

宇宙総合学研究ユニット NEWS 2019年5月号



第1回宇宙学セミナー開催報告

2019年度の第1回宇宙学セミナーは、宇宙学ガイダンスとして4月16日17時より理学部4号館504号室で開催されました。ガイダンスには学部生、院生合わせて22名の学生が集まり、宇宙学拠点の紹介や各研究会の活動内容をそれぞれの担当より説明してもらいました。このガイダンスをきっかけに多くの学生さんが宇宙ユニットの活動に積極的に参加することを期待しています。(寺田昌弘 記)

第2回宇宙学セミナー開催報告

2019年4月26日第2回宇宙学セミナーが、北部総合教育研究棟小林・益川記念室で開催されました。「商業有人宇宙飛行に関する宇宙ビジネス法の課題」という演題で、学習院大学法学部教授 小塚荘一郎先生にご登壇いただきました。

商業有人宇宙飛行は、近年、日本でも事業化を目指す企業が出現し、法制度のあり方が議論されるようになって来ています。宇宙ビジネス法の意義や全体像についての解説と商業有人宇宙飛行に関する法制度のあり方について最新情報を交えた講義ののち、学生からの多くの質問と活発な意見交換が行われました。日本においても商業有人宇宙飛行が行われる日が近づいて来ていることを実感できたセミナーでした。(辻廣智子 記)

ポプラ植樹と工場見学報告

2019年4月18日にナイス株式会社のナイスプレカット滋賀工場で宇宙木材利用研究会の実験に用いたポプラの植樹と工場見学が行われました。宇宙木材利用研究会では樹木を低圧環境下で育成する実験を計画しています。その準備として、昨年から今年にかけて大気開放下で育てたポプラを「宇宙木材礎の木」として植樹しました。ポプラの苗木は1年間で約170センチほどに成長しました。また、プレカット工場では無垢材や集成材、合板や2×4の加工を見学しました。木材の加工はほぼ自動化されており、自動的にプレカットや穴の加工が行われることに驚きました。引き続き宇宙木材利用研究会では宇宙での樹木育成と木材利用を目指し、実験を進めていく予定です。(伊藤梓 記)

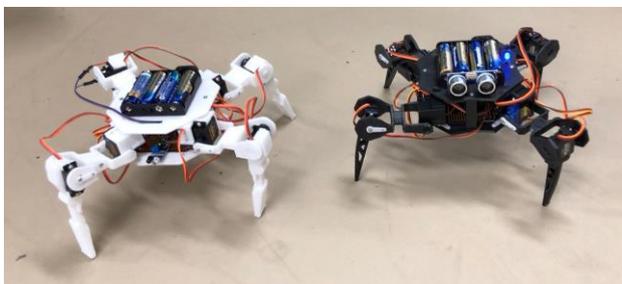


第 1 回 Arduino 講習会開催報告

第 1 回 Arduino 講習会が 2019 年 4 月 24 日に宇宙ユニット実験室（北部総合教育研究棟 506 号室）で開催されました。Arduino は電子工作に入門しやすいアナログ・デジタル入出力ができるワンボードマイコンです。プログラミングを用いて電圧・電流を制御し、簡単にロボットや計測システムを作ることができます。Arduino を使って LED を光らす回路から始めて、温湿度センサーを使って温度や湿度を計測するシステムを作ったりと、電子工作全くの初心者から経験者まで時間を忘れて Arduino 物作りに熱中しました。有人宇宙計画研究会では、①宇宙ロボットチーム、②木造キューブサットチーム、③宇宙樹木育成チームへの参加者を募っています。宇宙ロボットチームはすでに、宇宙ユニット実験室に設置されている 3D プリンターと Arduino を使って月面用 4 足歩行ロボットの試作を始めています。各チームへの参加希望者は、宇宙ユニットまで連絡してください。Arduino 講習会は今後も開催される予定です。（増田凱斗 記）



第 1 回 Arduino 講習会の様子



宇宙ロボットチームが試作した月面用 4 足歩行ロボット

今後の宇宙学セミナー・関連イベントなど

日時	内容	場所
5 月 20 日 (月) 17:00~18:30	第 3 回宇宙学セミナー タイトル：ヒトの地磁気感受性の計測 講演者：眞溪歩 氏（東京大学情報理工学系研究科 准教授）	会場：京都大学 理学研究科 4 号館 5 階 504 会議室 一般対象
5 月 23 日 (木) 13:30~15:00	第 4 回宇宙学セミナー タイトル：ブラックホール初撮影の衝撃と今後の展望 講演者：嶺重慎 氏（京都大学理学研究科 教授、宇宙総合学 研究ユニット ユニット長）	会場：京都大学 理学研究科 4 号館 5 階 504 会議室 一般対象
5 月 31 日 (金) 13:30~15:30	第 5 回宇宙学セミナー 講演者：Vladimir Airapetian 氏（NASA ゴダード宇宙飛行セン ター）	会場：京都大学 理学研究科 セミナーハウス 一般対象
6 月 13 日 (木) 14:45~16:15	第 6 回宇宙学セミナー 講演者：十亀昭人 氏（東海大学工学部建築学科 准教授）	会場：京都大学 理学研究科 4 号館 5 階 504 会議室 一般対象

宇宙への長期滞在と軽度高気圧酸素

石原昭彦 教授

(人間・環境学研究所)

1. はじめに

月面着陸、スペースシャトルの飛行、国際宇宙ステーションへの長期滞在を経て、今後は月面基地や宇宙エレベーターの建設、火星移住へと宇宙開発が進む。それに伴い人間が微小重力や低重力の環境に滞在する時間が増える。人間が宇宙環境に長期にわたって滞在することの難しさを改めて考えなければならない。宇宙は、地球上（1G）とは異なり微小重力（microG）である。微小重力の環境に適応するために様々な体の変化が生じる。最初に生じるのは体液シフトである。下部に流れる血液など体液が減少して（下肢が細くなるので bird leg という）、頭部に流れる体液が増大する（顔面が膨れるので moon face という）。その後、骨格筋の萎縮、骨粗しょう、神経の変性が生じる。宇宙への長期滞後に地球上に帰還すると直ちに重力の影響を受けて、神経・筋活動を円滑に行うことが難しくなり、容易に骨折を引き起こす。したがって、微小重力の環境にできる限り適応することなく、地球上で得られた形態や機能を維持しながら宇宙滞在する必要がある。

2. 宇宙への長期滞在を目指して

これまでに宇宙への長期滞在を目指す方法が研究されてきた。宇宙に滞在する前に筋力運動（preconditioning）を行って筋量を蓄えておく。実験動物を回転車輪の附属した飼育ケージで飼育して、自発的に走運動を行わせる（**図 1**）。回転車輪に任意の負荷を加えることができるので、毎日負荷を増大していく。すなわち、持久運動から筋力運動へと移行させることによって筋肥大を効果的に引き起こして筋力を増大させる。しかしながら、どれだけ筋量が蓄えた実験動物になったとしても、宇宙環境では地上と同じ走運動を継続することができないので、筋肥大の効果を持続できるのは数か月程度と考える。



図 1. 実験動物用の走運動装置。飼育ケージに回転車輪が附属しており、自由に走運動が行える。磁力により回転車輪に任意の負荷を加えることができる。合計 20 台の回転車輪の走行距離や走速度を同時に記録・保存することができる。

生物衛星に実験動物を搭載して 1 分間に 32 回転させると火星表面に降りた時と同じ重力（3/8G）を維持できる。遠心力を利用して重力を作ることは可能であるが、地球上と同じ重量環境を作ることは難しい。また、人間の場合は、生物衛星を回転させることで目が回ってしまうので生活するのは難しい。

人は運動不足や加齢により代謝が低下する。代謝の低下は、身体の衰えを引き起こして、メタボリックシンドロームや生活習慣病を発症する。運動は健康や体力の維持・向上には最適であるが、宇宙環境で地上と同様な運動を継続することは難しい。閉鎖した環境で 1.25-1.3 気圧、35-40%酸素（これを「軽度高気圧酸素」という）の環境に滞在することにより、気圧外傷（鼓膜の損傷、頭・歯・胸痛など）、酸素中毒、活性酸素の過剰な産生を生じることなく体に溶け込む酸素（これを溶存酸素という）や末梢での血流を増大させて代謝の維持・向上を期待できる（図 2）。溶存酸素は血漿中に直接溶け込むので、末梢血管がどれだけ細くても、血液がどれだけドロドロしていても手先や足先、心臓、眼や脳の末端まで流れていく。溶存酸素は、運動や投薬などでは増大しない。気圧の上昇と酸素濃度の増大によって溶存酸素を増大できる。軽度高気圧酸素の環境に滞在することにより宇宙環境への滞在で生じる代謝の低下を予防できると期待できる。

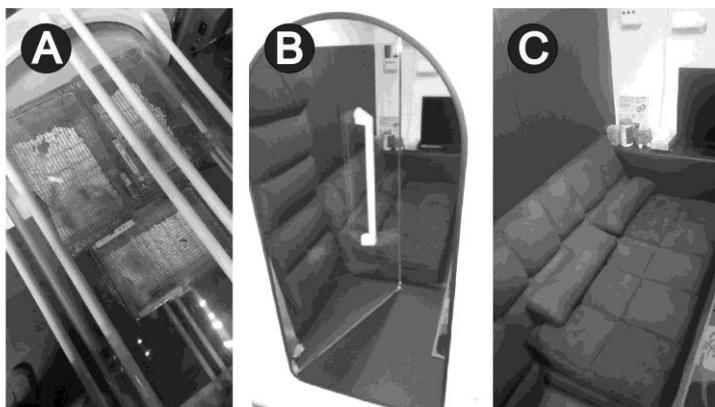


図 2. 実験動物 (A) と人間 (B・C) 用の酸素ルーム。室内を任意の気圧と酸素濃度に設定できる。気圧、酸素濃度、滞在時間の設定は、液晶パネルに数値を入力するだけで良い。人間用の酸素ルームには、テレビ、VTR、エアコンなどが設置されている。

代謝を向上させるのではなく、反対に代謝を低下させて体の形態や機能を維持する方法が検討されている。この研究には、ニホンヤマネやコウモリなどの冬眠動物が用いられている。ニホンヤマネは、冬季の間は長期にわたって冬眠する。冬眠直前には、餌を体内に蓄えるために体重が 2 倍になる。冬眠中は代謝が低下して体温が 2℃前後になり、心拍数も 1 分間に数回まで落ちる。冬眠するニホンヤマネは、冬眠しないアフリカヤマネに比べて約 3 倍長生きする。さらに、冬眠から目覚めた後は、すぐに野山を走り回る。冬眠により長期にわたって体を動かさなくても筋萎縮や骨粗しょうが生じない仕組みを持っている。2006 年に兵庫県の六甲山で 30 代の男性が遭難して 24 日後に救出された。男性は食べ物や飲み物を持たず、救出時の体温は 22℃だった。また、2012 年にスウェーデンで 40 代の男性が雪に埋もれた車中で何も食べずに 2 月間過ごした（雪だけを食べていた）。救出時の体温は 31℃だった。担当した医師は、生き延びた理由として適切な低体温を維持できたことによる「疑似（人工）冬眠」によるものと推察した。冬眠動物は、冬眠中の体を保護するために熱ショックタンパク（heat shock protein）を産生する。さらに、冬眠しない動物でも低温ショックタンパク（cold shock protein）を過剰発現させることによって、筋萎縮を予防するだけでなく筋肥大を引き起こすことができる。冬眠動物を用いて熱ショックタンパクや低温ショックタンパクの発現メカニズムを明らかにすることにより、微小重力の環境で生じる筋萎縮を抑える方法を確立できると考える。

がんやエイズを患い余命少ない人を仮死（冷凍）状態にして、それらの治療法が確立できた未来に目覚めさせて治療を受ける方法がいくつかの研究機関で実施されている。何百人もの人が長い眠りについている。今のところ、目覚めさせた人はいないので蘇るのかどうかは分からない。一方、何十年にもわたって睡眠が続いて突然目覚めた人間がいる。その場合には、加齢現象は進行していた。しかしながら、

睡眠中は代謝を抑えてエネルギーの産生を最小限に抑えていたと思われる。代謝を限界まで低下させれば、余命を延ばすことができる。遠い星を目指して長期にわたって微小重力の環境に滞在する場合、低体温を維持することによる代謝の低下は有効な方法かもしれないが、これについてはさらなる研究が必要である。

遺伝子を改変することによって、微小重力の環境で筋量、筋力や筋持久力を維持できる骨格筋に変えることができる。筋量と筋力には TGF- β や FOXO1、筋持久力には PGC-1 α などが関係している。これらの発現量を調節（増減）することで、微小重力の環境での筋量や筋力・筋持久力の維持を期待できる。しかしながら、現段階では、遺伝子改変によって体のすべての筋が肥大したり、持久力が向上してしまう。足はチータのように早く走ることができる筋になり、腕は象のように大きな力を発揮できる筋にするといった部分的に筋量や機能特性を変化させることはできない。将来、筋の種類や部位ごとに独自の遺伝子改変が可能になれば、宇宙飛行士の骨格筋だけでなく、高齢者、ケガをした人の骨格筋を目的に合わせて改良できるようになる。

3. 軽度高気圧酸素の環境

1.25-1.3 気圧、35-40%酸素の閉鎖環境に滞在することにより、副作用（気圧外傷、酸素中毒、活性酸素の過剰発生など）を生じることなく、最大限に体内の酸素を増大することができる。酸素は、血液中を流れる赤血球によってからだ全体の細胞に運ばれる。赤血球の中にあるヘモグロビンという物質が酸素（これを結合酸素という）を結びつけて運ぶ。血液によって運ばれる酸素には、もう1種類ある。それは、血液に溶け込んで流れている溶存酸素である。溶存酸素は、ヘモグロビンと結びついた結合酸素に比べるとわずかである。しかしながら、溶存酸素は血液に直接溶け込んでいるために、赤血球が連鎖・凝集して流れにくくなった状態でも、または血管がどれだけ細くても、手先や足先、心臓、眼、脳の奥深くまで流れていくことができる。溶存酸素を増大させることができるのは、「気圧の上昇」と「酸素濃度の増大」の2つになる。適切な気圧の上昇と酸素濃度の増大による「軽度高気圧酸素」の環境を利用することによって、微小重力の環境で代謝を維持することが可能になる。

4. 軽度高気圧酸素の効果

軽度高気圧酸素の環境に滞在することにより、健康や体力の維持・増進、アンチエイジング（抗加齢）、病気の予防を目指すことができる。実験動物を用いたこれまでの研究から、メタボリックシンドローム、2型糖尿病、糖尿病性白内障、高血圧、関節炎、パーキンソン病（**図3**）、筋萎縮の予防・改善に軽度高気圧酸素への滞在が有効であることが明らかになった。さらに人を用いた臨床研究から、シミやしわの減少、不妊症に効果が認められることが明らかになった。これらの効果は、軽度高気圧酸素の環境への滞在によって細胞の代謝を改善・向上させることにより得られる。軽度高気圧酸素の環境への滞在中は、特別な動作は必要ない。また、睡眠時に軽度高気圧の環境に滞在すれば、仕事の時間を奪われることはない。さらに高齢者、ケガをした人など誰でも複数人が同時に使用できるという利点がある。スペースの限られた宇宙ステーションでの設置は難しいが、月面基地や火星上のコロニーでは使用できると考える。

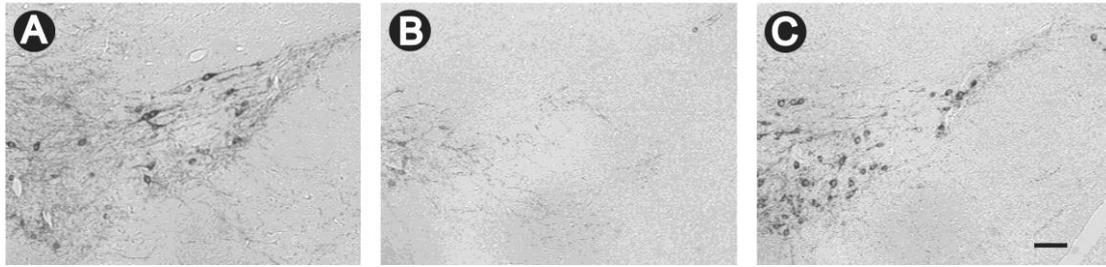


図3. マウス黒質線条体の断面。ドーパミンを含んだニューロンが反応するように免疫染色を施してある (A)。薬物を投与してパーキンソン病を発症させたところ、ドーパミンを含むニューロンが減少した (B)。薬物を投与しながら、1日3時間にわたって軽度高気圧酸素の環境に滞在させたところ、ドーパミンを含むニューロンの減少が抑制された (C)。Cのスケールは、200 μ mを示す。Kusuda et al., Neuroscience Research, 132: 58-62, 2018 を改変

5. おわりに

宇宙飛行士の宇宙ステーションへの滞在は6ヵ月程度であり、まれに1年の滞在が計画されてきた。宇宙環境への連続した最長の滞在期間は、ロシアのワレリー・ポリャコフ博士による438日(1994年1月～1995年3月)である。火星への往復になると微小重力への滞在はさらに長期になる。今のところ人間が宇宙環境に長期にわたって滞在できるという保証はない。宇宙医学・生理学分野の研究が発展することを期待している。

参考文献

石原昭彦：宇宙と地球を行き来する生活を目指して -宇宙環境での神経・筋の反応- (特集：宇宙生物学 -未来への招待-)。Biophilia (ビオフィリア), 2: 16-22, 2005.

石原昭彦．軽度高気圧酸素の仕組みと効果．ファルマシア (日本薬理学会), 53: 241-244, 2017.

Ishihara A. Mild hyperbaric oxygen: mechanisms and effects. J Physiol Sci, accepted (April, 16, 2019).

京都大学 宇宙総合学研究ユニット
<http://www.usss.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: usss@kwasan.kyoto-u.ac.jp