

みんなでふたたび木星へ、そして氷衛星へ その9 ～JUICE 衛星搭載非熱的中性粒子観測器 PEP/ JNA: 打ち上げ後初期チェックアウト報告～

浅村 和史¹, 下山 学², 二穴 喜文², 三好 由純³, 坂野井 健⁴, 齋藤 義文¹,
JUICE-PEP/JNA チーム

(要旨) 欧州宇宙機関 (ESA) の木星探査機 JUICE が 2023年4月14日に打ち上げられました. JUICE 衛星にはプラズマ粒子環境観測を行う観測器パッケージ PEP (Particle Environment Package) が搭載されています. そして, PEP を構成する観測器の一つに非熱的中性粒子観測器 JNA (Jovian Neutrals Analyzer) があり, 欧州チームとともに私たちが開発を行いました. 打ち上げ後, JUICE 衛星は木星に向け順調に飛行を続けており, 各機器の初期チェックアウトが順次行われています. PEP/JNA のチェックアウトも進められ良好な結果が得られています. ただし, 現時点ではチェック項目がまだ残っており, 宇宙空間で非熱的中性粒子の信号を得るには至っていません. 今後行われるチェックアウト運用を経て, 木星磁気圏での本格的な観測に臨みたいと考えています.

1. PEP/JNA の科学

1.1 非熱的中性粒子の生成

木星は固有磁場を持ち, その周囲には強大な磁気圏が形成されています. そして, 木星の磁気圏を周回する氷衛星は様々な形で磁気圏プラズマと相互に影響しあっています. 例えば, 希薄な大気しか持たない氷衛星に磁気圏の高エネルギーイオンが降りこんでくると, 衛星表面に衝突します. 衝突したイオンの一部は後方に散乱され磁気圏に戻っていきますが, このとき衝突前にもともと持っていたエネルギーの一部を失い, 低エネルギー化します. また, 衝突・散乱の際には周囲の天体表面構成粒子との多重回の衝突を経るため, 放出時の荷電状態は粒子種やエネルギーなどによって統計的に定まる平衡状態に従うと考えられ, 正イオンや負イオン, または中性粒子と

なっています. 磁気圏内のプラズマ粒子は電磁場の影響を受けて運動し, 同じ場所で同じエネルギー・運動方向を持っていたとしても, 荷電状態が異なるとその後の運動は全く異なるものとなります. 特に, 中性粒子となった場合は電磁場の影響を受けないこととなります. 中性粒子は重力の影響のみを受けて飛行し, プラズマの系から見ると粒子の一部が消失することになります.

磁気圏高エネルギーイオンと衛星表面との衝突では, 衛星表面構成粒子が運動量交換によって宇宙空間にたたき出されることがあります. この過程はスパッタリングと呼ばれます. たたき出されたスパッタリング粒子も周囲の衛星表面構成粒子や入射してきた磁気圏イオンとの多重回の衝突を経て放出されているため, 荷電状態が変化し, 正イオン, 負イオン, または中性粒子となります. そして, スパッタリング過程によるイオンの放出はその場所でのプラズマ粒子の生成を意味し, プラズマの密度, 温度, バルク速度といった構造を変化させます. 一方, 中性粒子として放出されたスパッタリング粒子は, 中性の後方散乱粒子と同様に重力の影響のみを受けることとなり,

1.宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所

2.Swedish Institute of Space Physics

3.名古屋大学宇宙地球環境研究所

4.東北大学惑星プラズマ・大気研究センター

asamura@stp.isas.jaxa.jp

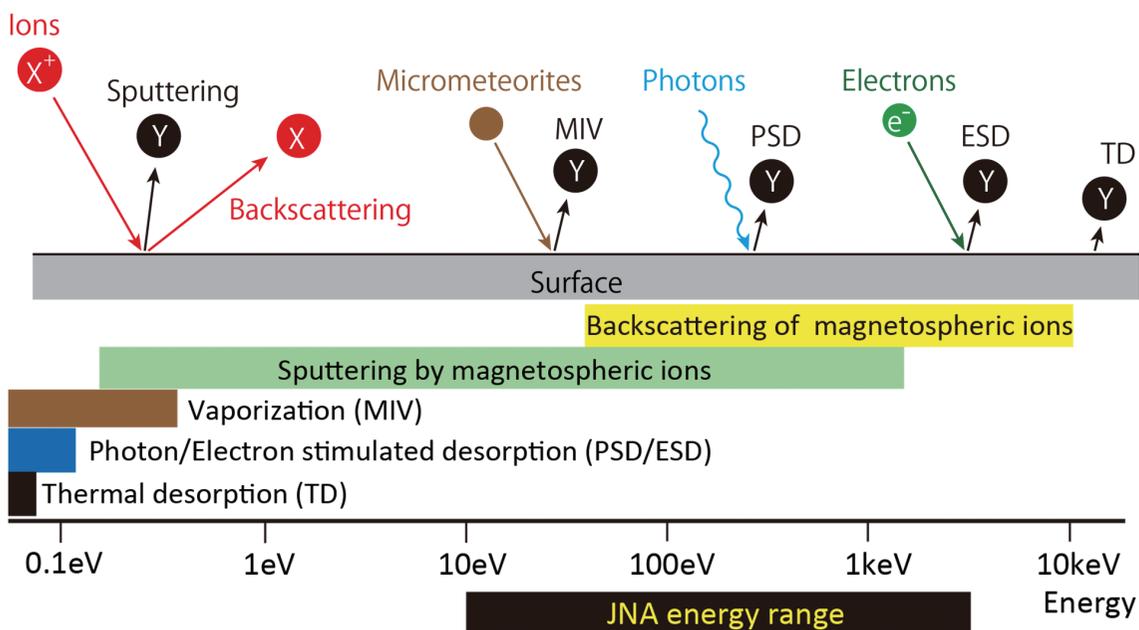


図1: 大気が希薄な天体表面からの粒子放出過程と放出粒子の典型的なエネルギー帯。PEP/JNAは10eV–3.3keVのエネルギー範囲に感度を持っています。[1]より転載

遠隔地まで飛行します。これらの中性粒子は、中性である限りその場でのプラズマ現象に影響を与えることはあまりありません。しかし、長距離を飛行する間に周囲のプラズマ粒子との電荷交換衝突や光子による光電離などが起こり、荷電状態が変わってイオンとなることがあります。そして、一旦イオンとなってしまうえば電磁場の影響を受けてプラズマとしての振る舞いを示すようになり、その場でのプラズマ現象に影響を与えるようになります。

このように、プラズマ粒子の衛星表面への降り込み、そして後方散乱過程、スパッタリング過程による粒子放出やその後の電離は木星磁気圏プラズマ粒子の消失・生成に寄与しており、衛星を介した磁気圏プラズマ粒子の輸送過程の一翼を担っています。しかし、その実態はほとんど分かっていません。

後方散乱現象やスパッタリング現象は磁気圏高エネルギーイオンが衛星表面に直接衝突することによって引き起こされる現象ですので、比較的高いエネルギーを持った非熱的粒子の放出が可能です。一方、後方散乱とスパッタリング以外の衛星表面からの粒子放出過程には、宇宙塵/太陽光/電子衝

突による粒子放出 (MIV; Micrometeorite Impact Vaporization / PSD; Photon Stimulated Desorption / ESD; Electron Stimulated Desorption), 熱脱離 (TD; Thermal Desorption) などがあります。しかし、これらの過程は放出粒子のエネルギーが相対的に低く、最も高い宇宙塵衝突による放出過程であっても2500 – 5000K (0.2–0.5 eV) 程度の熱的なエネルギー分布になると考えられています (図1)。このため、非熱的なエネルギー帯に感度を持つ中性粒子観測器を用いて衛星表面方向を観測すると、後方散乱粒子とスパッタリング粒子のみを選択的に観測することができます。そして、その生成起源となっている衛星表面に降り込む高エネルギーイオンの情報の取得にもつながります [2, 3]。JUICE衛星に搭載したPEP/JNA観測器はこのような後方散乱過程、スパッタリング過程で放出される非熱的中性粒子を観測するように設計されています。

1.2 磁気圏プラズマの構造

過去のGalileo衛星の観測からガニメデが固有磁場を持つことが分かっています。ガニメデの公転半

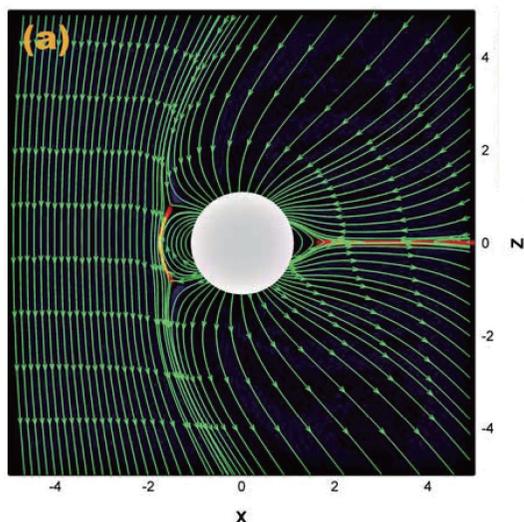


図2: MHDシミュレーションによって得られたガニメデ磁気圏磁場構造。緑線が磁場方向を示します。木星磁気圏プラズマは左側からガニメデに吹きつけています[4]より転載。

径は $15R_j$ (R_j は木星半径) で、木星磁気圏内で木星の自転運動によって引き起こされるプラズマの共回転領域を周回しています。この共回転速度は公転速度より速いため、ガニメデの固有磁場に対し木星磁気圏共回転プラズマが吹き付ける状況となり、磁気圏内で独自の衛星磁気圏が形成されると考えられています。図2は MHD (電磁流体力学) シミュレーションによって得られたガニメデ周辺の磁場構造を示しています[4]。ガニメデ周辺では木星磁気圏プラズマ流の速度が亜音速であり、マッハ数が小さいため、ガニメデ磁気圏の上流側 (図2では左側) に衝撃波面が形成されず、Alfvén Wingと呼ばれる特徴的な磁気圏構造が形成されています。なお、太陽風によって形成される太陽系惑星磁気圏の場合、通常太陽風の速度が超音速となっているために磁気圏前面で衝撃波面が形成されます。そして、極めて限られた太陽風条件の下でのみ Alfvén Wing の形成が起り得ることが知られています。

また、図2ではガニメデ磁気圏の赤道域 ($z=0$ 付近) に磁力線の両端がガニメデにつながる「closed」な領域が存在し、その極側には片端のみがガニメデにつながった「open」な領域が広がっています。さらには、磁気圏の後ろ側 (x が正となる側) にウェイク

構造も現れています。これらの構造は地球磁気圏とは大きく異なる様相を呈しています。

プラズマ粒子は磁力線方向に移動しやすい性質を持つため、ガニメデ表面の「open」な磁力線がつながる領域には磁気圏イオンが磁力線に沿って降り込んでくると考えられます。この降りこみは衛星表面で後方散乱粒子やスパッタリング粒子の生成・放出を引き起こします。そしてこれらの過程で放出された粒子の中で、中性粒子は電磁場の影響を受けずにほぼ直線的に飛行することになります。このことは、ガニメデ表面方向から飛んでくる非熱的中性粒子を撮像観測すると、降り込んできた磁気圏イオンのガニメデ表面上の分布情報を得ることができ、それを基にガニメデ磁気圏の空間構造についての情報が得られることを意味しています。これは、地球ではオーロラ発光の撮像観測から磁気圏プラズマ粒子の空間分布情報を引き出していることと似ています。なお、プラズマ粒子の直接観測ではその場に存在するプラズマの詳細情報が得られますが、遠隔地の情報は原理的に取得できません。一方、ガニメデ周辺での非熱的中性粒子の撮像観測ではプラズマの詳細情報を得ることは困難ですが、空間的な大規模構造やその時間変化の推定につながる情報を得ることが期待できます。このようにプラズマの直接観測と非熱的中性粒子の観測はそれぞれ相補的な関係となっています。

磁気圏プラズマ現象の理解は、観測衛星を磁気圏の中に送り込み、プラズマを直接観測することで進んできました。そして、これらの衛星観測は大容量の観測データを取得・地上伝送することができ、衛星の運用もしやすい地球磁気圏で精力的に行われてきました。しかし、磁気圏は中心天体の持つ固有磁場 (磁気双極子モーメントの向きや強度など) や自転速度、中心天体に吹き付けるプラズマ流の速度や密度、磁場方向などのパラメータによって様々な形態をとり得ます。地球磁気圏はこのパラメータの中の一部の限られた範囲を反映しているにすぎず、地球磁気圏の観測だけでは磁気圏プラズマ現象の包括的な理解に至るのは困難と考えられます。ガニメデ磁気圏のような地球磁気圏とは大きく異なる磁気圏の直接探査は、プラズマの分布や輸送、加速、加熱といった磁気圏プラズマ現象の理解を進める上で重要な意味を持っています。

PEP/JNAチームでは、以下の2つの科学目標を設定し、JUICEミッションの目標である氷衛星科学探査の一翼を担おうとしています。

- (a)ガニメデ磁気圏構造、および木星磁気圏プラズマとの相互作用の理解
- (b)木星磁気圏における物質の生成、輸送、消滅に果たす氷衛星の役割の理解

また、PEPは粒子の直接観測を行う機器パッケージで、JNAによる非熱的中性粒子観測に加え、電子やイオン、熱的中性粒子や高エネルギー中性粒子を観測する合計6台の観測器で構成されています。JUICEには磁場やプラズマ波動の観測機器も搭載されており、これらの機器との協調観測を行うことで、ガニメデ衛星磁気圏や木星磁気圏でのプラズマ現象の理解を進めます。

2. PEP/JNA の機器概要

2.1 開発の経緯

私たちはスウェーデン宇宙物理研究所 (IRF; Swedish Institute of Space Physics), ベルン大学 (スイス) と共に非熱的中性粒子観測器を開発してきました。これまでにMars Express (欧州の火星周回探査機), Venus Express (欧州の金星周回探査機), Chandrayaan-1 (インドの月周回探査機), BepiColombo/みお (欧州の水星探査計画に対して日本が提供する周回探査機) に観測器を搭載し、観測に成功しています。JUICE衛星搭載 PEP/JNA (図3)も同じ枠組みで開発を行いました。PEP/JNA はChandrayaan-1, およびみお衛星搭載の非熱的中性粒子観測器 [5, 6] をベースとし、木星系での観測に合わせ角度分解能や耐放射線性をなどを向上させた観測器となっています。

2.2 観測手法

PEP/JNA の観測原理は図4のようになっており、非熱的中性粒子のエネルギー分析、到来方向弁別のほか、質量分析を実現しています。

以下に観測器を構成する要素毎に観測原理を説明します。



図3: PEP/JNAプロトフライトモデル。

- (a)荷電粒子除去部 / Collimator: 入射粒子の中に存在する荷電粒子を静電場によって軌道偏向し、除去します。また、視野外方向から観測器に入射する粒子を除去するコリメータの役割も果たします。
- (b)粒子電離部: 残った中性粒子を Conversion surface に浅い角度で衝突させ、一定の確率で反射・イオン化します。
- (c)エネルギー分析/光子除去部 (Wave energy analyzer): イオン化した粒子の軌道を静電場によって偏向し、特定のエネルギー範囲のもののみを飛行時間分析部に導くことでエネルギー分析を行います。また、光子 (紫外線) が静電場によって軌道偏向されないことを利用し、入射光子を除去します。
- (d)飛行時間計測部: エネルギー分析部から出射した粒子は静電場による加速後、Start surface に衝突します。Start surface では衝突によって二次電子がたたき出され、Start CEMで検出されます。一方、Start surface に衝突し、反射した粒子は Stop CEMで検出されます。そして、二次電子ともとの入射粒子の検出タイミング差を計測すると、粒子の速度が求められます。エネルギー分析によって入射粒子のエネルギーが分かっていることも考慮すると、速度の情報から質量を割り出すことができます。

PEP/JNA の仕様を表1に、プロトフライトモデルの各部の写真を図5に示します。

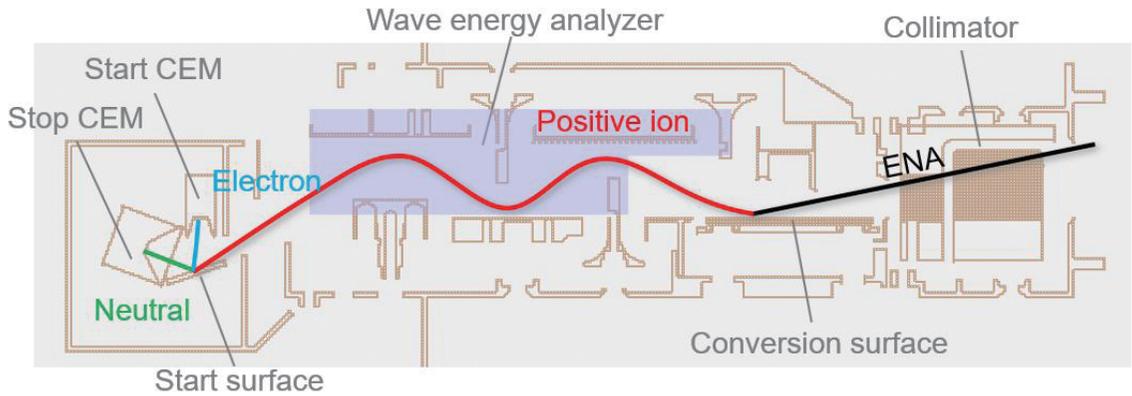
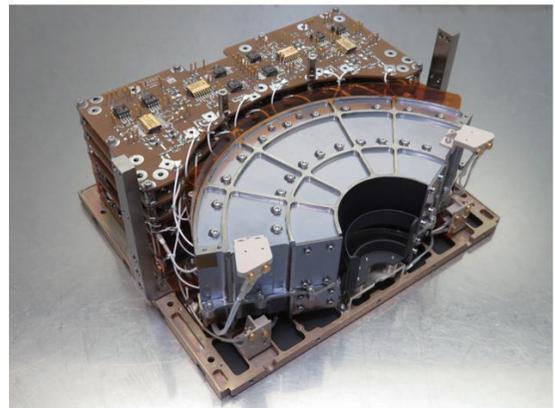


図4: PEP/JNA の観測器断面と模式的な粒子軌道。入射粒子 (ENA: Energetic Neutral Atom) を電離後、エネルギー分析、飛行時間分析を行います。CEM (Channel Electron Multiplier) は電子増倍管の一種で、粒子の検出デバイスとして用いています。



エネルギー分析部 (上半分)



飛行時間計測部とプリアンプボード



Stop CEM アセンブリと Start surface



観測器制御・データ処理基板

図5: PEP/JNA プロトフライトモデルの各部の写真。

表1: PEP/JNA の仕様.

観測対象	非熱的中性粒子
エネルギー	10eV - 3300eV
エネルギー分解能	~1 ($\Delta E/E$)
質量分解	1, Heavy
視野範囲	15° x 150°
角度分解能	7° x 20-25°
感度 (検出効率込)	2x10 ⁻⁴ —2x10 ⁻⁵ cm ² str eV/eV
時間分解能	15s (ノミナル)

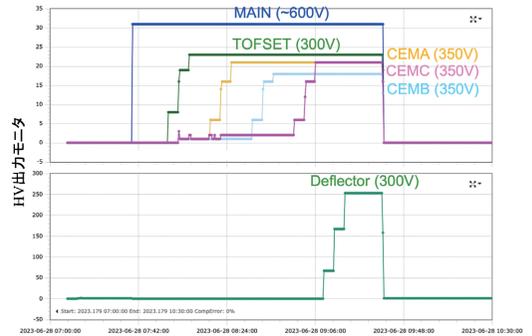


図6: PEP/JNA 高電圧電源チェックアウト時の出力電圧の変化. 高電圧出力の種類とそれぞれの到達電圧が記載されています.

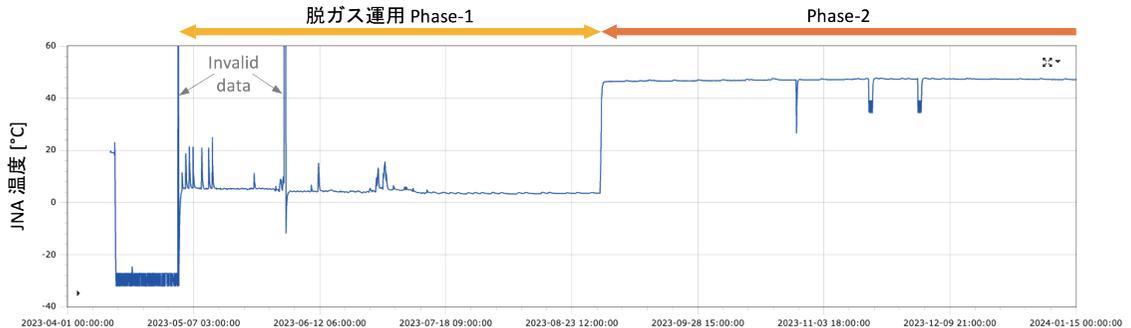


図7: PEP/JNA 温度の推移.

3. 初期チェックアウトの状況

JUICE衛星は 2023年4月14日に打ち上げられました [7, 8]. まず衛星本体の立ち上げとチェックアウトが実施され, その後各観測機器の初期チェックアウトが開始されました.

PEP/JNAのチェックアウトでは, その主要構成要素である, 観測器制御・データ処理部, プリアンプ部, CEM検出器を含む飛行時間計測部, 静電エネルギー分析部, 高電圧電源部の健全性を順次確認します. また, PEP/JNAへの電力供給や後段のデータ処理を担うPEP共通電子回路部の動作確認も同時に行います.

打ち上げ後初めてのPEP/JNAへの電源投入は2023年5月30日のことで, 観測器制御・データ処理部と PEP共通電子回路部の正常動作が確認できました. その後, 機器に組み込まれた疑似検出信号発生

装置を用い, プリアンプの健全動作も確認されました. 電磁干渉ノイズなども出現しておらず, 良好な動作です.

続いて2023年6月28日から30日にかけ, 主に高電圧電源部の機能確認を行いました. 周囲の圧力が十分に低く保たれない状態で高電圧を出力すると, 放電が起きて機器が損傷する恐れがあります. 一般に打ち上げ直後の衛星では, 地上での組み立てや試験時に付着したガスなどの影響で周囲の圧力が高くなることが知られています. そこでPEP/JNAでは, 打ち上げから数年をかけて徐々に高電圧の出力を上げることとしています. 今回のチェックアウトでは出力レベルを最大の10~15% 程度に抑え, 高電圧電源部の機能が正常であることを確認しました (図6).

2024年1月現在, PEP/JNAは脱ガスモードで運用されています. このモードはPEP/JNAに搭載されたサバイバルヒーターの運用を最適化すること

で機器の温度を上げ、機器からの脱ガスを促進するモードです。そして、機器内部をクリーンに保ち、かつ高電圧出力時の放電のリスクを抑制する狙いがあります。図7にJUICE衛星打ち上げからの PEP/JNA の温度変化を示します。打ち上げ直後、 -30°C 程度を推移していた温度は、2023年5月初めの設定変更により $+5^{\circ}\text{C}$ 程度まで上昇しています(脱ガス運用 Phase-1)。更に2023年9月からは冗長系のサブバイパルヒーターも同時に運用することで $+50^{\circ}\text{C}$ 近い温度に達しました(脱ガス運用 Phase-2)。この運用は2024年1月15日まで行い、その後Phase-1時の運用に戻しました。

今後、2024年1月下旬にPEP/JNAのためのPEP共通電子回路部オンボードソフトウェアのアップデートを行います。その後定期的なチェックアウトを経て、2026年夏に高電圧出力を通常運用に必要なレベルまで昇圧し、観測準備を完了する予定です。

4. おわりに

JUICE衛星は今後、月や地球、金星フライバイを経て2031年に木星周回軌道に投入され、木星系での観測を始める予定です。木星軌道投入後は2035年にガニメデ周回軌道投入となりますが、それまでにカリストやエウロパでのフライバイも予定されています。ガニメデ起源の非熱的中性粒子だけでなく、他の衛星やイオトラス起源の非熱的中性粒子などの観測も行い、木星磁気圏のダイナミクスに迫っていければと考えています。

参考文献

- [1] 浅村ほか, 2015, 遊星人 24, 113.
- [2] Grande, M., 1997, Adv. Space Res. 19(10), 1609.
- [3] Futaana, Y. et al., 2006, Planet. Space Sci. doi:10.1016/j.pss.2005.10.010.
- [4] Jia, X. et al., 2008, JGR, doi:10.1029/2007JA012748.
- [5] Kazama, Y. et al., 2006, Adv. Space Res., doi:10.1016/j.asr.2005.05.047.
- [6] Kazama, Y. et al., 2007, Planet. Space Sci., doi:10.1016/j.pss.2006.11.027.
- [7] 関根ほか, 2023, 遊星人 32, 128.
- [8] 齋藤ほか, 2023, 遊星人 32, 222.