

令和6年度地球観測技術等調査研究委託事業
「将来の有人宇宙活動を支える
宇宙医学人材養成プログラムの創出」
委託業務成果報告書

令和7年5月
国立大学法人京都大学

本報告書は、文部科学省の地球観測技術等調査研究委託事業による委託業務として、国立大学法人京都大学が実施した令和6年度「将来の有人宇宙活動を支える宇宙医学人材養成プログラムの創出」の成果を取りまとめたものです。

目次

内容

1. はじめに.....	1
1.1. 委託業務の目的.....	1
1.2. 業務の方法.....	1
1.3. 当該年度における委託業務の結果概要.....	2
2. 実施内容.....	4
2.1. 宇宙医学講義の実施(宇宙医学基礎知識の習得を行う):.....	4
2.1.1. 京都大学での宇宙医学講義.....	4
2.1.2. 宇宙医学講義におけるコンセプトマップ解析(京都大学).....	18
2.1.3. 宇宙医学講義後におけるアンケート結果(京都大学).....	20
2.1.4. 岐阜医療科学大学での宇宙医学講義.....	25
2.2. 模擬微小重力暴露実験の実施(講義で学んだ知識を実践的に体験・実施する):.....	26
2.2.1. ベッドレスト実験実施報告.....	26
2.2.2. 京都大学チームのベッドレスト被験者測定.....	33
2.2.3. 岐阜医療科学大学チームのベッドレスト被験者測定.....	35
2.2.4. ベッドレスト期間中の被験者ケア.....	38
2.2.5. ベッドレスト期間中の訪問者.....	40
2.2.6. ベッドレスト終了の被験者.....	41
2.2.7. ベッドレスト成果報告.....	41
2.3. 宇宙医学研究室の訪問見学実習(基礎研究の現場を体験する):.....	41
2.3.1. 2023 年度実施宇宙医学実習全体報告会の開催.....	41
2.3.2. 全体報告会での報告内容: 大分大学ならびに大分空港での体験実習の報告.....	42
2.3.3. 全体報告会での報告内容: 東京慈恵会医科大学・細胞生理学講座での体験実習の報告.....	47
2.3.4. 全体報告会での報告内容: IHI エアロスペースでの体験実習.....	51
2.3.5. 全体報告会での報告内容: ヒューストンでの体験実習の報告.....	55
2.3.6. 全体報告会での報告内容: ベッドレスト実験での体験実習の報告.....	63
2.3.7. 2024 年度の宇宙医学実習.....	71
2.3.8. NASA Ames Research Center での体験実習.....	72
2.3.9. NASA Johnson Space Center での体験実習.....	82
2.3.10. ベッドレスト実験での体験実習.....	103
2.3.11. 2024 年度宇宙医学実習アンケート結果.....	107
2.4. 生命倫理を中心とした宇宙倫理的視点の構築(宇宙医学研究者としての倫理的観点の習得を行う): 111	
2.4.1. 宇宙医学教育プログラムシンポジウム「人類の宇宙居住の先に: 将来宇宙で亡くなった場合について語ろう!」の開催.....	111
2.5. 宇宙関連学会・企業・機関との交流(宇宙医学と多方面との関わりを学ぶ):.....	112

2.5.1.	43th Annual ISGP meeting (International Society for Gravitational Physiology).....	112
2.5.2.	日本宇宙生物科学会第 38 回大会.....	113
2.5.3.	第 68 回宇宙科学技術連合講演会.....	113
2.5.4.	第 70 回日本宇宙航空環境医学会大会.....	114
2.5.5.	Annual Meeting of the American Society for Gravitational and Space Research (ASGSR) 2024 115	
2.5.6.	Dr. Sergio Santa Maria によるセミナーの開催	116
2.5.7.	ひらめき☆ときめきサイエンス・宇宙医学の開催.....	116
2.5.8.	大分県立高校における出前授業の実施.....	122
2.5.9.	大学の入試試験問題への宇宙医学教育プログラムについての出題.....	123
2.5.10.	セミナー開催.....	124
2.5.11.	外部評価会	125
2.5.12.	実習参加者情報交換用名簿の作成	129
3.	まとめ	129
4.	添付資料	131
4.1	有人宇宙医学講義シラバス	131
4.1.1.	第 1 回宇宙医学講義スライド集.....	133
4.1.2.	第 2 回宇宙医学講義スライド集.....	151
4.1.3.	第 3 回宇宙医学講義スライド集.....	164
4.1.4.	第 4 回宇宙医学講義スライド集.....	174
4.1.5.	第 5 回宇宙医学講義スライド集.....	191
4.1.6.	第 6 回宇宙医学講義 宇宙歯学研究会資料	201
4.1.7.	第 7 回宇宙医学講義スライド集.....	202
4.1.8.	第 8 回宇宙医学講義スライド集.....	224
4.1.9.	第 9・10 回宇宙医学講義スライド集	242
4.1.10.	第 11 回宇宙医学講義スライド集	246
4.1.11.	第 12 回宇宙医学講義スライド集	250
4.1.12.	第 14 回宇宙医学講義スライド集	257
4.2	岐阜医療科学大学での宇宙医学講義シラバス.....	261
4.3	ベッドレスト成果発表資料	262
4.4	2023 年度宇宙医学実習全体報告会 報告資料.....	263
4.5	NASA 研究者によるセミナーのフライヤー	268
4.6	大分県立高校での出前授業	269
4.7	宇宙医学セミナー 石岡教授.....	295
4.8	2024 年度宇宙医学実習全体報告会 報告資料.....	303
4.9	外部評価会報告資料	308
4.10	学会等発表実績	311

1. はじめに

1.1. 委託業務の目的

将来の有人宇宙活動へ貢献できる即戦力となる宇宙医学の専門知識を持った人材の育成を行うことを目的とする。現在、国際宇宙ステーションが有人宇宙活動の中心となっているが、今後はアルテミス計画など月面周回軌道上の宇宙飛行士の滞在や月面有人活動、その後の火星有人活動など人類の宇宙進出は益々活況となる。そのような中、宇宙滞在によって、人体に生じる生理的变化を正しく理解し、それに対してどのような対策を講じるかを考察できる人材を育成することは、有人宇宙活動の根幹を支えることとなる。そのため、これまで京都大学で実施してきた有人宇宙医学プログラムを発展させ、講義と実践的な実習(模擬微小重力暴露実験: ベッドレスト実験)を通じて、微小重力環境下での生理的影響を深く学ぶことができる教育プログラムへ発展させ、これを実施する。各アカデミアとも連携し、多くの学生に宇宙医学を学ぶ機会を提供し、事業終了後も継続できる体制を整備する。

1.2. 業務の方法

令和6年度における実施内容は、以下の通りである。

これまで京都大学宇宙総合学研究ユニットで実施してきた宇宙医学講義を継続実施した上で、新たに講義で学んだ知識を実践的に活用する機会を提供する。具体的には模擬微小重力暴露実験(ベッドレスト実験)を行い、被験者からデータを取得しそれを解析することによって、微小重力環境下で生じる人体への生理的影響について学び、その対抗策についても考察する。さらに宇宙医学実験を行なっている日本全国の研究室訪問を通じて、基礎研究の現場を体験し宇宙医学研究についての理解を深める。宇宙医学的観点から、将来の有人宇宙活動における生命倫理についての議論を行い、文理を超えた幅広い見識を身につける。これら一連の活動を教育プログラムとして確立し、宇宙医学に関連する学会や大学などのアカデミアや宇宙関連団体と連携して、有人宇宙活動における宇宙医学の重要性ならびに宇宙医学と他分野との関連を継続して学んでいく。最終的に参加学生の理解度と教育プログラム内容を自己・外部評価する。プログラム成果は、シンポジウムを通じて広く公表する。

① 宇宙医学講義の実施(宇宙医学基礎知識の習得を行う):

京都大学において、大学院横断科目として、Zoomを通じて分野を問わず全国の大学生の聴講も可として実施している「有人宇宙医学」講義、また、岐阜医療科学大学において実施している「宇宙医学」講義について、新たに模擬微小重力暴露実験に繋がる講義内容を検討しつつ実施する。また、講義内容に関する設問に対するレポートを提出させ、理解度を評価し、学生にフィードバックする。

② 模擬微小重力暴露実験の実施(講義で学んだ知識を実践的に体験・実施する):

ベッドレスト実験は、被験者が6度頭低位に長期間臥床することにより、宇宙滞在で生じる筋骨の脆弱、体液シフト変化、神経系・循環器系への影響を模擬し、宇宙滞在中の人体影響を総合的に学ぶ機会となる。令和5年度は、被験者募集ならびに実験測定者としての学生募集を全国の大学から募り、模擬微小重力暴露実験(ベッドレスト実験)を実施する。食事・排泄・睡眠・入浴といった基本的な生活に必要な行動に対する介助方法の地上と宇宙・微小重力環境における差異と共通点を考察させるとともに、各種生体反応の測定を行い、実験手法の学習を行う。実習で得られたデータの解析を行い、その結果ならびに計測・処置の意義をプレゼ

ンテーションさせて理解度を評価する。また、取得したデータについて、学術データとしてまとめ、成果報告を実施する。

③ 宇宙医学研究室の訪問見学実習(基礎研究の現場を体験する):

京都大学でこれまで実施していた有人宇宙医学プログラムの研究室訪問を発展させ、日本国内の複数箇所の宇宙医学研究室を訪問し、複数の異なる視点から基礎研究の現場を体験するとともに、訪問先の異なる学生同士で交流することによりさらに知見を深める機会を提供する。訪問先は、日本宇宙航空環境医学会に所属している研究者を中心に依頼する。学生からアンケートを取得し効果を評価する。

④ 生命倫理を中心とした宇宙倫理的視点の構築(宇宙医学研究者としての倫理的観点の習得を行う):

宇宙医学研究は、人や実験動物を対象とするため生命倫理に深く配慮する必要がある。京都大学では令和3年度から宇宙航空科学技術推進委託費において「倫理学を基盤とした宇宙人材育成プログラムの開発と実践」(代表: 嶺重慎)を実施しており、本業務の研究代表者も共同参画者として参加している。宇宙での生命倫理について宇宙医学と倫理学の間で学生間の議論を行い、前年度に検討した評価手法を基に、生命倫理についての理解度を評価する。

⑤ 宇宙関連学会・企業・機関との交流(宇宙医学と多方面との関わりを学ぶ):

宇宙分野に関係する学会活動への参加や企業・機関(JAXAやNASA等)との交流や訪問を行う。また、他分野との融合の重要性を学ぶため、定期的にセミナーを開催する。学生アンケートを取得し効果を評価する。

1.3. 当該年度における委託業務の結果概要

令和6年度における業務の結果概要は、以下の通りである。

① 宇宙医学講義の実施(宇宙医学基礎知識の習得を行う):

京都大学において、大学院横断科目として、Zoomを通じて分野を問わず全国の大学生の聴講も可として実施している「有人宇宙医学」講義、また、岐阜医療科学大学において実施している「宇宙医学」講義について、新たに模擬微小重力暴露実験に繋がる講義内容を検討しつつ実施した。また、講義内容に関する設問に対するレポートを提出させ、理解度を評価し、学生にフィードバックした。

② 模擬微小重力暴露実験の実施(講義で学んだ知識を実践的に体験・実施する):

ベッドレスト実験は、被験者が6度頭低位に長期間臥床することにより、宇宙滞在で生じる筋骨の脆弱、体液シフト変化、神経系・循環器系への影響を模擬し、宇宙滞在中の人体影響を総合的に学ぶ機会となる。令和6年度も令和5年度に引き続き、被験者募集ならびに実験測定者としての学生募集を全国の大学から募り、模擬微小重力暴露実験(ベッドレスト実験)を実施した。食事・排泄・睡眠・入浴といった基本的な生活に必要な行動に対する介助方法の地上と宇宙・微小重力環境における差異と共通点を考察させるとともに、各種生体反応の測定を行い、実験手法の学習を行った。実習で得られたデータの解析を行い、その結果ならびに計測・処置の意義をプレゼンテーションさせて理解度を評価した。また、取得したデータについて、学術データとしてまとめ、成果報告を実施した。

③ 宇宙医学研究室の訪問見学実習(基礎研究の現場を体験する):

京都大学でこれまで実施していた有人宇宙医学プログラムの研究室訪問を発展させ、日本国内外の複数箇所の宇宙医学研究室を訪問し、複数の異なる視点から基礎研究の現場を体験するとともに、訪問先の異なる学生同士で交流することによりさらに知見を深める機会を提供した。訪問先は、日本宇宙航空環境医学会に所属している研究者を中心に依頼した。学生からアンケートを取得し効果を評価した。

④ 生命倫理を中心とした宇宙倫理的視点の構築の検討(宇宙医学研究者としての倫理的観点の習得を行う):

宇宙医学研究は、人や実験動物を対象とするため生命倫理に深く配慮する必要がある。宇宙での生命倫理について宇宙医学と倫理学の間で学生間の議論を行い、宇宙医学と倫理学との共通課題を引き続き検討し、生命倫理についての理解を深めた。議論内容を精査し、理解度を評価した。

⑤ 宇宙関連学会・企業・機関との交流(宇宙医学と多方面との関わりを学ぶ):

宇宙分野に関係する学会活動への参加や企業・機関(NASA Ames Research Center, NASA Johnson Space Center)との交流や訪問を行った。また、他分野との融合の重要性を学ぶため、定期的にセミナーを開催した。学生アンケートを取得し効果を評価した。

2. 実施内容

2.1. 宇宙医学講義の実施(宇宙医学基礎知識の習得を行う):

2.1.1. 京都大学での宇宙医学講義

昨年度に引き続き、有人宇宙医学講義のシラバス(添付資料 4.1)に基づき、宇宙医学講義を京都大学総合生存学館の大学院生向け講義として実施した。

昨今の宇宙分野の状況として、人類の宇宙進出は、特に技術的發展に伴って益々活況となっている。スペースシャトルから国際宇宙ステーション(ISS)に宇宙ミッションが移行し、宇宙滞在が益々長期化している。今後は月面ミッションや火星ミッションなどで数年単位の滞在も現実のものになるであろう。しかし、地球環境に適応して進化した人類が、宇宙環境に滞在した際にどのような影響があるのかはすべて解明されているわけではない。そのため本講義では、今後の有人宇宙活動に向けて、人への宇宙滞在の影響がどのようなものであるかを学び、将来的にその対策方法の解明に従事する人材育成を目的とする。また、地上での臨床医学との共通点や違いなどについても学習し、宇宙医学と地上医学の関わりについて検討する能力を得る。到達目標は、宇宙環境が人へどのような影響があるかを理解することである。そして今後数年単位に及ぶ宇宙滞在においてどのような問題点があり、それを解決するために何をすることが必要かなど、自身で考察する能力を養うことである。

有人宇宙医学講義の各項目で重要となるテーマの相関関係を図 1 に示す。宇宙環境は大きく分けて、微小重力・宇宙放射線・閉鎖環境・真空状態といった地上とは異なる環境であり、地上でのサポート体制も重要である。個々の影響における課題を考えてみよう。

〈微小重力による影響〉(図 1 の上段、黄色の項目)

地上での1G の環境に適応した我々の人体は、微小重力に晒されると自重を感じなくなる。そのため、機械的負荷の喪失により、骨格筋の萎縮や骨量減少が生じる。また、体液シフトにより心循環器系へ影響を与える。更に平衡感覚の乱れや視覚変化によって、宇宙滞在初期は宇宙酔いの現象が生じる。これら微小重力環境による身体影響を理解し、その対策を考慮することは今後の有人宇宙ミッションにとって引き続き重要な課題である。

〈宇宙放射線による影響〉(図 1 の中段左、緑色の項目)

ISS で暴露される1日の放射線量は、地上で半年程度浴びる放射線量に等しい。しかし、低線量で長期間被曝するという環境は、地上とは異なる。このような放射線状況下でどのような人体影響があるかを理解することは重要であり、酸化ストレスの増加による細胞への影響を学習する必要がある。

〈閉鎖環境による影響〉(図 1 の中段右、青色の項目)

ISS での閉鎖環境生活は、我々の精神心理に大きく影響する。特に少人数で、なおかつ言葉や文化が違う宇宙飛行士が共同して長期間生活する環境は容易にストレスが蓄積する状況である。また、このような閉鎖状況で感染症などのリスクに対してどのように対応するかも大きな課題である。

〈低圧による影響〉(図 1 の中段中央、柿色の項目)

宇宙での真空環境における船外活動では、宇宙服のみが人体の保護を行う。宇宙服内部は低圧に保たれており、長期間の船外活動は低圧症の危険も大きくなる。低圧症が宇宙飛行士に及ぼす影響を学習する。

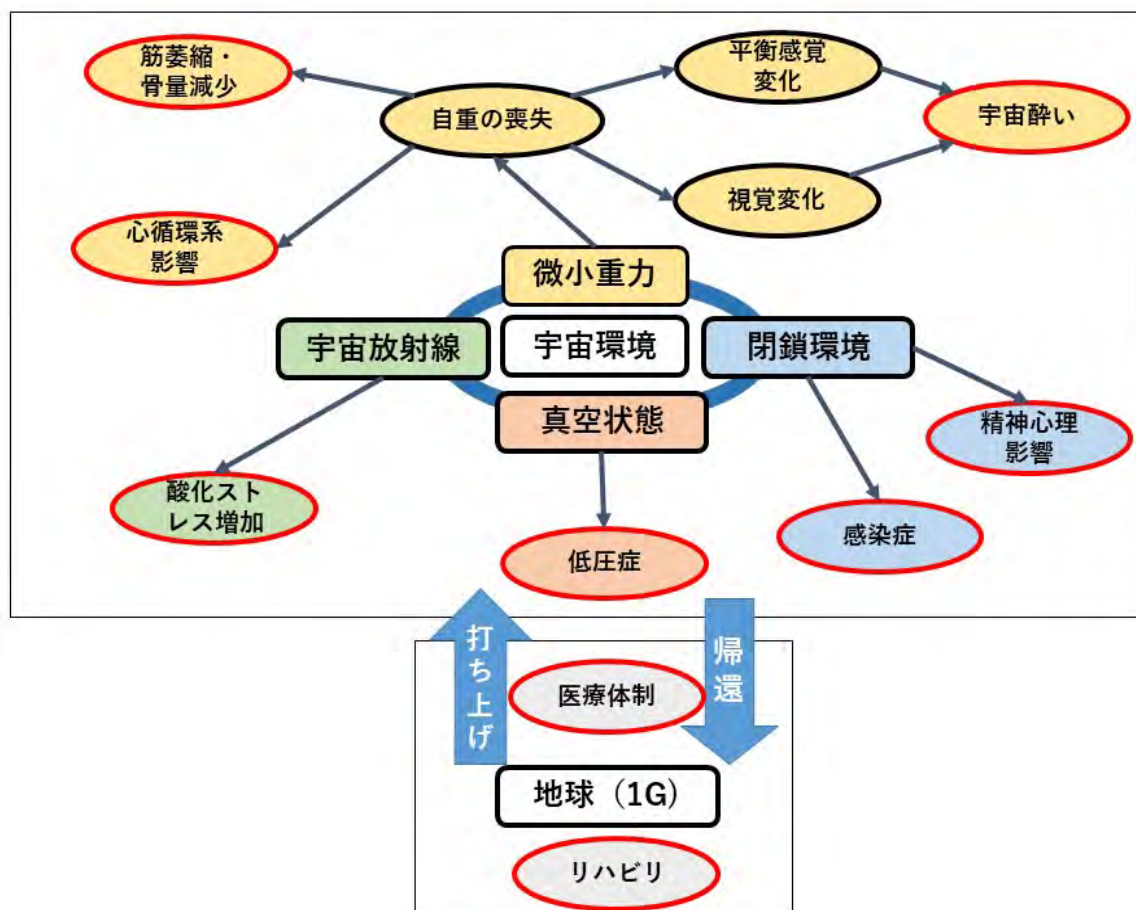
〈地上でのサポート体制〉(図 1 の下段、灰色の項目)

宇宙環境に適応した状態で地上に帰還する際には、地上の1G 環境に再適応する必要がある。そのため、帰還後はリハビリテーションを行う必要があり、また打ち上げや帰還時、宇宙滞在時の宇宙飛行士への健康サポート(医療体制)も大切な項目である。宇宙ミッション前・中・後にどのように宇宙飛行士をサポートしているのか

を学習することが必要である。

上記の宇宙医学分野で重要なテーマについて学ぶことは、宇宙医学研究の発展にとって必須である。宇宙医学研究分野で即戦力として活用できる項目の習得を目的として、それぞれ専門家を招聘し、令和 6 年度後期も講義を実施した。合計で 158 名(京大生 15 名、外部生 143 名)の参加があった。

図 1



2024 年度 大学院分野横断型講義「有人宇宙医学」

授業科目名: 有人宇宙医学

対象学生: 大学院生、学部生(聴講可)

曜日限: 水曜日 4 限

場所: 総合生存学館大講義室(2F)

概要・目的: 人類の宇宙進出は、特に技術的発展に伴って益々活況となっている。人の宇宙滞在もスペースシャトルから国際宇宙ステーションに宇宙プログラムに移行して、益々長期化し、今後は月面ミッションや火星ミッションなどで数年単位の滞在も現実のものになっている。しかし、地球環境に適応して進化した我々人が、宇宙環境に滞在した際にどのような影響があるのかはすべて解明されているわけではない。そのため本講義では、今後の有人宇宙活動に向けて、人への宇宙滞在の影響が

どのようなものであるかを学び、将来的にその対策方法の解明に従事する人材育成を目的とする。

- 【第1回】10月2日 宇宙医学概要(寺田昌弘:京都大学)
- 【第2回】10月9日 宇宙での骨格筋への影響①(志波直人:久留米大)
- 【第3回】10月16日 宇宙での骨への影響(近藤久貴:愛知学院大)
- 【第4回】10月23日 宇宙酔い(野村泰之:日大)
- 【第5回】10月30日 宇宙飛行とリハビリテーション(山田深:杏林大学)
- 【第6回】11月6日 宇宙での歯科分野への対応(前田初彦:愛知学院大)
- 【第7回】11月13日 フライトサージャンの役割(嶋田和人:筑波航研、元 JAXA 医師)
- 【第8回】11月27日 宇宙での自律神経系への影響(岩瀬敏:愛知医大)
- 【第9回】12月4日 宇宙放射線の影響①(山敷庸亮:京都大学)
- 【第10回】12月11日 宇宙放射線の影響②(山敷庸亮:京都大学)
- 【第11回】12月18日 宇宙での姿勢制御(萩生翔大:京都大学)
- 【第12回】12月25日 宇宙服と減圧症(田中邦彦:岐阜医療科学大)
- 【第13回】1月8日 宇宙での動物実験(高橋昭久:群馬大)
- 【第14回】1月22日 宇宙での骨格筋への影響②(河野史倫:松本大)



図2: 愛知学院大・近藤先生の講義風景。

以下に各講義テーマの概要を述べる。

[第1回 10月2日 宇宙医学概要 寺田昌弘(京都大学)](添付資料 4.1.1)

第1回宇宙医学講義では、前半にまず宇宙ユニットが実施している文科省委託費事業「将来の有人宇宙活動を支える宇宙医学人材プログラムの創出」における宇宙医学教育研究プログラムの全体像を説明した。月面及び火星に向けた中継基地として建設の始まった月軌道プラットフォーム「ゲートウェイ」、月の新たな領域を訪れて新たなサンプルを採取することを目的に人類を再び月へ送り込もうという「アルテミス計画」。これらの計画で

はこれまで以上に多くの飛行士たちが、より長期間の宇宙ミッションに臨むことになる。地球低軌道に目を向ければ、民間企業による“商業宇宙ステーション”に向けた動きが加速している。厳しい選抜をくぐり抜けた職業飛行士のみならず、民間人を対象としたレジャーとしての宇宙滞在がビジネスとして軌道に乗ろうとしている。宇宙医学人材のニーズが急増することは明らかである。この現状を踏まえて、宇宙医学人材を育成するためには何が必要かを問う。その一つの案として、宇宙医学分野を理解するための実践的な教育プログラムを構築するにあたり、本プログラムの根幹をなす模擬微小重力暴露実験(ベッドレスト実験)があり、その実験に臨むために必要な基礎知識の習得をねらいとして、この宇宙医学講義があることを伝えた。また、後半では今後 13 回(+補講 1 回)にわたるオムニバス形式の宇宙医学講義の担当講師らの紹介と、各回で学ぶことになる宇宙環境における人体への影響についての概説を行った。

【第 2 回 10 月 9 日 宇宙での骨格筋への影響① 志波直人(久留米大)】(添付資料 4.1.2)

第 2 回宇宙医学講義では、宇宙における筋萎縮に対する運動効果を中心に解説した。加齢性筋萎縮であるサルコペニアについてリハビリの臨床医の立場から詳細に説明した。筋肉の衰えに伴い、骨折などのリスクも高まるため、総合的な予防が重要となる。講師は、「宇宙空間で有効な骨格筋維持装置開発の研究」が 2014-2017 年度科研費等に採択され、2014 年宇宙飛行士を対象に ISS 実験実施をした。その装置詳細と実験結果を紹介した。ハイブリッドトレーニング(HTS:Hybrid Training System)におけるハイブリッドとは、随意筋収縮と電気刺激筋収縮を指す。このシステムは、コンパクトな装置で重力に代わる運動抵抗を自身の体内で作製し、効率よく運動負荷メカニカルストレスを筋骨格系に与える。HTS の局所効果検証として、上肢実験の概要と結果は以下である。HTS 被験者 6 名。ダンベルを用いた肘屈伸運動を 1 回に 15 分 40 秒。週 3 回を 8 週間継続。実験終了後、被験者らの上腕二頭筋断面積:14%増加、肘屈伸筋力:40%増加した。また、膝前十字靭帯再建術を行う被験者に対して手術前 4 週間の HTS による膝屈伸運動を実施し、靭帯再建後の不要な semitendinous muscle を解析したところ、筋タンパク合成、骨格筋幹細胞分化による筋再生の強化に関与する遺伝子 EIF5A、筋損傷後の筋再生に強い関与をする遺伝子 PEX6 について発現が見られた。パラボリックフライト微小重力環境下や南極基地の閉鎖環境下でも HTS が期待通りの効果を上げることを確認した。ISS での HTS 試験は制約が多く、被験者は 1 名のみ。週 3 回、4 週間のトレーニング。両脚運動の実験申請だったが、上肢左腕のみの実験となった。左腕に HTS 装置を装着し、何もつけない右腕とともに同じダンベル運動を課した。MRI による上腕筋容量を調べたところ、HTS を実施した左腕はコントロールの右腕に比べて明らかな筋肥大が見られた。フライト中に上腕周囲径を計測したところ、筋肥大の左腕に減少が見られたが、脂肪が減っていたためであった。ハイブリッドトレーニング機器などを用いれば、宇宙における筋萎縮を効果的に予防できる可能性がある。特に、地上での臨床現場での技術が宇宙に活かせることができれば、開発コストも抑えることができ、また宇宙から地上への還元にもつながり、有用な手段である。

講義後の質疑応答の回答(志波先生からの原文のまま)

質問①

ビスフォスフォネートやその他の医薬品を長期的に服用し続けた場合の影響はどのくらい研究結果が出ているのでしょうか。

回答

ご質問有難うございます。私は今回講義で参考資料として提示したビスフォスフォネートの実験結果ですが、この実験は日本から発案された実験(徳島大学の松本教授、JAXA の大島元宇宙医学生物学研究室長)であり、私も研究結果について直接松本先生、大島先生から伺いお話することができました。詳しくは、論文を読んでいただければと思いますが、個人的な感想ですが、ビスフォスフォネート製剤による全身の DXA の結果からは、頭蓋骨の骨密度まで上昇しており、やはり、運動をして、必要な四肢、脊椎の骨にメカニカルストレスを与えることが不可欠であると再確認した研究結果でした。下の論文が代表的なものですが、いくつかの報告があります。国内の講演記録なども WEB 上ではみることができるようです。

Leblanc A, Matumoto T, et al.: Bisphosphonates as a Supplement to Exercise to Protect Bone during Long Duration Space Flight. Osteoporosis Int 24:2105-14, 2013

その後、ロモズマブの実験も国際宇宙ステーションで実施されたと聞きましたが(動物実験か宇宙飛行士実験か詳細は当方は存じ上げませんが米国の研究施設からの提案とお聞きしています)、まだ公開・論文かされていないようです。ロモズマブは、メカニカルストレス、メカノトランスダクションに関係する物質で、講義でも紹介したように臨床でも極めて有効な治療薬ですので、無重力環境での研究結果報告が待たれるところです。

質問②

昭和基地での研究でモチベーションの問題があったとのことですが、運動をするモチベーションがなくなるということでしょうか。だとしたら、どのように改善するのでしょうか。ISS ではどのようにして毎日 2 時間の運動をするというモチベーションをキープするのでしょうか。

回答

ご質問ありがとうございます。ISS では、他に運動の機会が無く、宇宙飛行士の方たちは決められた以上に運動をされていたと伺っています。運動をする duty は weekday のみで、土日は宇宙飛行士個々の判断に任せているということですが、日本人の宇宙飛行士の方たちは土日ほぼ運動をされていたとお聞きしています。運動そのものが好きでありジムで筋トレなどの運動を毎日するのと同じ感覚でされていたのではないかと思います。一方、南極観測隊の皆さんは、宇宙環境と同様、冬季(南極ですので、日本では夏季)の雪や氷に閉ざされた閉鎖環境の期間を実験期間に設定されましたが、実際にはこの環境下でも戸外の労力を要する作業があったり、柔道部など体育会系の部活動があったりと、身体運動をする機会が実験のほかに多くあったとお聞きしました。また、食生活なども ISS と比較すると恵まれた環境にあり、ハイブリッドトレーニングのために貴重な個人の自由時間を割くというモチベーションを維持することが困難ではなかったかと拝察しています。しかしながら、最終的に 10 名の被験者の方たちが 8 週間の長期実験を完遂していただき、実験を無事終了できました。関係の皆様には深く感謝しております。モチベーションを維持するためにはゲーム感覚で、VR の利用など、先進の IT、AI 技術を応用することで、素晴らしい device ができるのではないかと思います。10/9 の講義の際は実際に南極観測隊の隊員の方が WEB 参加されており、御意見を伺った内容のとおりです。

質問③

大変勉強になる講義をありがとうございます。ハイブリッドトレーニングによる筋力トレーニングは、筋肉量・骨密

度維持以外に心肺機能の維持にも働く可能性はあるのでしょうか。またランニングマシン下等での走るハイブリッドトレーニングの実験例は地上を含めありますでしょうか。ご教授頂ければ幸いです。

回答

ご質問ありがとうございます。歩行時やエルゴ駆動時にハイブリッドトレーニングを併用して実施した研究が複数あります。Hybrid training, shiba naoto で検索していただきますと、いくつかの論文にヒットすると思います。その中には、呼気ガス分析やマイオカインに関する研究報告もいくつかありますので、ご覧いただければと思います。一例を下記に示します。

Hashida R, et al: Electrical Stimulation of the Antagonist Muscle During Cycling Exercise Interval Training Improves Oxygen Uptake and Muscle Strength, Journal of Strength and Conditioning Research 35(1):p 111-117, January 2021.

質問④

今後 ISS の政府運用が停止され、民間宇宙ステーションの利用が本格化していくと期待されますが、このような情勢は研究機会の拡大につながるでしょうか。

回答

ご質問ありがとうございます。われわれの研究では公的な研究助成があり、段階的に研究計画を作成して実験を実施、幸運にも宇宙実験までたどり着けました。私たちのように、全く宇宙と関係の無い分野からの参入も、JAXA や、JSF の協力で宇宙実験を実施することができました。これは、学問的、学際的な視点で公的助成が行われることで実現できたものと思います。民間ベースになっても、このような公的研究助成システム(経済的、人的サポート)は絶対に不可欠であり、継続されることを心から望んでいます。民間ベースになるとマーケティングの視点がより強くなると思いますが、さらに飛躍的に様々な分野が発展する可能性はあると思います。

質問⑤

大型のトレーニング装置を ISS に持ち込むのは難しいそうですが、スターシップや、ISS よりも広い商業宇宙ステーションの登場によって、トレーニング装置の傾向が変わる可能性があるということでしょうか。

回答

ご質問ありがとうございます。宇宙環境に装置を打ち上げるには、積み込むスペースが確保でき、打ち上げに必要な推力を得るためのロケットが必要となります。そのために、重量当たりで計算しても莫大なコストがかかるとお聞きしています。打ち上げるのは自分たちの実験の装置だけではありませんので、宇宙で必要な様々な物品から総合的に判断され搭載、打ち上げることになると思います。我々の考案した装置は幸い小型軽量で、この点では有利な条件で宇宙実験に参加でき、H2ロケット、コウノトリで実験に先立って ISS へ搬入されました。これは、商業ベースになっても同じではないかと思います。ある企業が、貴方が提案する研究内容に共感して、莫大な助成を行う体制が整えば、大型で重量のある装置を宇宙へ打ち上げる可能性はあると思います。

質問⑥

NASA との調整が大変だったようですが、例えばどのような理由で大変だったのでしょうか。(途中で研究の変更などをしてはいけない理由はなぜなのでしょう)

回答

ご質問ありがとうございます。宇宙実験にたどり着くまでの、研究発表や論文になっていないような地球上の検証の繰り返し、軌道上で想定される事象の様々な検証、JAXA や NASA からの要求に対する回答は、莫大なものでした。それを全ての項目において回答を作成する必要があります。実験計画、開始から終了までで、英文論文数十篇分の労力を要したと実感しています。NASA でいよいよ実験の実施となる際も、ヒューストンでさまざまな NASA の関係セクションを回り、多くの NASA の現地スタッフと打ち合わせを行い、コミュニケーションを取ることが不可欠となります。この際、JAXA、JSF の日本人スタッフが同行して、スムーズに実験が行われるように全面的に協力をしていただきました。このような多くのセッション、人たちが関り、詳細に実験の方法や手順を決めていきます。我々の実験は、国からの人的、経済的な協力無くては絶対に実現が不可能でした。このような状況下での実験計画と実施ですので、途中で実験計画を変更する、内容を追加するということは、些細な内容であっても、よほどのことが無い限り困難であるということが実感でした。トレーニング装置作製も NASA でも前例のない装置でしたので、ISS で実験用装置を作製した経験のある企業により、内部の配線の一本に至るまで NASA の極めて厳格な規格に沿った装置の作製が求められました。

【第 3 回 10 月 16 日 宇宙での骨への影響 近藤久貴(愛知学院大学)】(添付資料 4.1.3)

第 3 回宇宙医学講義では、これまで一コマとしては扱っていなかった骨への影響について講義した。宇宙空間における微小重力環境は、ヒトの骨代謝に重大な影響を及ぼすことが明らかになっている。骨組織は、骨芽細胞による骨形成と破骨細胞による骨吸収のバランスにより恒常性が維持されているが、無重力環境ではこのバランスが崩れ、骨吸収が亢進し、骨形成が抑制される傾向にある。特に荷重骨(weight-bearing bones)である腰椎、大腿骨近位部、脛骨などにおいて顕著な骨密度の減少が観察される。長期宇宙滞在では、1 か月あたり 1 ~2%の骨密度低下が報告されており、これは地上での加齢性骨粗鬆症に比べ著しく急速である。骨密度の減少は、宇宙飛行士の骨折リスクを高めるのみならず、ミッションの安全性や身体機能の維持にも関わる重要な健康課題である。さらに、骨吸収の進行に伴い、骨から血中へのカルシウム遊離が増加し、高カルシウム血症や尿中カルシウム排泄の増加を介して腎結石形成リスクも高まることが指摘されている。このような骨代謝異常に対する対策として、現在はレジスタンストレーニングを中心とした運動療法が標準的に行われており、筋骨格系への負荷を人工的に再現することで骨吸収の抑制を図っている。また、カルシウムやビタミン D、K の適切な摂取管理に加え、ビスフォスフォネート系薬剤などの薬物的介入も試験的に用いられている。近年では人工重力装置や振動刺激などの新規アプローチも検討されている。宇宙骨代謝研究は、長期宇宙探査ミッションにおける生命維持技術として重要であると同時に、地球上の骨粗鬆症や廃用性骨減少への応用可能性も秘めており、宇宙医学および老年医学の両面から注目されている。

【第 4 回 10 月 23 日 宇宙酔い 野村泰之(日本大学)】(添付資料 4.1.4)

第 4 回宇宙医学講義では、ヒトの平衡バランス機能と重力変化について講義を行った。はじめに、20 世紀初頭にノーベル医学生理学賞を受賞したバラニー博士の三半規管におけるリンパ対流説(温度差による三半規管内のリンパ液の対流は重力による比重差で生じるという説)は、後年の微小重力下スペースシャトル実験によってくつがえされたエピソードを紹介した。宇宙医学の中で「宇宙酔い」は、いまだに解決されていない難題の一つである。宇宙空間で生活すると、微小重力環境によって、多くの器官の機能が地上と違う変化を起こす。特に、重力の感覚器である耳石器や中枢の空間識(空間認識)に関して大きな変化が起こり、吐き気や嘔吐を起こす状

態の宇宙酔いを代表とした症状が報告されている。宇宙酔いの原因として、以下の5つの発症仮説がある。①感覚混乱説、②体液シフト説、③耳石器左右非対称仮説、④耳石器傾斜再適応仮説、⑤位相差非同期適応仮説。しかしながら、実際には、単一仮説では捉えきれない複数の要因が重なることで発症するメカニズムが想定される。この中では①の感覚混乱説が最も重要視されている。地上では、目からの視覚情報のほかに、耳・前庭系(内耳)からの重力情報や、筋肉・健・皮膚感覚などからの体性感覚情報などをもとに姿勢を調節しているため、目を閉じても上下がわかる。しかし宇宙では重力情報がなくなるため、視覚情報に頼ることが多くなる。新しい環境に慣れるまで、感覚混乱をきたし、宇宙酔いが発生するという仮説である。この検証にあたっては地上での模擬微小重力実験やパラボリックフライト実験が進められてきた。地上での模擬微小重力実験によって、内耳への重力方向を変えても3～5日程度で耳石器が重力方向に適応することを確認した。宇宙酔いが治まるまでにかかる日数とほぼ同じである。※フライト中宇宙酔いに罹患したままであった宇宙飛行士もあるので個人差はある。パラボリックフライト実験では、視運動性眼振の応答に重力の閾値変化は認められず、相関があった。眼振速度について、初回飛行者には異常亢進が認められた。なお既経験者の眼振機能は順当に維持されていた。後半は、宇宙酔い、前庭機能系低下への対応・予防策について解説した。特に宇宙酔いでは吐しゃ物が船内を浮遊するリスクが問題視されるので、嘔吐を防ぐためには、前庭神経核から嘔吐中枢への信号をブロックする抗ヒスタミン薬等がある。

講義後の質疑応答を抜粋

Q. 高齢であるほど宇宙酔いにかかりやすい傾向はあるだろうか。

A. 宇宙飛行士に関していえば、選抜の過程で健康優良な方がパスされているので、年齢よりは飛行経験回数に影響されると思う。

Q. 耳石器に関する病(メニエール病等)の治療の一環として宇宙空間滞在療法などは想定されるか。

A. 内耳性のめまいではリンパ液の循環が悪くなることで眼震が起きるので、微小重力環境下で耳石器の左右非対称性が緩和される可能性はあるかも知れない。

Q. 宇宙酔い症状が出た際に、抗ヒスタミン薬等の投与を積極的に行った方が適応が早まるのか、あるいは薬は投与せずに自然に適応を待った方が結局は早く適応できるのか。

A. 酔い止め薬は事前に飲んでおくことが基本である。酔ってから服用しても効果は望めないもので、その条件では比較はできない。

Q. 民間の短期宇宙旅行にて予防的に酔い止め薬を服用すると副作用として眠気は避けられないのか。

A. そもそも眠ることで酔いを抑えるように薬は設計されている。短期宇宙旅行用の酔い止め薬として眠くなる副作用のない酔い止め薬の開発計画がある。

[第5回 10月30日 宇宙飛行士とリハビリテーション 山田深(杏林大学)] (添付資料 4.1.5)

第5回宇宙医学講義では、宇宙飛行士のリハビリテーションについて詳細に解説した。講師は、JAXAで生理的対策担当として宇宙飛行士のリハビリを担当している。実際に多くの日本人宇宙飛行士のリハビリを指導してきた経験をもとに宇宙飛行士のリハビリのスケジュールや運動内容などについて説明をした。宇宙長期滞在中

は、①微小重力環境、②宇宙放射線被ばく、③閉鎖環境(騒音)によって、筋萎縮、骨量減少、体液シフト、心肺機能低下、宇宙酔い、精神的ストレス、生体リズムの変化などの影響がある。筋萎縮・骨量減少・心肺機能低下については、これを最小限に抑える対策として宇宙飛行士には ISS 滞在中に運動が課されるが、地球帰還後、運動耐容能の低下といった様々な変化が身体に生じており、リハビリテーションが必要となる。遅筋の萎縮については、ISS 初期はヒラメ筋や腓腹筋の筋断面積にして 10~15%の減少がみられていたが、現在はそれよりも減少を抑えることに成功している。骨密度については 6~9%の減少があり、飛行前の骨量にまで回復するには 3 年程度の時間を要するのが現状である。なお微小重力環境下では、地上では圧迫されていた椎間板の負荷がなくなり身長が 1~3%程度伸びる。この身長変化に伴い、宇宙飛行士の 69%が腰背部痛を報告している。飛行士たちへの調査によると腰背部痛の痛みはフライト初期に最も強く次第に軽減されるとあるが、地上帰還後の NASA 宇宙飛行士 321 名中、44 名が椎間板ヘルニアを罹患していた。これは NASA 地上勤務職員をコントロール群として比較すると 4.3 倍。脊柱変化を調査したところ、飛行前後で椎間板の水分含有量に有意な変化はなかったものの、脊柱前弯角度を算出したところ、その角度に飛行後に有意に減少が見られた。対策として、この背骨のカーブを抑えるために当該部分の筋肉を鍛えることが考えられている。続けて ISS における軌道上運動機器について解説をした。現在は有酸素運動、動的ストレッチング、抵抗運動、ファンクショナルトレーニング、体幹トレーニング、静的ストレッチングなどをリコンディショニングとして実施しているが、個人因子やコンディショニングにも配慮した多様なリハビリテーションプログラムの提供は今後の検討課題である。

講義後の質疑応答を抜粋

Q.宇宙飛行士の帰還後のリハビリメニューが 45 日間に設定されていることには理由があるか？

A. リハビリの効率化により 45 日かからずに目標値を達成し完了するケース増えてきている。一方、ロシアなど国によっては温泉療法を取り入れてゆっくりとリハビリを実施する国もある。日本独自のリハビリメニューを構築したい。

Q. リハビリメニューに性差はあるか？

A. 現状、宇宙飛行士に女性は少なく、女性特有の問題等もあるだろうから産婦人科からの意見取入れも今後は必要になるだろう。

[第 6 回 11 月 6 日 宇宙での歯科分野への対応 前田初彦(愛知学院大学)](添付資料 4.1.6)

今回初めて宇宙での歯科問題について講義を行った。微小重力下における長期宇宙滞在は、ヒトの全身生理機能に多方面の影響を与えることが知られており、口腔領域も例外ではない。宇宙環境における歯および歯周組織への影響は、主に機械的負荷の減少、生体液組成の変化、免疫機能の低下、唾液分泌の変調、微生物叢(オーラルマイクロバイーム)の変化など、複数の要因が複合的に関与していると考えられる。まず、宇宙では地上と比較して咀嚼機能の低下が生じやすく、これにより歯および歯槽骨に対する機械的刺激が減少する。歯槽骨は荷重応答性の高い骨組織であり、咬合負荷の減少は歯槽骨の吸収や歯の動揺を助長する可能性がある。また、骨代謝全体において破骨細胞の活性化と骨芽細胞の抑制が確認されており、これが歯槽骨のリモデリングにも影響を及ぼすと推察される。さらに、宇宙環境下では唾液分泌量の減少が報告されており、これにより唾液の緩衝能・洗浄作用・抗菌作用が低下する。唾液中のカルシウムおよびリン濃度の変化は、歯の脱灰と再石灰化のバランスにも影響を与える。特に再石灰化が抑制されることにより、齲蝕(う蝕)発生のリスクが増

加する可能性がある。加えて、宇宙滞在中は免疫抑制状態に陥りやすく、これが歯周病原菌に対する宿主応答の低下を引き起こす。これにより、歯肉炎や歯周炎の発症・進行が助長される懸念がある。実際に、宇宙飛行士の口腔内細菌叢の変化や、特定の病原性細菌（例：Porphyromonas gingivalis）の増殖傾向が報告されており、これらが歯周病のリスク因子となり得る。また、宇宙では放射線暴露も避けられない環境要因の一つであり、高エネルギー粒子線による DNA 損傷や細胞機能障害が口腔粘膜や歯牙の発生・修復機構に影響を及ぼす可能性も示唆されている。これらの知見は、宇宙飛行士の長期的健康維持において口腔ケアの重要性を再認識させるものであり、将来的には宇宙用の予防歯科プログラム、マウスピース型の咬合刺激デバイス、あるいは唾液代替薬や口腔用プロバイオティクスの開発が求められる。総じて、宇宙環境は歯と歯周組織に対して多角的かつ潜在的なリスクを含んでおり、今後の宇宙歯科医療（space dentistry）の確立は、有人宇宙探査の実現における重要課題の一つである。

[第 7 回 11 月 23 日 フライトサージャンの役割 嶋田和人(筑波航研、元 JAXA 医師)] (添付資料 4.1.7)

第 7 回宇宙医学講義では、宇宙飛行士の健康管理を担う専門医（フライトサージャン）の実務について、講演者が JAXA フライトサージャンとして勤務した自身の経験談を交えながら、宇宙飛行士の医学運用について詳しく解説した。有人宇宙飛行に必要な支援活動について医学・医療を中心に述べた。国内では 1952 年の航空再開以来、有人飛行についての自主開発歴が乏しい。有人宇宙分野でも飛行士に関わる技術の開発経験は僅かである。有人宇宙開発については基盤である航空機の開発経験を積み、弾道飛行とその回収技術から習得するのが医学支援上も無理がない。我が国がこれから有人宇宙技術の自主開発にどう臨むのか、熟考する必要がある。講義では、JAXA フライトサージャンとして勤務した経験に基づき、宇宙飛行士の医学運用について解説した。軌道上での健康維持や帰還後のリハビリについても NASA や JAXA での運用方法について詳しく説明した。

[第 8 回 11 月 27 日 宇宙での自律神経系への影響 岩瀬敏(愛知医大)] (添付資料 4.1.8)

第 8 回宇宙医学講義では、微小重力が循環機能、自律神経機能に及ぼす影響と対抗措置について講義を行った。ヒトが微小重力に曝露されると、神経前庭系、心血管系、筋骨格系、骨代謝系、造血・免疫系、体温調節系にそれぞれ「宇宙酔い」、帰還後の起立不耐性などの心循環系デコンディショニング、筋萎縮、骨粗鬆症、貧血・免疫力低下、鬱熱などの様々な身体的な不都合が起きる。特に、心血管系の不都合は、体液移動、循環血液量低下に伴うもので、その大きな変化の原因は自律神経系の変容にあると考えられる（微小重力暴露による交感神経活動の変化は起立耐性維持に寄与している）。宇宙飛行後失神は、神経調節性失神であり、それに寄与する要因は、循環血液量の減少、下腿血液貯留量の増加、心拍数の増加に対する Bezold-Jarisch 反射の閾値低下、圧受容器反射の低下である。また、頭部方向への体液シフトが、緑内障、脳委縮を引き起こすリスクがある。このような不都合を解決する方法として、人工重力が提案されており、ベッドレスト実験により効果が実証されている。講師は、実際に人が搭乗可能な人工重力装置（大型遠心機）を製作し、これまで多くの実験を実施してきた。また、対照研究として人を長期間寝たきり状態にするベッドレスト実験なども行い、自律神経系からの新循環器への影響を研究してきた。とくに今年度は宇宙医学実習としてベッドレスト実験を実施する予定であることから、ベッドレスト実験とはどのような実験であるのか、過去のベッドレスト実験ではどのような結果が出ているのかなど模擬微小重力の比較として有用な点であることが強調された。まとめとして、宇宙空間での重力変化

が様々な生理的影響を及ぼすため、地上と同様の重力を発生させる人工重力が実現すれば、宇宙での多くの問題が克服できる可能性を示唆した。

[第 9 回 12 月 4 日 宇宙放射線の影響① 山敷庸亮(京都大学)] (添付資料 4.1.9)

宇宙放射線とは宇宙から飛来する放射線のことであるが、そもそも放射線とは何であるか。まず電磁波としての放射線は、電離放射線(紫外線・X 線・ γ 線)と非電離放射線(可視光線・赤外線・マイクロ波・電波)に大別される。その正体は光子(フォトン)であり、光子は質量を持たないがエネルギーを有する。光子のエネルギーが大きく、DNA などの生体高分子を電離させる、あるいは励起させることで発がん等の顕著な生体反応を及ぼす波長域の放射線を電離放射線とする。一方、光子のエネルギーが小さく、DNA などの生体高分子にそのような影響をほとんど与えない放射線を非電離放射線とする。生体に有害な電離放射線には電磁波のほかに、粒子の流れである粒子線がある。粒子線はさらに電荷を持つ荷電粒子線(α 線、 β 線等)と電荷を持たない非荷電粒子線(中性子線等)がある。 α 線とは不安定な原子核が崩壊時に放出する He 原子核(陽子 2 個・中性子 2 個からなる)である。※He より大きい原子核が放出された流れは重粒子線と呼び、宇宙放射線にはこれらも存在する。 β 線とは原子核から放出される電子や陽電子の流れ。中性子線とは原子核が核分裂するときに放出される中性子の流れである。地球は地磁気によって守られているため、地上にいる限り宇宙放射線の影響と直接受けることはほとんどない。ISS は地上から 400 キロメートル上空を飛行しているが、地磁気によるシールドの効果は ISS にも及んでいる。そのため、ISS に滞在する宇宙飛行士においてもこれまで宇宙放射線の直接的な健康障害は報告されていない。しかし、ISS では低線量で長期間宇宙放射線に暴露しているという事実がある。ISS 滞在 1 日では地上で浴びる半年程度の放射線量を浴びることが知られている。また、今後は月面や火星などのミッションも計画されており、地球の地磁気の保護が及ばない場所でどのように宇宙放射線を防御するべきかということは非常に重要なテーマである。

※講義概要は第 9 回・10 回分をまとめて記載

[第 10 回 12 月 11 日 宇宙放射線の影響② 山敷庸亮(京都大学)]

第 9 回の概要を参照

[第 11 回 12 月 18 日 宇宙での姿勢制御 萩生翔大(京都大学)] (添付資料 4.1.10)

第 11 回宇宙医学講義では、微小重力が姿勢制御に及ぼす影響について、筋肉の活動や動作を分析して、脳が運動を作り出す法則を明らかにしようという運動制御学的なアプローチによる研究を紹介した。人は地上においては 1G の下、平衡感覚を保っている。我々の個々の動作は様々な器官が統合されて、一つの動作を行うことが可能である。つまり、様々な自由度の組み合わせによって特定の動作を行っている。一つ一つの自由度を脳が 1 対 1 の関係で制御する場合、膨大な情報を瞬時に処理する必要がある。そのため、脳と末梢器官(骨格筋)の間には、シナジーと呼ばれるパターンが存在することが提唱されている。筋電図データから特定の動作に関わっている筋シナジーパターンを算出することが可能である。これまで行ってきた宇宙飛行士対象の宇宙実験では、約 6 ヶ月軌道上に滞在して地上に帰還した宇宙飛行士の筋シナジーパターンは帰還後 3 ヶ月経過しても、軌道上滞在前のパターンに回復していないことが分かっている。この原因については現在計画している宇宙実験でさらに解明する予定である。

講義後の質疑応答を抜粋

Q. 生後約3日の新生児の歩行中の筋シナジーにおいては、2個の筋肉のグループ(足を伸ばす・足を上げる)を使っていたのに対して、11~14か月の幼児では更に2個の筋シナジー(重力に対して体を支えるためのもの)を獲得して4個の筋シナジーを得るとのことだが、成長の過程で原始反射の一つである原始歩行が失われるが、筋シナジーにはどのような影響があるか？

A. 調べていないのでわからないというのが本当のところだが、反射が失われても系としては残っているのでプログラム自体は変わらないと思う。

Q. 筋シナジーのパターンの数は成長とともに変わってくると思うが、学習の過程でシナジーが増えていくのが一般的なのか、あるいは一度増えてから減らす方向に進むのか？

A. 運動制御の考え方では、一旦増やして、いらぬものを淘汰していく。今あるシナジーで対応できないときに必要に応じて再編していく運動学習の一環である。

【第12回 12月25日 宇宙服と低圧症 田中邦彦(岐阜医療科学大学)】(添付資料 4.1.11)

第12回宇宙医学講義では、講師自身の宇宙服開発の経過を紹介した。有人宇宙活動において、宇宙服の開発は重要である。船内で着用している衣服も広義の意味では宇宙服であるが、今回は特に船外活動用の宇宙服について解説した。はじめに、現行のNASA船外活動用宇宙服の構造を説明した。基本となる宇宙服のレイヤーは、気密を守るためのナイロン層と、宇宙服の膨張を防ぐために伸び縮みしない丈夫なポリエステル繊維素材(ダクロン)の拘束層から成る。さらに温度変化の激しい宇宙空間で身を守るためにアルミ蒸着した布を6層程度重ねて覆っている。船外宇宙服は、内圧が高いと宇宙環境が真空のため極端に膨張し、可動性が下がることとなる。そこで現在NASAの船外活動用宇宙服では、純酸素で内圧が0.3気圧に維持されている。このとき1気圧の船内からこの宇宙服の内圧0.3気圧へ急激な気圧変化をすると、血液中に溶け込んだ窒素が気化して気泡が発生し、血液中の酸素供給を妨げる等の障害が発生し(これを減圧症と呼ぶ)、最悪の場合死にいたる。これを避けるため、スペースシャトル時代は、船外活動前にはほぼ丸一日かけて0.7気圧まで徐々に船内の気圧を下げて予備呼吸を行い、その後宇宙服を装着して0.3気圧まで減圧するという手順だったが、現在は予備呼吸の段階でエクササイズを行うことでより速やかに血液中の窒素を排出でき、船外活動準備開始から4時間半ほどで船外活動ができるようになった。宇宙服の開発は、減圧症リスクを下げようとして高与圧にすると可動性が失われ、可動性を保つために低与圧にすると減圧症リスクが高まるという二律背反にある。この問題を解決するため、講師はスーツ等での締め付けによる加圧を加えた宇宙服、弾性と圧スーツについて研究を行った。気圧、接触圧を問わず、0.3気圧を確保できれば減圧症にならない検証までは実施できたが、わきの下やまたぐらといった箇所、これらは太い血管が皮下に走っているのでここに圧力をかけられなければ減圧症を起こすのだが、均一に圧をかけることが困難であった。仮にストッキングのような素材で0.3気圧相当の圧力を全身にくまなくかけようとする、mmHg換算で220mmHg。これは健康な人の動脈血圧よりもさらに高い。このようなスーツを装着すると全身の血流が止まる。また、内圧0.3気圧で飛行士は船外活動を行うが、肺水腫のリスクに曝され続けており、活動上限は8時間に定められている。常時暴露可能な気圧は0.65気圧とする実験データがある(Webb et al. 1998)が、これは富士山頂上の気圧と同程度である。今後は、月周回軌道でのミッションなども計画されており、宇宙飛行士にとって効率的にミッションを実行できる宇宙服の開発が重要となってくる。

講義後の質疑応答を抜粋

Q. 弾性と圧スーツの課題として、凹部(わきの下やまたぐら)への均一な加圧が難しいとのことであったが、不足分について空気圧で補うといったハイブリッド形式ならばどうか？

A. 0.3 気圧相当、あるいは 0.65 気圧相当をかけようとするとうすつが膨らんでしまう。素材の強度不足で上手くいっていないというのが現状である。着眼点はとても良いと思う。

Q. 船外活動用宇宙服の開発にあまり大きな進展が見受けられないのは、予算の問題もあるのか。

A. アルテミス計画や今後の火星開発計画にあわせて宇宙服開発の動きもあるようだが、公表されている情報が非常に少なく、また公開されているものに関しても、これまでの宇宙服開発で判明した課題を解決しようとしているように見受けられない。与圧したうえで可動性を確保するのは難しいのだろう。

Q. スキューバダイビングにおいては、呼吸は別に確保して、皮膚だけならば 5 気圧程度までは耐えられるという話がある。宇宙服においてもそのような展開はできないのか。

A. できない。毛細血管は非常に繊細で破裂しやすい。

[第 13 回 1 月 8 日 宇宙での動物実験 高橋昭久(群馬大学)]

第 13 回宇宙医学講義では、宇宙での動物実験について講義を行った。宇宙空間における人体および生物へのリスク要因の一つとして、宇宙放射線の影響が極めて重要視されている。地球の磁場および大気圏に守られている地表環境とは異なり、宇宙空間では銀河宇宙線(GCR: Galactic Cosmic Rays)や太陽粒子線(SEP: Solar Energetic Particles)といった高線量かつ高線質の放射線に曝露される。これらは主に高エネルギー陽子、ヘリウム核(α 粒子)、および重粒子線(HZE 粒子)で構成され、生体内での高い線エネルギー付与(LET: Linear Energy Transfer)を特徴とする。このような宇宙放射線による生物影響の解明を目的として、マウスやラットを用いた動物実験が国際宇宙ステーション(ISS)内外や地上のシミュレーター(加速器)において数多く実施されてきた。たとえば、JAXA や NASA による宇宙実験では、放射線曝露による DNA 損傷、染色体異常、細胞周期停止、アポトーシスの誘導などが詳細に解析されている。特に γ -H2AX フォーカス形成や 8-OHdG の発現は、酸化ストレスおよび DNA 二本鎖切断の有用なバイオマーカーとして利用されている。奈良医科大学の大西武雄教授をはじめとする研究者らは、宇宙放射線ががん誘発や神経変性疾患、免疫機能低下など長期的な健康リスクに及ぼす影響を動物モデルを用いて評価した。実験では、急性および慢性的な放射線曝露に対して、各臓器の応答性、細胞レベルでの転写制御異常、さらには遺伝子発現の変化に焦点を当てた解析が行われ、特に造血系・神経系・消化器系への影響が注目されている。また、放射線の線質によって生物学的効果が大きく異なることから、相対生物効果(RBE)の測定も不可欠であり、HZE 粒子の RBE は X 線や γ 線と比較して非常に高いことが示されている。これに基づき、宇宙飛行士の被ばく線量管理には、実効線量に加えて、質量遮蔽、被ばく時間、個体差といった多因子を考慮した個別化医療的なアプローチが求められている。さらに、放射線防護に向けた研究も進展しており、ラジオプロテクター(例:アミフォスチン)や抗酸化物質(ビタミン E、NAC など)の投与、DNA 修復促進因子の活性化といった分子レベルでの介入が試みられている。総じて、宇宙放射線に関する生物実験は、宇宙探査時の被ばくりスク評価と同時に、地上における放射線医療やがん治療研究にも応用可能な知見を多数提供しており、宇宙医学と放射線生物学の融合領域として今後も重要性を増していくことが予想される。

[第 14 回 1 月 22 日 宇宙での骨格筋への影響② 河野史倫(松本大)] (添付資料 4.1.12)

第 14 回宇宙医学講義では、衰えない筋肉を作るための骨格筋エピジェネティクス研究について講義を行った。14 日間の宇宙飛行がラット後肢筋に与える影響として、ヒラメ筋、腓腹筋に顕著な筋委縮が認められたのに対して、前脛骨筋には顕著な筋肥大が見られたと報告されている。講師らはパラボリックフライトによる微小重力環境下でのラットの姿勢変化と筋電図の変化の関係性を確認し、微小重力環境で活動低下する筋肉に筋委縮が起きる(廃用性筋委縮)ことを明らかにした。次に他のグループ研究成果として、ISS で 90 日間の宇宙実験を行ったマウスの骨格筋繊維の変化に関する報告を紹介した。抗重力筋のヒラメ筋において一部遅筋繊維から速筋繊維への変化が生じることが分かった。また、ISS 長期滞在(180 日)クルーにおけるヒラメ筋繊維サイズ変化のデータのばらつきを示し、ISS 滞在中の運動方法選択においてトレッドミルの「走る」運動の少ないクルーにヒラメ筋繊維サイズダウンの傾向があると考えられていることを紹介した。地上でも運動効果獲得における個体差があることがわかっており、遺伝的要因のみならず、生活習慣や運動歴等の後天的要因も存在するという仮説を講師は立てた。遅筋から速筋への置換では 7 割強もの遅筋が残っている事実講師は着目した。この仕組みを解明できれば速筋へ置換されにくい遅筋を作れるのではないかと。将来的には宇宙でも衰えない、萎縮しない筋肉を遺伝的に作ることができるかもしれない。これらの研究を動物実験で継続していくことが重要である。

講義後の質疑応答を抜粋

Q. 遅筋と速筋はエピジェネティクスの的にはどの段階で分けられると考えられるのか。

A. 未解明の部分なのではっきりとしたことは言えないが、損傷した遅筋が再生する際には速筋から速やかに遅筋に変わるが神経入力がないと遅筋にはならない。神経入力が遅筋の特徴を決めていることは間違いない。微小重力環境と人工重力による 1G 環境を作れる ISS のマウス実験にて、筋細胞が遅筋と速筋のどちらになるかを決定する遺伝子を特定しようとしているが、まだ決定的なものは見つかっていないようだ。

Q. 速筋に比べると、遅筋のほうが筋核は倍くらい多いが、遅筋のほうが修復しやすいという理解で良いか。

A. サテライト細胞数も遅筋のほうが若干多いので、再生能力に大きな差があるという報告はないが、サテライト細胞の増殖活性が高いために筋核が多いという考え方で間違いはないと思う。

Q. サテライト細胞自体は遅筋も速筋も同じものなのか。

A. サテライト細胞そのものは同じ。血流量や代謝物が異なればサテライト細胞の増殖の活性、分化には差が出るかも知れない。

Q. 遅筋への置換を目指すにあたって、筋委縮が悪影響を及ぼすことはあるか。

A. たとえば廃用性筋委縮の問題は、筋力低下ではなく、構造上の乱れにより筋力を発揮できなくなる点にある。今の性能のまま小さくなることには特に問題はない。

Q. 筋肉の修復が不利というが、筋肥大と筋繊維の性質は分けて議論すべきということか。

A. 生体の筋肉が一度壊れて再生すると、その時にあるサテライト細胞からしかできないのでせっかくの筋核の多様性が失われてしまう。再生後の筋細胞は血糖の処理が非常に早くなるが運動応答が見られなくなる。一度壊れて再生した筋繊維のほとんどが FOG 筋(速筋繊維 type2a)になる。エネルギー代謝には優れているが外の

刺激には応答しない。筋核にも多様性が必要ではないか。運動に応答しやすい、代謝が強い、加齢や病気に対する耐性がある等々。

2.1.2. 宇宙医学講義におけるコンセプトマップ解析(京都大学)

有人宇宙医学講義を通し、宇宙医学に対して学生が持つイメージがどのように変化し、学生が何を学んだのかを可視化する目的で、コンセプトマップを講義の前後で作成してもらい、前後のコンセプトマップの構成を比較することで、学生の講義理解度を評価した。今回もこれまで同様に、中心テーマを「微小重力への生体適応」とし、以下の作業を行った。

- i. 中心テーマ(ここでは「微小重力への生体適応」)を構成しているコンセプト(=中心テーマについて知っている事柄)を書き出す。
- ii. 関係性を考えながらコンセプト間をリンクで繋ぎ、可能な限りリンク語を書き入れる。

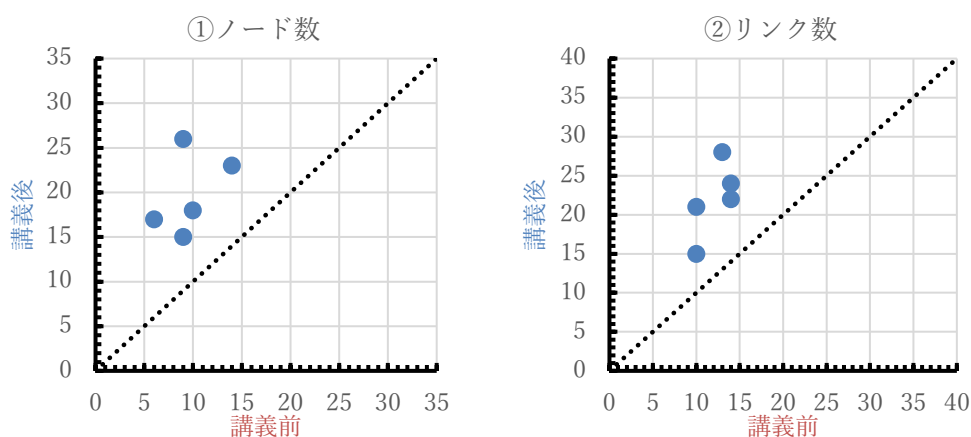
コンセプトマップは第1回目の講義(2024年10月2日)と、第14回目の講義(2025年1月22日)が終了した後にそれぞれ20分間作成する時間を設け、学生に作成してもらった。

【コンセプトマップ解析】

コンセプトマップにおいては、リンク数が多いノードほど学生が明確なイメージを形成している重要な概念であると考えられる。そこでリンク数が3つ以上のノードを抽出し、その変化を見ることで、講義がイメージ形成にどのように影響したかを解析した。

【コンセプトマップの分析結果】

ここで、①ノード数、②リンクの数、③3つ以上のリンクをもつノードの数、④③のノードのリンク数合計とし、おのの平均値や増加率、標準偏差を比較した。①～④についてx軸を講義前、y軸を講義後として数をプロットし(図3)、講義前からの数的変化を範囲に分けて、ヒストグラムで示した(図4)。



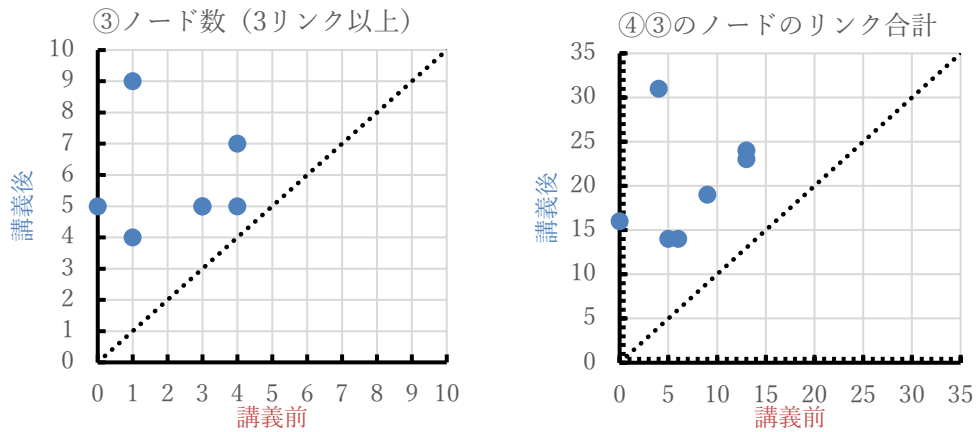


図 3: コンセプトマップにおける講義前後の関係

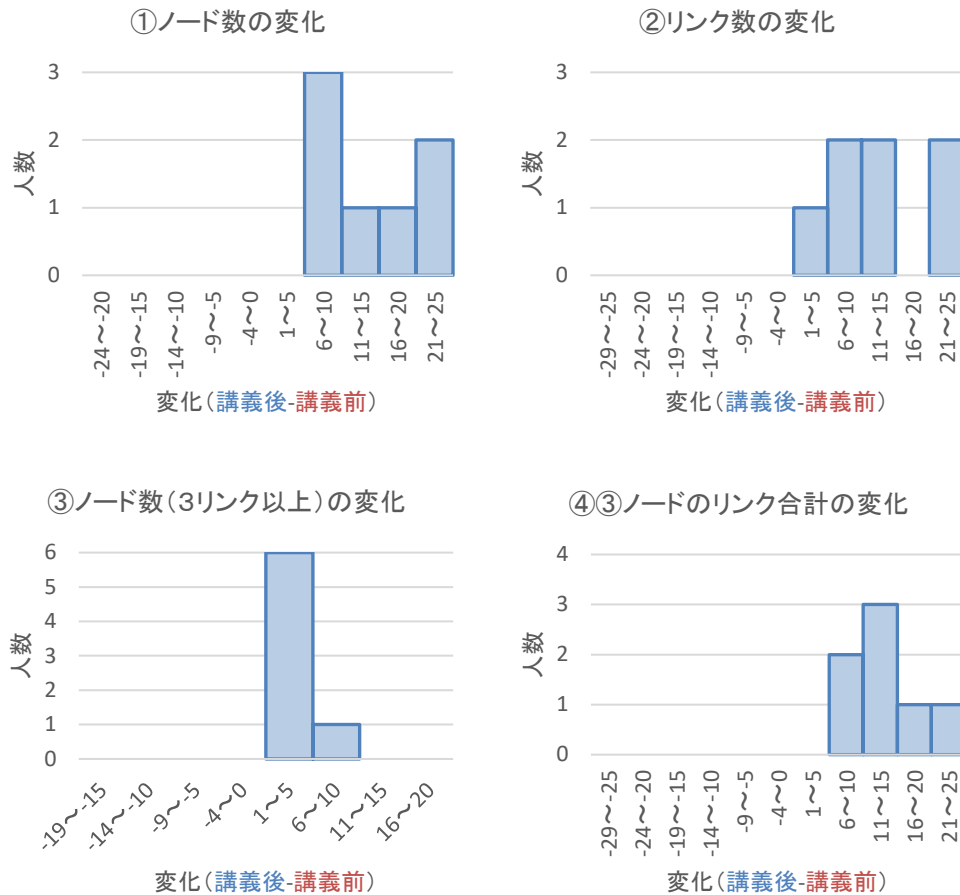


図 4: コンセプトマップにおける講義前後の変化量分布(ヒストグラム)

【ノード数の変化】

講義前の平均値は 10.3、講義後は 27.3 であり、約 2.65 倍となった。図 3-①と図 4-①のとおり、すべての学生のコンセプトマップでノードは増加していた。講義を受講することによって専門的知識が増えたと想像できる。

【リンク数の変化】

講義前後で平均値の変化は 12.3 から 30.4 となり、約 2.5 倍となった。すべての学生のコンセプトマップでリンク数は増加していた。全体としては、コンセプトマップを見ると、講義内で触れた内容や専門外の単語も並ぶようになり、知識の幅が広がったように思われる。

【3リンク以上をもつノード数の変化】

平均値は講義前の 2.3 から講義後は 5.3 という結果を得た。変化に大きな個人差がないのは、図 4-③を見ても範囲にばらつきが少ないことから明らかである。講義前からノード数が多くなかった理由としては、今回の講義は宇宙医学に特化したものであったため、特に医療系・生物系でない学生にとっては専門的な用語間の複雑な繋がりを具体的にイメージすることは若干難しかった可能性がある。

【3リンク以上をもつノードのリンク合計の変化】

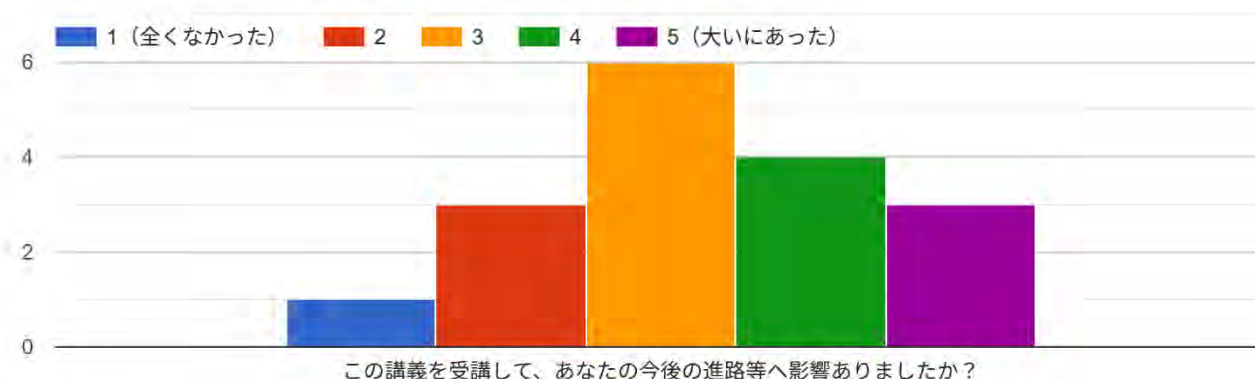
平均値は 7.1 から 20.1 へと約 2.8 倍増加した。一方で図 4-④を見ると、すべての学生でリンク合計が増えており、20 以上増えた学生もいた。今回の講義はオムニバス方式で、宇宙医学としても広い範囲を網羅していたが多く数の学生が講義終了後には複雑な繋がりを認識していたものと思われる。

【ノードの内容変化】

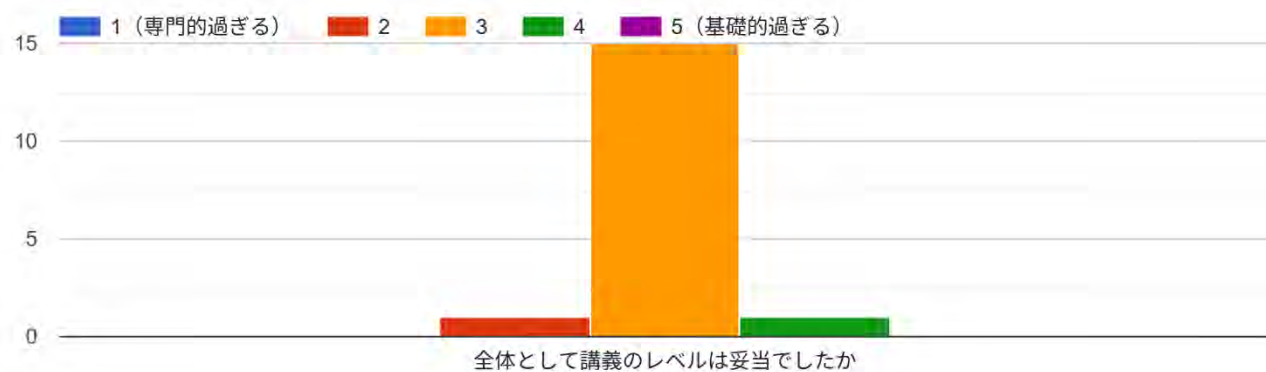
- ・これまで通り、「宇宙放射線」、「筋萎縮」、「体液シフト」、「宇宙酔い」、「骨量減少」といったノードが複数の履修者に共通してみられた。もともと宇宙で生じる変化のイメージとして、宇宙放射線や宇宙酔いといったポピュラーな用語を講義を受けることによって、さらにイメージ付けできたと思われる。
- ・講義前は微小重力の影響として、「免疫」、「精神ストレス」、「筋力」といったノードがみられていたが、講義後には「筋萎縮」、「骨密度低下」、「心循環低下」、「眼球変形」といったノードが多く数の学生で見られるようになっていくことから、内容が具体的になり、バリエーションが増えたことがわかる。また、今回の講義では骨や歯についての講義も新規に加わったため、それらに関する用語も講義後には増えていた。講義を受けることによって、これまで漠然としていたイメージがよりはっきりとイメージできるようになり、身体変化を想像できるようになったと思われる。

2.1.3. 宇宙医学講義後におけるアンケート結果(京都大学)

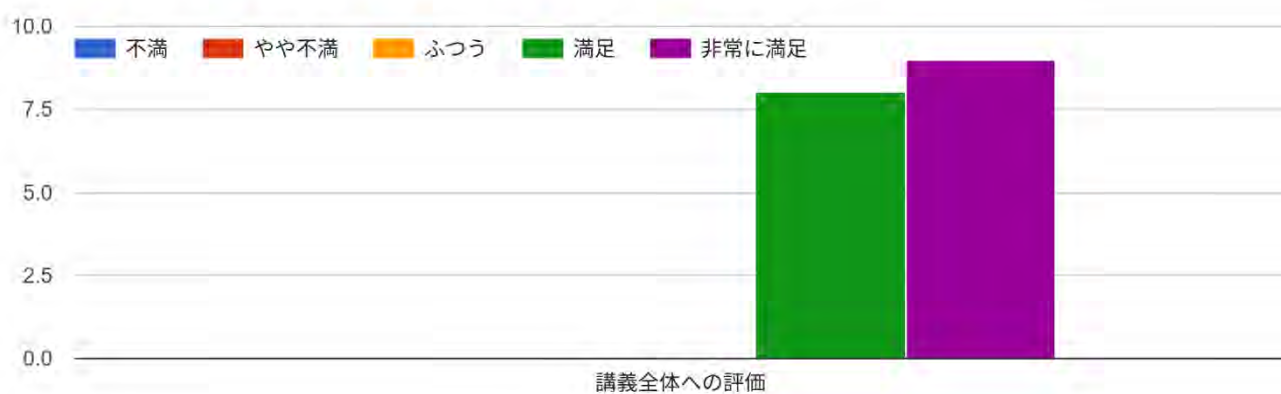
進路等への影響



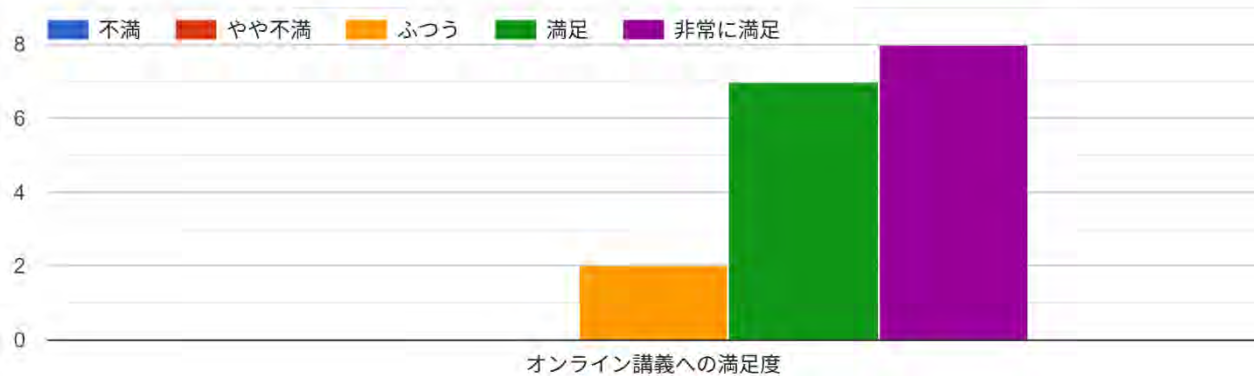
講義レベル



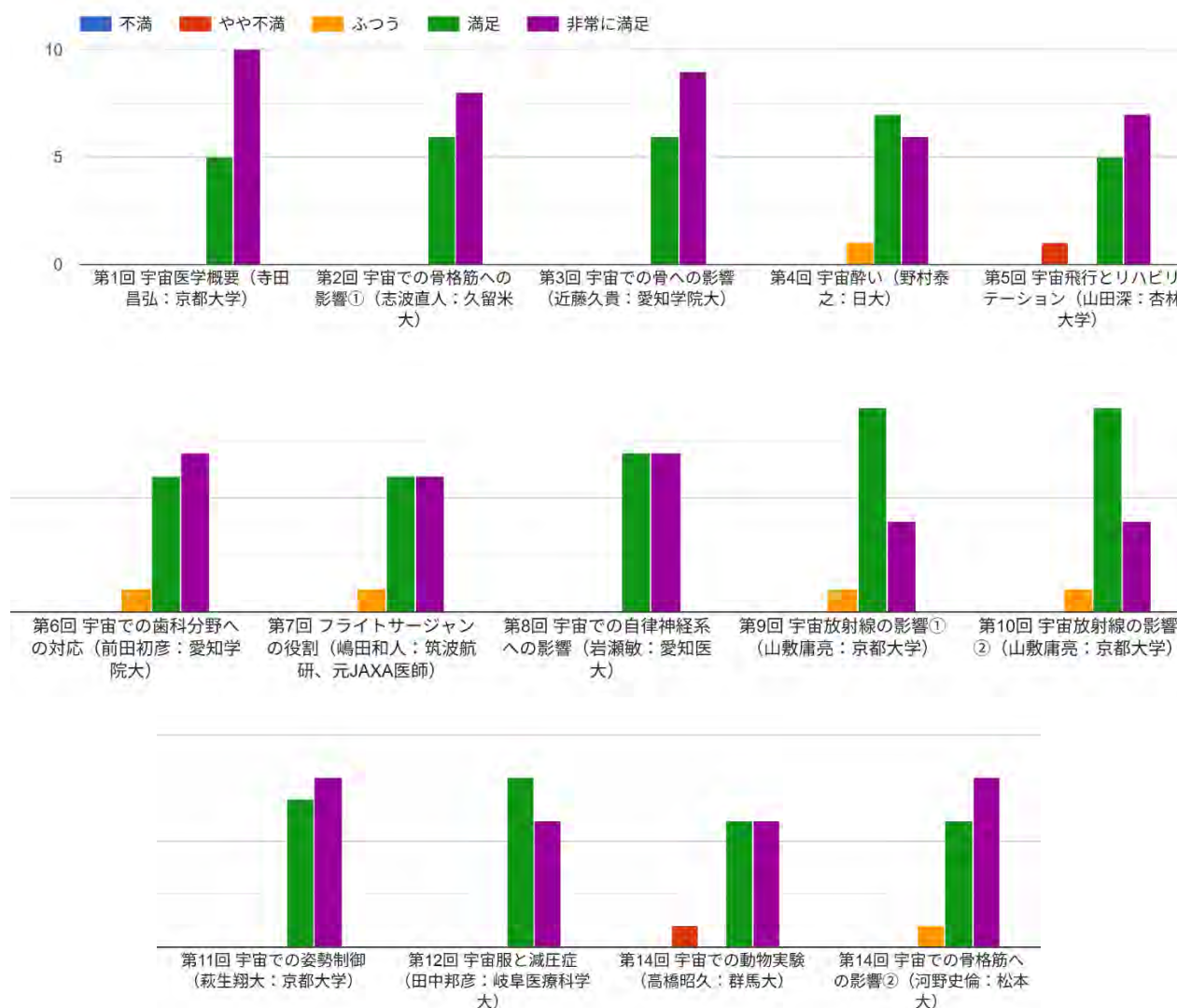
講義全体への評価



オンライン講義への評価



各講義への評価（出席した講義のみ記載してください）



最もよかった授業名とその理由を記載してください(原文まま)

- 宇宙放射線分野の講義には当初から関心があった。
- 第 10 回 宇宙放射線の影響 放射線について基本的な部分から教えていただけて大変勉強になりました。話し方も引き込まれるような講義で聞き入ってしまいました
- 宇宙での骨への影響(近藤久貴：愛知学院大)理由は、熱意をもってご自身の体験をもとに授業を展開されていたから。
- 宇宙医学概要: 学びの楽しさが伝わってきたから(こちらも楽しくなりもっと知りたくなった)宇宙での骨への影響: 歯と宇宙の接点は全く予想していないことだったから
- 7 回 フライトサーजनも知らなかったが、後半の宇宙に関する話題が興味深かった。又、宇宙医学の今迄の復習もできた。
- 第 5 回

- 第3回 宇宙での骨への影響(近藤久貴:愛知学院大)
- 全体的にわかりやすく、根拠等がしっかりしていたように感じた。
- 第12回 宇宙服と減圧症(田中邦彦:岐阜医療科学大)
- 日本人が宇宙服に挑戦する気概を感じることができた

最も不満だった授業名とその理由を記載してください(原文まま)

- 特になし
- ありません
- 過去の実績のご紹介での学びは多くありましたが、最新情報が少なかった授業もあったように感じました。
- 無かったです。
- 第7回
- 第14回 宇宙での動物実験(高橋昭久:群馬大)
- 内容に興味がなかった可能性もあるが、実験内容や結果が結びつかなかった。

オンライン講義への感想(良かった点、悪かった点)などを記載してください(原文まま)

- 大変興味深いお話を多数拝聴でき、感謝しています。
- 大変とは思いますが社会人でも受講できるような形で講義をしてくださって感謝しております。今後もつづけていただけると嬉しいです
- 良かった点は、定刻に参加できなくても後日拝聴することができ、また、遠隔地でも参加が可能であった点がよかったです。
- オンライン講義だったので、生徒同士での交わりが全くなく、ディスカッションやグループワークがないのでネットワークは広がらなかった。小学生の子供の体調不良の時でも、家でオンラインで講義に参加できたり録画で受講できたことは大変ありがたかった。
- 好きな時間に講義を聞けるので良いです。悪かった点は、通信状態が悪い等で開始が遅れたり、映像、音声が届かなくなることがある。
- zoom に接続しているパソコンの前に誰もいないのか、配信上での不具合に気づいてもらえるまでに時間がかかっていた。リアルタイムで受けられない人への配慮があり、遠方からでも講義を聞けることが嬉しかった。
- 適宜オンデマンドにも対応して下さったので欠席した際は助かった。
- 社会人でも宇宙医学を勉強することができました。生涯教育として大変ありがたかったです。悪かった点としては、スライドを共有できない会があった気がします。改善いただければ幸いです。
- 当日にオンラインで参加できなくても、後日視聴できるので、良いと思う。
- 対面授業の時間には参加ができませんでしたが、講義動画の配信があったので非常に助かりました。

進学・就職された場合にはその所属先を教えてください(業界、教育業界、理系大学院などでもOKです。)

8 件の回答



その他、講義全体の感想などを自由にご記入ください(原文まま)

- 人工冬眠などの分野のお話も、今後もし拝聴する機会がございましたら是非お願いいたします。
- 現役で、宇宙医学に係わられている研究者の方々に講義していただき大変有益でした。NASA で実施されている Aerospace Medicine Clerkship などご参考にして頂きながら、より宇宙医学研究と健康管理運用が連動されたシステムを構築されると素晴らしいだろうと感じました。貴重な授業を提供頂きありがとうございました。
- ほぼ 10 年間、子育てに専念していたこともあり、大学 1 年生に戻ったつもりで本講義に臨みました。宇宙医学という分野は、私にとってまさに「真っ白なキャンバス」でしたが、今回の学びを通じて、ようやく輪郭が見えてきたように感じています。まだ自分に何ができるのかを模索している段階ではありますが、有人宇宙探査において宇宙医学は最も重要な分野の一つであると強く実感しました。火星基地や月面基地での人体への影響、宇宙船での移動中の生理的・心理的対策など、未解明な点が多く、今後大きな進展が期待される分野であることがわかりました。当初は医師でなければ関われない分野だと考えていましたが、実際には非常に幅広い領域で成り立っており、非医療従事者にとっても貢献の可能性があることを知りました。同時に、宇宙空間で人を対象に実験を行うには倫理的制約が多く、さらに動物実験にも厳しい制約が課されていることを知り、非常に驚きました。飛躍的な発見が容易ではない反面、新たな領域である宇宙という場だからこそ、従来とは異なるアプローチが求められ、スピード感ある解決策の創出が必要とされていると感じています。宇宙開発は私にとってまだ新しい世界ですが、できる限り宇宙医学の分野にも貢献していきたいです。今回の授業では、社会的・精神的、そして心療内科的な観点からの宇宙医学について触れる機会がなかったため、もし再び受講の機会があれば、そのような視点からの学びもぜひ深めてみたいと考えています。
- 時期が少し前倒しにして、年内終了等が良かったのではないかと思います。2-3 月は年度末で報告書作成のシーズンの為。
- 知らないことだらけのまま受けた講義でしたが、学ぶことがとても多く楽しかったです。ありがとうございました。

- このような講義を行なっていただけることで、宇宙医学への理解が網羅的に広がりました。今後もぜひ継続いただければありがたいです。可能な限り毎回受講させていただきます。
- 平日の昼間は参加し難いので、出来れば夜か土曜日や日曜日に実施して欲しい。
- 有人宇宙活動における人体の反応をいろいろ知ることができて楽しかった。
- 仕事との掛け持ちでの講義受講のため、出席率が低く申し訳ありませんでした。聴講した回は宇宙医学の学問分野としての広がりを知るなど非常に勉強になりました。

アンケートの結果から、宇宙医学講義自体は高く評価されていることが判明した。特にオンラインでの授業の提供は、オンタイムで参加できない場合でも受講できることと遠隔でも参加できることが好評であった。講義内容・レベルについては、宇宙医学の基礎的な知識提供を目的としているため、ある程度宇宙医学に携わっている受講者には物足りない部分もあったかもしれないが、広くテーマを扱っているため、自分の専門分野の知識も習得できるといった利点があった講義だと確信する。

2.1.4. 岐阜医療科学大学での宇宙医学講義

岐阜医療科学大学では、前期・専門基礎分野・保健医療福祉と臨床検査・選択講義の環境医学概論として、宇宙医学講義を実施した。有人宇宙開発の歴史と、宇宙医療科学(宇宙空間の人体への影響、対抗策、地上での医療との共通点・相違点など)について講義を行った。受講生は岐阜医療科学大学の臨床検査学科の4年生であるため、医療関係者の視点から有人宇宙開発を理解してもらう目的である。

全8回の講義内容は下記の通りである(添付資料4.2)。

第1回 有人宇宙開発の概要：

世界の有人宇宙開発の概要を解説する。

第2回 循環器系：

重力変化に対する心・循環系への影響と高齢者医療との関連について解説・演習を行う。

第3回 運動系：

重力変化に対する筋・骨への影響と高齢者医療との関連について解説・演習を行う。

第4回 感覚器系：

重力変化に対する感覚器と高齢者医療との関連への影響について解説・演習を行う。

第5回 放射線影響：

有人宇宙開発に伴う放射線影響と人体における放射線障害について解説・演習を行う。

第6回 船外活動：

宇宙服の構造・機能と高地医学について解説・演習を行う。

第7回 宇宙医学史：

本邦の宇宙医学研究の歴史について解説する。

第8回 本邦の宇宙開発：

本邦の宇宙開発の展望について解説する。

2.2. 模擬微小重力暴露実験の実施(講義で学んだ知識を実践的に体験・実施する):

2.2.1. ベッドレスト実験実施報告

令和6年度の模擬微小重力暴露実験(ベッドレスト実験)として、令和6年9月8日～19日の日程で岐阜医療科学大学においてベッドレスト実験を実施した。10日間の「6度ヘッドダウン・ベッドレスト」を行い、その被検者のケアおよび計測を、宇宙医学に関心のある学生とともに行った。

同実験・実習は一定期間、被検者を床上で生活させ、食事・排泄といったすべての行為を床上でしかも臥位で行わせることによって、①身体を支持、移動させる筋・骨といった運動器、特に日常的に体重を支えている下半身及び体幹部の運動器に対する負荷を消失させる。またこのとき、臥位から立位、座位といった姿勢変化、つまり身体にかかる重力方向の変化も消失するため、②深部感覚あるいは内耳・前庭系といった平衡感覚器官への入力も消失する。この時、頭部方向を水平状態から6度低位にすることで、③頭部方向への血液移動を惹起させる。①～③の効果によって、地上1G環境において、微小重力環境における身体状況を模擬するものである。

ベッドレスト実験日程:

9月8-9日: ベッドレスト実験前のプレ測定

9月9-18日(10日間): ベッドレスト期間

9月18-19日: ベッドレスト実験後のポスト測定

昨年度(令和5年度)に倫理申請を行った。倫理審査は、京都大学と岐阜医療科学大学の多機関共同研究における中央一括申請として、岐阜医療科学大学の研究倫理委員会へ申請した。研究倫理委員会へ申請した研究計画書の内容を記載する。

1. 研究課題名

模擬微小重力曝露に伴う身体的変化と内耳前庭系電気刺激の影響評価

2. 研究実施体制

岐阜医療科学大学 大学院保健医療学研究科 教授 田中邦彦

研究計画作成, 統括, 実験実施, 解析, 発表

同 教授 丹羽政美

MRI 検査実施・解析

同 講師 杉浦明弘

MRI 検査準備・実施・解析

同 教授 杉浦浩子

ベッドレスト準備・実施

京都大学 宇宙総合学研究ユニット 特定准教授 寺田昌弘

ベッドレスト実施・運動機能評価

京都大学 人間環境学研究科 准教授 萩生翔大

運動機能評価

3. 研究の目的及び意義

3-1. 研究の背景

提案者らは、内耳前庭系電気刺激が内耳由来の姿勢や血圧調節機能を改善させることを報告してきた。また、内耳前庭系が骨形成や免疫応答にも影響を及ぼしていることが明らかになってきた。

人体が微小重力に曝露されると、血液の頭方移動、筋・骨への負荷低減、内耳前庭系への入力消失等によってさまざまな変調をきたす。提案者は長期宇宙滞在によって内耳前庭系機能が低下することを法億してきた。

3-2. 研究の目的と意義

微小重力環境曝露中も内耳前庭系に刺激を加えることでこの機能低下が抑制されるのではないかと考えられる。そこで本研究では、内耳前庭系の変調がほぼ確実な2週間弱、模擬微小重力環境(6度頭低位での臥床生活)に曝露し心・血管・筋・骨・免疫系にいかなる変調が認められるか、その変調が内耳前庭系への継続的電気刺激によって予防できるか否か、できるのであればどの程度可能かを定量的に検証する。

4. 研究の方法及び期間

4-1. 研究実施期間

許可日から 2027 年 3 月 31 日まで

4-2. 研究の方法

1. 被検者

- ・ 健常男性 12 名(令和 5 年度、令和 6 年度の合計)
- ・ 問診の結果から、研究者が被験者として実験に参加可能と判断した者。
- ・ 半数を刺激群、残りを対照群とする。

2. -6°ヘッドダウンベッドレスト(岐阜医療科学大学可児キャンパス 基礎・成人看護実習室・1号館 2111): -6°に頭部を下げた状態にセットしたベッド上で仰臥位姿勢になる。

- ・ 被験者は、頭を-6°下げた姿勢を保ってさえいれば、側臥位や伏臥位姿勢への寝返りを許可する。
- ・ 読書、PC 使用、勉強などは自由に行うことができ、被験者同士や訪問者との談笑も混乱を招かない範囲であれば許可するなど、必要以上に被験者の生活を制限しないこととする。
- ・ 生活上に不便が生じた場合は、専属の看護スタッフが補うこととし、看護スタッフや医師(看護スタッフは日中 2 名、夜間 1 名。医師は日中 1 名、夜間 1 名)が 24 時間体制で被験者の要望にできるだけ応え、話し相手をつとめたりして、実験中の被験者のストレスを出来るだけ軽減するようにする。看護師は岐阜医療科学大学職員および公募に応募してきた者に依頼する。時給 1250 円を支給予定。
- ・ 携帯電話通話も午前 10 時から午後 10 時まで、実験に差し支えない範囲で許可する。ベッドレスト中は規定食(朝、昼、夕)のみを摂取させ、約 2,200Kcal/日に規定する(給食業者に依頼)。
- ・ 水分摂取はミネラルウォーターか麦茶をペットボトルにて与え、脱水を避けるために前日の 1 日尿量と同じ量を最低限摂取するように指示する。不感蒸泄分は被検者の任意とする。
- ・ 食事や排泄はベッド上で仰臥位か側臥位で行い、必要時には看護スタッフが介助する。
- ・ 入浴の代わりにベッド上で清拭および洗髪を毎日行う。
- ・ 各ベッドはパーティションで区切り、可能な限りプライバシーの確保に努める。

- ・ ベッドレスト前中後で 4-3 の計測を行う。

3. -6° ベッドレスト中の内耳前庭系電気刺激 (Galvanic Vestibular Stimulation; GVS):

- ・ 刺激群の被験者は、1 日 10 分間の GVS を毎日行う。
- ・ 耳介後部に電極を置き 0.1~3.0 mA、振幅一定のホワイトノイズ波形による電気刺激を加える。
- ・ まず刺激を感じることができる体感閾値となる電流強度を確認する。刺激群(6 名)には体感閾値の 90%の強度で刺激を行う。刺激強度は期間中変更しない。対照群(6 名)には体感閾値確認後、0mA で 10 分間同様の手技のみ行う。

※刺激群・対照群の()内の人数は、令和 5・6 年度の 2 回分の実験の総数。各年度それぞれの群は 3 名。

4-3. 観察及び検査項目とデータの収集方法

1. ベッドレスト前後の計測

① 起立時血圧応答(1 号館 1221)

- ・ 0° および 60° で各 5 分間、姿勢を維持させ以下の項目を計測する
- ・ 心電図, 呼吸曲線(DL-320、S&ME)
- ・ 連続血圧、1 回拍出量(Human NIBP, AD Instruments)
- ・ 血管年齢(アルテット 2、ユメディカ)

② 重心動揺(岐阜医療科学大学可児キャンパス 1 号館 1221)

- ・ 直立時の重心動揺を計測する(重心軌跡測定装置、武井機器)
- ・ 開眼 1 分、閉眼 1 分の重心動揺距離・外周面積・X 軸 Y 軸それぞれの周波数応答を解析する。

③ 耳石機能検査(岐阜医療科学大学可児キャンパス 1 号館 1221)

- ・ 500Hz、持続時間 0.1msec の音を 1 秒間に 5 回、20 秒間、100 デシベル程度の大きさでヘッドフォンから聞かせたときの胸鎖乳突筋筋電図測定。

④ 骨・免疫代謝マーカー

- PTH-インタクト
- カルシトニン
- オステオカルシン
- BAP
- Ca
- IP
- 1,25-(OH)₂ ビタミン D
- リンパ球マーカー(CD4, CD8)

⑤ 骨密度

- ・ 頭蓋骨・上腕骨・肋骨・骨盤・腰椎・大腿骨・踵骨の骨密度(岐阜医療科学大学関キャンパス CT 室)

⑥ 胸腺容積(関キャンパス CT 室)

- ・ 胸腺のサイズを評価する

⑦ fMRI

- ・ 視覚誘導自己運動感覚に起因する脳内応答評価(岐阜医療科学大学関キャンパス MRI 室)

<京都大学>

⑧下肢拮抗筋の筋活動パターン測定

立位時ならびに歩行時の筋シナジー測定を実施する。立位時の筋シナジーは、床反力計上にて静止立位を維持した後、前方のディスプレイに呈示された 12 方向に設定されたターゲットにできるだけ足圧中心を一致させる立位課題を行い測定する。課題中、前後・左右方向の足圧中心位置および両脚のヒラメ筋、腓腹筋内側頭、腓腹筋外側頭、前脛骨筋、外側広筋、大腿直筋、大腿二頭筋長頭、中殿筋よりワイヤレスの筋電計測装置 (FreeEMG1000) を用いて表面筋電図を導出する。足圧中心がターゲットまわりで安定した時間の筋電図データを用い、非負値行列因子分解により筋シナジー (筋シナジーから各筋への重みづけベクトル) とその活動度 (中枢神経系から筋シナジーへの運動指令) を算出する。歩行時の筋シナジーは歩行中に取得した筋電図データより算出する。

⑨歩行動作解析

動作解析カメラシステム (MICROCAM200-4) を用いて、ベッドレスト開始前ならびに終了後にベッドレスト被験者の歩行中の動作解析を行う。

⑩心電図測定

心電計 (Bittium Faros180) を用いて、ベッドレスト実験中のベッドレスト被験者の心電図をベッドレスト実施中に連続で測定する。

2. ベッドレスト前後の計測 (基礎・成人看護実習室)

① 血圧

- ・ 血圧測定装置を用いて毎日定時に計測。

② 深部温 (鼓膜温) と末梢温

- ・ 1 日 3 回定時に、鼓膜温計、体温計を用いた体温測定を行う。

③ 水分出納

- ・ 飲水量・食事量・尿量・便重を連日計測する。

5. 評価項目

【主要評価項目】

- 起立時血圧応答
- 京大: 歩行動作応答、心拍変動応答

【副次的評価項目】

- 重心動揺・耳石機能・代謝マーカー・骨密度・胸腺容積・fMRI
- 京大: 筋電図 (EMG) データ、床反力データ、カメラ動画データ、心電図データ

6. 研究対象者の選定方法

6-1. 選択基準

口頭、広告公募に対して応募してきた、岐阜医療科学大学学生を含めた健康ボランティア

6-2. 除外基準

重篤な循環器系・筋・骨・耳鼻科的疾患の既往のある者、治療中の者

7. 研究の科学的合理性の根拠

7-1. 目標数とその設定根拠

12 名

統計的有意水準を得るために 1 項目あたり最低 6 名が必要。刺激群と対照比較のため計 12 名。

7-2. 統計解析方法

t 検定・分散分析・ノンパラメトリック解析の内、実験方法ならびに得られたデータに応じて適切なものを採用する。総じて適切なものを採用する。

8. インフォームド・コンセントを受ける手続き等

研究責任者は、事前に研究倫理委員会で承認、学長の許可の得られた同意説明文書を研究対象者に渡し、文書及び口頭により十分な説明を行い、研究に参加するかどうかについて、十分考える時間を与えた後、研究対象者の自由意思による研究参加の同意を文書で得る。

9. 個人情報等の取扱い

本研究は、個人情報の取扱いに関して、「人を対象とする生命科学・医学系研究に関する研究計画書についての細則」及び適用される法令等に従い、本研究計画書を遵守して実施する。

本研究で取り扱う試料・情報等は研究責任者が個人が特定されないように加工した上で、研究・解析に使用する。個人が特定されないように加工する方法については、試料・情報から個人を識別できる情報を削除し独自の符号を付す作業を行う。作成した対照表ファイルにはパスワードを設定した上でパスワードのかかる USB に保存し、鍵のかかる書庫に保管し、部屋から持ち出さない。

本研究の成果を学会及び論文で発表する際には、研究対象者の個人を特定できる情報は一切使用しない。

10. 研究対象者に生じる負担並びに予想されるリスク及び利益、これらの総合的評価並びに当該負担及びリスクを最小化する対策

10-1. 予想される利益

本研究に参加することによる研究対象者個人への直接的な利益は生じない。研究成果は内耳を介したあらたな調節系の発見、その高齢者等における新たな治療・リハビリ方法の開発、宇宙滞在における身体不調の新たな病態理解と治療・予防に有益となる可能性がある。

10-2. 予想されるリスク等

- 予定プロトコル終了時および被検者が中止を申し出た際には直ちに実験を終了する。
- ベッドレスト開始後 2-3 日目に頭痛が生じる場合があるが、軽度であり、4 日目以降は軽快する。許容範囲を超えた場合にはベッドレストを中止する
- 採血は 1 回 15mL 程度であり、健康な人体に影響はない。
- 前庭電気刺激は、非常に微弱なノイズ刺激であり、危険ではないが、被検者が不快感を訴えた場合には直ちに中止する。また、機器と人体からはアースを確実にとる。

11. 試料・情報の保管及び廃棄の方法

- 本研究の実施のために取得したデータ・情報については、研究責任者の所属する研究室内の外部から切り離された媒体に保存する。データは当該情報を取り扱う研究者のみがパスワード管理により利用できることとし、情報の紛失・遺漏等の防止を徹底する。また、同意の撤回（中止の申し出）があったデータ等については、登録時からすべてのデータを破棄する。
- 本研究終了後において、本研究で得られた研究対象者のデータ・情報を他の研究において使用することはない。取得したデータ・情報は「岐阜医療科学大学研究活動不正行為防止規程」第3条第3項及び第4項の規定に準じて適切に保管・破棄する。

12. 学長への報告内容及び方法

(1) 研究の実施の適正性若しくは研究結果の信頼を損なう事実等の情報を得た場合

研究責任者は、研究の実施の適正性若しくは研究結果の信頼を損なう事実又は損なうおそれのある情報を得た場合は、速やかにその旨を学長に報告する。

(2) 研究の倫理的妥当性若しくは科学的合理性を損なう事実等の情報を得た場合

研究責任者は、研究の倫理的妥当性若しくは科学的合理性を損なう事実若しくは情報又は損なうおそれのある情報であって、研究の継続に影響を与えられとされるものを得た場合は、遅滞なくその旨を学長に報告する。

(3) 進捗状況の報告

年1回研究の進捗状況及び研究の実施に伴う有害事象の発生状況を学長に文書で報告する。

(4) 研究終了（中止の場合を含む）の報告

研究責任者は、研究を終了したときは、その旨及び研究の結果概要を文書により学長に報告する。

13. 研究の資金源その他の研究機関の研究に係る利益相反及び個人の収益その他の研究者等の研究に係る利益相反に関する状況

13-1. 研究資金源

- 岐阜医療科学大学個人研究費
- 文部科学省 宇宙航空科学技術推進委託費

13-2. 利益相反

本研究は研究遂行にあたって、研究の結果及び結果の解釈に影響を及ぼすような「利益相反」は存在しない。

13-3. 知的財産

研究者及び岐阜医療科学大学、京都大学に帰属し、研究対象者へは生じない。

14. 研究に関する情報公開の方法

本研究の成果は、関連学会での発表及び論文発表を予定している。

15. 研究により得られた結果等の取扱い

本研究により得られる結果は、一般臨床で用いられている一般的な検査データと同様のもの、研究対象者の健康にとって重要な事実となり得る。また、その説明が研究業務の適正な実施に著しい支障を及ぼす可能性はないため、研究対象者に口頭および書面により説明する。ただし、インフォームド・コンセントを受ける際に、研究対象者より説明を希望しないと回答された場合は説明しないこととする。

16. 研究対象者及びその関係者が研究に係る相談を行うことができる体制及び相談窓口（遺伝カウンセリングを含む。）

研究対象者及びその関係者からの相談については、以下の相談窓口にて対応する。

【相談窓口】

岐阜医療科学大学 大学院保健医療学研究科 教授 田中邦彦

〒501-3892

岐阜県関市市平賀字長峰 795-1

岐阜医療科学大学

TEL: 0575-22-9401 ktanaka@u-gifu-ms.ac.jp

【苦情窓口】

岐阜医療科学大学 庶務課

〒501-3892

岐阜県関市市平賀字長峰 795-1

岐阜医療科学大学

TEL: 0575-22-9401 gumsj@u-gifu-ms.ac.jp

17. 研究対象者への経済的負担又は謝礼

研究対象者には、謝礼として 10,000 円/日を渡す。

以上の内容の研究計画書を臨床倫理委員会へ提出した。当初、「観察」研究であり「侵襲を伴わない（採血などの軽微な侵襲を除く）」研究として申請したが、「6 度ヘッドダウンーベッドレスト」が「介入」であり「侵襲」にあたるとの指摘を倫理委員会側から受けた。そこで、侵襲を伴う介入研究としての様式を整え、再申請したところ、聞き取りが行われたうえで令和 5 年 8 月で承認となった。

審査に時間を要したため、令和 5 年度は当初 9 月中に実施予定であったが、年度末の 3 月に行った。これは、岐阜医療科学大学看護学科が所有している「基礎・成人看護演習室」において実施するため、岐阜医療科学大学学生が長期休暇中しか実施できないためでもあった。

今年度（令和 6 年度）は当初の計画通り 9 月にベッドレスト実験が実施できた。被験者は、岐阜医療科学大学の学生から募り、予定通り 6 名のボランティアに参加していただいた。

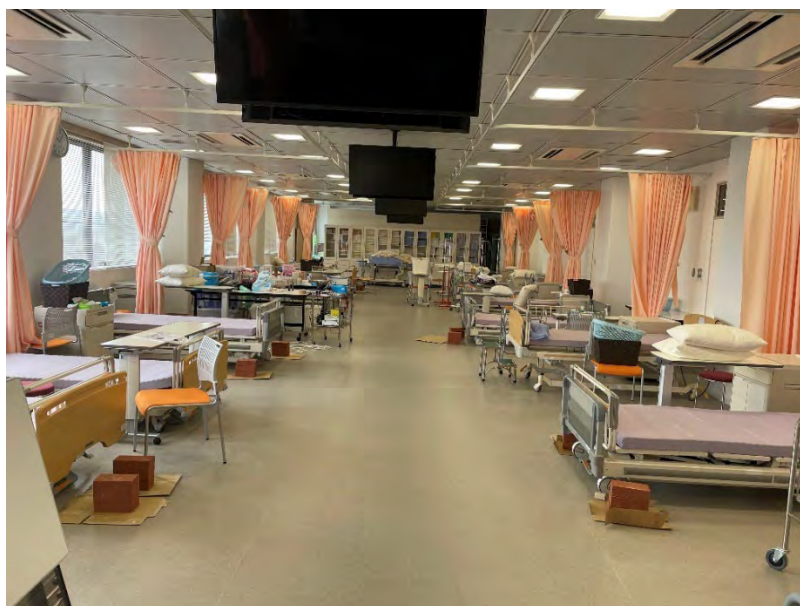


図 5: 岐阜医療科学大学可児キャンパス 成人・老年看護学実習室。

2.2.2. 京都大学チームのベッドレスト被験者測定

筋電計 (FreeEMG1000、図 6) を用いて、ベッドレスト開始前ならびに終了後にベッドレスト被験者の歩行中、両脚のヒラメ筋・腓腹筋・前脛骨筋・長腓骨筋・外側広筋・大腿直筋・大腿二頭筋・中殿筋の筋電図を測定した (図 7)。我々が普段何気なく行っている身体運動は、極めて複雑な運動制御の結果行われている。人体には膨大な筋が存在するために、中枢神経系が個々の筋をそれぞれ制御していると、処理すべき情報量が膨大となる。この問題に対し、中枢神経系は膨大な情報量を簡略化するための戦略として、機能的に類似した筋をまとめて支配する神経制御機構である「筋シナジー」という概念が提唱されている。筋電図データを用い、非負値行列因子分解により筋シナジー (筋シナジーから各筋への重みづけベクトル) とその活動度 (中枢神経系から筋シナジーへの運動指令) を算出する。



図 6: 筋電計 (FreeEMG1000) 装置。ワイヤレスで筋電図を測定することができ、被験者への負担が少ない。



図 7: 被験者にワイヤレス筋電計を貼付している様子。

動作解析カメラシステム(MICROCAM200-4、図 8)を用いて、ベッドレスト開始前ならびに終了後にベッドレスト被験者の歩行中の動作解析を実施するため、データを取得した。宇宙飛行士は、帰還直後には下肢骨格筋が萎縮し、歩行がスムーズにできないことも知られている。ベッドレストによる長期臥床においても、宇宙飛行士に生じる歩行動作の変化が再現できると予想される。そのため 4 台のカメラを用いて歩行中の動作を記録した(図 9)。ベッドレスト前後でどのように影響しているかを比較する。



図 8: 動作解析カメラシステム(MICROCAM200-4)。4 台のカメラを用いて被験者の動作を 3 次元的に捉える。

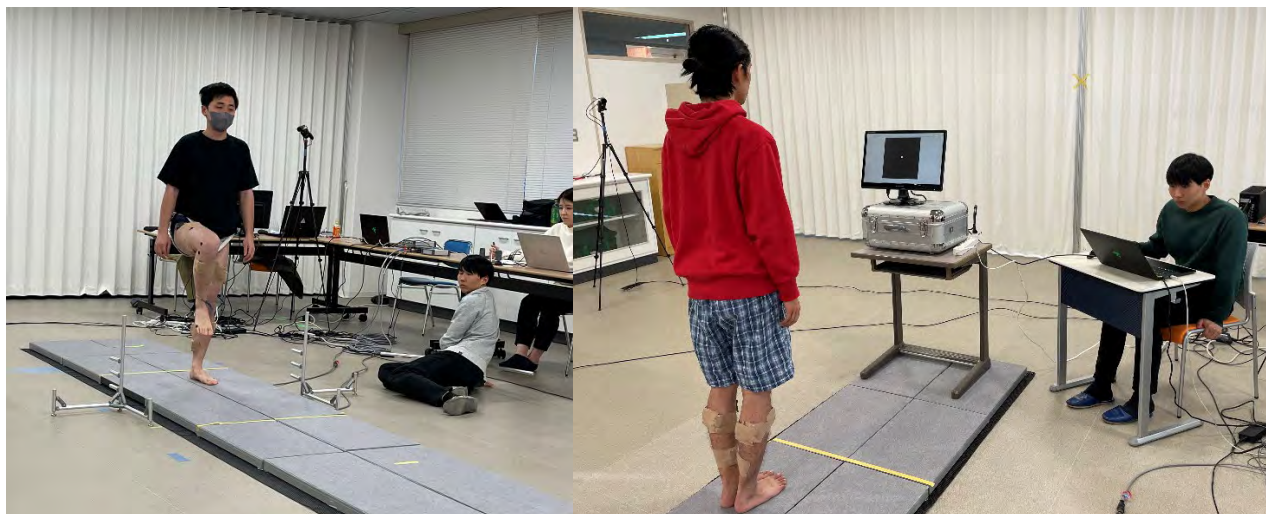


図 9: 筋電測定ならびに動作解析測定のためのデータ取得風景。

心電計 (Bittium Faros180、図 10) を用いて、ベッドレスト実験中のベッドレスト被験者の心電図を測定した。宇宙飛行士は、軌道上滞在時に心拍変動などの体内リズムの乱れが生じ、睡眠の質が落ちるなどと言われている。心電図を測定することにより、そのデータを解析し交感神経と副交感神経のリズム (心拍変動) を測定することが可能である。ベッドレスト期間中、被験者にこの心電計を常につけてもらい、心電図データを取得し、ベッドレストによる体内リズムの変化を検討する予定である。



図 10: 心電計 (Bittium Faros180)。小型の心電計で 24 時間装着可能で、最大 2 週間連続で心電図を記録することができる。

2.2.3. 岐阜医療科学大学チームのベッドレスト被験者測定

6° ヘッドダウンベッドレストの前後で、循環調節機能ならびに平衡感覚機能評価を行うべく、データ測定を実施した。仰臥位から立位への姿勢変化、すなわち身体にかかる重力方向の変化を定量的に再現性を以ておこなう

ための姿勢変換装置を用いて測定した(図 11)。仰臥位から立位(60 度頭高位)あるいはその逆変化を任意の契機で行うことができるものである。血圧を連続的に計測しつつ姿勢変換を行わせることで、姿勢変化時の血圧調節機能を評価することができる。



図 11: 姿勢変換装置と連続血圧測定装置。

また、模擬微小重力曝露中、平衡感覚器官のひとつである内耳前庭系およびそこから求心神経である前庭神経一次ニューロンに人工的に刺激を加えるための刺激装置を用いて測定した。既成のミュキ技研製電気刺激装置をもちいて内耳前庭系電気刺激(Galvanic vestibular Stimulation: GVS)を行った。アイソレーター(SS-203J, ミュキ技研)を用いて、想定しているノイズ波形を発生させた(図 12)。同装置にノイズ波形を入力するため、PC で作成した刺激波形をアナログ変換する変換器 (USB-6218, National Instruments)を用いた(図 13)。すでに有しているプログラミングソフトにて振幅一定のホワイトノイズ波形を作成し、同変換機でアナログ信号に変換し、電源供給装置に送信した(図 13)。そこからアイソレーターに送信し、刺激として出力した。これらの装置にて GVS を行った。



図 12: 左図はアイソレーター(下)と電源供給装置(上)。右図はデジタル-アナログ変換器。



図 13: ベッドレスト中にノイズ波形で刺激している様子。学生が実験の様子を見学している。

血液検査: 本実験・実習に際しては血液検査、特に骨代謝にかかわる項目も検査し、考察させることを想定している。そこで診療目的のみならず、研究目的の血液検査も発注でき、会場である岐阜県内に在する株式会社メディック(岐阜県大垣市横曽根 3 丁目 2-8)に依頼することとした。

6 名のボランティアに説明を行ったうえで、書面による同意書を得た。

採血を行ったのち、体感閾値の 90%に相当する強度で GVS を 30 分間行った。刺激終了後、再度採血を行った。刺激前後で以下の項目を検査した。

1. 副甲状腺ホルモン(PTH)
2. カルシトニン
3. オステオカルシン
4. 骨アルカリフォスファターゼ(BAP)
5. Ca
6. IP
7. 1,25-(OH)₂ビタミン D
8. 免疫学的検査(リンパ球マーカー; CD4, CD8)

2~7 の項目については遠心処理が必要であったため、薬学科の協力を得て、室温で 15~20 分静置したのち、3000 回転 5 分で遠心(図 14)し、血漿成分と血球成分を分離させたうえで検体提出を行った。



図 14: 薬学科実習室内の遠心装置。

2.2.4. ベッドレスト期間中の被験者ケア

前年度、模擬微小重力暴露実験・実習を行うための消耗品準備を完了させていた。被検者を床上で起き上がらせることなく生活させるため、身体ケアならびに環境整備に必要と想定される消耗品を準備し、ベッドレスト期間中はこれらの消耗品を用いて、被験者に快適に過ごしてもらえるようにサポートをした。被験者のベッドレスト期間中の身体ならびに精神的状況は測定の結果に影響を及ぼすため、できる限りストレスが蓄積しないように支援を行った。

表1: 準備した消耗品リスト

排泄用品	非接触消毒器専用スタンド		環境用品	温湿度計
	業務用アルコール製剤			パーティション
	業務用アルコール製剤容器			
	汚物処理キット			
	水洗式ポータブルトイレ 12L		衣服関係	サージカルマスク
	尿器掛			脱衣かご
	トイレットペーパー			グレディーバスケット
	洗剤			実習衣
採血用品	医療機器廃棄物容器		食事関係	ストロー
	R 防臭ペダルペール			ガーグルベース

	インジェクションパッド			食器
	カラー駆血帯			
	シリンジ 20ml 横口		健康管理	上腕式血圧計
	翼状針			皮膚赤外線体温計
	ステン角型パット			体組成計
	ナビスジェルパッド(チューブ用溝付き)			ポータブル身長計
	クーラー BOX			
	検体ラック			

ベッドレストを実施した実習室内には、中央管理のエアコンが装備され、水道設備が造設されているため、被検者の身体を清潔に維持することが可能である。また常設している洗濯機による衣服の洗浄、被検者周辺のケア用品の洗浄ならびに消毒が同室内にて実施可能である。また、学内無線 LAN にアクセス可能であるため、インターネット使用による被検者の日中ストレス緩和が可能である(図 15)。さらに、実習用のリネンも有している。ベッド数が多いため、夜間のケアスタッフならびに本プログラムに参加する学生も同時に宿泊可能となっている。

ベッドレスト期間中は、看護師ならびに医師が常駐し、被験者のケアに当たり、緊急時に対応可能な状況を維持した(図 16)。

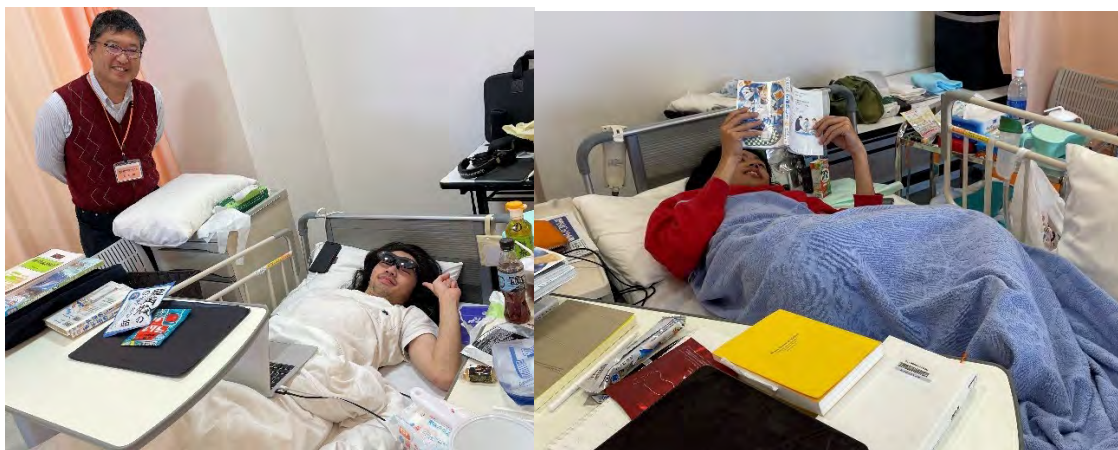


図 15: ベッドレスト中の被験者の様子。ベッドレスト中はパソコンを使用したり、読書をしたり、自由に過ごすことができた。



図 16: 洗髪の様子。ケアスタッフによりベッドレスト被験者は、定期的に洗髪などをしてもらえた。

2.2.5. ベッドレスト期間中の訪問者

ベッドレスト期間中は、9名の学生が見学に訪れ、ベッドレスト中の被験者の様子を観察し、被験者から感想などを聞き取り調査した。また、一部の学生はベッドレスト期間中の測定作業の手伝いも行った。学生の中には、大分大学から岐阜まで泊りがけで来てくれた子達もあり、貴重なベッドレストの現場を見学してもらえ、大変ありがたかった。

また、宇宙航空研究開発機構(JAXA)宇宙科学研究所の稲富裕光教授や、株式会社島津製作所の澤田浩樹さんも訪問され、ベッドレストの様子を見学したり、6度ヘッドダウンの状態を体験されたりした(図 17)。特に、澤田さんとは、宇宙医学研究におけるベッドレスト実験が、どのようにビジネスに応用できるかの議論をさせていただいた。ベッドレスト実験が、介護分野は高齢者医療への応用が期待できるため、大変興味を持っていただいた。その縁もあり、澤田さんも京大の有人宇宙医学講義に参加していただくこととなった。



図 17: 株式会社島津製作所の澤田浩樹さんの訪問の様子。ベッドレスト状態も体験していただいた。

2.2.6. ベッドレスト終了の被験者

10 日間のベッドレスト後に介助者にサポートされながら、順番にベッドから起き上がった(図 18)。被験者の中には起き上がってすぐに立てる者や、しばらく立てず休憩後にやっと立つことができる者など様々な状態であった。めまいがひどい状態や重篤な体調不良を訴える被験者はおらず、数時間後にはすべての被験者が立ち上がり歩行できる状態であったため、順次ポスの測定を受けた。



図 18: 介助を受けながらベッドから起き上がる様子。すべての被験者が安全に起き上がった。

本年度も昨年度に引き続き、6 名の被験者に参加してもらい、無事にベッドレスト実験を終えることができた。ベッドレスト期間中は多くの訪問者が訪れ、ベッドレスト実験の現場を見学した。被験者や見学者だけでなく、介助者などの参加によって安全にベッドレストを遂行できた。この委託費事業で実施する前は、10 数年前に岐阜医療科学大学でベッドレストを実施した以来、我が国ではベッドレスト実験は実施されてこなかったもので、昨年度と今年度の 2 回のベッドレスト実験の成功は非常に貴重な経験となった。

2.2.7. ベッドレスト成果報告

ベッドレスト実験で測定した GVS データについては、解析を行い、GVS を毎日 10 分間与えた群は、ベッドレストによる平衡感覚機能低下ならびに重心動揺増大が抑制されることが判明した。この成果については、2025 年 3 月 17～19 日に行われた第 102 回日本生理学会大会で岐阜医療科学大学の田中が発表した(資料 4.3)。

2.3. 宇宙医学研究室の訪問見学実習(基礎研究の現場を体験する):

2.3.1. 2023 年度実施宇宙医学実習全体報告会の開催

2023 年度には、4 箇所(大分大学・大分空港、東京慈恵会医科大学、IHI エアロスペース、ヒューストン)の訪問ならびに模擬微小重力暴露実験(ベッドレスト実験)を実施し、宇宙医学に関する施設・研究室見学や実験体験などを行った。合計 29 名の学生が参加した。特に IHI エアロスペース見学には、15 名の学生から応募があり、7 名を選出した。また、ヒューストンでの実習には驚くべきことに 42 名の学生から応募があり、その中から 5 名を選出した。それぞれの実習では、参加学生から事後アンケートを取得して、次年度への改善点の洗い出しを行った。

まず、2023 年度に実施した宇宙医学実習の全体報告会を、2024 年 8 月 29 日に開催した。この報告会では、それぞれの場所を訪問した学生達の全体の報告会を行い、各場所でどのようなことを学んだかの情報共有をした。全体報告会の報告内容については添付資料 4.4 に掲載する。

<2023 年度の訪問先ならびに実験>

- 大分大学・大分空港
- 東京慈恵会医科大学
- IHI エアロスペース
- ヒューストン
- ベッドレスト実験

<全体報告会>

- 日時：2024 年 8 月 29 日(木) 13:00～15:00
- 会場：京都大学南部総合研究 1 号館・医研 1 号館 共同セミナー室(1)

(Zoom 接続によるハイブリット開催)

アジェンダ:

- ◆ 訪問先概要(5 分)
- ◆ 各班からの報告(90 分)
- ◆ 2024 年度実習先紹介(5 分)
- ◆ 全体交流会(20 分)

全体報告会では、それぞれの実習・実験で何を学んだかを共有した。4 箇所の訪問先ならびにベッドレスト実験に参加した学生が情報共有できる機会になっただけでなく、今年度宇宙医学実習に参加したい学生への告知にもなった。全体報告会は、実習参加学生には大変好評であった。年度末には 2024 年度の全体報告会を企画・実施した。

2.3.2. 全体報告会での報告内容：大分大学ならびに大分空港での体験実習の報告

1. 実施日 :2023 年 9 月 21・22 日
2. 実施場所 :大分大学(大分県由布市挾間町医大ヶ丘1丁目1番地)、大分空港
3. 参加学生 :3 名

<日程と概要>

日程:

2023 年 9 月 21 日(木)

- 14 時 30 分：大分駅集合 徳丸先生と中沼先生が車で迎えに来て下さいました。
- 15 時：大分大学 挾間キャンパス 見学
- 15 時 30 分：北野正剛学長・杉尾賢二副学長による歓迎のご挨拶

猪股雅史医学部長による大分大学の宇宙医学プロジェクト構想

16 時 15 分：徳丸治教授(元 FS)による宇宙医学の歴史と現在の課題

2023 年 9 月 22 日(金)

9 時：大分大学医学部の未来に向けた研究を覗く(AI surgery 中沼寛明先生)

10 時 40 分：AI を用いた手術支援システム見学

13 時：大分空港・スペースポート(宇宙港)見学

13 時 45 分：大分県の宇宙政策

15 時 30 分：現地解散

【概要】

大分大学 北野正剛学長より挨拶を受け、その後、猪股雅史医学部長による大分大学の宇宙医学プロジェクト構想説明、徳丸治教授による宇宙医学の歴史と現在の課題を伺った。2 日目、中沼寛明先生に大分大学医学部の未来に向けた研究を伺い、AI を用いた手術支援システムを見学した(図 21)。午後からは大分空港・スペースポートへ移動し見学、大分県の商工観光労働部の方より大分県の産官学の連携でこれからの宇宙を切り口とした医療との連携、宇宙港としての地の利や今後の展望等や問題点について意見交換をおこなった(図 22)。



図 19：大分大学での実習の風景。

【大分大学の宇宙医学プロジェクト構想】

プロジェクトの背景

猪股雅史医学部長により、大分大学医学部が高度救急医療から先端医療の提供に至る経緯や目標が語られました。

立地からの利便性とプラットフォームの役割

大分大学のアジアのプラットフォームとしての立地からの利便性が強調され、宇宙と繋ぐ「SPACEPORT OITA」(大分空港)が特に重要視されました。

連携の重要性

国東市民病院と大分大学の連携で、特殊渡航医学の分野で協力することで、宇宙を含む未知なる場所への渡航における玄関口としての役割が期待されています。

健康チェックとメディカルツーリズム

渡航前後の健康チェックから、最先端の AI を使用した医療の提供までを含む「特殊渡航医学」の領域において、未知の状況に対処するための体制が整えられています。

産官学の連携で未来を切り開く

産官学の連携により、これからの未来を切り開くために協力して宇宙医学プロジェクトを進めていく意欲が表明されました。

これらの要点は、大分大学が宇宙医学分野において先進的なプロジェクトを展開する構想についての魅力的な概要を示してくださいました。

【宇宙医学の歴史と現在の課題】

元 NASDA フライトサージャンの徳丸治教授より、これまでの宇宙医学について「宇宙医学入門」と銘打たれた講義が行われました。この講義は、1 年間にわたって寺田昌弘先生から学んだ宇宙医学の内容を総復習するものであり、その要点が纏められていました。

宇宙環境へのヒトの適応、微細重力環境での人体の影響、筋肉と骨、視覚、宇宙酔い、圧力、宇宙放射線など、幅広い宇宙医学のトピックが 2 時間足らずの中に纏められました。宇宙環境での人体の特異な影響や健康への影響について包括的に学ぶことができ宇宙医学への理解が深まりました。

【大分大学医学部の未来に向けた研究を覗く】

2 日目の午前中は、中沼寛明医師より「宇宙開発時代における医学研究・医学教育・産官学連携のビジョン」をご講義賜りました。

アジアにおける宇宙医学の拠点としての必要性

大分がアジアにおける宇宙医学の拠点になる必要性和必然性が述べられ、大分大学医学部が AI を使った救急外科医療を提供する医師と環境の特異性が示されました。

スペースポート大分の利点

大分がなぜ選ばれたかについて、宇宙医学を進める上で宇宙生体材料の即時利用が必要であり、スペースポート大分を利用することで最短で病院や大学に届けることができるという利点が説明されました。

医学研究・教育・産官学連携のビジョン

医学研究・教育・産官学連携のビジョンが明示され、臨床宇宙医学や宇宙医学教育の分野での連携が進めら

れていることが紹介されました。

宇宙医学先端研究教育機構(ARTISM)

大分において産官学の協力実施体制が「宇宙医学先端研究教育機構(ARTISM)」として進められていることが言及されました。

AIを活用した内視鏡外科手術

最新の AI を活用した外科医療や、次世代型内視鏡外科手術「Smart Endoscopic Surgery」の構想についての講義が行われ、医療技術の進化とその将来の可能性に焦点が当てられました。

Surgical Devices in Space のアイデア創出

医療技術の進化が人類が宇宙に拡大した際にも対応できる可能性について、Surgical Devices in Space のアイデア創出についての講義がありました。

AIによるディープラーニングの重要性

AIによるディープラーニングの重要性が強調され、より多くの術例を記録し AI に学ばせることが手術の正確性と安全性向上に寄与すると説明されました。

大分大学が宇宙医学において積極的な役割を果たし、医学研究・教育・産官学連携を通じて未来の医療技術の発展に貢献していることがわかった。

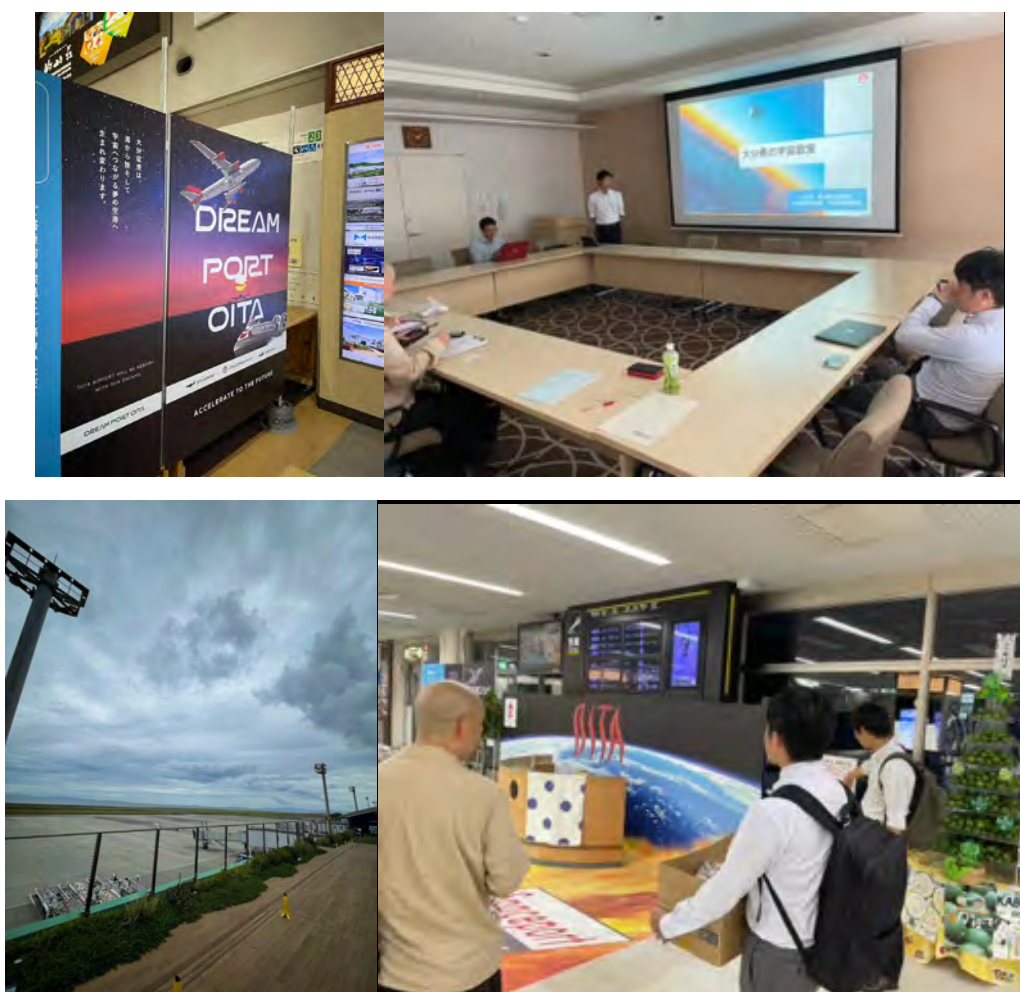


図 20: 大分空港の実習風景。

【大分県の宇宙政策】

大分県と宇宙産業の連携

大分県 商工観光労働部 先端技術挑戦課 宇宙開発振興班の担当者から、大分県が宇宙産業と連携を取る理由や意義について説明がありました。

宇宙産業の成長予測

民間人宇宙旅行者や職業宇宙飛行士の数、そして将来的な宇宙産業の市場規模と成長予測に関する情報が提供されました。2040 年には 160 兆円の市場が期待されているとのことです。

大分の目指す宇宙港

大分が目指す宇宙港は、広義には人工衛星やロケットの発射場から有翼型の機体で宇宙旅行を提供する施設まで含まれます。当面は後者の着陸を主とした宇宙港が計画されています。

大分空港の選ばれる理由

大分空港がスペースポートとして選ばれる理由として、3,000m 級の滑走路を持ち、東側に海が開けていることが挙げられています。

期待される効果

宇宙港の設立により、鉄鋼、石油、化学、半導体、機械、自動車、医療機器など多様な産業が集積し、宇宙利用のビジネスが活性化できる土壌が期待されています。また、観光資源も豊富なため、宇宙旅行の期間前後のニーズにも応えることが可能です。

大分県が宇宙産業の成長に対応し、宇宙港を通じて地域経済の発展と新たな産業の創出を期待していることがわかりました。

【今回の研修を通じて学んだ事項】

産官学の協力体制がしっかりと出来ていることが一番の印象に残りました。今回は官と学のみでしたが、お互いに連携を意識し取り組んでいることがはっきりとわかりました。この事は他の地域において産官や官学の連携はあっても産官学の三者が揃うことの難しさがあることも理解できました。

AI 医療においては、AI に任せるのではなく、AI にディープラーニングさせ、リアルタイムでの医療の補助をする技術、より正確により安全に手術する技術としてくみ上げられていることを知ることが出来ました。

【参加学生からの感想】

参加学生 A:

工学部でありながら、宇宙医学と銘された実習に参加することに、初めは緊張していましたが、大分大学や大分県の目指す space port 構想は、宇宙医学に限らない視野の広いものであり、実習ではそれらを医学を軸としながらも広く学ぶことができ、大変勉強になり刺激的な二日間でした。特に、印象的な点として、Spaceport が教育や研究の場であることと産官学民の連携があります。Spaceport 候補地である大分空港は近隣に病院や大分大学があり、着陸後の宇宙飛行士をすぐに検査することが可能で、これまで困難であった理論と実践の宇宙医学教育をする最高の場所となっており、宇宙から帰還した実験サンプル等も大学ですぐに解析することが可能で、より実践的な宇宙教育や研究を推進することができます。また、産官学民の連携も進めており、大分県の職員の方々のお話を直に聞くことができ、今後の産官学民事業を意識した講義を聞くことができました。宇宙医学というものを学べただけでなく、日本の宇宙開発の未来へ向けた現状や宇宙の学際性を再認識することがで

き、学びの詰まった実習でした。このような機会を設けてくださった先生方に深く感謝申し上げます。

参加学生 B:

大分大学で受けた講義はどれも面白く、宇宙医学について学び始めたばかりの私にとっては新鮮かつ貴重な学びとなりました。宇宙医学についての基礎的なことから、大分で行われている宇宙産業の展望についてまで、現状の問題点なども含め、本当に多くのことを学ぶことが出来ました。今まで宇宙医学について研究する方々と交流する機会が無かったため、今回この実習で宇宙医学を学ぶ方々と交流することが出来たことも、私にとってとても貴重な経験となりました。皆さんとのディスカッションを通して、もっと宇宙医学について学びたいという刺激を受けることもできました。二日間ありがとうございました。

参加学生 C:

医療を中心に宇宙港との連携は、北海道の大樹町や和歌山県の串本と違い大変実用的で有意義な試みだと感じました。

今回の研修においても宇宙で死者がでることについては想定されていなかったことが確認できた。宇宙葬として地上より遺骨を宇宙に上げるビジネスモデルとしての話は聞いたが、宇宙倫理学を問うにおいて宇宙滞在中に亡くなる方が出て、そのときの死者への扱いを問うことは、必ず有人宇宙開発をする上において人と宇宙での繋がりのひとつとして宇宙に携わる方々と問うていきたいと考える。

2.3.3. 全体報告会での報告内容：東京慈恵会医科大学・細胞生理学講座での体験実習の報告

1. 実施日 :2023 年 9 月 25～29 日
2. 実施場所 :東京慈恵会医科大学・細胞生理学講座・宇宙航空医学研究室
(〒105-8461 東京都港区西新橋 3-25-8)
3. 参加学生 :2 名

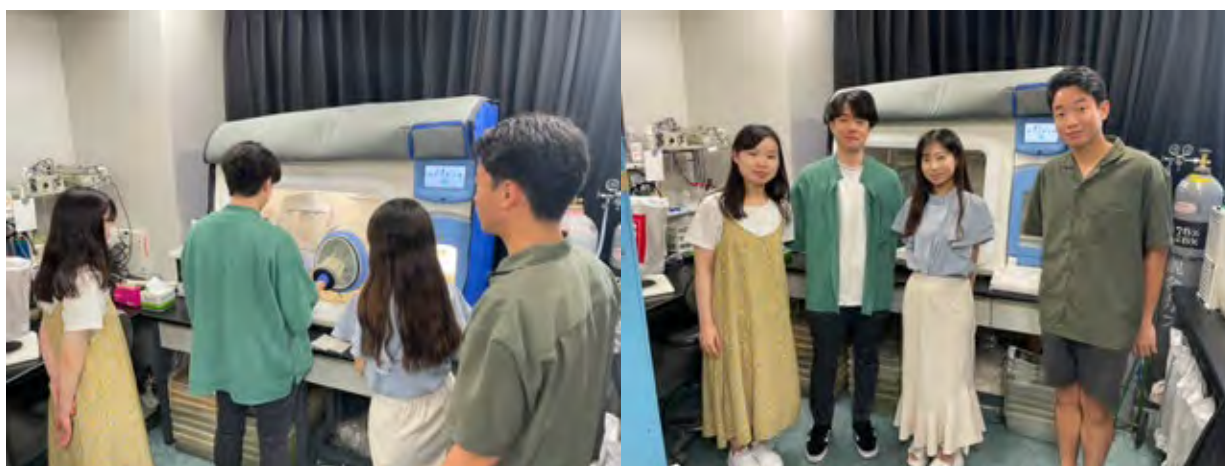


図 21: 東京慈恵会医科大学での実習作業の様子。

【実習概要】

模擬微小重力(SMG)環境下で培養した培養細胞を用いて基本的な遺伝子解析や組織解析を体験し、宇宙医学に関する基礎研究を学んだ(図 23)。具体的には、SMG 下で培養した人臍帯内皮静脈細胞(HUVEC)に対して、ウエスタンブロッティング、免疫蛍光染色実験を行い、control(1G)群との比較、考察を行った。

【実習工程】

表 2 に本実習にて実施した実験、主要な実験項目等の工程をまとめた。免疫蛍光染色は 2～3 日目、ウエスタンブロッティングは 1～4 日目にかけて行われた。4～5 日目にかけて報告会のための実験データ整理と資料製作、報告会を行った。また、2 日目には慈恵医大理事長である栗原敏先生より、研究に対する向き合い方、ご自身の研究等についてのご講演をいただいた。実習初日と最終日にコンセプトマップを作成し、参加者が本実習を通して宇宙医学分野に対する認識がどのように変化したのかを確認した。

表 2 本実習の工程概略

9/25 (Day1)	9/26 (Day2)	9/27 (Day3)	9/28 (Day4)	9/29 (Day5)
	免疫蛍光染色			
	- 固定処理 - 透過処理 - ブロッキング - 一次抗体反応	二次抗体反応 共焦点イメージング		
	ウエスタンブロッティング			
タンパク質濃度測定	- タンパク質濃度調整 - 電気泳動 - メンブレン転写 - ブロッキング - 一次抗体反応 (標的タンパク質)	- 二次抗体反応 (標的タンパク質) - ストリッピング - 一次抗体反応 (内在性コントロール)	二次抗体反応 (内在性コントロール)	
- 施設紹介 - コンセプトマップ作成	講演		報告会関連	
			- 実験データ整理 - 報告会準備	- 報告会 - コンセプトマップ作成

【実習内容】

緒言:

宇宙空間、特に微小重力環境は、筋萎縮や骨量の減少、心血管系の変化等の影響を人体に与える。これらの影響は、長期間の有人宇宙探査ミッションにおける宇宙飛行士の健康リスクを増加させるだけでなく、宇宙旅行を今後普及させるうえで大きな障害となる。近年、宇宙飛行中の宇宙飛行士に閉塞性左内頸静脈血栓が偶発的に発見されたことが報告された。血栓の形成には、血管内皮細胞から生産および分泌され、1 次止血の初期段階において血小板凝集に寄与するフォンヴィレブラント因子(vWF)が関わっている。この因子の分泌調整機能の破綻は、異常な血液凝固反応を引き起こすことが知られている。

本実習では、微小重力環境における血栓形成に vWF の生産や分泌の異常が寄与している可能性があると仮定し、3D クリノスタット Gravite を用いて模擬微小重力環境下で 72 時間培養したヒト臍帯静脈内皮細胞(HUVEC)に対して、免疫蛍光染色、ウエスタンブロッティング実験を行い、SMG 環境が vWF の局在と分泌量に与える変化の定量を試みた。

【結果】

免疫蛍光染色：

血栓形成に関わるフォンヴィレブラント因子(vWF)、小胞体内に恒常的に発現する免疫グロブリン重鎖結合タンパク質(BiP)、ゴルジ体のシス層表面に局在するシスゴルジマトリックスタンパク質(GM130)、細胞核(DAPI) の4種類のタンパク質に対して染色処理を行った。共焦点顕微鏡を用いて観察・撮影した各タンパク質の蛍光像に対して、ImageJ内のプラグイン Colocalization Colormap を利用し、vWF-BiP 間、vWF-GM130 間の共局在率を算出した。図 22(C,D)に示すように、SMG 環境で培養した vWF と BiP、GM130 の共局在率はいずれも減少傾向にあることを示した。

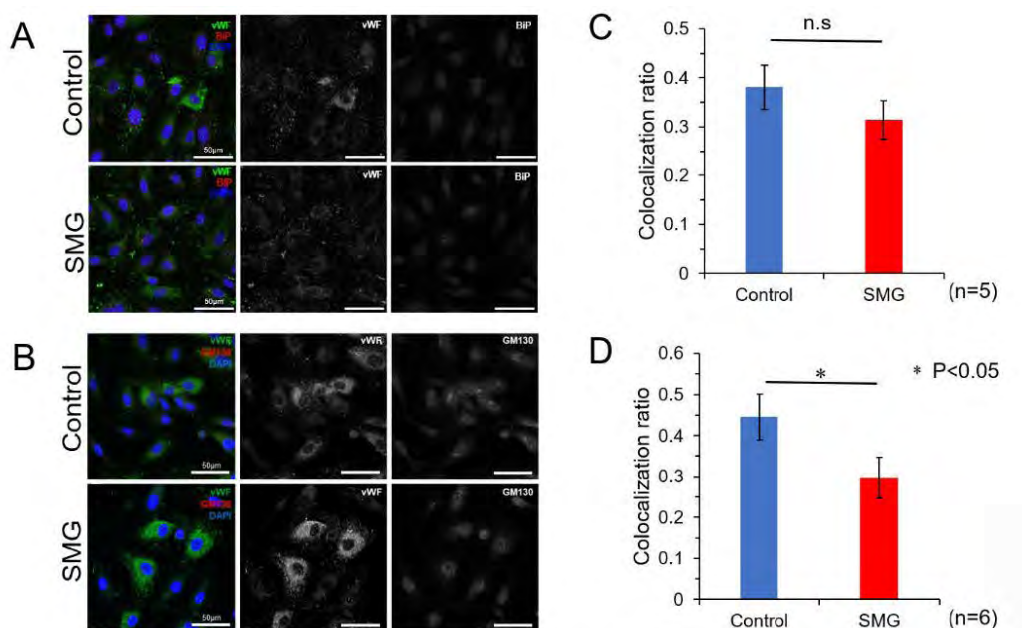


図 22: A,B) vWF-BiP、vWF-GM130 の免疫蛍光染色像。C) vWF-BiP の共局在率。control と比較して SMG の方が減少傾向にある。D) vWF-GM130 の共局在率。SMG の方が有意に減少している。

ウエスタンブロッティング：

一次抗体に abcam 社製の vWF 抗体、二次抗体にラビット由来の抗体を用いてウエスタンブロッティングを行った。その結果、図 23(A)に示すように vWF の分子量である 260kDa の位置にバンドが確認された。次に、内在性コントロール標識のために、一次抗体に cell signaling 社製の GAPDH 抗体、二次抗体にラビット由来の抗体を用いてウエスタンブロッティングを行った。その結果、図 23(B)に示すように GAPDH の分子量である 36kDa の位置にバンドが確認された。

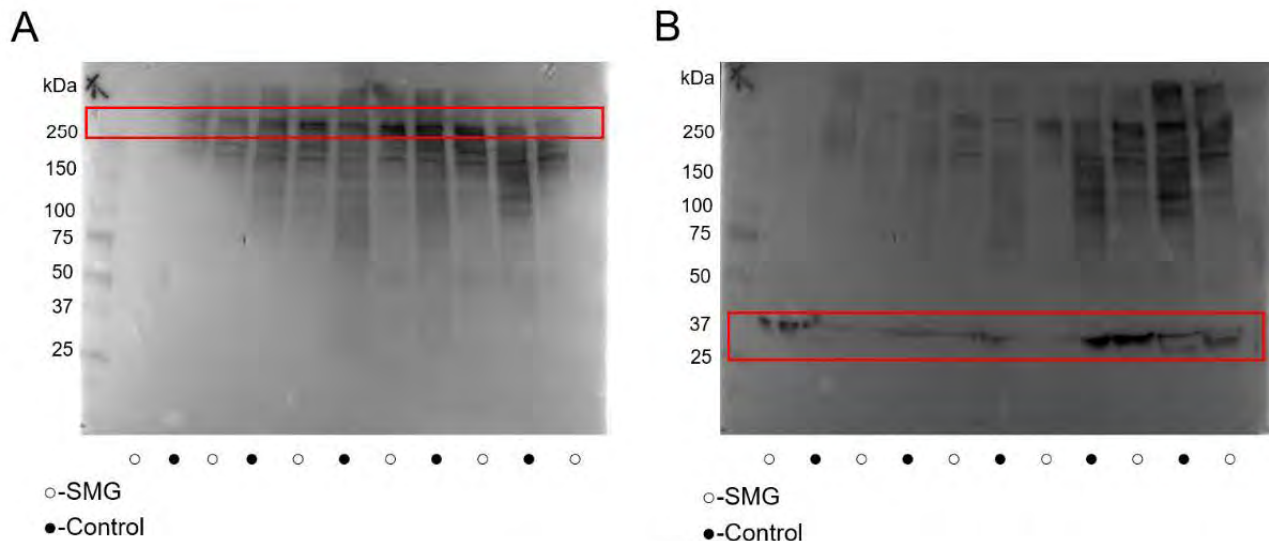


図 23: A) ウェスタンブロッティングによる vWF バンド標識。vWF の分子量である 260kDa の位置にバンドが確認される。(図内赤枠) B) ウェスタンブロッティングによる GAPDH 標識。GAPDH の分子量である 36kDa の位置にバンドが確認される。(図内赤枠)

【考察】

免疫蛍光染色:

小胞体表面にあるリボソームで合成されたタンパク質は、小胞体へ取り込まれゴルジ体へと輸送される。輸送されたタンパク質はゴルジ体内で濃縮され、細胞外に分泌される。緒言で述べたように微小重力環境下が血栓形成に寄与していると仮定した場合、vWF-BiP、vWF-GM130 間の共局在率が SMG 環境により減少したことは、vWF が細胞外へ多く分泌されたことを示唆していると考えられる。しかし、vWF の分泌量そのものが減少した可能性も考えられるため、タンパク質量そのものを定量するために、後述のウェスタンブロッティングを行った。

ウェスタンブロッティング:

タンパク質量の定量を行うために、ウェスタンブロッティングを行った。vWF の分子量である 260kDa の位置に濃いバンドが確認されたが、バンドの濃さがレーンによって異なっていた。このことから、タンパク質は検出されているが、サンプルのタンパク質濃度に差が生じてしまった可能性が考えられる。GAPDH を一次抗体としてバンドを観察すると、vWF の一次抗体を見たときに比べてはっきりと全体のタンパク質のバンドが標識された。この原因として、ストリッピングでタンパク質をしっかりと剥がせていなかったところに同じ動物種の二次抗体を乗せたため、二重に染色された可能性があること、発色液の付け方に差があったことの

2つが考えられる。また、タンパク質が標識されていることは分かるものの、目的のバンド以外も染まっており、メインの抗体が乗っていたかが分からなくなってしまった。バンドがはっきりと見えないところがある原因として、転写がうまくいっていない可能性が考えられる。また、抽出したタンパク質の状態が悪いと、バンドが縦に流れたり、スミアがみられたりするが、今回は分離できていたため、タンパク質の構造自体は壊れていないと考えられる。

【参加学生からの所感・感想】

参加学生 A:

本実習で行った実験を通して、宇宙飛行士から得られた症例をもとにした仮説立てから地上で行う模擬微小重力環境を利用した細胞レベルでの実験という、宇宙医学研究の流れを把握することができました。加えて、研究を遂行するにあたって、一般的な生命科学実験で用いられる検出手法の十分な理解と手技が求められると感じました。私はもともと機械工学を専攻しており、宇宙医学に関わる細胞を扱った生命科学系の実験は大学院から始めたため、本実習の実験はとても新鮮かつ学びの多いものとなりました。また、宇宙医学を専門とされる慈恵医大の先生方、学生の方々との交流とつながりを得ることができ、自身の研究方針、今後の身の振り方について大いに参考になりました。

参加学生 B:

5 日間の実習を通して、免疫染色やウエスタンブロットなど、多くの実験手法を学ぶことが出来ました。さらに、先生方から実験の手法以外にも沢山の宇宙医学に関するお話を聞けたり、動物実験を見させて頂いたり、予定していた以上に多くのことを学び、体験して帰ることが出来ました。また、普段大学で宇宙医学の分野を研究している人が自分一人であったために、慈恵医大にて同じように宇宙医学の研究をしている学生と交流することが出来たのも、私にとってとても貴重な機会でした。学生たちとの交流を通して、自身の宇宙医学の研究に対するモチベーションが向上し、今回の経験を生かしてもっと研究活動に精進したいと思うことが出来ました。

2.3.4. 全体報告会での報告内容：IHI エアロスペースでの体験実習

1. 実施日 :2024 年 2 月 21 日
2. 実施場所 :株式会社 IHI エアロスペース富岡事業所(群馬県富岡市藤木 900 番地)
3. 参加学生 :7 名



図 24: IHI エアロスペースでの集合写真。

【はじめに】

2024 年 2 月 21 日(水)に群馬県富岡市にある IHI エアロスペース富岡事業所において京都大学宇宙ユニットから宇宙医学実習として見学をさせて頂いた(図 26)。宇宙医学に関心のある学生 7 名が参加した。

【実習で行ったこと】

- ◇ IHI エアロスペースが行う事業紹介
- ◇ IHI エアロスペースは宇宙開発部門だけでなく、航空事業、防衛産業、そして宇宙開発の3つの部門からなるという事業構成。
- ◇ 3つの部門から全て1:1:1のまま事業の総額が2倍になるといった話や、工場も人材も不足していくという話。
- ◇ 以前は陸上自衛隊の特殊装置を作ったりもしていた。
- ◇ 陸上自衛隊などに向けた陸上無人機の作成できる技術はあるものの今はあまり作られていない。
- ◇ IHI エアロスペースの職員の方々と参加者それぞれが持つ疑問をもとに様々なディスカッション
- ◇ FRP 複合材にもかなり力をいれている。
- ◇ IHI エアロスペースはノウハウなどが多くあり、例えば固体燃料をどんな形になるよう混ぜるといった混ぜ方や材料などに関するメモが多くあるという話があった。特許になっていない技術が多くあるとの話だった。
- ◇ 技術者への質疑応答
- ◇ 法整備担当者への質疑応答

【参加学生が実習から学んだこと】

参加学生 A:

私は普段医学科で勉強をしてきたため、宇宙産業の企業に関わる機会がなかなかなかった。今回の実習では日本の民間宇宙産業の代表の1つであるIHIでの実習に参加をさせて頂いた。IHI エアロスペースの実習で印象的だったのは名前から私自身が航空宇宙産業のみを取り扱っていると思い込んでいたが、防衛産業も事業の3本柱の大切な一つであると学んだ。IHI エアロスペースは防衛産業も扱っていることから、防衛産業という産業の性質上、防衛産業から航空宇宙産業への貢献もあるのではと感じた。また、本実習では普段医学生や医療系学生としか接する機会のない自分にとって工学系の参加者が他参加者として多かったのは大変刺激的だった。木製の人工衛星の作成をしている方や漆を使った宇宙芸術分野をしている方、火星ローバーの開発を行っている方、マッハ6を目指したスクラムエンジンの研究をしている方、とんでもなく航空機への知識や考察が深い方などの参加者がおり、将来有人宇宙開発に関わりたいという夢や国産の音速民間航空機を開発するといった強い情熱を持った参加者に会うことができた。このような参加者に会うことができ、私がまだまだ全く知らない航空宇宙開発の世界が広がっていることに気づかされたと同時に、今後、私自身の夢に向かうにあたって大変大きな刺激となった。私自身は将来、医師として宇宙飛行士になりたいという夢が有人宇宙開発に興味を持ったきっかけであった。宇宙医学から宇宙開発や人々に貢献したいという夢も今、抱いている。そして、医療×テクノロジーにも興味を抱いた。この分野を必要とする、目の前の患者さん、世界のどこかにいる患者さん、これからの患者さん、そして病や事故等々に機能を奪われた方々の、救いとなれるような医師像にも憧れを抱いた。これらのことから、私自身の興味分野として、医療×テクノロジー×有人宇宙活動がある。今回の実習では有人宇宙開発が今後発展していく中で宇宙医学分野は必ず需要が増すと、日本を代表する民間宇宙産業のIHIの方々に言って頂いたことが自身が今後進んでいく際の勇気になった。

参加学生 B:

今回の実習には宇宙医学というテーマが設定されており、医学部の学生という立場で参加したが、医学的な関心よりむしろ工学的な関心のほうが強かった。宇宙空間という特殊な環境における生理学的な変化や長期的な影響にも興味はあったものの、個人的な趣味で航空宇宙分野の工学書を読むことが多く、工場見学や技術者、工学系の学生と交流ができるという点に魅力を感じていた。現地では様々な背景の学生が集まっており、衛星や推進など、聞いた話の内容は実に多彩で興味深い内容であった。学生の話もさることながら、やはり事業所の方々から聞いた話が私にとっては最大の収穫だったと考えている。富岡事業所で担当している技術に関して、当日まで詳細がわからなかったが、工場見学で材料の研究も行っていることがわかった。昨今の航空分野における複合材料の進出には目覚ましいものがあり、私もこれに深い関心を持っていたため、従来の金属材料との違いを中心に質問を行った。先方からは丁寧な回答を得たため、大いに勉強になった。私はこれまで、こうした技術系の内容を学習するときは、博物館などで可能な限り実物に触れることが一番重要であると考えてきた。写真や映像で見ただけでは知と努力の結晶が放つ圧倒的な空気感を感じ取ることは難しいからだ。今回も IHI という先端技術に関わる企業の工場で実物に触れ、その美しい製品に感動した。零式艦上戦闘機を開発した堀越二郎技師は機能的に優れているものは美しいと言ったそうである。哲学の分野では、真善美に触れたとき人は感動すると考えられているが、無駄のない最適解として技術が形になったとき、それはアイデアに近いものを内包するため感動をもたらすのだと私は考えている。現地で技術開発や法整備に奔走している方々の純粋で情熱的な態度がこれを生み出すと感じ、今後の学習に対する態度を再考する契機となった。

参加学生 C:

実習では IHI エアロさんの会社説明や設備見学を通じて、学び続ける大切さを感じた。同社では CFRP でできた航空機部材(ファンカバーやガイドベーン)の売り上げが増え、宇宙・航空・防衛の売り上げが1:1:1に均衡をとりつつある。また SPACEONE のカイロス固体エンジン、IST のメタンエンジンターボポンプ等、ベンチャーへの出向によるブラックボックス技術の知見共有も積極的に行っている。加えて社内公募実験を募り、積極性のある若手への機会提供に取り組んでいるそうだ。

対応くださった方々は直接的な業務に限らず、法や工学・世界情勢に明るい多角的な視点を有していた。参加した学生が課外で取り組む、木製の衛星打ち上げや宇宙気球での漆工芸の制作などの面白い取り組みに対し、意見交換を行った。

また私は大学院で、マッハ 6 で飛行する極超音速航空機のスクラムエンジンを研究している。そして「国産の音速民間航空機を商用化する」という生涯をかけて成し遂げたい夢がある。研究開発・技術の側面でこの実現にむけた課題を論じたことはあったが、今回は STM(宇宙の道路交通法)や事故発生時の法損害・責任所在など、製品として実現した未来を議論できたことが最大の収穫であった。宇宙開発や航空に対して意識の高い同年代と交流でき、今後も研究を頑張ろうと再度思った。

参加学生 D:

私は有人宇宙開発に焦点をあてた議論をできたことがとても学びになったと感じている。まず、ロケットに人を載せることの技術的な難しさについては工場見学の際、その規模と作業の複雑さに驚かされたと同時に、有人ロケット開発になるとこれ以上の精度保証や安全性の担保をする必要があると感じ、より一層難しいことのように感じた。また、法的な制約に関しては、「現状の法制度上、日本からの有人ロケット打ち上げを許可することがで

きない」ことや、「海外の有人ロケットを輸入し日本で飛ばす方法でも法整備に5年かかる」などの難しさがあることを政府法整備に関わられている職員さんのお話から学んだ。このように技術開発や法整備の難しさはあると知ったが、同時に将来実現可能になる希望がみえてきたとも感じている。議論させていただいた皆様は技術開発や法整備に政府と協力しながら着々と取り組まれているし、IHI エアロスペースがベンチャー企業と協力している体制があることで開発の土壌がしっかりしているものと考えたので、今後日本で有人宇宙開発をやる意義も十分にあると感じている。私もその一員として貢献できる仕方に関わっていこうと考えた。

参加学生 E:

私は物心ついたところから宇宙開発について興味を抱いており、大学では工学部の宇宙基礎工学コースに所属している。しかし、私の所属しているコースでは、理論についてを徹底的に学ぶというスタイルなので、機器の作成や実験などを行うことはあまり行わない。そんな中で、日本の航空・宇宙産業の第一線で活躍している民間企業の IHI エアロスペース様の方々のお話を直々にお伺いできるというこの実習はとても魅力的なものであった。また、大学の授業において、有人宇宙学実習という人類が宇宙で社会を築くことを考える授業を受けたことがあるのだが、そこで、工学、理学からしか宇宙にアプローチできないわけではないことを知り、いろいろな視点で宇宙開発を考えてみたいと思うようになった。

このようなバックグラウンドを持って受講したこの実習は私にとって大変収穫のあるものとなった。

工場見学では大規模な生産ラインがあり、自動化も多くされているが人の手で作業する部分もまだまだあることを知った。効率的でかつ品質を向上させるのに、人と機械がうまく協力することが大事であることを知った。意見交換の場では、学生が様々な課外活動を行っていることを知った。また、IHI エアロスペースの方々とは他の学生の方々の活動を聞いて、私の考えの及ばないような観点から航空・宇宙産業のビジネスへと話を展開していて、自分の視野の狭さを痛感することとなった。特に今回、宇宙開発を技術面からではなく、法律面からアプローチすることが多かったが、これは私にはなかった視点であり、とても勉強になった。アメリカと日本のロケット打ち上げの多さの違いに法律がかかわってきていることを知ってとても驚いた。日本の宇宙産業の発展に貢献できるように一層勉強を頑張っていこうと思う。

参加学生 F:

私は今回の実習で、宇宙開発の技術的な難しさや、法律上の制約など現場で働いている方々にしかわからないようなことを知ることができとても学びになった。特に、H3 ロケットなどの固体燃料モーターの開発について、自社での技術が引き継がれ様々な実験を経て今の性能になっているという点について、技術開発の実態に驚かされた。私が今回この実習に参加させていただいた理由の一つに将来宇宙開発に携わりたいという考えがある。そのため、今回の実習で宇宙開発がただ1社独断での技術で成しえるものではなく多くの企業や政府などと連携して進めていく必要があるという点が知れたということがとても有意義であったと感じた。工場での製造ラインでも大規模な工場なのにライン管理や製品の品質管理、また効率面でも考えられていてとても多くのことを学ぶことができた。カーボンでのフィンの開発などでは、実際に開発を進めている方からお話を聞くことができ、独自の配合で品質が決まるという点についても企業としての研究意義があるのだということを痛感した。また今回一緒に参加していた方から、それぞれの方が宇宙開発にいろいろなアプローチで開発、研究に取り組んでいる姿を見て自分も将来宇宙開発に貢献できるようにこれからも頑張っていきたいと感じた。

2.3.5. 全体報告会での報告内容：ヒューストンでの体験実習の報告

1. 実施日 :2024 年 2 月 19-25 日
2. 実施場所 :アメリカ合衆国テキサス州ヒューストン Johnson Space Center 周辺
3. 参加学生 :5 名

<主な実習内容>

- NASA 研究者 4 名による講演
 - Brandon Macias 博士 (Overview)
 - Steve Laurie 博士 (SANS)
 - Jason Norcross 博士 (EVA)
 - Tim Macaulay 博士 (Sensorimotor)
- NASA 研究者に向けたプレゼンテーション (学生発表)
- 伊藤恵梨さん (フライトサージャン候補生) との交流
- Space Center Houston の見学
- Lone Star フライトミュージアムの見学

NASA 研究者 4 名による講演:

本実習では、共同参画機関である岐阜医療科学大学の田中先生の旧知の研究者である Brandon Macias 博士を始め、Johnson Space Center で研究を行っている 4 名の現役研究者から、最新の宇宙医学研究の知見を紹介していただいた。

Brandon Macias 博士 (Overview)

Brandon Macias 博士は、以前に田中先生が NASA Ames Research Center で研究をしていた時に知り合った研究者で、現在は NASA Johnson Space Center 内の Cardiovascular and Vision Laboratory で Director を務めている。同氏の発表では、循環器や視覚に関する内容を中心に、宇宙医学の全体像や、Johnson Space Center の研究施設に関することを学ぶことができた。

循環器系のリスクは、起立不耐症 (Orthostatic Intolerance) や律動不整 (Dysrhythmias) などのミッション中のリスクと、心血管疾患 (Cardiovascular Disease, CVD) などの長期的なリスクに大別されるとのことだった。CVD に関しては、現在行われている地球低軌道の宇宙活動や、以前の月探査の疫学データでは、寿命リスクの短縮が示されていないとのことだった。一方、宇宙飛行中に酸化ストレスや炎症のマーカーが上昇することが明らかになっており、今後の火星探査では問題になる可能性があるとのことだった。また、CVD のリスクは、宇宙環境 (放射線や精神ストレスなど) だけでなく、性別、年齢や遺伝的バックグラウンドによる影響も受けるとのことだった。今後、多くの人が宇宙に行くことが想定されるため、リスク評価の個別化が重要だと感じた。

Steve Laurie 博士 (SANS)

SANS とは Space Flight-associated Neuro-ocular Syndrome (宇宙飛行に関連する神経眼症候群) の略であり、視神経乳頭の浮腫や眼球の平坦化を特徴とする、宇宙飛行後に生じる眼の異常である。2011 年頃に提唱された以前の仮説では、男性のみに生じる、右目に生じやすい、塩分摂取量と関連する、などと考えられていたが、

最新の研究では、男性にも女性にも生じる、両目に生じる、食物中の塩分量を減らしても SANS が持続すると考えられているとのことだった。

また、近年の研究では、遺伝的バックグラウンドや解剖学的な違い(anatomical variability)による個人差があることが明らかになりつつあるとのことだった。そこで、日本人は SANS を発症しやすいですか、と質問してみたところ、まだ日本人の宇宙飛行士のデータは少なく、明らかになっていないとのことだった。今後、日本人についてのデータの拡充が必要だと感じた。

Jason Norcross 博士(EVA) (図 25)

EVA とは Extravehicular Activity(船外活動)のことであり、宇宙探査には欠かせないトピックである。これまでに国際宇宙ステーションでの軌道上の EVA や、アポロ計画での月面における EVA が行われてきた。しかし、それらの EVA がすべて順調に行われてきたわけではなく、予定時間までに作業が終わらなかったり、EVA 自体が延期されたりすることが多かったそう。今後の EVA を含めた宇宙探査ミッションでは、それらを見直し、効率的かつ計画的に EVA を企画する必要があると考えられる。

また、宇宙環境での EVA は、NASA の NBL(Neutral Buoyancy Laboratory)とよばれる巨大プール内で宇宙飛行士がトレーニングを行うことで、実現可能性を高めることができると教えてもらった。



図 25: Jason Norcross 博士の講演の様子。

Tim Macaulay 博士(Sensorimotor)

普段私たちは視覚系や前庭系、体性感覚系からの感覚情報をもとに、その場に応じた適切な運動指令を出している。しかし、宇宙環境では、重力が地球上と大きく異なる(国際宇宙ステーションでは微小重力、月面では 0.16 G)ため、入力される感覚情報が大きく変化し、運動出力方法も更新する必要がある。宇宙環境に長期間滞在した際には、異なる重力での運動出力に適応した状態となるため、地球帰還後すぐは歩くだけでもふらついてしまう。この状態を調べるために、宇宙飛行士は帰還後すぐ、目を閉じた状態での歩行や指差し運動などによる検査を行うそう。この検査の実際の映像をたくさん見せてくださり、イメージが湧いたとともに、思った以上にふらふらな状態の宇宙飛行士をみて、宇宙からの帰還の過酷さを知った。

NASA 研究者に向けたプレゼンテーション(学生発表)

事前に用意したパワーポイントスライドを用いて、Brandon 博士に自身の研究紹介や自己紹介を行い、ディスカッションを行った。Brandon 博士は時折うなずきながら熱心に聞いてくださり、とても貴重な経験を積むことができた。下記のそれぞれの参加学生がまとめた自身の発表内容の概要を記載する。発表資料は添付資料 3.3 に掲載する。

参加学生 A

NASA のミーティングルームでの発表では、自己紹介、宇宙に興味を持ったきっかけ、将来どんなことをしたいか、について話した。私は中学校で宇宙についての授業を聞いて、宇宙について未知なことが多く、宇宙について考えると胸が躍って一瞬で宇宙に魅了された。一度は宇宙の研究者になることも考えたが、幼い頃から医療に興味があって、医師になる夢を諦めきれなかったので医学部に進むことを決めた。そんな中、フライトサーजनという職業を見つけ、医師として宇宙に関わる仕事ができることを知った。発表では、このような私のバックグラウンドを紹介することができた。

参加学生 B

私は大学 4 年間卒業してから、医師を志し今の大学に入学した。前の大学にいた時、研究はしていたもののコロナ禍であったこともあり、学会など人の前で発表したり、英語で発表する機会はほとんどなかったため、今回が初めてであった。まず、発表スライドを作る過程でも日本語と英語ではスライドの作り方が違い、とても勉強になった。自分の発表は、以前研究していたことといま現在興味のある研究について発表した。

当日はとても緊張してしまい、反省点も多くあるが、Brandon 博士をはじめとして、田中先生、寺田先生も優しく聞いて下さり、とても良い経験になった。質疑応答では、今まで興味を持って学んできたことと、医学をどのように結びつけていきたいかということ聞かれ、うまく答えることができなかった。想定質問を考えていったつもりであったが、言語化することができず悔しかった。その点に関して、医学部で勉強する中で、ブラッシュアップしていけたらいいなと思った。

参加学生 C

金属 3D プリンター材料を研究する工学科の学生として、宇宙医学の観点で金属 3D プリンターの火星で活用するプランを提案し、議論した。火星にも重力が存在するため、地球帰還時と似た身体的負荷が火星到着直後にも宇宙飛行士を襲うのではないかと、という仮説のもと、3D プリンターを使って火星の資源を活用しながら段階的に補助具を作製して対応していく案を発表した。Brandon 博士には、専門外ながらも最後まで真剣に発表を聞いていただき、製造の度に発生する材料の損失割合に関するご指摘を受けた。当然の事象として、天下り式に解釈していた特性にも定量的な観点で目を配る重要性を強く実感した。また、発表後には、他の学生メンバーからも予想していなかった視点からの質問をいただき、非常に刺激的なイベントになった。

参加学生 D

私は運動制御学を専門とし、月面低重力下で運動がどのように上手くなるか(適応するか)について調べている。発表では、始めに研究の意義について説明し、次に実験の方法について実験中の動画を用いながら紹介した。私は重りを用いて体重を軽くすることで模擬低重力環境を作っているが、発表を聞いてくださった Brandon 博

士から、NASA ではばねを使った模擬低重力環境を用いて実験していることを教えてもらった。他にも研究活動に対して応援のコメントをいただき、今後の自信となった。英語での口頭発表は初めての経験で、とてもハードルが高く感じていたが、拙い英語でも大半は伝わることを体感し、今後も先入観を持たず様々なことに挑戦していきたいと思った。

参加学生 E

学生発表では、自身が行っている動物モデルを用いた発がん研究に関して発表した。事前に全員で集まって練習会をしたこともあり、Brandon 博士に研究の内容や重要性を理解して頂けたと自己評価している。Brandon 博士からは、同氏の研究と比べると私の研究は基礎研究的な側面が強く、どちらかというと Ames Research Center で行われている研究に近いという旨のコメントを頂くことができた。また、先だって行われた Brandon 博士の講演の中で、Johnson Space Center 内の同氏の研究グループが使っている建物に動物飼育施設があるとのことだったので、動物実験に関してディスカッションすることができた。

NASA の研究者に直接、研究紹介ができる機会はとても貴重な機会であり、Brandon 博士とのディスカッションはとても有意義だった(図 26)。



図 26: 発表会後の Brandon 博士を囲んで記念撮影。

Space Center Houston の見学:

Johnson Space Center の隣にある Space Center Houston には、NASA のミッションや宇宙飛行の歴史に関するさまざまな展示物があった。ここでは、アポロ計画、スペースシャトル時代、そして国際宇宙ステーション (ISS) での現在の活動について学ぶことができた。また、マーキュリー計画、ジェミニ計画、アポロ計画のカプセルやスペースシャトル計画の部品や宇宙食、当時の宇宙船を見ることができ、シミュレーションなどで、宇宙ミッションを管理する様子を体験することもできた。さらに、船外活動訓練に使用されるシミュレーターや機器など、宇宙飛行士が宇宙ミッションに備えるために受ける厳しい訓練を紹介する展示もあった。

過去や現在のミッションに関する展示に加えて、アルテミス計画をはじめとした NASA の将来的なミッションの計画を紹介する展示もあり、月や火星への有人宇宙探査など NASA が目指すものについても知ることができた。その展示は、日本とは比べ物にならないくらい大規模で、没入感があり惹きつけるものがあった。

また、Space Center Houston では、館内での展示に加えてトラムツアーというツアーを実施している。このツアーに参加すると、普段は入ることができない Johnson Space Center 内の様々な施設を見学することが可能である。ツアーは 3 種類あり、それぞれ宇宙飛行士訓練施設、George W.S. Abbey Rocket Park、旧ミッションコントロールセンターを見学できる。本実習ではすべてに参加することができた。下記にそれぞれのトラムツアーの概要を記載する。

宇宙飛行士訓練施設

米国実験棟 (Destiny) の他、日本実験棟 (JEM) 等のモックアップが見学できた。ほぼ全ての実験棟が揃えられており、日本では決して体感することのできない「国際宇宙ステーション」としての規模を知ることができた。また、展示の説明文で「JEM の役割」として語られていたのは、数ある分野の中でも宇宙医学、生物学のみであり、当該分野に対する米国からの熱い信頼を感じとれた。

George W.S. Abbey Rocket Park

アポロ計画の月飛行全てで使用された、直径約 10 m、全高約 110 m を誇る超大型液体燃料ロケット Saturn V の実物を見学できた。各アポロ計画の概要を記述した説明文が Saturn V を格納する倉庫を覆い尽くすように展示されており、米国の宇宙開発の壮大さを実感させられた。

アポロ 13 号のモニュメントの説明文には、“remarkable success”という表現が見られた。米国宇宙開発の発展の源泉は、想定外の結果に価値を見出して「成功」と断言できるような価値観にあるのだろうと感じさせられた。

旧ミッションコントロールセンター

ジェミニ計画やアポロ計画を導いた旧ミッションコントロールセンター(管制室)を見学できた(図 27)。使用されていない施設をガラス越しに観察する形ではなく、当時のフライトディレクターである Gene Kranz 氏のナレーションとともに、アポロ 11 号着陸当時の室内の音声とモニター画面が流れた。月面着陸前後の的確な指示と応答が繰り広げられ、人類史上最大の偉業を成し遂げようとする者が背負う責任と覚悟を体感することができた。

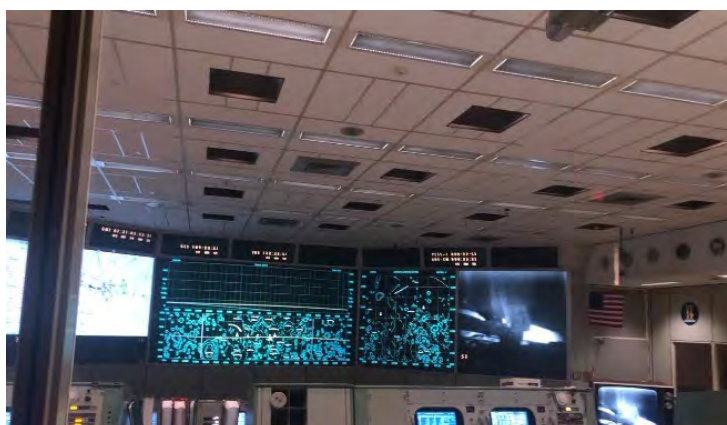


図 27: ミッションコントロールセンターの様子。

伊藤恵梨さん(フライトサージャン候補生)との交流:

フライトサージャン候補生の伊藤恵梨さんとの交流は、壁一面に歴代の宇宙飛行士の写真やポスターが飾られている素敵なイタリアンのお店で行われた(図 28)。伊藤さんは初対面でありながらも壁を感じさせない、非常に明るくて親しみを覚える方だった。

今回の交流では、伊藤さんが医師になったきっかけやフライトサージャン候補生になるまでの軌跡、フライトサージャンが実際どのような仕事をしているかについてお話を聞かせていただいた。それによると、伊藤さんは整形外科医で、バスケットボール日本代表のチームドクターをしたことがあるとのことだった。伊藤さんの人柄と、臨床だけでなく特殊な経験をしていることが、フライトサージャン候補生に選出された要因であると感じた。

また、フライトサージャンは宇宙飛行士の健康管理をする重要な仕事だが、リハビリはリハビリ専門のトレーナーの指示で行われている他、宇宙飛行士の車での送迎やスケジュール管理などマネージャー要素が強く、私たちが想像するような仕事はあまりしていないとおっしゃっていた。加えて、フライトサージャンになるためには自衛隊で授業を受けなければならないなど、これまで知らなかったことをたくさん教えていただいた。私がフライトサージャンに憧れがあると伝えると、国際宇宙ステーションがもうすぐ運用を終了する予定であることから JAXA が今後もフライトサージャンを必要とするのかよくわからないとおっしゃっていたが、どこにそのチャンスが待っているかわからないし、何が自分の目標に繋がるかわからないのでとにかく色々な方面にアンテナを張って、チャレンジしてみることが大切だとアドバイスしてくださった。伊藤先生のアドバイスを心に刻んで、たとえ自分の目標に関係のないことのように思えても果敢に挑戦していきたいと思った。



図 28: 伊藤さん(右から3人目)を囲んで記念撮影。

Lone Star フライトミュージアムの見学:

Lone Star フライトミュージアムには国内外のたくさんの戦闘機や、宇宙に関する展示があった。私の祖父は戦闘機が好きで、木や 3D プリンターで部品を作って小さな戦闘機のモデルを作っている。祖父の家で見たことのある戦闘機が幾つか展示されていて、見ていてとても楽しかった。その他にも、パイロットとして知っておく必要のある気候、気圧、温度、風などに関する説明と、実際に触れてそれぞれの効果を体感できる模型が置かれていた。

宇宙に関する展示としては、探査車のコンセプトや、Centaur と名付けられているヒューマノイドロボットの展示があった。また、スペースシャトルの乗組員が実際に使っていたシミュレーターも展示されており、宇宙に関する展示も充実していた。

参加者からの所感:

参加学生 A

宇宙医学実習の約 1 週間、初めて会う方々と過ごす日々は、初めは緊張の方が強くて不安な気持ちもあった。しかしどなたも優しく、宇宙や宇宙関連事業などにとても詳しく経験も豊富で、話していて刺激をもらえ、楽しかった。NASA の研究者の方々の発表の質疑応答の際には、質問するのを躊躇してしまってなかなか発言できなかったが、この貴重な機会を無駄にしてはならないと思い、その日の夜の Brandon 博士との会食ではたくさん質問してコミュニケーションを取ることができた。

私は宇宙に興味がある一方で産婦人科医になりたくて医学部に入ったが、その2つをどうしても関連づけられなくて将来どちらに進もうか、悩んでいた。しかし、Brandon 博士にこのことを話すと、産婦人科医は女性の体のスペシャリストで、今後女性の宇宙飛行士も増えていく可能性があるのも、産婦人科医がフライトサーजनになることや、宇宙関連の研究に携わることは非常に意味のあることだと言ってくださって、一見関連のなさそうなことを繋げて何かを発展させていくことはとても面白そうだなと思うようになった。

この 1 週間で見聞きしたり、感じたりしたことを大切にして、チャレンジする気持ちを忘れずに、医学部の残り 5 年を過ごしていきたいと考えている。この度はこのような素敵なプログラムを企画していただき、本当にありがとうございました。

参加学生 B

Johnson Space Center で最先端の研究をされている研究者の方々が 4 人来てくださり、研究を英語で聞くことができたことは大変貴重な経験であったと思う。中でも特に印象に残っているのは、Brandon 博士に、宇宙医学を学ぶためにどうしたら良いかと聞いたときに、宇宙医学というのはあくまでもその延長線にある学問であって、それを目指しすぎるべきでないと仰っていたことだ。同様に、フライトサーजनを目指されている伊藤さんも、目指しすぎてなれるものではないから視野を広げるべきだと仰っていたことも印象に残っている。

医師を志すスタートラインに立ったばかりの自分にとって、すぐに研究の道に進むことは現時点では難しいと考えている。しかし、今回の実習に参加したことで、宇宙医学という学際的な分野の研究の最先端に触れることができ、研究者の方々がどのように考えて研究をされているかを知ることができた。このことは、私が将来様々な選択をしていく中できっと役に立つと感じた。これからも色々なことに興味を持ち、広い視野を持って生きていきたい。まずは医師になって、その延長線上で将来宇宙に関わることができたら嬉しいと思う。

そして何よりも、この実習に参加したことで、同じ医学部でも違う大学の友人と大学のことや興味のあることを話すことができたり、普段関わることのない理学系や工学系の修士課程や博士課程の友人と研究のことや興味のあることを話すことができ嬉しかったし、とても良い刺激になった。さまざまなバックグラウンドを持ち、宇宙が大好きな友人たちと出会えたことはかけがえのない経験であった。これからも人との繋がりを大事にしていきたいと改めて感じた 5 日間であった。参加することができて本当に良かった。Brandon 博士、田中先生、寺田先生、NASA の研究者の方々、参加者の友人たちに改めて感謝申し上げたい。ありがとうございました。

参加学生 C

Space Center Houston の見学では、アポロ計画を初めとした米国の宇宙開発の壮大さを実感するとともに、その発展の源となったであろう彼らの価値観を学びとることができた。将来、宇宙開発分野で活躍したいと考え

る私にとって、想定外の結果でも「失敗」と捉えず、意義を見出した上で「成功」と胸を張って断言するという考え方を学ぶことができたのは大きな成果になった。

また、JEM 内の装置を使って材料工学の研究をしている私にとって、実施されているのにも関わらず、専攻する分野の記載が「JEM の役割」の展示に一切されていなかったことが悪い意味で衝撃的だった。同時に、しっかりと記述のあった宇宙医学分野に見習うべきものは何かと考える視点が芽生え、異分野の人間ながらも、この分野をもっと知りたいと思う欲求が湧いた。

「宇宙」に共通の憧れを持ちながらも、異なるバックグラウンドを持った学生同士であったからこそ、毎日が刺激的で今後の人生においても大きな財産となる経験ができたと感じている。

参加学生 D

NASA の研究者の方へ自分の研究について発表したり、ヒューストンに詳しい先生方に終始案内してもらったりなど、非常に貴重な機会となった。中でも、様々なバックグラウンドを持った学生の皆さんと共に実習を進めることで、広い視野を得ることができた。実習の最後には、学生間で宇宙系学会の情報を交換したり、博士課程の話をしたりすることができ、今後も頼りにしたい仲間を得ることができた。宇宙研究に携わる学生が集う場として今後も今回のような実習を増やしてほしいと思った。

参加学生 E

本実習では、4 名もの NASA の研究者の方々に講演していただく等、とても貴重な経験を積むことができた。現地に行って専門家の方々と交流し、実物を見たりすることで、ネット上では知りえない情報を得ることができた。個人的には、Johnson Space Center のトラムツアーで見た、Saturn V ロケットの迫力がとても印象的だった。また、NASA の方々の講演では、宇宙飛行による健康リスクの個別化というのが今後の大きな課題の一つだと感じた。例えば、Steve Laurie 博士の講演では、遺伝的バックグラウンドが SANS の発症に関わる可能性が考えられているということを学んだ。これまでに宇宙に行った宇宙飛行士は、アメリカ人やロシア（旧ソ連）人の男性が多く、それに伴って NASA の方々が扱っているデータには人種や性別の偏りがあると思われる。実際に、日本人のデータが少なく、他の人種と比べて日本人が SANS を発症しやすいかは明らかになっていないとのことだった。今後、宇宙滞在時間の長期化や宇宙に行く人の増加が予想されるため、人種や性別などの個人差を踏まえた、より正確なリスク評価が必要だと感じた。

実習の内容に加えて、学年や専門が異なる学生の方々と過ごすことができたことも、貴重な経験になった。実習の期間中、参加者の誕生日を祝うなど、終始、和気あいあいとした雰囲気の中で過ごすことができた。今回の実習中の Brandon 博士の講演は、田中先生が留学していた時のご縁で実現したものであり、日々のご縁を大切にしていきたいと改めて感じた。

このような素晴らしい機会を頂けたことに感謝し、有人宇宙活動を支える人材になれるよう、本実習で得た経験を活かしていきたいと思う。

2.3.6. 全体報告会での報告内容：ベッドレスト実験での体験実習の報告

1. 実施日 :2024 年 3 月 7～18 日
2. 実施場所 :岐阜医療科学大学 可児キャンパス(〒509-0293 岐阜県可児市虹ヶ丘 4-3-3)
3. 参加学生 :15 名 (被験者、見学者、測定者)



図 29: ベッドレスト実験に用いたベッド。

【はじめに】

2024 年 3 月 7 日から 18 日の日程で、岐阜医療科学大学において模擬微小重力曝露実験(ベッドレスト実験)が行われた。図 29 は実習に用いたベッドの様子である。被験者は全国から集まった大学生・大学院生 6 名で、見学や測定を行う学生を集めると、15 名を超える学生が参加した。本報告書では、実習の様子を被験者・測定者・見学者それぞれの立場からまとめる。

【ベッドレスト前後の計測】

本実験では、6 名の被験者を 3 名ずつの 2 グループ(A、B)に分け、合計 4 日間(ベッドレスト前 2 日間+ベッドレスト後 2 日間)の測定を行った。測定項目は 11 あり、以下の日程で各グループに対し計測が行われた。

※1. グループ分けは健康状態、身体の状態によらず、ランダムに行った。

※2. 計測器具の不具合により、一部被験者の測定順序の変更があった。

※3. ベッドレスト開始前、ベッドレスト終了後は通常のベッドで就寝し立ち歩きも自由とする。

・ベッドレスト開始 2 日前 測定項目(グループごと)

A: 測定1・2・3・8・9

B: 5・6・7

・ベッドレスト開始 前日 測定項目(グループごと)

A: 4・5・7・10・11

B: 測定1・2・3・4・8・9・10・11

・ベッドレスト終了 当日 測定項目(グループごと)

A: 4・5・7・10・11

B: 測定1・2・3・4・8・9・10・11

・ベッドレスト終了 翌日 測定項目(グループごと)

A: 測定1・2・3・8・9

B: 5・6・7

各測定項目は以下の通りである。

1. 起立時血圧応答 (1 号館 1221)

0° および 60° で各 5 分間、姿勢を維持させ、以下の項目を計測します。

- 心電図,呼吸曲線(DL-320, S&ME)
- 連続血圧,1 回拍出量(Human NIBP, AD Instruments)
- 血管年齢(アルテット 2,ユメディカ)

被験者メモ:5 分間横になった状態から直立の姿勢に移る際に、血液が下方に流れる感覚、皮膚が下に引っ張られる感覚、指先が痺れる感覚、身体に重みが増す感覚が感じられた。ベッドレスト終了後には、血液が下方に流れ頭から血が引いていく感覚、身体が重くなる感覚がより鮮明に感じられた。

2. 重心動揺 (1 号館 1221)

直立時で「開眼 1 分」、「閉眼 1 分」、「閉眼+磁石での内耳前庭系刺激1分」、「閉眼1分」の重心動揺(重心軌跡測定装置、武井機器)

被験者メモ:「開眼 1 分」後に「閉眼 1 分」をやるにあたって、身体の揺れが大きくなった。その後に耳の後ろ側(内耳前庭系を刺激できる箇所)に磁石を装着することで、明らかに姿勢が安定する感覚を受けた。

ベッドレスト終了後には、バランス感覚の衰えでふらつきがあったが、初見でなかったこと、力まないことで身体のだらつきを抑えられることを知っていたため、想像以上にふらつくことはなかった。重心動揺の変化が実験者の想像以下のものではあったのならば、こういった事が要因としてあげられるだろう。

ただし、一度揺れ始めたあと姿勢を立て直すのは、ベッドレスト終了後の方が困難であった。

3. 耳石機能検査 (1 号館 1221)

500Hz、持続時間 0.1msec の音を 1 秒間に 5 回、20 秒間、100 デシベル程度の大きさをヘッドフォンから音を聞いたときの胸鎖乳突筋筋電図。

4. 骨・免疫代謝マーカー(採血 約 15mL・ベッドレスト前後で 1 回ずつ)

- PTH・カルシトニン・オステオカルシン・BAP・Ca・P・ビタミン D・スクレロステチン
- リンパ球マーカー (CD4,CD8)

5. 骨密度 (関キャンパス 3 号館 3 階実習室)

踵の骨密度測定(超音波骨密度測定装置 CM-300)

6. 筋肉量 (関キャンパス 超音波センター)

上下肢の超音波撮影による上下肢の筋肉量を評価する。

7. fMR I(関キャンパス MRI 室)

視覚誘導自己運動感覚に起因する脳内応答評価

8. 下肢拮抗筋の筋活動パターン測定

- 立位時ならびに歩行時の筋シナジー測定を実施します。立位時の筋シナジーは、床反力計上にて静止立位を維持した後、前方のディスプレイに呈示された 12 方向に設定されたターゲットにできるだけ足圧中心を一致させる立位課題を行い測定します。
- 課題中、前後・左右方向の足圧中心位置および両脚のヒラメ筋、腓腹筋内側頭、腓腹筋外側頭、前脛骨筋、外側広筋、大腿直筋、大腿二頭筋長頭、中殿筋より表面筋電図を測定します。

被験者メモ:ベッドレスト終了後の測定では、バランス感覚の衰えが感じられ、運動量が上がれば上がるほど左右へのふらつきが大きくなった。

また、被験者によっては左右のバランス感覚の衰えを訴えていたが、私の場合は前後に重心を移動させた際のふらつきが強かった。

足の裏側全体で地面を踏ん張っている感覚が希薄で、底がカーブを描いている靴を履いているときと同じような感覚を受けた。

9. 歩行動作解析

動作解析カメラシステム(MICROCAM200-4)を用いて、ベッドレスト開始前ならび終了後にベッドレスト被験者の歩行中の動作を撮影、解析いたします(WinAnalyzer)

被験者メモ(千葉俊彦):ベッドレスト終了後、太もも、足の関節部分の感覚が鈍く、自身の身体が操り人形のようになってしまった感覚を受けた。

歩行時、上げた脚とは逆側に引っ張られる(ふらつく)感覚を受けた。

10. 体重測定

ベッドレストの前後での体重の変化を計測した。

11. 尿検査

ベッドレスト開始日の朝、ベッドレスト終了日の翌日朝に尿検査を実施した。

続いて、測定項目のうちいくつかに関して、その詳細をまとめる。(被験者学生の感想も含む)

【実験中 1 日の流れ】

3 月 8 日金曜日 15 時 41 分、ベッドレスト実験、つまり 10 日間のベッド生活が始まった。本節では、ベッド生活における 1 日の流れを簡単に紹介する。

◎起床と就寝

起床は 6～10 時くらい。被験者によってばらつきがあった。私はいつも PC 作業をして夜更かしをしていたので、いつも起きるのが 8 時過ぎだった。窓側のベッドで寝ていた被験者たちは、太陽の明かりで 6 時過ぎには必ず目が覚めるという健康的な生活を送っていたようだ。

消灯が 22 時。部屋全体が真っ暗になるが、私の周りからは 0 時頃まで PC のキーボードを叩く音が聞こえていた。

◎体温と血圧の計測

1 日 2 回、体温と血圧を計測していた。実験期間中、私の体温は 37℃前後を行ったり来たりしており、平熱(36.0℃)よりも高かった。

◎電気刺激

1 日 1 回、お昼ご飯の前後に、電気刺激を実施。「〇〇くん、”刺激” 良いか」という先生の声掛けが毎日の楽しみとなっていた。

◎食事

食事は 1 日 3 回。

朝は、黒糖クロワッサンと野菜ジュースのコンボ。(黒糖クロワッサンを食べるたびに、この実験参加のことを思い出すでしょう笑)

昼晩は、弁当とお茶。高齢者宅配専門の弁当だったこともあり、分量は多くなかったが、1 日中動いていなかったのも、私にとっては適量であった。毎日メニューが変わり、栄養バランスもしっかりしていたので、食事は 1 日の楽しみのひとつだった。

◎タオル拭きと洗髪

ベッドの上ではシャワーをあびることができないので、2 日に 1 回(看護師さんに頼めば、毎日対応可能)、体の汚れはタオル拭きで落としていた。基本的には自分自身で寝ながら体を拭くが、背中では看護師さんをお願いして、拭いてもらっていた。

また、洗髪も看護師さんをお願いしていた。介護でも使用する大きな専用ゴムバケツを利用して、シャワーで髪を洗う。

人によると思うが、私は昼食後の時間帯で実施することが多かった。

◎トイレ

タイミングはもちろん人によりけりだ。普段通りコンスタントに便を出す者もいれば、10 日間一度も大便を出さないまま実験を終える者もいた。

小便は専用のホースに、大便は専用の便器に出す。無事出し切ったら、看護師さんを読んで処理していただく。その際、重量を計測していた。

◎自由時間

「実験」といっても、この 10 日間は被験者にとって、寝たきりという条件以外は、基本的に自由だった。体勢を変えなければ、眠っていても、PC 作業をしていても、本を読んでも OK。各々が好きなように過ごしていた。

【fMRI】

ベッドレスト実験前後における測定の一つは fMRI を用いたものであった。岐阜医療科学大学関キャンパスにある MR 装置を用い、ある映像を見た際に脳のどの位置が活動しているかを調べた。装置の中には映像を映すことができないため、被験者は足元に置かれたスクリーンの映像の反射を、顔の上部に設置された鏡を通して見ることになる。映像は 2 パターン用意されており、どちらも多数の小さい円形の図形が動いているという点で共通している。それらの円は連動して同じ方向に動くが、その動いている方向が時間と共に変化していく。一つ目のパターンでは、円形の図形は全て同じ色になっており、映像に焦点を合わせながらも中心を見続けるように指示を受けた。二つ目のパターンでは、図形のうち一つだけが異なる色になっており、それを目の動きで追うことが求められた。二つ目の映像ではスムーズに映像を見ることができたが、一つ目の映像では、図形の動く方向が変わる際に目がピクツと動く感覚がある。これらの映像を見ている際に活発に活動する脳の部位を測り、実験前後での影響を調べるそうだ。実験による影響が見られたか、それらの事実からどのようなことが明らかになるのか、研究成果の公表が待たれる。

【血圧】

ベッドに寝て右腕に血圧測定機、左中指に心拍数測定器を装着し、横になったり起立したりを複数回(3 回だったと思う。)行った。起立する際、横になっていた後、血液の移動、下半身に集まる感覚を感じた。また、胸部の圧迫感、頭部は頭重感、指先に軽く痺れを感じた。ベットから降りた際には、視界がぼんやりしたり、一時的な目眩が認められた。

【重心動揺】

重心動揺の機械にのって、複数回(3 回だったと思う。)開眼、閉眼し結果を記録した。重心の不安定さについて、開眼時 1 分経った時点で、閉眼時 1 分を行うと身体の揺れが増加し、姿勢を安定させるのに苦勞した。その後、耳の後ろに磁石を装着すると、何をしなかった場合と比べ、姿勢が安定した感覚が得られた。

【筋エコー】

はじめに

私たちは本学の田中教授が開講した宇宙医学という授業を通して、宇宙空間が人体に与える影響に興味を持った。その中でも無重力空間で使用されない筋肉、特に抗重力筋が萎縮してしまうことを防ぐために様々なトレーニングが宇宙で行なわれていると知った。

その講義の中で今回のベッドレスト実験(模擬微小重力曝露実験)が本学で行われると知り、座学ではなく実際に体験したいと思い参加した。

実験の内容

この実験ではベッドレスト状態を課することで、模擬宇宙空間を再現している。そこで私たちは、微小重力環境下では宇宙空間と同様に、抗重力筋は通常より活動が少なくなるため萎縮し、抗重力筋でない筋は萎縮の影響が少ないとの仮説を立て実験を進めた。筋の萎縮指標には、筋骨格超音波検査によって測定した筋厚と皮下脂肪厚を測定した。

具体的な内容は以下に示した。

使用機器は、富士フィルムヘルスケア株式会社製 ARIETTA 850、探触子はリニア型プローブ(2-12MHz)を用いた。

測定項目は、上肢・下肢の周囲径と皮下脂肪厚および筋厚とした。

被検者肢位は上肢では肩関節下垂位、下肢は膝関節屈曲位にて下腿筋が収縮しないよう注意しながら足関節中間位とした。

測定部位の詳細については以下に示す。

○上肢

- ①. 上腕二頭筋: 肩峰と肘頭を結ぶ線の中点における筋厚および皮下脂肪厚(真皮層を含む)。
- ②. 上腕三頭筋: 肩峰と肘頭を結ぶ線の中点における筋厚および皮下脂肪厚(真皮層を含む)。

○下肢

- ①. 下腿三頭筋: 大腿骨外側顆と足関節外果を結ぶ線の近位 1/3 の点の延長線上にある腓腹筋内側頭・外側頭、およびヒラメ筋の筋厚と皮下脂肪厚。

【実験の見学・被験者へのインタビュー】

実験中の症状

初めの二日間は頭痛があったけれど、だんだんと順応していった。また、いつもよりも顔が熱く、平熱よりも高くなっていた。一方で、足先は冷たい感覚があり、毛布を使うなどして、体温調節を行うようにしていた。

また、のどの渇きが減退したとのことだった。頭に血が上り、下肢には血が流れにくくなったため、このような症状が生じていると考えられる。味覚と嗅覚が鈍化していたが、食べることがこの期間の一つの楽しみになっているという人もいた。お菓子などの甘いものを食べたいことがあるとのことだった。個人差はあるが、食欲の低下が見られるという被験者もいた。

実験に持ってきてよかったもの、実験に対する希望

持ってきてよかったものとして、印象的であったのはサングラス型ディスプレイである。サングラス型ディスプレイとは、サングラスに近い外観を持っており、着用してパソコンやスマートフォンと連携させれば、その画面が映画館のスクリーンに映し出されたように見えるものである。ベッドレスト中は身体を起こすことができず、パソコンで作業をすとなれば首を曲げた状態を保たなければならない。しかし、このサングラス型ディスプレイを着用すれば真上に画面が映し出され、首の負担もかからず快適に作業ができると言われていた。

また、被検者の実験に対する希望としては、手を洗うことのできる蛇口、ものを整理できるような環境面、隣の人の物音などの対処があった。

実験で大変だったこと

大変だったこととして、排泄を挙げていた被検者が多かった。排泄の際、慣れるまで看護師の方の手助けが必要となるため、心理的な苦痛を感じたり、寝た状態で排泄することが初めてであるため、尿意や便意は感じてでも排泄できるまでに時間がかかったりして大変であったと言われていた。

実験後の感覚の変化

1 日目は目眩、脱水症状、個人差はあるが吐き気、後ろに引っ張られる感覚、頭を左右前後に振った際に、その方向にふらつく感覚、バランス感覚の衰え、関節が自由に動かない感覚、わずかな筋肉の減少、体重減少が見られた。

2 日目は 1 日目よりも改善されたが、後ろに引っ張られる感覚、頭を左右前後に振った際に、その方向にふらつく感覚、バランス感覚の衰え、関節が自由に動かない感覚が残っていた。普通に頭を振ってもふらつきはそれほどでもなく、お辞儀程度まで下げると、1 日目と同程度の目眩を感じた。走ることには恐怖を感じる。

3 日目は頭を下げた時のふらつきはあるが、ほとんどが平常時に戻った。走れるようになった。

【参加学生(被験者)の感想】

参加学生 A:

これまで宇宙に関する様々な講義を受ける中で、ベッドレスト実験についてお話を聞いたことがあった。微小重力空間における人体の反応を調べるという点で有用な実験であるとのことだったが、医療倫理との兼ね合いや実験実施にかかる困難さからしばらく実験が行えていないということで、当時はまさか自分が被験者になることがあるとは思っていなかった。実際に参加してみると、実験に係る測定から生活のサポートまで非常に多くの人が関わって成り立っているのだと身に沁みて感じた。このような貴重な経験を与えてくださった先生や学生の皆様には頭の下がる思いである。十日間も寝たきりで過ごすというのは、もちろん初めての経験であり、寝ている間体調に問題はないかなど正直なところ心配な点も多くあった。しかし、実験が始まってみると、寝たきりの生活に慣れるまでの二日ほどは落ち着かなかったが、一度生活リズムが掴めると特に辛い点もなく快適に過ごすことができた。むしろ、日常の慌ただしさから離れ、健康的な生活ですらあったように思う。“無重力”を体験するというだけではなく、程度の大小はあれども被介護体験とともれる生活を行う中で、暖かいタオルに感動する・少しでも人と話すと気持ち上がるなど、いずれ介護する側・される側になる際に何を考えなければならないのかを考えるきっかけともなり有意義な経験であった。他の被験者をはじめ、様々なバックグラウンドを持つ学生との交流も新しい世界をすることができたとない機会となった。一生に一回の非常に貴重な体験となったように思う。

参加学生 B:

以前より田中先生の講義から重力変化に対する筋や感覚器、循環系への影響に興味があった。特に抗重力筋は無重力条件下では使われず萎縮、赤筋が白筋化することが印象的であった。そのため、今回測定補助という形でベッドレスト実験に参加して自分が学んできた分野が活躍する様子を体験できたことは非常に有意義なものであった。同時にもっと自分の専門性を高めることで、他の分野と交流したときに新しいアイデアや視点からより深く宇宙医学に関われるのではないかと感じ、勉強へのモチベーションとなった。

また、宇宙医学として行ったベッドレストは高齢者の寝たきりと類似しているため高齢化社会における医療としても役立てると考えているので、今回の経験を将来に活かしたい。

機会があればこれからも積極的に参加して幅広い知見を得たいと思った。

参加学生 C:

この度は、実験に参加させていただきありがとうございました。

田中先生の講義から重力に対する筋や感覚器、循環器への興味があった。そこで自分の専門分野と関連づけてみて、筋肉や、血管などの大きさ、長さを測定できるエコー検査を用いて、実際に、数値がどのように変化をするのかを明らかにしたかった。残念ながら、10 日間では劇的な変化は見られなかったが、模擬微小重力環境にいた被験者のエコーを取ることは、私にとって非常に良い経験になった。また、いつかは地球に帰ってきた宇宙飛行士さんの筋エコーをとってみたいと思った。

今回は、エコー検査しか行うことができなかったが、CK やミオグロビンなどの血液検査、MRI など、エコー検査以外の専門分野とも絡めて、検査をしてみたいと感じ、自分の専門分野の意欲がより湧いた。

また、他大学の学生さんと交流をして、宇宙医学という分野の幅広さを改めて実感した。私は医療の知識しかないが、他大学の学生さんを通じて、物理学などの他分野の知識も深めたいと感じた。

また、機会があれば是非参加したい。

参加学生 D:

今回ベッドレスト実験に参加させていただいた動機は3つある。

1つ目にベッドレストの実験が(規模・期間は異なるが)NASA でも同様の実験が行われていること。2つ目にJAXA の宇宙飛行士(もしくは宇宙飛行士候補者)の方々も実験前後で行われる測定を受けること。3つ目に実験後、無重力暴露後の身体の変化が体感できることがある。

宇宙飛行士を目指す私にとって、少しでも宇宙飛行士・無重力の体感に近づくことのできる今回のような機会はまたとない好機であった。

一方で、10 日間ほどで目に見えた変化が本当に訪れるのだろうか、長めの寝正月を経験するだけで自身の心情に変化を与えるには至らないのではないかという懸念もあった。

結果としては、良い意味で期待を大きく裏切られた。実験の最中は、平常に生活するのでは味わうことのできない逆境(排泄、不自由によるストレス)をいくつも乗り越えることとなり、極地で働く宇宙飛行士の感じるものを僅かではあるが体感しているようであった。

中でも大きな驚きを受けたのが、実験後も身体の変化であった。10 日間ぶりの起床時、これまでに受けた体験では説明することのできない感覚(頭を後ろに引っ張られるような感覚、大きめのふらつき)が私を襲い、「この体験をできただけでも本実験に参加した甲斐があった。」起床してすぐにそう思った。

ちょうど、我々よりも一足早く地上へ帰還した古川聡宇宙飛行士が X(旧 Twitter)にて、地上帰還後身体にどのような変化が見られ、平常状態へとどのような過程を経て回復していくのかを事細かにレポートしておられた。そこで書かれている、無重量暴露後の後遺症がベッドレスト被験者のものと多く重なり、自身が体感している感覚がまさしく宇宙飛行士のものであると確認できたことがとても嬉しく思えた。

本実験を通じてこのような体験を得られた裏には、実験を主導いただいた田中先生、寺田先生、測定にご協力いただいた京都大学、企業の方々、我々被験者をケアし、サポートいただいた看護師の皆様、岐阜医療科学大学の方々など多くの方々の努力と協力があった。

この場をお借りして、全ての関係者様に心より感謝申し上げます。

そして気さくな被験者仲間、彼らがいたからこそベッドでの生活も笑いのある素敵なものとなった。彼らにもこの場をお借りして感謝を申し上げておきたい。

最後にはなるが、本実験は日本の有人宇宙開発発展、民間の方々健康改善に繋がるものであると私は信じている。今回の結果をレポートを目にした人々が、人類の発展に寄与すべく実験に参加頂けることを願いつつ締めくくりとさせていただく。

参加学生 E:

今回、私が本実験に参加した動機は大きく 2 つあります。ひとつは、寝ているだけでバイト代をいただけるという点です。寝ている間は、研究を進めてもいいし、本を読んでいてもいいし、映画を観ていても良いというのです。こんな機会があつていいのでしょうか。それに加えてもう一つ、医学と有人宇宙開発の両面の発展に貢献できる点です。ベッドレスト、前後の試験を通じて得られるデータたちが巡り巡って、上記の発展に繋がると考えるとワクワクしますよね。

なんだか壮大なことを書き連ねましたが、ベッド生活 10 日間は思っていたよりもあっという間で、進めたい研究も進まなければ、読み終える予定だった本もほとんど開けませんでした。あまり集中力が持続しなかったのだ。いや、もともと集中力が無いただけなのかもしれませんが。

大変だったことは 2 つ。トイレと寝返りだ。トイレは、特に大便をいかにしてリリースするかに苦戦した。うまく踏ん張れないのだ。無重力空間で滞在する宇宙飛行士はもっと大変なのかもしれない。寝返りは 5,6 日目あたりにしんどくなった。先生曰く、寝たきり状態に順応した結果起こる症状だそうだ。

これ以外の体験については、#ベッドで無重力 というハッシュタグで、SNS (Instagram, X) でもリアルタイムで発信していました。この報告書をここまで丁寧に読んでくださった方には是非いいねを押しにきてほしいです。そして、「寝ること」でさえ、医学や宇宙開発といった発展途上の分野に貢献し得るということに、想像を膨らませてみてください。そんな妄想が、私達の日常を面白くできるんじゃないかと考えています。

いつか宇宙旅行している人が、当たり前になり電気刺激をする世界になっていたら、この実験に参加していたことを周りの人に自慢しようと思っています。

2.3.7. 2024 年度の宇宙医学実習

2024 年度は、2 箇所 (NASA Ames Research Center, NASA Johnson Space Center) の訪問とベッドレスト実験を実施し、宇宙医学に関する施設・研究室見学や実験体験などを行った。合計 21 名の学生が参加した。

2.3.8. NASA Ames Research Center での体験実習

実施日：2024 年 10 月 17-22 日

実施場所：アメリカ カリフォルニア州マウンテンビュー、NASA Ames Research Center

参加学生を募集したところ、33 名からの応募があり、2 名の学生を選抜した。訪問日までの間に、zoom を用いて、英語での自己紹介発表の練習などを繰り返し行い、訪問準備をした。

訪問初日には、入構用の Visitor badge を取得し、NASA Ames Research Center 内にあるデータベースを運営している GeneLab を訪問した。Dr. Valery Boyko に施設内のガイドならびにデータベース運営の説明を行ってもらった。また、Dr. Joshua Alwood に大型遠心装置によるマウス過重力実験の現場も案内してもらった。実習 2 日目には、Dr. Jessica Lee から人工衛星 Biosentinel の話、Dr. Jonathan Galazka よりオープンデータベースを用いたドライ解析研究の話、Dr. Piyumi Wijesekara からは閉鎖環境実験の話などを聞いた。また、ショウジョウバエを用いた神経研究のラボ見学、骨解析の現場 (Micro CT 装置など) の見学などを行った。最終日には、参加学生が英語で自己紹介のプレゼンを行い、現在どんな研究をしているか説明した。NASA 研究者から貴重なアドバイスなどを伺う機会となった。





図 30: NASA Ames Research Center の見学の様子。

はじめに

本実習は、文部科学省宇宙航空科学技術推進委託費の支援を受けて、「将来の有人宇宙活動を支える宇宙医学人材養成プログラムの創出」として行われている宇宙医学教育プログラムの一環として、海外の宇宙医学研究の学習を目的に、2024 年 10 月 17 日から 10 月 22 日に実施された。主にはアメリカサンフランシスコ州にある NASA Ames Research Center の研究者との交流を行い、NASA 研究者とのディスカッションを通じて宇宙医学についての知見を深めた。また、NASA Ames Research Center 内の施設見学を行い、アメリカの宇宙分野の現場を体験することにより、今後の宇宙医学分野への考察を深めることができた。

本レポートでは、実習の内容および実習によって学んだことを報告する。また最後には簡単に実習生の所感を記載する。

開催概要

日時: 2024 年 10 月 17 日から 2024 年 10 月 22 日

場所: アメリカ合衆国サンフランシスコ州マウンテンビュー NASA Ames Research Center

参加学生: 関結香、本城万由佳

引率: 寺田昌弘先生(京都大学)

主な実習内容

- NASA Ames Research Center 構内での研究室見学・講義
 - Dr. Valery Boyko (GeneLab のデータ取得)
 - Dr. Joshua Alwood (大型遠心装置による過重力実験)
 - Dr. Jessica Lee (深宇宙における微生物研究)
 - Dr. Jonathan Galazka (GeneLab 取得データのドライ解析研究)
 - Dr. Piyumi Wiksekera (閉鎖環境実験)
 - 宇宙環境における神経の変化を研究している研究室

o Dr. Eduardo Almeida(骨組織の解析)

- NASA 研究者に向けたプレゼンテーション(学生発表)
- 現地研究者との交流
- 市内見学(シリコンバレー、サンフランシスコ)

● NASA Ames Research Center 構内での研究室見学・講義

本実習では、寺田先生の旧知の Joshua 先生をはじめ、NASA Ames Research Center で宇宙医学の最前線の研究をされている研究者の方々からの講義や研究室見学をさせていただく機会に恵まれた。また、見学は NASA Ames Research Center 内で行われ、実習約 2 ヶ月前から申し込んだ各個人専用のバッジが当日発行され、制限区域内に特別に立ち入ることが許された。

o Dr.Valery Boyko(GeneLab のデータ取得)

NASA のオープンデータベースである GeneLab のデータ取得・解析を行っている研究者である Valery 先生の案内により、GeneLab 上に公開されている RNAseq や scRNAseq のデータを取得する現場を見学した。

宇宙環境での実験をする機会が限定されている宇宙医学研究において、GeneLab で公開されているデータは数少ない非常に有用なものである。したがって宇宙から回収したサンプルからデータを取得する過程は重要であり、その再現性を確保するために RNAseq データ取得におけるほとんどすべての過程が機械化・統一化されていた。

GeneLab 上のデータの再現性が取得の過程においては保たれているということ、そして NASA で取得されたデータ同士の比較研究がしやすくなっているということを知り、今後の解析などにも役立てられると感じた。



図 31: Valery 先生によるラボ見学の様子。

○ Dr. Joshua Alwood(大型遠心装置による過重力実験の見学)



図 31: 大型遠心装置の様子。

宇宙環境は微小重力条件であり、重力に適応して進化を遂げてきた生物にとって微小重力環境は様々な臓器に影響を与えていると考えられている。微小重力環境を地球上で完全に再現することは難しいため、微小重力条件とは逆に大型遠心装置を用いて過重力条件で実験することにより、重力が生物に与える影響が検討されている。

Joshua 先生は宇宙環境における放射線・微小重力が骨組織に与える影響について研究されており、先生が現在行っている大型遠心装置でマウスに過重力をかける実験の現場を見学することができた。

マウスのケージを入れることができるほどの大きさの箱を遠心装置により高速回転させており、マウスの様子はケージ内のカメラでリアルタイムに観察することができるようになっていた。

大型遠心装置のような大規模な装置は日本では有効活用できていない現状であり、多くの論文で記載されている過重力実験の様子を実際に見学することができたのは非常に貴重な経験であった。

さらに、マウスの様子の映像も見せていただき、過重力環境において代謝の変化が生じるという興味深い結果についての話を伺い、改めて重力が生物に与える影響の複雑さについて感じ、宇宙医学への興味を深めることができた。

○ Dr. Jessica Lee(深宇宙における微生物研究)

ジェシカ先生は、宇宙微生物学や合成生物学の専門家で、深宇宙ペイロードや宇宙合成生物学について網羅的な講義をしていただいた。

まず、BioSentinel と呼ばれる微生物を深宇宙環境に送り観察を行うペイロードシステムについてのお話をいただいた。宇宙放射線が生物に与える影響について解明するためには、ISS での低軌道実験では放射線量

が少ないこともあり、月をはじめとした深宇宙での実験が必要となる。深宇宙における放射線は低軌道での放射線よりも DNA 損傷、酸化ストレスなどから生物全体に多大に影響を与えることが予想されている。そのことについて考察を行うために、微生物を深宇宙で自動的に培養し観察データを地球に送信するサンプル回収不要なペイロードである BioSentinel というシステムが用いられている。

すでに深宇宙でのデータ取得は行われており、酵母は深宇宙における放射線下でも生存していたという結果が得られたとのことで、現在は反射による二次放射線があるという点で深宇宙と異なる月でのペイロードプロジェクト LEIA が進行しているというお話を伺った。

サンプル回収が困難な場合も多い宇宙生物学実験において観察画像を送り返したり、自動培養を行ったりする技術は必要不可欠である。その最先端の技術を実際に見ることができ非常に刺激的であった。

次に、宇宙合成生物学についてのお話では、酵母などの微生物を宇宙において接着剤・薬剤・ヨーグルトなどの食品の供給に役立てるための開発研究について知ることができた。宇宙開発において大きな課題となっている食料品や日用品の供給に対して課題解決を試みている様子が非常に興味深かった。さらに、酵母はマウスやヒトとは異なり非常に小さいため重力を感知しないが、宇宙環境において増殖速度が上昇するという興味深い結果についても聞くことができ、宇宙微生物学に対して興味を持つきっかけとなった。

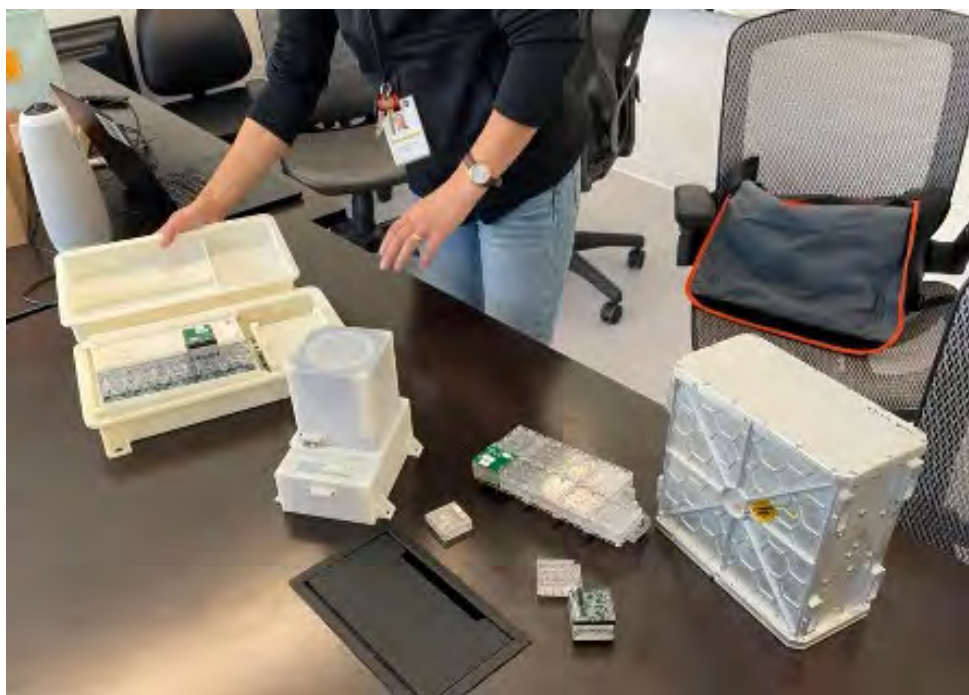


図 32: 深宇宙ペイロード。

○ Dr. Jonathan Galazka (GeneLab データの解析)

GeneLab データのドライ解析研究の専門家である Jonathan 先生とディスカッションする機会をいただいた。

先述のように実験を行う機会の少ない宇宙生物学研究において、ドライ解析による研究は非常に重要な役割を果たしている。Jonathan 先生は主に微生物の遺伝子データの解析を行っており、研究についての話を聞くことができた。

さらに、実習生の研究内容についても興味を持っていただき、研究内容について話すと有用なアドバイスをもらうことができ、非常に貴重な機会をいただくことができた。

○ Dr. Piyumi Wijesekara(閉鎖環境実験)

Piyumi 先生は組織工学を用いた月面砂塵が気管に与える影響について研究されており、先生の研究内容のお話と Piyumi 先生が参加された閉鎖環境実験についてのお話を伺うことができた。

まず、研究内容のお話では、Piyumi 先生が開発した iPS 細胞を使って培養条件下でより簡便に観察をすることができる気管組織の映像を見せていただいた。気管は本来管腔構造であるが、内側と外側を反対にして気管内の組織を外側にすることによって観察が容易になるという逆転の発想により開発が行われており興味深かった。

先生が参加された閉鎖環境実験とは、HERA と呼ばれるプロジェクトで閉鎖環境が健康に与える影響を解明することを目的として地球上の宇宙船を模した設備で被験者 4 人で生活を行うというものである。閉鎖環境での生活について、ずっとカメラで観察されているという居心地の悪さはあるものの健康管理がしっかりされていたために特に大きなストレスもなくむしろ健康的に過ごすことができたそうで、非常に貴重な話を聞くことができた。

○ 宇宙環境における神経の変化を研究している研究室

神経の研究においてはマウスよりもショウジョウバエの方がヒトに近いために実験動物として採用されることが多いが、NASA Ames Research Center においても宇宙環境が神経に与える影響を検討するためにショウジョウバエが実験対象として採用されていた。

ショウジョウバエを用いた実験の様子やその観察の様子について見学をさせていただいた。ショウジョウバエを用いた実験を見学したのは初めてだったので、ボトルに入れて飼育を行っている様子やショウジョウバエの脳組織切片の観察の見学をする機会をいただいたことで実験に対するイメージを具体的に持つことができるようになった。特に脳組織切片を観察するとヒトの脳組織と非常に似通っていたことが印象的であった。



図 33: ショウジョウバエの飼育の様子。

○ Dr. Eduardo Almeida(骨組織の解析)

Eduardo 先生が主宰されているラボにおいては、ドライ解析とウェット実験の両方が行われており、それらの様子を見学することができた。

まず、骨組織の microCT や顕微鏡による解析の様子を見せていただいた。用いられている microCT の機械が日本で用いられているものとは異なっていたことが印象的であった。

そして、Eduardo 先生が現在進行している p21 変異マウスの骨組織のシングルセルデータの解析についても見せていただいた。その実験データは Eduardo 先生主導で計画しプロジェクトとして採用され、実際に宇宙で取得したサンプルのものであり、自分で宇宙実験を計画し実行している姿に非常に感銘を受けた。さらに、NASA だけでなくアメリカの他の大学とも共同研究を行い microCT の解析などを分担して行っていることも印象的であった。実験結果の一部についても見せていただいたが、そのデータ量や多彩な解析に驚いた。

● NASA 研究者に向けたプレゼンテーション(学生発表)

5 日目の最後に参加学生それぞれによる自己紹介を兼ねたショートプレゼンテーションを行った。

○ 参加学生 1

私のプレゼンテーションでは、今までに自身が行ってきた骨粗鬆症予防の研究について述べた後に、新たな宇宙飛行士の骨粗鬆症予防策についての考えを発表した。現在行われている宇宙空間における骨粗鬆症予防策は主に服薬による予防策、サプリメントによる栄養補給、そして宇宙飛行中の運動である。しかし、服用による予防策は骨密度減少予防には効果があるものの副作用が問題視されているため、私の研究テーマであるボーンブロス(スープ)による骨粗鬆症予防を宇宙飛行士に発展させたいと考えている。

私の研究はボーンブロスが与える破骨細胞の分化抑制の効果を確かめる細胞実験と閉経モデルのラットを使いボーンブロスを一定期間経口投与した後の骨密度の変化を確かめる動物実験の二つを中心に進めてきた。動物実験においては経口投与で閉経後の骨粗鬆症の進行を遅らせることができた為、ボーンブロスを毎日一定量飲むことで骨粗鬆症予防に寄与することがわかった。宇宙飛行士における発展としては宇宙空間での食事として毎日摂取してもらうか、宇宙飛行前後に地球上で毎日摂取してもらう二つの考えを発表した。プレゼンテーション後には研究者たちから様々なアドバイスをもらうことが出来た。細胞実験において違う細胞での実験提案や、宇宙飛行士の食事について、宇宙飛行士が毎日食べているものの管理についてのアドバイスなどをもらうことができた。NASA を訪れるまでに約2年間研究を行ってきた、この先どのような方向性で実験をしなくてはいいか悩んでいたが大変貴重なアドバイスを頂き、これからの研究への意欲が高まった。

○ 参加学生 2

私のプレゼンテーションでは、自分の将来の目標である宇宙環境における骨量減少の機序を解明することにより老若男女問わずすべての人々が安心して宇宙に行ける世界を作ること、そのために現在どのような研究をしているか、そして今後どのような研究がしたいかということについてプレゼンテーションを行った。

骨組織は、骨細胞・骨芽細胞・破骨細胞の 3 種類の細胞によって構成されている。骨細胞は長い間休止状態にあると考えられていたが、近年の研究によって骨をつくる骨芽細胞や骨を壊す破骨細胞のはたらきを調節する司令塔であることが明らかになった。骨細胞は、重力感知にも大きく寄与していることが考えられているが、宇宙環境が骨細胞に対して与える影響についてはまだ解明されていない。現在、東京慈恵医科大学の宇宙航空

医学研究室の訪問研究生として、GeneLab 上の骨細胞データのドライ解析を行い、宇宙環境が骨細胞に対して与える影響についての研究を行っている。

研究活動の過程で、宇宙環境においては骨細胞の成熟が抑制されているということが明らかになった。私はそこから、宇宙環境においては骨細胞が未成熟な均一な細胞集団となり、ヘテロジェナイエティが失われることによって骨量減少が生じているのではないかと考えるようになった。そして骨細胞は本来複数のサブタイプを持つ不均一な細胞集団であり、その一部のサブタイプが宇宙環境において特に強く影響を受けた結果骨の恒常性に対して影響を与えているのではないかという仮説を立てた。プレゼンテーションにおいては、その仮説や立証のために行いたい実験について話すことができた。まずは地上での尾部懸垂実験を行うとよいのではないかという意見など今後の仮説立証のために新しい視点を提供していただき、非常に貴重な機会をいただき今後の研究のモチベーションを高めることができた。

● NASA Ames Research Center の研究者との交流

研究所の見学期間でたくさんの研究者と交流を持つことができた。

施設見学の際に研究器具やシステムについて説明してくれた研究者たちと昼食を食べながら交流を深めた時の写真を下に示す。昼食中には、研究者たちにどのようにして NASA で働くようになったかなどの質問したり、宇宙についての話や宇宙の映画についての話題でも盛り上がった。



図 34: ランチ風景。

最終日の昼食は NASA の施設内にあるカフェテリアで研究者たちと共に昼食を頂いた。寺田先生が Ames Research Center に在籍していた際の元上司である研究者や、産休中の研究者もカフェテリアに集まり食事を楽しんだ。昼食中は、NASA での仕事と子育ての両立についての話や、研究者たちの家族の話、近況報告、そして最近の宇宙に関するニュースについてなど様々な話ができ、とても刺激的で楽しい一時だった。



図 35: スーパーバイザーとのランチ風景。

- **市内見学(シリコンバレー、サンフランシスコ)**

週末は研究施設が休みになるので市内見学に出かけた。Ames Research Center が位置するシリコンバレーには世界を代表する大企業 (Apple・Google・Intel) が本社をおいている。それらの会社施設見学に行った。Google は独創的な形をした会社で施設内は Google カラーの自転車がおいてあり、それに乗って施設内を移動できる。広大な敷地にある Google は圧巻で、私がいつも使用している物は Apple 製品が多いが Google Pixel など Google 製品もとても魅力的に見えた。



図 36: Google 見学の風景。

Apple の施設も円形と実に面白い形をしていて、施設の設計が iPad をかざすことで見れるコーナーが Visitor センターにおいてあり、Apple ならではの観光者たちの楽しませ方でおもしろかった。

サンフランシスコ観光ではサンフランシスコの観光名所である Golden Gate Bridge、Pier39 やアルカトラズ島などを訪れた。Golden Gate Bridge はとても美しく、感動した。その他にも市内を歩いていると無人タクシーが走っていたり Tesla の最新自動車がたくさん走っていたりと最先端を進むアメリカを感じることができた。



図 37: サンフランシスコ見学の風景。

最後に Stanford 大学も訪れた。NASA の研究施設で働く人の中には Stanford 大学出身の人も多く、インターン生も受け入れている。Stanford の大学内では Stanford のパーカーを着て楽しそうに授業から帰る学生たちや、図書館で勉強する学生、フットボールのゲーム観戦に向かう学生などを見かけ、聡明そうな学生たちが充実した学生生活を送っており、同じ大学生として身が引き締まった。

所感

参加学生 1 歯学部歯学科 5 年・学部学生)

今回この実習に参加した経緯は、“私の研究をさらに発展させるために NASA に行きたい！”と思ったことがきっかけで、NASA への訪問方法を探していました。調べていく中で、寺田先生を知り、寺田先生のメールアドレスを探してメールを送りました。その時はまだ宇宙学医学実習の応募はされておらず、そのプログラムが予定されることも知りませんでした。寺田先生なら何か良いアイデアをいただけるかもしれないと思い連絡しました。そこで寺田先生からこの実習が計画されていることを教えていただき、後に応募してこの実習に参加することが出来ました。幼い頃から NASA に憧れを抱いていましたが、まさか自分が NASA の研究施設を訪問する機会を手にすることができるとも思っていなかったもので、飛び上がるほど嬉しかったです。

Ames Research Center を訪れて感じたことの一つは、研究の道の厳しさです。自分が描いていた夢の実現に向けてその世界に一步近づくとやはり現実が見えてきます。宇宙空間に何か物運ぶということは決して簡単なことではなく、自分の実験を宇宙で実現したいのであればたくさんの研究データが必要であることなど当たり前想像ができることではありますが、改めて気付かされました。ただ今回の実習を通して学んだことは、決して諦めないで方法を模索することがとても重要であるということです。この先自分の研究をどう広げていくのか、広げられるのかと考えると厳しい道のりで不安になることがあります。しかし、努力をして探し求め続ければきっと方法があると思うのです。今回の NASA への切符を手にした時のようにです。今回、NASA に行きたいと思った時に色々な人に相談をしました。しかし、皆が言うことは同じで“NASA の訪問は難しいと思う”の言葉でした。正直、私は自分の立場で NASA に行くのは不可能に近いとも思っていました。諦めずに探し続けました。そして達成することが出来たのです。この先困難にぶつかることも多いと思いますが、この経験を糧に自分の目標を達成するために諦めずに進んでいきたいと思いました。そして、今回実際に NASA の施設に足を運んだことで研究の難

しさを感ずると同時に研究の面白さも改めて感ずることが出来ました。どんな研究結果が出てもそこに何かの理由がある。そこを突き詰めていくことが研究の面白さだと思います。Ames Research Center での研究者たちが自分の研究に誇りを持ち、キラキラと輝いて研究に臨んでいる姿は、とても印象的でした。これからもこの経験を胸に邁進して参ります。

学生である私にこのような貴重な機会をくださった京都大学の寺田先生、NASA Ames Research Center でお世話になった先生方に心より感謝申し上げます。

参加学生 2（医学部医学科 4 年・学部学生）

今回の実習は、宇宙環境での骨量減少のメカニズムや骨細胞に対する影響を解明したいという目標を持つ私にとって、まさしくロールモデルである宇宙での骨の研究を行っている NASA の研究者の方々に直接お話を聞くことができるという非常に重要な機会となりました。

まず実習の前は、宇宙生物学の研究を行っている研究室は非常に少なく、自分が研究者としてのキャリアを積むにあたってどのようなキャリアパスがあるのかということが想像しづらい状況にありました。実習を経た今でもその疑問に明確に答えることはできませんが、今回の実習を通して将来への不安というものが和らいだように思っています。その理由は想像していたよりも多様なキャリアがあるということを知ることができた、というところにあります。今回の実習を通して宇宙生物学の研究は NASA でしかできないものではなく、アカデミアでも可能であるということを初めて知りました。特に骨の研究を行っている Joshua 先生や Eduardo 先生から研究の話を伺ったときに、アメリカのたくさんの共同研究先の名前が挙がっていました。研究所かアカデミアかというところだけではなく、NASA では海外からのポスドク研究員の方々が多く活躍されているということも印象的でした。今回引率くださった寺田先生もポスドクとして NASA で研究をされていましたし、同じように世界中からポスドク研究員が楽しそうに研究をしている姿を近くで見ることができました。もちろん NASA の宇宙開発は軍事的側面もあるため閉鎖的な側面もありますが、想像していたよりも世界中のいろいろな立場の研究者たちが宇宙生物学・宇宙医学の研究をしているということを実感しました。そこから今はキャリアパスに対して過度に心配するのではなく、自分ができることを一つ一つやっていこうと思えるようになりました。

そして今回の実習で、自分の興味や解明したいことについて再確認することができました。私は現在、ドライ解析を用いて宇宙環境が骨細胞に対して与える影響について研究を行っていますが、それだけでは限界も多く、自分が進むべき方向やアプローチについて悩んだり、結果を求めるあまりに視野が狭くなったり、自分の目標を忘れてしまうことがありました。今回の実習で研究者の方々の話を伺っていると、そうだ、自分が本当にやりたいこと、解明したいことはこれなんだ、という気持ちが湧き上がってくるのを感じました。特に私の研究内容と近い分野を専門とされている Eduardo 先生の解析内容を見せていただいたときの新鮮できらきらとした気持ちは忘れられません。おそらくそのときの気持ちは私の研究人生において、初めて骨細胞について論文を読んで興味を持ったときと並ぶほど強い原動力となると思っています。

今回の実習で得たことを原動力に、これから研究に精進していこうと思います。このような貴重な機会をくださった京都大学の寺田先生、NASA Ames Research Center でお世話になった先生方に心より感謝申し上げます。

2.3.9. NASA Johnson Space Center での体験実習

実施日：2025 年 1 月 23-30 日

実施場所：アメリカテキサス州ヒューストン、NASA Johnson Space Center

参加学生を募集したところ、22 名からの応募があり、4 名の学生を選抜した。訪問日までの間に、zoom を用いて、英語での自己紹介発表の練習を複数回実施し、訪問のための準備をした。

実習 1 日目に、入構するための Visitor badge を取得し、NASA Johnson Space Center へ入った。Dr. Brandon Macias の案内でラボ見学ならびに NASA 研究者からのレクチャーを受けた。Dr. Brandon Macias からは、Cardiovascular や SANS (Spaceflight Associated Neuro-ocular Syndrome) についての講義、Dr. Steven Laurie からは SANS についての講義、Dr. Jason Norcross からは船外活動 EVAn についてのレクチャー、Dr. Tim Macaulay からは神経感覚器系の研究についてのレクチャーを受けた。各研究者の研究室を訪問し、実際の実験器具や施設の見学を行った。その後、学生が英語でプレゼンを行い、NASA 研究者からアドバイスもらった。週末をはさんで、JAXA ヒューストン駐在事務所を訪問し、JAXA 職員からアルテミス計画における日本の役割について話を伺った。またフライトサージャンの伊藤先生からフライトサージャンの役割やどのようなキャリア形成をしてきたかなどお話を伺い、学生が積極的に質問を行い、議論した。実習の後半にはテキサス州ガルベστοンで開催された 2025 NASA HRP (Human Research Program) IWS に参加し、実際の研究者の発表を聞き、ポスター発表などでは学生から積極的に質問をしていた。





図 38: NASA Johnson Space Center の見学の風景。

はじめに

本実習は、文部科学省宇宙航空科学技術推進委託費の支援を受けて、「将来の有人宇宙活動を支える宇宙医学人材養成プログラムの創出」として行われている宇宙医学教育プログラムの一環として、海外の宇宙医学研究の学習を目的に、2025 年 1 月 23 日から 2 月 1 日(うち現地滞在は 1 月 24 日から 1 月 30 日)に実施された。主にはアメリカテキサス州にある NASA Johnson Space Center の研究者との交流を行い、NASA 研究者とのディスカッションを通じて宇宙医学についての知見を深めた。また、NASA Johnson Space Center 内の施設見学を行い、アメリカの宇宙分野の現場を体験することにより、今後の宇宙医学分野への考察を深めることができた。

本レポートでは、実習の内容および実習によって学んだことを報告する。また最後には簡単ではあるが所感として実習生が何を学んだかの感想を記載する。

開催概要

日時: 2025 年 1 月 23 日から 2025 年 2 月 1 日(うち現地滞在は 1 月 24 日から 1 月 30 日)

場所: アメリカ合衆国テキサス州ヒューストン Johnson Space Center 周辺

参加学生: 藤田櫻子、小矢円花、横関悠平、中山大河

引率: 寺田昌弘先生(京都大学)、田中邦彦先生(岐阜医療科学大学)

主な実習内容

- NASA Johnson Space Center 構内での研究者 4 名による講演(講演内容)
 - Dr. Brandon Macias (Cardiovascular)
 - Dr. Steven Laurie (SANS)
 - Dr. Jason Norcross (EVA)
 - Dr. Tim Macaulay (Neurovestibular)
- NASA Johnson Space Center 構内の Human Research ラボ見学
- NASA 研究者に向けたプレゼンテーション(学生発表)
- Space Center Houston (JSC Visitor Center) の見学
- JAXA ヒューストン駐在員事務所の訪問
 - 伊藤恵梨先生(JAXA フライトサーजन)による講演
- Houston Museum of Natural Science の見学
- 2025 NASA HRP IWS (NASA Human Research Program Investigator's workshop) の参加
- 市内見学(MD Anderson Cancer Center 訪問、港町ケマ訪問)

開催日程(実習スケジュール)

1月23日	木	移動日
1月24日	金	ラボ見学・レクチャー・ディスカッション@NASA JSC(制限エリア内)
1月25日	土	JSC Visitor Center 見学①、市内見学
1月26日	日	JSC Visitor Center 見学②、市内見学
1月27日	月	JAXAヒューストン駐在員事務所訪問、JSC Visitor Center 見学③、市内見学
1月28日	火	2025 NASA HRP IWS参加①、HMNS見学(Free Tuesday Night)
1月29日	水	2025 NASA HRP IWS参加②
1月30日	木	2025 NASA HRP IWS参加③
1月31日	金	移動日
2月1日	土	移動日

● NASA Johnson Space Center 構内での研究者 4 名による講演(講演内容)

本実習では、田中先生の旧知のブランドン先生をはじめ、NASA Johnson Space Center で宇宙医学の最前線の研究をされている 4 名の NASA 研究者からレクチャーを受ける機会に恵まれた。また、本講演は NASA Johnson Space Center 内で行われ、各個人専用のバッジ実習約 3 ヶ月前から申し込み当日発行し、制限区域内に特別に立ち入ることが許された。加えて、各研究者の講演後には質疑応答を通じてディスカッションをすることも許された。NASA の内部にいるからこそ、例えば宇宙飛行士へのアクセスの良さを活かした研究などが行われていたのが印象的であった。



図 39: 講演の様子(ブランドン先生)、NASA Johnson Space Center 研究棟建物内にて。

○ Dr. Brandon Macias (Cardiovascular)

ブランドン先生は、Cardiovascular(心臓循環器系)の研究者で、宇宙医学全般の最新トピックを含めたご講演であった。宇宙に行くと微小重力環境になるので、地上では下肢方向に分布する血液が相対的に上部(頭部方向)に移行することが知られている。その現象を Fluid Shift と呼び、それによる静脈環流量の増加により心臓に負荷がかかったり、血液の鬱滞が生じたりすることがある。過去には宇宙飛行士が閉塞性内頸静脈血栓を生じたことも報告されている。ブランドン先生は Fluid Shift を地上で模擬するような実験(心臓に負荷をかけるような実験)を行っていて、その最新のデータも共有していただいた。また、血液の鬱滞に関しては、頸部(内頸静脈)に対して、エコー(超音波)などを用いて解析を行っていた。さらに、Fluid Shift による影響を最小限に抑えるためのカウンターメジャーを考えることもとても大切で、減圧スーツを開発したり、下腿に装着するカフを開発したり、企業とコラボレーションしながら取り組まれているのが印象的であった。また、後述するスティーブン先生のご専門の SANS についての研究も共同で行っていて、宇宙空間に実際に持っていけるポータブルの機器も開発されていた。



図 40: SANS リスクのため、ISS で眼底検査を行う宇宙飛行士の様子(NASA ホームページより)。

0 Dr. Steven Laurie (SANS)

宇宙滞在を経験した宇宙飛行士が、視神経乳頭のむくみ、眼球の扁平化、網脈絡膜のひだ形成、視神経の腫れ、視力の全般的な変化を経験することが知られている。その宇宙飛行士が経験する眼球の形態の変化の総称を SANS (Space Flight-associated Neuro-ocular Syndrome) と呼ぶ。スティーブン先生は SANS の専門家で、SANS に関する初歩的な知識から、研究の最先端までとても丁寧に説明していただいた。全ての宇宙飛行士が SANS を経験するわけではないので、その兆候を早い段階に気が付くのが寛容になってくる。眼底のスキャンシステムを導入し、スクリーニング的に宇宙飛行士の目の状態を確認することにより、視神経乳頭付近の若干の浮腫をキャッチすることが大切であることを見出した。また、眼底検査に関しては、実際に宇宙飛行士に対する指導も行っていた。加えて、脳脊髄圧が微小重力環境（詳しくは地球帰還後の宇宙飛行士）では亢進するという研究もあり、とても興味深く拝聴した。また、GLP1 阻害薬を使った内科的アプローチによる対策も検討されていた。

0 Dr. Jason Norcross (EVA)

ジェイソン先生は、船外活動 EVA (Extravehicular Activity) の専門家で、EVA について網羅的なレクチャーを行なっていただいた。宇宙服に必要な条件や開発の難しさを丁寧に説明してくださった。研究の一環で実際に宇宙服を着用して、訓練のようなものを行ったようであるが、宇宙服開発には精神的な要素も絡んでいると仰っていたのは、非常に意外だった。というのも、宇宙服には搭載できる飲水量が決まっていて、決められた時間で脱水などを防ぐためにバランスよく水分補給することが求められる。ただ、人間は水が枯渇することが怖く、序盤は飲水を我慢してしまい、結局脱水傾向となり、蓋を開けてみたら、スーツに搭載された飲水を全然消費していなかったというような具合である。また、生命維持システム LSS (Life Support System) についても講義していただいた。加えて、360 度方向に自由に動くことができるトレッドミルを使った、宇宙服の歩行シミュレーションも研究されていた。また、実際の宇宙飛行士を被験者とした研究も盛んに行っているのが印象的であった。

0 Dr. Tim Macaulay (Neurovestibular)

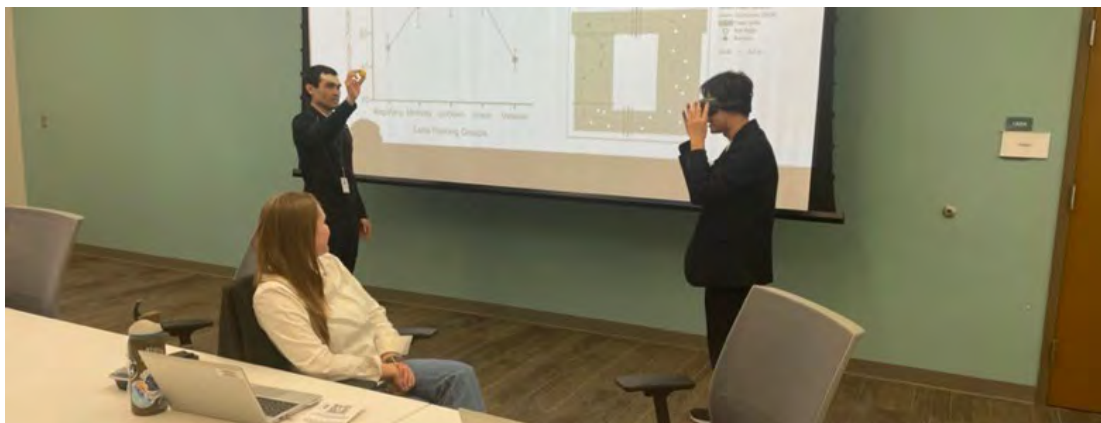


図 41: 実習生が視覚、聴覚などの感覚を混乱させる特殊ゴーグルをつけて、キャッチボールをしている様子。

宇宙に行った時に体に最初にかかる変化として知られているのは前庭神経系の変化である。具体的には宇宙酔いと呼ばれるような現象で、諸説あるが、重力刺激がなくなることにより、感覚器系が混乱し、酔いを生じるとされる。この酔いは宇宙飛行士の能力を甚大に低下させることが知られ、カウンターメジャーの開発が急務であ

る。ティム先生は神経感覚器系の専門家で、宇宙に行った時、あるいは宇宙から戻ってきた時の感覚の適応について研究されていた。もちろん宇宙飛行士を被験者とした研究も行っているが、視覚、聴覚を混乱させる特殊ゴーグルや深部感覚を混乱させるマットなどを開発して、その感覚の変化に対する人間の適応を調べる模擬実験を開発していた。また、対策としてはタブレット端末を使った感覚適応マシンの開発に加え、ムーブメントを伴うローバー着陸シミュレータも作成し、最先端の研究が行われていた。

● NASA Johnson Space Center 構内の Human Research ラボ見学

前述の講義の後には、それぞれの研究者にラボを案内していただいた。それらは、宇宙飛行士が実際に被験者として研究に参加する場所であり、普段は絶対に立ち入ることの許されない場所である。非常に貴重な体験をすることができた。

○ Cardiovascular Laboratory



図 42: ブランドン先生より心臓循環器系の研究室について説明を受けている様子。

ブランドン先生には、心臓循環器系のラボを案内していただいた。実際の実験機器や実際のデータを使って、研究の内容を説明していただいた。あらゆる心臓循環器に関わる知見のため、ロシア製のスーツを使った研究もなされていたのが印象的であった。ただどれも存在している実験機器は実際の臨床現場で使われる眼底検査の医療機器で、他にも超音波検査、視野検査装置も日本の病院でも見かけられるようなものであった。

○ Neurovestibular Laboratory



図 43: 宇宙飛行士が研究あるいは訓練で使用する感覚器系のテストのための障害物を体験している実習生。

ティム先生には、神経感覚器系のラボを案内していただいた。実際に宇宙飛行士が飛行前と飛行後で検査を行う装置などを実際に体験させていただき、とても良い経験になった。言葉で表すのは非常に難しいが、床がふわふわしていて、通常の健常人でもとても混乱するものであった。カウンターメジャーとして開発していた訓練機器もとても大規模なもので驚いた。

○ EVA Laboratory

EVA、船外活動、宇宙服のラボは、ザ宇宙ラボという見た目のラボであった。宇宙服は人の体型に合わせて作成すること、医学と工学を融合することがとても肝要であり、それを叶えるための 3D スキャニングシステムがあった。

● NASA 研究者に向けたプレゼンテーション(学生発表)

講義の後には参加学生それぞれによる自己紹介を兼ねたショートプレゼンテーションを行った。実習生それぞれが出国前に自己紹介プレゼンと NASA の研究者に聞きたい項目を準備して本番に臨んだ。終了後にはブランドン先生より修了証をいただいた。

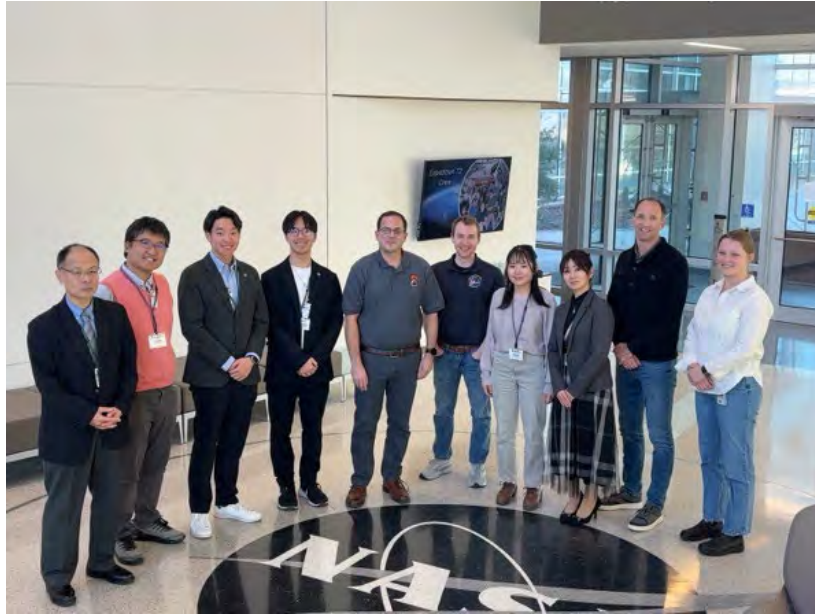


図 44: 実習初日にお世話になった先生方とともに。

o 参加学生 1

英語での発表には最後まで自信がなかったのですが、親身にアドバイスをいただけたことが大変有難かったです。具体的には、NASA 内でデンタルデータを扱う研究室の情報は得られませんでした。JSC に骨代謝関連のラボがあること、自身の研究構想に関する助言をいただけたことが有意義でした。特に、宇宙飛行士の骨喪失問題については、現在機械を使ったトレーニングで対処していますが、今後月面基地や民間のステーションまでこれらを運ぶことが可能かどうか分からないというコメントをいただき、自身が研究で扱おうとしていた薬剤投与面からの予防・治療の重要性を改めて認識しました。

o 参加学生 2

自分自身のプレゼンテーションでは、自分のバックグラウンドや宇宙医学における特に興味のある分野、宇宙医学の分野で実現したいこと、そして現在関心を持っている課題について発表しました。以下に主な内容をまとめます。

私は幼少期より宇宙や天文学に強い興味を抱き、特に太陽系外惑星の探査や地球外生命体の探索に魅了されてきました。同時に、生命の仕組みや遺伝子、脳・神経系などにも関心があり、これが大学で医学部に進学するきっかけとなりました。しかし、大学進学後も宇宙への興味は衰えることなく、医学と宇宙を結びつける研究分野を模索する中で、宇宙医学に出会いました。

現在、大学では神経系の研究室に所属し、シナプスの分子レベルでの機能を解明する研究に取り組んでいます。光遺伝学の技術を活用し、光刺激によって活性化する酵素をポストシナプスに特異的に局在させ、シナプス可塑性のメカニズムに迫る研究を行っています。この経験を通じて、神経系における基礎的な理解が深まり、さらに宇宙環境が神経系に与える影響にも興味を持つようになりました。

このような研究をしていることもあり、宇宙医学の中でも、神経系への影響に特に関心があります。これまで、宇宙環境が心血管系や筋骨格系に及ぼす影響は多く研究されてきましたが、神経系に関しては未解明な部分が多く残されています。その中でも、長期的な宇宙滞在が神経系に与える影響に強い興味を持っています。たと

例えば、Spaceflight Associated Neuro-Ocular Syndrome (SANS) や神経変性疾患のリスク増加などの問題は、宇宙開発の進展とともに重要性が増すと考えています。

また、健康な人だけでなく、疾患を持つ人々が宇宙環境でどのような影響を受けるのかも興味深いテーマです。今後、宇宙旅行が一般の人々にとって身近になるにつれ、現状では宇宙飛行が禁忌とされる疾患を持つ人々への対応が求められると思います。たとえば、乗り物酔いを起こしやすい人、視覚に問題を抱える人、また神経変性疾患のリスクを持つ人々が宇宙環境でどのような影響を受けるのか、研究を進める必要があります。特に、地上では一般的な疾患（いわゆる common disease）を持つ人々への影響は、今後の宇宙開発の大きな課題となると考えています。

将来的に私は、神経系の宇宙環境への適応メカニズムを解明し、疾患を持つ人々、特に神経系疾患を抱える人が宇宙飛行を可能にするための研究に携わりたいと考えています。その目標のために、現在関心を持っている課題として、宇宙環境で神経系に起こる変化をどのように調べるのか、宇宙医学における神経系の研究で最も重要な課題は何か、そして自分自身がこの分野でどのように貢献できるかを深く追求したいと考えています。

o 参加学生 3

NASA の研究者の皆さまへの自己プレゼンは、事前に複数回の練習会を行い、本番に挑みました。私が専門として重きを置いている「環境制御・生命維持システム (ECLSS)」および「宇宙開発広報（人文社会科学からのアプローチ）」について、初対面の専門家たちに、慣れない英語、限られた時間でいかに伝えるかという点に苦慮しました。先生方から、自分の専攻である化学システム工学や、興味のルーツなどを組み合わせて表現するようにご助言をいただき、プレゼンテーションを形にすることができました。また、プレゼン後には発表内で触れた「今回の実習で知りたいこと」の一つである、NASA における宇宙医学 (physician) と ECLSS 開発 (engineer) の連携についてディスカッションすることができ、有意義なプレゼンテーションとなりました。

o 参加学生 4

私のプレゼンテーションでは 3 枚の写真を使って自己紹介を行った。最初の 2 枚は自分の私生活のことに関することから、どうして医学部に進学したか、どうして宇宙に興味を持ったのかまで幅広く説明することを心がけた。また、最後の 1 枚では自分の研究内容について紹介した。自分は大学の宇宙航空医学研究室に MD-PhD コースの一環として所属し、研究活動に従事している。研究テーマは「模擬微小重力下のヒト臍帯静脈内皮細胞におけるフォン・ヴィレブランド因子に関する機能形態変化の解析」である。ちょうどブランドン先生のご専門は心臓循環器系であり、自分と同じく、宇宙飛行士の微小重力環境下での血栓傾向に注目されていた。地上での血栓傾向においてはウィルヒョウの三徴（血流鬱滞、血管内皮障害、凝固系亢進）が知られているが、ブランドン先生が注目するのは血流鬱滞の部分、自身は凝固系亢進の要素であり、共通のテーマに違った側面から取り組む NASA の研究者と直接意見交換ができたことはとても貴重な経験となった。また、自分は 3D クリノスタットを使用した模擬微小重力実験に若干の限界を感じ、その結果の解釈に難渋していたので、その疑問をそのままぶつけた。ブランドン先生たちも宇宙飛行士を被験者とした研究ができるとはいえ、地上でのベッドティルティングシステムを使った模擬実験も同時に行っていて、やはり宇宙環境という地球では再現の難しい環境における人体の変化を研究する難しさに関する意見を交換し、互いに共感する貴重な機会となった。また、他の研究者からはフォン・ヴィレブランド因子の増加による血栓傾向は、炎症に類似するのではないかと指摘もあり、今後の研究発展への新しい視点を提供してもらった。

● Space Center Houston(JSC Visitor Center)の見学

Johnson Space Center の隣には、一般の方も入ることができるビジターセンター(Space Center Houston)がある。ここは観光地的な要素が強く、2 日目以降はそちらの施設を見学することができた。初日にもらったバッジで出入りが自由だったので、2 日目、3 日目、4 日目と連続で訪れ余すことなく堪能できた。とても広い館内で、宇宙好きにはたまらない多くの貴重な展示やスリリングなアクティビティがあった。

○ Shuttle Carrier Aircraft(シャトル輸送機)

シャトル輸送機とは、スペースシャトルを輸送するために、NASA が改造したボーイング 747 航空機のことである。2 機存在するうちの 1 機が Space Center Houston に展示されており、実際に Space Shuttle の実寸大模型 Independence が上に載っている。シャトル輸送機とスペースシャトルの実寸大模型の中には実際に入ることができて、シャトル輸送機の開発に関する歴史や、実際の飛行の様子、試作の模型などが展示されていた。スペースシャトル Independence の中には実際のコックピットをはじめ実際のシャトルの様子が再現されていて、カナダアームなども格納されていた。

○ Apollo mission(アポロ計画)

アポロ計画は、NASA による人類初の月への有人宇宙飛行計画である。1961 年から 1972 年にかけて実施され、全 6 回の有人月面着陸に成功した。そのアポロ計画に関する展示も充実していて、実際の宇宙船やアポロ着陸船、月面ローバーの実寸大の模型や、実際の月の様子、地上での月サンプルの解析の様子、本物の月の石などの展示が充実していた。

○ Artemis program(アルテミス計画)

アルテミス計画は、NASA が出資する有人宇宙飛行(月面着陸)計画である。上記のアポロ計画では人類初の月面着陸を成し遂げ、再び月へ「Back to the moon」と題して、数年以内には月に再び人類が降り立つことになる。日本もこの計画に参画し、アメリカ政府との間で月面に降り立つ初めてのアメリカ人以外の外国人は日本人となることへの確約を取り付けた。スペースセンターヒューストンには、このアルテミス計画に関する展示も充実していて、実際の計画の詳細や、アルテミス計画に参画する各国の機関や企業の情報なども知ることができた。実際にアルテミス計画に参画する宇宙飛行士に質問できるコーナーもあり、一応「怖くありませんか？」と質問してみた。いつか回答が返ってくることを期待したい。

○ Skylab(スカイラブ)

スカイラブは、1973 年から 1979 年まで地球を周回した、アメリカ合衆国が初めて打ち上げた宇宙ステーションである。Space Center Houston にはスカイラブの実寸大の模型があり、実際に中に入り当時の設備などを体感することができた。まず、その大きさに驚かされたが、中にはトイレやベッド、シャワーなどの設備があたかも高級ホテルのように充実していた。中でも、宇宙酔いに代表される感覚器系の異常に関するテストを行う、Rotating Vestibular Test Chair が実際に搭載されていたのがとても印象的であった。

○ George W.S. Abbey Rocket Park(サターン V ロケット)

サターン V ロケットが存在するロケットパークは、スペースセンターヒューストンからは少し離れていて、専用のトラムに乗ってその場所に向かう。道中は広大な Johnson Space Center の敷地が広がっていて、野生の鹿やバッファロー(大学との共同研究用)、場合によってはアリゲーターなどが生息しているそう。到着するとそこには巨大な格納庫が存在し、中には、アポロ計画の月飛行全てで使用された、直径約 10m、全高約 110m を誇る超大型液体燃料ロケット Saturn V ロケットの実物を見学することができた。各アポロ計画の概要を記述した説明文が Saturn V を格納する倉庫を覆い尽くすように展示されており、米国の宇宙開発の壮大さを実感させられた。また、アポロ計画中に犠牲になった命に関する記載もあり、今日の宇宙開発はその犠牲の上にあることを改めて感じる機会となった。加えて、倉庫の周辺にはアメリカ初の有人宇宙飛行を行ったロケットなどの展示もあった。

○ 宇宙飛行士訓練施設

宇宙飛行士訓練施設もスペースセンターヒューストンから少し離れた JSC の構内に存在し、専用のトラムで片道 10 分ほどかけて向かう。建物内には国際宇宙ステーション(ISS)をはじめ、世界各国あらゆる国の宇宙ステーションモジュール、宇宙船のモックアップがあり、実際に宇宙飛行士がここで訓練していることを考えると、いくら時間があっても見飽きない施設であった。中には最近話題になったアメリカボーイング社のスターライナーのモックアップもあり、宇宙好きにはたまらないものであった。宇宙飛行士になっていつかここに帰って来たいとさえ思わせた。

○ Historic Apollo Mission Control Center(旧ミッションコントロールセンター)



図 45: ヒストリックミッションコントロールセンターにて。

アポロ計画で実際に使用されたミッションコントロールセンターの見学は大人気で、私たちも 1 日目では満員御礼で見学が叶わず、2 日目は悪天候により中止になったので、3 日目にして初めて見学することが許された。この施設も専用トラムに乗って向かう。建物は日本でいう重要文化財に指定されていて、荷物を持って入ることは許されず、少し緊張した面持ちで向かった。ミッションコントロールセンターでは、これも当時のものの本物であるが、

センター後方に存在する見学席に着席し、映画のような具合で実際の映像とともにアポロ計画を管制している様子を見学することができた。時間にして 15 分ほどであったが、月面に着陸して、月面に人が降り、当時の米国大統領が宇宙飛行士と電話をして、地球に戻ってくるまでの管制の様子が、実際の画面に、実際の映像とともに映し出されながら、臨場感があり楽しむことができた。タバコの吸い殻に至るまで当時の様子が再現されていて、不思議な体験であった。アメリカの成し遂げた月面着陸が全くのフェイクニュースなのではないかと思わせるくらいには、信じられない、アメリカの底力を感じる経験となった。

● JAXA ヒューストン駐在員事務所の訪問

Johnson Space Center から徒歩 5 分ほどの場所、閑静なオフィスビルディングの一角に日本の宇宙航空研究開発機構(JAXA)のヒューストン駐在員事務所があった。JAXA の皆様のご厚意により、JAXA 内の会議室で駐在員の田口先生と、JAXA フライトサージャンの伊藤先生のレクチャーを受けることができた。田口先生からは、JAXA がヒューストンでどのような仕事をしているのか、アルテミス計画に関する日本の位置付けと役割、ゲートウェイ計画における日本の役割など、日本のこれからの宇宙参画に関するポジティブなお話をお伺いすることができた。直近では大西宇宙飛行士の ISS ミッションが控えていて、とても興味深い話も拝聴することができた。

○ 伊藤恵梨先生(JAXA フライトサージャン)による講演

伊藤先生は、整形外科の専門医で、数年前まではスポーツドクターとして、東京オリンピックの女子バスケットボールチームの専属として活躍されていた。その後 JAXA に転職し、現在は Johnson Space Center で JAXA フライトサージャンとして活躍されている。伊藤先生からは、フライトサージャンがどのような仕事であるのか、どのようなモチベーションで日々の業務を行っているのか、そもそもどうしてフライトサージャンになったのか、などについて非常に興味深い話をお伺いすることができた。中でも印象的であったのは、「幸運の女神には前髪しかない」と最後に仰っていたことで、チャンスは訪れたそのときに掴まなければならない、後悔しているようじゃもう遅いということで、将来宇宙に関わるにしても関わらないにしても、人生の糧となる教訓を得ることができた。また、講演後は質疑応答とディスカッション、交流の機会ももち、貴重な意見交換をすることができた。巷では日本の宇宙参画はあまりポジティブな印象を受けないが、現場で働かれている先生たちの目はキラキラしていて、学生ながらとても心強く感じた。



図 45: JAXA でお世話になった田口先生と伊藤先生とともに。

● Houston Museum of Natural Science の見学

Johnson Space Center から車で 30 分強ほど離れたヒューストン市内ダウンタウンの近くにヒューストン自然科学博物館(Houston Museum of Natural Science)が存在する。公式 HP によると、ヒューストン自然科学博物館は、科学がすべての人の生活を向上させることができるという考えのもとに 1909 年に設立された、アメリカの中でも有数の歴史ある巨大な博物館である。火曜日の夜は入場料が無料になる Tuesday Free Night で、私たちもその恵みに預かることができた。博物館は現地の家族連れやカップルでとても賑わっていた。HMNS は日本では想像できないくらい広く、期間限定の展示も含めればおよそ 20 種類の展示があり、その 1 つ 1 つが日本の一般的な博物館 1 つ分ほどのボリュームがあった。到底火曜日の夜で全部回ることはできず、一部分ではあったがとても楽しむことができた。中でも恐竜に関する展示は印象的で、展示を進むごとに時代も進むような展示方式でその世界、時代に没入して楽しむことができた。また、宇宙に関する展示もあり、宇宙医学実習としては宇宙に関する勉強もできたので大満足である。プラネタリウムもあったので、また訪れる機会があったら一日を潰すつもりで計画したいと思う。

● 2025 NASA HRP IWS(NASA Human Research Program Investigator's workshop)の参加

NASA ヒューマンリサーチプログラム(HRP)は、NASA が宇宙計画の重点を再び探査に定めたことを受けて、2005 年にジョンソン宇宙センターに設立された。NASA の有人研究への投資は、将来の探査ミッションを支援するために、人間の健康とパフォーマンスに対する最大のリスクを調査し、軽減することに向けられた。NASA HRP IWS は、HRP の研究者ワークショップ(IWS)で、年に 1 回開催される年次大会・年次学会のようなもの、HRP 資金による研究および技術タスクの進捗状況と結果をプログラム管理部門に報告する主な場であり、研究者全員の間で分野を超えた交流を目的としている。今年の会議は 3 日半にわたって開催され、2025 年 1 月 28 日から 1 月 31 日まで、ガルベストーンアイランドコンベンションセンターで開催された。ガルベストーンは JSC から車で 30 分ほどさらに南東に向かった場所、メキシコ湾(アメリカ湾)に面するリゾート地である。期間中は濃い霧がかかっていて、なかなか景色を楽しむことはできなかったが、3 月ごろになって暖かくなると多くの観光客で賑わうそうである。

学会は 5 会場以上の複数の会場で同時に行われ、非常に規模の大きいものであった。ホワイエのような場所では参加者がコーヒーを片手にディスカッションをしたり旧友との再会を楽しんだりと非常に和気藹々とした雰囲気広がっていた。引率の寺田先生や田中先生、現地で世話になった日本大学耳鼻咽喉科の野村先生も例外ではなく、古い友人や NASA の知り合いなどとの交流を楽しんでいる姿がとても印象的で、羨ましく思えた。日本の学会も格式高く良いと思うが、HRP IWS はどちらかというともっとカジュアルで、お祭りのような雰囲気さえあった。

学会は HRP に関連する様々な分野に関するシンポジウムで構成されていて、医学に始まり、生物学、化学、工学、人工知能、インターネットに至るまで、どれも本当に興味深く、どれも聞きたい、どのシンポジウムを聞きに行くかはかなり頭を悩ませた。また、初日の Johnson Space Center で世話になったブランドン先生たちにも再会して、交流を深めることができた。

宇宙分野の最先端で活躍されている NASA の関係者や、もはや宇宙飛行士に至るまでが、その辺にフラットいて、とても身近な環境で、自分から話しかけに行ったり、質問したりして、多くの意見交換ができたのは非常に貴重な経験となった。



図 46: RP IWS 初日第一会場の様子。

0 ポスターセッション

学会にはポスターセッションもあり、NASA に限らず多くの大学や研究機関がポスターを出していた。中には日本人の研究者や大学院生の展示もあり非常に興味深く見学させていただいた。また、会場奥には高校生を中心に大学生も参加している NASA 出資の宇宙医学開発プロジェクト展示があったそれらは、NASA がアメリカ全国の高校に対して、資金を提供し、自分たち自身で、宇宙での医学に関する問題を解決するプランを考え計画し、それを実行し、製品化して実際に発表しているものである。たとえば、宇宙における全自動の胸骨圧迫装置や、残薬の管理アプリケーション、宇宙で使える耳鏡、宇宙で使える 3D プリント製の手術器具、メンタルケア用の VR ゴーグル、宇宙で使える点滴装置など、非常に多岐にわたる展示があり、どれもとても興味深かった。なんといってもそれらは高校生が考えているという事実がとても驚きであった。現地の学生と交流するとても良い機会であった。

多くの研究者に直接質問ができる好機でもあり、自分の専門と同じような研究をしている人と交流をしている実習生もいた。



図 47: HRP IWS ポスターセッションの様子。

○ NASA 宇宙飛行士 Dr. Michael Barratt 特別講演

学会 3 日目には NASA 宇宙飛行士のマイケル・バラットさんの特別講演セッションがあった。マイケル・バラットは 2000 年に NASA 宇宙飛行士に選抜され、元々はフライトサージャンであった。内科および航空宇宙医学の認定を受けており、2 回の宇宙飛行に参加している。2009 年、バラット博士は第 19/20 次長期滞在のフライトエンジニアを務めた。ベテラン宇宙飛行士の貫禄で、ユーモアのある講演は開始後すぐに観客を虜にし、講演後も質問や写真を求めて長蛇の列ができていた。講演後夕方には、ホワイエにいらっしゃるマイケル宇宙飛行士を見つけて、実習生みんなで質問に行き、NASA 宇宙飛行士とも交流し、意見交換することができた。

○ NASA Ames Research Center の研究者との交流



図 48: NASA Ames Research Center の研究者とともに。

学会 3 日目のランチタイムはカリフォルニア州にある NASA Ames Research Center の研究者と交流する機会を持った。彼らも今回の HRP IWS のためにはるばるガルベストンまでやってきていた。学会場から歩いて 5 分くらいの、地元では大人気のレンフォレストカフェでランチをいただいた。NASA Ames Research Center は引率の寺田先生がポスドクとして留学されていた場所で、有人宇宙開発の JSC とは異なり、遺伝子やマウスを使った基礎研究を行っているラボとして知られている。昨年秋に別の宇宙医学実習で訪れた場所でもある。個人的には、自分の研究は細胞を使ったウェットな実験なので、今回の JSC での実際の人間を使った大胆とも言える研究に少し疑問を感じることもあり、基礎研究の大切さをシェアするととても良い機会となった。ジョシュ先生の研究室には、インドなど世界各国からたくさんの研究者が集結していて、とても仲良く皆の笑顔が溢れる楽しい雰囲気がとても印象的だった。

● 市内見学(MD Anderson Cancer Center 訪問、港町ケマ訪問)

寺田先生や田中先生の計らいもあり、講演や学会、ラボ見学の合間を縫って、休日なども活用して市内見学することも許された。JCS 周辺に昔からあり、歴代の宇宙飛行士が訪れた日本食料理店やイタリアンレストランなどで食事をしたり、現地のショッピングモールやブックストアを訪れたりした。

○ MD Anderson Cancer Center

ヒューストンのダウンタウンすぐ隣には世界的に有名な MD アンダーソンがんセンターがある。テキサス大学 MD アンダーソンがんセンターは、米国テキサス州ヒューストンにあるがんの研究・治療・予防を専門とする医療機関で、世界的に高い評価を受けており、海外からの患者も積極的に受け入れている。がん撲滅を使命と掲げ、患者さんの評価、ケア、治療、がん管理をはじめ、がんの研究、教育、予防も含む包括的ながん患者医療サービスを専門とする、世界で最も高い評価を受けているがんセンターの 1 つである。実習後半の午後に、病院内を見学したわけではないが、病院周辺を散策することができた。日本では考えられないくらい大きな建物が多く聳え立っていて、その全てがどれもが病院であることに驚かされた。周辺一帯全てがメディカルディストリクトで、ベイラー医科大学や看護学校、テキサス小児病院などもあり、アメリカの世界的に有名な医療特区の規模感に驚かされた。すぐ隣には日本庭園も備えた閑静な公園があり、束の間の自然も感じることもできた。

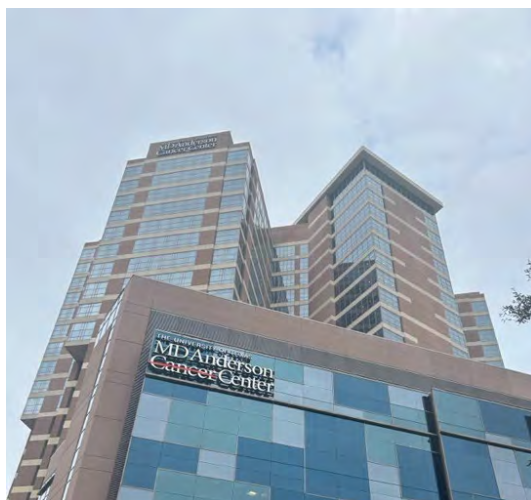


図 49: MD Anderson Cancer Center Main Building。

○ 港町ケマ

JCS から車で 15 分ほど海側に走ったところにケマという港町も存在する。ケマー・ボードウォークという名前が有名かと思うが、周辺にはボートの停泊場や灯台、遊園地など、映画に出てきそうなアメリカの昔ながらの港町が広がっている。とても景色が綺麗で、夕日と共に楽しむことができた。シーフードも有名で、今回は叶わなかったが、次回はぜひとも堪能したい。

所感

参加学生 1（医学研究科大学院博士課程 1 年）

今回の Johnson Space Center 実習では、主に3箇所ですべて貴重な経験をさせていただきました。私は普段歯科医として勤務しながら、大学院生として宇宙医学の研究を行っている研究室に所属しています。自身の研究の方向性や歯科医師としてのキャリアを宇宙に関連づけていきたいと考えているものの、歯科に関するデータは少なく、未開拓な分野であることを漠然と認識していました。

今回の実習では、文献では一部しか知ることができなかった歯科に関する情報の詳細や、最前線の研究について知りたくて応募し、参加する機会をいただきました。

1. Johnson Space Center での研究見学とプレゼンテーション

初日は Johnson Space Center 内の実験施設を見学し、Brandon 博士らの研究についてご紹介いただいた後、自身の研究をプレゼンする機会をいただきました。英語での発表には最後まで自信がなかったのですが、親身にアドバイスをいただけたことが大変有難かったです。

具体的には、NASA 内でデンタルデータを扱う研究室の情報は得られませんでした。JSC に骨代謝関連のラボがあること、自身の研究構想に関する助言をいただけたことが有意義でした。特に、宇宙飛行士の骨喪失問題については、現在機械を使ったトレーニングで対処していますが、今後月面基地や民間のステーションまでこれらを運ぶことが可能かどうか分からないというコメントをいただき、自身が研究で扱おうとしていた薬剤投与面からの予防・治療の重要性を改めて認識しました。

2. JAXA 駐在員事務所でのディスカッション

土日 2 日間の Houston 市内散策を挟み、週明けは JAXA 駐在員事務所にて、職員の方やフライトサーजनの伊藤恵梨先生とお話する機会をいただきました。少人数体制のディスカッションだったため、JAXA「きぼう」利用テーマに関する文献を調査していた段階から聞きたかった内容や、当日講演いただいた内容についても詳しく掘り下げてお話を伺うことができ、収穫の多い時間となりました。

3. Human Research Program (HRP) での学会参加

後半の 3 日間は、NASA 主催の HRP 学会に参加し、宇宙飛行士の健康に関する多様な研究について学びました。先述の通り、英語での議論に不安がありましたが、事前に質問を整理することで受け身の姿勢を少し脱却し、細かい点まで質問することができました。しかしながら、やはり瞬発的な議論には課題を感じたため、今後はリスニングや会話力の向上に取り組みたいと考えています。幸い、一部の研究者と連絡先を交換させていただいたため、今後も交流を深めたいです。

最終日には宇宙飛行士の Michael Reed Barratt 氏の講演終了後、個人的に質問をする機会を頂きました。海外の飛行士に直接話を聞いたことは予想外の経験で、今後必要とされる歯科医療の役割についてお話を伺うことができました。

また日本の学会の違いとして感じたのは、この学会ではそれぞれの研究チームのロゴがステッカーとして配布されており、名札にも専門分野を示すシールを貼ることで、言葉を交わす前から情報を伝える工夫がされていました。国内学会ではあまり見かけない手法でしたが、非常に効果的だと感じました。

初めて参加する海外学会がこの学会であったことは、とても印象深く良い経験となりました。

感謝と今後に向けて

実習全体の体感として、未踏の地へ赴き予想もしなかった発見や驚きを得たというよりは、文献で得た情報によって漠然としたイメージを構築していたところに、具体的な情報や私なりの見方が加わり、宇宙医学への関わり方について解像度が上がったと感じました。

また、実習を通じて知り合った同期参加者との交流も大きな刺激となりました。宇宙医学における横のつながりが少なかったため、私にとって非常に良い刺激となり、貴重な出会いとなりました。皆さんそれぞれフィールドが異なりますが、本当に素敵な方達で、学ぶことが多くありました。このメンバーで旅ができたことも嬉しい経験となりました。

最後に、このような貴重な機会をくださった京都大学の寺田先生、岐阜医療科学大学の田中先生、旅先でお世話になった先生方に心より感謝申し上げます。今回の経験と皆様とのご縁を大切にしながら、今後のキャリアに繋げていこうと思います。ありがとうございました。

参加学生 2（医学部医学科 3 年・学部学生）

今回の実習では、NASA の研究者の方々から直接講義を受けたり質問をしたりできる機会があり、大変貴重な経験となりました。特に、自分の研究分野である神経系について、SANS や宇宙酔いの専門家から最新の知見を直接聴くことができたのは非常に印象的でした。SANS に関しては、発症には遺伝的背景や解剖学的な個人差が影響することが近年の研究で明らかになりつつあるとのことで、なぜそのような個人差が生まれるのか質問したところ、まだメカニズムが十分解明されていないとのことでした。また、現在の研究では地上データを中心に分析が行われているため、飛行中のデータ取得が課題となっているというお話も伺いました。これらのお話を通じ、宇宙開発が進む中で、個人差が生まれるメカニズムの解明や飛行中データ取得の技術開発が不可欠であることを強く感じました。さらに、ラボ見学では、実際に研究者の方々が研究されている現場を訪れ、研究がどのように進められているのか、その一端を垣間見ることができました。

また、Space Center Houston では展示やトラムツアーを通して、宇宙開発の歴史や規模を体感し、アメリカの宇宙開発の壮大さに圧倒されました。JAXA 駐在員事務所では、駐在員の方々の研究やフライトサーजनの方のお話を伺い、自分が医学を学んでいる身として深く共感する内容も多く、大いに刺激を受けました。

HRP IWS では、Human Research に関する多種多様な最先端の研究に触れることができ、非常に刺激的でした。ポスターセッションでは、宇宙医学の幅広いテーマについて、例えば幹細胞の宇宙環境下での培養、宇宙飛行による神経系や感覚運動系の適応、宇宙放射線が脳や眼に与える影響、宇宙での睡眠やストレスの研究、筋骨格系や免疫系への影響を調べる研究など、非常に多岐にわたる研究を目の当たりにしました。研究の詳細は様々ですが、一つ一つがユニークで、どれも非常に興味深いものでした。また、研究者の方と直接お話をすることもでき、刺激を受けると同時に、新たな視点を得ることができ、自分の視野が確実に広がったと感じています。

今回の実習を通して感じたのは、宇宙医学はまだ未知の多い分野であり、今後さらに研究を進めるべき課題が多いということです。また、宇宙という特殊な環境を前提にした研究に取り組む際には、最初から「宇宙」だけに視野を絞らず、まずは自分の専門分野を深めることが重要だと感じました。そのうえで、自分の専門性をどのように宇宙に応用できるのか、あるいは宇宙で得た知見をどのように地上に還元できるのかを模索することが求められていると思いました。加えて、1つの分野に固執せず視野を広く持ち、柔軟に考える姿勢が宇宙医学研究において特に大切だと感じました。

今後は、宇宙と関わる意識を持ちながら、自分の専門分野をさらに深め、将来的には宇宙環境での人間の適応メカニズムを明らかにし、その成果を地球上での医療や健康維持にも活かせるような研究に貢献したいと思っています。この実習を通じて、自分自身の目指すべき方向性がより明確になったように思います。

参加学生 3（工学部化学システム工学科 3 年・学部学生）

私は今回の実習を通じて、主に二つの問いについて理解を深めることを目標としていました。一つ目は「日米の有人宇宙開発にはどのような差異があるのか」、二つ目は「専門である ECLSS の研究は、アメリカではどのように展開されているのか」という問いです。

実習では、アメリカの有人宇宙開発に関わる現場へ飛び込むことで、それらの問いに対する答えを得るだけでなく、抽象的な気づきや具体的な学びまで、多角的な知見を獲得することができました。

例えば、一つ目の問いに関しては、日米の差異をあらためて実感した一方で、共通する課題や日本ならではの特徴にも気づくことができました。渡航前に仮説として考えていた、スケールの違い（人口や予算など）や社会的な要因（文化や制度など）による有人宇宙開発の発展度合いの差は、現地での経験を通じてより具体的に確

認できました。その一方で、宇宙における QOL の向上に関する研究など、日本特有の文化が活かせる可能性があることも実感しました。

二つ目の問いについては、NASA の研究者との対話や、宇宙医学の基礎研究からミッション設計・オペレーション検討まで幅広く議論が交わされる HRP IWS への参加を通じて、多くの示唆を得ました。有人宇宙開発では、宇宙医学の研究対象である「人体」がシステムの中心にあり、そこから機器やオペレーションの設計につながっていくという点が特に印象的でした。これは、課題を解決するためには、機器とオペレーションを包括的に設計する必要があることを意味しています。ECLSS についても同様で、人間がそれをどのように運用するのかという視点を考慮に入れた開発の重要性を強く認識しました。

さらに、実際にアメリカに留学している方々から経験談を聞くことで、アメリカ留学に対する具体的なイメージを持つことができたのも、予想以上の収穫でした。また、ご引率いただいた寺田先生や田中先生とのディスカッションでは、宇宙医学研究の現状、NASA での留学経験、宇宙服の開発など幅広いテーマについてお話を伺うことができました。食事や移動の時間にも学びがあり、非常に濃密な体験となりました。

参加学生 4 (医学部医学科 4 年・学部学生)

今回の実習では、テキサスロードハウスで食べた 33 オンスの T ボーンステーキが今まで食べた人生の牛肉の中で 5 本の指に入るくらい美味しかったこと以外に、5 点の気づきがありましたので、簡単にまとめて紹介させていただきます。

1 点目は、NASA は悪い意味はなく、意外と普通だったということです。私たちが「宇宙開発においてどの国が最も進んでいると思う?」と聞かれて最初に思い浮かべるのはおそらくほとんどがアメリカでしょう。さらには、そのアメリカをそこまでの宇宙大国に引き上げたのはアメリカ航空宇宙局(NASA)であると思います。街を歩いていたら、別に宇宙とあまり関わりはないけど、NASA のロゴが入ったパーカーが売っていて、NASA はもはや神聖化していてロゴすら尊いのかかもしれません。帰国後、友達に「NASA に行ってきたよ」と言うと、大抵の場合「凄いな」と言われて若干引かれます。でも実際はそのようなことはないのです。確かに施設の警備は厳重で、入るまでのプロセスはかなり複雑でしたが、ブランドン先生をはじめ中で働かれている研究者の方々はいたって普通の方々です。別に NASA の構内は空飛ぶ車が飛んでいるわけではなく、シンプルな建物が整然と並んでいるだけです。また、ラボ内にある研究設備も見たこともない最新の実験機器というよりは、普通に日本でも見かける機械です。場合によっては日本の方が最新の機器があるかもしれません。ブランドン先生が使っているベッドティルティングシステムもおそらく日本でも再現可能です。神経系のラボで見たような障害物のコースもきっと日本のホームセンターで調達することができそうです。では、日本とアメリカ、あるいは NASA と他の機関の差を生むものは何なのでしょう。1 つには宇宙資源へのアクセスのし易さはあるでしょう。というのも私たちは宇宙飛行士に直接話を聞いたり、宇宙飛行士のデータを集めたりするようなことは簡単にはできません。ただそれだけではなく、他にはラボの雰囲気も影響していそうです。というのは、NASA の研究者と食事を共にしたり、交流したりして感じたことで、彼らは自分の研究がとても楽しそう、ラボの仲間ととても仲良しで、プライベートも充実しています。目がキラキラしているのです。決して日本のラボの雰囲気が悪いというわけではありませんが、土壌がそうさせるのかもしれません。これを常に意識しろというわけではありませんが、その違いがどのように生まれるかについて、私たちは考える必要があると思います。あと追加するならば、NASA をあまりに高貴な存在に位置付けすぎなのではないかとも言えると思います。今回の実習では NASA 主催の学会に参加する機会がありましたが、学会場では見渡す限りどこにでも NASA の研究者がいました。もちろんある程度の実力や手続きが前提に

はなりますが、名刺交換して、留学したい、NASA で働きたいとお願いすると実現できてしまいそうな気がします。「NASA はあまりに高貴な存在で、そこに出入りして宇宙を志すことは叶わない」とはなから諦めるのでは惜しいように思えました。

2 点目に、アメリカという国の宇宙産業に対する層の厚さに圧倒されました。若干 1 点目と矛盾するような感じではありますが、とは言っても NASA およびアメリカの宇宙開発、宇宙研究は日本のレベルとは桁違いです。まず関わる人数や資金が異なりますし、皆のモチベーションも全く違います。今回の学会では多岐にわたる分野について複数のシンポジウムが同時に繰り広げられていましたが、例えば SANS という、言ってしまうと現象としては極めて小さい眼の変化に対して、ものすごい数の研究者がいて、ものすごい額の研究費が投入されていて、真剣な議論が繰り広げられるわけです。これが他の分野についても等しく言えるわけで、正直これじゃあ勝てないなと思いました。また、アポロ計画に関して今回改めて学びましたが、やはりあの時代に月に行くのは、全てがフェイクニュースだと思いたくなるくらいに信じられません。宇宙大国の底力を感じました。決して宇宙を諦めるわけではないのですが、将来の自分の進路の中に宇宙を入れるかどうかを再考する機会になりました。少なくとも宇宙を志すならばアメリカには留学するべきなのでしょう。個人的には、ひとまずは地球でいいかなとも思います。

3 点目に、人を使った研究というのは結構アバウトな世界であると気が付かされました。というのも、自分は普段細胞を使った基礎医学・生理学的な研究を行っていますが、そこにおいては、分子レベルのメカニズムが重視される傾向があります。つまり、何かの現象が観察された場合は、さらにそれを探って研究を進めるのです。どうしてそれが起きたのか、Etiology が大切なのです。場合によってはマウスを使った研究も行います。しかし、今回 JSC で行われていたようなリアルの人を被験者にした研究では、とりあえずやってみて、メカニズムはよくわからないけどデータが出るということは往々にしてあるというか、それによって得られたデータは確かに立派な研究結果ではあるのです。ただ、個人的にはそのようなデータは疑問であり、どうしてそうなるのかが明確ではない点において歯痒さが残ります。これは何も宇宙に関係なく、私の専門の医学でも言えることです。医学では臨床研究というものがありますが、この治療をしてみたらよくわからないけど、生存率が良くなったみたいなのはよくあるのです。だからこそ、基礎医学などを通じた基礎研究がとても大切で、その大切さを再認識できる機会にもなりました。

4 点目に、有人宇宙医学分野においては「研究(リサーチ)vs 治療(クリニカル)」の構造が垣間見えるということです。JSC のスティーブン先生の講演で、「このデータはメディカルスクリーニングでたまたま見つけた変化なのだけど、具体的には感染などを判定するための腰椎穿刺で脳脊髄液の素性を調べた時に、たまたま脳脊髄圧が亢進していることがわかった」ということを仰っていました。つまり、クリニカルからリサーチを抽出しているプロセスです。もし自分が研究者だったら、あらゆる変化が全てデータになるわけなので、つまり自分の実績になるわけで、もう全ての変化を捉えるためにいろいろな手段を尽くしてしまいそうです。しかし、実際はそう簡単ではなく、あくまで人に影響のあることなので(時には侵襲的な検査も伴いますので)、臨床的に重要なことに重きが置かれるのも事実です。研究者としてはジレンマを感じるかもしれませんが、それは仕方のないことです。だからこそ変化としては小さくとも臨床的に意義のある SANS のようなものに多くの研究者が集まるのかもしれません。

最後に 5 点目に、今回の滞在でも「人脈の大切さ」にはつくづく気付かされました。田中先生が学会中にある研究者に「Hey! Tyson(田中先生のこと)! It's been 25 years!」と言われていたことが印象的すぎて、25 年ぶりに会って覚えていて、再開できることがあるのだろうか。まだ自分産まれてないですもの。そのような具合に HRP IWS の学会場では多くの人が交流を楽しんでいてその姿がとても羨しかったです。自分も今回の滞中で何人か知り合いを作りましたが、その人脈はこれからも大切にしたいと思います。

長くなりましたが、やはり現地に行かないと気が付かないことは多くあると思いました。その点においてこの海外渡航を伴う宇宙医学実習の意義を見出した気がします。今後の自分のキャリアに学んだことを繋げていきたいと思います。この実習は宇宙を志す人にとってはもちろん、最先端の知見を学ぶことができる他にない機会になるでしょうが、私のように宇宙に軽く触っていて将来はどのように宇宙に関わるべきか迷っている(どちらかといえば関わらないかもしれない)人にとっては、本物を見ることによって、その関わり方を再検討するきっかけになることは間違いありません。最後になりましたが、今回はこのような素敵で充実した実習をお与えいただきまして、心より感謝申し上げます。ありがとうございました。

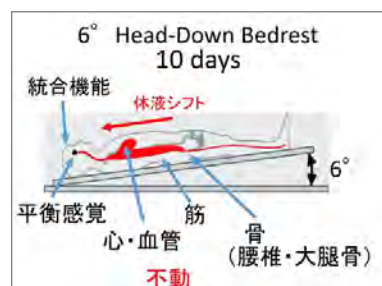
2.3.10. ベッドレスト実験での体験実習

本年度も岐阜医療科学大学可児キャンパスにおいて、ベッドレスト実験が実施された。下記に実施内容と見学者の立場から所感について纏める。

➤ ベッドレスト実験の目的

ベッドレスト実験は、宇宙飛行士が無重力環境で経験する身体変化の一部を地上で再現し、健康への影響と対策を研究するために行われる。

この実験では、水平位から頭を 6 度下げた姿勢(Head-Down Tilt:HDT)をとることで、血液や体液の移動、骨・筋肉への負荷の減少という点で無重力に類似した環境を作り出す。



岐阜医療科学 HP より引用



図 50: 実際に実験が行われた環境(各ブースはカーテンで仕切られていた)。

➤ 実施期間 : 2024.9.8-9.18 10 日間

➤ 人数 : 6 人

➤ 計測内容(1-5 可児キャンパス, 67 関キャンパス)

1. 内耳前庭系電気刺激(Galvanic Vestibular Stimulation:GVS)

1日に1回、田中先生によって各被験者に内耳前庭系に電気刺激を継続的に与えるという介入実験が併せて実施された。この実験は微重力環境における内耳前庭系の衰退を電気刺激によって改善させる目的がある。被験者は電気刺激介入群と対照群に分けられ、プラセボ効果を避けるために自身がどちらであるかは知らされずに行われた。

2. 起立時血圧応答

被検者はまず回転式のベットに仰臥位になり末梢血圧/HCUpressure 頭蓋内圧/一回拍出量の測定を開始、その後ベットが 60° に起こされる。少し静止状態で観察した後また側臥位へと戻る。これを1サイクルとして、ベット

が動く間も含め2サイクル分の計測を行った。またその後、耳の付け根部分にネオジム磁石を貼り付けて、同様に2サイクル計測を行い、結果を比較した。

観察された結果の一部として、右の写真に示す様な圧受容器反射のデータがある。これは磁石を入れていない場合の普遍的な反応であるが、体を起こした際に頭蓋内圧は上昇するが心拍出量は下がり、その代償として心拍数が上がり血圧が回復する。



図 51: 血圧測定時の体勢(仰臥位/60° 起こした状態)。

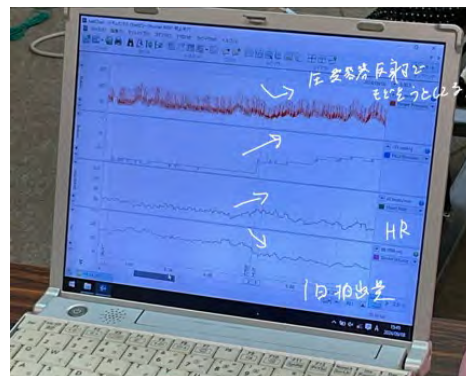
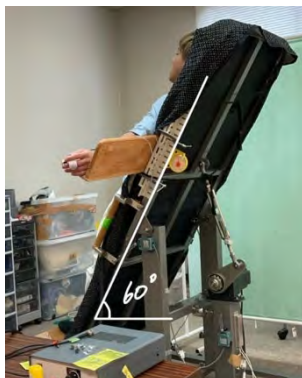


図 52: 測定項目と観察された変化。

3. 重心動揺

直立時の重心軌跡を描記する装置を用いて測定を行う。被験者は装置の上に乗し、直立の姿勢で前方にある一点の印を見つめた状態で1分間測定を行う。(装置上のクッションは測定時の感度を上げるために設置された。)

次に同じ姿勢のまま閉眼し 1 分間測定を行う。その後、血圧応答の際に用いた磁石を耳の付け根に貼り、同様に開眼閉眼状態の計測を行った。



図 53: 測定の様子。

4. 筋電図測定

直立時と歩行時における筋活動について測定を行う。被験者は床内部に圧力を感知するセンサーが取り付けられたマットの上に立ち、足元から伝わる力の大きさ方向や圧力中心を詳細に測定する。併せて下肢拮抗筋の筋電図測定も行われる。まずは直立姿勢を静止状態で維持し、その後に前方に設置されたディスプレイに映される指標の方向に従って、足元は動かさずに重心のみを偏らせる動作を行う。

5. 歩行動作解析

ベッドレスト前後で被験者の歩行状態について観察する。被験者は両足に 20 個程度のマーカーを付けて、筋電図測定で用いたマットの上を指定された条件(スタート/ゴールの位置を変えたり、往復の際に3段階のハードルが設置されたりした状態)で歩く。計測時には、これらの装置から筋・関節の動きを観察するだけでなく、部屋の四隅に設置されたカメラから歩行の動作を解析する。

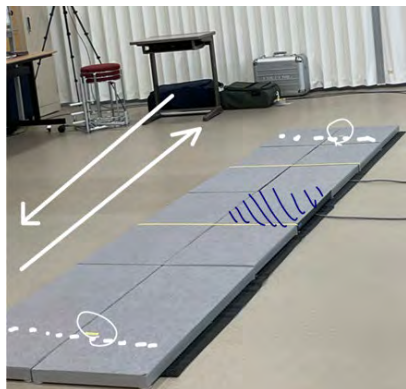


図 54: 測定用マットレス。

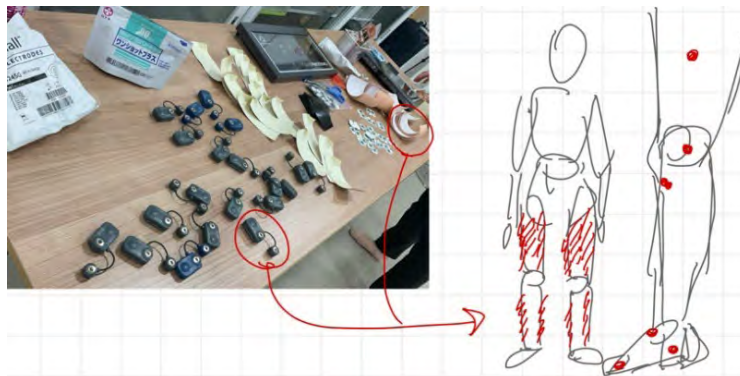


図 55: 筋活動を観察するためのマーカーは赤点の位置に貼られていた。

6. fMRI

MRI(ECHELON Smart, HITACHI)を用いて視覚誘導自己運動感覚に起因する脳内応答評価を行った。被験者はMRI 内で仰臥位となり、ミラー付きのゴーグルを介してスクリーンに投影された図形を追うように指示された。



図 56: fMRI の様子。

7. 筋肉量測定

上肢と下肢の筋肉量測定を行った。上肢は、脱力した状態で利き手の肩峰と肘頭の中央における周囲長を測定し、さらにリニア型プローブを用いて内側と外側の筋肉を B モードで観察・測定した。下肢においては座位で足を垂直にした状態で、腓骨の上端から外果を結んだ際の頭側から 3 分の 1 における周囲長を測定し、上肢と同様に超音波エコーによる測定も行なった。

見学時所感①（参加学生 1）

ベッドレスト実験の見学を通して今まで座学で学んできた検査手技などを統合的に理解することができた上に、今後の宇宙医学の展望を自分なりに考えられた。

授業で学んできた検査方法を実際に見学すると、その原理や注意事項などがより腑に落ちた。さらに臨床における検査では疾病に対応する所見がすでに知られている一方で微小重力暴露後にみられる未知の所見というのは一から自分で見つけ出さなければならないという点で難しさを感じた。筋肉量の低下など予想される変化を裏付ける所見は見つけやすいが、想定していない変化を検査データの中から見出すのは大変知識とセンスを要するものであると思う。

今回のベッドレストをはじめ宇宙医学の関心は基礎医学の延長として宇宙空間における人体の挙動がどのように変化するかということにある。しかし同時に近い将来宇宙医学分野での知見が地上での基礎医学に還元されるのではないかと期待するようになった。「宇宙」と聞くと地上とは全く異なる特殊な環境をイメージしてしまうが、見学中生身の人間を観察しているうちに地上と現象は違えど背景にある原理原則は同じであるということに気がつく。一次的には宇宙空間での変化やその機序、対策などが議論されると思うが、その次のステップとしてその現象から新たな生命の仕組みを見出し、地上での治療・創薬に還元していくことが可能だと思う。そのためにはまず宇宙でも適応可能な検査手技を確立する必要がある。その第一歩として今回の地上での模擬微小重力実験は多くの気づきを得ることのできる貴重な機会だった。例として肥満と膝関節の痛みについて考えたい。確かに過度な負荷により物理的に膝関節がすりへるというのは考えられるが、もし無重力空間でも肥満群にのみ膝の痛みが生じた場合、脂肪から分泌される未知の生理活性物質が分子レベルで膝関節に影響を与えていることが示唆される。その分子レベルの応答の研究や、介入と画像検査などにより地上での治療にも活用できる知見がえられる可能性がある。では宇宙環境において膝関節の画像評価をするにはどうしたら良いのだろうか。そのようなことを考えながら超音波エコーを見学していると、潤滑剤としてエコーゼリーを検査部位に塗布していることに気が付く。さらに宇宙空間での利用を考えると無重力空間での飛散のリスクや、周辺装置への付着など検討すべきことが次々と浮かんでくる。実際 ISS での頸動脈エコーの実績は既にあるらしいが、今回地上での検査を見学することで着想を得て宇宙における検査について自分なりに考えることができたのは大変有意義であった。今後、地上での基礎医学への還元という視点も持って宇宙医学と関われるようになったのは、本実験での一番大きな学びであった。

見学時所感②（参加学生 2）

この実習に興味を持ったきっかけは、自身が所属する研究室で以前ベッドレスト環境を用いた実験が行われていたためであった。地上で重力の影響を受けない環境を再現しようと思うと、例えば、パラボリックフライトのような自由落下の力によって機内に作り出される数秒間の無重力状態や、クリノスタッドのような一方向に力が掛からないように回転動作をさせ続ける装置が思い浮かぶ。ベッドレストは頭部への体液シフトによって類似の生理学的な状態を引き起こすと聞いたことはあるが、結局重力は下方向へかかっているという状態が引っかかり文献で結果を見てもあまりイメージができなかった。現在、自身の研究は *in vitro* 実験であり微小重力環境を再現するとしても直接ベッドレスト実験は関与しないが、今後 *in vivo* 実験へ切り替わる際にベッドレスト環境やその原理を応用できるようにしておきたいと考え、今回の実習に参加した。

実際に見学させていただいたのは全日程の三日間(開始前測定/実験開始8日目/最終日および終了後測定)である。初日と後半を比較して特に印象に残っているのは、後半日程で被検者の方々と話させていただいた際に、顔貌が満月様にふっくらとしていた様に感じたことや、最終日の起き上がる時にはフラフラとして立てない、頭が重いと言いながら車椅子で運ばれていった光景であった。(先生方が最終日のことを「地球に帰還する日」と表現していたことにとても共感できた光景であった。)

被験者の方々に伺った内容としては、自身が歯科医であることから生まれた疑問点が多かった。例えば水分摂取量について、文献では長期間の実験の際は飲水量が細かく管理されているという記載があったが、今回の実習では自由に設定されており、喉の渇きを感じないので飲水の回数が減ったという意見が多かった。これは体液の上方シフトと関係あるのか、相関性があるのだとしたら口渇感の低下と実際の乾燥状態(唾液の分泌量)は比例しているのかなどが気になる点であった。今後、学習・検証する機会に恵まれたら嬉しい。

測定内容については、三半規管の測定を行う際に耳の後ろに磁石を付けて計測していたのがとても興味深く、一部体験をさせていただくことができた。重心動揺を観察する検査で、通常の状態で計測してみると、閉眼したときに体幹がぶれていることが測定結果を見る前から感じられた。しかし、磁石を付けてみると先ほどの様に、倒れそうになる感覚がない。測定中の自身の様子を動画で撮影いただいていたので後で確認すると、磁石を付けている時はほぼ体幹がぶれていないのがよく分かった。

また血圧測定時には、細かな測定データからどこで圧受容器反射が起きているかや、体液の上方シフトについてご説明いただきながら観察することができた。これらの実験は宇宙医学分野だけでなく起立性低血圧など高齢者医療においても需要の高い研究に感じられた。

直に実習へ参加することで、ベットレスト実験に関して曖昧だった知識が整理され、新たな発見や疑問に出会うことが出来た。宇宙で起こる身体の変化についても新たに学習する良い機会となったので、宇宙医学の講義で聴講した内容と合わせて理解を深めていきたい。

2.3.11. 2024 年度宇宙医学実習アンケート結果

宇宙医学実習への参加終了後に、各参加者に対してアンケート調査を行った。アンケート内容としては、「見学に対して、何を期待して応募しましたか?」、「今回の訪問がその期待に応える内容であったか教えてください。」、「今回の実習で学んだことは何か?」、「一番印象に残ったことは?」、「改善した方がよい点や今後の要望」、「今回の訪問によって、宇宙分野への想いや今後の進路などへの影響」の6点について主に回答してもらった。以下にそれぞれの回答を原文のまま記載する。

見学に対して、何を期待して応募したか?

- 宇宙医学の研究の場を実際に見て、今後のキャリアに役立てること
- 実際に研究者たちとの交流
- 宇宙医学の最前線を体験する。NASAに行くことができる。
- 米国の有人宇宙関係者との意見交換を通じた個人的な仮説の検証
- 宇宙医学への理解を深め、視野を広げつつ、将来のキャリアと宇宙医学との関わり方を考えるため。
- ベットレスト実験の参加者の実験終了後の変化を見ること。
- 実験、特に検査手技の実際を見てみたかった。宇宙と医学の間でどのような実験が実際に行われているのか知りたかった。

今回の訪問がその期待に応える内容であったか？

- 自分が将来やりたいと考えている分野の最先端の研究者の方々とお話することができ、宇宙医学の研究者としてのキャリアパスのイメージが掴めたと感じる。
- 研究者たちの話が詳しく聞けて、自分の研究についてのアドバイスも貰えることができて大変有意義な時間だった
- とても充実したものでした。多くを学びました。
- このような機会でもないとなかなか現地に行くのは難しいというハードルを超えることができ、かつ先生方のご縁のおかげで好意的にディスカッションに応じていただいた方が多いという点で、十分に期待通りだった。
- 宇宙医学を具体的にイメージできるようになり、視野も広がった。
- 実際に見学することが出来た。
- 応える内容だった。

今回の実習で学んだことは何か？

- 宇宙環境はあくまで実験条件の 1 つであり、必ずしも NASA でなければ宇宙医学の研究ができないというわけではなく、アカデミアとの共同研究もたくさん行われているということを学んだ。
- 宇宙空間への応用の厳しさと現実を学びました。しかし、NASA の研究者たちは自分たちの目標のために地道に研究をしている姿を見て自分も目標達成のために諦めないことが大切だということも学びました。
- NASA は“普通に身近な”組織であるが、米国の宇宙医学の層はとてもとても厚い。
- 現地に身を置くことで学べたこと（NASA という場や学会の雰囲気、アメリカの文化や英語でのディスカッションの様子など）と、専門家に話を聞くことで学べたこと（宇宙医学/ECLSS 研究や運用、宇宙医学を取り巻く環境、NASA の方の考え方や特徴など）のような非常に多岐に渡る、想像以上の学びを得ることができた。
- まずは専門分野を深め、その専門性を宇宙にどう応用し、地上に還元できるかを考えることが大切だと学んだ。また、視野を広く持ち柔軟に考える姿勢の重要性も感じた。
- 参加者の実験前と実験後での変化を見、宇宙飛行士の体の変化を少し感じる事が出来た。
- 臨床の現場のように疾患や症状をふまえる程度検査結果がわかっている・予想できる場合と違い、今回は体に起こる変化が全くわからないため混沌とした検査データや観察した事象からエッセンスを見極める難しさを知った。生データから新しいことを見出すためには検査手法の原理を深く知り、見たいものを見れる解析スキルが必要だと感じたためその後自分なりに勉強しています。

一番印象に残ったことは？

- 最終日に骨のシングルセル解析をしている先生にデータの 1 部を見せていただいたこと。自分が将来やりたい研究に重なっていたこともあり、最先端の研究を見てとてもわくわくした気持ちになった。
- 巨大遠心機を使ったラットの実験見学
- NASA の施設見学
- HRP IWS への参加。場の雰囲気や参加者層、議論の中身など、非常に刺激的だった。

- NASA 研究者の方々による講義とラボ見学、HRP IWS への参加
- ベットレスト実験のベットに実際に寝たところ、想像よりも傾きが大きかった。
- 実際に自分も傾いたベッドで一晩寝たこと

改善した方がよい点や今後の要望など

- とくにありません。
- 特になし
- JSC の実習としては特にありませんが、フロリダの KSC もあれば完璧だと思います。
- 旅程の詳細が事前にもう少し分かっていると、個人で見学やヒアリングを調整することができ、用事がない時間の密度を上げることができただろうと感じている。
- 今後もこのような実習が継続されることを望みます。
- なし
- データ解析にも触れてみたかった。オープンになっているデータはあまりないのでこのような機会にデータに触れられるととても勉強になると思いました。

今回の訪問によって、宇宙分野への想いや今後の進路などへの影響

- あったと感じます。博士課程取得後のキャリアの選択肢の 1 つとして NASA でのポスドクというものができたと思います。
- せっかくの貴重な経験をさせて頂いたので自分の研究を宇宙に関わるものにしたいという気持ちは強くなりました。今は歯学部でこの 1 年間は国家試験のための勉強の年になってしまうと思いますが、卒業後の大学院ではさらに発展し宇宙への応用に少しでも繋がるような研究をしていきたいと考えております。
- 宇宙からは少し離れようと思いましたが、関わるとしても少なくとも別の専門を極めてから、日本ではなくアメリカに行きたいと思えます。
- 博士進学や米国留学に対する解像度が高まったため、方向性を定めるとまではいかずとも、メリットや障壁が見えてきた点において、進路に影響を与えたと言える。宇宙分野に携わりたいという考えは変わらず、強いまま。
- 宇宙分野との関わり方を深く考えるきっかけとなり、今後の進路にも影響があると思います。
- 宇宙に関する実験は自分とはかけ離れた所で行われていると思っていたが、今回の訪問によって宇宙に関する実験が少し身近に感じられた。
- (自分の専門分野以外の)宇宙医学の論文にも目を通すようになった。実際に見学をしてヒトを対象にした宇宙医学実験の実際や難しさを知ったので、こういう実験はどういうふうに行なっているのだろうというより具体的な疑問をモチベーションとして論文を読んでいます。

進学・就職した場合の所属先

- 理系大学院

その他

- 大変貴重な経験を提供して頂き心から感謝しております
- 大変お世話になりました。ありがとうございました。
- 何かご恩を返せるよう、他の実習参加者の方ともコミュニケーションをとりながら、盛り上げていこうと思います。引き続きどうぞよろしくお願いいたします。
- 貴重な機会をありがとうございました。またシンポジウムや報告会などお声がけいただけるとうれしいです。

宇宙医学実習の終了後、参加者に対してアンケート調査を実施し、見学への期待、実習内容の満足度、学んだこと、印象的だった体験、改善点や要望、今後の進路への影響など、6つの観点から回答を得た。本調査を通じて、参加者の多様な視点や体験、そして実習がもたらした意義が明らかとなった。

まず、参加者が実習に応募した動機としては、宇宙医学の研究現場を実際に見学し、今後のキャリア形成に活かしたいという意欲的な声が多く見られた。また、宇宙医学という最先端の分野に直接触れられる機会を通じて、自身の研究テーマに関連づけたり、仮説の検証を行いたいという具体的な目的を持つ者もいた。NASAの施設を訪れること自体を強く希望する声や、実験参加者の変化を観察することに興味を持つなど、動機は多岐にわたっていた。

実際の実習内容については、多くの参加者が「期待に十分応えるものだった」と評価している。現地の研究者との直接的なディスカッションを通して、宇宙医学の現場で活躍する人々の考え方やキャリアパスを知ることができたことは、参加者にとって大きな学びとなった。中には、自分の研究内容に対して具体的な助言を受けたという声もあり、将来の進路選択や研究の方向性を考えるうえで非常に有益な機会となったことがうかがえる。

実習を通じて得られた学びとしては、宇宙医学は必ずしもNASAだけで行われる特別な研究ではなく、アカデミアや他機関との連携によって多様な研究が行われていることへの気づきや、宇宙環境への応用には多くの困難が伴うこと、それに対して地道な努力を重ねている研究者の姿勢への共感などが挙げられた。また、実験データの解析においては、変化が予測できない環境下で本質を見出す難しさを痛感し、検査手法の原理や解析スキルの重要性を再認識する契機になったという回答もあった。さらに、英語での議論や米国文化への触れ合い、学会の雰囲気など、現地に身を置かなければ得られない体験も豊富であった。

印象に残った体験としては、研究者から最先端の解析データを見せてもらったことや、自身の研究と重なる内容に出会ったことが強く印象に残ったとの意見があった。巨大遠心機を使用した動物実験の見学や、NASA施設の見学、宇宙関連の国際的なワークショップへの参加、ベッドレスト実験を実際に体験したことなど、非常にユニークな体験が参加者の記憶に強く残っていることがわかる。

改善点については、大きな不満の声は見られず、実習内容そのものには高い満足度が示された。一方で、旅程やスケジュールの詳細について事前にもう少し情報があれば、個人での学習や交流をより効率的に行えたのではないかという提案があった。また、限られた機会の中でオープンデータの解析に触れる時間があれば、さらに学びを深められたという意見も寄せられた。

今回の実習を通じて、宇宙分野への関心や今後の進路に影響を受けたとする回答も多かった。NASAでのポストクを将来の選択肢として具体的に考えるようになった者や、自身の研究を宇宙応用に繋げたいという意欲を新たにした者もいた。一方で、宇宙分野に直接関わる前にまずは自らの専門を深めたい、あるいは関わりとす

れば日本ではなく米国での活動を目指したいという冷静な意見もあった。また、宇宙医学分野の論文に目を通すようになった、研究へのモチベーションが高まったなど、実習が参加者の思考や行動に実際的な変化をもたらしていることが示された。

全体として、本実習は参加者にとって非常に有意義であり、多くの刺激と学びをもたらす貴重な機会であったことがわかる。今後もこのような実習が継続されることを望む声も多く、参加者同士のネットワークづくりや、さらなる宇宙医学への関心醸成に繋がる可能性が高い。参加者からは感謝の意が多数寄せられており、教育的・研究的意義の高いプログラムであったと総括できる。

2.4. 生命倫理を中心とした宇宙倫理的視点の構築(宇宙医学研究者としての倫理的観点の習得を行う)：

2.4.1. 宇宙医学教育プログラムシンポジウム「人類の宇宙居住の先に：将来宇宙で亡くなった場合について語ろう！」の開催

日時： 2024 年 11 月 19 日(火)14 時～

場所： 真宗大谷派小野山浄慶寺(オンライン配信あり)

〒604-0982 京都府京都市中京区御幸町通竹屋町下ル松本町 563

内容：

- 医学的観点からの宇宙での人の死について
(演者：暮地本宙己東京慈恵会医科大学講師)
- 倫理的観点からの宇宙での人の死について
(演者：中島浩彰浄慶寺住職)
- 総合討論
(パネリスト：演者 2 名、司会：寺田昌弘)

宇宙倫理学教育プログラムに参加していた京都の住職である中島浩彰氏に協力をお願いし、宇宙医学教育プログラムシンポジウム「人類の宇宙居住の先に：将来宇宙で亡くなった場合について語ろう！」を実施した。2024 年 11 月 19 日に京都市にある浄慶寺で行った。宇宙飛行士だけでなく、民間人も宇宙滞在する時代が到来する。将来的には、宇宙で人類が居住することも実現するかもしれない。人が居住するという事は、宇宙で一生を過ごし、そこで人生を終える方も出てくる。もしくは様々な原因で人生の途中で亡くなる可能性がある。そのような場合、どのように対応すべきかを本シンポジウムで議論した。

医学的観点からは宇宙医学研究者の東京慈恵会医科大学の暮地本宙己氏に講演してもらい、倫理的観点からは中島氏に講演をお願いした。本シンポジウムはオープン参加であり、浄慶寺の檀家さんや一般の方々の参加もあり、将来の宇宙での死という問題を議論した。



図 57: お寺でのシンポジウムの様子。

2.5. 宇宙関連学会・企業・機関との交流(宇宙医学と多方面との関わりを学ぶ):

2.5.1. 43th Annual ISGP meeting (International Society for Gravitational Physiology)

2024 年 5 月 26～31 日にドバイで開催された 43rd Annual ISGP Meeting (International Society for Gravitational Physiology)に参加し、本委託費における宇宙医学教育プログラムについてポスター発表した。ヨーロッパでも宇宙医学を学べる Master コースの大学院が創設されたようで、今後のコラボレーションなどについても議論した。学会では多くの学生や若手研究者も出席しており、宇宙医学教育プログラムの周知を行った。





図 58: ドバイでの ISGP の様子。

2.5.2. 日本宇宙生物科学会第 38 回大会

2024 年 9 月 20～22 日に山形大学で開催された日本宇宙生物科学会第 38 回大会に参加した。大会中には、若手育成委員会と企画委員会と若手の会の合同でシンポジウムを開催し、宇宙医学に関わる学生有志グループの SMJYC (Space Medicine Japan Youth Community) から講演者を招聘し、学会員に宇宙医学に関する取り組みについて説明した。また、学会の理事会においても、宇宙医学教育プログラムへの協力を引き続き呼びかけた。



図 59: 山形大入口の学会看板。

2.5.3. 第 68 回宇宙科学技術連合講演会

2025 年 11 月 5～7 日の日程で兵庫県姫路市において開催された第 68 回宇宙科学技術連合講演会に参加した。宇宙教育セッションにおいて、本委託費における宇宙医学教育プログラムの成果について発表した。ベッドレスト実験の実施や NASA への海外派遣などの成果について説明した。会場からは、どのような専門の学生が参加するのかなどの質問を受けた。他大学との宇宙教育プログラムとも協力体制を構築したいと考える。



図 60: 学会会場の様子。

2.5.4. 第 70 回日本宇宙航空環境医学会大会

2024 年 11 月 15～17 日に東京慈恵会医科大学で開催された日本宇宙航空環境医学会第 70 回大会に参加した。この学会は、本委託費における宇宙医学教育プログラムと最も関りが深く、教育プログラムの宇宙医学講義の講師は、この学会の会員がほとんどである。若手の会とも密な連携をしており、この学会に所属する学生の多くが宇宙医学教育プログラムに参加している。今後も強固な連携を行い、宇宙医学の発展と啓蒙活動に共に取り組んでいく予定である。





図 61： 日本宇宙航空環境医学会の学会会場の様子。

2.5.5. Annual Meeting of the American Society for Gravitational and Space Research (ASGSR) 2024

2024 年 12 月 3～7 日にプエルトリコで開催された ASGSR (American Society for Gravitational and Space Research) 40th Annual Meeting に参加した。宇宙教育セッションにおいて、本委託費事業の宇宙医学教育プログラムについて口頭発表を行った。ベッドレスト実験についての報告を主に行った。ベッドレスト実験は教育教材としての効果があることを強調した。このセッションには NASA をベースにした多くの宇宙教育プログラムについての発表があった。将来的に、NASA の教育プログラムとも協力体制を築いていきたい。





図 62: ASGSR 会場の様子。

2.5.6. Dr. Sergio Santa Maria によるセミナーの開催

宇宙医学セミナーとして、NASA Ames Research Center の Dr. Sergio Santa Maria を京都大学に迎え、2024 年 11 月 26 日にセミナーを実施した。Dr. Santa Maria は BioSentinel spaceflight mission ならびに LEIA spaceflight mission の PI (Principal Investigator) であり、今回は BioSentinel と LEIA mission について紹介していただいた (添付資料 4.5)。NASA 研究者と直接交流できる貴重な機会となった。

宇宙医学教育プログラム セミナー

**NASA研究者による
Spaceflight Mission (BioSentinel, LEIA)の紹介**

NASA Ames Research CenterのDr. Sergio R. Santa Mariaが
来日し、京都大学でセミナーを行います。
Dr. Santa MariaはBioSentinel spaceflight missionならびに
LEIA spaceflight missionのPI (Principal Investigator) であり、
今回はBioSentinelとLEIA missionについて紹介していただきます。
NASA研究者と直接交流できる機会ですので、ぜひご参加ください。

BioSentinel:
<https://www.nasa.gov/ames-engineering/spaceflight-division/biosentinel/>

LEIA:
<https://www.nasa.gov/ames-engineering/spaceflight-division/leia/>

問合せ先:
terada.akashiho.2@kyoto-u.ac.jp
(京都大学・宇宙航空学研究所ユニット 寺田 尚弘)

日時: 2024年11月26日(火) 16時~ ※
場所: 京都大学 南部総合研究1号館・医研1号館 1階セミナー室
<https://www.infront.kyoto-u.ac.jp/access/>
(オンライン配信あり)

※ Dr. Sergio R. Santa Mariaの到着時間によっては、セミナー開始時刻が遅れる場合があります。

参加登録はこちらのQRコードから

Sergio R. Santa Maria
Research Scientist

Biography
-NASA Principal Investigator, BioSentinel spaceflight mission (2019-Present)
-NASA Co-Principal Investigator, LEIA spaceflight mission (2022-Present)
-NASA Space Biology Principal Investigator, ORGANA: Outbreak-Reduction potential and Genetic Assessments for New mission Applications (2020-Present)
-NASA Space Biology Principal Investigator, Acquisition of beneficial mutations through adaptive evolution under simulated microgravity (2020-Present)
-NASA Project Scientist, BioSentinel spaceflight mission (2014-2019)



図 63: Dr. Sergio Santa Maria とのセミナー後の交流の様子。

2.5.7. ひらめき☆ときめきサイエンス・宇宙医学の開催

2024 年 8 月 6 日にひらめき☆ときめきサイエンス「宇宙医学ってなんだろう? 宇宙医学研究がどのように社会貢献できるかを学ぼう!」を開催した。

今回のひらめき☆ときめきサイエンス宇宙医学でも昨年度に引き続き、宇宙医学がどのようなものかを中学生を対象として学んでもらった。宇宙医学という分野がどのような研究をしているかを小学生や中学生の子供たち

に知ってもらうために、人が宇宙に滞在したらどのような生理的影響があるかを講義で解説し、実際に宇宙飛行士の実験で使った測定機器の体験などを実施した。講義では、宇宙環境（微小重力、宇宙放射線、閉鎖環境など）によって筋骨が衰える、体液シフトが生じる、放射線被ばくの可能性がある、視力が衰えるなどの影響があることを説明、また現在どのような宇宙医学実験が地上や軌道上で実施されているのかについても話した。当日は、16 名の中学生が参加した。10 時半から 17 時までみっちり宇宙医学について学んでもらった。終了後には、記念として修了証を渡した。

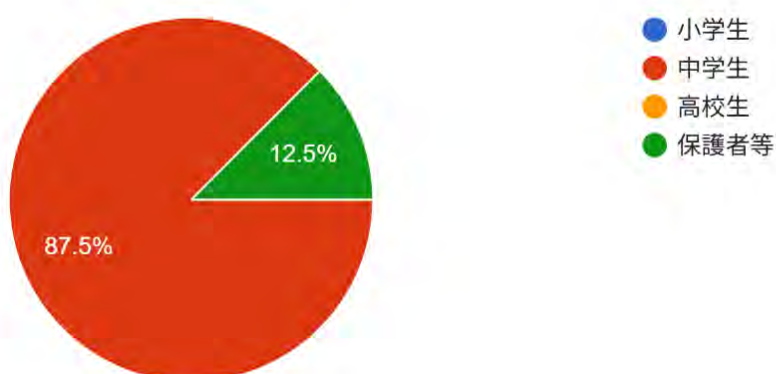


図 64: ひらめき☆ときめきサイエンスの様子。

【ひらめき☆ときめきサイエンスのアンケート結果】

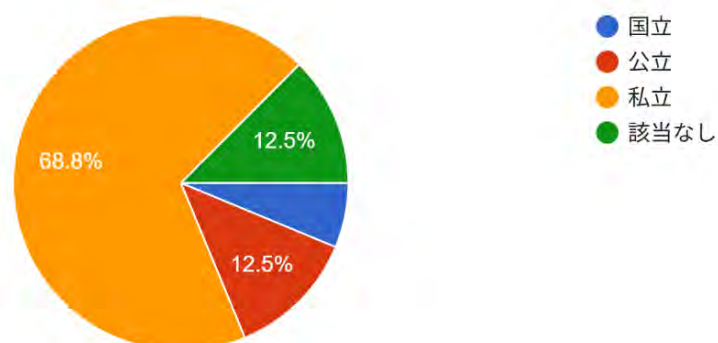
あなたがあてはまるものを選択してください（その①）。

16 件の回答



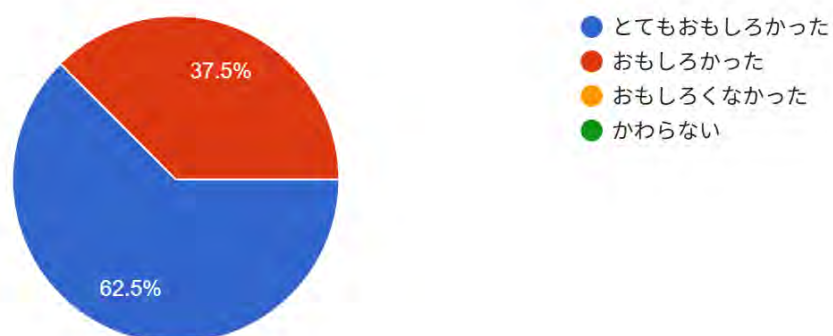
あなたがあてはまるものを選択してください（その②）。

16 件の回答



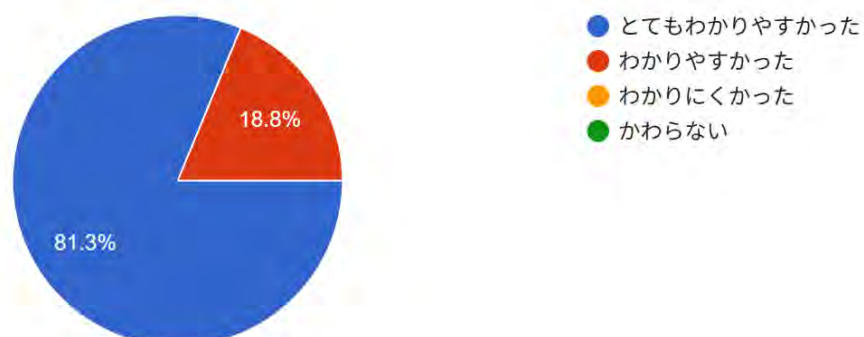
Q1.今日のプログラムは、いかがでしたか。あてはまるものを一つ選んでください。

16 件の回答



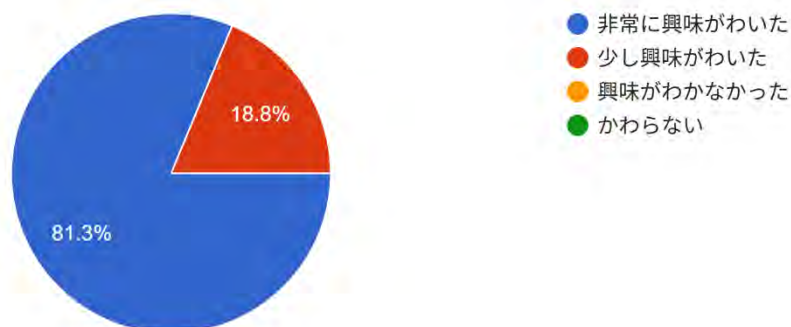
Q2.今日のプログラムはわかりやすかったですか。あてはまるものを一つ選んでください。

16 件の回答



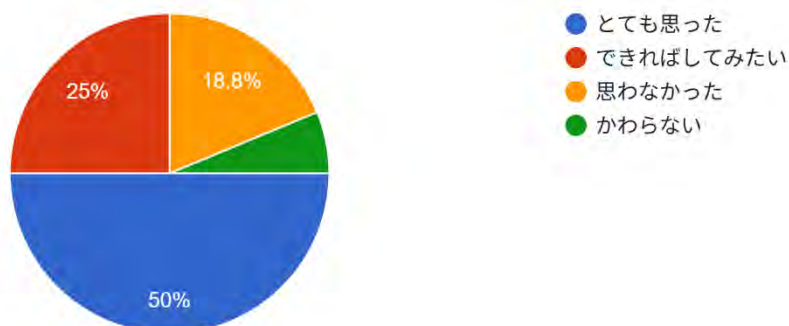
Q3.科学（学問）に興味がありましたか。あてはまるものを一つ選んでください。

16 件の回答



Q4.研究者（大学等の先生）からの話などを聞いて、将来、自分も研究をしてみたいと思いましたか。

16 件の回答



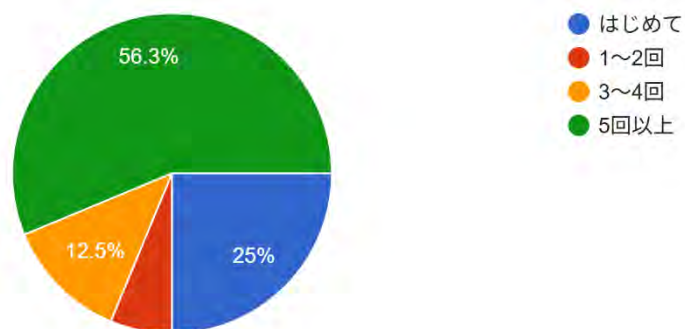
Q5.参加しようと思った理由について教えてください。あてはまるものを一つ選んでください。

16 件の回答



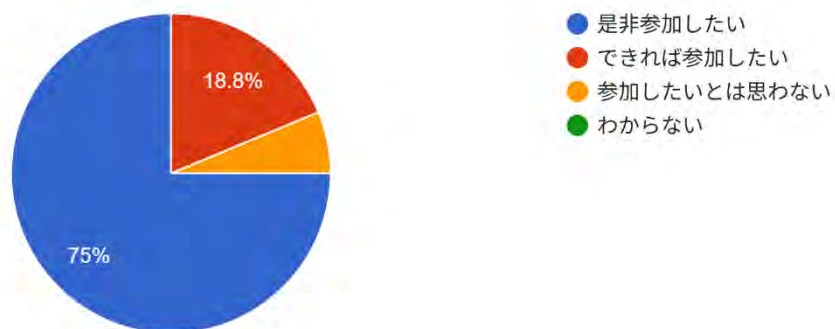
Q6.今までひらめき☆ときめきサイエンスのプログラムに何回参加したことがありますか。

16 件の回答



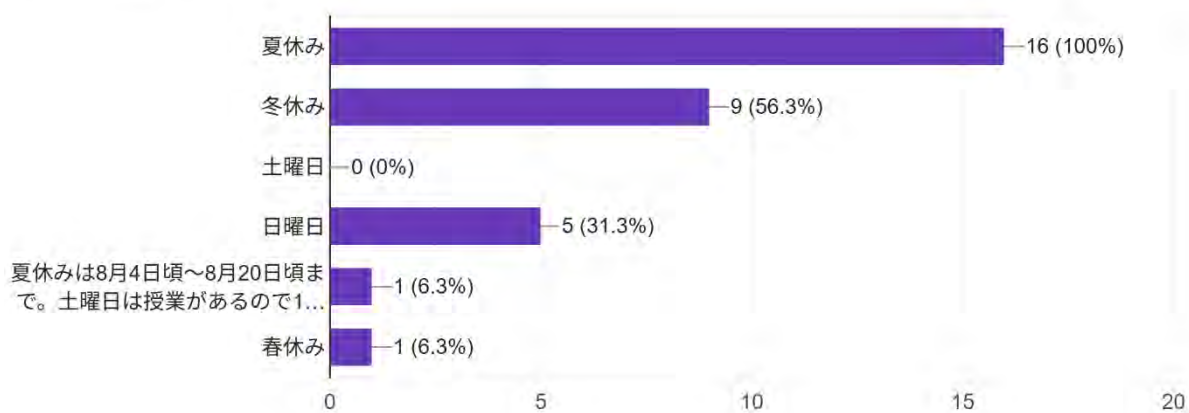
Q7.このような企画があれば、また参加したいと思...したか。あてはまるものを一つ選んでください。

16 件の回答



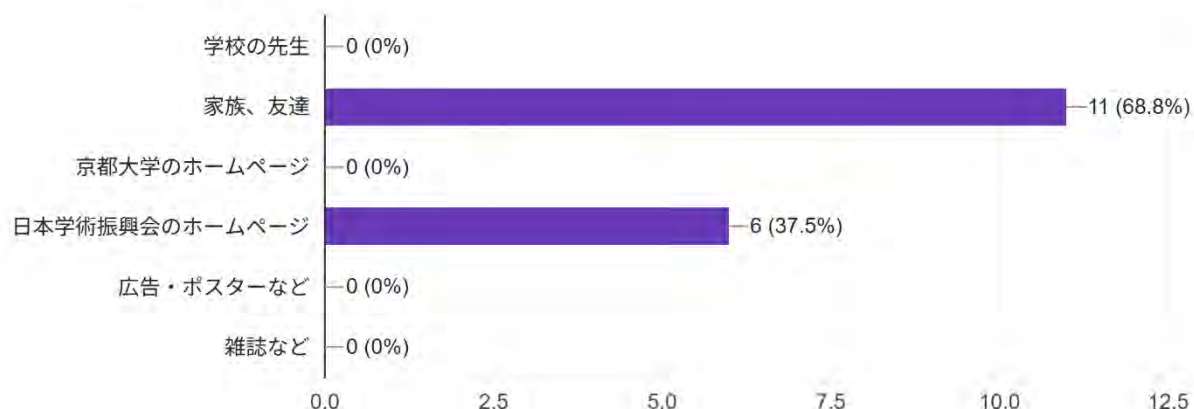
Q8.このような企画に参加しやすい時期はいつですか。あてはまるものを全て選んでください。

16 件の回答



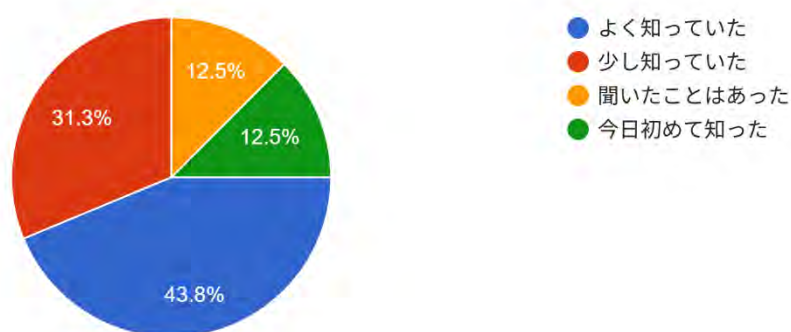
Q9.このプログラムを誰から（どこで）知りましたか。あてはまるものを全て選んでください。

16 件の回答



Q10.科研費について知っていましたか。あてはまるものを一つ選んでください。

16 件の回答



◎意見・感想: (原文のまま)

- 宇宙医学についてよく知らなかったですが筋肉の実験を通して興味を持つことができました（夏休みは 8 月 4 から 8 月 20）.
- この度は貴重な機会を頂き有難うございました。大学では幅広い分野を学べる事が体感できたと思います。関わって下さいました方々、誠に有難うございました。
- 様々な研究を知り、興味をもつきっかけを与えてくださって感謝しております。高校生にももっとチャンスを下さい。私学なので夏休みは短く、冬休みは 12 月 28 日～1 月 6 日。土曜日も 13 時過ぎまで学校あります。
- とても楽しかったです！
- 宇宙医学の技術についてわかりやすく説明してくださりありがとうございました。特に筋電図の測定において、測る場所によって心電図の波形が変わる事に驚きました。これから宇宙医学が身近な物になる事を期待しています。

- お菓子美味しかったです。ありがとうございました。
- とても楽しいプログラムでした。宇宙医学に興味がわきました。先生、スタッフの皆さん、ありがとうございました。
- 実習の時間が多めに取られていて、楽しく学ぶことができました。ありがとう御座いました口
- 講座がとても楽しかったです。ありがとうございました。
- 午前中の講義、紙で資料を頂ければ家に帰っても見返せて良かったなと思います。
- 実習できたから器具の使い方が良く分かった

アンケート結果から、プログラム内容の理解ならびに興味を大いに引き出せたことが確認できた。参加者からはおおむね良好な評価をいただいた。特に、講義だけでなく実習で測定を体験できたことが、子供たちにとって印象深かったようである。大学に進学する前の中等課程(中学生・高校生など)の子供たちに教育する重要性を実感した。

2.5.8. 大分県立高校における出前授業の実施

宇宙医学分野の啓蒙活動として、いくつかの出前授業を行った。まず 2025 年 2 月 20 日と 21 日に大分県で出前授業を行った(図 65)。この出前授業は、昨年度に本委託費イベントの宇宙医学訪問実習で大分大学と大分空港を訪問したのをきっかけに、大分県庁・大分県教育委員会との繋がりができ、その一環として大分県側から要請があったものであり、今回で 2 度目の出前授業である。本委託費プログラムの代表者の寺田と、大分大学の徳丸治教授の 2 名で、大分県立大分舞鶴高等学校ならびに大分県立国東高等学校の 2 校で、「宇宙にヒトは住めるのか? -宇宙に最も近い大分の高校生と考える-」というテーマで講演を行った(参考資料 4.6)。寺田からは宇宙滞在中に人体にどのような影響が生じるのかを宇宙医学の観点から説明した。徳丸教授は NASDA でフライトサーजनとして勤務していた経験から宇宙医療の運用がどのようにされているのかを説明した。講演後にはパネルディスカッション形式で、高校生からの質問に答えた。

出前授業の実施ならびに様子については、大分放送の夕方のニュースとして報道された(図 66)。

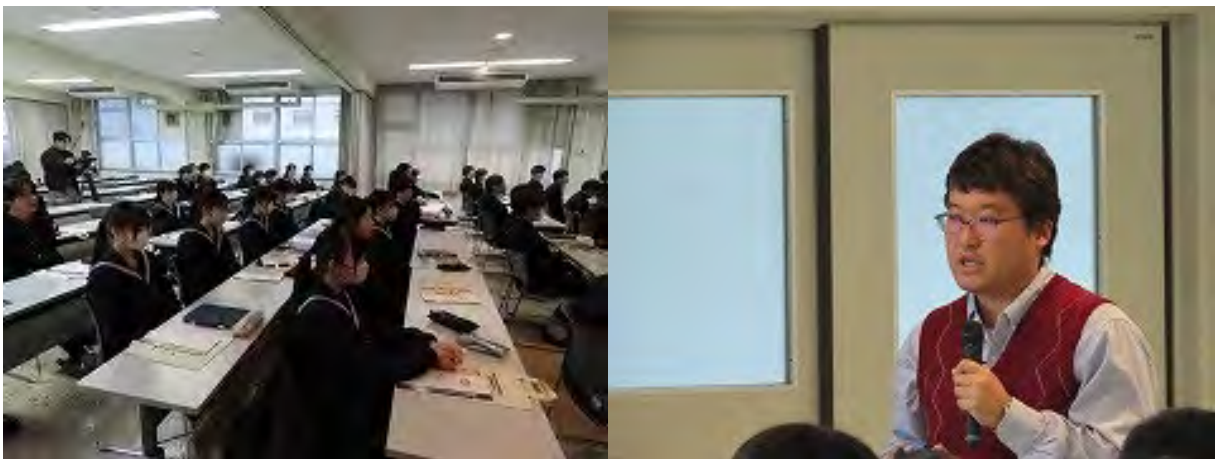




図 65: 大分県立高等学校での出前授業の様子。

ニュース 地域 【大分】高校生が学ぶ「宇宙×医学」

【大分】高校生が学ぶ「宇宙×医学」

2025/02/20 19:46

CAB 大分朝日放送

宇宙で「健康」に過ごすには？
高校生が学ぶ「宇宙×医学」

講話
▶宇宙環境が引き起こす体の異常
▶宇宙飛行士の健康状態 など

0:00:00 / 0:01:37

宇宙への関心を高めてもらおうと大分市の高校で講演会が開かれました。

テーマは「宇宙と医学」です。

大分大学福祉健康科学部 徳丸治教授

「宇宙飛行や訓練に支障をきたすような状態、これを生じさせる恐れがあるような病気などが見つかる」と宇宙飛行士として不適格となる」

講演会は大分空港の宇宙港計画に向けた人材育成の一環で県が去年から開いています。

宇宙や医学にまつわる研究を行う2人の大学教授が、宇宙環境が引き起こす体の異常や宇宙飛行士には非常に高いレベルの健康状態が求められることなどを伝えました。

受講した大分舞鶴高校・理数科の2年生38人の中には普段から宇宙に関する研究をしている生徒もいて、熱心に話を聞きながら質問をしていました。

2年生
「宇宙分野の研究をしているけど自分の知らないことを知れてとても勉強になった」

2年生
「植物に関する実験をしているので宇宙で人の食料をうまく開発できたり宇宙の環境に適した植物の栽培方法を確立したり、そういったことに（きょうの話が）生かせると思う」

21日は新年度から宇宙コースを設ける国東高校でも講演会が予定されています。

図 66: ニュースでの報道。

2.5.9. 大学の入試試験問題への宇宙医学教育プログラムについての出題

世界思想社教学社より、公立はこだて未来大学の入学試験の英語科目で、宇宙医学教育プログラムが取り上げられたとの連絡があった(図 67)。取り上げられた記事は、2023 年 5 月 19 日付で読売新聞が発行した「Academics nurture personnel to help sustain life in space」『The Japan News』(<https://japannews.yomiuri.co.jp/society/general-news/20230519-110247/>) (図 68)で取り上げられた我々の宇宙医学教育プログラムについての文章であった。公立はこだて未来大学の受験生にも、試験問題という形ではあるが、宇宙医学教育プログラムについて知ってもらえる機会ができた。

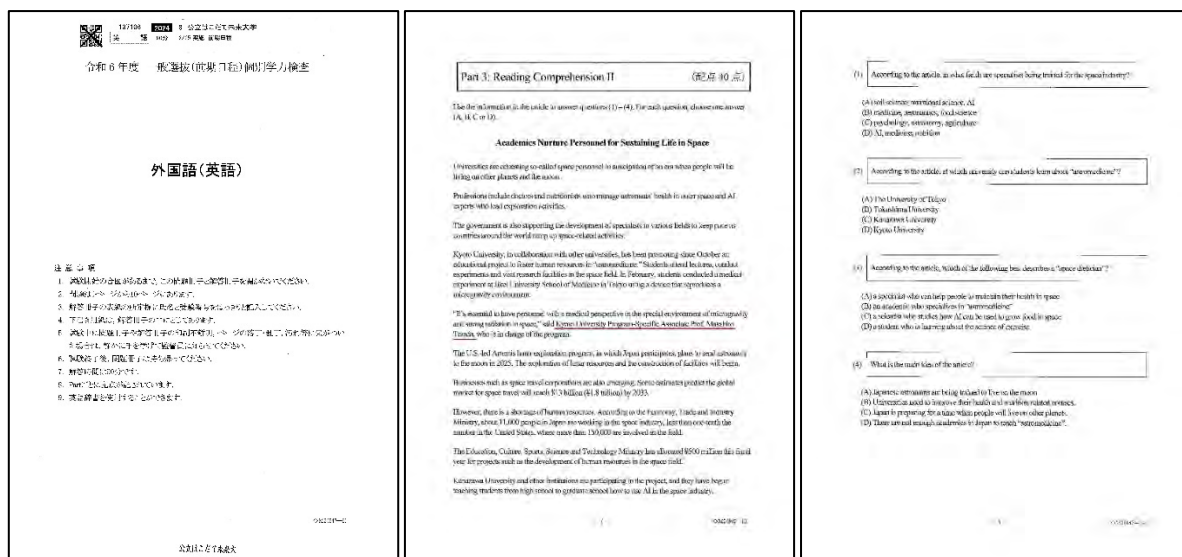


図 67： 宇宙医学教育プログラムが取り上げられてた入試問題。

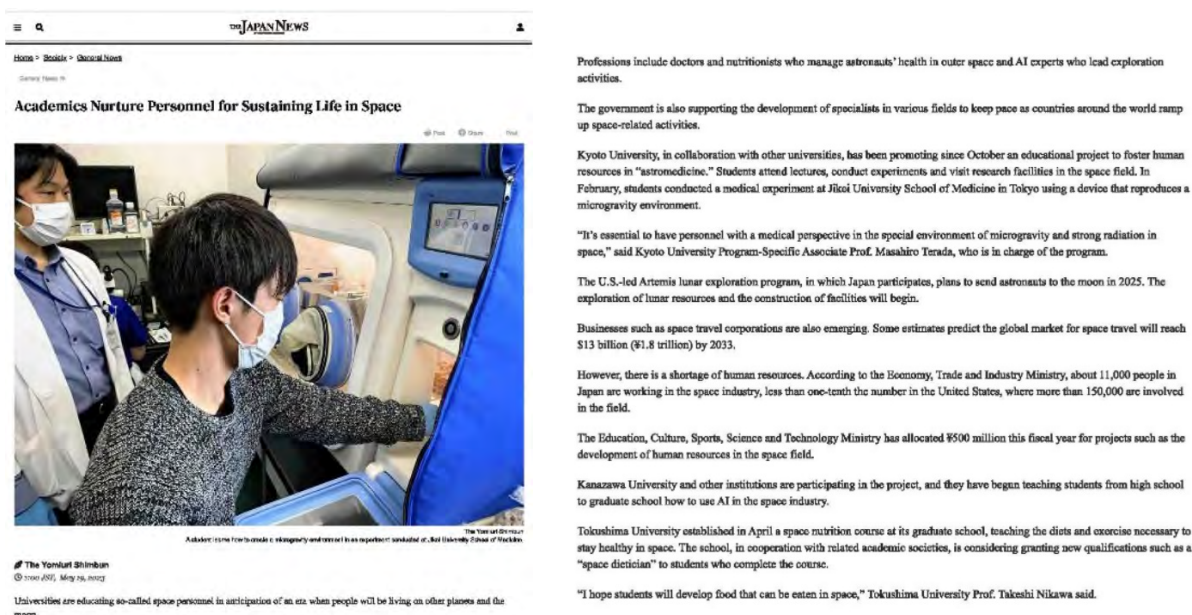


図 68： 入試問題として取り上げられた元の新聞記事。

2.5.10.セミナー開催

宇宙医学分野に関するセミナーを開催した。2025 年 3 月 3 日(月)には、帝京大学の石岡憲昭教授に、「宇宙大航海時代-宇宙に住む-」という題名で講演を頂いた(添付資料 4.7)。石岡教授は長く JAXA でのライフサイエンス研究に携わってこられたため、幅広い講演内容となった。特に、宇宙居住に向けた懸念事項やその対策、医療体制など宇宙医学の知識に基づいた内容のお話であった。多くの参加学生から質問が出て、石岡教授との議論が盛り上がった。

2.5.11.外部評価会

本年度実施した宇宙医学教育プログラムの実施内容について、外部評価者を指名して評価を行っていただいた。外部評価者は、昨年度の外部評価会と同様、石岡憲昭氏(帝京大学/JAXA)、泉龍太郎氏(日本大学)、鈴木一人氏(東京大学)の3名に引き続きお願いし、2024年5月27日(木)15:00~17:00に京都大学東京オフィス@丸の内で開催した(図 69)。評価会の前の13:00~14:45には今年度の宇宙医学実習の全体報告会を行い、学生からの実習報告があった。評価委員の3名の先生方にはこの実習全体報告会にもご出席いただき、実際の学生の生の声をお聞きいただいた。この実習全体報告会ならびに評価会は、関係者のみのクロージングではなく、広くプログラム内容について確認していただくために、一般の方も参加可能なオープン開催とした。そのため、開催告知は、宇宙総合学研究ユニット、日本宇宙航空環境医学会ならびに宇宙惑星居住科学連合のメーリングリストを通じて行った。特に宇宙惑星居住科学連合には、10団体(日本マイクログラビティ応用学会(JASMA)、日本宇宙生物科学会(JSBSS)、日本宇宙放射線研究会(JASRR)、日本宇宙航空環境医学会(JSASEM)、生態工学会(SEE)、宇宙人類学研究会、京都大学宇宙総合学研究ユニット、東京理科大学スペース・コロニー研究センター、徳島大学宇宙栄養研究センター、同志社大学宇宙医科学研究センター)が加盟しており、多くの団体に告知した。その結果、外部から28名の登録があり、当日はzoomを通じたオンラインで参加していただいた。当日のプログラムについては下記の通りである。

【宇宙医学実習報告会】(添付資料 4.8)

13:30-13:45 NASA Ames Research Center での実習報告

13:45-14:00 NASA Johnson Space Center での実習報告

14:00-14:15 ベッドレスト実験実習報告

14:15-14:45 意見交換会

【外部評価会プログラム】

15:00-15:30 2024年度の京都大学での取り組みについて……寺田昌弘

15:30-16:00 2024年度の岐阜医療科学大学での取り組みについて……田中邦彦

16:10-17:00 評価者コメント・意見交換

外部評価会では、まず寺田から2024年度の京大での取り組みについて説明し、次に参画機関である岐阜医療科学大学での取り組みについて説明していただいた(添付資料 4.9)。その後、それぞれの発表での質疑応答や議論を通じて、外部評価者からの評価をいただいた。評価内容については、表3に掲載する。

プログラムの最後には、外部参加者も交えて宇宙医学教育や宇宙医学研究分野の今後について自由討論を行った。宇宙医学教育については、昨年度に引き続き、我々のプログラムも好意的に受け止められている印象を受け、人材育成は最重要課題であることが確認できた。3名の外部評価委員のそれぞれの専門性の観点からも、本プログラムに対するご意見や、今後の宇宙分野における展望など様々な意見を聞くことができた。委託事業終了後の教育プログラム体制についても議論し、今後も外部からの意見を取り入れつつ、宇宙医学における研究ならびに人材育成について大いに貢献していくことを確認した。



図 69: 外部評価会における意見交換の風景。

表 3: 評価者コメント一覧

(1) 宇宙医学教育に期待するテーマについて	
取りあげるべきテーマがあれば記述してください。	● これまでも記述しているが、今後、月から火星へと活動の場を広げ、居住する場合、惑星間飛行や低重力の影響下での宇宙医学的視点からのストレスや精神心理に関するテーマ、さらには、惑星居住が、グループから村、都市へと拡大する中での健康と社会の仕組み、環境等との関係を視点とする社会医学的な観点からの宇宙医学教育も必要になってくるとされる。 ● NASA だけでなく、米国や欧州で行っている宇宙医学研究の拠点を訪問し、最先端の研究に触れさせる。
(2) 教育プログラムの内容について	
評価できる点	● 3 年間継続して、現在、問題となる宇宙医学に関わる分野を中心に大学だけでなくメーカーや NASA の研究室を訪問し、知識を広げるプログラムとしては評価できる。 ● ベッドレスト実験、日本・海外の施設や学会への参加等、多くの学生を対象に、いろいろなプログラムを工夫した点は高く評価出来る。 ● 宇宙医学のプログラムとしてまとまっており、外部の学生も参加できる仕組みになっていることで日本の宇宙医学の水準を底上げしている。

改善できる点	● 昨年度も指摘したが、生命倫理に関連する法律や宗教、異文化との交流、ジェンダー、さらには環境と社会の関係を含め視野を広げた議論の場を設けることを期待したい。これまでは既成の宇宙医学に則ったプログラムであるが、今後は人が宇宙に進出し、宇宙に住み社会を構築していく上での宇宙医学の在り方を議論し取り入れていくべき。また、座学と実習との関連性を明確にし知識や興味を満たすだけでなく次のステップにつなげていくことを期待する。 ● 宇宙医学の講義のプログラムに関し、初年度から改善を提案した件が全く反映されなかった。プログラムの改善自体よりも、提案を全く考慮しなかった件の方が大きな問題であり、これでは評価をする意味が無い。 ● 倫理教育に関しては、座学だけでなく、実際のベッドレスト実験の倫理審査に参加させるのも一つの方法。実際の委員会に参加させることが難しければ、シミュレーションでも良いと思われる。 ● 学生を学会等に参加させる場合は、発表を義務付けることが望まれる。 ● 研究室訪問で見るだけでなく、学生が参加していくようにすべき。アメリカだけでなく欧州も含めてネットワークを広げていくべき。
(3) 教育評価について	
評価できる点	● 講義だけでなく実験、実習に重きを置いた教育と思われ、成果を学生自ら外部発信することや海外の研究者と交流し議論するなど国際的視野に立った教育により知識を広げていくことは評価できる。 ● フィードバックをきちんと受けて改善されている。
改善できる点	● 一部の学生の知識の広がりや理解だけでなく、昨年度も記述したが、参加学生の個々人の感想や希望等についてレポートを提出させ、プログラムに参加した全学生間で共有し議論させる。繰り返しになるが、学生自ら宇宙医学教育研究テーマを考えさせ、プログラムや研究計画を立案させ、内容について妥当性を含めてみんなで議論する場を設けて総合的な評価につなげること。実習参加者が一部に限定されるが、決して一部の参加者のための教育ではないことのために、ホームページ等を立ち上げ広く情報を展開する。 ● (2)のプログラム評価でも触れたように、評価や改善提案を考慮しないのであれば、評価を行っても無駄としか言いようが無い。 ● 人文社会科学的視点を含めた評価があるべき。
(4) 上記以外の項目へのご意見、あるいは全体的なコメント	
(自由記述欄)	● やはり目指すは国際水準であり、多くの人々に幅広く提供するだけでなく、新たな付加価値をどうつけていくのが重要。 ● 計画書にもある通り、「本事業を通じた成果は積極的に各アカデミアの年次大会で発表し、宇宙医学研究ならびに医学教育の啓蒙を行い、我が国の有人宇宙開発を支える宇宙医学分野の基盤を広げ、堅固なものとする。関連機関との連携を確立し、多くの学生に宇宙医学を学ぶ機会を提供し、事業終了後

	も継続できる体制を整備する」ことは大変重要なことであるが、この3年間の活動では必ずしもその方向性が見えてこない。 ● これまでのところ、それぞれのカリキュラムに参加した学生、興味のある学生に限られているように思われるので、他の学生にも興味を抱かせるカリキュラムが必要で、これは学部横通しのアンケート調査を実施したり、宇宙環境の大きな特徴である微小重力、宇宙放射線、閉鎖環境それぞれに含まれる宇宙医学的要素の複合環境を念頭にカリキュラム、実験、実習等を考えることが望まれる。さらに、実験、実習と座学との関連性、各大学との連携、宇宙ベンチャー企業を含む多種多様な企業との連携を明確にし、人材を活かすための雇用をも見据えたプログラムを将来的に期待する。生成 AI の積極的活用をも必要であろう。 ● 国内外の実習に参加した学生は必ずしも同一人ではないので、これでは各個人の興味に終始することを危惧するので、もっと学生の輪を広げるために3年間の成果を取りまとめて、出版物(総説や論文、書物、教科書など)にして、宇宙医学教育プログラムのホームページに掲載するなど広く周知をはかること(SNS の活用も考慮してもよいかもしれない)。継続プログラムにするための方針をこれまで参加した学生も含め幅広い議論、調査をして目的とする今後の活動方針を明確にすること。実験や実習もただ面白いからではなく将来の課題を踏まえること。これまでの実績を踏まえ、まずは宇宙ベンチャー企業、宇宙関連大学からなる宇宙教育コンソーシアム構築や国際宇宙大学(ISU)との連携を目指し、オンライ講義の充実を図る。 ● NASA、ESA や JAXA の教育プログラムとの連携も視野に入れるべきかと。 ● このようなプログラムに関しては、単なる科研費の報告書だけでなく、しかるべき学会誌等に、論文として発表することが必要と考えられる。必ずしも査読付きである必要は無いと思われるが、教育関係の学会・研究会もあり、適切な発表の場はあるはず。またなるべく早期、来年度中には投稿することが望まれる(出来れば英文で)。 ● 今後、このようなプログラムを進める場合は、JAXA との関係性をどのようにするかを検討しておくことが望まれる。
--	---

外部評価者からのコメントは昨年と同様に、おおむね本プログラムの重要性についてご理解いただいているかと感じた。とくに、日本での宇宙医学教育の底上げを行い、多くの学生に教育機会を提供できていることについては高い評価を頂いた。学生へのフィードバックの仕方などについては今後改善の余地があるかと考える。特に宇宙医学実習での見学だけでなく、学生自らが率先して活動できる場をより多く提供していくこともじゅうようである。研究分野においてはどこまでこの教育プログラム中に細かくサポートしていくか考慮する必要があるが、複合的に宇宙環境の理解を深める取り組みも行っていきたいと考える。また、宇宙医学実習についての学生への旅費の支出についても議論となった。本委託費プログラム単独での実施だけでなく、他の分野のプログラムとの

協力関係を構築し、多くの学生に教育機会を提供するプログラム内容にしていきたいと強く感じた。そのような連携が、委託費事業終了後の本プログラムの継続にも重要となってくる。

宇宙医学教育・研究分野の今後についての意見交換では、継続して人材育成を行っていく重要性を再確認した。また、宇宙医学の専門性を高めるような教育内容にするのか、より宇宙医学の社会的つながりを強調するような教育内容にするのか、様々な意見が出た。専門性を高めつつ社会的貢献にもつながる教育内容にすることが重要である。本委託費事業終了後も外部評価会で出た意見やコメントを参考に、益々本宇宙医学教育プログラムを魅力的なものとして継続していきたい。

2.5.12. 実習参加者情報交換用名簿の作成

宇宙医学実習の全体報告会の中で、学生から各訪問先の実習参加者同士の交流を深めたいという要望があった。全体報告会は、各訪問先の情報を参加できなかった学生に行い、横の交流をすることが目的であったが、年一回の開催のため、顔見知りになれてもその後の交流に繋がらないという課題もあった。そこで、参加学生同士が気軽に連絡しあう事を促進するために、これまでの実習参加者の名簿を作成することとした。名簿には、氏名、連絡先情報(e-mail)、所属先、過去のプログラム参加イベント、居住地域、専門分野、興味のある分野、の項目に分けて、情報提供に同意した学生に記載を依頼した。その結果、25名の学生より情報提供の同意が得られ、名簿を作成した。特に居住地域や専門分野、興味のある分野などからの情報を参照し、大小規模に関わらず、学生同士が交流するきっかけになればと願っている。今後は所属先などアップデートすべき情報があるので、順次アップデートして最新の名簿情報として引き続き同意した学生間で情報共有を行っていき、交流の促進を行っていく。

3. まとめ

本事業は、3年間にわたる取り組みを通じて、宇宙医学教育および関連分野における人材育成、実践的な実験・実習の実施、そして倫理的視点の強化において顕著な成果を上げた。初年度は、宇宙医学教育プログラムの基盤構築に注力し、必要な体制や施設の整備を行った。2年目には、プログラム実施に向けた具体的な準備が整い、教育コンテンツの充実と学生へのスムーズな提供が可能となった。本年度は、その集大成として、プログラムの本格的な実施を開始し、宇宙医学教育の実践的な側面を学生に提供した。

宇宙医学講義においては、京都大学宇宙総合学研究ユニットで培った知見と経験を最大限に活用し、講義内容の質の向上を図った。協力研究者と連携し、宇宙医学の重要性を深く理解した講師陣を迎え、学生に対して包括的かつ実践的な内容を提供することができた。これにより、学生は宇宙医学に関する理論的な知識を身につけるとともに、その応用に関する理解を深めることができた。また、講義内容については、宇宙医学における人材育成の重要性を強調し、将来的な宇宙医療の発展に向けた基盤づくりを意識したカリキュラムを展開した。

宇宙医学実習に関しては、初年度は IHI エアロスペース、東京慈恵会医科大学、フクダ電子株式会社、久留米大学、徳島大学、東京理科大学を訪問した。2年目は、IHI エアロスペース、東京慈恵会医科大学、さらに大分大学とヒューストンへ訪問した。本年度は、特に海外への連携を強化し、NASA Ames Research Center と NASA Johnson Space Center を訪問した。これにより、学生に多様な環境での実践的な経験を提供し、宇宙医学の現場で必要とされる技術や知識を実際に体験する機会を提供した。特に NASA での実習は、学生にとって極めて

貴重な経験となり、実際の宇宙研究や飛行士訓練の現場に触れることで、宇宙医学の最前線を学ぶ機会を得た。

また、模擬微小重力暴露実験（ベッドレスト実験）は、本事業のメインプログラムの一環として、岐阜医療科学大学の協力を得て実施した。初年度はベッドレスト実験の準備を行い、2年目には6名の被験者が参加し、10日間のベッドレスト実験を通じて、宇宙空間での人体への影響をシミュレーションする貴重なデータを収集することができた。また、本年度も同じく6名の被験者を対象にベッドレスト実験を行うことができた。この実験は、宇宙医学研究における重要な手法であり、実験期間中は多くの学生や企業関係者が見学に訪れ、実験自体を啓蒙活動の一環として活用することができた。特に、企業の方の訪問などもあり、地域との連携強化にも寄与した。

さらに、本事業では生命倫理の観点から、宇宙倫理学委託費とのコラボレーションにより、合同ワークショップ・シンポジウムを開催し、宇宙環境における動物実験や人間への影響に関する倫理的な議論を深めた。ワークショップでは、具体的な事例を挙げながら議論が進められ、宇宙医学研究における倫理的課題に対する認識を高めることができた。シンポジウムでは宇宙での死という問題に取り組み、チャレンジングな議論を行うことができた。これらの取り組みは、宇宙医学の発展に不可欠な倫理的視点を強化する上で重要な意味を持ち、今後の研究活動においても持続的な影響を与えると確信している。

加えて、3年間を通じて、国内外での学会参加、セミナー開催、出前授業、国際交流活動など、多岐にわたるアウトリーチ活動を実施した。これにより、宇宙医学分野の魅力を広く伝え、国内外の研究者とのネットワークを強化することができた。特に、国際的な交流を通じて、宇宙医学の最前線での研究動向を把握し、今後の研究の方向性について有益な情報を得ることができた。今後も、これらの活動を継続し、宇宙医学分野の国際的な発展に寄与する所存である。

3年間では、延べ481名の方々に宇宙医学教育を提供できた。このことは、本プログラムの目的の一つである広く宇宙医学を認知してもらうという事項を大いに達成できたと自負する。生物系・医療系以外の者が宇宙医学的知識を学ぶことで、その他の宇宙分野に応用する機会が格段に増えると期待する。アンケート結果などからも本教育プログラムへの満足度が高いことが確認できた。教育プログラムとしては、継続することにも大きな意味合いがある。そこで、本委託費事業終了後も、これまでの成果をさらに発展させ、より多くの学生に対して実践的な教育機会を提供し、宇宙医学分野における人材育成を加速させることを目指す。また、本プログラムを継続的に運営できる体制の確立に向けた検討を進め、宇宙医学研究の発展に貢献し続けるための基盤づくりを行う所存である。

表4：宇宙医学教育プログラムへの参加者数

教育プログラム名称	R4	R5	R6	総数
有人宇宙医学講義	109	131	158	398
模擬微小重力暴露実験	－	15	17	32
宇宙医学実習	28	17	6	51
延べ人数	137	163	181	481