを調べる。Cetは、くじら座の略符である。

EQUULEUS と OMOTENASHI

世界最大のロケットで
打ち上げる世界最小の探査機

第 11 回

既製品を使った EQUULEUS姿勢系開発

姿勢系の開発と聞くと、様々なセンサやアクチュエータを開発し、それらを使った宇宙機姿勢の制御アルゴリズムを開発することを思い浮かべるとと思います。EQUULEUSでは、開発行為の多くは既製品を用いることで外注され、姿勢制御系の上位に位置する自律機能設計が検討の中心でした。今回は姿勢系で既製品を利用することのメリットとデメリット、そしてDV1運用という挑戦的な運用を成立させるために実装した自律機能について紹介します。

統合型姿勢制御ユニットの利用

姿勢系を設計するにあたって大きな制約となったのがサイズでした。複数のセンサやアクチュエータを別々に調達して配置するという通常の設計手法では6Uという狭い空間に収まらないことを懸念し、Blue Canyon Technologies社の統合型姿勢制御ユニットXACT-50を採用しました。XACT-50は1U以内のサイズに姿勢制御に必要なセンサ・アクチュエータを備え、それらを用いた姿勢制御機能も有しています。従ってメインの搭載コンピュータは制御アルゴリズムを実行する必要がなく、目標姿勢などの高レベルな指令をするだけで姿勢制御機能を達成できます。基本的な姿勢制御機能は既に実

証済みであり、プロジェクトで「車輪の再発明」をせずとも、より信頼性の高い姿勢制御機能を得ることが可能です。

このように既製品利用には多くのメリットが存在する一方で、開発がプロジェクトの制御下でないことによるデメリットも多く存在します。具体的な姿勢制御アルゴリズムの中身やソースコードは企業のアセットであり、詳細な共有が困難です。また、ミッションの要求から特殊なアルゴリズムが必要でもその実装ができなかったり、できても高いコストがかかります。さらにユニットの挙動再現のためにパソコン上で動くソフトウェアシミュレータが欲しいと思っても、EQUULEUSでは企業側から提供されたユニットシミュレータをプロジェクトで開発した探査機シミュレータと統合できませんでした。そこでEQUULEUSの挙動を再現する際には、XACT-50のエンジニアリングモデルを用いたハードウェアシミュレータを使っています。

さらに、XACT-50の内部挙動がブラックボックスであるため、FDIR（異常検知・隔離・復帰）の設計に工夫が必要でした。階層型FDIRと呼ばれる設計フレームワークを用い、姿勢系コンポーネント異常などの下層の異常に対してはXACT-50のソフトウェアが対処し、姿勢制御失敗などの上層の異常に対してはメイン搭載コンピュータが対処するという役割分担によって解決しました。

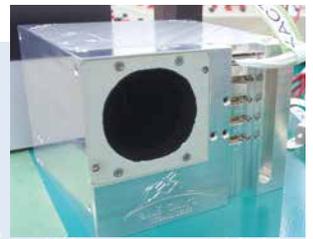
DV1運用を成立させるために

EQUULEUSでは、異常が発生した場合は三軸姿勢制御モードから太陽捕捉モードに切り替わり、宇宙機の最低限の機能以外を停止し、次の地上局との通信までバッテリー枯渇などの致命的な事象に陥らないように設計されています。

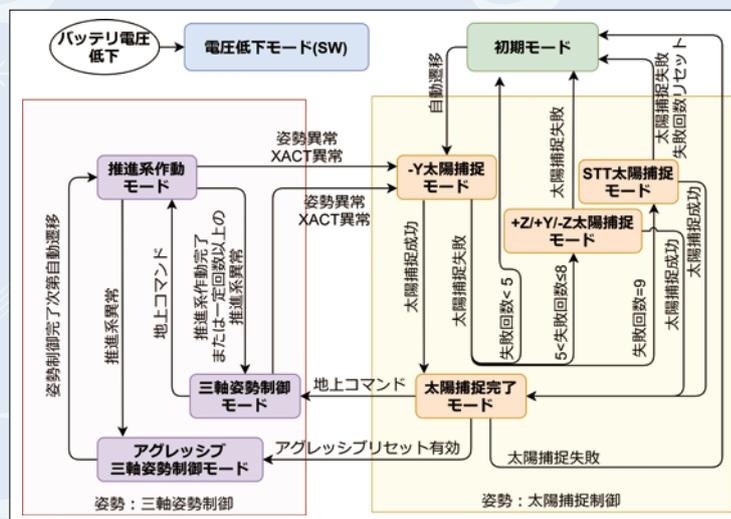
一方、打ち上げ直後には、「DV1運用」という長時間の推進系作動運用が計画されています。DV1運用の目的は、月へ向かう軌道からラグランジュ点に向かう軌道へ移行するために適切な幾何関係で月フライバイを行う事です。推力・燃料に制限があるため、打ち上げ後数日以内に軌道制御を終わらせる必要があります。このため、DV1運用中に異常を検知して太陽捕捉モードで留まると地上局が対応するまで貴重な時間が無駄になり、月フライバイまでに目標とする軌道制御が達成できなくなり、目標軌道への到達が難しくなる可能性があります。そこでDV1運用では、太陽捕捉モードに留まらずに自動で推進系作動状態まで探査機自身で復帰する「アグレッシブリセット」という機能を実装しました。

最後に

EQUULEUSの姿勢系開発は、既製品を用いるという新しい取り組みでした。設計の再利用性を高めつつミッションに応じてカスタマイズしたいという、衛星設計における相反する要求に取り組むための知見が得られたのではないかと思います。またDV1運用は超小型探査機ならではの攻めた運用が要求され、ここでは紹介しきれない数多くの工夫によって成り立っています。無事成功することを読者の皆さんも祈ってください。（野村 俊一郎・高橋 亮平）



XACT-50外観



EQUULEUSの制御モード図(一部簡略化しています)

》チャレンジ! より遠くへ、
》そして誰もやっていないことを

ガスも漏らさずにリュウグウから持ち帰りたい

——小惑星探査機「はやぶさ2」の帰還カプセルは2020年12月6日、オーストラリアのウーメラ砂漠に着地しました。カプセルを最初に目視で確認したのが、澤田さんですね。

カプセルの中には、リュウグウのサンプルを格納したサンプルコンテナが収められています。サンプリング装置の開発責任者だったことから、大役を担うことになりました。

「はやぶさ」は小惑星のサンプルを地球に持ち帰る技術の実証が目的だったのに対して、「はやぶさ2」ではいかにきれいな状態でサンプルを持ち帰るかを重視していました。しかもリュウグウは有機物や水を多く含んでいると考えられるため、サンプルから揮発するガスも漏らさずに持ち帰りたい。コンテナを金属でシールすることにしたのですが、大気圏再突入時の衝撃に耐えられるものにするのが大変でした。シールしてはハンマーで思いつき叩き、駄目だ、ここを変えてみよう、とトライアンドエラーを繰り返しました。さんざん試験をしてきたので密閉されていると信じていましたが、オーストラリアで行った簡易分析でサンプルコンテナからガスが採取され、それが地球の大気とは異なることを示唆するデータが得られたときは、ようやく苦労が報われたと思いました。

——サンプルコンテナを日本に持ち帰り、開封して最初に中を確認したのも、澤田さんだそうですね。

開発責任者の特権ですね。開けた瞬間こう見えるだろう、という映像を何度も思い浮かべていました。想像していたのは、粉のようなものでした。ところが実際は、数mmサイズの粒がゴロゴロとたくさん!「言葉を失うくらい感動した」といろいろな取材で話していますが、ものすごく感動すると何の言葉も出てこないものなのです。

たくさんサンプルを採取できたことは、もちろんうれしいです。でも、それは結果。開発から運用、回収に至るまで、サンプリング装置チームみんなでミスがないように目を光らせてパーフェクトにできたことが、何よりもうれしく思いました。

次は火星の衛星フォボスからのサンプルリターン

——現在は、どのようなミッションに取り組んでいるのですか?

火星の衛星フォボスに着陸してサンプルを持ち帰る火星衛星探査計画MMXに参加し、サンプリング装置の開発を担当してい

火星衛星探査機プロジェクト
主任研究開発員

澤田 弘崇 (さわだ ひろたか)

1976年、長野県生まれ。博士(工学)。東京工業大学大学院理工学研究科機械宇宙システム専攻博士課程修了。2004年、JAXA総合技術研究本部誘導・制御システムグループ。月・惑星探査プログラムグループ開発員、「はやぶさ2」プロジェクト 主任研究員を経て、2019年より現職。宇宙探査イノベーションハブ主任研究員を併任。



ます。ロボットアームを使って筒状のコアラーを突き刺してサンプルを採取する新しい方式を考えているのですが、フォボスは重力が小さいのでコアラーに力を掛けると探査機が反動で浮いてしまうなど、いろいろな難しさがあります。

——MMXのどういう点に面白さを感じていますか?

宇宙探査というのは遠いところに行くとこそ意義があると、私は思うのです。日本はまだ火星圏の探査に成功していませんから、火星圏に行くことにワクワクします。また、日本はサンプルリターン技術で世界をリードしているといっても、すぐ追い付かれてしまうでしょう。新しい技術に挑戦できるMMXは、面白いだけでなく、リードを維持するためにも必要なミッションです。

新しく、楽しくて、チャレンジングなことを

——仕事をやる上で意識していることはありますか?

新しく、楽しくて、チャレンジングなことを、常にやってみたい。1つのことだけをやるのは苦手で、面白そうなことを見つけると、あれもこれもやりたくなってしまいます。それで忙しくなって自分の首を絞めることになるのですが、モチベーションを維持するためには重要なことだと思っています。

今、宇宙探査イノベーションハブも併任しています。企業が持っている面白そうな技術を探してきて共同研究を行い、その成果を宇宙で利用し、また地上の技術に革命を起こすことを目指した組織です。新しく、楽しくて、チャレンジングなことをやりたい私に、とても合っています。

例えば、360度カメラを宇宙で使ったら絶対面白い映像が撮れる!とリコーさんに声を掛け、小型全天球カメラの開発につながりました。国際宇宙ステーションの「きぼう」日本実験棟に取り付け、とても素晴らしい映像が撮れています。JAXAデジタルアーカイブで公開しているので、ぜひご覧ください。

企業の人に声を掛けると、最初は怪訝な顔をされることも多いです。自分たちの技術を宇宙で使うなんて考えたこともない、と。しかし、話をしていくと、面白そうだとか協力的になってくれます。私たちにとっては地上の優れた技術を宇宙で使うことができ、企業にとっては事業拡大になる。そういうウィンウィンな関係を目指しています。普段の生活の中でも、これを宇宙で使ったらどうだろう?と考えたりしています。面白い技術があれば、将来の探査ミッションにも積極的に取り入れていきたいですね。

編集後記

緊急事態宣言が解除され、新型コロナウイルス感染症の第5波も下火になってきました。

このまま沈静化する事を願わずにいられますが、With コロナの世界を賢く生きていきたいものです。

(竹前 俊昭)



ISASニュース No.487 2021年10月号

ISSN 0285-2861

発行/国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所
発行責任者/宇宙科学広報・普及主幹 藤本 正樹
編集責任者/ISAS ニュース編集委員長 山村 一誠
デザイン制作協力/株式会社アズディップ

〒252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台 3-1-1 TEL: 042-759-8008