

令和 8 年 8 月 25 日



国立大学法人福井大学
国立大学法人筑波大学

宇宙で変わる「バランス感覚」の正体を解明 — 耳の重力センサー「球形囊」が適応の鍵だった —

本研究成果のポイント

- ◆ 耳の中にある「重力センサー」の機能が、宇宙では選択的に変化することを世界で初めて発見しました。
- ◆ 宇宙飛行士と宇宙マウスをつなぐ解析により、重力環境への適応メカニズムを分子レベルから明らかにしました。
- ◆ 本成果は、将来の月・火星探査だけでなく、高齢者の転倒予防や新たな治療法の開発につながることを期待されます。

概要

宇宙飛行士は長期間宇宙に滞在すると、地球へ帰還した直後にふらつきや転倒しやすくなることが知られています。しかし、その原因となる耳の平衡感覚器官がどのように変化するのは、これまで十分に分かっていませんでした。

福井大学学術研究院医学系部門の安部力教授、岐阜大学大学院医学系研究科の森田啓之名誉教授、筑波大学医学医療系の村谷匡史教授らの共同研究グループは、国際宇宙ステーション（ISS）に長期間滞在した宇宙飛行士と、ISS で35日間飼育したマウスを対象に解析を行い、耳の平衡感覚器官のうち「球形囊」^{（注1）}が宇宙環境で選択的に変化することを世界で初めて明らかにしました。また、宇宙飛行士では帰還直後に球形囊の機能低下と姿勢バランスの低下が認められ、その一部は微弱な前庭電気刺激（noisy GVS）^{（注2）}によって改善することも示しました。

本研究は、宇宙環境に対する前庭器官^{（注3）}の適応メカニズムを明らかにした初めての成果です。将来の月・火星探査における宇宙飛行士の健康管理やリハビリテーション技術の開発だけでなく、高齢者の転倒予防や前庭疾患の新たな治療法の開発にもつながることが期待されます。

〈研究の背景と経緯〉

人は地球上で生活する中で、重力を利用して姿勢を保ち、歩行や視線を安定させています。この重力情報を感知しているのが、耳の奥にある前庭器官です。しかし、宇宙空間では重力刺激がほとんどなくなるため、多くの宇宙飛行士は地球帰還後にふらつきや歩行障害などの平衡機能障害を経験します。今後、アルテミス計画や火星探査など、より長期間の宇宙滞在が計画される中で、その原因を明らかにし、予防法を開発することは重要な課題となっています。

これまで、宇宙飛行によって前庭機能が変わることは知られていましたが、耳のどの感覚器官が変化しているのか、その分子メカニズムはほとんど分かっていませんでした。その理由の一つは、耳の前庭器官が非常に小さく、宇宙実験で得られた限られた試料から詳細な遺伝子解析を行うことが技術的に困難だったためです。

研究グループは、国際宇宙ステーション（ISS）で 35 日間飼育したマウスから、耳の前庭器官である球形嚢と卵形嚢^{（注 4）}を個別に回収し、それぞれの遺伝子発現を解析できる独自の技術を開発しました。これにより、宇宙環境によってどの器官が最も影響を受けるのかを分子レベルで調べることが可能となりました。

さらに、本研究でマウスから得られた知見がヒトにも当てはまるかを検証するため、ISS に 157～328 日間滞在した宇宙飛行士を対象に、平衡機能や球形嚢・卵形嚢の機能を詳細に評価しました。マウスで見いだした分子レベルの変化と、宇宙飛行士で認められた生理機能の変化を統合することで、宇宙環境に対する前庭器官の適応メカニズムの解明を目指しました。

〈研究の内容〉

ISS で 35 日間飼育したマウスの球形嚢と卵形嚢について RNA-seq 解析^{（注 5）}を行い、宇宙環境による遺伝子発現の変化を比較しました^{*1}。その結果、球形嚢では数百種類の遺伝子の発現が変化していた一方、卵形嚢では大きな変化は認められませんでした（図 1）。さらに、変化した遺伝子を詳しく解析したところ、神経細胞間の情報伝達を担うシナプス機能や、神経回路の適応に関わる遺伝子群が多く含まれていました。また、球形嚢では、通常は卵形嚢に特徴的な遺伝子発現パターンへ近づく変化が認められ、微小重力環境に適応するために分子レベルで再構築（リモデリング）が起こっていることが示唆されました。

次に、ISS に 157～328 日間滞在した宇宙飛行士を対象に、VEMP 検査^{（注 6）}を用いて球形嚢と卵形嚢の機能を評価しました^{*2}。その結果、球形嚢の機能を反映する cVEMP は地球帰還直後に有意に低下していたのに対し、卵形嚢の機能を反映する oVEMP には明らかな変化は認められませんでした（図 2）。さらに、半規管機能を評価する温度刺激検査（カロリックテスト）でも異常は認められず、宇宙飛行による影響は耳の前庭器官全体ではなく、球形嚢に選択的に生じていることが明らかとなりました。また、宇宙飛行士の姿勢バランスを評価したところ、地球帰還直後には重心動揺が増加していましたが、微弱前庭電気刺激（noisy GVS）^{（注 7）}を行うことで姿勢バランスは有意に改善しました。

以上の結果から、微小重力環境では耳の前庭器官全体が一様に変化するのではなく、球形嚢が選択的に変化することが明らかになりました。また、マウスで認められた球形嚢の分子レベルでの変化と、宇宙飛行士で認められた球形嚢機能の変化は、球形嚢が宇宙環境への適応に重要な役割を果たしている可能性を示しています。

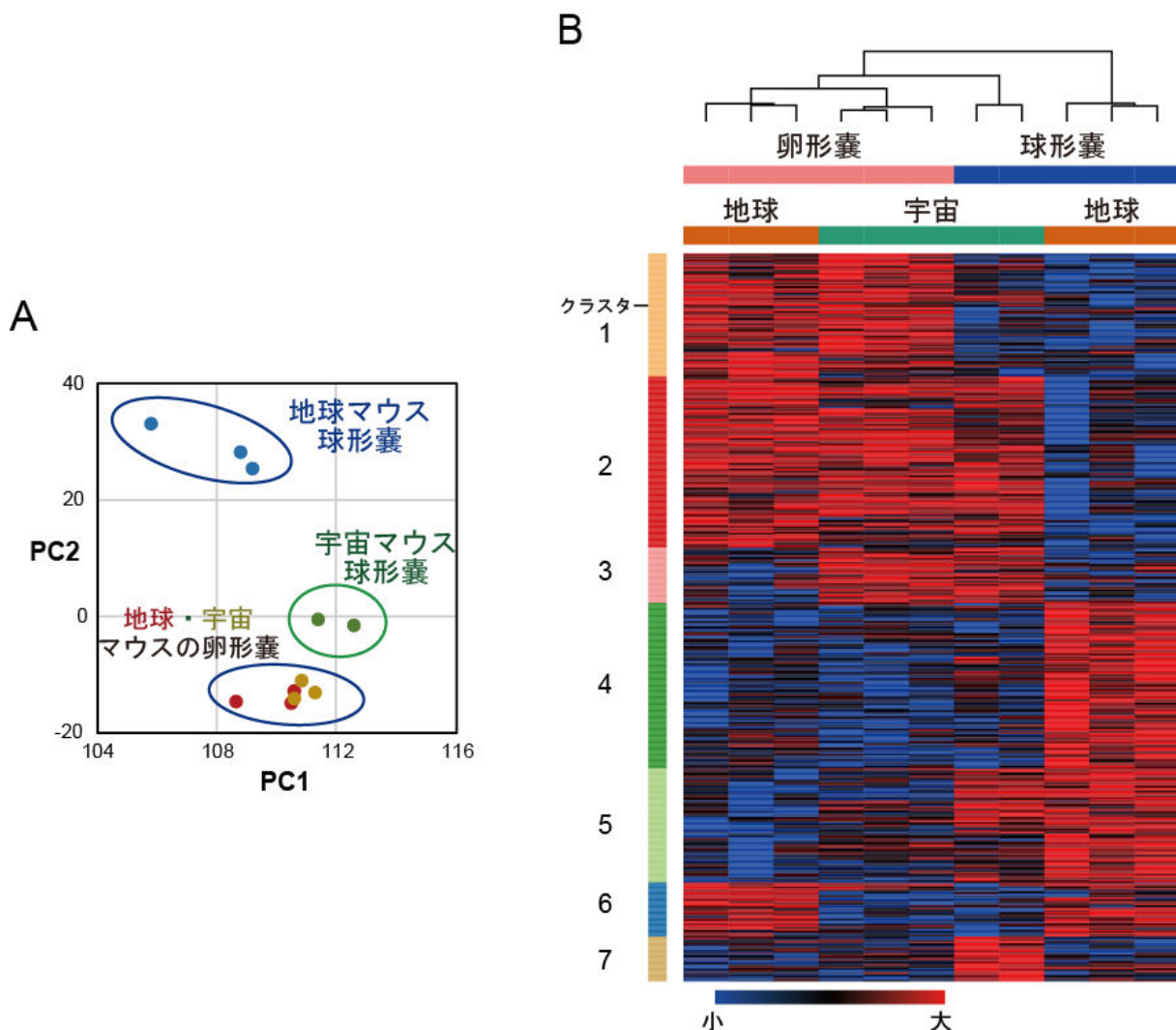
〈今後の展開〉

本研究により、宇宙環境では耳の平衡感覚器官のうち球形嚢が選択的に変化し、これが宇宙飛行士の一時的なバランス機能低下に関与することが示されました。今後は、

球形嚢で変化した遺伝子や神経回路が重力環境への適応に果たす役割をさらに詳しく解析し、その分子メカニズムの解明を進めます。また、本研究で有効性が示された微弱な noisy GVS について、月・火星探査など長期宇宙滞在後のリハビリテーションへの応用を目指すとともに、加齢に伴う平衡機能低下や転倒リスクの高い高齢者、前庭疾患患者に対する新たな予防・治療技術としての応用も期待されます。

〈参考図〉

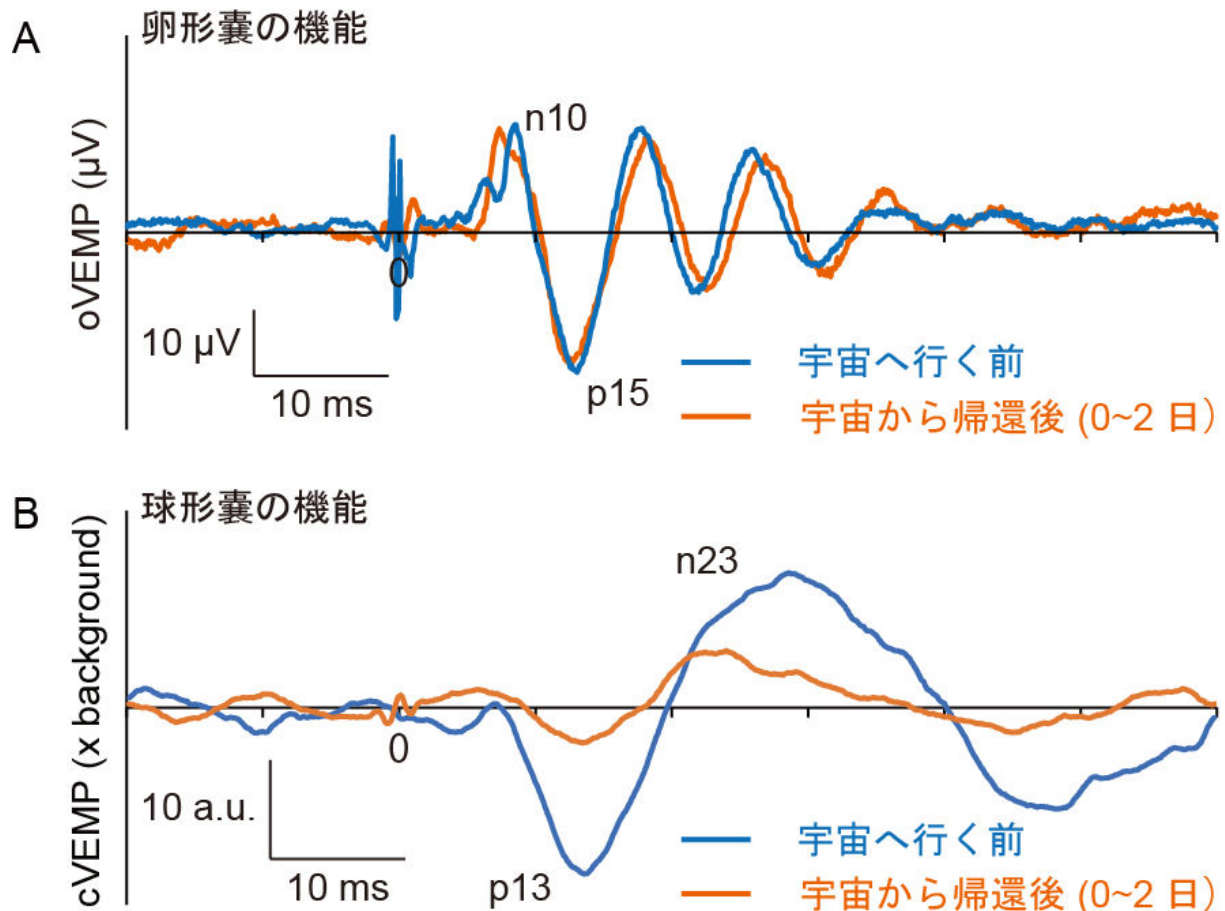
図 1 :



A : マウスの耳の平衡感覚器官（球形嚢・卵形嚢）の遺伝子発現を主成分分析（PCA）した結果。地上で飼育したマウスと宇宙で飼育したマウスの卵形嚢では遺伝子発現パターンに大きな違いは認められませんでした。一方、球形嚢では宇宙マウスの遺伝子発現パターンが地上マウスと大きく異なり、宇宙環境による影響を強く受けることが示されました。

B : 遺伝子発現のヒートマップ。赤色は遺伝子発現量が高いこと、青色は低いことを示しています。宇宙環境では球形嚢において多数の遺伝子の発現が変化した一方、卵形嚢では大きな変化は認められませんでした。これらの結果から、耳の平衡感覚器官全体が一様に変化するのではなく、球形嚢が選択的に重力環境へ適応することが明らかになりました。

図 2 :



A: 卵形囊の機能を評価する検査（oVEMP）の代表波形。宇宙飛行前（青）と地球帰還後（橙）を比較しても、波形に大きな変化は認められず、卵形囊の機能はほぼ維持されていました。

B: 球形囊の機能を評価する検査（cVEMP）の代表波形。地球帰還後（橙）では、宇宙飛行前（青）と比べて波形の振幅が小さくなり、球形囊の機能が一時的に低下していました。

〈用語解説〉

（注 1）球形囊（きゅうけいのう）

前庭器官の一つで、主に上下方向の重力や加速度を感じる「重力センサー」です。

（注 2）noisy GVS（ノイジー前庭電気刺激）

耳の後ろから非常に弱い電気刺激を与え、前庭機能を補助する技術です。

（注 3）前庭器官

耳の奥にあり、重力や体の動きを感じ取る感覚器官です。姿勢や歩行、目の動きを安定させる重要な役割を担っています。

（注 4）卵形囊（らんけいのう）

前庭器官の一つで、主に水平方向の加速度や頭の傾きを感じる感覚器官です。

(注 5) RNA-seq (RNA シーケンス解析)

細胞の中でどの遺伝子がどの程度働いているかを網羅的に調べる解析手法です。本研究では、宇宙環境による球形嚢と卵形嚢の遺伝子変化を解析しました。

(注 6) VEMP (Vestibular Evoked Myogenic Potential : 前庭誘発筋電位)

耳の平衡感覚器官の働きを調べる検査です。本研究では、人の球形嚢や卵形嚢の機能を評価するために用いました。

(注 7) 温度刺激検査 (カロリックテスト)

外耳道に温水または冷水を注入して半規管を刺激し、その刺激によって生じる眼球運動を測定することで、耳の平衡感覚器官の一つである半規管の機能を調べる検査です。

〈論文タイトル〉

Selective saccular plasticity under microgravity links peripheral transcriptomic remodeling to postflight vestibular dysfunction

微小重力環境で耳の「球形嚢」が選択的に適応する仕組みを解明：宇宙飛行後の平衡機能低下との関連を実証

〈著者〉

Chikara Abe, Shin-ichiro Fujita, Dai Shiba, Kunihiro Tanaka, Chisato Fujimoto, Shigeto Tokunaga, Shinichi Iwasaki, Satoru Takahashi, Masafumi Muratani, Hironobu Morita

責任著者のみ

安部 力 (福井大学 学術研究院医学系部門 医学領域 形態機能医科学講座
生理学分野 教授)

森田 啓之 (岐阜大学 大学院医学系研究科 名誉教授)

村谷 匡史 (筑波大学 医学医療系 教授)

〈発表雑誌〉

「*Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* (PNAS)」

(2026 年 8 月 17 日に掲載) 巻数、掲載ページ: 123 (35) e2605593123

77[°]ストラクト URL : <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.2605593123>

DOI 番号 : <https://doi.org/10.1073/pnas.26055931>

〈研究支援〉

- ・ ^{*1} 宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 重点課題 : (14YPTK-005512, 19YT000341, 20YT000259, and 21YT000128):
<https://humans-in-space.jaxa.jp/kibouser/subject/life/70781.html>
- ・ ^{*2} 宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 「きぼう」利用フィジビリティスタディ
<https://humans-in-space.jaxa.jp/kibouser/subject/life/70552.html>
- ・ 日本学術振興会 科学研究費助成事業(科研費) 新学術領域研究: 15H05940
- ・ 日本学術振興会 科学研究費助成事業(科研費) 基盤研究(C): 18K06850
- ・ 日本学術振興会 科学研究費助成事業(科研費) 挑戦的研究(萌芽): 25K22774
- ・ 日本学術振興会 科学研究費助成事業(科研費) 基盤研究(B): 26K02750
- ・ 日本学術振興会 科学研究費助成事業(科研費) 学術変革領域研究(A) (公募) :

26H01852

- ・ 内閣府 戦略的大学改革・イノベーション創出環境強化事業