

宇宙総合学研究ユニット NEWS 2019 年 6 月号



第 3 回宇宙学セミナー開催報告

2019 年度の第 3 回宇宙学セミナーは、5 月 20 日 17 時より理学部 4 号館 504 号室で開催されました。東京大学情報理工学系研究科の眞湊歩先生をお招きして、「ヒトの地磁気感受性の計測」というタイトルでお話しいただきました。今回は学部生、院生、教職員合わせて 16 名が集まりました。セミナーでは、磁気の脳波への影響についてなど、興味深いお話がありました。地球の地磁気が人体へ影響していると考え、宇宙における人の活動にも影響があるかもしれません。様々な分野と協力していくことで、宇宙分野の発展があるのかと益々実感しました。（寺田昌弘 記）

第 4 回宇宙学セミナー開催報告

2019 年 5 月 23 日、第 4 回宇宙学セミナーが理学研究科 4 号館 504 会議室で開催されました。「ブラックホール初撮影の衝撃と今後の展望」と題し、嶺重慎教授(京都大学理学研究科、宇宙総合学研究ユニット ユニット長)がご講演を行いました。

2019 年 4 月 10 日に世界 6 か所で行われた記者会見でブラックホールの影の撮影に成功したことが発表されました。裏話も交えながら、そのブラックホール画像の撮影方法や観測に使用された望遠鏡の原理についてわかりやすく解説していただきました。現在注目される話題に幅広い分野の学生や研究者が多く集まり、参加者から活発に質問が出されました。（伊藤梓 記）

第 5 回宇宙学セミナー開催報告

2019 年 5 月 31 日、理学部セミナーハウスで NASA ゴダード宇宙飛行センターのウラディーミル・アイラペディアン博士をお迎えし、第 5 回宇宙学セミナーが開催されました。アイラペディアン博士は太陽物理の研究者であり、太陽系外惑星のハビタビリティに関する国際プロジェクトを現在行っています。

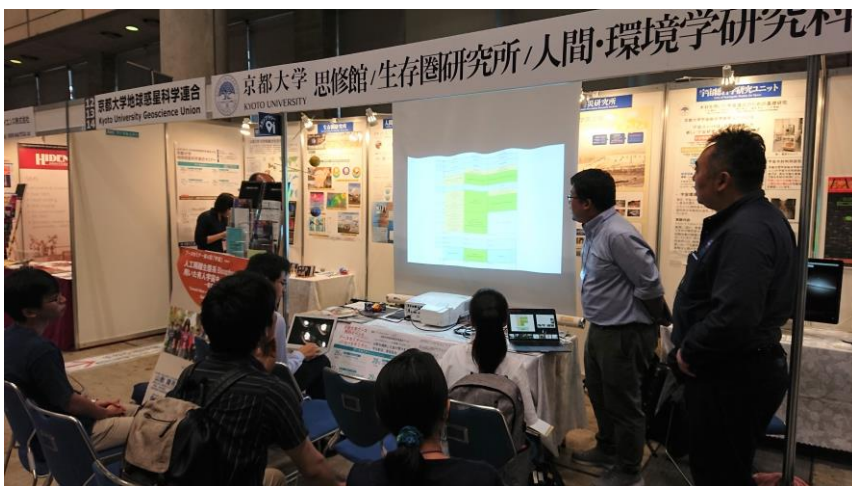
「暗い太陽のパラドックス」を解く鍵はスーパーフレアにあり、スーパーフレアによって亜酸化窒素やシアン化水素が発生し、それが生物の起源となったのではないかという大変興味深いお話をしていただきました。今後の研究の展望やアストロバイオロジーの最新の研究情報を聞ける大変貴重な機会となりました。（伊藤梓 記）

日本地球惑星科学連合(JpGU)2019 年大会出展報告

5月26日から30日にかけて幕張メッセで開催された JpGU2019 年大会に、宇宙ユニットがブース出展しました。ブースには連日多くの研究者、学生が訪れました。

また、29日には、宇宙ユニット副ユニット長の山敷教授がコンビーナを務める、"陸域海洋総合作用-惑星スケール物質循環"と題したセクションにおいて、寺田昌弘特定准教授

は、"The important factors for future human space activity in terms of space medicine" と題した、宇宙長期滞在における健康指標に関する発表を行いました。また、同セクションで三木健司宇宙ユニット RA は"Establishment of new curriculum at Biosphere 2"と題した、Biosphere2 における新たな教育プログラムの構築に関する発表を行いました。(三木健司 記)



今後の宇宙学セミナー・関連イベントなど

日時	内容	場所
6月13日(木) 14:45~16:15	<u>第6回 宇宙学セミナー</u> タイトル：宇宙建築とヒラキガミ 講演者：十亀昭人 氏（東海大学工学部建築学科 准教授）	理学研究科 4号館 5階 504 会議室 一般対象

※宇宙学セミナーの詳細は随時 Web ページ (<http://www.uss.kyoto-u.ac.jp/seminar.html>) で公開いたします。

宇宙医学について

寺田昌弘 特定准教授

(学際融合教育研究推進センター 宇宙総合学研究ユニット)

こんにちは。宇宙総合学研究ユニットの寺田です。私は、2018年4月から宇宙ユニットに着任しました。やっと宇宙ユニットにも慣れて、様々なイベントを通して、多くの学生さんたちと日々楽しく過ごさせていただいております。宇宙ユニットに着任して1年以上経ちましたが、今月の宇宙ユニット NEWS では、私の専門分野についてご紹介させていただきます。

宇宙ユニットに関わっている皆さんなら「宇宙」という言葉から様々な興味深いことを思い浮かべられると思いますが、ライフサイエンス（生命科学）研究においても、非常に興味深いキーワードの一つです。私の専門は宇宙医学です。宇宙医学とは、いわば宇宙飛行士の健康を守るための研究分野です。アポロ

宇宙船時代ではエリート軍人から屈強な男性の宇宙飛行士が主に選ばれていたため、宇宙飛行士と言えば体力は人一倍あり精神力も常人を凌駕しているようなヒーロー的な存在でした。しかし、現在では宇宙飛行士の活躍の舞台は、各国が協力して建設した国際宇宙ステーション（International Space Station: ISS）になりました。宇宙飛行士は通常それぞれのミッションで ISS に約 6 ヶ月間滞在します。そのため、各国の宇宙飛行士が ISS という宇宙に孤立した限られた空間の中で、集団生活することになります。国も文化も違う数名が長期間孤立した環境で生活するため、現代の宇宙飛行士の最も必要な資質としては、協調性があげられます。昔のように体力には絶対の自信があるようなヒーロー的な資質ではなく、優れた任務遂行能力があれば宇宙飛行士に選抜されます。そこで、長期間宇宙空間で任務を遂行してもらうためには、宇宙環境が宇宙飛行士の身体にどのような影響があり、どうすればそれを防止することができるのかを知ることが重要になります。宇宙医学研究は、宇宙環境がどのように人体に影響があるかを観察し、そのメカニズムを探る研究ということができます。

現在宇宙飛行士が活躍している ISS は、地上から約 400 キロメートルの上空を周回しています。地上での距離に換算すると大体東京から京都までの道のり、つまり、もし新幹線で移動できれば 2 時間ちょっとの距離しか離れていないのです。しかし、ここでの環境は微小重力環境です。また、宇宙放射線が降り注いでいる環境でもあります。また、ISS は地球の周りを大体 90 分で 1 周していますので日照時間も地上とは異なります。更に ISS 内は狭い空間に何人も国も文化も異なった飛行士が共同生活する場所となりますので、閉鎖環境という特徴があります。これらの宇宙環境は、人体に様々な影響を与えます。特に、微小重力環境では宇宙飛行士の下肢骨格筋の抗重力筋（主に遅筋線維が大きな割合を占めているヒラメ筋）が著しく萎縮する事が知られています 1)。また、骨からのカルシウム流出も増加し、骨密度の低下が生じます 2)。地上で人工的に微小重力環境を模擬する事は容易な事ではありませんが、パラボリックフライトで微小重力を作ることができます。宇宙ユニットではこれまで学生さんにパラボリックフライト実習を提供してきましたが、生物研究としてもパラボリックフライトは利用されています。航空機に人や実験動物を載せて、このパラボリックフライトを行う事によって、微小重力環境を模擬した実験が人や動物を対象に行う事が出来ます。

地上では体液（主に血液）は重力に引かれて、下肢方向にシフトしていますが、下肢骨格筋の収縮運動（ミルキングポンプ）によって上肢方向に流れ、結果として体内の体液状態はほぼ一定に保たれています。しかし宇宙に滞在した直後は、微小重力によって体液が下肢方向に引っ張られる働きが失われ、ミルキングポンプのみが働き、頭部に体液が貯留するため顔が丸くなる現象（ムーンフェイス）が生じます。この宇宙での体液シフトを模擬するような実験モデルとして、ベッドレスト実験があります。このベッドレスト実験では頭部を約 6°下げたまま、被験者に長期間（2 週間から 1 ヶ月程度）ベッドで横になっ

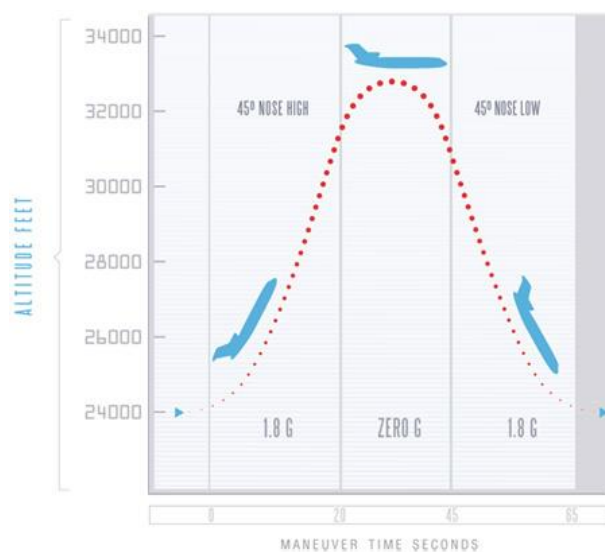


図 1: パラボリックフライト中の重力変化の様子。自由落下中に約 20~30 秒間の微小重力が得られる。

©NASA

ています。しかし宇宙に滞在した直後は、微小重力によって体液が下肢方向に引っ張られる働きが失われ、ミルキングポンプのみが働き、頭部に体液が貯留するため顔が丸くなる現象（ムーンフェイス）が生じます。この宇宙での体液シフトを模擬するような実験モデルとして、ベッドレスト実験があります。このベッドレスト実験では頭部を約 6°下げたまま、被験者に長期間（2 週間から 1 ヶ月程度）ベッドで横になっ

てもらいます 3)。この実験では長期間寝たきりになるため、体液シフトのみならず下肢の骨量減少や骨格筋萎縮も模擬する事が出来ます。動物実験では、げっ歯類（マウス・ラット）を用いた実験ですが、後肢懸垂（尾部懸垂）という実験モデルも模擬微小重力実験としてよく用いられています 4)。後肢懸垂実験では、げっ歯類の尾部をつり下げて後肢を浮かせて飼育します。そのため、宇宙環境で自重が消失し下肢骨格筋に負荷が掛からない状態を模擬する事ができ、骨格筋萎縮メカニズム解明や骨密度低下メカニズム解明の研究によく用いられています。

実際の宇宙研究における宇宙医学研究には、大きく分けて、3 つの実験があります。1 つ目は宇宙飛行士が被験者となるヒト軌道上実験、2 つ目は実験動物が対象となる動物実験、3 つ目は培養細胞などの細胞実験があります。ここでは、宇宙医学という観点からいくつかの宇宙実験の例を挙げていきたいと思います。2009 年に実施された MDS 装置（Mice Drawer System）を用いたマウスを 91 日間 ISS に滞在させた実験では、各国の研究者が共同でサンプルシェアを行いました 5)。この実験では、Human bone specific osteocalcin promoter によって Pleiotrophin を過量発現したトランスジェニックマウス 3 匹と野生型マウス 3 匹の計 6 匹が用いられましたが、残念ながら軌道上でトランスジェニックマウス 1 匹と野生型マウス 2 匹が死亡してしまいました。しかしながら、これまでヒト以外のほ乳類でここまで長期間軌道上に滞在した動物はおらず、この実験は非常に貴重なものです。イタリアのジェノバ大学の Dr. Cancedda のグループは、軌道上に 91 日間滞在すると骨吸収が増加し骨形成が減少するが、Pleiotrophin によってそれらを防止する事が出来る可能性を示しています 6)。また骨格筋についてはヒラメ筋（Soleus: Sol）と長指伸筋（Extensor digitorum longus: EDL）を比較し、筋萎縮に関する Ubiquitin-ligases は両骨格筋で上昇しているが、IGF-1 と Interleukin-6 は Sol では減少しており、EDL では増加したことが報告されています 7)。スペースシャトルでは約 2 週間しかマウス・ラットを滞在させられませんでした。この MDS 実験では約 3 ヶ月間滞在させる事によって、より現在の宇宙飛行士にとって参考になる結果が得られたと考えられます。骨や骨格筋における重要な因子（遺伝子やタンパク質）を見つける事が出来れば、それらが宇宙飛行士のカウンターメジャー開発へ大いに貢献できる事になります。

宇宙飛行士を対象とした研究の中で、宇宙での健康評価方法の開発に向けた研究を私は JAXA で実施した経験があります。その研究は「毛髪」を対象としたものです。毛髪の毛幹部分は体内のミネラ

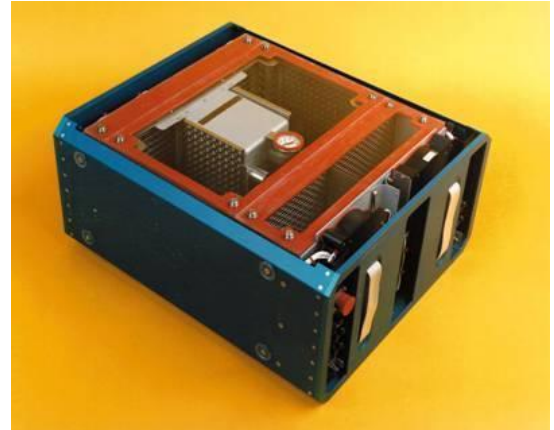


図 2: AEM (Animal Enclosure Module) の画像。この中でマウスやラットを飼育し、スペースシャトルに搭載できる。©NASA



図 3: MDS (Mice Drawer System)の画像。マウス 6 匹を ISS で長期間飼育できる。©NASA

ルの排泄器官であるため、一定期間の体内動態が記録されています。また、毛根部分には毛根細胞があり遺伝子変化を観察する事も出来ます。そのため、血液や尿を採取しにくい軌道上において、この毛髪の利点を利用して毛髪によって宇宙飛行士の健康状態の評価が出来ないかという目的で実験を実施しました。この結果はすでに論文に発表しましたが、毛根においては数名の宇宙飛行士で軌道上滞在中に増殖因子に関係する遺伝子が顕著に減少しているという結果が得られました⁸⁾。また、毛幹においてもカルシウムの含有量が軌道上滞在中に興味深い変化をしている可能性があります。これらデータを解析する事によって、宇宙においてもより簡便で飛行士への負担も少ない健康評価方法の開発に繋げていくことができます。また、宇宙飛行士の歩行に着目した研究も行いました。微小重力環境下では下肢骨格筋が萎縮することは広く知られています。宇宙飛行士は地上に帰還してすぐにはスムーズに歩行が出来ません。歩行には筋力のみが重要ではなく、バランス感覚や拮抗筋同士の協調、神経活動、血流変化など多くの要因が関わっているため、微小重力環境による筋萎縮のみではこの歩行の困難さを説明できません。そこで、宇宙飛行士が約 6 ヶ月間の軌道上滞在から帰還した後の歩行について、筋電図測定やモーションキャプチャーを用いた歩行動態の測定を行いました。また、筋電図データと重心中心データを特殊な解析をする事によって、下肢骨格筋の神経パターンを評価しています。このような神経パターンの評価方法も、リハビリテーションによってどのくらい歩行動態が回復したのかを評価するのに貢献できるかも知れません。

宇宙環境での人体の変化は、地上での様々な病状に類似している事があります。例えば、入院や寝たきりによる長期臥床では宇宙で生じる筋萎縮・骨密度低下と似た現象が生じます。地上での長期臥床患者の多くは高齢者のために加齢の影響ももちろん関わってきますが、宇宙飛行士を対象とする事で加齢等の要因を排除し、より純粋に筋萎縮・骨密度低下のメカニズムやそれに対処するカウンターメジャーを解明できる可能性があります。また、宇宙飛行士が帰還した後の歩行動作などの回復過程に着目する事は地上のリハビリテーション技術に大いに貢献できるはずです。宇宙医学というと宇宙分野に限った医学のように思われるかも知れませんが、宇宙環境という特殊な状況を地上での臨床現場でのテストベッドとして考えれば、宇宙医学はより広く一般社会に応用できるはずです。また、今後は月面や火星への有人宇宙ミッションが計画されています。このようなミッションでは数年単位に及ぶ宇宙滞在が必要になるかもしれません。現在の宇宙医学の対象は数ヶ月宇宙に滞在した人が地上に帰還した際に、どのような変化が生じ、どうやって回復させていくかを解明することが主要な役割です。しかし、将来的には人は宇宙に長期間滞在中、地上に戻ってくる機会の方が少なくなるかもしれません。その時には、現在とは違った観点から宇宙医学に取り組む必要があります。宇宙医学は今後発展していく分野だと信じています。

<文献>

- 1) Fitts RH, et al: Functional and structural adaptations of skeletal muscle to microgravity. J Exp Biol 204: 3201-3208, 2001
- 2) Smith SM, et al: Space flight calcium: implications for astronaut health, spacecraft operations, and Earth. Nutrients 18: 2047-2068, 2012
- 3) Feuerecker M, et al: Five days of head-down-tilt bed rest induces noninflammatory shedding of L-selectin. J Appl Physiol 115: 235-242, 2013

- 4) Morey-Holton ER, et al: Hindlimb unloading rodent model: technical aspects. J Appl Physiol 92: 1367-1377, 1985
- 5) Cancedda R, et al: The Mice Drawer System (MDS) experiment and the space endurance record-breaking mice. PLoS One 7: e32243, 2012
- 6) Tavella S, et al: Bone turnover in wild type and pleiotrophin-transgenic mice housed for three months in the International Space Station (ISS). PLoS One 7: e33179, 2012
- 7) Sandona D, et al: Adaptation of mouse skeletal muscle to long-term microgravity in the MDS mission. PLoS One 7: e33232, 2012
- 8) Terada M, et al: Effects of a Closed Space Environment on Gene Expression in Hair Follicles of Astronauts in the International Space Station, PLoS One, 11 (3); e0150801, 2016

京都大学 宇宙総合学研究ユニット

<http://www.uss.s.kyoto-u.ac.jp/>

〒606-8502 京都市左京区北白川追分町 吉田キャンパス北部構内 北部総合教育研究棟 403 号室

編集人：伊藤梓

Tel&Fax: 075-753-9665 Email: uss.s@kwasan.kyoto-u.ac.jp