

重力波望遠鏡「KAGRA」3年ぶりに観測再開 国際共同、実るか感度向上策

2023.05.25 草下健夫 / サイエンスポータル編集部

宇宙のかなたから届くわずかな空間のゆがみ「重力波」を捉える観測施設「KAGRA（かぐら）」（岐阜県飛騨市）が25日未明、3年ぶりに国際共同観測を再開した。東京大学宇宙線研究所が明らかにした。ブラックホールなどの理解を目指す地下の巨大な望遠鏡だが、感度が足りず重力波をまだ捉えられていない。前回の観測を基に、予想以上に大きかった観測ノイズの原因を洗い出し、改善策を講じてきた。研究チームを率いる同研究所の梶田隆章教授は「来年春には、重力波の兆候を捉える感度を達成したい」と意気込む。



地下に建設された重力波望遠鏡「KAGRA」の俯瞰図。L字型トンネルの1辺は3キロ（東京大学宇宙線研究所提供）

ブラックホールと中性子星が合体して重力波が発生する現象の概念図（オーストラリア・スウィンバーン工科大学カール・ノックス氏提供）

「時空のさざ波」神岡の山中で

重力波は「時空のさざ波」などと表現される。物体の周りの空間は、その重力でゆがめられている。物体が動くとそのゆがみがさざ波のように、光速で周辺に広がっていくのが重力波だ。アインシュタインの一般相対性理論を基に、1916年に存在が预言された。

ブラックホールのような重い天体の合体で生じる重力波を捉える試みが続き、2015年、米国の2つの観測施設からなる「LIGO（ライゴ）」が初検出。LIGOチームの3人は2017年、ノーベル物理学賞に輝いた。その後もLIGOと、欧州の「Virgo（バーゴ、ビルゴ）」が連携し、ブラックホール同士の合体や、一部の星の終末の姿である「中性子星」同士の合体、ブラックホールと中性子星の合体で生じた重力波を計90例、捉えてきた。

重力波が来る方向を特定するには、複数の重力波望遠鏡を使った三角測量が必要。精度を高めるにはLIGOやVirgoに加え、なるべく離れた地域にもう1台が必要とされた。そこで東京大学が中心となり、飛騨市神岡町の山中、地下約200メートルにトンネルを掘り、KAGRAを建設した。1辺3キロのL字型の真ん中から2方向に発射したレーザー光が、それぞれ鏡に反射して戻るまでの時間差を基に、重力波を捉える仕組み。約164億円の建設費をかけ、2019年春に完成した。成果などの論文執筆には8カ国・地域の研究者約150人が参画している。KAGRAのKAは神岡のKA、GRAは重力を意味するGravity（グラビティー）などに由来し、神様に奉納する踊りである神楽も意識したという。梶田教授は「重力波の到来方向を調べるため、KAGRAが東アジアにあることが極めて大切だ。国際観測の必要性が長く認識されてきた」と説明する。梶田教授は素粒子ニュートリノの研究で2015年、ノーベル物理学賞を受賞している。

宇宙理解の新たなツール

天文が好きなら、子供でも天体望遠鏡をのぞいたことがあるだろう。これは「天文学の父」ガリレオが17世紀に始めた可視光観測だが、20世紀に入るとX線や電波などや、さらに天体から飛来するニュートリノを捉える方法でも観測できるようになった。こうしたさまざまな観測手段の特質を持ち寄り、成果を連携させ、宇宙の

知見を深める研究分野を「マルチメッセンジャー天文学」と呼ぶ。21世紀の今、新たにこれに加わったのが、KAGRAなどの重力波望遠鏡を使う「重力波天文学」だ。



KAGRAの3年ぶりの観測計画を報道陣に説明する梶田隆章教授＝17日、東京都文京区の東京大学

KAGRAのトンネル内。3キロにわたって直径80センチの真空のダクトが続いている（東京大学宇宙線研究所提供）

重力波で調べる宇宙の謎として、梶田教授は主に3つを挙げる。（1）金やプラチナなどの重い元素が、中性子星同士の合体を通じて作られることがほぼ分かってきた。さらに観測例を集めて確認したい。（2）実際に観測されるブラックホールは予想より重すぎており、それらがどのように作られるかを調べたい。（3）太陽の8倍以上の重さの星が最後に起こす「超新星爆発」の仕組みは、まだよく分かっていない。中心部で起きる現象について、重力波観測で物質の移動を調べ、ニュートリノ観測で温度を調べ、連携させて理解したい。

「そう簡単な代物ではない」

KAGRAは完成後、LIGOやVirgoとの共同観測を目指して調整を進め、2020年3月に参加条件の感度を達成した。ところがコロナ禍のため、LIGOとVirgoがKAGRAの参加を待たずに観測を中断。これを受け、KAGRAはドイツの施設と20年4月に共同観測をしたが、やはりコロナで、わずか2週間で打ち切りとなった。この時、KAGRAの感度を妨げるノイズが予想以上に大きいことが判明した。原因を調べ、鏡を支える防振装置の再設置や調整、散乱光の対策、光学系の改善などを進めて感度を向上させ、共同観測の再開に備えてきた。

共同観測は日本時間25日午前零時に再開した。計画ではKAGRAは、まず1カ月にわたり観測する。ただ現時点では、まだ実際に重力波が見える感度ではないという。1カ月の観測結果を受けた装置の再調整などを経て、来年春に復帰して3カ月間、観測する。この段階で、中性子星の合体による重力波の兆候を捉える感度とするのが目標だ。なお再開当初に観測するのはKAGRAとLIGOで、不具合が見つかったVirgoは当面、調整を続けるという。KAGRAの、LIGOやVirgoとの感度の差は現状では大きく、実績を重ねて先行する両者と肩を並べて観測するのは、まだまだ先のような。梶田教授は「LIGO、Virgoとも、感度を上げるのに相当に時間を食ってきた。当初思ったような感度を、そう簡単に出せる代物ではない。KAGRAは決して、他に比べて感度向上に長くかかってはいない。頑張るが、KAGRAだけが急速にというのはなかなか難しい」と思いを語る。

「LVK」の期待に応える日を

2027年頃に始まる次の国際観測までにさらに感度を高め、KAGRAにより、重力波の到来方向を捉える精度の向上に貢献することを目指すという。KAGRAの建設が節目を迎えた2015年11月、筆者を含む報道陣が坑内取材した。「本格観測に入れば1年以内にも重力波を捉える」といった期待を聞いた当時に比べると、率直に言って、今は研究者たちの言葉に何だか勢いが無い。しかし、LIGOやVirgoの文書には「LIGO-Virgo-KAGRA (LVK) Collaboration (コラボレーション＝共同研究)」とばっちり記され、もはや大きな期待を背負っている。ビッグサイエンスの達成のためには、困難や当初の見込み違いを必ずしもネガティブに捉えるべきではなく、また時に、改善の過程そのものが当該分野の修練につながる側面もある。アインシュタインが天から神岡に向けて微笑む日を待ちたい。

関連リンク 東京大学宇宙線研究所「[大型低温重力波望遠鏡『KAGRA』](#)」

米カリフォルニア工科大学「[LIGO Ready to Explore Secrets of the Universe](#)」(英文)

<https://www.cnn.co.jp/fringe/35204117.html>

民間旅行のスペースX宇宙船打ち上げ 4人搭乗、ISSに1週間滞在

2023.05.22 Mon posted at 11:22 JST



民間旅行のスペースX宇宙船打ち上げ、ISSに1週間滞在

(CNN) 米航空宇宙局(NASA)の元宇宙飛行士と3人の乗客を乗せたスペースXの宇宙船が現地時間の21日午後、米フロリダ州から打ち上げられた。4人は国際宇宙ステーション(ISS)に約1週間滞在する。今回の宇宙旅行「AX-2」は米新興企業アクシオムスペースが手配した。全て民間で運航する宇宙旅行はこれが2度目。今回は幹細胞研究者のラヤナ・バルナウイさんが、サウジアラビアの女性として初めて宇宙旅行に参加した。4人を乗せた有人宇宙船「クルードラゴン」は、スペースXのロケット「ファルコン9」を使って軌道へ打ち上げられた。軌道上を16時間飛行した後、米東部時間の22日午前9時24分、ISSにドッキングする予定。AX-2の搭乗者を引率しているのはアクシオムの従業員でNASA元宇宙飛行士のペギー・ウィットソンさん(63)。女性として初めて民間宇宙飛行の船長を務める。

旅費を支払って搭乗した乗客は、国際通信ビジネスで財を築いた米国人実業家のジョン・ショフナーさんと、サウジアラビア空軍戦闘機パイロットのアリ・アルカルニさん、バルナウイさんの3人。アルカルニさんとバルナウイさんの旅費はサウジアラビアが負担した。ISSにドッキング後は、既に滞在している宇宙飛行士7人と合流し、約8日間の滞在中、幹細胞などの生物医学研究を含めて20以上の研究・科学プロジェクトに取り組む。

https://www.afpbb.com/articles/-/3465525?cx_part=top_category&cx_position=1

動画：韓国国産ロケット、3回目の打ち上げ 延期の翌日



【5月26日 AFP】韓国は25日、国産ロケット「ヌリ号（[Nuri](#)）」を打ち上げた。当初は前日に予定されていたが、技術的な問題で延期されていた。今回は「ヌリ号」の3回目の打ち上げとなった。2021年には失敗したが、22年には人工衛星の軌道投入に成功していた。打ち上げは当初24日に予定されていたが、コンピューター通信に問題があり延期されていた。問題は翌日までには解消した。羅老宇宙センター（[Naro Space Center](#)）から打ち上げられたヌリ号は3段式ロケットで、全長は47メートル、重量は200トン。政府の公式配信の司会は「正常に飛行中」と述べた。配信によると、ヌリ号に積まれていた人工衛星8機は無事に切り離された。韓国は2032年までに月面着陸を行い、45年までには火星着陸を目指すなど、野心的な宇宙開発計画を発表している。映像は25日撮影・提供。(c)AFP

<https://news.mynavi.jp/techplus/article/20230524-2686786/>

H3 ロケット試験機2号機の打ち上げ形態/ペイロードが変更へ、衛星搭載は見送る方針

掲載日 2023/05/24 14:27 著者：小林行雄

目次 [第1段エンジンの開発をバックアッププランに変更](#) [打ち上げ形態も実績を積んだものへと変更](#)

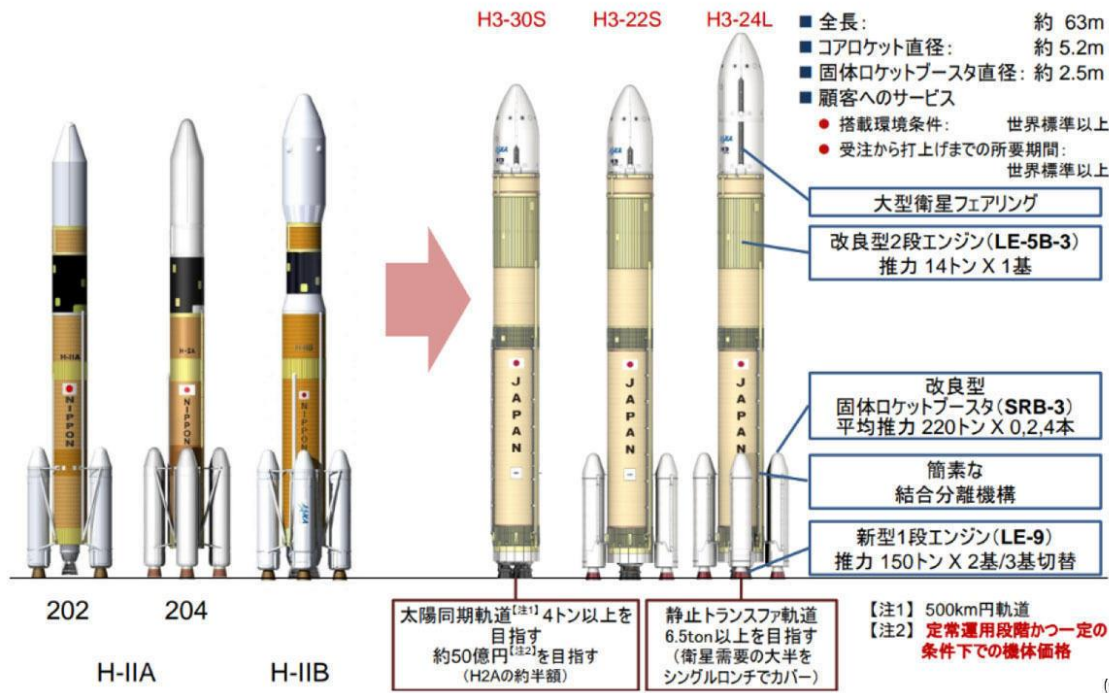
文部科学省(文科省)と宇宙航空研究開発機構(JAXA)は5月24日に開催した宇宙開発利用部会(第75回)の中で、日本の次期基幹ロケット「H3」の試験機2号機の開発方向性について、2023年3月に打ち上げに挑みながらも、第2段エンジンの着火が行われず、衛星の軌道投入に失敗したH3ロケット試験機1号機の結果を踏まえ、その打ち上げ形態の変更などを提案した。H3はさまざまな軌道へ多種多様な人工衛星の打ち上げを行うことを目的に、その打ち上げ能力を柔軟に変えられるような設計を採用。当初の計画では、H3ロケット試験機1号機では固体ロケット・ブースター(SRB)を2本搭載するH3-22形態を採用するが、同2号機ではSRBを用いず、第1段ロケット・エンジンの装着数をH3-22形態の2基から3基に増やしたH3-30形態を採用することが計画されていた。しかし、H3ロケット試験機1号機の打ち上げ失敗を受け、その原因究明と対策を前提とするが、ロケットの打ち上げ準備には相当の期間を必要とするとの判断から、早期の打ち上げ再開に向け、試験機2号機の各仕様などの見直しを図る必要がでてきたという。

第1段エンジンの開発をバックアッププランに変更

もともとH3ロケット試験機2号機は2023年度中の打ち上げが予定されており、2023年1月には1基目の2号機用のLE-9エンジンの領収燃焼試験が実施されるなど、すでに打ち上げを目指した開発が進められている。そのLE-9エンジンについても、現状は試験機1号機向けに実績のある技術や部品を活用して開発されたタイプ1と、試験機2号機以降向けに新技術などを活用するタイプ2の2段階開発とされていた。タイプ2エンジンについては2023年2月より翼振動計測試験を開始し、4月8日までにすでに5回試験が実施され、前段階の開発で見られていた回転非同期の応答の抑制には成功したものの、一部共振応答が仕様よりも大きいデータが確認されたことから、さらなる改良および試験が必要と判断。そのため、早期の打ち上げ再開を念頭に、当面の打ち上げへの対応には、実績ができたタイプ1をベースにしたタイプ1Aエンジンを準備するというバックアッププラン

に変更するという。

【参考】 H3ロケットのシステム概要



H3 ロケットのシステム概要。打ち上げニーズごとに最適な構成に変更できる。フェアリングはサイズによってS(ショート)、L(ロング)、このスライドには記載されていないがW(ワイド)の3種類が用意される (C)JAXA

LE-9エンジンの開発状況



■ タイプ2エンジンに向けた翼振動計測試験(本年2月より実施)の状況

- タイプ2エンジン用ターボポンプの検証として、合計5回計1,223秒の試験を実施。
- FTP2の矢で、FTP1の矢で見られていた回転非同期の応答は抑制したが、一部共振応答が大きいデータが得られており、恒久対策として更なる改良及び試験が必要と判断される状況。これに伴い、試験機2号機以降の当面の打上げに対応するタイプ1Aエンジンを準備。
- 信頼性の高いLE-9エンジンにするため、必要なデータ取得を継続し恒久対策の検討を進める。

	着火日時	試験時間 [秒]	燃焼圧力 [Mpa]	FTP回転数 [rpm]	OTP回転数 [rpm]	備考
第1回	2月21日 15時59分	271.8 (230.0)	9.76 (9.76)	43,834 (43,536)	17,108 (16,667)	FTP入口圧力が下限値に達したため、計画通り自動停止
第2回	3月14日 15時52分	268.5 (269.0)	9.72 (9.73)	42,277 (42,099)	16,561 (16,525)	FTP入口圧力が下限値に達したため、計画通り自動停止
第3回	3月22日 15時51分	288.0 (288.0)	10.73 (10.73)	45,206 (45,500)	17,543 (17,575)	タイマー停止
第4回	4月1日 15時50分	270.0 (270.0)	9.26 (9.26)	40,825 (40,550)	17,573 (17,828)	タイマー停止
第5回	4月8日 16時02分	124.6 (126.0)	9.70 (9.70)	41,063 (41,399)	17,457 (17,458)	OTP回転数が上限値に達したため、計画通り自動停止

(C)JAXA

LE-9 タイプ2エンジンの翼振動計測試験実施状況 (C)JAXA

LE-9エンジン仕様比較

	タイプ1(試験機1号機)	タイプ1A(試験機2号機~)	タイプ2
FTP	0の矢 (剛性の向上、減衰力の強化)	タイプ1と同じ	恒久対策仕様※1
OTP	1の矢(タービン入口部の流れの不均一性を抑制)	恒久対策仕様 (タイプ1と同じ)	恒久対策仕様 (タイプ1と同じ)
噴射器	機械加工	タイプ1と同じ	恒久対策仕様※2
その他コンポーネント	タイプ1仕様	恒久対策仕様 (主として既に開発試験で実績があるもの)	恒久対策仕様



図 LE-9エンジンの概要

※1 FTPの恒久対策仕様として、タービン効率の向上を図る複数の設計案を検討中。これまでに試験実績のある0の矢、1の矢の設計をベースとすることでリスクを低減する。

※2 噴射器の恒久対策仕様として、3D造形技術の適用による製品コスト低減等を計画。

(C)JAXA

LE-9 エンジンのタイプ別仕様比較 (C)JAXA

打ち上げ形態も実績を積んだものへと変更

また、打ち上げ形態も試験機2号機ではH3-30形態を予定していたが、その場合、基幹ロケットとして初めての3基エンジンならびにSRB無しという構成から、1段実機型タンクステージ燃焼試験(CFT)やホールドダウンシステム(機体を保持、エンジン3基の立ち上がりを確認した上でリリースする装置)の追加検証が必要であることが課題となるため、試験機1号機と同じ構成のH3-22形態へと変更することで開発期間の短縮を図ることを想定しているとする。ここでポイントとなるのはロケットの仕様変更でペイロードが問題なく詰めるのかという点。試験機2号機には先進レーダ衛星「ALOS-4」が搭載される予定であるが、打ち上げ能力的にはH3-22形態でも可能であるという。また、宇宙基本計画工程表に記載されている2023年度~2025年の打ち上げミッションで求められるのはH3-22形態もしくはH3-24形態(SRB4本構成)であることから、H3-22形態での実績を重ねたいという部分もあるとする。ただし、先の試験機1号機に先進光学衛星「だいち3号(ALOS-3)」が搭載され、それが喪失された以上、試験機2号機に万が一の場合が生じALOS-4も喪失されるとなると、それに伴う防災関連の政策や関連分野への影響などが懸念されること、またH3-22形態でALOS-4を試験機1号機同様の軌道に向けて打ち上げても問題はないのか、といった疑問などが生じていることから、ALOS-4の代わりに飛行中のロケットの各種データを取得可能なセンサなどで構成されたロケット性能確認用ペイロードを搭載する案が提案されている。これにより、より多くのデータを得ることができるようになるため、今後の打ち上げ精度向上に向けた知見を得ることができるようになることが期待される。また、打ち上げまでの時間的な問題から、そこまでさまざまなセンサ類の搭載ができるわけではないとの見通しから、空きスペースなどが生じた場合は影響のない範囲でのピギーバック衛星の搭載なども検討していくとしている。このため現時点での試験機2号機の打ち上げの形態とペイロードの組み合わせ可能性としては以下の4つに分けられることとなり、このうちの4番(H3-22形態にロケット性能確認用ペイロードを搭載)の方向性を前提とした開発が進められることとなりそうである。

H3-30 形態+ALOS-4 H3-22 形態+ALOS-4

H3-30 形態+ロケット性能確認用ペイロード H3-22 形態+ロケット性能確認用ペイロード

【参考】H3ロケット試験機2号機トレードオフ検討



■ 試験機2号機へのペイロード搭載形態については、以下のオプションが存在。

	ケース1-1 [当初計画]	ケース1-2	ケース2-1	ケース2-2
H3ロケット形態	H3-30形態	H3-22形態	H3-30形態	H3-22形態
ペイロード	ALOS-4		ロケット性能確認用ペイロード	
H3ロケット開発に係るメリット・デメリット	メリット: ✓ H3-30形態の早期の検証が可能 デメリット: ✓ H3-22/24形態確立の遅れに伴う多数の直近ミッションへの影響	メリット: ✓ H3-22/24形態の早期確立に伴う多数の直近ミッションへの対応 デメリット: ✓ H3-30形態の検証が今後	メリット: ✓ H3-30形態の早期の検証が可能 デメリット: ✓ H3-22/24形態確立の遅れに伴う多数の直近ミッションへの影響	メリット: ✓ H3-22/24形態の早期確立に伴う多数の直近ミッションへの対応 デメリット: ✓ H3-30形態の検証が今後
開発リスク	新たな開発要素(エンジン3基、ホールドダウンシステム等)の追加検証が必要	TF1で実績のある第1段形態・SRBの活用及びTF1で正常にフライト作動したエンジンをベースとすることによる開発期間の低減	新たな開発要素(エンジン3基、ホールドダウンシステム等)の追加検証が必要	TF1で実績のある第1段形態・SRBの活用及びTF1で正常にフライト作動したエンジンをベースとすることによる開発期間の低減
ペイロードに係るメリット・デメリット	メリット: ✓ ALOS-4による早期の成果創出 デメリット: ✓ 打上げ失敗時のALOS-4喪失による政策的影響、関連分野への影響		メリット: ✓ 打上げ失敗時のALOS-4喪失の回避 ✓ TF1と同じ飛行計画の活用による最早打上げの実現 ✓ ロケット性能に係る着実なデータの取得 デメリット: ✓ ALOS-4による成果創出が今後	

(C)JAXA

H3 ロケット試験機 2 号機のシステム形態候補とペイロード候補の組み合わせによるメリット・デメリット (C)JAXA

なお、H3-30 形態については、試験機 2 号機で見送られると、今後しばらくはその形態での打ち上げがなくなる見通しであるが、決してプラン自体がなくなるわけではないとしている。特に中型衛星かつ太陽同期軌道というユーザーが比較的多く存在するボリュームゾーンに対してコストメリットを打ち出せる構成であることから、民間活用の側面からも時期は未定ながらも打ち上げを実現させていく必要があるとの認識が示されている。ただし、現状としてはできる限り早期の H3 ロケットの打ち上げ再開に向けて万全を期していくことが最重要ポイントとなっていることから、そこは今後の打ち上げ計画などを含めて検討していく形で一旦は棚上げとしつつ、文科省、JAXA とともに試験機 1 号機で実績を積んだ技術などを活用していくことで、試験機 2 号機の早期の打ち上げ成功につなげたいとしている。

https://news.biglobe.ne.jp/domestic/0523/ym_230523_8134657072.html

中国やロシアの「キラー衛星」、米英と監視…政府の「宇宙安保構想」原案が判明

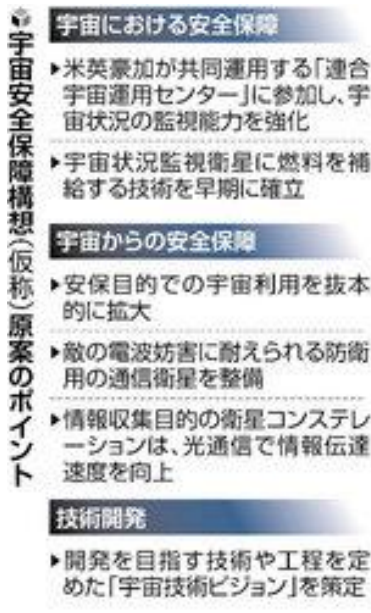
2023 年 5 月 23 日 (火) 15 時 0 分 [読売新聞](#)

今後 10 年間の宇宙安全保障政策の指針となる「宇宙安全保障構想 (仮称)」の原案が判明した。安保目的で宇宙利用を抜本的に拡大し、中国やロシアの「衛星攻撃衛星 (キラー衛星)」を監視することを念頭に、米国が英豪、カナダと共同運用する「連合宇宙運用センター」への参加を目指す方針を明記した。

岸田首相が昨年 12 月、国家安保戦略の改定で宇宙安保の強化が盛り込まれたことを受け、策定を指示していた。構想策定は初めてで、6 月上旬にも決定する。

構想原案は、宇宙空間で他国の脅威やリスクに対処する「宇宙における安全保障」と、衛星情報などを利用して日本の領域、国民を守る「宇宙からの安全保障」の二つの考え方を基本に据えた。中露はキラー衛星のほか、地上から衛星を攻撃する兵器の開発も進めている。原案は「宇宙空間における脅威は急速に拡大している」と危

機感を示し、「同盟国・同志国との協力が不可欠」だと強調した。



[写真を拡大](#)

連合宇宙運用センターへの参加は「宇宙における安全保障」の目玉となる。

同センターは、米軍のバンデンバーグ基地（カリフォルニア州）にある米軍の機関で、宇宙ごみなどの脅威を監視、把握し、各国に情報提供している。防衛省は2026年度以降、宇宙状況を監視する衛星を複数打ち上げる方針で、同センターの運用に参加することで宇宙監視の一翼を担う。

米英豪やカナダ、ニュージーランド、フランス、ドイツによる宇宙空間での協力枠組み「連合宇宙作戦イニシアチブ」への参加を目指すことも盛り込んだ。

監視衛星の長期運用のため、衛星に燃料などを補給する技術の早期確立も目指すとした。

「宇宙からの安全保障」分野では、電波妨害に強い防衛用の通信衛星を整備する方針も示した。防衛省は、自衛隊の部隊が情報共有するための通信衛星を2基運用しているが、いずれも電波妨害に脆弱だ。2基は30～31年度に寿命を迎え、後継機には電波妨害を防ぐ装置を搭載する方向だ。情報収集目的で多数の小型衛星を星座のように配置して一体運用する「衛星コンステレーション」に関しては、光通信で情報伝達速度を向上させ、AI（人工知能）で画像分析能力を高める方針も盛り込んだ。自衛目的で敵のミサイル発射基地などを攻撃する「反撃能力」には、敵の位置情報をリアルタイムで把握する必要があり、衛星コンステレーションが重要となる。宇宙関連の技術開発の工程表となる「宇宙技術ビジョン」を策定する方針も盛り込んだ。

<https://sorae.info/astrometry/20230527-extracting-water-from-the-moon.html>

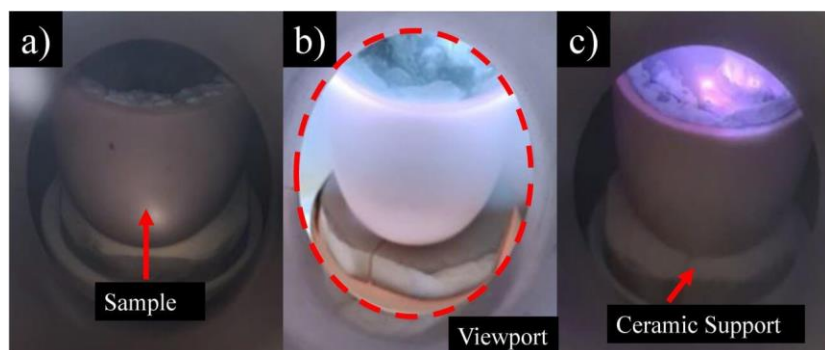
“レンジでチン” すれば取り出せる？ 月の砂から効率良く水を得られることが判明

2023-05-27 [彩恵りり](#)

将来的に計画されている月面の長期滞在に関しては、様々な課題が指摘されています。重大な問題の1つは、月面での大量の水の確保です。人間の生命維持などに利用される水を地球から輸送しようとすれば膨大な費用がかかるからです。幸い、月の表面には水が豊富に存在することが近年の研究で判明しており、特に多いのは月の両極付近のクレーター内部であることも分かっています。極地のクレーター内部には太陽光が半永久的に当たらない永久影となっている場所があります。永久影の水は霜のような非常に細かい氷の結晶の形で存在しており、レゴリス（月表面を覆う砂状物質）の約20分の1の割合で存在するとみられています。

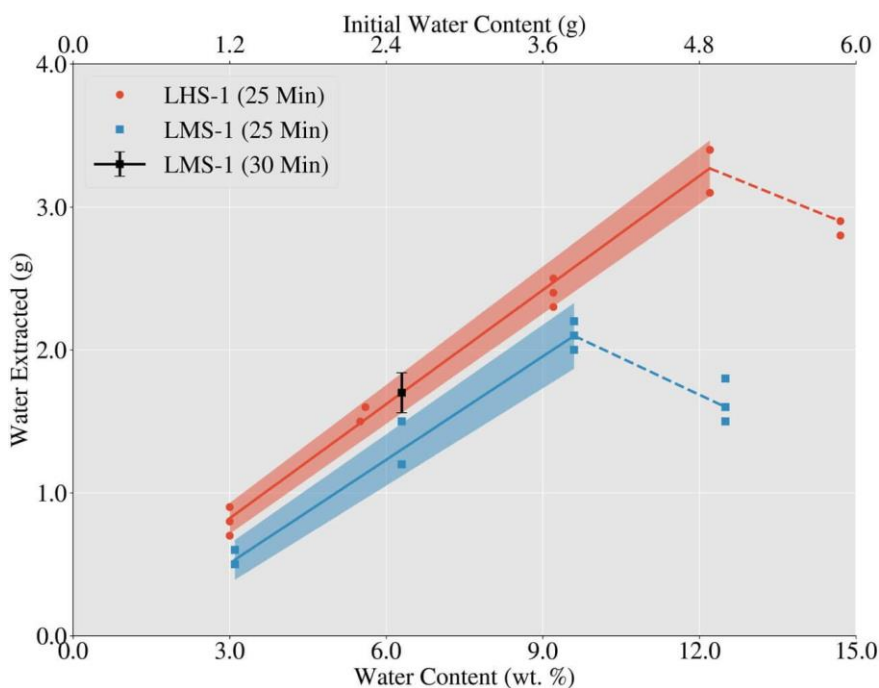
ただし、砂と混ざった状態の氷を溶かし、水として取り出すのは難しいことが分かっています。氷を溶かすための熱源は、これまで太陽光やレーザーが考案されてきましたが、そのどちらも加熱には適していないのです。これは「大部分がレゴリスで占められている氷」という物質構成の問題と、「表面しか加熱できない」という熱のムラの問題があるためです。そこで、代替として提案されたのがマイクロ波による誘電加熱です。簡単に言えば、

月の砂を“電子レンジでチン”する方法です。液体の水と比べると作用は弱いものの、岩石であるレゴリスをマイクロ波で加熱することは可能です。物質の内部に浸透するマイクロ波を利用すると均一に温めることができるため、氷を溶かせるだけの熱をレゴリスに発生させることができます。また、電子レンジが一般に普及していることからわかるように、この方法は仕組みが簡単であり、レーザーよりも電力効率が優れているといった長所もあります。過去には、1wt%から 2wt% (wt%=重量比) という極めて少ない割合の氷を含むレゴリス模倣物質 (レゴリスと同じ組成・粒の形状をした人工物) をマイクロ波照射で加熱し、水分を取り出すことに成功した研究事例もあります。しかしこの研究では、マイクロ波の出力が 1000W から 1200W とかなりの大電力になる点が問題でした。資源の限られる月面基地ではもっと低出力のマイクロ波で水を取り出す必要があると予想されますが、低い出力でも問題なく水を取り出せるのかは未知数でした。



【▲ 図 1: 実験の様子。氷を混ぜたレゴリス模倣物質は、マイクロ波の照射でプラズマが生じて輝いている (Credit: James D. Cole, et.al.)】

この疑問に答えるため、オープン大学の James D. Cole 氏らの研究チームは実験を行いました。用意されたのは、一般的な家庭用電子レンジよりもずっと出力が低い 250W のマイクロ波です (波長は家庭用電子レンジと同じ 2.45GHz)。Cole 氏らは月面の観測結果に基づいて準備した化学組成が異なる 2 種類のレゴリス模倣物質について、それぞれ 3.0wt% から 14.7wt% までの様々な割合で氷を含むサンプルを用意しました。実験条件を合わせるため、25 分間のマイクロ波照射でどの程度の水分が取り出せるのかを調べました。

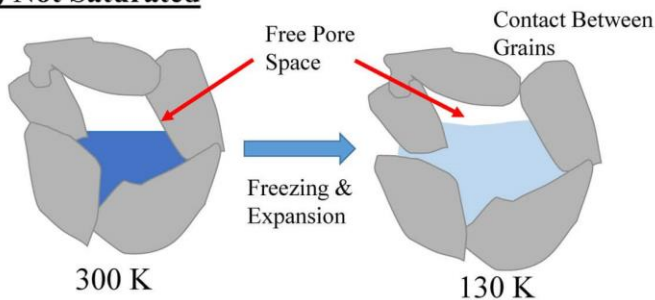


【▲ 図 2: 2 種類のレゴリス模倣物質 (LHS-1 および LMS-1) での実験結果。最も氷を含んでいるサンプル (グラフ右側) は、それよりも氷が少ないサンプルと比べて水の抽出率が悪くなっている (Credit: James D. Cole, et.al.)】

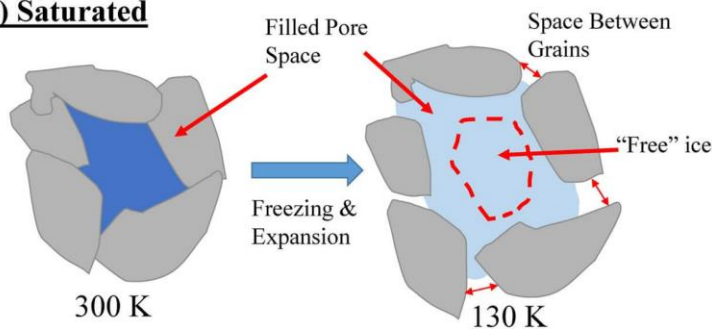
その結果、ほとんどのサンプルでは 250W のマイクロ波による 25 分間の加熱で、47% から 67% の

水分を取り出せることが分かりました。この割合は過去の実験で行われたレーザーによる加熱よりもずっと効率が良いことを示しています。さらに照射を続けた場合、6wt%のサンプルでは35分で88%もの水分を取り出せることもわかりました。また、レゴリス模倣物質の化学組成の違いによる水分の取り出し効率への影響は無視できるほど小さいことも明らかにされました。ただし、実際の月のレゴリスとは異なり、実験で使われたレゴリス模倣物質はマイクロ波によって加熱されやすい物質を含んでいないことから、実物ではより効率的な加熱と水分の取り出しも期待されます。

a) Not Saturated



b) Saturated



【▲ 図 3: マイクロ波照射によりレゴリスが加熱され、その熱によって氷が融ける (上側)。氷が多すぎるレゴリス (下側) は、レゴリスと接触していない部分の氷が融け残ってしまい、水分の抽出率が悪くなったと推定されている (Credit: James D. Cole, et.al.)】

一方、最大の割合で氷を含むサンプルの場合、水分を取り出す効率は低下することも判明しました。これは、レゴリスの隙間を埋める氷が多すぎるために、レゴリスに接触していない部分の氷が融けずに残ったためだと推定されています。また、固体の水は液体の水と比べて誘電加熱が弱く、氷自身が発熱しないことも、氷が融け残る原因となります。今回の実験で試された最大の氷の割合は 14.7wt%ですが、月面の観測では 30wt%以上という豊富な氷を含むレゴリスも見つかっています。レゴリスから水分を取り出す方法はマイクロ波による誘電加熱が唯一ではなく、他の方法にも検討する余地があるかもしれません。

とはいえ、永久影に含まれる氷の割合は 5.6wt%で、今回の実験で効率的に取り出せることが示された範囲内にあり、低い割合で氷を含むレゴリスは豊富に存在すると推定されます。マイクロ波による誘電加熱は、月で水を得る唯一の方法ではないにしても、主要な方法になる可能性があります。

Source

[James D. Cole, et.al.](#) "Water extraction from icy lunar simulants using low power microwave heating". (Acta Astronautica) 文／彩恵りり

<https://www.itmedia.co.jp/news/articles/2305/20/news059.html>

NASA、「アルテミス V」の有人月着陸船は SpaceX ではなく Blue Origin に

2023年05月20日 07時34分 公開 [ITmedia]

米航空宇宙局 (NASA) は 5 月 19 日 (現地時間)、月面に宇宙飛行士を送る「アルテミス計画」の一環とし

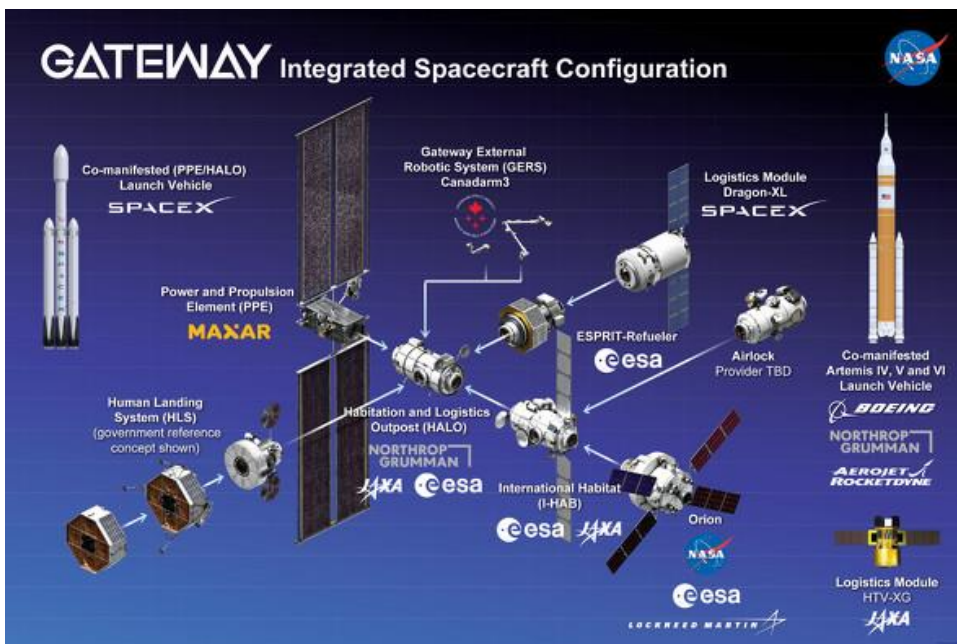
て、5回目のミッション「Artemis V」で使用する有人月着陸船の開発を、米 Blue Origin に委託すると発表した。契約総額は 34 億ドル。Blue Origin のジェフ・ベズス CEO は、NASA と協力できることを光栄に思うと [ツイート](#)した。

アルテミス計画では、2025 年に予定されている「Artemis III」ミッションで初めて宇宙飛行士を月面に送り込む予定だ。このミッションでは、[イーロン・マスク CEO が率いる米 SpaceX の月面着陸船が採用される](#)。また、次の「Artemis IV」ミッションでも SpaceX の Starship が採用される予定だ。

2029 年に予定されている「Artemis V」ミッションでは、Blue Origin の月面着陸船「Blue Moon」が宇宙飛行士を月面に運ぶ。計画によると、Blue Moon はまず無人で Blue Origin のロケットによって月周回軌道上の「Gateway」まで運ばれ、そこで NASA の Orion で Gateway に到着した 4 人の宇宙飛行士のうち 2 人が Blue Moon に乗り換えて月面に着陸する。この 2 人の宇宙飛行士は、月の南極付近で約 1 週間滞在する予定だ。



(NASA の発表文。画像クレジットは Blue Origin)



月の「Gateway」(Credits: NASA)

滞在後、宇宙飛行士は Blue Moon で Gateway に戻り、Orion で地球に帰還する。Blue Moon は Gateway に留まり、次のミッションでも使用される可能性がある。

NASA は、SpaceX に加えて Blue Origin をアルテミス計画の有人着陸システムのパートナーに追加することで、競争が生まれ、納税者のコストが削減され、定期的な月面着陸が可能になるとしている。

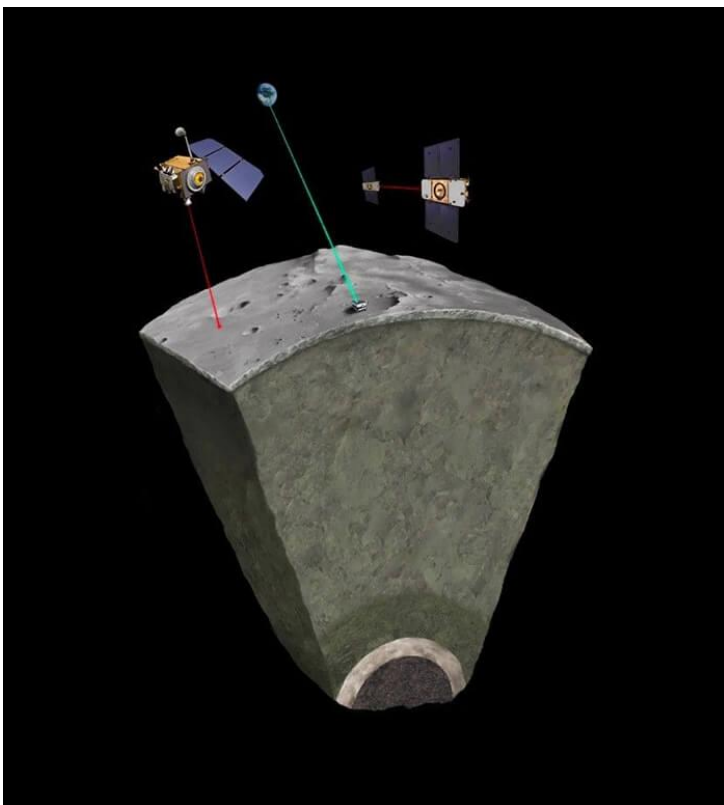
<https://sorae.info/astromy/20230525-lunar-core.html>

月の中心部に固体の「核」を発見 過去の大規模なマントル転倒の証拠も

2023-05-25 彩恵りり

地球唯一の自然衛星である「月」の内部構造は、惑星科学における長年の謎でした。20世紀前半までは、月の内部は地球のような層ごとに分かれた構造をしているのか、それとも火星の衛星フォボスやダイモスのように均質な構造をしているのかすらも不明だったのです。この謎に大きな進展があったのは、NASA（アメリカ航空宇宙局）の「アポロ計画」によって月面に地震計が設置されてからでした。

地震波の性質（速度、屈折角、減衰の度合いなど）は、通過する物質の性質（密度、温度、固体か液体かなど）によって変化することが知られており、地球の内部構造は地震波の観測を通して推定されています。月にも「月震」と呼ばれる地震活動があることが地震計の設置により判明したため、測定された地震波のデータを元に月の内部構造を推定することができます。これにより、月には地球と同じような層状の内部構造があるらしいことが明らかにされました。ただし、月震の規模や頻度は地球と比べて低いことに加えて、月面に設置された地震計の数が少ないため、地球のように詳細な構造を探るにはデータが不足していました。アポロ計画から半世紀以上経った現在ではアポロ計画以外にも設置された地震計があり、データの量も豊富になりましたが、今度はその膨大なデータの解釈に悩まされるようになりました。このような背景があるため、月の内部に関する研究に大きな進展がみられたのはつい最近のことです。2011年になり、月には中心部に半径約330kmの金属核（コア）があることや、少なくともその一部は液体であること、マントルと核の境界部には部分的に融けた柔らかい層（半径約480km）があることが明らかにされました。しかし、それ以上の明確な構造は引き続き不明のままです。特に、月の中心部には半径約250kmの固体金属核が存在するという予測も出されましたが、この時点では決定的ではありませんでした。これは、核の半径が月そのものの半径の約20%と極めて小さく（地球など岩石惑星の多くは約50%）、それだけ通過する地震波が少ないためです。



【▲ 図: 今回の研究で、月の核は固体と液体に分離していることが明らかにされた。また、核とマントルの境界

部の組成や物質は、過去の月で起きたマントル転倒の強力な証拠であるとしている（Credit: Géoazur/Nicolas Sarter）】

コート・ダジュール大学の Arthur Briaud 氏などの研究チームは、月の核の謎について決定的な答えを得たと発表しました。研究チームはこれまでに取得された地震波のデータの再分析に加え、月の形状の厳密なデータや月内部の熱対流のモデルも使用して、月の内部構造に関する分析を行いました。その結果、月の中心部には固体の核が存在する可能性が高いことが明らかになりました。地球の中心部には液体の外核と固体の内核が存在することが明らかになっていますが、月の核も地球と同じような構造をしていることになります。ただし、月の内核の半径は約 258 ± 40 km であり、これは内核の半径が月の半径のわずか 15% しかないことを意味します。また、平均密度は 7.822 ± 1.615 g/立方 cm であると推定されました。これは、月の核がほぼ純粋な金属でできているというこれまでの予測と一致します。さらに、今回の研究では、外核の外側を覆う部分的に融けたマントル下部について、鉄とチタンの鉱物であるチタン鉄鉱 (Ilmenite) が豊富に含まれていることも示されました。これは月の内部に関する別の重大な謎である「マントル転倒 (Mantle overturn)」の強力な証拠であると Briaud 氏は考えています。月には表側と裏側で岩石や元素の種類が大きく異なるという謎があります。特に、月の模様として観察される黒っぽい玄武岩が主体の「海」は、月が誕生してから 10 億年程度が経った時点でマグマが供給されたことを示唆しています。マグマが供給されるには熱源が必要ですが、月の誕生後これほど遅いタイミングで大規模な熱源が発生したことは謎でした。マントル転倒は、このような熱源の発生を説明するメカニズムとして 1995 年に提唱されました。マントル転倒では、月が誕生後に冷えて固まっていくに従い、マントルの上部で鉄やチタンなどの重い元素を含む鉱物が先に結晶化し、マントルの下部にはマグネシウムなどの軽い元素が集中するようになったと考えます。この場合、重い物質が軽い物質の上に乗っていることになるため、やがてマントル全体のバランスが不安定になり、重い物質は“転倒して”沈み込んでいきます。すると、重い物質が沈み込んだ際の重力エネルギーと、重い元素の中に含まれる放射性物質の崩壊熱が組み合わさることで、核の外側で再加熱が発生します。発生した熱は対流を引き起こし、マントルの物質と熱を上部へと運び上げ、鉄などの重い元素を含む玄武岩マグマを月の表面に噴出させます。これが現在、月の表側にある海になったと考えられます。

マントル転倒が起きた結果、鉄やチタンなどの重い元素を含む鉱物は核の近くへと沈み込みます。今回の研究結果はマントル転倒の強力な証拠となる重い元素の沈み込みに対応する状態をまさに示しており、内核の発見と共に重要だと Briaud 氏は強調しています。今回示された月の内部構造モデルは、月の磁場が予測より弱すぎることなど、他にも山積している月の謎の解明にも影響を与えると考えられます。

Source

[Arthur Briaud, et.al.](#) “The lunar solid inner core and the mantle overturn”. (Nature)

[Arthur Briaud.](#) “La Lune ouvre son cœur pour la première fois”. (Centre national de la recherche scientifique)

[P.C. Hess & E.M. Parmentier.](#) “A model for the thermal and chemical evolution of the Moon's interior: implications for the onset of mare volcanism”. (Earth and Planetary Science Letters)

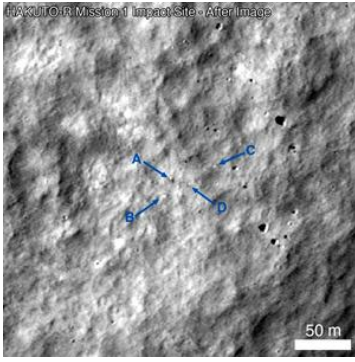
[Renee C. Weber, et.al.](#) “Seismic Detection of the Lunar Core”. (Science)

文／彩恵りり

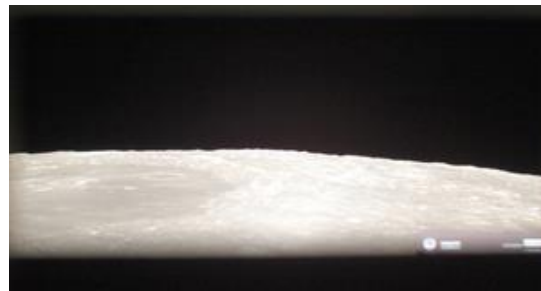
<https://www.asahi.com/articles/ASR5S5R5JR5SULBH00D.html>

HAKUTO-R の月着陸船の痕跡か NASA 探査機の撮影画像公開

玉木祥子 2023 年 5 月 24 日 17 時 45 分



アイスペースの月着陸船が降り立つ予定だった地点周辺を、月探査機 LRO が撮影した画像。A~D の 4 カ所でクレーターや着陸船の破片のようなものがあるという=NASA、アリゾナ州立大提供



米航空宇宙局 (NASA) は、日本の宇宙ベンチャー「ispace (アイスペース)」の月着陸船が降り立つ予定だった地点を撮影した画像を公開した。少なくとも四つの目立った痕跡が確認されたといい、着陸船が月面に衝突したときにできた穴 (クレーター) や、着陸船の破片の可能性があるという。

月探査機ルナー・リコネイサンス・オービター (LRO) が着陸地点周辺について、着陸予定時刻後に撮影した画像 10 枚と着陸前の画像を比較して解析した。60~80 メートルにわたって月面が白っぽく変化していたという。同じ地点を再撮影し、さらに分析をしていく予定。アイスペースは、民間の月探査計画「**HAKUTO-R**」のミッション 1 として着陸船を昨年 12 月 11 日に打ち上げた。4 月 26 日に、月面の「氷の海」と呼ばれる場所

に降り立つ予定だったが、直前に着陸船との通信が途絶えた。その後も通信を確立できず、月面にぶつかる「ハードランディング」をしたとみられている。(玉木祥子)

<https://news.mynavi.jp/techplus/article/20230523-2685959/>

木星の数年周期の気象変動が深部の磁氣的波動に起因する可能性を神戸大が提唱

掲載日 2023/05/23 15:30 著者：波留久泉

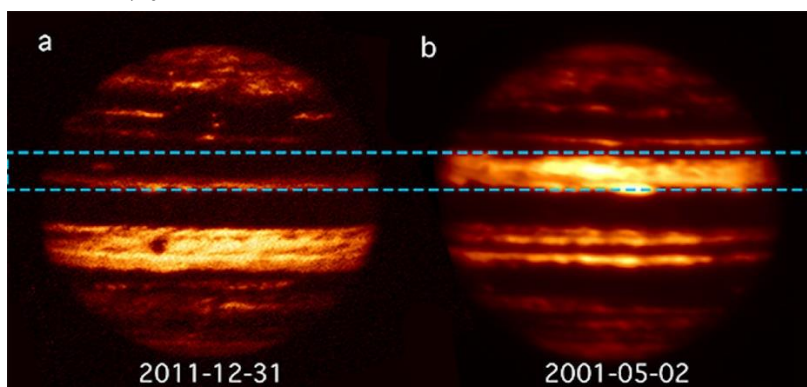
神戸大学は5月19日、最新の木星探査観測などの知見とデータ科学的解析を基に、木星表面で広く観測されてきた気象の数年変動が深部の磁氣的な波動に起因する可能性があることを示したことを発表した。

同成果は、神戸大 大学院 システム情報学研究科の堀久美子助教を中心とする、英・リーズ大学のクリス・A・ジョーンズ教授、レスター大学のリー・N・フレッチャー教授らの国際共同研究チームによるもの。[詳細は、英科学誌「Nature」系の天文学術誌「Nature Astronomy」に掲載された。](#)

木星表面の鮮やかな縞模様は、その色や明るさが、時とともに変化することが知られている。時には急激な嵐が起り、それらが木星表面全体に広がっていくような現象「global upheavals(全球蜂起)」も観測されている。しかし、このような変化が規則的なものなのか、もしくは、突発的なものなのかは、長らく不明だったという。そうした中、近年、数十年にわたる木星赤外線画像のデータセットが系統的に解析され、南緯41度から北緯33度までの広範囲で、周期4~9年の規則的な変動が起こっていたことが判明。これらは、木星での一日の長さ(約10時間)に比べて長いことから、木星の「気候変動」と呼ばれることもあるという。

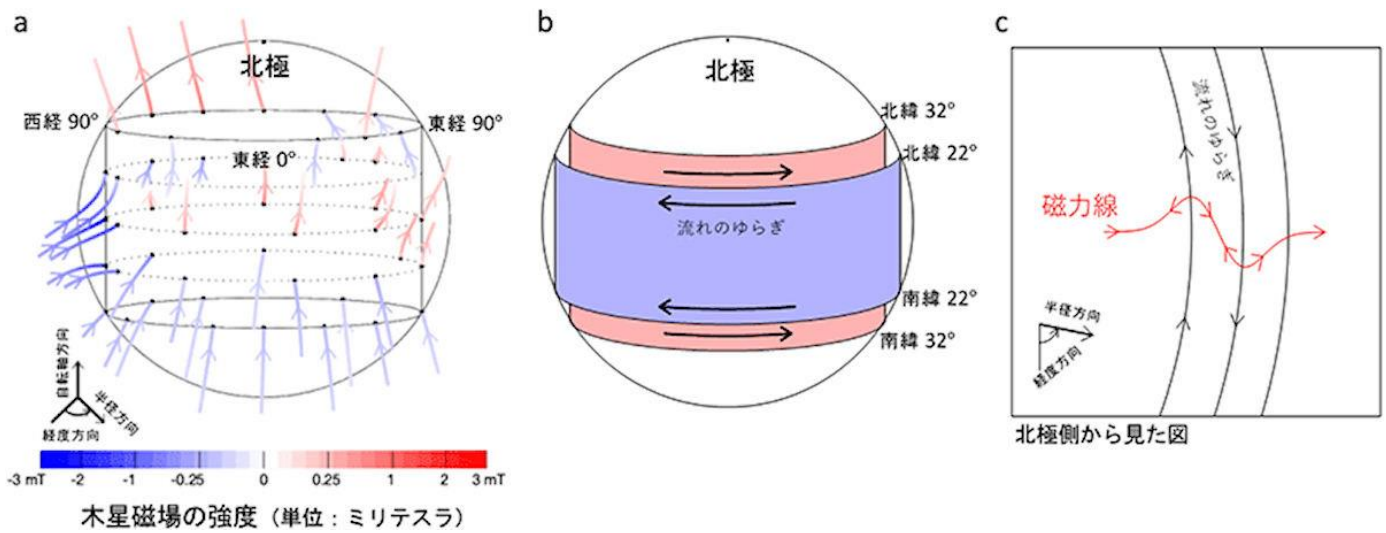
しかし、その特徴が観測から明らかになってくる一方で、成因については諸説が入り乱れる状況となっていたという。その多くが、地球の気象学における知見を基にした説であり、広緯度にわたる数年周期性を定量的に説明できるものは皆無であったことから、研究チームは今回、観測的な特徴を定量的に説明する説の構築に挑むことにしたとする。研究チームが目にしたのは、木星が巨大ガス惑星であり、地球のように「地面」が存在しないという点。木星表面はその惑星深部からシームレスにつながっているため、木星大気で観測される現象も、木星深部の現象に起因する可能性があるとする。実際、過去の理論・数値シミュレーション研究により、深部の磁場形成領域(ダイナモ)では、数年以上の周期で磁氣的な波(ねじれ振動)が励起されうること、その振動は木星表面近くの熱流を広い緯度帯で変動させうること、などが示唆されていたという。そこで今回の研究では、その理論を根拠として、木星赤外線観測で見つかった特徴をどの程度説明できるかを調べることにしたとする。

具体的には、現在運用中のNASAの木星探査機「ジュノー」による磁場観測結果、ハッブル宇宙望遠鏡による風観測結果、そして深部密度の理論モデルから、各緯度におけるねじれ振動の周期が理論的に算出された。その算出値は3~8年であり、赤外線観測で見つかった周期性を、誤差の範囲内で定量的に説明できることが確かめられたという。

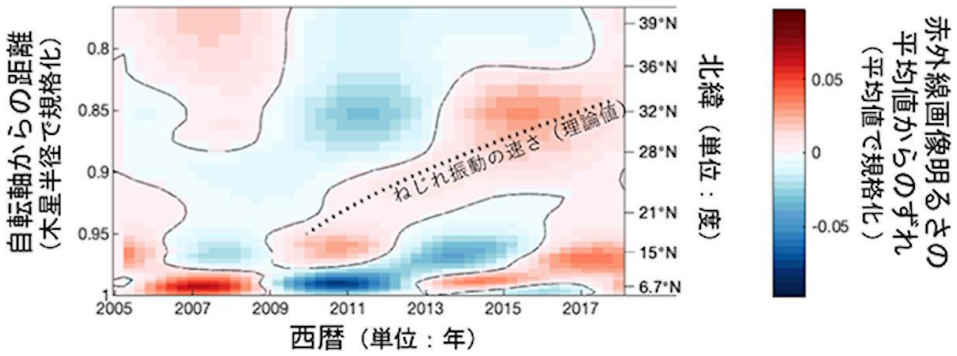


赤外面像で捉えられた木星大気の長期変動。(a)2011年12月撮像、(b)2001年5月撮像。青い点線は北赤道縞(北緯7~21度)を示す。明るさ(赤外放射の強さ)が変化していることがわかる。補正前の画像であることを注意(画像はフレッチャー教授ら研究グループの論文より転載されたもの)(出所:神戸大Webサイト)

また、この理論値を基に、近年開発されたデータ科学的解析法の1つである「動的モード分解法」を用いることで、赤外線画像の時空間データセットから、深部ねじれ振動が期待される周波数域に、微小なシグナルを抽出することにも成功したとするほか、そうして抽出されたシグナルは、期待された波長および伝播速度と矛盾ないものだったとしてもおり、これらの結果から深部ねじれ振動の基本的特性(周期・波長・伝播速度)を大気の観測データに確認することができたと研究チームでは説明している。



木星深部のねじれ振動。(a)木星を貫く磁場。青線と赤線は磁力線を表し、その色で磁場の強さが表されている。NASA の探査機ジュノーの磁場観測を基に作成されたもの。(b・c)ねじれ振動の概念図。ねじれ振動は自転軸を中心とした円柱状の振動で(b)、自転軸と垂直な方向に伝播する(c)。東西向きの流れのゆらぎ(黒線)によって磁力線(赤線)がゆがみ、そのゆがみが磁力線のバネ効果によって引き戻されて、逆向きに流れのゆらぎが生じる。これが繰り返されることで、振動が起こり、その振動が磁力線に沿って波動として伝播していく (画像は Nature Astronomy 掲載論文が一部改変されたもの) (出所:神戸大 Web サイト)



木星赤外線画像データセットから抽出された深部ねじれ振動のシグナル。赤外線画像の明るさが東西方向に平均化され、動的モード分解法を用いて抽出された。色と等高線は、明るさの平均値からのずれを表す。横軸は西暦、縦軸は自転軸からの距離。黒の点線は、ねじれ振動の伝わる速さを示す。ねじれ振動の速さで、赤外線画像における時空間変動パターンを説明できることがわかる (画像は Nature Astronomy 掲載論文が一部改変されたもの) (出所:神戸大 Web サイト)

従来の描像は、岩石惑星である地球での知見を基として他惑星に拡張したもので、大気現象と深部現象との相互作用はほぼ議論されておらず、今回の研究で提唱された説は、そうした従来の惑星大気研究における描像とは異なるものであると研究チームでは述べており、この成果は、木星に代表される巨大ガス惑星を理解するためには、両方の議論、特にその統合的な理解が重要であることを示唆するものであるとしているほか、地球に代表される岩石惑星とは本質的に異なるものであり、今回の研究を進めることは、地球環境の特徴を改めて浮き彫りにし、再認識することにもつながるともしている。

加えて、地球以外の天体において深部の磁気的な振動・波の存在が示唆されたことは、磁場の形成メカニズムを

解明するために極めて重要だとも指摘している。磁場形成問題の難点の1つは、磁場が形成されている「現場」を直接調べることができず、理論を制約するための実測的な情報が欠落している点だとしているが、ねじれ振動は、その深部領域の物理的状態を強く反映するため、これを逆手にとることで、観測された振動の特性から磁場形成領域内部を「スキャン」することも可能になるとのこと、このような情報は、理論モデルの取捨選択に役立つほか、理論的な問題点を明確にもする可能性があるとしており、今後、今回の研究成果を活用していくことで、天体磁場形成問題の解決のための新たな可能性が開かれ、大きく展開していくことが期待されるという。

<https://news.mynavi.jp/techplus/article/20230522-2684928/>

極地研など、南極隕石から木星の形成と移動に関する同位体的証拠を初確認

掲載日 2023/05/22 14:19 著者：波留久泉

国立極地研究所(極地研)と東京大学(東大)の両者は5月18日、日本の南極観測隊(JARE29)が収集したアングライト隕石「Asuka 881371」と、日本とベルギーの合同南極観測隊(JARE54とBELARE-SAMBA2012-23)が収集したアングライト隕石「Asuka 12209」を、酸素同位体分析設備で分析した結果、どちらのアングライト隕石にも、異なる2つの天体起源を示す酸素同位体が存在していることが示されたと共同で発表した。



ナンセン氷原の裸氷上のアングライト隕石「Asuka 12209」(出所:極地研 Web サイト)

同成果は、英・オープン大学の Ben Rider-Stokes 大学院生を中心とする、極地研、東大の研究者も参加した国際共同研究チームによるもの。詳細は、[英科学誌「Nature」系の天文学術誌「Nature Astronomy」に掲載された。](#)

アングライトは、太陽系最古の火山岩として知られている。今回の研究では、南極で収集された2つのアングライトの隕石を調べた結果、どちらの隕石からも異なる2つの天体起源を示す酸素同位体が発見された。研究チームによると、このような発見は初めてだという。そして試料の同位体比年代を測定した結果、この隕石試料の形成時期が、木星の形成や移動の推定年代と重なることが判明したとする。つまり、隕石の母天体の衝突イベントが木星の移動によって引き起こされたことが示唆されたのである。この研究成果は、木星の形成と移動に関する同位体的証拠を示す初めてのものだとしている。研究チームは現在、隕石試料の水素含有量を調査し、衝突イベントが太陽系への水の供給という点でどのような役割を果たしていたかを評価しているとする。

今回の研究により、太陽系におけるとても大きなイベントに関する重要な知見が、1g未満というごく少量の物質から得られた。Rider-Stokes 大学院生は今回の発見に対し、今後も回収できるサンプルが微量だったとしても、宇宙航空研究開発機構(JAXA)による火星衛星探査計画「MMX」のようなサンプルリターン計画は重要であることを示唆しているとした。

<https://news.mynavi.jp/techplus/article/20230524-2686628/>

土星の衛星数が100個を突破 62個の新衛星のうち半数はすばる望遠鏡で観測

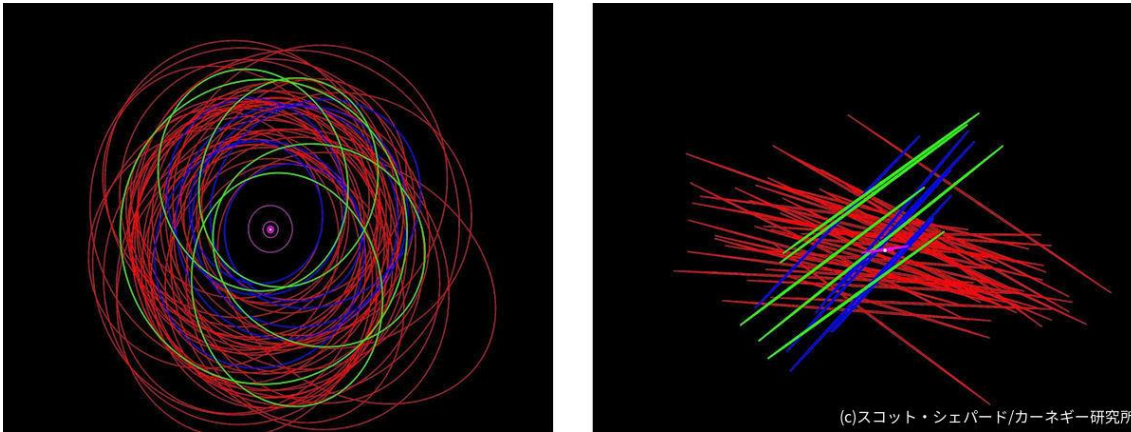
掲載日 2023/05/24 14:28 著者：波留久泉

国立天文台 ハワイ観測所は5月22日(ハワイ現地時間)、5月に国際天文学連合から土星の衛星として新たに発表された62天体のうち、土星の衛星として通算100番目に報告された「S/2004 S43」(仮符号)を含む約半数を、

すばる望遠鏡による 2004 年から 2007 年にかけての観測で発見したことを発表した。

同成果は、米・カーネギー研究所のスコット・シェパード教授が率いる研究チームによるもの。

今回の国際天文学連合の発表により、土星の衛星数は 145 個となった。なお新たに発表された 62 個の衛星は、直径 2km ほどの小さな天体で、土星本体から遠く離れた楕円形で傾いた軌道を有し、土星本体の自転とは逆向きに公転するものが多いという特徴を持つ不規則衛星だ。またその約半数は、すばる望遠鏡でかつて稼動していた主焦点カメラ「Suprime-Cam」(現在は超広視野主焦点カメラ「Hyper Suprime-Cam」にアップデート)を用いた、2004 年から 2007 年までの観測で発見された。



土星の衛星の軌道を示す概念図。(左)極方向から。(右)赤道方向から。今回発表された新しい衛星は、外側の軌道を回る不規則衛星だ。不規則衛星の軌道は赤、緑、青色で表されている。(c)スコット・シェパード/カーネギー研究所(出所:すばる望遠鏡 Web サイト)

100 番目の衛星である S/2004S43 の初観測は 2004 年のことである。今回の新衛星たちはとても小型であるために非常に暗く、明るさはわずか 26 等程度しかないという。そのため、軌道を決定するためには発見後もさらに年数をかけての追観測が必要だったとする。そして 2019 年と 2021 年に、台湾中央研究院 天文及天体物理研究所のエドワード・アシュトン博士が率いるチームが、すばる望遠鏡と同じくハワイ・マウナケア山頂にあるカナダ・フランス・ハワイ望遠鏡(CFHT)を用いた観測を行い、62 個すべての衛星の軌道が確定された。なおこれらの衛星は、元々は大きな衛星が、衛星同士あるいは彗星や小惑星との衝突で破壊されてできたものだという。そのような衝突から生じたかけらは、元の親衛星とほぼ同じ軌道を保持する。似たような軌道の数から、少なくとも、5 個から 8 個の親衛星が存在していたことが推定されるとしている。またこれらの衛星は、巨大惑星領域で形成されて惑星に取り込まれた天体たちの最後の生き残りだとする。米国航空宇宙局(NASA)が土星の衛星タイタンでの探査用として計画しているヘリコプター型(移動式ロボット回転翼着陸船)の「ドラゴンフライ」(2027 年に打ち上げ予定)のような土星探査機で、これらの衛星を間近に撮影することができれば、惑星を作る材料となった始原的な物質についてより深く理解することができる可能性があるという。なおシェパード教授によれば、土星の周辺においてさらに多くの小さな衛星を観測済みだとしたうえで、その軌道を決定するためにはより詳細な追観測が必要だとしている。これらの未確定の衛星候補の大半も、すばる望遠鏡による 2004 年の観測で初めて発見されたとする。シェパード教授は、太陽系の第 9 惑星(プラネット X)の探索のため、すばる望遠鏡などを用いた観測で、10 個以上の木星の新衛星を発見。2023 年 2 月には木製の衛星の総数が 95 個となったことが発表され、木星が“最も衛星の数が多い惑星”となったばかりだった。しかし今回のシェパード教授による発見で、わずか 3 か月で土星がその座を奪還し、しかも一気に 50 個も引き離れた形だ。衛星数を巡る土星と木星の争いについて、シェパード教授は、土星の周りの衛星については、直径約 3km のものまでは完全に捉えていると考えているという。一方の木星については、地球により近いことから(太陽~木星間が約 5 天文単位、太陽~土星間は倍の約 10 天文単位)、さらに小さな、約 2km のものまで完全に捉えているとする。土星は観測可能な衛星サイズが木星よりも 1km 大きいにも関わらず、今回木星よりも 50 個も多く衛星が見つかり、同じ 2km の範囲になれば、土星の方がさらに多くの衛星を持っていることが考えられるとしている。

名大など、トンガ沖海底火山噴火に伴うプラズマバブルの直接観測に成功

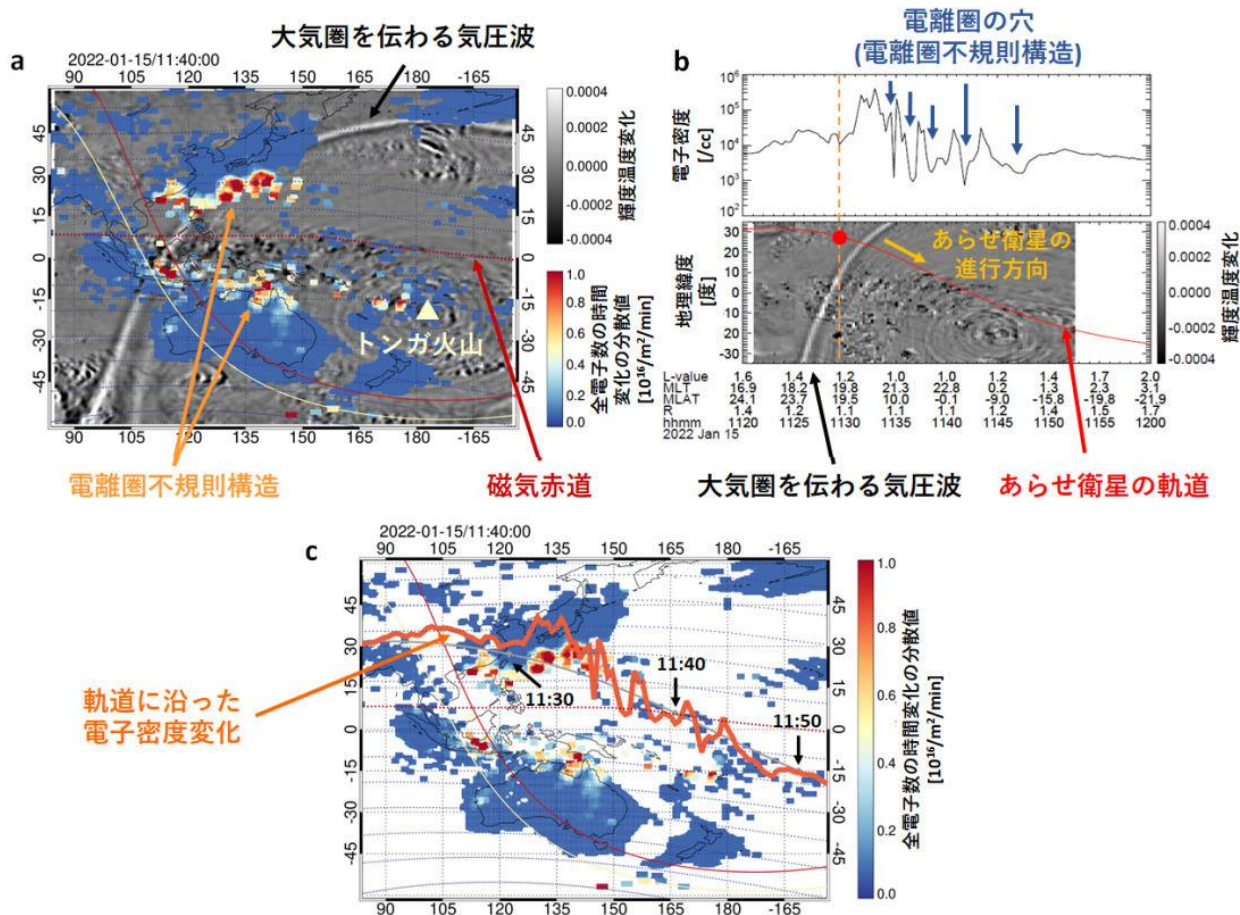
掲載日 2023/05/24 20:05 著者：波留久泉

名古屋大学(名大)、情報通信研究機構(NICT)、電気通信大学(電通大)、東北大学、金沢大学(金大)、京都大学(京大)、宇宙航空研究開発機構(JAXA)の7者は5月23日、全球測位衛星システム(GNSS)、気象衛星「ひまわり8号」、ジオスペース探査衛星「あらせ」、電離圏観測機器などのデータを解析し、2022年1月15日に南太平洋で発生したトンガ沖海底火山の大規模噴火に伴う、同心円状の気圧波が引き起こした電離圏電子密度の不規則構造「プラズマバブル」の直接観測に成功し、少なくとも高度2000kmの宇宙まで到達していたことを解明したと共同で発表した。同成果は、名大 宇宙地球環境研究所の新堀淳樹特任助教を中心とする研究チームによるもの。詳細は、[英オンライン総合学術誌「Scientific Reports」に掲載された。](#)

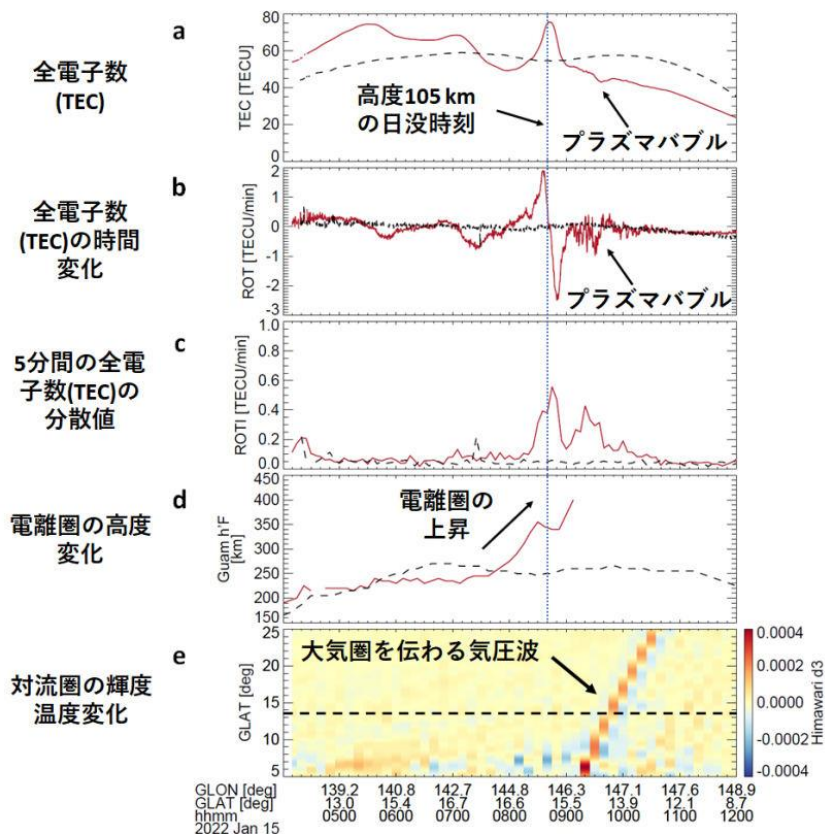
地球を取り巻く高度60km以上の上空には、太陽からの紫外線やX線によって大気中の分子や原子の一部がイオン化した電離圏が形成されている。赤道上空では、地球磁場が電離圏に対して水平となるため、特有の現象がいくつか発生する。プラズマバブルはその1つであり、電子密度が周囲よりも2桁以上低い“電離圏の穴”である。その内部は、空間的に乱れた電子密度構造(電子密度の不規則構造)で満たされており、衛星測位や通信などに悪影響を及ぼす。そのため、プラズマバブルがどのような条件下で発生するのかを予測・予報することが、宇宙天気研究の中で重要視されている。しかし、どのような条件下で発生するのか、下層大気の変動が発生にどのように関わっているのかは、未解明の部分も多いという。またトンガ沖で発生した海底火山の大噴火は、世界中に強烈な気圧波、高速の津波を引き起こすと同時に、アジア域上空でプラズマバブルを発生させたが、その到達高度は不明だった。そこで研究チームは今回、あらせと、ひまわり8号、地上連携観測データを組み合わせた解析を行い、噴火後のプラズマバブルの発生メカニズムの解明を目指したという。

電離圏がかく乱されると、GNSS衛星からの位置情報に誤差が生じることがあるが、現在はその誤差を利用して電離圏の情報が獲得されている。今回もまず、全球の電離圏変動を高時間・高空間分解能で観測するため、世界各地の9000台超のGNSS受信機のデータを収集し、全電子数(TEC)データベースを作成したという。また、噴火による気圧波、プラズマバブルおよび電離圏の動きの情報を得るため、ひまわり8号の赤外輝度温度、あらせの電子密度、太平洋域に設置された電離圏観測機器(イオノゾンデ)が使用された。解析の結果、気圧波の到来のタイミングで、磁気赤道を挟んで5分間のTECの時間変化の分散値が増加している領域が現れたことが判明。その増加は、電離圏電子密度の不規則構造の形成を示しており、このことは、対流圏を伝搬する気圧波から生まれた大気変動が上方へと伝搬し、電離圏の電子かく乱を引き起こしたことを意味しているとする。

あらせは当日、気圧波と正面衝突する形で夕方過ぎに近地点付近(高度約400km)を通過。同衛星が捉えた電子密度の時系列プロットによれば、大気圏を伝搬する気圧波が到来する数分前に電子密度の急増が起こり、その後、電子密度が周囲と比べて1桁~2桁も急減する多数のプラズマバブルが形成されたとする。なおこの電子密度かく乱の出現領域は、5分間のTECの時間変化の分散値の増加領域にも対応していた。そしてプラズマバブルは、少なくとも高度2000kmの宇宙空間まで伸びていたことが突き止められた。その高度まで到達するプラズマバブルは極めて稀だという。また、グアム島のイオノゾンデ観測によって、電離圏が250kmから400km近くまで上昇していることが示され、急激なTEC値の上昇と同期していたとのこと。その上昇後にプラズマバブルが起きており、この電離圏の上昇がプラズマバブルの発生に関わっていることが推察された。さらに、対流圏輝度温度変化との比較から、グアム島に気圧波が到来する約2時間前から電離圏の上昇が始まっており、対流圏を伝搬する気圧波よりも早い大気変動を考える必要が出てきたとする。



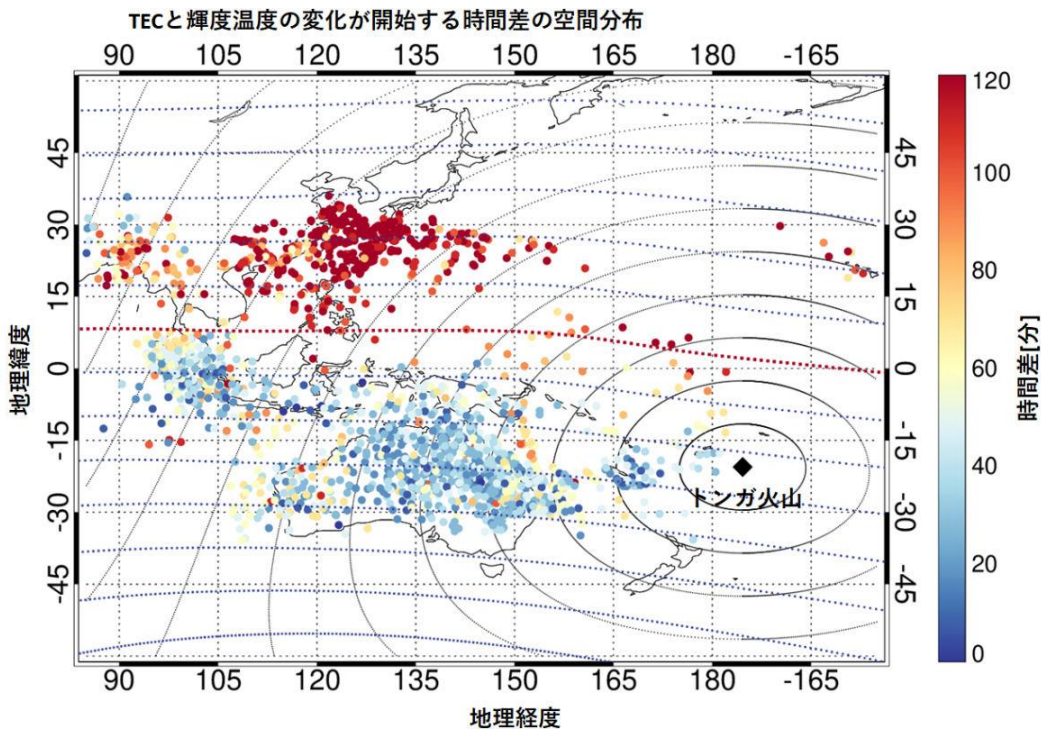
噴火後に観測された気圧波と電離圏不規則構造。(a)世界時 2022 年 1 月 15 日 11:40 における赤外輝度温度と 5 分間の TEC の分散値の 2 次元マップ。縦軸は地理緯度、横軸は経度。横方向の赤線は磁気赤道。(b)あらせの観測による電子密度変化の時系列プロットと赤外輝度温度の緯度-時間プロット。図下の数字は、時間とあらせの位置。(c)5 分間の TEC の分散値の 2 次元マップ上にあらせの観測による電子密度変化が重ねられた図(出所:名大プレスリリース PDF)



グアム島上空における TEC 変化(a~c)、電離圏高度変化(d)、および対流圏輝度温度変化(e)の時系列プロット。a~d 中の黒点線は 2022 年 1 月 13 日の、赤実線は同 15 日のデータ。また e 中の黒点線は、グアム島内の観測点の地理緯度(出所:名大プレスリリース PDF)

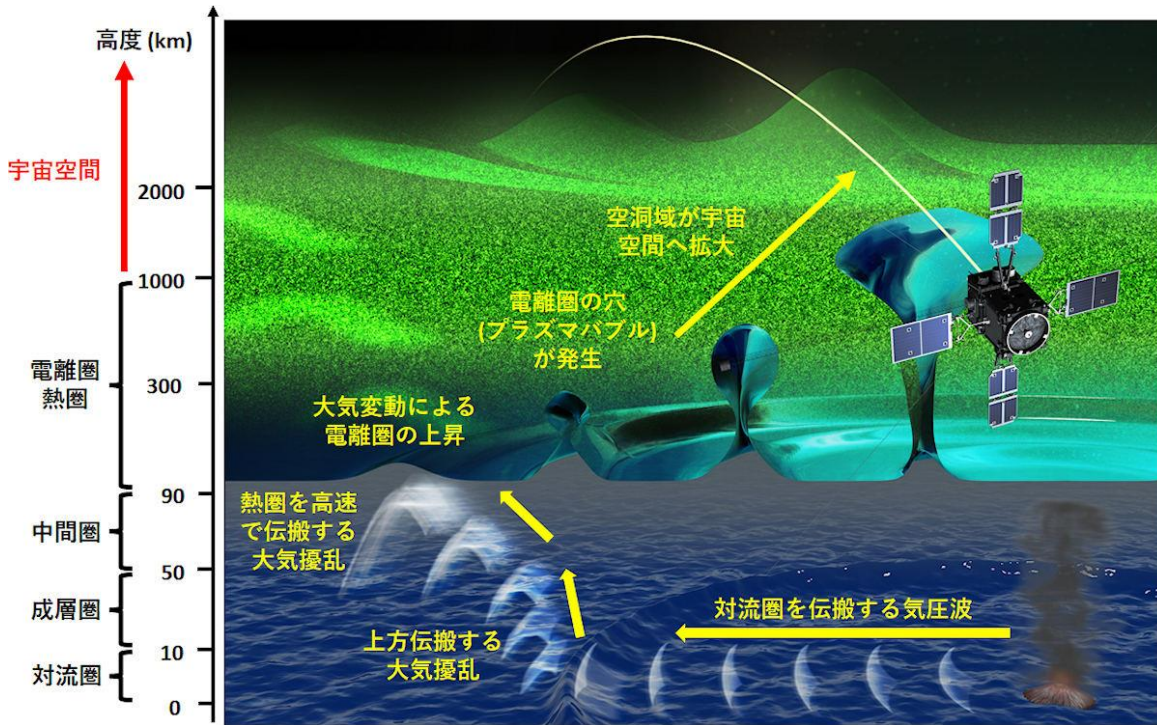
そこで、急激な電離圏 TEC の上昇と、対流圏輝度温度変化の開始時間差の空間分布に関する調査を行った結果、全体的に電離圏 TEC の上昇が始まる時間の方が、対流圏輝度温度変化よりも約 20 分~約 2 時間早く始まること、その開始時間差は南半球よりも北半球側で大きいことが判明した。その原因として以下の 2 点が考えられるが、詳細なメカニズムについては今後の研究に託されるとしている。

噴火によって発生した気圧波が高温の熱圏に到達し、そこで加速された気圧波が対流圏を伝わる気圧波を追い越す形で伝わり、電離圏の上下運動をもたらした南半球で発生した電離圏変動が高速で磁力線に沿って北半球に伝わった研究チームは今回の研究により、トンガ沖海底火山噴火に伴う気圧波に伴って、プラズマバブルがアジア域低緯度電離圏かつ通常では考えられない高高度で発生していたこと、および電離圏の高度上奏が気圧波の到来より早く開始していたことを発見した。この結果は、火山噴火などを通じて対流圏で生じた大気変動が、数分から数十分かけて電離圏へ伝搬して電離圏電子密度変動を引き起こすという従来の地圏-大気圏-電離圏結合の考え方を見直すことを示唆するとしている。



電離圏 TEC 変動と対流圏輝度温度変化の開始時間差の空間分布。この時間差は、0~120 分間のカラースケールで示されている。同心円は、1000km ごとのトンガ火山からの距離(出所:名大プレスリリース PDF)

また、今回の噴火のような大規模な場合、通常では起こりにくいとされる条件下でも、プラズマバブルが形成されることが示された。このような事例は、現在の宇宙天気予報モデルには取り入れられておらず、今後、似たような事例を解析して得られた知見を取り入れていくことが期待されるという。またそれにより、今後、地震や火山噴火などの自然災害に起因した電離圏かく乱が起こった場合に、衛星放送や通信の障害の軽減に貢献できると考えられるとしている。



噴火後に観測されたプラズマバブルの発生メカニズム。左の縦軸は高度、値と目盛は各領域の境界の大まかな高度(出所:名大プレスリリース PDF)

https://news.biglobe.ne.jp/domestic/0524/dol_230524_5774108993.html

「反物質」がこの宇宙にほぼ存在しない…「2つの仮説」とは？

2023年5月24日(水) 6時0分 [ダイヤモンドオンライン](#)



「反物質」がこの宇宙にほぼ存在しない…「2つの仮説」とは？ [写真を拡大](#)

「この本は、まちがいをなく買いた」。竹内薫氏絶賛の1冊『僕たちは、宇宙のことぜんぜんわからない』。本書は、「宇宙は何でできてるの?」「ビッグバンの時には何が起こったの?」「ダークマターって何?」「宇宙で僕らはひとりぼっちなの?」……こんな「まだ解かれていない宇宙の謎」を解説する「世界一わかりやすく面白宇宙入門」だ。本連載では、本書の一部から抜粋して、わかりやすい宇宙のお話を伝える。

Photo: Adobe Stock

「反物質」はほとんど見つからない

物質と反物質には、すごく大きくてすごく大事ですごく当たり前の違いが1つある。

物質は至るところにあるのに、反物質はほとんど見つからないのだ。

どうやらこの宇宙には、反物質よりも物質のほうがずっとたくさんあるらしいのだ。

もし物質と反物質がお互い正反対のバージョンだったら、ビッグバンのときに粒子と反粒子は同じ個数つくられたはずだ。でも、そこから少し劇を進めてみたらどうなるだろう？

ふつうの粒子1個あたり反粒子が1個つくられたとしたら、いずれはすべての粒子が反粒子と出合って対消滅

し、宇宙の物質は残らず光子に変わっていたはずだ。でも君は生きているし、君が光でできていないのはほとんど間違いないんだから、そんなことにならなかったのは確かだ。

だから、反物質よりも物質のほうの方がなぜか選り好みされたのだと考えるしかないのだ。

この差の理由として考えられるのが（少なくとも）2つある。

考えられる理由その1

ビッグバンのときに、反物質よりも物質のほうが少ないだけたくさんつくられた。大部分の物質と反物質は対消滅して消えてしまった。でも、反物質が底をついてもほんの少し物質が残っていて、その物質から、いま存在している銀河や星、チョコレートケーキやダークマターがつくられた。確かにそれでいまの宇宙の様子は説明できるけれど、話をはぐらかしているだけだ。「どうしていまの宇宙は反物質じゃなくて物質でできているの」という疑問が、「どうして宇宙の始まりには反物質よりも物質のほうが多かったの」という疑問に変わっただけだ。そして残念なことに、どっちの疑問の答えもぜんぜんわからない（しかも、初期の宇宙にまつわる現在の理論のほとんどは、最初に物質と反物質が違う量だけつくられたという事実とつじつまが合わない）。

考えられる理由その2

ビッグバンのときには物質と反物質は同じ量だけつくられたけれど、粒子の何かの性質のせいで、時間が経つにつれて物質が反物質よりも多くなっていった。物質よりも反物質のほうを速く壊したり、反物質よりも物質のほうを速くつくったりする物理反応がもし存在するとしたら、それもありえる話だ。

粒子はつねにつくられては壊されているので、粒子と反粒子とで生成や破壊がほんのちょっと違っていただけだったとしても、その違いが積み重なれば大きいアンバランスになるかもしれない。

この第2の説はなかなかよさそうだ。でもこの宇宙がそもそも、反物質よりも物質のほうを好んでつくったり取っておいたりするなんてありえるのだろうか？ほとんどの物理現象は完璧に対称的だ。わかっている限り、ふつうの物質にできることなら反物質でも同じようにできる。たとえば中性子は陽子と電子と反ニュートリノに崩壊する（核ベータ崩壊といってつねに起こっている）。それとまったく同じように、反中性子は反陽子と反電子とニュートリノに崩壊する。もしかしたら、宇宙の選り好みはほんのちょっとなのかもしれない。

物理学者は素粒子の生成と破壊を調べて、粒子と反粒子のあいだで次々に姿を変える振動現象の様子のわずかなずれを探している。ちょっとしたずれの証拠は見つかっているけれど、残念ながら、いまの宇宙に見られるとてつもなく大きなバランスのずれはとうてい説明できない。だから、反物質よりも物質のほうの方が選り好みされた理由はほかにもあるはずだ。それがわかったら、そもそもどうして粒子と反粒子の2種類があるのか、その手掛かりが見つかるかもしれない。でもいまのところはぜんぜんわからない。

奇妙な物質

反物質についてはある程度のことにはわかっている。

存在していて、物質と電荷がプラスマイナス反対で、物質と接触すると対消滅して光に変わることはわかっている。手掛かりがぜんぜんないわけじゃない。

でも、わかっていないことに比べたら、そんな手掛かりなんてたいしたことない。まず、どうして反物質があるのかがわかっていない。それがわかったら、物質の成り立ちを解く手掛かりになるのだろうか？

もっと別の種類の物質も存在するのだろうか？さらに、物質と反物質には対称的なところがたくさんあるけれど、この宇宙はなぜか物質のほうを選り好みしているのだ。こうした疑問のことを考えていくと、反物質が怖くなってくるかもしれない。もちろん触りたくはない。けれど、反物質からどんなクールなことが学べるか考えてみてほしい。たとえば、とてつもない疑問が1つ残っている。


反粒子は物質粒子と同じように重力を感じるのだろうか？

反物質があることはわかっているし、いまの理論によるとふつうの物質とまったく同じように重力を感じると予想されているけれど、実際に十分な量の反物質を観察してこの基本的な疑問に答えるのはまだ無理だ。

重力はすごく弱いので、そうとうたくさん粒子を集めないと測れない。でも反物質はすごく少ないし不安定な

ので、重力の実験をするのはほとんど不可能だ。でももし、反物質とふつうの物質で重力の感じ方が違っていたら？ 反粒子の大きな特徴は、電磁気力と弱い核力と強い核力の「荷」がふつうの粒子とプラスマイナス反対なことだ。だとしたら、反粒子の「重力荷」も反対なんだろうか？ 反物質は重力を反対に感じるのだろうか？

もしそうだったとして、「反重力」の性質を持った反材料をつくって利用する方法が見つかったら、どうなるか想像してみしてほしい。子どもの頃に夢見た空飛ぶ車や反重力ブーツが現実のものになるのだ！

もしそうなったら、「反物質」っていう名前を「凄物質」って変えたいかなかもしれない。 

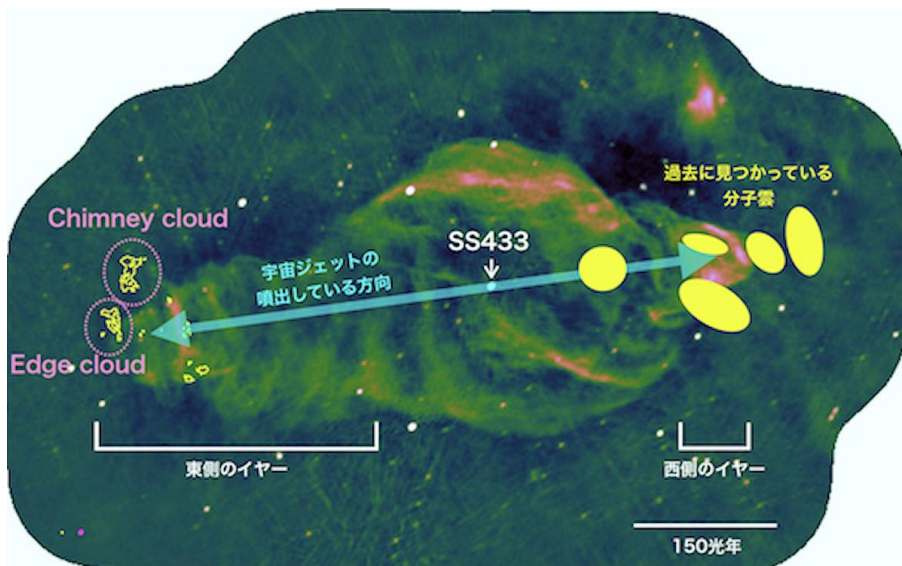
<https://news.mynavi.jp/techplus/article/20230522-2685082/>

国立天文台、X線連星が噴出する宇宙ジェットの先端に新たな分子雲を発見

掲載日 2023/05/22 17:59 著者：波留久泉

国立天文台(NAOJ)は5月18日、野辺山45m電波望遠鏡と、南米チリ・アタカマ砂漠のASTE望遠鏡(アタカマサブミリ波望遠鏡)を用いた観測により、わし座方向に位置する天の川銀河の中で最も活発なX線連星の1つ「SS433」から噴出する宇宙ジェットの先端に、2つの分子雲を新たに発見したことを発表した。

また、これらの分子雲の特徴的な構造から、宇宙ジェットと相互作用している可能性が高いことが確認されたのと同時に、それらの分子雲はそれぞれ1つの大きな塊ではなく、今回の観測での解像度では観測できない、より小さな分子雲の粒が集まってできている可能性が示唆されたことも併せて発表した。



X線連星SS433(画像中央)とその周辺を取り囲む電波星雲W50のイメージ。黄色の楕円で示される領域では過去に分子雲が発見されている。黄色のコントアで示されているのが本研究で発見された新たな分子雲。(c)鹿児島大学(出所:国立天文台Webサイト)

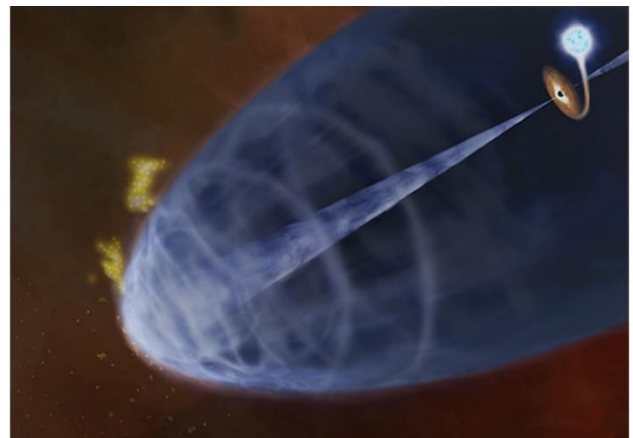
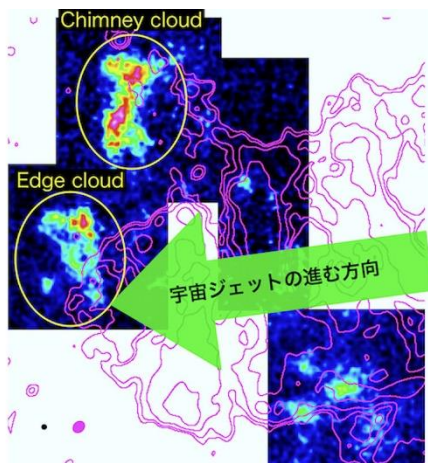
同成果は、鹿児島大学 理工学研究科 天の川銀河研究センターの酒見はる香研究員を中心とした、NAOJ、名古屋大学らの共同研究チームによるもの。詳細は、[日本天文学会が刊行する欧文学術誌「Publications of the Astronomical Society of Japan」に掲載された。](#)

ブラックホールや中性子星などの「コンパクト天体」と恒星による連星系は、X線で明るく輝くことからX線連星と呼ばれている。同連星では、強い重力により恒星表面のガスが剥ぎ取られ、コンパクト天体に降着することがある。ただし、すべてのガスがコンパクト天体に吸い込まれるわけではなく、その一部は宇宙ジェットとして、非常に細く絞られて外に向かって噴き出す。X線連星は、同ジェットによって物質やエネルギーを遠方に伝播させることで、銀河の組成や進化に影響を及ぼしているという。

X線連星は星が多く作られる銀河面周辺に多く存在するが、そのような場所には星の材料となるガスやダストなどの星間物質が漂っている。それらにX線連星からの宇宙ジェットが衝突した際、周辺の星間物質を圧縮して高

密度にし、星が誕生する分子雲ができやすい環境を作るという示唆が先行研究から得られている。その一方で、宇宙ジェットは星間物質を熱することで低温・高密度な分子雲が形成されるのを妨げるという説もあり、宇宙ジェットが分子雲の形成において果たす役割はまだ完全には解明されていなかった。

そこで研究チームは今回、宇宙ジェットと星間物質との相互作用を観測的に調査するため、光速の約 26% という高速度(秒速約 78 万 km)の宇宙ジェットを噴出している X 線連星の SS433 に着目したという。同連星は、巻貝のような形をしたガス状天体の電波星雲「W50」の内部に存在する。同星雲の東西に引き伸ばされた構造(イヤー)は、SS433 から噴出する宇宙ジェットの表面に対応する構造であると考えられている。これまでの観測により、特に SS433 より西側のイヤー周辺には多数の分子雲が確認されていた。今回の研究では、これまで分子雲の検出例の無かった東側イヤーに存在する新たな分子雲を発見すべく、野辺山 45m 電波望遠鏡とチリの ASTE 望遠鏡を用いた観測が行われた。その結果研究チームは、東側イヤーの先端領域に大きな分子雲の塊が 2 つ存在していることを発見し、それぞれ「chimney cloud」、「edge cloud」と命名した。また詳細な解析から、これらの分子雲はイヤーとの衝突によると思われる特徴的な構造を持っている可能性が高いことが指摘された。



W50 東側イヤーの先端に同定された分子雲から放射される電波強度の分布。マゼンタのコントアは東側イヤーの構造を示している。(c)鹿児島大学(出所:国立天文台 Web サイト)

宇宙ジェットで周辺に散らばっている小さな分子雲の粒を掃き集めているイメージ。(c)国立天文台(出所:国立天文台 Web サイト)

次に、両分子雲から放射される光が詳細に調べられた。すると、一般的に密度の高い分子雲から放射されるような光が含まれていることが判明。それにもかかわらず、分子雲からの複数の放射光に関する情報を組み合わせた解析に基づくと、この分子雲は典型的なものに比べて密度が低いという結果が得られたという。これらの矛盾する結果に対し、研究チームは、この分子雲が今回の観測の解像度では分解できないような、より小さな分子雲の粒が集まって塊のように見えているものとする説が提案された。

解像度よりも小さい分子雲からの放射に関する情報は、観測によって平均化されてしまうため、解析すると本当の分子雲の密度よりも過小評価されてしまうことが起こるといえる。つまり今回発見された分子雲も、画像に見られるような大きな塊ではなく、実際にはもっと小さな分子雲が集まっている可能性があるとした。先行研究では、宇宙ジェットは周辺に存在する低密度なガスを圧縮して高密度にすることで状態遷移を引き起こし、分子雲を作ることができると考えられてきた。しかし、そのプロセスで今回発見された分子雲を形成すると考えるのは現実的でないという。特殊な状況下以外では、分子雲が作られるまでに要する時間が、SS433 から噴出する宇宙ジェットの年齢よりも長くかかってしまうためだ。そこで新たな説として、周辺に元々存在していた即座に星になる程の質量は無い小さな分子雲の粒が、宇宙ジェットで掃き集められたとするものが考え出された。周囲に散らばっていた分子雲の粒を、宇宙ジェットでかき寄せて集めるイメージだ。このような状況を考えれば、今回発見された分子雲の特徴である、「より小さな分子雲の粒が集まっている」という解釈とも一致するとしている。

研究チームによると、もし SS433 からの宇宙ジェットで分子雲の粒を掃き集めて今回の 2 つの分子雲を形成し

ただのだとすると、宇宙ジェットは太陽質量の約 6000 倍のガスを運べるほどパワフルだという。このように、宇宙ジェットで直接星間物質を圧縮して分子雲を作り出す以外にも、まとまった質量を持つ分子雲を作り出す方法もあることが、今回の観測で提案された。

研究チームは今後、これらの分子雲をさらに詳細に観測することで、宇宙ジェットが分子雲の形成・進化に与える影響を解明できるものと考えているとする。また、SS433 以外の活発な X 線連星から噴出する宇宙ジェットとその周辺の星間物質の研究も、現在国内外で進められている。将来的には X 線連星が天の川銀河の形成・進化にどのくらい、どのように寄与しているのか全貌が明らかになることが期待されるとしている。

<https://sorae.info/astrometry/20230526-uranus-large-moons.html>

天王星の 4 つの衛星には内部に海が存在する可能性が判明 2023-05-26 [彩恵りり](#)

太陽系で 2 番目に遠い惑星「天王星」には、現在 27 個の衛星が発見されています。中でもサイズが大きな「ミランダ」「アリエル」「ウンブリエル」「チタニア」「オベロン」は、天王星の 5 大衛星として知られています。



【▲ 図 1: ジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡が撮影した天王星とその衛星。最も大きな 5 つの衛星であるミランダ、アリエル、ウンブリエル、チタニア、オベロンの他、6 番目に大きな衛星のバックも写っている (Credit: NASA, ESA, CSA, STScI / 日本語は筆者による加筆)】

これらの衛星は氷を主成分とすることから氷衛星と呼ばれており、条件次第では地下に液体の水が豊富な層、すなわち内部海が存在する可能性があります。特に大きいチタニアとオベロンについては、海水に不凍剤 (0°C を下回る温度でも水の凍結を防ぐ物質) の役割を果たすアンモニアが溶け込んでいれば、現在も内部海が維持されているのではないかとする予想もありました。特に、ごく最近の火山活動の痕跡と思われるデータが得られたアリエルは興味深い観測対象です。しかし近年になって、そのような海水は物質として不安定であり、少なくとも不凍剤の存在だけでは内部海を維持できないことも判明しています。

一方で、近年の惑星探査機の活躍により、これまでの予想よりもはるかに多くの天体が内部海を持つ可能性が浮かび上がってきました。活発にプルームを噴出させている土星の衛星のエンケラドゥスをはじめ、小惑星帯の準惑星ケレス、冥王星および衛星カロンがその一例です。これらはどれも近年に接近探査が行われた氷を主成分とする天体であり、天王星の 5 大衛星はこれらの天体とほぼ同じ大きさを持っています。

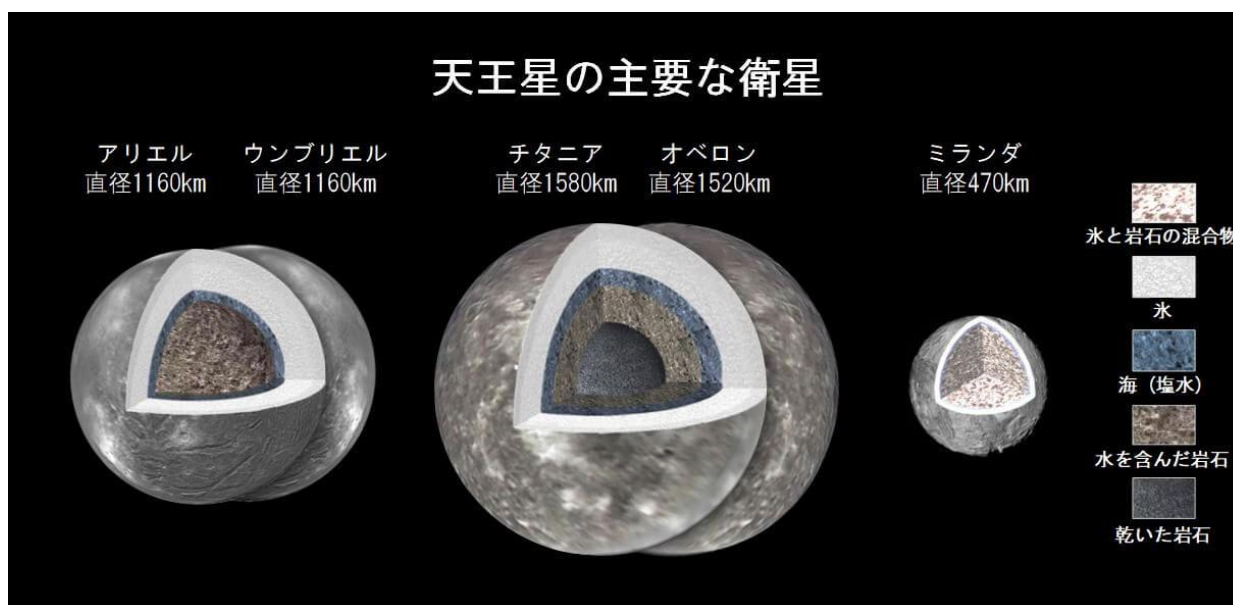
JPL (ジェット推進研究所) の Julie Castillo-Rogez 氏などの研究チームは、これまでに行われた氷を主成分とする天体の探査データを元に、天王星の 5 大衛星における内部海の有無について検討を行いました。検討されたデータには、表面化学、地質学、力学モデル、形状データが含まれています。

天王星の接近観測データは、1986年にフライバイ探査を行ったNASA（アメリカ航空宇宙局）の惑星探査機「ボイジャー2号」で取得されたものしかなく、5大衛星については表面の約40%分のデータしかありません。観測データは限られていますが、それでも他の天体のデータと照らし合わせることで、内部構造を推定したり、特に重要な天体内部の熱の動きを詳細に検討したりすることができます。

分析の結果、5大衛星の表面付近の岩石は多孔質であり、内部の熱を保持する断熱性が高いことが判明しました。また、衛星の誕生直後の数百年間は寿命の短い放射性物質の崩壊で熱が発生し、その余熱が内部の氷を融かす主要な熱源となることも判明しました。

一方で、他の氷天体で考慮される潮汐力（他の天体との重力を介した相互作用で本体が引き伸ばされる力）は、5大衛星ではほぼ存在しないことも明らかになりました。5大衛星に潮汐力がほとんど働かないことは過去の研究でも示されていましたが、今回の研究では潮汐力が生じたのは衛星が誕生した直後の軌道が不安定だった時期のみだったことがわかりました。

潮汐力が働く天体では摩擦熱が生じ、内部を温める潮汐加熱と呼ばれる現象が起きることがあります。しかし天王星の5大衛星では、潮汐力の影響が最も大きかったミランダやアリエルにおいてさえ、内部の加熱は放射性物質の崩壊熱よりずっと小さいことが判明しました。潮汐力が強すぎると表面の岩石の多孔質性が失われてしまい、余熱を保持する断熱性能が失われてしまう負の効果も判明しました。



【▲ 図2: 今回の研究で推定された5大衛星の内部構造。アリエルとウンブリエルには深さ25km以下、チタニアとオベロンには深さ50km以下の海が地下に存在することが推定された一方、ミランダは完全に凍結していると推定されている（Credit: NASA/JPL-Caltech / 訳は筆者による加筆）】

これらを考慮すると、アリエル、ウンブリエル、チタニア、オベロンはサイズが十分に大きいため、現在でも内部海が維持されている可能性があることが判明しました。一方、5大衛星の中で最も小さく、内部の熱が失われる速度が速いミランダの内部海は、誕生から10億年後までに凍り付いた可能性が高いと推定されます。

4つの衛星に内部海が存在する場合、アンモニアに加えて塩化物が不凍剤として機能することで、内部海平均水温は-5℃から-30℃であると推定されます。内部海の規模はチタニアとオベロンでは深さ50km以下、アリエルとウンブリエルでは深さ25km以下であると推定されます。その他の成果として、ミランダには明確な核が存在せず、アリエルとウンブリエルには水を含んだ岩石の核、チタニアとオベロンは外側に水を含んだ岩石・内側に乾いた岩石のできた核があること、どの天体にも金属が主体の核は存在しないことも推定されています。

ただし、本当に内部海が凍結せず現在まで残っているのかは不透明です。チタニアとオベロンにおける深さ50kmという内部海の規模は最大限の見積もりであるものの、氷天体の内部海としてはかなり小さな規模です。また今回のモデル計算では、液体の水で構成された海ではなく、液体の水が隙間を満たした岩石の形で存続している可

能性も指摘されています。内部海の有無や、存在する場合どのような状態なのかは、各衛星の磁場を測定することで分かるかもしれません。一方で、海水の中にアンモニアや塩化物が多い場合、海水による磁場はほとんど発生しなくなるため、観測による証明が困難となる可能性もあります。

NASA と NSF (アメリカ国立科学財団) は、10 年ごとに「惑星科学 10 カ年計画 (Planetary Science Decadal Survey)」と呼ばれる計画書を出版しており、その時点での惑星科学における謎や課題、それらを解決するために推奨される探査や観測計画を取り上げています。2023 年はちょうど 3 冊目の計画が開始される時期ですが、その中で最優先課題として取り上げられているのが天王星の周回探査計画です。計画にはもちろん 5 大衛星の観測も含まれているため、天王星の探査ミッションなどを通して、将来的には 5 大衛星の内部海の有無に関してもっと多くのことが分かるようになるかもしれません。

【訂正】一部表記を修正しました。準惑星ケレスを誤って準衛星と表記しておりました (2023 年 5 月 26 日 22 時 50 分)

Source

[Julie Castillo-Rogez, et.al.](#) “Compositions and Interior Structures of the Large Moons of Uranus and Implications for Future Spacecraft Observations”. (Journal of Geophysical Research: Planets)

[Gretchen McCartney, Karen Fox & Alana Johnson.](#) “New Study of Uranus’ Large Moons Shows 4 May Hold Water”. (NASA)

[G.M. Marion, et.al.](#) “Modeling ammonia–ammonium aqueous chemistries in the Solar System’s icy bodies”. (Icarus)

[Richard J. Cartwright, et.al.](#) “Evidence for Ammonia-bearing Species on the Uranian Satellite Ariel Supports Recent Geologic Activity”. (The Astrophysical Journal Letters)

文／彩恵りり