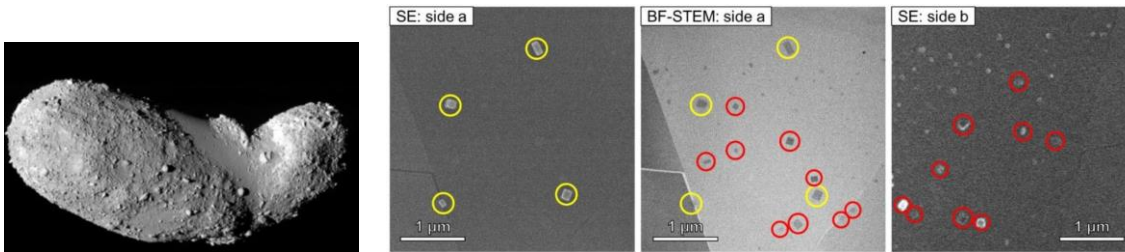


乾いた小惑星「イトカワ」から液体の水の間接的な証拠を発見 ありふれた小惑星

に水があった証拠

2023-06-20 [彩恵りり](#)

JAXA（宇宙航空研究開発機構）が2003年に打ち上げ、2010年に帰還した小惑星探査機「はやぶさ」は、小惑星「イトカワ」から採取したサンプルを地球へ運ぶことに成功したことで知られています。アリゾナ大学のShaofan Che氏とThomas J. Zega氏の研究チームは、イトカワの元となった天体（母天体）がかつて液体の水を含んでいたことを間接的に示す証拠を発見しました。



【▲ 図1: イトカワは一般的なタイプの小惑星であり、非常に乾燥していることで知られている。しかし今回の研究で、過去には豊富な水が含まれていることが明らかにされた（Credit: ISAS / JAXA）】

【▲ 図2: イトカワのサンプルから見つかった塩化ナトリウムの結晶（丸で囲まれた結晶）。大きさは1 μ m（0.001mm）よりもはるかに小さい（Credit: Che & Zega）】

イトカワは「S型小惑星」という非常に一般的なタイプの小惑星であり、地球に落下する隕石の67%はS型小惑星と同じタイプの岩石でできているとも言われています。

S型小惑星は、一言で表せば「カラカラに乾いた岩石」であり、長年の研究でも水の証拠は見つかっていません（※）。S型小惑星は太陽系誕生時に太陽から近い距離で作られた天体であり、水は太陽の熱や天体同士の衝突による熱で蒸発してしまったと考えられています。

※...ここでいう「水」とは、液体や固体の水（遊離水）に限らず、化学成分中の水、例えば鉱物に含まれる結晶水なども含まれます。

このため、地球などの惑星に水をもたらしたのはS型小惑星ではなく、もっと少数の珍しいタイプの小惑星だとする考えが主流でした。太陽系の外側の低温環境で作られたとされる「C型小惑星」はその有力候補であり、JAXAの小惑星探査機「はやぶさ2」の探査天体「リュウグウ」や、NASA（アメリカ航空宇宙局）の小惑星探査機「OSIRIS-REx」の探査天体「ベンヌ」が該当します。

しかし、今回のChe氏とZega氏の研究によって、乾燥したS型小惑星も過去に豊富な流体、すなわち液体の水が存在した可能性が高いことが示されました。その理由は、イトカワのサンプルに含まれていた「塩化ナトリウム（NaCl）」の結晶の存在です。いわゆる食卓塩と同じ組成である塩化ナトリウムの結晶は、液体が関与しないと生成されにくいことで知られています。塩化ナトリウムの結晶はこれまでもS型小惑星を起源とする隕石中から見つかっていましたが、地球の大気中の湿気や人間の汗など、実験室で隕石のサンプルを分析する際の汚染によって付着した可能性が排除できていませんでした。一方で、「はやぶさ」が持ち帰ったイトカワのサンプルは厳重に管理されており、地球の環境に晒されたことは一度もありません。サンプルは5年間保管されましたが、保管開始直後の写真と比較して塩化ナトリウムの存在する場所が変化していないことや、比較のために同様の環境に晒された地球の岩石に新たな塩化ナトリウムが付着していないことも、サンプルが汚染されていないことを示す証拠となります。結果的に、今回イトカワのサンプルから見つかった塩化ナトリウムの結晶は地球に届けられてから付着したのではなく、イトカワにもともと存在していたことが分かります。

また、塩化ナトリウムの分布はナトリウムが豊富なケイ酸塩鉱物の脈と一致することや、ケイ酸塩鉱物の化学組成は熱水による変質を受けたことを示していることも、今回明らかになりました。これらの証拠は、イトカワが過去に豊富な液体の水に触れていたことを示す有力な証拠です。Che 氏と Zega 氏は、イトカワの元となった天体には凍った水と塩化水素が含まれており、それらの化学変化と最終的な水の蒸発が塩化ナトリウムの結晶を作ったという仮説を立てています。このシナリオが正しい場合、イトカワのような S 型小惑星は過去のある時点で大量の水を含んでいたことになり、惑星形成時の水の供給にも影響した可能性があります。今回の研究だけでは、S 型小惑星が過去に含んでいたかもしれない水の量を推定することは難しいため、惑星の水供給のシナリオを書き換えることには繋がりません。しかし、太陽系でありふれたタイプの天体が過去には乾燥していなかったことを示す今回の成果は、惑星形成論に影響を与える可能性もあります。

Source [Shaofan Che & Thomas J. Zega](#). "Hydrothermal fluid activity on asteroid Itokawa". (Nature)

[Daniel Stolte](#). "Pass the salt: This space rock holds clues as to how Earth got its water". (University of Arizona)

文／彩恵りり

<https://uchubiz.com/article/fea20488/>

そもそも宇宙建築って何？-月面に「快適な住宅」をつくる構想を解説

2023.06.20 08:30

宇宙ビッグデータを活用した無料 GIS プラットフォーム「天地人コンパス」を手掛ける天地人。本企画では、同社でインターンとして働く学生が、「学生視点」で宇宙ビジネスの注目点を解説していきます。第 2 回となる本記事では、大学院で建築環境について研究する龍崎輝が「宇宙建築」に焦点を当てます。

そもそも宇宙建築とは

宇宙建築と聞くと、多くの方は SF 映画に出てくる宇宙基地などを想像するのではないのでしょうか。しかし、宇宙建築の実現はそう遠い未来の話ではなく、現実味を帯びつつあります。既に世界各地で研究や開発が行われています。そもそも、宇宙建築とは、地球圏外に建設される人間が暮らすための構造物のことです。大きく 3 種類の構想が進んでおり、1 つ目は国際宇宙ステーション (ISS) のような宇宙空間に浮かぶ構造物、2 つ目は月面の建築、3 つ目は火星の建築です。本記事では、特に研究が進んでいる月を設計対象地とした計画について紹介します。

「月面住宅」を 3D プリンターで建設する米 ICON の構想

「Project Olympus」は、3D プリンティング技術を用いて月面住宅を建設する計画です。大型の 3D プリンターと電源の太陽光パネルのみで、建物を施工できます。

Project Olympus は、米国のベンチャー企業 ICON が主導し、NASA から資金援助を受けています。ICON は 2017 年の創業で、3D プリンターを用いた建設技術を開発しています。2018 年には米国初の 3D プリンター技術による住宅建築の許可を取得し、実際に住宅の建設に成功した実績もあります。



出典：[ICON](#)



出典：[SAGA Space Architects](#)

このプロジェクトでは、構造物として月の表面を覆う砂（レゴリス）が採用されています。ICON は、レゴリスにほとんど何も加えず、マイクロ波やレーザー、赤外光などを使ってレゴリスの状態を変化させ、3D プリン

ティングの材料にする方法を研究しています。しかしなぜ、地球上に存在せず検討することが難しい月のレゴリスを、材料として使おうとしているのでしょうか。それは、宇宙建築の材料は現地調達することが望ましいからです。材料を調達する方法は「地球から持っていく」「現地で調達する」の2択ですが、地球から持っていく場合はロケットを何度も打ち上げる必要があります。そのため、現地調達できる材料で設計する必要があります。また、地球の一般的な建物の設計では、初めに用途やコンセプトから大枠を設計することが主流です。そのため、初めから詳細に材料を決定するという設計プロセスの違いは、地球上の建築と宇宙建築の大きな違いかもしれません。宇宙建築の材料は、宇宙で構造物として成立可能で、さらに激しい温度差や有害な放射線などから人間を守る能力が求められます。Project Olympus では、月面における熱や放射線、隕石から人間を守る堅牢な建築にするため、構造材としてレゴリスが採用されました。さらに、材料選定時には、組み立て方法（人間 / 機械）などの、施工性も考慮する必要があります。地球上で一般的な構法

（木造、鉄骨造、鉄筋コンクリート造など）を利用できれば、多くの技術的知見を生かせそうですが、そう簡単にはいかないようです。そこで、前述の3Dプリンティング技術が採用されたようです。一方、宇宙で実現可能な構法を、地球にも適用することは可能であると考えられます。今後3Dプリンティング技術以外にも宇宙建築において新しい構法が考案され、地球上の建築もより面白くなっていくかもしれません。

月面などにおける宇宙建築の実現が早まることだけでなく、建築全体の技術的・意匠的なレベルが上がることも、建築業界が積極的に宇宙分野へ参入することの重要な意義であると感じます。

ROSENBERG SPACE HABITAT：快適な居住環境を追求

上記とは別に、自然科学だけでなく心理学などの視点から多角的に住環境を検討し、人間が快適に居住できる月面住宅「ROSENBERG SPACE HABITAT」の構想もあります。デンマークのSAGA Space Architects（SAGA）が開発した同住宅は、高さ約7m、2.5階建ての月面住居のプロトタイプとして設計され、SpaceX社の宇宙船Starshipの中に納まるサイズとなっています。この建築は、閉鎖的で単調な月面空間における快適性に着目して設計されています。ISSは、人間が生活できる最低限の環境は保持されていますが、快適とは言えない環境です。そもそも、限られた資源の宇宙空間で人間が生活できるようにするだけでも高度な技術が必要であり、居住空間の快適性まで検討して設計されていませんでした。しかし近年、宇宙で人間が滞在できる環境に対する考え方は、「最低限生活可能な環境」から「快適に感じる環境」の実現にシフトしています。SAGAは、長期間の生活が前提となる月面の建築においては、心身の健康を損ねない快適な環境が必要であると考え、同住宅を設計しました。無機質な閉鎖的空間で孤立状態になることは心に大きなストレスを与えることから、ROSENBERG SPACE HABITATは2名の居住想定で、内部空間は居住者が適度な刺激を得られ、体内時計を維持できるように工夫されています。最上階の2.5階は、柔らかいテキスタイルで壁面と天井が覆われた就寝キャビンです。その下の2階はリビングスペースで、建築内の全機能を制御できるダッシュボードや折りたたみ式テーブル、ワークスペース、収納などが備え付けられています。1階にはエアロック式の部屋があり、中にトイレやシャワーがあります。階の移動は、備え付けられたはしごを使って行います。また、この建築では、月面で狂ってしまうと考えられる体内時計を調整する設計を取り入れています。人間の体内時計はおよそ25時間ですが、地球上では太陽光を浴びると24時間にリセットされます。しかし、月と地球では、昼夜の周期が大きく異なります。月の1日（太陽が昇って沈み、次にまた昇るまでの時間）は地球上で約27日です。月では、地球の2週間のあいだ昼間が続く、その後2週間夜が続きます。これが、月で体内時計が狂ってしまう要因です。

月で体内時計を維持するために、ROSENBERGには、地球上と同じ周期で自然光を再現したサーカディアン照明が導入されました。サーカディアン照明の有効性について、SAGAは2020年にROSENBERGのもととなったLUNARKという建築実験で確認したと述べています。LUNARKの実験では、-30℃にもなるグリーンランド北部を月に似た過酷環境として実験場所に選定し、実際にLUNARKを設置して2名の設計者が60日間滞在し

ました。建築内に設置されたサーカディアン照明で夜明け、日の出、昼光、夕焼けなど様々な自然光のパターンを再現した結果、正常な睡眠ホルモンの分泌が確認され、自然な睡眠サイクルの確保に成功しました。



出典：[SAGA Space Architects](#)

出典：[SAGA Space Architects](#)

このように、宇宙建築の設計では、地球での当たり前を適用することができず、人間が健康に生きるために必要なことについて考える必要があります。特に照明や空調などの建築設備に着目すると、改めて「人間にとって快適な環境とは何か」を考えさせられます。宇宙の視点で人間の快適性を見つめ直すことにより、宇宙のみならず、地球上の建築環境も向上させることに繋がるでしょう。また、私は大学院で、テラスやピロティなどの半屋外空間における温熱環境について研究しています。オフィスなどの閉め切った室内空間は、空調を一定に制御し、温度や湿度、気流などがほとんど均一な空間と考えることができます。一方で半屋外空間は、半分屋外であるため温度や気流などの温熱環境が常に変動します。このような環境では、室内空間と比較すると人間の温熱環境に対する期待が小さいため、やや暑かったり寒かったりしても許容されやすいという特徴があります。

宇宙空間は、さらにこの特徴が顕著で、人間の環境に対する期待は地球上よりも小さいと考えられます。そのため宇宙建築には、「人間の快適さ」についての研究が進んでいる地球上の建築設備に関する知見を、十分適用させる余地があると思います。

<https://news.yahoo.co.jp/byline/ishidamasahiko/20230623-00354915>

宇宙飛行士の「脳」は宇宙でどうなるのか



石田雅彦ライター、編集者 6/23(金) 11:33



(写真:イメージマート)

民間の参入などにより宇宙旅行が現実になってきている。宇宙へ行くと我々の身体にはどのような影響があるのだろうか。宇宙に長期滞在した宇宙飛行士の脳に異常が出るのが問題になっているが、最近、宇宙へ行く回数と脳への影響について新しい研究が報告された。

宇宙で我々の身体はどうなるか

よく無重力状態というが、これは重さの感覚がないという意味で、微小重力といわれるように、例えば地球を周回する宇宙船や人工衛星の中で地球上で感じる重力が全くなくなることはないのだという。地球を周回する宇宙船や人工衛星は自由落下状態を続けているだけで、地球の中心へ向かう重力の影響を常に受けているからだ。

ただ、宇宙のどこかには、あまたある恒星や惑星からの重力の影響が釣り合った完全な無重力状態の地点はある。では、こうした無重力状態（微小重力状態）は、宇宙飛行士にどのような影響を及ぼすのだろうか。

当然だが、我々の身体は地球の重力に適応している。血圧を含めた血液やリンパ液などの体液の循環、嚥下や消化管、排泄、呼吸などだが、頭蓋骨の中に納められた脳についても重力の影響を受ける。

宇宙飛行士は、体液の循環がうまくいかず、顔がむくんだり、耳の異常を訴えたりするが、眼球の形状異常など目にも悪影響が出るのが知られ（Space Flight-associated Neuro-ocular Syndrome、※1）、また、長期滞在

した宇宙飛行士は地球へ帰還後も脳が正常位置に戻らないなどの症状が出たり、脳が格納される脳室の容積が増えたりすることがわかってきた（※2）。

宇宙飛行のインターバルが影響か

最近、米国の研究グループが、宇宙に滞在する期間が長くなり、一度、地球へ帰還しても再度、宇宙へ戻る間の期間が短くなると宇宙飛行士の脳室の容積が増え、元に戻りにくくなるという研究結果を報告した（※3）。

前述したように、宇宙での長期滞在で脳室の容積が増えることはわかっていたが、滞在期間や宇宙飛行の回数などとの関係はまだよくわかっていなかった。同研究グループは、宇宙での総滞在期間（約2週間から1年）、以前の宇宙飛行の経験（過去0回から3回）、前回の宇宙飛行からの経過時間（約1年から9年）という区分で30人の宇宙飛行士の脳をMRI検査して比べたという。また、30人の宇宙での滞在期間の内訳は、2週間（8人）、6カ月（18人）、6カ月超（4人）だった。その結果、この研究グループによれば、宇宙での滞在が長期化（最長6カ月）すると脳室の容量が増え続け、地球上での回復期間が3年未満の場合、脳室の容量が十分に回復しなくなる危険性があるという。こうした変化は宇宙滞在の最初の6カ月間で起き、1年以上滞在経験のある宇宙飛行士の数が少なくサンプル数が足りないこともあって6カ月以上の滞在では宇宙飛行士によって個人差があった。こうした脳室の容積変化は、地球に帰還後、次第に元に戻るが、同研究グループは元に戻る回復期間が3年未満の宇宙飛行士、つまり元に戻るのが早かった宇宙飛行士は次の宇宙飛行後にも脳室の容積増大はみられなかったという。一方、回復期間が3年以上かかった宇宙飛行士は、次の宇宙飛行の後に再び脳室の容積増大がみられた。これにより同研究グループは、前回から次の宇宙飛行まで3年未満という期間が脳室が元に戻るようになるには不十分であるかもしれない、短いインターバルで宇宙飛行を繰り返すと脳室が拡張したままになる危険性があると述べている。各国の宇宙飛行士の活動では、宇宙滞在回数では米国、ロシア、日本の順に多く、宇宙滞在日数ではロシア、米国、日本の順になっている。また、日本人宇宙飛行士では、宇宙滞在回数で若田光一氏が5回、野口聡一氏と星出彰彦氏が3回などとなっている（JAXA資料より、2023年3月現在）。商用宇宙開発が熱を帯び、これまでより頻繁に有人宇宙飛行が実施されるようになってきている。また、宇宙での滞在期間も長期化し、有人での月面滞在、有人火星探査などの計画もある。今後に向け、宇宙飛行士らの健康管理は重要な課題だ。

※1 : Andrew G. Lee, et al., "Spaceflight associated neuro-ocular syndrome (SANS) and the neuro-ophthalmologic effects of microgravity: a review and an update" microgravity, 6, Article number: 7, February, 2020

※2-1 : Angelique Van Ombergen, et al., "Brain ventricular volume changes induced by long-duration spaceflight" PNAS, Vol.116(21), 10531-10536, 6, May, 2019

※2-2 : Larry A. Kramer, et al., "Intracranial Effects of Microgravity: A Prospective Longitudinal MRI Study" Radiology, Vol.295, No.3, 14, April, 2020

※3 : Heather R. McGregor, et al., "Impacts of spaceflight experience on human brain structure" scientific reports, 13, Article number: 7878, 8, June, 2023

[記事に関する報告](#)



石田雅彦 ライター、編集者

いしだまさひこ：北海道出身。法政大学経済学部卒業、横浜市立大学大学院医学研究科修士課程修了、医科学修士。近代映画社から独立後、醍醐味エンタープライズ（出版企画制作）設立。紙媒体の商業誌編集長などを経験。日本医学ジャーナリスト協会会員。水中遺物探索学会主宰。サイエンス系の単著に『恐竜大接近』（監修：小島郁生）『遺伝子・ゲノム最前線』（監修：和田昭允）『ロボット・テクノロジーよ、日本を救え』など、人文系単著に『季節の実用語』『沈船「お宝」伝説』『おんな城主 井伊直虎』など、出版プロデュースに『料理の鉄人』『お化け屋敷で科学する！』『新型タバコの本当のリスク』（著者：田淵貴大）などがある。

精度 100m の月面着陸を目指せ！ JAXA の月探査機「SLIM」の技術にシビれた！

掲載日 2023/06/19 17:23 著者：鳥嶋真也

目次 [1 これからの月探査に“ピンポイント着陸技術”が必要な理由とは？](#)

[これからの月探査に必要なピンポイント着陸技術 SLIM が目指す月への高精度着陸技術の実証](#)

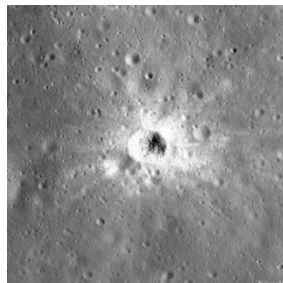
[軽量な月惑星探査機システムを実現し、月惑星探査の高頻度化に貢献](#)

[2 傾いた太陽電池、あえて転ぶ着陸、月の起源の解明 — まだある SLIM の魅力](#)

アポロ計画に代表されるように、これまで人類は、月にさまざまな探査機を送り込んできた。そしていま、有人月探査計画「アルテミス」をはじめ、月探査がふたたび活発になろうとしている。

こうした中、月の科学者は嬉しくも悩ましい課題に直面している。これまでの探査で、月面の詳細な地図ができ、「どこを調べれば科学的におもしろいのか」が詳しくわかるようになった一方で、その場所を狙って正確に着陸する術がなかったのである。この課題を解決するため、宇宙航空研究開発機構(JAXA)は小型月着陸実証機「SLIM(スリム)」を開発した。SLIM が目指すのは、精度 100m という、従来とは桁違いの高い精度での着陸技術の実証である。さらに将来の月・惑星探査を見据え、着陸に必要な装置の軽量化も実現した。

打ち上げは 2023 年 8 月以降の予定で、それに先立つ 6 月 4 日、その機体が種子島宇宙センターで報道公開された。名前のおおくりスリムな機体に秘められた、数々の最先端技術と未来の可能性をみていこう。



6 月 4 日、種子島宇宙センターで公開された小型月着陸実証機「SLIM」

NASA の月探査機「LRO」が撮影した、SLIM が着陸する予定の場所の近くにある「SHIOLI」クレーター。この画像のように、現在月面は数十 cm というきわめて高い分解能で撮影し尽くされており、科学者たちは「あのクレーターの隣にある、あの岩石を調べたい」といった粒度で議論するようになっている (C) NASA/GSFC/ASU

これからの月探査に必要なピンポイント着陸技術

人類はこれまで、半世紀前のアポロ計画に代表されるように、月面へさまざまな探査機や宇宙船を送り込んできた。その着陸精度は数 km~十数 km というもので、これはたとえるなら、東京駅丸の内駅前広場に着陸するつもりが、下北沢駅に降り立ってしまうようなものである。もちろん、月面に無事に降り立つということだけでも、まだ技術的なハードルは高い。また、アポロ計画で宇宙飛行士が降り立ったような、「海」と呼ばれる広大で平坦な領域に着陸するのであれば、それくらいの精度でも問題はなかった。しかし、SLIM のプロジェクト・マネージャーを務める JAXA 宇宙科学研究所(ISAS)の坂井真一郎氏は、「今後の月探査を見据えたとき、私たちはいま精度のままではいけないと考えています」と語る。そこで SLIM では、“精度 100m”という、ピンポイント着陸技術の実証を目指している。その背景には、大きく 2 つの理由がある。

ひとつは、月面の詳細な地図が手に入ったことである。近年、米国航空宇宙局(NASA)の月探査機「ルナー・リコネサンス・オービター(NRO)」や、JAXA の月周回衛星「かぐや」などによって、高分解能な月面観測データが大量にもたらされた。その結果、現在の月探査ミッションは、「あのクレーターの隣にある、あの岩石を調べたい」というほどの細かさで議論されるようになっている。そんな科学者の願いを実現するためには、そうした岩石のすぐ近くに着陸できる技術が必要になる。また、科学的に興味深い場所というのは、クレーターの縁のよ

うに傾斜があったり、大小様々な岩石が転がっていたり、凹凸の厳しい地形であったりと、複雑な地形の中にあることが多い。そのため、その中のわずかな隙間を狙って着陸することも求められる。

もうひとつの理由が、アルテミス計画に代表されように、月探査がふたたび活発になろうとしていることである。とくにアルテミス計画では、月の極域にあると考えられている水(氷)を採り出して、資源として利用しようということが考えられている。しかし、その月の水は、つねに日光がまったく当たらない「永久影」、「永久凍土」にあると考えられており、その中で探査を持続的に行うことは難しい。ただ、その近くには、逆につねに日光が当たり続けている「永久日照」の領域があるため、まずは永久日照の領域に降り、電力や熱を確保しつつ、永久影の中へアタックしていくというような運用が求められる。こうした、永久影にほど近い永久日照の領域という、非常に限られた狭い領域に着陸するためにも、ピンポイント着陸技術が求められているのである。

SLIM が目指す月への高精度着陸技術の実証

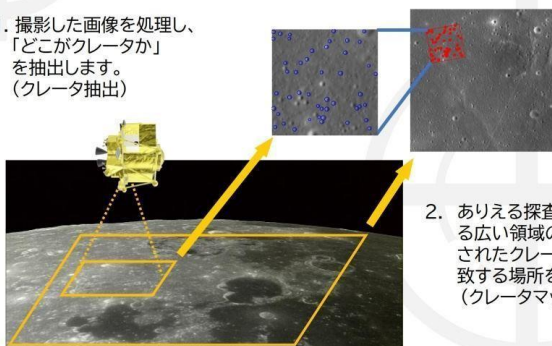
精度 100m という高精度の着陸を目指すため、SLIM は「画像照合航法」と「自律的な航法誘導制御」という、大きく 2 つの新しい技術を使う。画像照合航法というのは、カメラで自分の眼下に広がる月面を撮影した画像を使い、自身の位置を推定して航行する技術のことで、まず探査機が搭載している航法カメラが撮影した画像を処理して、「どこがクレーターか」を抽出する。そして、ありえる探査機位置を包含する広い領域の地図から、抽出されたクレーターのパターンと一致する場所を特定する。これを繰り返すことで、自分の位置を測定し、そして修正することで、ピンポイントな着陸を実現する。この技術の実現にあたっては、処理時間が重要になる。現状の宇宙用 CPU は、地上用と比べて 100 分の 1 程度の能力しかない。そこで、宇宙用 FPGA 上でも数秒の処理時間で済む画像処理アルゴリズムが開発された。これは長年、ISAS と大学とが共同で研究したことで実現のめどが立ったという。さらに、地球と月との間には約 2.5 秒のタイムラグがあるため、照合や特定の作業を、地球の管制室でやっていたのでは間に合わない。そのため、自律的な航法誘導制御によって、月面上の目標地点に接近し、さらに着陸地点上空では画像ベースの障害物検出・回避を自律的に行うなど、SLIM 自身のコンピューターが自律的に判断して行うようになっている。坂井氏は「これほどの高精度の月面着陸は、計画が予定どおりいけば、SLIM が世界初になると思います。ただ、米国の民間企業などでは、将来的に高精度の着陸をやると公表しているところもあり、今後、ピンポイント着陸という技術は、競争的な領域になると考えています」と語る。



▶ 画像照合航法

SLIM は「画像照合航法」により自己位置を測定し、修正することでピンポイントな着陸を実現します。

1. 撮影した画像を処理し、「どこがクレーターか」を抽出します。(クレータ抽出)



2. ありえる探査機位置を包含する広い領域の地図から、抽出されたクレータパターンと一致する場所を特定します。(クレータマッチング)

15

(C) JAXA

画像照合航法の概要 (C) JAXA

軽量な月惑星探査機システムを実現し、月惑星探査の高頻度化に貢献

SLIM はまた、小型・軽量の、まさにその名前のおり“スリム”な探査機システムの実証も、目的のひとつとなっている。将来の月・惑星探査においては、いま以上に観測装置の高度化が求められる。ただ、高度な装置、た

たとえば天体の地表を事細かに観測したり、天体から岩石を回収して地球に持ち帰ったりできる装置は、どうしても大きく、そして重くなってしまう。そうした装置を積むためには、探査機の機体(筐体)やエンジン、太陽電池、コンピューターなどを軽量化し、その浮いた分を観測装置に充てることが必要となる。

また、岩などが転がっている複雑で狭い場所に降りようとするなら、小さな機体のほうが有利でもある。

そこで、SLIM を通じて、探査機システムの小型・軽量化技術を実証し、将来の太陽系探査の要求に応えようというのである。その工夫が最もよくわかるのは、SLIM の外見だろう。多くの衛星や探査機は、箱のような構体の中に、推進剤のタンクが入っている。しかし SLIM は、軽量化のために、タンクそのものが探査機の主構造も兼ねており、いわばタンクの外側に直接いろんな装置がくっついているような姿かたちをしている。そのタンク自身も、燃料と酸化剤を隔壁で区切るだけの一体型タンクとなっており、軽量化も図られている。

また、SLIM の下部には、軌道制御や月面着陸時の速度制御に使用する、500N 級スラスターが 2 基装着されている。このスラスターには、金星探査機「あかつき」に採用された技術をルーツにもつ、セラミック燃焼器を使用しているほか、世界的にも例のない幅広い推力範囲とパルス作動を実現し、その高い性能から推進系全体の質量低減にも寄与している。このほか、航法カメラやレーザー距離(高度)計、太陽電池、通信に使う S バンドのトランスポンダー、SUS を外装に用いた SUS ラミネート電池、電力制御分配器など、ありとあらゆる部分で最先端技術による小型・軽量化と、さらに国産化が図られている。

これにより、SLIM の寸法は高さ約 2.4m、縦約 1.7m、横約 2.7m で、打ち上げ時の質量は約 700kg、推進薬が空になったときの質量は 200kg と、小型の自動車くらいの規模しかない。

坂井氏によると「これまでの月着陸機と比べ、SLIM はかなり小型・軽量に仕上がっています。過去にこれほど小さな探査機が月に降り立った例はないでしょう」と語る。



▶ 軽量な探査機を実現する搭載機器

RCS
推進系



22N スラスター(THR)

二液式20N級の小推力スラスターです。12基から構成され、噴射するスラスターの組み合わせと様々な噴射パターンが生み出す並進力・回転力により、姿勢制御、軌道変換、ピンポイント着陸を支えます。

株式会社Hリエアスペース



メインエンジン(OME)

軌道制御や月面着陸時の速度制御に使用する二液式500N級スラスターです。国産技術であるセラミック燃焼器を使用し、世界的にも例のない「幅広い推力範囲とパルス作動」を実現しています。高い性能から推進系全体の質量低減にも寄与しています。

三菱重工株式会社
京セラ株式会社



タンク

OME・THRで使用する燃料・酸化剤を貯蔵するタンクです。内部に金属製共通隔壁型を具備しており、燃料・酸化剤タンクを一体化しています。SLIMの主構体の役割も担っており、SLIMの構造質量低減に大きく寄与しております。また、酸化剤側には新規に開発した軽量なPTFEによるダイアフラムが使用されています。

三菱重工株式会社
中興化成工業株式会社



SLIM はその名のとおり、小型・軽量の、まさに“スリム”な姿かたちをしている

[次へ：傾いた太陽電池、あえて転ぶ...](#) 傾いた太陽電池、転ばぬようにあえて転ぶ.....

このほかにも、SLIM はさまざまなユニークな技術や仕組みが詰め込まれている。

太陽電池の角度

まず、すぐにわかるのが、SLIM を正面から見たときに、機体の水平面に対して太陽電池が斜めに傾けて装着されていることだろう。これにより非対称な、やや奇妙な見た目になっている。

この理由は、太陽電池の発電量をできるかぎり最大化するためである。SLIMは機体を北の方角に向けつつ、月の朝方の時間帯に降りる。つまり、着陸時の衛星の姿勢、向き、そして月から見た太陽の位置があらかじめ決まっているため、それに合わせて最適化された結果なのである。

なお、SLIMの運用可能な時間は、最大で月の日没まで、つまり最大で2週間程度と見積もられている。



▶ 軽量な探査機を実現する搭載機器

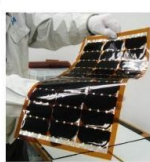
EPS
電源系



SUSラミネート電池(LICM)

小型軽量化のために、一般的なラミネート電池に使われるアルミではなく、SUSを外装に用いたSUSラミネート電池セルです。セル2式をCFRPの板で拘束し、打ち上げ時の振動・衝撃や真空中での充放電に耐えられるようにしています。

古河電池株式会社
株式会社テクノソルバ
株式会社三協製作所



薄膜太陽電池

小型軽量化のために、軽量・高効率な薄膜3接合太陽電池シートを搭載しています。フレキシブル性を生かして、一部曲面にも搭載しています。また、工程簡略化のため、ベルクロによる取り付けを採用しました。

シャープ株式会社



電力制御分配器(IPCU)

従来は個別のコンポで担っていた、バッテリー充放電機能、太陽電池発生電力のレギュレーション、電力分配機能の他、スラストバルブ駆動制御機能、ヒータ制御機能を集約した新規開発品の電力制御器です。これらをデジタル制御で行うことにより従来のアナログ制御機器に比べて大幅な高機能化・軽量化を実現しています。

三菱電機株式会社
三菱電機特機システム株式会社

11 (C) JAXA

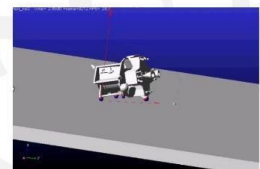
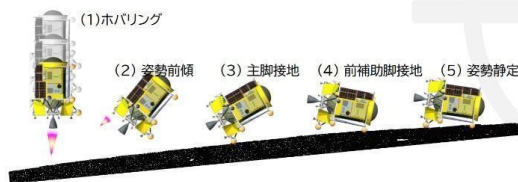
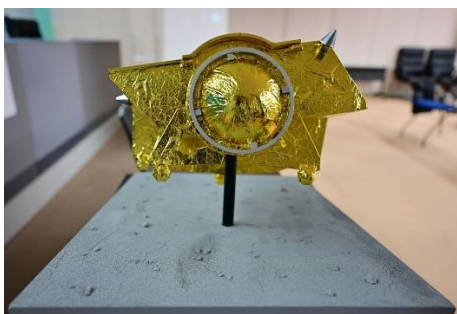
小型・軽量な探査機システムを実現する技術の一例 (C) JAXA



▶ 傾斜地に適した「二段階着陸」方式

着陸目標地点は前述の通りクレータ近傍に位置し、そのため付近一帯は斜度15[deg]程度の傾斜地となっています。従って、SLIMのような小型軽量の機体で、このような傾斜地に安全に着陸することが重要です。

科学・探査目的の高度化に伴い、今後はこのような地形への着陸が一般に求められるようになると考えています。着陸シミュレーション等による検討を重ねた結果、SLIM規模の機体の場合、始めに主脚で一度接地してから、機体を前方に回転させて静定する「2段階着陸方式」が耐転倒性に優れることが明らかになっています。



SLIM着陸シミュレーション

19 (C) JAXA

SLIM(模型)を正面から見たところ。機体の水平面に対して、太陽電池が斜めに傾けて装着されている
転ばぬようにあえて転ぶ、「二段階着陸」

SLIMは傾斜地に安全に降りるため、「二段階着陸」という一風変わった方法で着陸する (C) JAXA

そして、最もユニークな点が着陸方法である。これまで打ち上げられた月着陸機の多くは、4本の脚を持ち、垂直に降りてきて、その脚で踏みしめるように月面に降り立ってきた。

しかし、SLIMが着陸を予定している、「神酒の海」付近の「SHIOLI」クレータ近隣の地域は、約15度の傾斜がある。そのため、従来の着陸方法では機体が倒れるなどの危険性がある。また、科学・探査目的の高度化にともない、今後はこのような難しい地形への着陸が当たり前のように求められるとも考えられており、まったく異なる着陸方法が必要となった。そして開発されたのが、「二段階着陸」という一風変わった方式である。機体

を垂直に降下してきた SLIM は、まず機体の後部にある主脚で一度接地したあと、機体を前方に倒して、他の脚を接地させて着陸する。転ばぬためにわざと転ぶという、まさに逆転の発想である。

これは、SLIM のような小型・軽量の機体だからこそ可能な方法であり、また実験やシミュレーションなどによる検討を重ねた結果、安全かつ効率がいい方法だということもわかったという。

ぼんぼりのような着陸脚

着陸脚もユニークなもので、アポロの月着陸船などは、脚のダンパーで着陸時の衝撃を吸収していたが、SLIM では脚からして、アルミニウム製の網目状のぼんぼりのような塊がついているだけという、やはり変わった形をしている。着陸時にはこれがつぶれることで衝撃を吸収できるようになっており、シンプルかつ軽量、安全な仕組みになっている。また、この脚は全部で5つあり、機体後部に主脚として1つ、前部に2つ、そしてその間に2つ装着されているが、この間にある2つは、他の3つよりもやや奥まった位置に装着されている。その理由は、たとえば岩に乗り上げるようにして着陸してしまった場合でも、かならず安定して静止できるように意図したものだという。SLIM プロジェクトの主任研究者を務める、ISAS の澤井秀次郎氏によると、「もし着陸地点がでこぼこした地形だった場合、3つの脚だけではどこかが浮いてしまうなどして安定できないかもしれません。そこで5つの脚をつけたのですが、そのすべて同じ平面上に装着すると、でこぼこがあったときに、やはりうまく安定できません。そこで、間の2つの脚は、わざと引っ込めた位置に装着することで、どんな地形だったとしても、かならずどこか3点でしっかり接地できるようにしているのです」と語る。



SLIM の着陸脚は、アルミニウム製の網目状のぼんぼりのような塊になっており、着陸時にはこれがつぶれることで衝撃を吸収するという、シンプルかつ軽量の仕組みが採用されている (C) JAXA

SLIM を裏側から見たところ。透明の四角いカバーが取り付けられている部分に着陸脚がある

着陸後は月の起源の解明にも

さらに、SLIM は工学実証だけでなく、科学探査の使命も背負っている。

もちろん、ピンポイント着陸がミッションのいちばん大きな目的だが、せっかくの機会を生かし、科学観測が計画されている。それも、月の起源と進化を解明するというきわめて野心的な目標である。

これまで「かぐや」などの観測で、月のマントルに由来すると考えられる岩石(カンラン石)が、どこにあるかがおおよそわかっている。SLIM はまさにその岩石がある場所に降りることから、分光カメラを使って成分の分析を行う。月の起源をめぐっては、地球からちぎれて飛び散った岩石からできたという説や、巨大な天体が地球に衝突し、それによって発生した破片からできたという説、まったく別のところで生まれ、のちに地球の重力によって捕らえられたという説などがある。SLIM の観測によって、月のマントルの成分と、地球の成分とを比較することができることから、そうした仮説の検証ができる。また、天体の初期の進化過程についてもわかっていないことが多く、その理解につながる重要な知見が得られる可能性もあるという。

小型プローブ「LEV-1」、「LEV-2 (SORA-Q)」

くわえて、SLIM には「LEV-1 (Lunar Excursion Vehicle-1)」と「LEV-2 (SORA-Q)」という2機の小型プローブ(探査車)も搭載しており、着陸の直前に分離し、月面に降ろされる。

LEV-1 は月面を跳躍しながら自由自在に移動探査できるプローブで、質量は 2.1kg。SLIM より先に着陸したあと、SLIM が着陸する様子や、着陸後の状態などを、カメラや加速度センサーなどで記録し、地球との地球直接

通信により送信することができる。また、飛び跳ねるようにして月面を移動できる装置も搭載し、実際に移動できるかどうかの技術実証も行う。活動可能な時間は40分以上が予定されている。

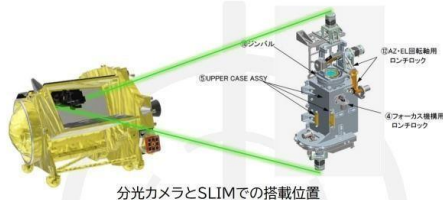
一方のLEV-2(SORA-Q)は質量約250gで、打ち上げ時は球形をしているものの、2つに割れるようにして変形し、球の半分ずつがそれぞれ車輪となって、月面を二輪走行することができる。また、カメラも搭載しており、SLIM本体や周辺の画像を撮影し、さらにその画像の中から良質なものを自律的に選択肢、LEV-1を中継して地球へ送信することができる。活動期間は約2時間が予定されている。



▶ 月面活動ミッション概要

着陸成功後は、月起源解明を狙い「分光カメラ」により、月マントル由来と考えられる岩石の組成分析を行う予定です。

そのためには、狙ったクレータ近傍への着陸が必要であり、ピンポイント着陸により初めて可能となる観測になります。この観測が成功基準のエクストラアクセスの1つとなっています。



分光カメラとSLIMでの搭載位置

また、以下のような特徴を有する小型プローブを搭載しています

- ・ 着陸後のミッション状況観測
- ・ 着陸シーンの外部からの撮像（静止画）
- ・ 独立した通信系で地球との直接通信



小型プローブ放出(左)と月面上の小型プローブのイメージ(右)

17

(C) JAXA



SLIMは月面の科学観測や、小型プローブの展開も行う (C) JAXA

SLIMに搭載された状態の「LEV-1」。ちなみに「LEV-2 (SORA-Q)」はこの奥に搭載されている

SLIMの打ち上げは2023年8月以降の予定で、X線分光撮像衛星(XRISM)とともにH-IIA ロケット47号機に搭載され、鹿児島県の種子島宇宙センターから飛び立つ。月面着陸は打ち上げから4~6か月後の予定となっている。SLIMはその名のとおり、小さくて軽いスリムな探査機ではあるものの、さまざまな最先端の技術と、創意工夫と、そして宇宙探査の未来を拓く可能性をもっている。「山椒は小粒でもぴりりと辛い」ということわざのように、その技術で世界をシビれさせる日を心待ちにしたい。



打ち上げに向けて準備が進む SLIM

鳥嶋真也とりしましんや

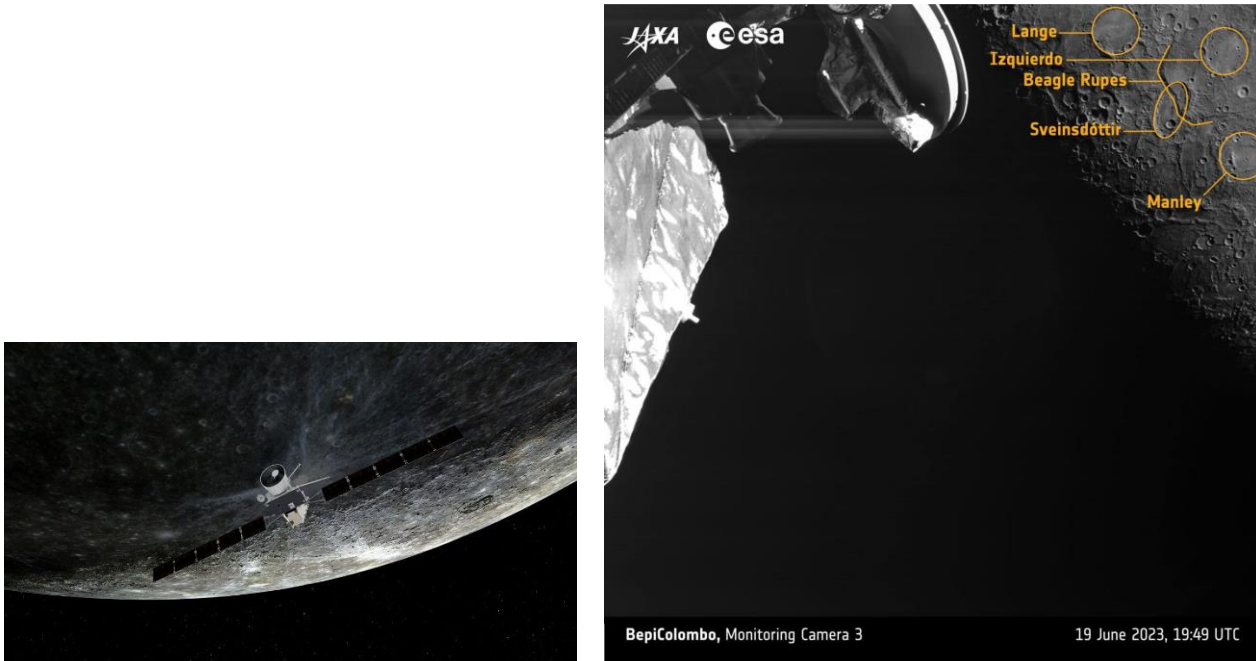
<https://soraie.info/space/20230621-bepicolombo-3rd-mercury-flyby.html>

日欧の水星探査ミッション「ベピ・コロombo」探査機が第3回水星スイングバイを

実施

2023-06-21 [soraie 編集部](#)

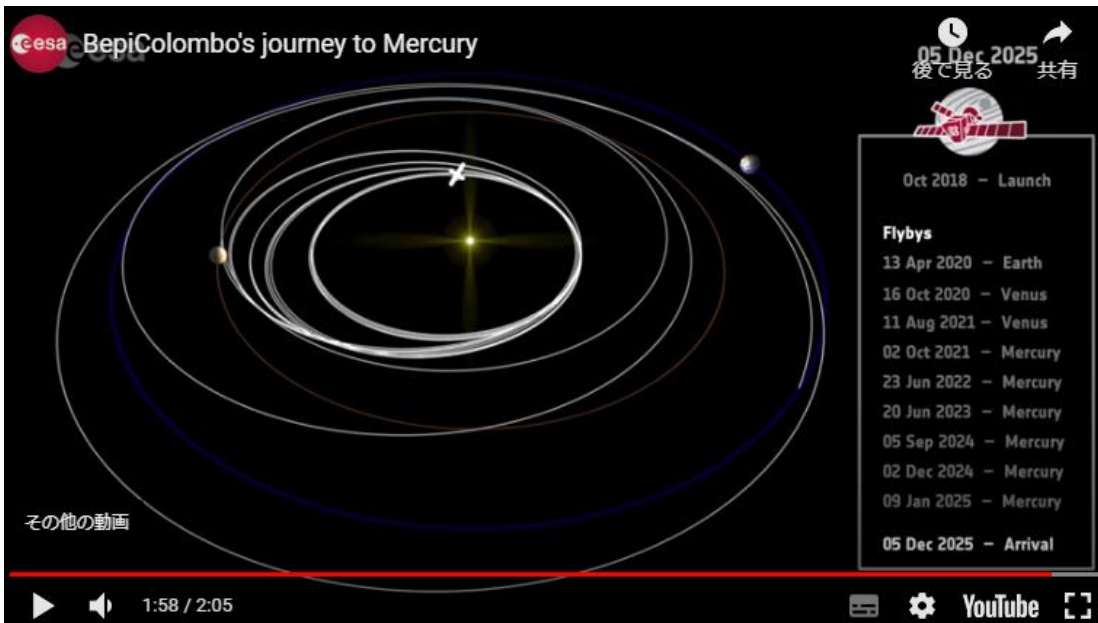
日本時間 2023 年 6 月 20 日、欧州宇宙機関（ESA）と宇宙航空研究開発機構（JAXA）の水星探査ミッション「BepiColombo（ベピ・コロombo）」の探査機による、水星でのスイングバイ（太陽を公転する天体の重力を利用して軌道を変更する手法）が実施されました。



【▲ スイングバイのため水星に接近したベピ・コロombo探査機の想像図（Credit: ESA/ATG medialab）】

【▲ BepiColombo の電気推進モジュール（MTM）のカメラで日本時間 2023 年 6 月 20 日 4 時 49 分に撮影された水星（[注釈なしバージョンはこちら](#)）（Credit: ESA/BepiColombo/MTM）】

BepiColombo は日本の水星磁気圏探査機「みお（Mercury Magnetospheric Orbiter）」と欧州の水星表面探査機「MPO（Mercury Planetary Orbiter）」の 2 機による水星探査ミッションです。ここに両探査機の水星周回軌道投入前までの飛行を担当する欧州の電気推進モジュール「MTM（Mercury Transfer Module）」が加わり、現在 3 機の機体は縦に積み重なった状態で飛行を続けています。

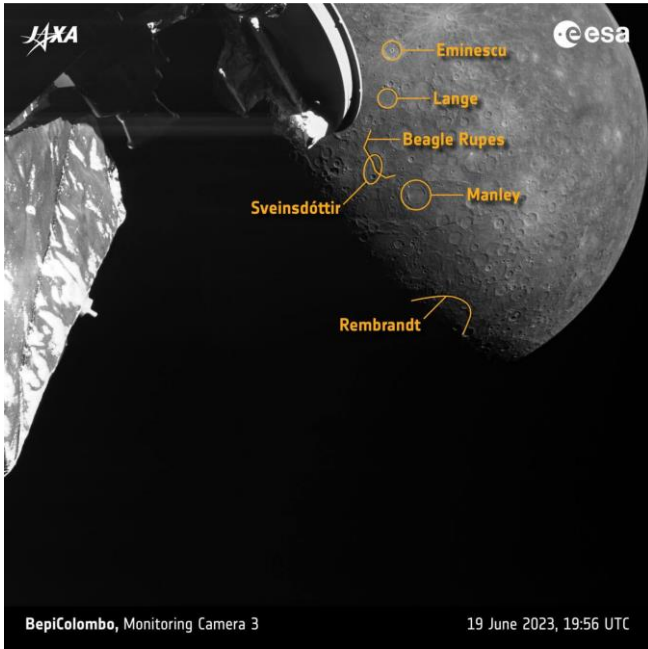


【▲ 打ち上げから 9 回のスイングバイを経て水星の周回軌道へ入るまでの軌道の変化を示した動画】
（Credit: ESA - European Space Agency）

BepiColombo のミッションでは 2025 年 12 月の水星周回軌道投入に向けて地球・金星・水星で合計 9 回のスイングバイが計画されていて、水星スイングバイは今回が 3 回目です。最接近時刻は日本時間 2023 年 6 月 20 日

4時34分で、BepiColombo 探査機は水星の夜側表面から約236km離れたところを通過しました。翌日の日本時間6月21日にはスイングバイ中に撮影された3点の画像がESAから公開されています。

1点目はMTMに搭載されているモニタリングカメラ（MCAM）で最接近の15分後に撮影された画像です。撮影時点での水星表面からの距離は約2536kmでした。細長い楕円形をしているスヴェインスドットティル・クレーター（Sveinsdóttir、長径約213km）は、水星表面に対して天体が斜めに衝突したことで形成されたと考えられています。スヴェインスドットティル・クレーターを引き裂くように走っているのは、長さ約600kmのビーグル断崖（Beagle Rupes）です。ESAによればこうした断崖は水星のあちこちで見つかり、水星が冷えるにつれて収縮したために形成された可能性があるといいます。



【▲ BepiColombo の電気推進モジュール（MTM）のカメラで日本時間2023年6月20日4時56分に撮影された水星（[注釈なしバージョンはこちら](#)）（Credit: ESA/BepiColombo/MTM）】



【▲ BepiColombo の電気推進モジュール（MTM）のカメラで日本時間2023年6月20日5時29分に撮影された水星（[注釈なしバージョンはこちら](#)）（Credit: ESA/BepiColombo/MTM）】

2点目も MCAM で最接近の 22 分後に撮影された画像です。撮影時点での水星表面からの距離は約 4000km でした。ビーグル断崖の右下にはジャマイカの芸術家 Edna Manley (エドナ・マンリー) にちなんだマンリー・クレーター (Manley、直径約 218km) があります。マンリー・クレーターは国際天文学連合 (IAU) の惑星系命名ワーキンググループによって 2023 年 6 月 13 日付で命名されたばかりです。MCAM チームの一員であるオープン大学の David Rothery 教授によると、マンリー・クレーターでは初期の水星における炭素に富んだ地殻の名残の可能性のある暗い (反射率が低い) 物質が掘り起こされているとされています。同様の物質が存在する他の場所とともに、マンリー・クレーターは BepiColombo ミッションで詳しく調査される予定です。

3点目は MCAM で最接近の 55 分後に撮影された画像です。撮影時点での水星表面からの距離は約 1 万 1780km でした。BepiColombo 探査機の本体とアンテナの間に水星が見える様子を、ESA は「水星を抱きしめているようだ」と表現しています。

2025 年 12 月に水星周回軌道へ入るために、BepiColombo 探査機は水星スイングバイをあと 3 回行う必要があります。次の第 4 回水星スイングバイは 2024 年 9 月 5 日に実施される予定だということです。

Source Image Credit: ESA/BepiColombo/MTM

[ESA](#) - A trio of images highlight BepiColombo's third Mercury flyby

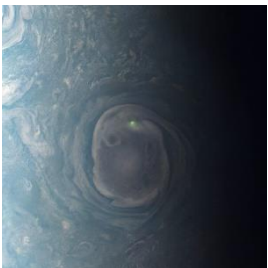
文/sorae 編集部

<https://sorae.info/astronomy/20230623-pj31.html>

雲の中で輝きを放つ木星の雷 NASA 木星探査機ジュノーが撮影

2023-06-23 [sorae 編集部](#)

こちらはアメリカ航空宇宙局 (NASA) の木星探査機「Juno (ジュノー)」が捉えた木星の渦の一つです。Juno に搭載されている可視光カメラ「JunoCam」で日本時間 2020 年 12 月 31 日 6 時 17 分に取得したデータをもとに作成されたもので、撮影当時の Juno は木星の北緯 78 度付近の上空、雲頂から約 3 万 2000km を飛行していました。



【▲ 木星探査機 Juno (ジュノー) の「JunoCam」で撮影された木星の雷の光。2020 年 12 月 31 日に取得されたデータをもとに市民科学者の Kevin M. Gill さんが作成 (Credit: Image data: NASA/JPL-Caltech/SwRI/MSSS; Image processing by Kevin M. Gill © CC BY)】

渦には緑色に光っているように見える部分があります。NASA によると、これは木星の雲の中で発生した雷の光です。地球の雷は赤道付近で最も頻繁に発生しますが、木星の雷は極の近くで最も頻繁に発生するのだとされています。 関連: [木星の大気では水とアンモニアが高高度の雷や降り注ぐ雹をもたらす](#) (2020 年 8 月 7 日)

画像を作成したのは市民科学者の Kevin M. Gill さんです。Gill さんはこれまでも JunoCam のデータをもとに様々な画像を作成・公開しており、今回は Juno による 31 回目の木星フライバイ (近接通過) 「PJ31 (Perijove 31)」で取得されたデータが使われています。

関連: [木星の北半球で渦巻く嵐と高高度の雲、NASA 探査機「ジュノー」が撮影](#) (2022 年 1 月 6 日)

木星の雷の光を捉えた JunoCam の画像は、NASA やサウスウエスト研究所 (SwRI) が 2023 年 6 月 15 日付で紹介しています。

Source

Image Credit: Image data: NASA/JPL-Caltech/SwRI/MSSS; Image processing by Kevin M. Gill © CC BY

[NASA](#) - NASA's Juno Mission Captures Lightning On Jupiter

[NASA/JPL](#) - PIA25020: NASA's Juno Mission Captures Lightning On Jupiter

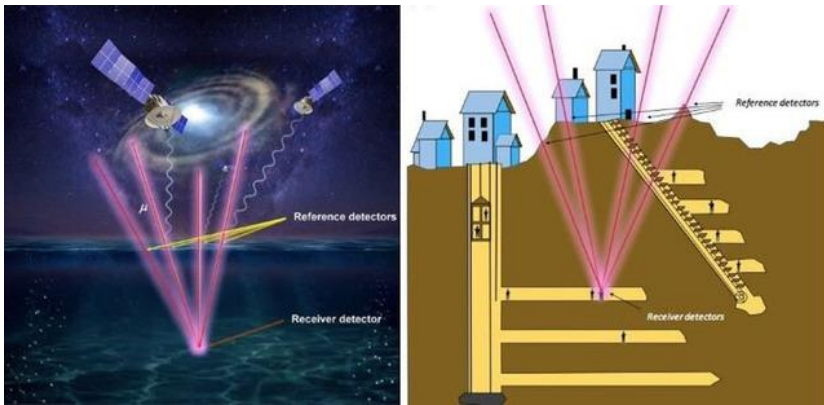
[SwRI](#) - NASA's Juno Mission Captures Lightning On Jupiter

文/sorae 編集部

<https://resemom.jp/article/2023/06/19/72613.html>

地下でも使える GPS 的技術、東大ら宇宙線ミュオン粒子用い開発

東京大学国際ミュオグラフィ連携研究機構が、地上における GPS のようなナビゲーションを地下でも実現する「muPS」技術を開発し、その実験に成功したと発表しました。 2023.6.19 Mon 18:15



東京大学国際ミュオグラフィ連携研究機構が、地上における GPS のようなナビゲーションを地下でも実現する「muPS」技術を開発し、その実験に成功したと [発表しました](#)。

GPS（正確には GNSS）はいまやスマートフォンにも搭載されており、はじめての場所へ出かける際に、道に迷う心配を取り除いてくれる、大変便利かつ身近な技術になりました。しかしその GPS も、衛星からの電波に頼っている関係で、ビルの中や地下街では、基本的には使うことができません（Wi-Fi や通信キャリア基地局などからの位置情報をとれるエリアなら、地下でも位置がわかります）。

東京大学をはじめ、日本電気、テクノランドコーポレーション、カタールニア大学、ダラム大学、北京大学との共同研究において、GPS が使えない地下空間でも利用可能なナビゲーション技術「muPS」を開発しました。

muPS 技術は、宇宙線に含まれるミュオン粒子（muon）の高い透過能力と、物質によらない飛行速度の普遍性を利用します。ミュオン粒子とは、超新星爆発などの高エネルギーなイベントで加速された宇宙線と、地球の大気が反応して生成される素粒子のひとつです。この粒子は地球のいたる場所に同じように降り注いでいます。屋内、屋外、地上、地下問わず、あらゆる物体を、真空中を進む光と同等の速度で貫通する性質を持っています。そのため、地上の受信局と地下の受信デバイスそれぞれを複数、配置することで、それぞれで得たミュオン粒子の測定データから任意受信デバイスの位置を正確に求めることができます。

以前の研究では、地上局と受信デバイスの時刻同期をワイヤレスで実現することができず、有線であれば muPS による位置の取得ができませんでした。しかし、今回の実験では、受信デバイスのクロック精度を高めることで地上局との間の時刻同期を可能とする [無線 muPS 技術](#)（MuWNS: muometric wireless navigation system）を開発し、その実証実験を行いました。実験は、東京都内およびカナダ・カルガリーの市街地における地上と地下で MuWNS によるナビゲーション誤差と、GPS/GNSS による測位誤差を比較しました。その結果、目標とする精度である誤差 1m 以内には届かなかったものの、都市部における単独での GPS 測位精度よりも高いナビゲーション精度が得られたと報告しています。また、目標とする 1m 以内の精度を実現するためには、さ

らに受信デバイスのクロック精度を上げることが考えられています。現在はクォーツを利用して受信側のクロックを生成しているところを、最近 5G 以降を見据えてその低価格化が進んでいるという、チップスケール原子時計(CSAC)をクロックに利用することで、1m は達成が見込めるそうです。

そして、屋内や地下でも高精度なナビゲーションが実現すれば、あらゆる場所に置いて複雑な用途に対応する自律移動ロボットの実現も可能となることが考えられます。たとえば、災害時の緊急対応などで人が入っていけない危険な場所に、テザーなしで捜索に立ち入れるロボットなども実現できそうです。

ちなみにミュウ粒子、muPS に関しては『[サンダーバード 50 周年記念エピソード \(サンダーバード 55/GoGo\)](#)』に参加したジャスティン・T・リー、リンジー・リー（旧姓ホラン）夫妻が製作したパペット映画『ミックシ：宇宙線編』がわかりやすいので、ご参考にどうぞ。この映像作品には国際ミュオグラフィ連携研究機構が協力しています。



地下でも使える GPS 的技術、東大らが宇宙線ミュウ粒子用い開発

《Munenori Taniguchi》



<https://news.yahoo.co.jp/articles/e7e1d69c4559bc6d27532622f782c79f53cba81d>

「太陽柱」と「虹」 氷と雨が織りなす光のアート 珍しい大気光学現象が同時に

【熊本発】

6/22(木) 6:52 配信

FNNプライムオンライン

[FNN プライムオンライン](#)

熊本県内では 6 月 18 日の日没ごろ、西の空には「太陽柱」が、東の空には「虹」が現れるという珍しい光のアートの共演が見られた。 [【画像】テレビ熊本のスタッフが撮影した「太陽柱」](#)

氷の粒が光を反射してみせる「太陽柱」

6 月 18 日午後 7 時半ごろ、熊本市中央区でテレビ熊本のスタッフが撮影した写真。西の空、[金峰山](#)の上に地面に対して垂直に伸びる光の筋「太陽柱」がある。太陽柱は、巻層雲など上空高いところにある雲を構成する氷の粒に光が当たって反射したものだ。

反対側には雨粒が映し出す「虹」も

一方その反対側、東側にはうっすらと虹が現れていた。虹は太陽の光が雨粒によって反射される現象で、阿蘇の情報カメラでも虹の根元の部分が日没の前後、数十分にわたって映し出されていた。このほか FNN ビデオポストにも西と東、氷と雨が織りなす光のアートの共演が多数寄せられていた。 [【画像】FNN ビデオポストに寄せられた写真をもっと見る](#) (テレビ熊本)

ギャラリー

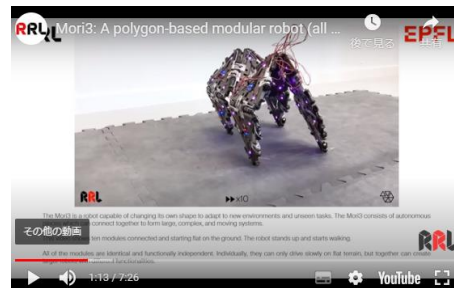
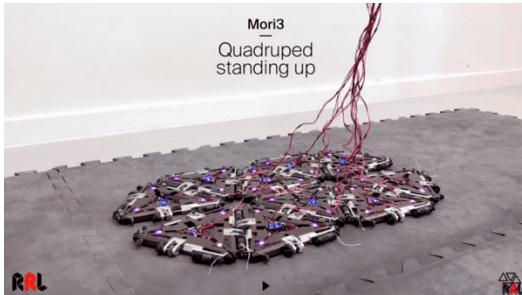




<https://www.gizmodo.jp/2023/06/shape-shift-robot-swarm-could-help-astronauts-in-space.html>

宇宙船の省スペース化に貢献？ 合体して形を変えるロボット

2023.06.18 18:00 Passant Rabie - Gizmodo US [\[原文\]](#) (たもり)



Gif: EPFL RRL Mori3 ロボットが立ち上がる様子。 Video: Reconfigurable Robotics Lab - EPFL/YouTube

宇宙ミッションに用途別のロボットを連れていこうにも、月や火星に向かうロケットの貨物室には何体も積載するゆとりはないかもしれません。多目的に使えるモジュール式のロボットなら、そんな問題の解決策となりそうです。スイス連邦工科大学ローザンヌ校（EPFL）のエンジニアのチームが設計した Mori3 は、三角形のモジュールからほとんどの 3D オブジェクトへと形を変えられるロボットです。Nature Machine Intelligence に掲載された [論文](#) によれば、各モジュールがくっ付いてさまざまな形を構築するポリゴンメッシングと呼ばれるプロセスを通し、あらゆるタスクを果たすという発想なんだそう。

研究者たちは Mori3 が、月面やいずれは火星のコロニーにいる宇宙飛行士たちをアシストできる日が来ると考えています。「Mori3 は目の前の環境とタスクに応じて自由自在に組み立て・分解できる、モジュール型の折り紙のようなロボットを作り出すことを目的としています」と、Reconfigurable Robotics Lab の Jamie Paik 所長は [リリース](#) の中で語っていました。そして「Mori3 は大きさ、形状、機能を変えられます」ともコメントしています。**複雑なタスクの遂行は難しいかも...**

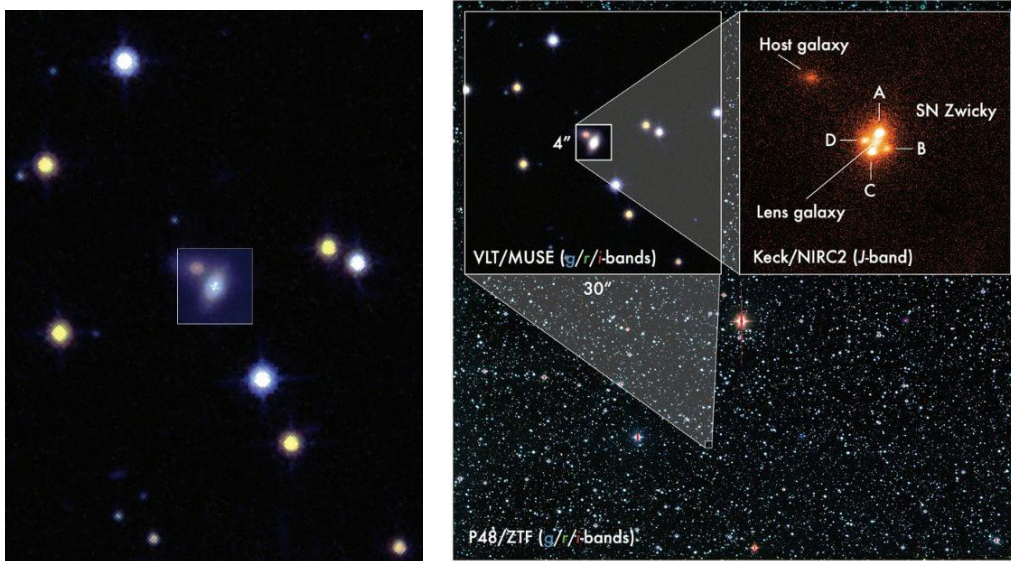
Mori3 ロボットは自律型の部品で構成されているので、形を変えて別のモジュールにくっ付き、機能的な構造を作るためにやりとりできるんだそう。また互いに連結すると、群れとして行動します。意図された形へと合体した後のロボットは動き回り、物体に触れて運び、ユーザーと交流することができました。前述のリリースの中で、「ロボット工学への理解を再考する必要がありました」と語っていたのはロボット工学の博士研究員 Christoph Belke 氏。「ポリゴンメッシングが有望なロボット戦略だと示せたのです」と述べていました。Mori3 ロボットは宇宙船に收容できるよう、そして形状に合わせた基本的なアクティビティを実行できるよう設計されていますが、複雑なタスクを遂行するには設計されていません。「連結式構造を作るために互いに接続する多角形で多態形なロボットは幅広い用途に効果的に使えます」とリリースの中でコメントしていた Paik 所長も、「Mori3 のような多目的なロボットは、特定の分野においては特化したロボットよりも効果的でなくなるでしょう」と指摘。しかし「Mori3 の最大のセールスポイントは多用途性です」と強調していました。

<https://sorae.info/astromy/20230618-sn-2022qmx.html>

重力レンズ効果で分裂・拡大して見える超新星「SN Zwicky」の輝き

2023-06-18 [soraie 編集部](#)

こちらは 2022 年 8 月に発見された超新星「SN 2022qmx」を捉えた画像です。中央の四角で囲まれた部分はハワイのマウナケア山にある W.M.ケック天文台の「ケック望遠鏡」で取得された高解像度の画像で、周辺の様子を取得した低解像度の画像に重ね合わせられています。



【▲ W.M.ケック天文台の「ケック望遠鏡」で取得された超新星「SN 2022qmx」、通称「SN Zwicky」。重力レンズ効果によって4つに分裂して見えている (Credit: Joel Johansson)】

【▲ ZTF で取得された夜空 (背景)、超大型望遠鏡 (VLT) の広視野面分光観測装置「MUSE」で取得された SN 2022qmx 周辺 (左上)、ケック望遠鏡の近赤外線観測装置「NIRC2」で取得された SN 2022qmx (右上) を示した図 (Credit: J. Johansson)】

中央の高解像度画像をよく見ると、ぼんやりとした楕円形に見える銀河の中心付近に十字を描くような4つの光点が写っています。この4つの光点こそ、「重力レンズ効果」を受けて分裂して見えている SN 2022qmx の輝きなのだといいます。楕円形に見える銀河の左上には、SN 2022qmx が起きた銀河も写っています。

重力レンズとは、手前にある天体 (レンズ天体) の質量によって時空間が歪むことで、その向こう側にある天体 (光源) から発せられた光の進行方向が変化し、地球では像が歪んだり拡大されたり、時には同じ天体の像が複数に分裂して見えたりする現象です。SN 2022qmx の場合、楕円形に見える手前の銀河の質量によって超新星の光の進む向きが変化することで、地球からは4つに分裂して見えているというのです。ストックホルム大学の Ariel Goobar さんを筆頭とする研究チームによると、SN 2022qmx は約 40 億光年先で発生し、重力レンズ効果によって 25 倍近くに拡大されています。

パロマー天文台 (米国) の掃天観測システム「Zwicky Transient Facility (ZTF、ツビッキー・トランジェント天体探査装置)」で最初に検出されたことにちなんで、SN 2022qmx は「SN Zwicky」とも呼ばれています。超新星爆発は白色矮星を含む連星や大質量星が起こすとされていますが、これまでの観測の結果、SN 2022qmx は白色矮星が関わる「Ia 型超新星」であることが判明しました。

Ia 型超新星は真の明るさが一定だと考えられています。真の明るさが判明している天体や現象は、実際に観測された見かけの明るさと比較することで地球からの距離を求めることができます。このような天体や現象は「標準光源」と呼ばれていて、Ia 型超新星もその一つとして重要視されています。



【▲ 重力レンズ効果によって超新星が分裂して見える様子を説明した動画】（Credit: ESA/Hubble, L. alçada）
超新星はもともと明るい現象ですが、「SN Zwicky」こと SN 2022qmx のように重力レンズ効果を受けると、より遠方で起きた場合でも観測することが可能になります。Ia 型超新星は標準光源として宇宙の加速膨張の研究にも役立てられていることから、加速膨張の原因だと考えられている暗黒エネルギー（ダークエネルギー）や、銀河の質量の大半を占めているとされる暗黒物質（ダークマター）の性質に迫る機会を得るためにも、「SN Zwicky」と同様に重力レンズ効果を受けた Ia 型超新星が今後もより多く発見されることに期待が寄せられています。※記事中の距離は天体から発した光が地球で観測されるまでに移動した距離を示す「光路距離」（光行距離）で表記しています。

Source Image Credit: Joel Johansson, ESA/Hubble, L. Calçada

[W.M. Keck Observatory](#) - Rare Gravitational Lensing Warps Light Of Distant Supernova Into Four Images

[Stockholm University](#) - Rare gravitational lens splits light of distant supernova into four images

[Caltech](#) - Astronomers Discover Extremely Warped Supernova

[University of Maryland](#) - Astronomers Discover Supernova Explosion Through Rare 'Cosmic Magnifying Glasses'

[Goobar et al.](#) - Uncovering a population of gravitational lens galaxies with magnified standard candle SN Zwicky

(Nature Astronomy)

文/sorae 編集部

https://news.biglobe.ne.jp/domestic/0620/dol_230620_5891455500.html

【わかりやすい宇宙の話】“空間”が「曲がる・歪む・膨らむ」ってどういうこと？

2023年6月20日（火）6時0分 [ダイヤモンドオンライン](#)



わかりやすい宇宙の話】“空間”が「曲がる・歪む・膨らむ」ってどういうこと？ [写真を拡大](#)

「この本は、まちがいで買いた」。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話をお伝えする。

どっちが正しいの？

空間は埋められるのを待っている無限の空っぽな場所なんだろうか？ それとも物質がないと存在できないものなんだろうか？ 実はどっちでもない、というのはかなり確実だ。空間は空っぽの場所ではないし、物質どうしの関係性でもない。 どうしてそんなことがわかるのかというと、空間はどっちの考え方にも当てはまらない振る舞いをするからだ。曲がったりゆがんだり膨らんだりするのだ。

わけがわからない。「何だって？」

「空間が曲がる」とか「空間が膨らむ」というフレーズを注意して読むと、ちょっとどぎまぎしてしまうはずだ。 いったいどういう意味なんだ？ 意味があるのか？ 空間がただの概念だとしたら、曲がったり膨らんだりするはずないじゃないか。 空間が物体の位置を測るための物差しなのだとしたら、空間の曲がり具合とか膨らみ具合なんてどうやって測るんだ？ いい質問だ！

空間が曲がるという考え方にどうしてこんなに戸惑うんだろう？

それは、ほとんどの人は生まれてからずっと、空間とは何かが起こるための見えない背景だと頭の中でイメージしているからだ。 床が厚い木の板でできていて、両側が硬い壁で仕切られた、劇場の舞台みたいなイメージだ。 この抽象的な舞台は宇宙の一部じゃなくて、その中に宇宙が入っているだけなんだから、この舞台が曲がるなんてありえないと思ってしまうのだ。 でも残念なことに、君の頭の中にあるイメージは間違っている。

一般**相対性理論**を理解して、現代の空間の概念について考えるためには、空間は抽象的な舞台であるという考え方を捨てないといけない。 空間は物理的な実体であるという考え方を受け入れるのだ。空間もいろんな性質を持っていて、いろんなふうに振る舞う。 そして宇宙の中にある物質から影響を受ける。そういうイメージを持たないといけないのだ。 頭の中で変な声が響いてきたかもしれない。でも、覚悟を決めてほしい。本当にわけがわからないのはここからだ。 この考え方を受け入れて、空間にまつわる本当に奇妙で基本的な未解決の謎を正しく理解するためには、さっきのイメージを少しずつ解きほぐしていかないといけない。

空間のネバネバの中を泳ぐ

空間が波立ったりゆがんだりする物理的な実体だなんて、どうしてありえるんだろう？ どういう意味なんだろう？ 空間は実は空っぽの部屋（ものすごく大きい部屋）なんかじゃなくて、濃いネバネバでできた巨大な塊のようなものだ。 ふつう、そのネバネバの中を物体は楽々と動き回ることができる。空気で満たされた部屋の中を歩き回っても、空気の粒子には気づかない。それと同じだ。 でもある決まった条件になると、このネバネバがゆがんで、その中を動く物体の進行方向が変わることがある。 また、このネバネバはぐちゃぐちゃかき回されて波立つこともある。そうすると、その中にある物体の形が変わる。 このネバネバ（「空間ネバネバ」と呼ぼう）は、本物の空間の完璧なたとえにはなっていない。 でもこのたとえを思い浮かべれば、いまこの瞬間に君がいるこの空間は、形の変わらない抽象的なものなんかじゃないとイメージできる。 君は何か具体的な実体の中において、その実体は伸びたり揺れたりゆがんだりするけれど、君はそれに気がつかないのだ。 いまちょうど、君の身体を空間のさざ波が通り抜けたかもしれない。あるいは、この瞬間に身体が変な方向に引き伸ばされているけれど、気がつかないだけかもしれない。 このネバネバがただネバネバする以外に何かをするなんて、最近までわからなかった。だから何にもないんだと勘違いしていたのだ。 では、この空間ネバネバはどんなことができるんだろう？ 実はいろんな変なことができるのだ。 まず、空間は膨らむことができる。空間が膨らむってどういうことか、ちょっとのあいだじっくり考えてみよう。 ネバネバの中を実際には動いていないのに、物体どうしがどんどん離れていくということだ。 君がネバネバの中でじっと座っていたら、突然そのネバネバが膨らみはじめたとイメージしてほしい。 別の人と向かい合わせに座っていたら、君もその人もネバネバに対して動いてなんかいないのに、その人はどんどん遠ざかっていくのだ。

このネバネバが膨らんでいるかどうかは、どうしたらわかるだろう？

ネバネバを測るための物差しも一緒に伸びてしまうんじゃないの？

確かに、物差しの中にあるすべての原子のあいだの空間も膨らんで、原子はお互いに引き離されそうになる。もしその物差しが超やわらかいキャンディーでできていたら、一緒に伸びていこう。

でも硬い物差しを使えば、その中の原子は（電磁気力で）互いにしっかり結びついていて、長さは変わらないので、空間が増えているのに気づけるはずだ。しかも、実際に空間が膨らんでいることはわかっている。

生まれたばかりの宇宙では空間がとんでもないスピードで膨らんで引き伸ばされたこともわかっているし、それと同じような膨張はいまも起きている。また、空間はゆがむこともできる。空間ネバネバは、ちょうどキャンディーのようにぐにゃとつぶれたり形が変わったりすることもあるのだ。

アインシュタインの一般相対性理論によれば、その空間のゆがみこそが重力である。質量のある物体がまわりの空間をゆがめて変形させるのだ。空間が変形すると、その中を動いている物体は思った通りには進まなくなる。ゆがんだネバネバの塊の中で野球のボールを投げると、まっすぐ飛んでいかない。

ネバネバのゆがみ具合に合わせてカーブしていくのだ。ボウリングの球みたいに何か重い物体のせいでネバネバが激しくゆがんでいると、野球のボールはそのまわりをぐるぐる回ってしまうかもしれない。

ちょうど、月が地球のまわりを、地球が太陽のまわりを回っているのと同じように。

それは人間の肉眼でも見ることができるのだ！たとえば太陽とか、ダークマターの大きな塊など、重い天体の近くを光が通ると、光の進行方向が曲がる。もし重力が空間のゆがみでなくて、質量を持った物体のあいだに働いた力だったとしたら、質量ゼロの光子が引き寄せられるはずがない。

光の進行方向が曲がるのを説明するためには、空間そのものがゆがんでいると考えるしかないのだ。

最後に、空間は波打つこともできる。伸びたりゆがんだりできるのなら、そんなに突拍子もないことじゃない。でもおもしろいことに、その伸びたりゆがんだり空間ネバネバの中でどんどん広がっていく。それが重力波だ。空間が突然ゆがんだら、そのゆがみが、ちょうど音波や水の波のように四方八方に広がっていく。

空間がただの抽象的な概念だったり、完全に空っぽだったりしたら、そんなことは起こりようがない。

何か物理的な実体がなければそんなことは起こらないのだ。

このさざ波が本当に発生するってどうしてわかるのかというと、(a) 一般相対性理論で予測されていたからと、(b) 実際にそのさざ波がとらえられたからだ。

宇宙のどこかで2つの重いブラックホールが、ものすごい勢いでお互いのまわりを回転しはじめた。

そして空間がとんでもなくゆがんで、そのゆがみが宇宙空間に広がっていった。その空間のさざ波が、ここ地球上で超高感度の検出装置を使って検出されたのだ。このさざ波は、空間が伸びたり縮んだりしてできると考えればいい。空間のさざ波が通り過ぎると、空間が一方向には縮んでもう一方向には伸びるのだ。うさんくさいなあ。本当なの？空間がただの空っぽの場所じゃなくて実体があるなんて、突拍子もない話に聞こえるかもしれない。でも宇宙で経験することはその通りだ。実験や観測でかなりはっきりわかっている。空間内での物体どうしの距離は、目に見えない抽象的な背景で測れるものじゃない。確かに、空間は物理的な性質を持っていて、物理的な振る舞いをする存在だと考えれば、空間のゆがみとか膨張といった奇妙な現象を説明できるかもしれない。でもそうすると、もっといろんな疑問が湧いてくる。たとえば、いままで空間と呼んでいたものを、これからは「物理的ネバネバ」と呼んでみたくなるかもしれない。でもそのネバネバは何かの中にあるはずで、今度はそれを空間と呼んでもいいかもしれない。うまいアイデアだけれど、いまのところわかっている限り（たいしてわかっているわけではないけれど）、このネバネバが何か別のものの中にある必要はない。ネバネバが曲がったりゆがんだりするといっても、それが入っている何か広い部屋のようなものに対してゆがむんじゃなくて、ネバネバ自体がゆがむだけ。空間の各場所どうしの関係が変わるだけなのだ。でも、この空間ネバネバが何か別のものの中に入っている必要はないからといっても、実際には何かの中に入っている可能性だってある。もしかしたら、僕らが空間と呼んでいるものは、実はもっと大きい「超空間」の中に入っているのかもしれない

い。そしてその超空間こそ、無限に広がる空っぽの場所なのかもしれない。でも、ぜんぜんわからない。この宇宙の中に空間が存在していない場所はあるだろうか？ つまり、空間がネバネバだとしたら、ネバネバじゃない場所、ネバネバが存在していない場所というのはいくらあるだろうか？ どうも意味が通りにくい疑問だ。僕らが知っている物理法則は、どれも空間の存在を前提にしている。では、空間の外ではどんな法則が働いているっていうのだろうか？ やっぱり、ぜんぜんわからない。空間を実体のあるものだと考えるこの新しい考え方は、最近になって出てきたものだ。空間が何なのかはまだ少ししかわかっていない。まだ直感的な概念にしょっちゅう足を引っ張られている。古代人が動物を狩ったりするときにはその直感的な概念がすごく役に立ったけれど、いまではその足枷（あしかせ）を振りほどいて、空間は僕らのイメージとはぜんぜん違うんだ

と意識しないとイケないのだ。 **DIAMOND**
online

<https://news.yahoo.co.jp/articles/58a10cb0a672d825a44f301e7f578ed7b2c9bdb4>

<星空と宇宙> 「超新星」 巨大恒星その最期の輝き

6/20(火) 18:30 配信  毎日新聞 



[回転花火銀河とも呼ばれる、M101に現れた超新星「SN2023ixf」（矢印の星）＝静岡県小山町の富士山須走口5合目で2023年6月17日、手塚耕一郎撮影（10センチ屈折望遠鏡使用、ノイズ低減のため30枚を合成）](#)

地球から約2270万光年の距離にある、おおぐま座のうずまき銀河「M101」で5月20日に、山形市のアマチュア天文家、板垣公一さん（75）が、超新星「SN2023ixf」を発見しました。板垣さんは新天体の捜索家として知られ、今回で172個目の超新星発見となりました。「星空と宇宙」、今回は超新星について紹介します。

【超新星 その輝きを写真で】 光度14.9等の明るさで発見されたM101の超新星は、11等ほどまで輝きが増しました。国立天文台によると、この明るさの超新星は、2014年にM82で見つかった「SN2014J」以来です。6月に入り減光に転じましたが、6月17日に望遠鏡で撮影すると、写真にはっきりと写りました。発見から1カ月となる現在も、口径の大きな望遠鏡なら見るのが可能な、12等ほどの明るさで輝いています。今後、数カ月かけて徐々に暗くなり、見えなくなっていくでしょう。超新星は、太陽の8倍以上の質量を持つ巨大な恒星が、進化の最期を迎えた時に大爆発する現象です。星が急に明るくなる現象に「新星」がありますが、はるかに明るく、太陽の数億倍に輝くため、超新星と呼ばれています。超新星爆発の後、元の星の場所には中性子星やブラックホールといった高密度の天体が形成されると考えられています。宇宙には無数の銀河があるため、近年は毎年1000個を超える超新星が発見されています。しかし、とても遠い銀河がほとんどで、一般的には観察できないものばかりです。まれに近くの銀河で起こった時は、その輝きが、天文ファンの胸を躍らせます。1987年に、南半球で見られる銀河「大マゼラン雲」（距離約16万光年）で、超新星「SN1987A」が見つかりました。光度約3等と肉眼でも見え、望遠鏡が発明されて以来、最も明るい超新星とされています。過去の文献にも、太陽系を含む天の川銀河の中で、超新星が現れた記録があります。1054年、おうし座に出現し

た超新星「SN1054」は、鎌倉時代に藤原定家が書いた日記「明月記」に記述があり、金星より明るく輝いたようです。現在、その場所には残骸の「かに星雲」(M1)が見られます。ひとつの銀河の中で、数十年から100年に1度生じるといふ超新星。次に肉眼で見られるのはいつになるのでしょうか。【手塚耕一郎】

<https://sorae.info/astronomy/20230619-lamost-j1010519-2358502.html>

宇宙最初の恒星の“指紋”を残す恒星「LAMOST J101051.9+235850.2」を観測

2023-06-19 [彩恵りり](#)

宇宙には無数の恒星が存在しています。では、宇宙最初の恒星はどのような姿をしていたのでしょうか？



【▲ 図 1: 初期の宇宙で起こった超大質量星の超新星爆発の想像図。恒星の寿命は質量に反比例して短くなるため、最も重い恒星が最初に超新星爆発を起こしたと考えられる (Credit: 中国国家天文台)】

【▲ 図 2: SDSS (スローン・デジタル・スカイサーベイ) によって撮影された LAMOST J101051.9+235850.2 の可視光画像 (Credit: SDSS / 国立天文台)】

宇宙で最初に誕生した恒星は水素とヘリウムのみでできており、質量は太陽の140倍から260倍という、現在の宇宙にはほとんど存在しない巨大な恒星だったと推定されています。

質量が太陽の8倍以上ある恒星は生涯の最後に超新星爆発が起こりますが、これほど重い恒星の場合は、通常とは異なるプロセスを経て発生する「電子対生成型超新星」(※1)というタイプの超新星爆発が起こるとされています。超新星爆発では水素やヘリウムよりも重い元素が生成されますが、電子対生成型超新星は他の超新星と比べて特殊な核反応が生じるため、生成される元素の割合に特徴が現れると推定されています。

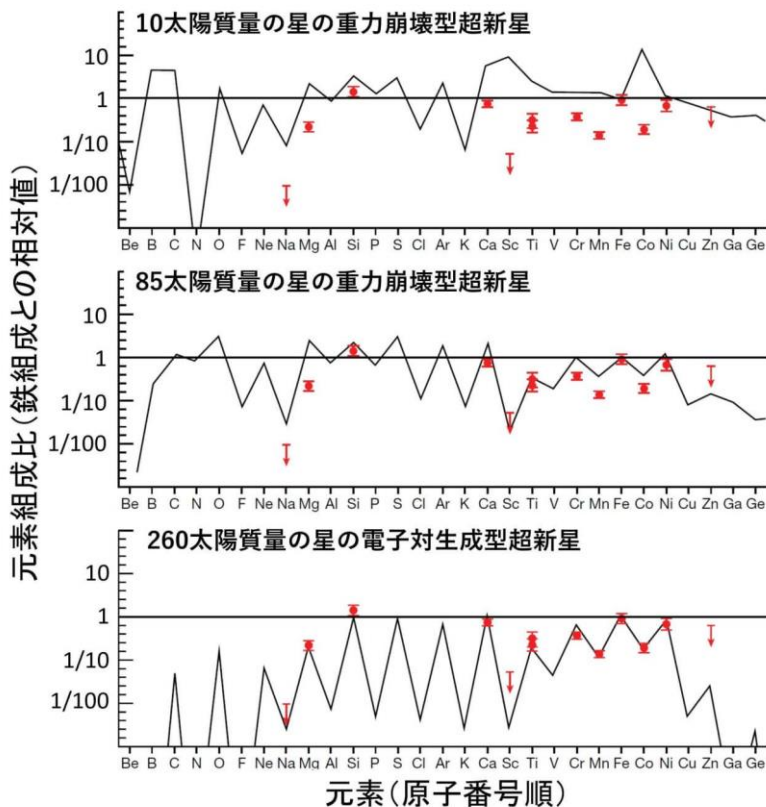
※1...「対不安定型超新星」とも。極端に重い恒星の内部では、核融合反応で発生する光のエネルギーが高すぎるために、電子と陽電子のペアが生成と消滅を繰り返して温度上昇が暴走する。核反応が極端に進行するため、中心部が収縮してブラックホールを作る暇がないほど急激な爆発が起こると考えられる。これが電子対生成型超新星である。電子対生成型超新星でばらまかれた残骸は、やがて2世代目の恒星の素となります。「初代星」や「ファーストスター」とも呼ばれる初代の恒星は遥か遠くに存在する上に寿命が短すぎるため、直接観測は困難であると考えられます。その一方で、2世代目の恒星に初代の恒星から引き継がれた特徴的な元素の割合が見つかれば、それは初代の恒星が非常に巨大であったことを示す“指紋”として機能するはずです。

中国科学院国家天文台と日本の国立天文台との国際研究チームは、中国の分光探査望遠鏡「LAMOST」を使用して、このような“指紋”を持つ2世代目の恒星を天の川銀河周辺のハローの中で探索しました。

LAMOSTによる観測の結果、幾つかの興味深い恒星が見つげ出されました。その中の1つ、「LAMOST J101051.9+235850.2」(地球からの距離約3000光年)というカタログ名の恒星には、マグネシウムの割合が低いという特徴がありました。そこで、研究チームがこの恒星の元素の割合を「すばる望遠鏡」で詳しく調べたところ、LAMOST J101051.9+235850.2はこれまでにない特徴を持つ恒星であることが確認されました。まず、LAMOST J101051.9+235850.2の重元素(※2)の割合は、太陽の260分の1以下という極端に少ない量でした。

また、重元素の割合が低い他の恒星（低金属星）と比べても、LAMOST J101051.9+235850.2 はナトリウムやコバルトが極端に少なく、その他の元素もこれまでに見たことがない割合で含まれていることが判明しました。

※2...ここでいう重元素とは、水素とヘリウム以外の元素を指す。実際の化学的性質に寄らず、これらはまとめて「金属」とも呼ばれる。



【▲ 図 3: 太陽の 10 倍、85 倍、260 倍の恒星が超新星爆発をした後の残骸に含まれる元素の推定量。赤い点が LAMOST J101051.9+235850.2 で観測された元素の量。最もよく一致しているのは質量が太陽の 260 倍の恒星の場合である (Credit: 中国国家天文台)】

これらの重元素は、LAMOST J101051.9+235850.2 の材料となった物質（ガスや塵）に、重い恒星の超新星爆発で生じた残骸が含まれていることを意味します。そこで、様々な質量の恒星が起こす超新星爆発の後に残される超新星残骸をシミュレーションし、LAMOST J101051.9+235850.2 の観測値と一致するものを調べてみたところ、観測結果とよく一致するのは電子対生成型超新星によって生じた超新星残骸に含まれる元素の比率であることが分かりました。特に、クロムからニッケルまでの元素の量の割合には、原子番号が奇数の元素と偶数の元素との間にみられる違い(※3)がよく反映されており、一致度の高さが注目されます。

※3...一般的に、陽子または中性子の数が偶数の原子核は、奇数の原子核と比べて安定性が高く、合成される量が多い。陽子の数は原子番号に対応するため、一般に原子番号が偶数の元素は奇数の元素よりも合成量が多い傾向にある。以上のことから、LAMOST J101051.9+235850.2 の化学組成は過去に電子対生成型超新星が生じたことを示す有力な証拠であり、初期の宇宙に非常に大きな質量を持つ恒星が存在したことを示す証拠でもあると考えられます。次なる研究課題は、このような巨大な恒星がどの程度存在していたのか、という疑問の解決です。そのためには 2 世代目の候補となる恒星を多数観測し、LAMOST J101051.9+235850.2 のような特徴を持つ恒星を見つけ出して、その割合を算出しなければなりません。新たな疑問に答えるためには、これからも観測作業を続ける必要があります。

Source [Qian-Fan Xing, et al.](#) "A metal-poor star with abundances from a pair-instability supernova". (Nature)

“[宇宙初代の巨大質量星の明確な痕跡を発見](#)”. (すばる望遠鏡)

<https://sorae.info/astromy/20230620-ngc6544.html>

美しい球状星団「NGC 6544」の輝き ハッブル宇宙望遠鏡が捉えた

2023-06-20 [sorae 編集部](#)

こちらは「いて座」の方向約 8000 光年先の球状星団「NGC 6544」です。球状星団とは、数万～数百万個の恒星が球状に集まっている天体のこと。天の川銀河ではこれまでに 150 個ほどの球状星団が見つかっています。カラフルな星々が密集して輝く様子に美しさを感じる天体です。



【▲ ハッブル宇宙望遠鏡で撮影された球状星団「NGC 6544」 (Credit: ESA/Hubble & NASA, W. Lewin, F. R. Ferraro)】

欧州宇宙機関 (ESA) によると、この画像は「ハッブル宇宙望遠鏡」の「掃天観測用高性能カメラ」(ACS) および「広視野カメラ 3」(WFC3) で取得したデータをもとに作成されています。画像の作成に使用されたデータは、淡い X 線源に対応する天体や電波で観測されたパルサーを探すために、それぞれ 2005 年 3 月と 2013 年 8 月に取得されました。ちなみに、NGC 6544 はいて座にある有名な「干潟星雲」(Lagoon Nebula、M8) の近くに見えます。干潟星雲は幅 55 光年に渡る輝線星雲で、その一部を捉えた画像はハッブル宇宙望遠鏡の打ち上げ 28 周年記念画像に選ばれています。

関連：[太陽の 20 万倍明るい恒星が潜む星雲](#) (2019 年 7 月 28 日)

冒頭の NGC 6544 の画像は「ハッブル宇宙望遠鏡の今週の画像」として、ESA から 2023 年 6 月 19 日付で公開されています。

Source Image Credit: ESA/Hubble & NASA, W. Lewin, F. R. Ferraro

[ESA/Hubble](#) - On the edge of the Lagoon

文／sorae 編集部

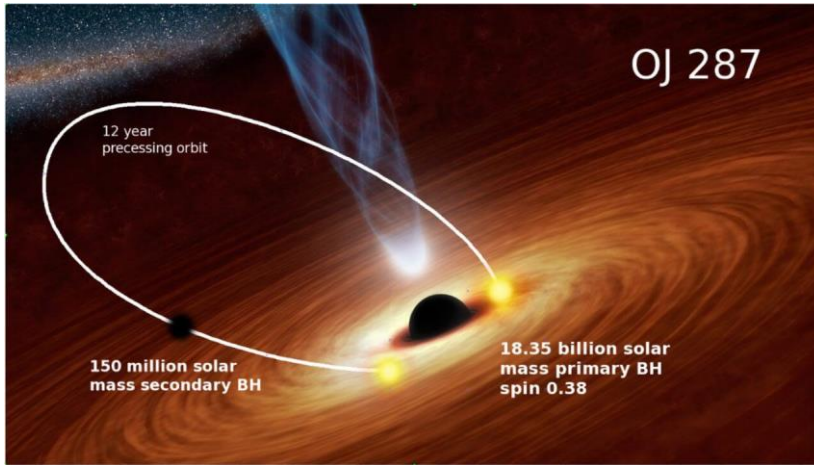
<https://sorae.info/astromy/20230621-oj287.html>

活動銀河「OJ 287」で超大質量ブラックホール連星の“セカンダリー”の存在が実証される

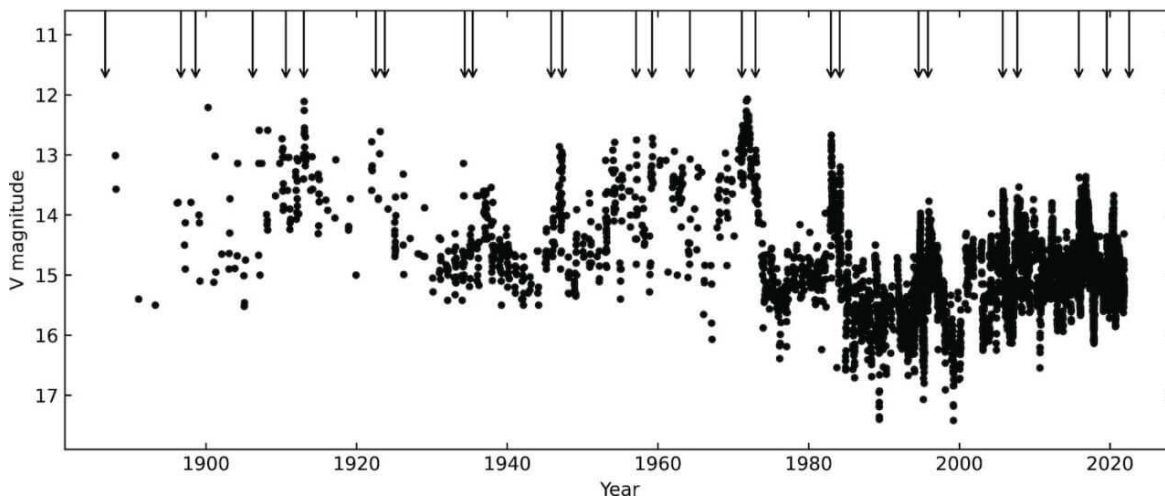
2023-06-21 [彩恵りり](#)

活動銀河「OJ 287」は、最も古い記録で 1888 年に観測されていますが、本格的に注目されたのはほぼ一世紀後の 1982 年ごろからでした。過去の観測記録を精査した結果、OJ 287 の明るさは 55 年周期および 12 年周期という、2 つの周期が複雑に絡み合いながら変化していることが分かったからです。

短いほうの 12 年周期で現れる変光を詳しく観測したところ、さらに短い間隔を置いて 2 回の閃光が生じていることがわかりました。こうした複雑な変光周期を説明するために、OJ 287 の中心部には連星をなす 2 つの超大質量ブラックホールが存在する、というモデルが提唱されました。



【▲ 図 1: OJ 287 の想像図。プライマリーの周りをセカンダリーが公転し、セカンダリーは時々プライマリーの降着円盤を貫通する。これが地球では 12 年周期での変光として観測される (Credit: AAS 2018)】

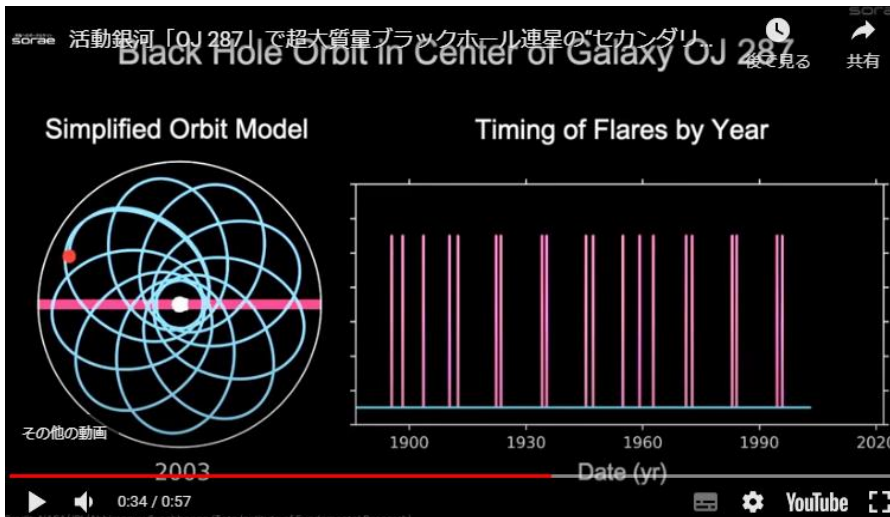


【▲ 図 2: OJ 287 の明るさの変化を示したグラフ。観測の歴史が長いために、長い周期の変光も明らかになったと言える (Credit: Valtonen, et.al.)】

このモデルでは、OJ 287 の中心にあるのはそれぞれ太陽の約 184 億倍と約 1 億 5000 万倍の質量がある超大質量ブラックホールの連星であると仮定しています。重いほうのブラックホール「プライマリー」は降着円盤をまわっており、OJ 287 の放射の大部分を占めています。一方、軽いほうのブラックホール「セカンダリー」は、プライマリーの周りで非常に長い楕円軌道を描きながら 12 年周期で公転していると考えられています。

なお、OJ 287 の超大質量ブラックホールを区別する決まった名称や仮符号は存在しないため、多くの文章では重いほうのブラックホールをプライマリー、軽いほうのブラックホールをセカンダリーと呼称しています。本記事もそれに倣います。彗星のような軌道を公転しているセカンダリーの軌道面は降着円盤に対して傾いているため、セカンダリーは時々降着円盤を横切ります。この時、降着円盤内の物質が加熱されることで、2 週間程度続く明るい閃光が生じます。このプロセスこそが短い 12 年の変光周期を生み出しており、さらに短い間隔で 2 回の閃光が生じるのは、セカンダリーが降着円盤を 2 回横切るからだと考えれば説明がつきます。

一方で、55 年の長い変光周期は、セカンダリーの公転軌道が大きく変化することによるものと考えられています。プライマリーとセカンダリーはお互いに強い重力を及ぼし合うため、セカンダリーの公転軌道の近点 (お互いが最も近づく軌道上の点) は大きく移動し続けます。この近点移動に伴う変化が 55 年の変光周期です。



【参考：セカンダリーの軌道の変化と閃光が観測されるタイミングの関係を解説した動画】

OJ 287 の中心部に大きなブラックホールの連星があるというモデルは長年支持されてきたものの、セカンダリーの存在を示す証拠が存在しない状態が長く続いていました。OJ 287 は地球から約 35 億光年先と極めて遠い銀河である上に、セカンダリーはプライマリーにかなり接近しているため、これらを分離して観測することができなかったためです。トゥルク大学の Mauri J. Valtonen 氏らの研究チームは、事前に予測されていた 2022 年の閃光について、相対性理論を考慮した正確な時期の推定を行い、OJ 287 の観測を試みました。その結果、事前に予測された時期に閃光が観測されましたが、その中に約 1 日間だけ、非常に明るさが増大する時期が含まれていることが分かりました。これは全くの予想外であり、短時間に天の川銀河の 100 倍の放射を行っていることが初めて観測されました。分析の結果、セカンダリーがプライマリーの降着円盤に突入した直後、大量の物質が一気に吸い込まれたことで生じたジェットの加速が短時間の急激な放射の原因であることが判明しました。このような放射はセカンダリーが存在しなければ説明することは困難なため、今回の観測結果は OJ 287 のセカンダリーの実在を強く支持するものです。過去のデータにはこのような急激な放射が記録されていないことから、今回観測されたような短時間の放射はたまたま見逃されていた可能性が高いことも分かりました。OJ 287 は天球上の見た目の位置が太陽に近付くことがあり、全ての閃光を観測できているわけではないので、観測精度が高くなった近年でも短時間の変化を見逃す余地が十分にある状態でした。Valtonen 氏も「(今まで見逃されていたのは) たまたま不運に見舞われていただけだ」と述べている通り、セカンダリー由来のシグナルを観測できたのは技術革新の成果だけでなく、運も絡んでいたこととなります。

OJ 287 の中心に存在する 2 つの超大質量ブラックホールは、非常に周期の長い重力波を放出しているとされているブラックホールの連星としても注目されています。今回の研究によってセカンダリーの存在がほぼ確実になったことで、重力波望遠鏡による観測が強化されるかもしれません。

Source

[Mauri J. Valtonen, et.al.](#) "Refining the OJ 287 2022 impact flare arrival epoch". (Monthly Notices of the Royal Astronomical Society)

[Mauri Valtonen.](#) "First Detection of Secondary Supermassive Black Hole in a Well-Known Binary System". (University of Turku)

[Lankeswar Dey, et.al.](#) "Authenticating the Presence of a Relativistic Massive Black Hole Binary in OJ 287 Using Its General Relativity Centenary Flare: Improved Orbital Parameters". (The Astrophysical Journal)

文／彩恵りり

<https://news.mynavi.jp/techplus/article/20230621-2709851/>

アルマ望遠鏡で大質量星形成の独自メカニズムを示唆する新たな証拠を観測

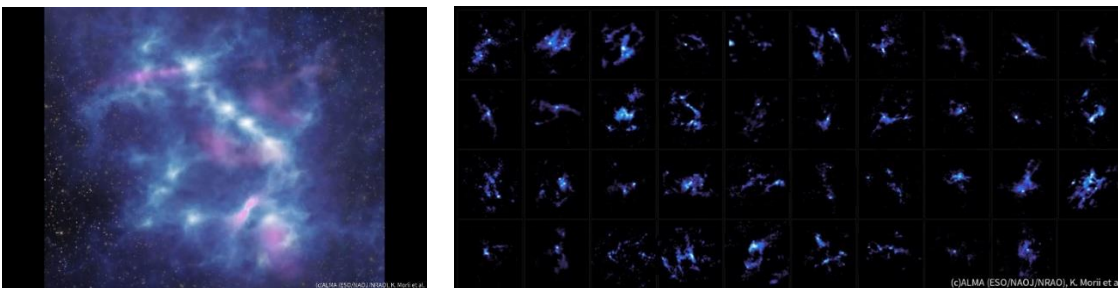
掲載日 2023/06/21 17:21 著者：波留久泉

国立天文台(NAOJ)と東京大学(東大)の両者は6月20日、アルマ望遠鏡を用いて、太陽の8倍以上の質量を持つ大質量星が誕生すると期待される領域で、これまでにないほど多くの“星の種”を発見し、大質量星の形成には星の種がガスをさらに集める必要があることがわかったと共同で発表した。

同成果は、東大/NAOJの森井嘉穂大学院生、NAOJのパトリシオ・サヌエーサ特任助教、NAOJ 科学研究部の中村文隆准教授らの国際共同研究チームによるもの。詳細は、[米天体物理学専門誌「The Astrophysical Journal」に掲載された。](#)

太陽のような小質量星の場合、核融合反応は水素からヘリウムでほぼ終了となる(最終盤にヘリウムの暴走的な核融合であるヘリウムフラッシュが起きて、炭素までは生成されると考えられている)。それに対し太陽の8倍以上の大質量星は、その先も核融合を続け、宇宙で最も安定した元素である鉄までが生成される。そして最終的に超新星爆発を起こし、惑星を形成し、生命を生み出すために必要な重元素の数々を宇宙に拡散させるのである。なお超新星爆発は、鉄よりも先の重元素を生成する現場の1つと考えられている。

しかし、大質量星は小質量星と比べると非常に希少であり、天の川銀河の中での割合では、主系列星のうちで質量の大きい順に上から3種類(O型星・B型星・A型星)を合わせても1%に満たないとされる。さらにそれらは遠方に位置していることから詳細な観測も難しく、大質量星の形成過程はいまだ確立されておらず、小質量星の形成と比べ不明な点が多く残っているのである。そこで研究チームは今回、大質量星がどのように誕生したのか、太陽のような星と同様にできているのかを探るため、このような重たい星が誕生すると期待されるものの、まだ星が形成されていない静穏な領域を対象に観測したとする。星形成の初期段階を明らかにし形成過程を議論するには、小質量星形成領域における先行研究相応の、星の種を識別できるほどの観測性能が求められるという。加えて、典型的な星の種の性質を知るには、統計的な研究と大きなサンプル数も必要となる。そこで今回は、大質量かつ高密度で大質量星を誕生させると期待される塵の雲からなる39の領域をアルマ望遠鏡で観測した。これらの雲は赤外線観測では暗いシルエットとして見えることから、「赤外線暗黒星雲」として知られている。今回対象とした赤外線暗黒星雲は、冷たく、これまでに星が形成されている兆候が見つかっていなかったことから、大質量星が誕生する前の状態と考えられ、星の形成過程を調べるのに最適な環境であることが考えられるとする。アルマ望遠鏡による電波の観測では、冷たい塵やガスが密集した星の種を見るのが可能だという。



赤外線暗黒星雲の内部構造の想像図。星の材料であるガスと塵の分布が、密度が高くなるにつれ青から白色で表されている。また、形成されたばかりの原始星の中には、ガスを噴出するものがあり、ピンク色で表されている。(c)ALMA (ESO/NAOJ/NRAO), K. Morii et al.(出所:NAOJ 科学研究部 Web サイト)

この39領域の観測では、雲に埋もれている800個以上の星の種(分子雲コア)が検出された。これは、赤外線暗黒星雲で特定されたこれまでで最大のサンプルだといい、これらのコアは、将来の大質量星形成の最も有望な場所を表しているとしている。

アルマ望遠鏡で観測された39領域の塵の分布。(c)ALMA (ESO/NAOJ/NRAO), K. Morii et al.(出所:NAOJ 科学研究部 Web サイト)

小質量星の形成シナリオでは、初期のコア質量の約30%~50%が星の質量に変換され、残りのほとんどは原始星から噴き出すガス流(アウトフロー)として放出される。これと同様に大質量星も形成されると仮定した場合、これらの星の種の99%以上は、大質量星を形成するのに必要な質量を持っていないことが明らかになった。つまり今回の研究は、大質量星形成領域にあるコアは、周囲のガスを取り込むことで成長する必要があることを示唆しているという。研究チームはこれらの結果が、大質量星には小質量星とは異なる星の形成メカニズムが存在することを支持しているとする。さらに今回、コアの分布の調査も行われた。星の集団を見ると、大質量星はまとまって、小質量星は散らばって存在している。もし大質量星が大質量なコアから形成されるとすると、星の種の段階においても大質量コアと小質量コアの分布に違いが見られる可能性が期待される。しかし今回の観測で得られた統計データを分析したところ、期待に反し、大質量のコアも小質量のコアと同様に散らばって分布している様子が見られたとのこと。その代わりに、より密度の高いコアが集まって存在する傾向があったとする。これは、大質量のコアよりも密度の高いコアが、大質量星に成長する可能性を示唆するとしている。

今回の研究成果は、大質量星の形成が小質量星とは異なる成長シナリオを持つ可能性を、これまでの研究よりも多くのサンプルからより確実に示すという。また、クラスター内のより密度の高いコアは、周囲の物質を蓄積することでより効率的に成長する可能性があることが推測できるとし、大質量星形成の初期段階では、星の種の初期質量よりもその密度が重要だとしている。

<https://news.mynavi.jp/techplus/article/20230620-2708816/>

銀河中心ではブラックホール同士が次々と合体？ 国立天文台が新説を発表

掲載日 2023/06/20 19:11 著者: [波留久泉](#)

国立天文台(NAOJ)は6月19日、2019年に重力波が検出された太陽質量の約85倍と約66倍のブラックホールの合体イベントにおける、2つのブラックホールが理論的に予想されていたよりも著しく重いこと、合体に付随して突発的な可視光の放射が観測されたことの2点の謎を説明可能な新たな説を発表した。

同成果は、NAOJ 科学研究部の田川寛通特任助教らの国際共同研究チームによるもの。詳細は、[米天体物理学専門誌「The Astrophysical Journal」に掲載された。](#)

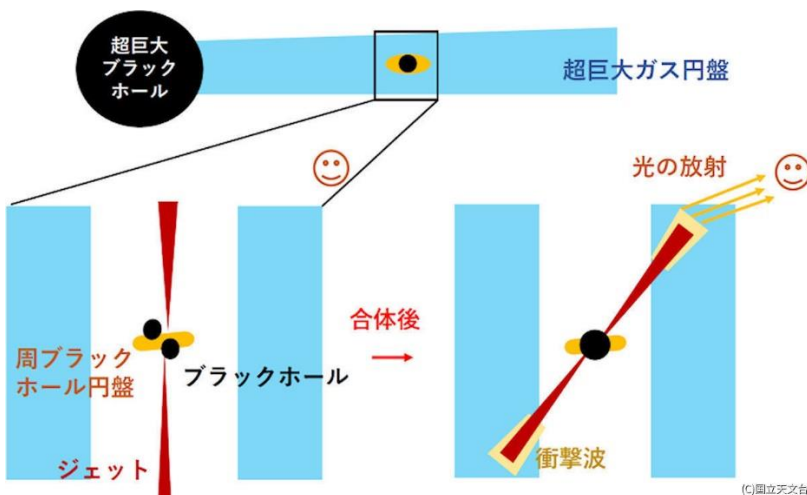
2016年2月に米国の重力波望遠鏡「LIGO」が、13億光年彼方で、それぞれ太陽質量の約36倍・約29倍のブラックホールの合体イベント「GW150914」による重力波を検出して以降、現在では、隔週程度の頻度で重力波観測によりブラックホールの合体が発見されている。

これだけ頻繁に観測されているとなると、ブラックホールの合体は、2つのブラックホールが強大な重力でお互いを引きつけ合って、一気に正面衝突で合体するようなイメージを持ってしまいが、そうではないという。2つのブラックホールはある程度まで接近するが、共通重心を回る連星ブラックホールとなり、膠着状態に陥ってしまうと考えられているからだ(3つ目のブラックホールにより均衡が崩れて合体するという説などがある)。そのため、宇宙のどこでどのようにして対をなし、そして合体に至ったのかなど、まだよくわかっていない点が多く残されているとする。そうした中、2019年5月に、LIGOとイタリアの重力波望遠鏡「Virgo」が、それぞれ太陽質量の約85倍・約66倍のブラックホールの合体による重力波イベント「GW190521」を報告。同イベントでは、これまで理論的に予想されていた質量よりもブラックホールが著しく重いことに加え、合体に付随して突発的な可視光の放射が観測された。これらの特異な特徴は、通常的环境下での合体シナリオでは説明が難しく、議論が続いているという。そうした中で研究チームは、ブラックホールが対になり合体を起こす領域として、銀河の中心領域に注目したとする。宇宙の大多数の銀河の中心領域には、太陽の数百万倍から数十億倍という大質量ブラックホールが存在しており、それらはしばしば回転する巨大ガス円盤に囲まれている。これらの巨大ガス円盤内には、たくさんの恒星級ブラックホールが存在するとされ、それらはガスやほかの天体との相互作用によ

り均衡状態が崩れやすいので、時間をかけてお互いに近づいて対をなして合体する。さらに連続した合体によって、GW190521において観測されたような重いブラックホールを形成可能であることが、田川特任助教らのこれまでの研究により明らかにされている。またこの環境では、巨大ガス円盤からブラックホールへのガスの降着によって、電磁波が放射される可能性があるという。しかしこれまでは、GW190521に付随して観測されたような可視光放射の特徴や、電磁波がブラックホール合体の後にのみ放射される過程を説明できる物理過程が解明されておらず、この光の放射の付随は偶然の一致によるものであると広く解釈されていた。

このような背景の下、研究チームは今回、明るい電磁波の放射を作り出す過程として、ブラックホールから放出されるジェットと、巨大ガス円盤内のガスとの衝突により生じる強い衝撃波からの放射に着目したという。

このシナリオでは、一部のブラックホール合体事象に電磁波放射が付随することが予想されるとする。これは、連星ブラックホールが合体するとブラックホールのスピンの向きが合体前後で変わることにより、合体後に出るジェットが再び活動銀河核の円盤と相互作用して衝撃波を形成するためだという。その衝撃波が円盤表面に達すると、さまざまな波長で観測可能な電磁波が放射される。このシナリオにより、過去に報告されている重力波イベント GW190521 と電磁波の対応天体候補を説明可能であることが明らかになった。



放射過程の概略図。ジェットの方向がブラックホールの合体時に変化し、冷たいガスと衝突して強い衝撃波を形成することで、電子が加熱・加速され、合体に付随して電磁波が放出される。(出所:NAOJ 科学研究部 Web サイト)

さらにこの現象から、ブラックホール合体の起源、活動銀河核円盤の構造、宇宙論、プラズマ物理、重力理論の理解の向上など、さまざまな天文学・物理学的進展が見込まれることから、研究チームは、今後の連星ブラックホール事象に対する電磁波追観測が期待されるとしている。

<https://sorae.info/astronomy/20230622-hd190412c-diamond.html>

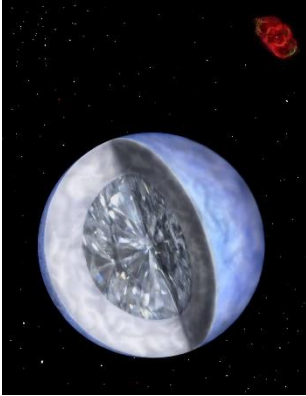
白色矮星「HD 190412 C」はダイヤモンドになりつつある？ 結晶化の観測的証拠

を初めて発見！

2023-06-22 彩恵りり

「白色矮星」は“宇宙最大のダイヤモンド”と例えられることがあります。現在の宇宙に存在する白色矮星は全体がダイヤモンドのように結晶化しているわけではないため、厳密に言えば誤りなのですが、サザンクイーンズランド大学の Alexander Venner 氏らの研究チームは、地球から約 104 光年の距離にある白色矮星「HD 190412 C」で結晶化が始まっている証拠を観測しました。白色矮星の結晶化が直接の観測結果から確かめられたのは今回が初めてです (※1)。

※1...2004年に「BPM 37093（ケンタウルス座 V886 星）」という白色矮星について、全体の約90%が結晶化していると推定した研究結果が発表されていますが、これは星震のデータをモデル化した研究であり、間接的な証拠に基づいています。これに対し、HD 190412 Cを対象とした今回の研究は、白色矮星から放出される光を直接観測して推定したものです。



【▲ 図: 内部が結晶化した白色矮星の想像図。白色矮星の保持した熱は宇宙空間へと逃げ、中心部から結晶化していくと考えられる。今回初めて HD 190412 C にて結晶化の観測的証拠が見つかった (Credit: Travis Metcalfe & Ruth Bazinet, Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics)】

白色矮星とは、超新星爆発しない太陽のような軽い恒星が赤色巨星の段階を経て進化した天体です。外層からガスや塵を放出し、硬い芯（コア、中心核）だけが残されたコンパクト星であり、中心部の核融合反応は停止しています。太陽程度の質量が地球程度の大きさに閉じ込められているため、白色矮星は強大な重力で圧縮されており、主な成分である炭素原子と酸素原子は極限まで縮められています (※2)。

※2...白色矮星を構成する“元素”の組成は、元の恒星の質量によって変化します。最も一般的な白色矮星の組成は炭素と酸素ですが、軽い恒星由来の白色矮星はほとんどがヘリウムで構成され、逆に重い恒星由来の白色矮星はネオンやマグネシウムが多いと言われています。

白色矮星は、恒星の中心核だった頃の余熱のみを保持し、新たな熱が発生しない“死んだ星”であるため、宇宙空間に熱を放出して冷えていく一方の天体です。温度が下がるに従って、白色矮星を構成する原子の配置は中心部から外側へと順に、ランダムな状態から整列した状態へと変化.....つまり結晶化が発生すると考えられます。白色矮星が“ダイヤモンド”と表現されるのは、高温高压の環境下で炭素原子の結晶が現れると考えられるからです (※3)。

※3...ただし、白色矮星の環境は超高温・超高压であるため、内部が本当にダイヤモンドなのか、それとも別の結晶構造が現れるのかは分かっていません。

白色矮星全体が冷え切るには1000兆年かかると言われています。私たちの宇宙はその0.001%程度の時間しか経過していないため、全体が結晶化してダイヤモンドになった白色矮星は、まだ私たちの宇宙には存在しません。しかし、現在の宇宙にも冷却が始まる初期段階の白色矮星は存在するため、一部で結晶化が始まっているもおかしくありません。では、白色矮星で結晶化が始まっていることを示す証拠はどうすれば見つけれられるのでしょうか。Venner氏らは、HD 190412 Cとその周りにある天体の関係性から証拠を発見しました。

HD 190412 Cは四重連星HD 190412星系を構成する天体の1つであり、残りの3つは全て恒星です。恒星と白色矮星にはそれぞれ独立した年齢の算出方法があり、またいくつかの手法によって年齢差を絞り込むことができます。白色矮星の年齢は表面温度をもとに、つまり“冷め具合”をもとに推定することができます。

ところが、白色矮星の内部で結晶化が起こると、結晶化による熱（潜熱）が放出されて、白色矮星は加熱されます。結晶化による熱は表面温度から推定される年齢を大幅にずらし、白色矮星を実際の年齢よりも“若く”見せることになるのです。この推定年齢のズレは、結晶化が起きていることを示す具体的な証拠となりえます。

観測の結果、HD 190412 星系全体の年齢は約 73 億年と推定された一方で、HD 190412 C の年齢は白色矮星になる前の恒星だった頃も含めて約 42 億年であると推定されました。星系全体の年齢に対する 31 億年という大幅なズレは、HD 190412 C が再加熱されたために実際よりも“若く見える”ことで生じたと考えられます(※4)。これは、内部で結晶化が始まっていることを示す有力な証拠です。今回の観測結果に基づくと、HD 190412 C は中心部の約 65%が結晶化していると推定されます。

※4...HD 190412 C を生み出した元の恒星はかなり重く、寿命は 2 億 9000 万年程度だったと推定されます。このため、白色矮星になる前の時間は 31 億年というズレの中ではほとんど無視できると考えられます。

ただし、星系全体の推定年齢には使用された算出方法によってばらつきがあり、31 億年というズレの推定値にはプラスマイナス 19 億年という大きな幅が残っています。白色矮星の内部について細かく推測するには、HD 190412 星系の年齢の不確かさを 10 億年以内にしないといけないため、今回のデータだけでは、白色矮星の内部の様子を具体的に構築することはできません。また、白色矮星の内部に含まれる微量成分（ネオン 22）が結晶化に伴って分離する効果により、さらに 10 億年程度の冷却速度の低下が起こると言われていますが、これについてもはっきりしたことは分かっておらず、これの影響も注目されます。

しかし、地球から約 104 光年という近い距離にある白色矮星で結晶化の証拠が見つかったということは、他の白色矮星でも同様の現象が発生していると予測されます。多数の白色矮星を観測することで、白色矮星の内部で起こる現象についてさらに具体的なことが分かるようになるかもしれません。

Source [Alexander Venner, et.al.](#) “A Crystallizing White Dwarf in a Sirius-Like Quadruple System”. (arXiv)

[Bob Yirka.](#) “A white dwarf’s journey to crystallizing into a celestial diamond”. (Phys.org)

[Michelle Starr.](#) “White Dwarf Star Enters Its Crystallization Era, Turning Into A 'Cosmic Diamond'”. (science alert)

[H. M. van Horn.](#) “Crystallization of White Dwarfs”. (Astrophysical Journal)

[A. Kanaan, et.al.](#) “Whole Earth Telescope observations of BPM 37093: A seismological test of crystallization theory in white dwarfs”. (Astronomy & Astrophysics)

文／彩恵りり