

令和 4 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 5 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 4 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.	委託業務の目標.....	1
1.3.	業務の方法.....	1
1.4.	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).....	16
2.1.3.	岐阜医療科学大学での宇宙医学講義.....	19
2.2.	模擬微小重力暴露実験の準備(講義で学んだ知識を実践的に体験・実施する):.....	20
2.2.1.	京都大学での準備状況.....	20
2.2.2.	岐阜医療科学大学での準備状況.....	22
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):.....	28
2.3.1.	株式会社 IHI エアロスペースでの体験実習.....	28
2.3.2.	東京慈恵会医科大学・細胞生理学講座での体験実習.....	29
2.3.3.	徳島大学・宇宙栄養研究センターでの体験実習.....	33
2.3.4.	久留米大学・整形外科教室での体験実習.....	39
2.3.5.	フクダ電子株式会社での体験実習.....	42
2.3.6.	東京理科大学・スペースシステム創造研究センターでの体験実習.....	45
2.3.7.	宇宙医学実習アンケート結果.....	51
2.3.8.	宇宙医学実習におけるコンセプトマップ解析(東京慈恵会医科大学における実習).....	57
2.4.	生命倫理を中心とした宇宙倫理学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):.....	60
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):.....	61
2.5.1.	2022 ASGSR (American Society for Gravitational and Space Research).....	61
2.5.2.	第 68 回日本宇宙航空環境医学会大会.....	62
2.5.3.	カザフスタン人研究者との交流.....	63
2.5.4.	宇宙ユニットシンポジウム.....	64
2.5.5.	元 NASA 研究者との交流.....	65
2.5.6.	アウトリーチ活動.....	67
2.5.7.	取材対応.....	68
2.5.8.	JAXA 教育センターとの打ち合わせ.....	68
2.5.9.	セミナー開催.....	69

2.5.10.	ロゴマークならびに HP 作成.....	69
2.5.11.	外部評価会.....	70
3.	まとめ.....	74
4.	添付資料.....	75
4.1.	有人宇宙医学講義シラバス.....	75
4.1.1.	第 1 回宇宙医学講義スライド集.....	77
4.1.2.	第 2 回宇宙医学講義スライド集.....	87
4.1.3.	第 3 回宇宙医学講義スライド集.....	91
4.1.4.	第 4 回宇宙医学講義スライド集.....	119
4.1.5.	第 5 回宇宙医学講義スライド集.....	125
4.1.6.	第 6 回宇宙医学講義スライド集.....	128
4.1.7.	第 7 回宇宙医学講義スライド集.....	132
4.1.8.	第 9 回宇宙医学講義スライド集.....	145
4.1.9.	第 10 回宇宙医学講義スライド集.....	163
4.1.10.	第 11 回宇宙医学講義スライド集.....	166
4.1.11.	第 13・14 回宇宙医学講義スライド集.....	172
4.2.	宇宙医学実習@東京慈恵会医科大学での実習参加学生らの発表スライド集.....	177
4.3.	宇宙医学実習@東京慈恵会医科大学での招へい講師講義スライド集.....	182
4.4.	招へい外国人キャリアセミナー.....	190
4.5.	招へい外国人(Ann-Sofie Schreurs, Ph.D.)スライド集.....	199
4.6.	招へい外国人(Ravikumar Hosamani, Ph.D.)スライド集.....	207
4.7.	インタビュー記事.....	222
4.7.1.	京都大学宇宙総合学研究ユニット特定准教授へのインタビュー(宇宙医学 HP より抜粋).....	222
4.7.2.	岐阜医療科学大学田中教授へのインタビュー(宇宙医学 HP より抜粋).....	227
4.7.3.	東京慈恵会医科大学インタビュー(宇宙医学 HP より抜粋).....	232
4.8.	学会等発表実績.....	235

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. 委託業務の目標

宇宙医学教育研究プログラムを開発・実践することである。具体的には、1)宇宙医学講義による微小重力環境下で生じる人体への影響ならびにその対策方法の学習、2)模擬微小重力暴露実験を通じた人体影響への実践的な理解ならびに計測手法・解析手法の習得、3)全国の宇宙医学研究室の訪問見学による研究交流、4)生命倫理を中心とした宇宙倫理的視点の構築、5)宇宙関連学会・企業・機関との交流を通じた実践的な人的交流、を行う。

本事業では、共同参画機関間で密な連携を取りつつ、宇宙医学分野における若手人材の更なる活性化や医療系以外の分野との協力促進を目指し、日本宇宙航空環境医学会等のアカデミアとの強固な連携を構築する。本事業を通じた成果も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。構築した基盤を軸に、事業終了後も長期に渡り、実践的な実習実施の場を全国の大学に拡大し、国内外を問わず宇宙医学を志す多くの学生に宇宙医学教育の場を提供し、人材育成を継続することを目指す。

1.3. 業務の方法

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、その対策について考察する。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準備(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4年度は、次年度に模擬微小重力暴露実験(ベッドレスト実験)を実施するための準備として、被験者募集、支援スタッフ雇用、会場準備、必要物品の調整等を行う。各種実験測定の前準備も実施する。

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。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(寺田)も共同参画者として参加している。宇宙医学における生命倫理をテーマに宇宙での倫理学の理解を促進させるための共同企画を次年度に実施するための準備を行う。生命倫理についての理解度を評価する方法を検討する。

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。

1.4. 当該年度における委託業務の結果概要

令和4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準備(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4年度は、次年度に模擬微小重力暴露実験(ベッドレスト実験)を実施するための準備として、被験者募集準備、支援スタッフ雇用、会場準備、必要物品の調整等を行った。各種実験測定の前準備も実施した。

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。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(寺田)も共同参画者として参加している。宇宙医学における生命倫理をテーマに宇宙での倫理学の理解を促進させるための共同企画を次年度に実施するための準備を行った。生命倫理についての理解度を評価する方法を検討した。

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(JAXA や NASA 等)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

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。そのため宇宙医学講義では、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必要とするかなど、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察してみる。

＜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 4 年度後期も講義を実施した。合計で 109 名(京大生 22 名、外部生 87 名)の参加があった。

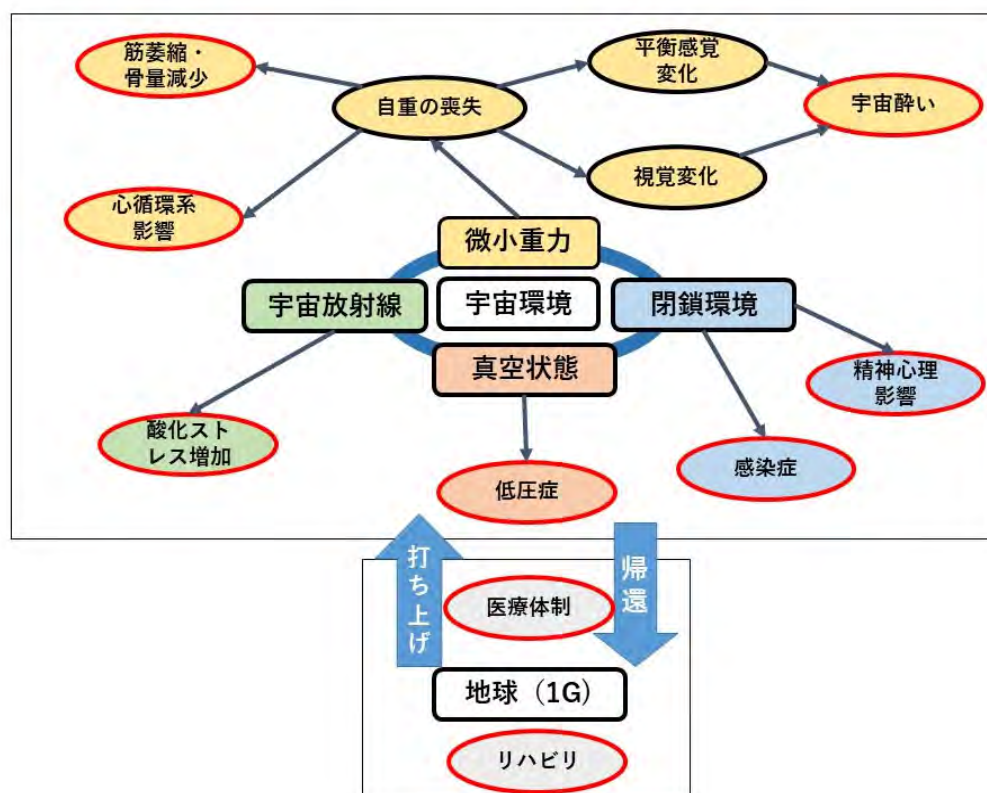


図 1: 宇宙医学における環境要因と人体影響の相関図

【授業計画と内容】(令和 4 年度後期実施)

- 【第 1 回】10 月 05 日 宇宙医学概要(寺田昌弘)
- 【第 2 回】10 月 12 日 宇宙での姿勢制御(萩生翔大)
- 【第 3 回】10 月 19 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 4 回】10 月 26 日 宇宙飛行とリハビリテーション(山田深:杏林大学)
- 【第 5 回】11 月 02 日 宇宙生物実験(暮地本宙己:慈恵医大)
- 【第 6 回】11 月 09 日 宇宙での骨格筋への影響①(河野史倫:松本大)
- 【第 7 回】11 月 16 日 宇宙での骨格筋への影響②(志波直人:久留米大)
- 【第 8 回】11 月 30 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 07 日 宇宙酔い(野村泰之:日大)
- 【第 10 回】12 月 14 日 宇宙服と低圧症(田中邦彦:岐阜医療科学大)
- 【第 11 回】12 月 21 日 宇宙での心循環系への影響(南沢享:慈恵医大)

【第 12 回】 12 月 28 日 宇宙での骨格筋への影響③(谷端淳:慈恵医大)

【第 13 回】 1 月 11 日 宇宙放射線の影響①(山敷庸亮)

【第 14 回】 1 月 25 日 宇宙放射線の影響②(山敷庸亮)

【補 講】 1 月 18 日 「月有人探査におけるストレスと心理学的課題—南極越冬隊の心理研究から学ぶ」

2022 年度第 9 回宇宙学セミナー(立花正一:ロイヤルこころの里病院)

以下に各講義テーマの概要を述べる。

【第 1 回 10 月 5 日 宇宙医学概要(寺田昌弘)】(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 12 日 宇宙での姿勢制御(萩生翔大)】(添付資料 4.1.2)

第 2 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3回 10月19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 4.1.3)

第3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。特に、軌道上での健康維持や帰還後のリハビリについて、NASA と JAXA それぞれでの運用方法を比較して説明した。日本国内では 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。

[第4回 10月26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 4.1.4)

第4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。宇宙長期滞在では、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5回 11月2日 宇宙生物実験(暮地本宙己、東京慈恵会医科大学)】(添付資料 4.1.5)

第5回宇宙医学講義では、講師自身の宇宙医学における研究テーマを含めて、宇宙生物実験について講義を行った。宇宙医学とは「普通では生命維持が不可能な環境」へのヒトの滞在・活動をサポートする極限環境医学の一分野である。宇宙医学は、臨床医学であると同時に、宇宙飛行士を宇宙での労働者として捉えた場合は、彼らの健康を維持するための産業医学とも考えられる。宇宙医学の誕生は、人が宇宙に進出したときに始まり、すでに半世紀以上の歴史がある。これまでは宇宙医学の産業への波及効果は極めて少なかったが、地上よりも微小重力環境下で胚性幹細胞が効率よく細胞塊を形成できることに着目し、人工臓器形成法を開発テーマに再生医療への応用を目指す試みや、微小重力環境暴露と加齢による骨格筋の廃用性筋萎縮(サルコペニア)の類似性に注目し、宇宙での筋萎縮メカニズムを検討してサルコペニア防止に役立たせようという試みなど、宇宙医学の社会に対する還元の可能性が見えてきた。講義後半では講師が宇宙医学研究に携わるようになった経緯について、研究内容をあわせて紹介した。宇宙医学研究の出発点として、微小重力環境下では無対流、無浮遊・無沈降、無静水圧、無容器浮遊という4つの効果が細胞内でどのように制御されるのかというテーマがある。講師は当初から重力が生命に与える影響に関心があり、解剖学教室にて基礎研究を始めるにあたり、まずは自分自身の研究技術の独自性や専門性を確立することにした。分子生物学的研究が主流の中で、当時ユーザー数の減っていた電子顕微鏡ではあるが、汎用性が高く全身の臓器細胞を観察する形態解析技術に興味を持った。光学顕微鏡では解像度が足りないという不利はあるが免疫組織化学染色によりどこにどのような機能分子が局在しているかをはっきり示すことができる。より解像度の高い観察が可能な透過型電子顕微鏡や走査型電子顕微鏡をあわせて、3つの顕微鏡でひとつの細胞の状態を対比的に明らかにしていくという研究手法を最初に習得した。講師は自身の習得した形態学的研究手法と、共同研究者のオミックス解析、それは遺伝子発現や代謝物発現について網羅的な解析が可能である、を組み合わせることで、機能と形態の関係性を通した生命原理に深く迫ることができる研究手法を確立するに至った。続けて、遠心機を用いた人工重力負荷実験について紹介した。この実験では、ロケット打ち上げ時の過重力環境が再現できる。5G程度の人工重力をかけたマウスの下垂体前葉では機能たんぱく質の発現と局在が変化することを明らかにした。次に現在実施中の主な研究テーマ2つを紹介した。ISSで35日間滞在したマウス(微小重力環境下と遠心による人工重力1G環境下の2群)の胃や肝臓組織のサンプル提供を受けて、オミックスと形態学的解析手法を用いた研究を紹介した。宇宙環

境では動脈硬化が起きやすく、それには血管内皮細胞が関与していることが知られている。地上に置いて模擬微小重力環境での細胞培養が可能な装置「GRAVITE」を用いて、動脈硬化予防に関わる因子を検討中である。

[第6回 11月9日 宇宙での骨格筋への影響① 河野史倫(松本大)] (添付資料 4.1.6)

第6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ックス的にはどの段階で分か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。

[第 7 回 11 月 16 日 宇宙での骨格筋への影響② 志波直人(久留米大)] (添付資料 4.1.7)

第 7 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。

講義後の質疑応答を抜粋

Q. ISS で HTS による運動を行った左腕の脂肪が落ちた原因は HTS 運動によるものか、微小重力環境によるものか。

A. なぜ左腕にのみ周囲径の減少が見られたのかについて明確な答えは得られていない。

Q. ISS 滞在中の飛行士の骨量減少に一定の効果があった Bisphosphonate は破骨細胞の働きを阻害するが、骨芽細胞の活動をより活発にさせるというアプローチでの創薬研究はあるのか。

A. そのような骨粗しょう症治療薬として甲状腺ホルモン(PTH)製剤がある。動物実験では骨肉腫の発生報告があった。

【第8回 11月30日 宇宙での自律神経系への影響 岩瀬敏(愛知医大)】

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。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7日 宇宙酔い(野村泰之、日本大学)】(添付資料 4.1.8)

第9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、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 10 回 12 月 14 日 宇宙服と低圧症(田中邦彦、岐阜医療科学大学)〕(添付資料 4.1.9)

第 10 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スーツが膨らんでしまう。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 11 回 12 月 21 日 宇宙での心循環系への影響 南沢享(慈恵医大)】(添付資料 4.1.10)

第 11 回宇宙医学講義では、宇宙環境が心循環系へ及ぼす影響について講義を行った。ヒトが長期宇宙滞在することで寿命の長さに変化はあるのだろうか。2012 年に東京都健康長寿医療センター研究所が発表した論文によれば、遺伝子導入により線虫の筋肉で発現したポリグルタミンは加齢に伴い凝集するのだが、宇宙環境下の線虫では凝集の形成が抑えられ、老化の遅延が示唆された。ショウジョウバエに関する研究でも同様の報告がなされている。ヒトに関する研究としては、ISS で 1 年間滞在した双子の宇宙飛行士の研究(Twin Study)について紹介した。一卵性双生児の一方が ISS に 1 年滞在し、もう一方は地上に残り、同じタイミングで多くのサンプルを取得して世界中の研究者が解析した。その一つとして、宇宙滞在すると寿命を調整するテロメアが伸びることが分かったが、このテロメアの伸長は地球帰還後に元の長さに戻るようである。また、宇宙環境での血管内皮細胞の動向についても解説した。宇宙では血管内皮細胞の形態が変化し、細胞内小器官にも変化が生じることが知られている。これらの影響は地上では 3D クリノスタットを用いて模擬することができる。宇宙での血管内皮細胞の動向が解明できれば、宇宙での心循環系への影響を解決できる可能性もある。宇宙での心肺蘇生術などについても説明した。

講義後の質疑応答を抜粋

Q. 今後、民間宇宙旅行が一般化したとして、心疾患のある人が宇宙環境に暴露した場合にはリスクはあるか。

A. 重力の影響を受けるような病態、たとえばエコノミー症候群、を起こしやすい患者等にとっては宇宙環境の方が良いとは思いますが、宇宙放射線の影響を考慮すると推奨はできないだろう。心不全のある患者については宇宙

環境の初期では体液シフトにより心臓への負荷がかかるので禁忌に近い。不整脈の誘発もあるかも知れない。たとえば荷重力が人に与える影響に関する航空医学の研究は健康な人を対象にした研究であり、病態が起きている患者への影響はほとんど調べられていない。

Q. Twin Study の報告では地上と宇宙空間でワクチンの効果に差はないとあったが、血液を介した薬剤の効果についてはどうか。

A. 薬効動態(薬物が体内に投与されてから排泄されるまでの過程を示すもの)が宇宙と地上で異なり、処方時の容量がそれに伴い変わる可能性は考慮すべきだろう。

[第 12 回 12 月 28 日 宇宙での骨格筋への影響③ 谷端淳(慈恵医大)]

第 12 回宇宙医学講義では、宇宙での骨格筋への影響について講義を行った。私たちの体は体重換算で約半分が骨格筋で出来ている。骨格筋の特徴としては、使えば使うほどに肥大し、使わなければ委縮する。宇宙環境に滞在すると微小重力の影響により、骨格筋の萎縮が生じることはよく知られている。宇宙での筋萎縮は使わないことにより生じる廃用性の筋萎縮であり、これらの現象は地上での高齢者の加齢性筋萎縮(サルコペニア)などとの相関も多い。講師は、これまで筋ジストロフィーにおける筋崩壊過程を研究してきた。筋の崩壊と萎縮にも共通する部分があり、その観点からの解説も行った。骨格筋を肥大させる調節因子として Myostatin の例を説明した。Myostatin 遺伝子に異常が生じると、筋骨隆々になることが知られている。また、筋分解系のシグナルとしてユビキチンプロテアソームとオートファジーについての解説をした。これらシグナル因子を調節することにより、筋分解と筋生成をコントロールでき、宇宙での筋萎縮予防にもつながる可能性がある。

講義後の質疑応答を抜粋

Q. 全身の筋肉をまんべんなく維持することが好ましいのか、部分的なものでも構わないのか。

A. 例えば、足の筋肉だけでも維持できれば痴呆を回避できるのか等のデータはないので、はっきりとした答えはないが、ほかの臓器に作用させるということを考えるのであれば、筋肉からサイトカインが出て血中を介して作用するので、どこかの筋肉が維持できていれば良いと個人的には思う。

Q. 微小重力環境下では完全には筋萎縮を回避できないと思うが、生活習慣病を予防するにはこれだけ筋肉量を維持できれば良いという目安は設定できるだろうか。

A. データがないのでわからないが、それがわかれば運動時間を最小限に留めることができるので重要なテーマであろう。

Q. 神経伝達に重要な役割を果たす一酸化窒素を考えると、果たして一酸化窒素合成酵素は、宇宙でも正常な機能を果たすだろうか。

A. 非常に興味深いですが、ISS での実験にも多くの制約があり、検証するのは難しい。しかし大変興味深いテーマであると思う。

[第 13・14 回 1 月 11・25 日 宇宙放射線の影響①・② 山敷庸亮(京都大学)] (添付資料 4.1.11)

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。

[補講回 1月18日「月有人探査におけるストレスと心理学的課題—南極越冬隊の心理研究から学ぶ」2022年度第9回宇宙学セミナー 立花正一(ロイヤルこころの里病院)]

我が国を含む国際有人宇宙活動は、国際宇宙ステーション(ISS)計画を経て、いよいよ月の有人探査に向かいつつある。ISS計画ではすでに7人の日本人宇宙飛行士の長期滞在を完了し、中には複数回の長期滞在ミッションを成し遂げたり、コマンダー(船長)としてチームを束ねる重責を果たした者もいる。我が国も宇宙飛行士の活躍を下支えする健康管理活動を通じて、宇宙医学・心理学の多くの知見や技術を積み重ねることができた。ISS計画によって、少なくとも地球の軌道上では健康を損ねることなく、半年程度の長期活動を実施できることが証明された。

しかし、月の有人探査となると、飛行士の健康管理支援のハードルはかなり高くなることが予想される。特に、宇宙放射線被ばく、隔離閉鎖環境での生活や任務に伴う精神・心理的ストレス、けがや病気を発症した際の医療対処手段や資源の乏しさは、大きな課題となるだろう。不測の事態が起こった際には、地球軌道上では地上からの支援が受けやすく、地球への緊急帰還も短時間で可能なのに比して、月面や月軌道上では、地球からの支援はより困難となり、派遣隊の自立性が問われることになる。

今回は、特に精神心理的課題に絞って論じたいが、地球からの隔絶感・孤立感が増し、活動における自立性・自律性が求められ、チームとしての団結力・リーダーシップの質の高さ、個々の隊員の情緒安定性・士気の維持・自己管理能力も問われるだろう。

このような未知の課題に挑戦する際に、我々が参考とすべき有力な知見は、南極大陸における越冬隊の長年の経験であり研究となる。アメリカ隊を中心とした心理学研究や体験に関する文献をレビューしたので、その一部を紹介したい。南極越冬活動の初期には、過酷な環境(寒冷、日照不足、隔離閉鎖、単調性など)による不眠、抑うつ、幻覚、意識の変容、行動異常などの報告がなされている。国際地球観測年(1957-58)を契機に始まる中

期においては、体系的な心理学的研究が行われ、住環境の改善や隊員の事前スクリーニングもなされた結果、Polar Madness と呼ばれた極端な精神症状や意識の変容は減少し、隊員選抜の評価要素なども確立した。南極越冬隊員に見られた心理的特徴(季節変動性、独特のコピーング手法、集団葛藤の傾向など)も明らかになり、越冬活動(チャレンジ)は人によってはプラス(健康増進効果 Salutogenic effect)に働くことも解ってきた。月有人探査要員の選抜・訓練・支援活動の参考になるものと考えている。

講義後の質疑応答を抜粋

Q. 本講義で紹介された、軍人と研究者の混成南極越冬隊において、行程の中で、チャレンジ精神のある研究者らにはストレス耐性があるように見られ、一方で命令を受けて派遣された軍人らにはそれがなかったとの話だが、チャレンジ精神も持ったグループが意図せずして、チャレンジ精神をもたないグループに悪影響を与えていた可能性はあるか。

A. 研究者は自分の研究に没頭できる環境であったと考えられる。軍人は任務として南極に赴いているに過ぎない。閉鎖環境ストレス暴露において、この差は大きいだろう。

Q. 今後月面や火星に人類が進出するにあたり、遠隔での医療にどのようなメリット・デメリットが考えられるか。特に、精神心理面での支援について、意見を伺いたい。

A. 地球から離れれば離れるほど、現地でのケアが重要になってくる。地球から遠隔通信でできる支援には限界がある。

Q. 月や火星に長期滞在する飛行士らにとって有効なストレスコーピング(ストレス対処)としてどのようなものが考えられるだろうか。

A. フラストレーションの解消という観点から言えば、工場のような騒音で閉鎖環境の ISS に比べたら、月面基地や火星での活動は自由度が高いものと思う。アポロの時は月滞在中にゴルフクラブでゴルフボールを打った飛行士がいた。

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。今回は、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(2022年10月5日)と、第14回目の講義(2023年1月25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2)、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3)

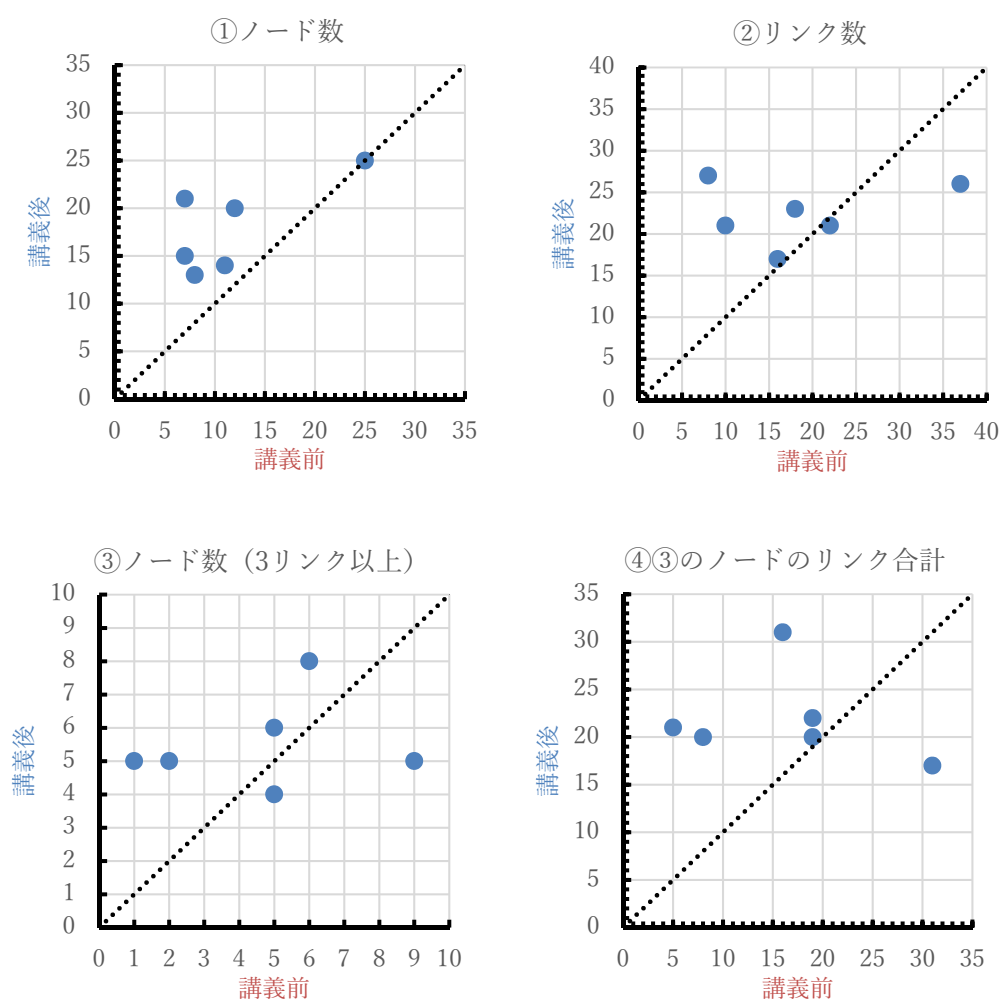


図2: コンセプトマップにおける講義前後の関係

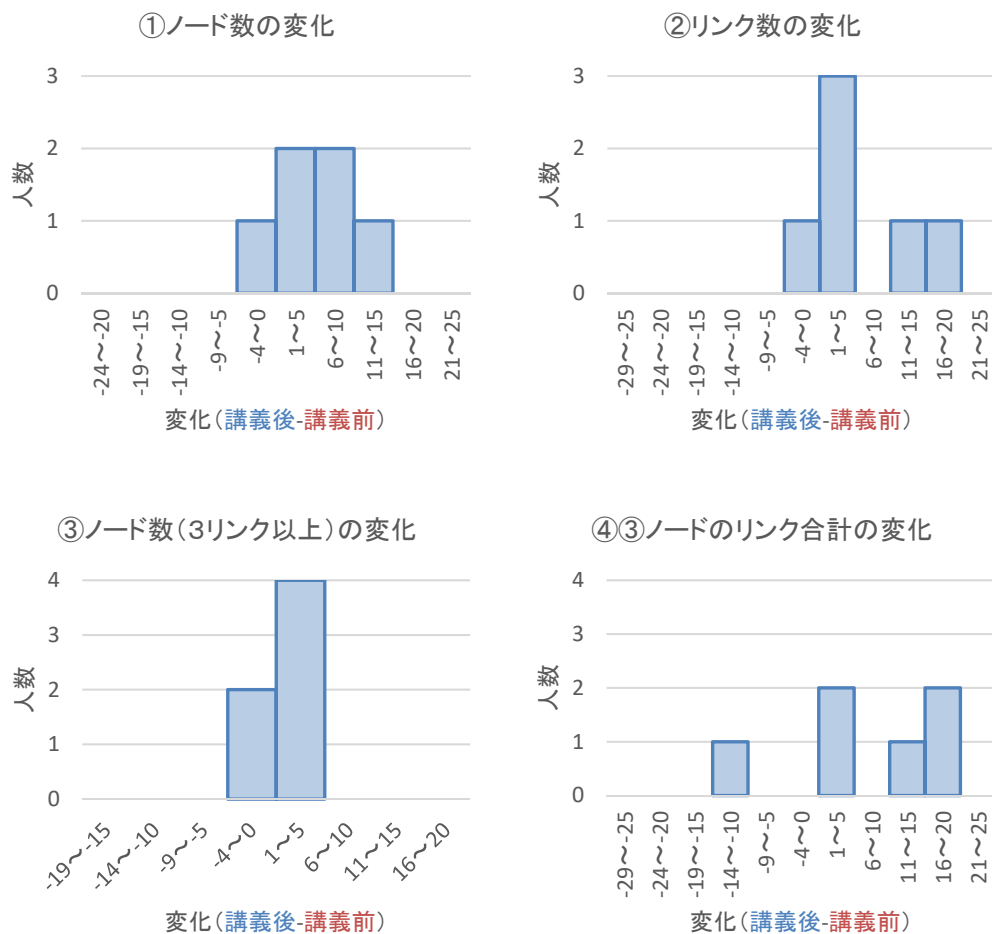


図 3: コンセプトマップにおける講義前後の変化量分布(ヒストグラム)

【ノード数の変化】

講義前の平均値は 11.7、講義後は 18.0 であり、約 1.53 倍となった。図 2-①と図 3-①のとおり、ほとんど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 18.5 から 22.5 となり、約 1.22 倍となった。半数の学生のコンセプトマップでリンク数は増加していた。2 名はほぼ増減なし。1 名は 37.0 から 26.0 へと約 0.7 倍の減少が見られた。特に著しい減少の見られた学生についてはオンラインでの講義参加にあたりコンセプトマップの十分な作成時間を確保できていなかった。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 4.0 から講義後は 2.0 倍増加し、8.0 という結果を得た。変化に大きな個人差がないのは、図 3-③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、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 13.0 から 30.0 へと約 2.3 倍増加した。一方で図 3-④を見ると、16 増加した人もいれば、14 減少した学生もあり、学生間で変化量に大きな差があったことがわかる。今回の講義はオムニバス方式だったため、宇宙医学としても広い範囲を網羅していたため、時間的にもノード間のつながりを整理できなかったことが原因の 1 つとして考えられる。

【ノードの内容変化】

- ・「宇宙放射線」、「筋萎縮」、「体液シフト」、「宇宙酔い」といったノードが複数の履修者に共通してみられるようになった。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、「人体」、「目」、「骨」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の学生でみられるようになってきていることから、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。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. 岐阜医療科学大学での宇宙医学講義

2022 年 9 月 15 日、岐阜医療科学大学にて宇宙医学講義ならびに講義に関連した実習を行った。

船外活動用宇宙服の構造と機能、ならびにその問題点について講義を行った。また、アルテミス計画を中心に、どういった船外活動用宇宙服を開発することが必要であると考えられるかといった、人体側から要求される宇宙服の考え方について講義を行った。

講義に引き続き、宇宙医学における主要な研究テーマである地上 1G 環境における人体の循環調節機能の考え方、研究方法について実習を行った(図 4)。NASA の研究でも使用されている電動 tilt bed に臥床し、水平仰臥位から立位(60 度頭高位)への姿勢変化を体験した。さらに、平衡感覚器への影響に関する研究方法を実習した。

実習では重心動揺測定装置の上にラバーマットを敷設し、体性感覚(深部知覚)を混乱させた状態で開眼・閉眼それぞれの条件で 1 分間の重心軌跡を記録した。内耳前庭系のみならず、体性感覚ならびに視覚による姿勢調節の補正機能の重要性を体感した。

また、その内耳前庭系自身の姿勢調節機能を体感するため、左右耳介後部の側頭骨乳様突起上に電極を貼付し、通電することで、前庭神経 1 次ニューロンを電気刺激する内耳前庭系電気刺激 (Galvanic Vestibular Stimulation: GVS)を体感した。前庭神経を直接刺激することで、姿勢を変化させていないにも関わらず前庭神経核から先への経路が賦活化され、重心動揺を自覚すること、正確な重力方向感知ができなくなること、それを用いて運動系、循環系などさまざまな調節系において前庭感覚の役割を調査できることを理解してもらった。

また、一方の電極を前頭部に置いて刺激することで視神経が刺激され、光が見えることを体感した。神経系の刺激伝導が電氣的活動によって行われていることを理解してもらった。

これらの実習によって、内耳前庭系の地上における感覚の重要性和宇宙医学への応用方法を体感してもらうことができた。



図 4: 岐阜医療科学大学での講義後の実習風景。(左)電動 tilt bed、(中央)重心動揺測定の様子、(右) GVS 体験の様子。

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

2.2.1. 京都大学での準備状況

令和 5 年度の夏に模擬微小重力暴露実験(ベッドレスト実験)を実施するための準備を行なった。ベッドレスト実験は、岐阜医療科学大学で実施する予定である。準備のために岐阜医療科学大学を訪問し、ベッドレスト実験を実施する施設・設備などを確認した。また、京都大学ではベッドレスト実験に用いる筋電計(FreeEMG1000)ならびに動作解析カメラシステム(MICROCAM200-4)、心電計(Bittium Faros180)等を購入し、次年度での測定準備を行なった。

筋電計(FreeEMG1000、図 5)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する予定である。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)を算出する予定である。



図 5: 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。

動作解析カメラシステム (MICROCAM200-4、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の動作解析を行う予定である。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、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予定である。



図 6: 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。

心電計 (Bittium Faros180、図 7) 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する予定である。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 7: 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。

2.2.2. 岐阜医療科学大学での準備状況

次年度、模擬微小重力曝露(6° ヘッドダウンベッドレスト)実験・実習を行うための準備を行った。

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(図 8)。



図 8： 平成 24 年に岐阜医療科学大学関キャンパスで行ったベッドレストの様子。

1. 会場設定

準備にあたって、まず床上生活のための施設を確保した。会場となる岐阜医療科学大学は、臨床検査学科、放射線技術学科、看護学科、薬学科と助産学専攻科を有する医療系の総合大学である。

このうち、看護学科の存在する可児キャンパスでの実施を想定した。会場は、16 床を有する成人・老年看護学実習室(図 9)が最も適していると考えられたため、学内学部生の教育に支障のない時期・方法での同実習室使用を看護学部長に依頼し、内諾を得た。

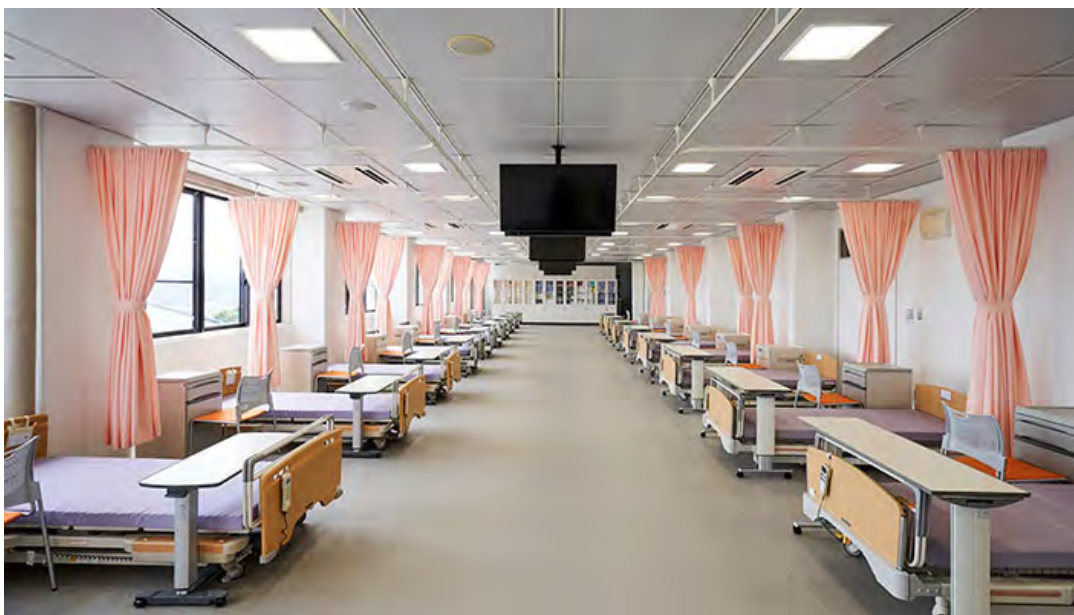


図 9： 岐阜医療科学大学可児キャンパス 成人・老年看護学実習室。

同実習室内には、中央管理のエアコンが装備されていることはもちろんのこと、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。さらに、実習用のリネンも有しているため、使用後のクリーニングを条件に借用する旨の内諾も得た。

次年度、6 名程度の被検者を予定しているが、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。

2. 備品準備

6° ヘッドダウンベッドレストの前後で、岐阜医療科学大学において循環調節機能ならびに平衡感覚機能評価を行うべく、装置の準備を行った。

すでに大学では、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におこなうための姿勢変換装置を有している(図 10)。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。同装置の細部調整・動作確認を再度行った。



図 10： 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の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製作した。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)を行う予定であるが、同刺激装置では、想定しているノイズ波形が作成できない。そこでアイソレーター(SS-203J, ミュキ技研)のみを購入し、同社に波形入力ならびに電源装置の作成を委託した(図 11)。



図 11： アイソレーター（下）と電源供給装置（上）

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）を本委託費にて購入した（図 12）。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。そこからアイソレーターに送信し、刺激として出力した。同装置にて GVS が行えることを確認した。

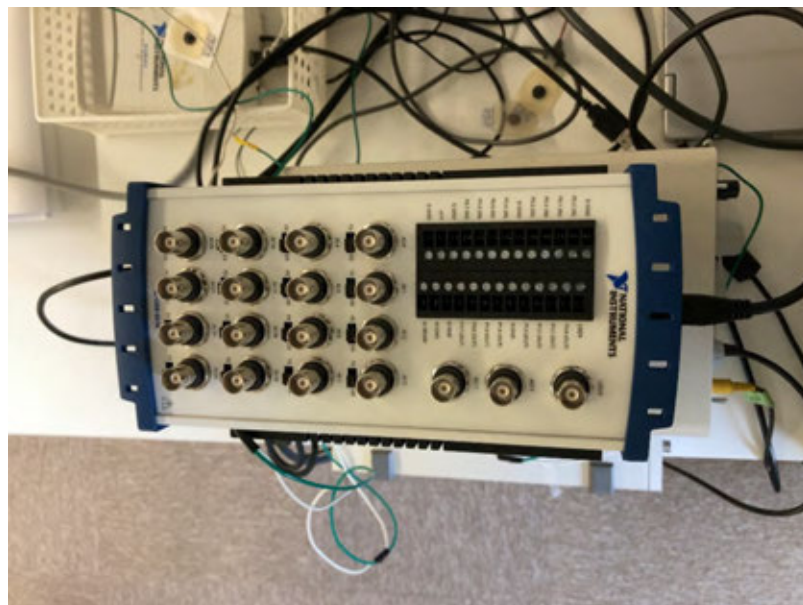


図 12： デジタル-アナログ変換器。

3. 消耗品準備

次年度、模擬微小重力暴露実験・実習を行うための消耗品準備をおこなった。

同実験・実習は、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た。以下にそのリストを記載する(表1)。

表1: 購入品リスト

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			

4. 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。

同社を訪問し、本実験・実習の意義を説明したのち、検体採取用スピッツの提供、検体採取および処理から提出、検査結果報告、経費請求といった検査に必要な手順を確認した。そのうえで岐阜医療科学大学と同社との間で業務委託契約を行った。

岐阜医療科学大学倫理委員会の承認(2022-20)を受けたのち、実際に検査を実施し、次年度滞りなく計測が行えることを確認した。

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。

予備実験として採血を行ったのち、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 13)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 13: 薬学科実習室内の遠心装置。

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）：

令和 4 年度は、6 箇所（IHI、東京慈恵会医科大学、徳島大学、久留米大学、フクダ電子株式会社、東京理科大学）を訪問し、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 28 名の学生が参加した。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。

2.3.1. 株式会社 IHI エアロスペースでの体験実習

1. 実施日 :2023 年 2 月 1 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 :4 名



図 14: IHI で会社の事業内容について説明を受けている様子。

実習内容

2023 年2月1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宇宙医学実習として見学をさせていただいた。宇宙医学に関心のある学生4名が参加した。

当日行ったことを以下に示す。

・IHI エアロスペースエンジニアリングの事業内容に関する紹介

IHI エアロスペースは、IHI が展開する事業の一つである宇宙開発を担う部門である。航空事業、宇宙開発、防衛産業の 3 本柱でそれぞれの設計、開発を行っている。当社はハヤブサの小惑星探査ミッションで有名であり、他にも宇宙ステーションへの実験ユニット輸送やイプシロンロケットの開発も行っている。また、日本ロケット開発の父である糸川英夫氏の図面（ペンシルロケットの図面）のサンプルが保管されている。

・新規事業で宇宙医学と関連する、宇宙で使える輸血器のサンプルの紹介

実際のサンプルを触らせていただき、各々感じたことをディスカッションした。

・ロケット等の製造現場の見学

実際のイプシロンロケットのフェアリング、エンジン部のボディや、エンジン本体の製造ラインをはじめ、新たな構造の開発現場や他企業と会議をする現場など、ものづくりの現場を見学させていただいた。

・IHI の職員の方との今後の宇宙開発に関するディスカッション

エンジニアの方や営業の方に対して学生から質問させていただいた。参加学生のバックグラウンドが、法学、機械工学、心理学と多様であり、宇宙医学分野に関わらず参加学生それぞれの興味に関連した事柄まで、自由に意見を交わすことができた。

実習で学んだこと

・機械工学系の学科で勉強をしており、宇宙開発について興味があったが、具体的にどこにどんな会社があって、何をしているのか全く知らなかった。それが、今回の実習を通して具体化された。また宇宙開発は、今回の宇宙医学のように、いままで地球で行ってきたものを宇宙でやること全てに該当することが分かった。モノづくりを学んでいる自分にとって、宇宙開発に携わる方法の一つではないことが今回の実習で得られた大きな収穫だったと思う。単純にロケットや衛星を作るだけではなく、宇宙での医療用器具や日用品、道路など、機械工学で学ぶ知識のすべてが宇宙開発を進めていく上で必要になってくると思う。それ故に、今学んでいることをより一層、真剣に取り組んでいきたい。

・初めて宇宙開発の現場を自分の目で見ることができ、宇宙開発を行うことで航空分野や防衛など多くの場面に還元できると実感した。特に意見交換会では、私が最も興味を持っている有人宇宙開発とものづくりについて、もし今後人が乗るロケットを作るとしたら、現在打上げを行っているロケットに加えてどのような工夫が必要か質問した。エンジニアの方から得られた回答としては、「人が乗るのだから今よりもっと“やさしく”設計しなければならない。」と、設計上人の安全のために振動を抑えたり、熱から守るなどの構造の設計が必要であるということであった。実際の製作や運用については、「これまで日本でやったことのないことであるため、経験がないということが障壁になっている。」と現場ならではの厳しい現状についても聞くことができた。イプシロンロケットや H3 ロケットの開発過程についても、発案から 10 年以上経って打ち上げができたことなど、これまでの開発の歴史について深くお話を聞くことができた。

・今回の実習ではこれまで自分があまり注目できていなかった、構造、飛翔物、空間設計などの“もの”と、それを利用したりそこで暮らす“人”との関係について考えることができた。また、現場で活躍されてる方と参加学生・教員それぞれがさまざまなバックグラウンドを持ち、それぞれの視点や知識をもって交流を行うことができ、とても有意義であった感じた。ものづくりは計画、設計、試作・試験、製作と工程が長期であり、特に宇宙開発分野はその時の情勢や政策にも左右されること知り、現場の難しさを知った。そのような状況でも、今後日本が宇宙開発を継続して進めていく中で、例えば人間が安全に宇宙へ行き宇宙で暮らすという目標を達成するためには、技術関連の知識と生物学的な知識の両方の視点が必要であり、立場や分野を問わずさまざまな機会で交流することが重要であると感じた。これは学生のうちからできることであるため、機会を大切にさまざまな視点を獲得したい。

2.3.2. 東京慈恵会医科大学・細胞生理学講座での体験実習

1. 実施日 : 2023 年 2 月 13～17 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 15: 東京慈恵会医科大学での実習作業の様子。

実習内容

2名の実習生が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に1週間滞在し、宇宙医学の基礎実験を実体験した。「HUVECの模擬微小重力環境下における重力応答」というテーマで下記の実験を実施し、そのデータを解析した。

実験項目:

- ① HUVEC(ヒト臍帯静脈内皮細胞)の培養
- ② GRAVITE 模擬微小重力(SMG)環境下実験
- ③ qPCRの準備(RNA抽出・mRNA濃度測定・cDNAへの逆転写)
- ④ qPCR - 遺伝子の発現量
- ⑤ 培養細胞の免疫染色 - 遺伝子の局在

結果:

<qPCR>

SMG環境下において、p62の発現量は減少傾向、VWF/ β -Actin / α -Tubulin / NOSは増加傾向が見られたが、いずれも有意差は見られなかった(図16)。しかし、p62の発現量はSMG環境下で増加することが報告されている(Chengfei et al., 2022)。相違が起きたことから、今回の結果の妥当性について検討した。同条件であれば、同温度で遺伝子の蛍光度はピークを示す。しかし、インナーコントロールであるGAPDHの解離曲線において、複数の温度でピークが見られた。これは、Primerや水がコンタミネーションしていた、またはcDNA作成に問題があった可能性が示唆された(図17)。

<免疫染色>

VDACと β -Actin、p62と α -Tubulin の共局在率に有意差は見られなかった(図18、19)。YAPと α -Tubulinの共局在率は1Gに比べてSMGのほうが有意に減少した(図20)が、YAPとDAPIの共局在率は、有意に増加した(図21)。これらの結果から、SMG環境下ではYAPが α -Tubulinのある細胞質から、DAPIのある核へ移行し、 α -Tubulinの発現量が増加したことが分かった。これより、模擬微小重力は、血管内皮細胞の増大や細胞増殖に寄与する可能性があると考えられる。これは、宇宙飛行によって動脈硬化のリスクが高まる原因の1つであると考察した。

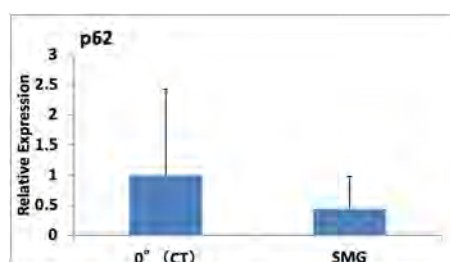
実験内容については、実習の最終日までにとまとめて、最終報告として報告した。(添付資料4.2)

実習期間中には、帝京大学の石岡憲昭先生に、宇宙渡航医学という観点からセミナーで講演いただき、実習参加者ならびに慈恵医大の学生が参加した(添付資料4.3)。宇宙飛行士だけでなく一般の人々も宇宙に滞在するようになると現在の宇宙医学分野での医療対策だけでなく、一般の方々に適応した新たな医療体制が必要という観点からの話があり、学生たちは新たな視点を学習することができたと思われる。

実習で学んだこと

今回の実験ではSMGを用いた実験であったが、完全な宇宙環境でなくとも宇宙という環境の特性を利用することで医学分野の発展の一助となり、宇宙環境の特徴の解明に繋がると考えた。また、宇宙医学の分野でも基本的な考え方や実験の手法は他の分野と同じであり、宇宙医学という分野を他の分野から切り離さずに1つの環境・条件として捉える重要性を感じた。ミトコンドリア(VDAC)と細胞内骨格(β -Actin)の共局在率について、さらに追実験して、VDACにかかる重力が β -Actinのたわみに影響を及ぼすことで、力学的に重力応答しているのを調べてみたいという意見も出た。既存のデータから、どの遺伝子が重力応答に関連しているのかを仮説をたて、一つずつ実験またはシミュレーションで実証していくことが地道ではあるが、研究において非常に重要であることが分かった。1つ1つの実験手法には意味があり、それを理解したうえで実習をしたほうが、実験結果に関して、深みのある考察をすることができて、新しい発見につながる可能性がある。

SMG 群/ 0° (CT) < 1



SMG 群/ 0° (CT) > 1

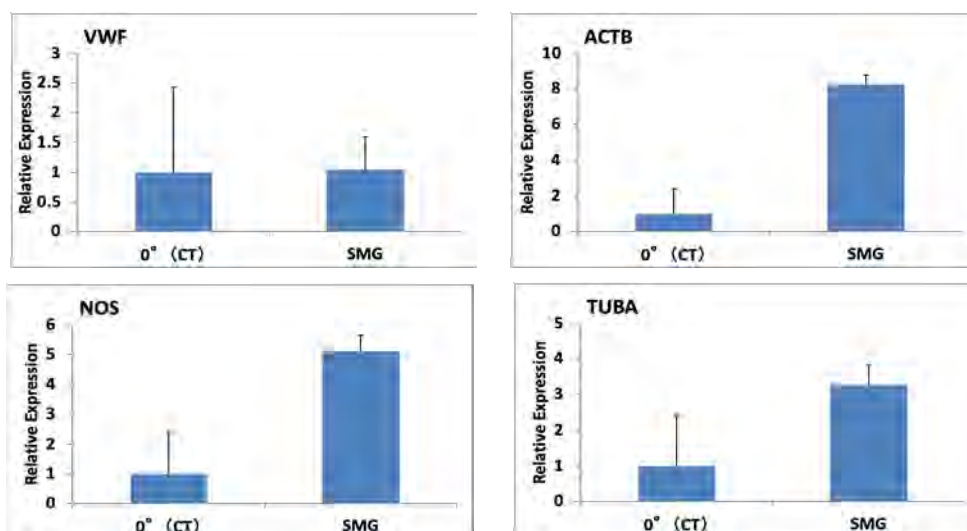


図 16: Gene Expressions from qPCR (p62, VWF, β -Actin, α -Tubulin, NOS)

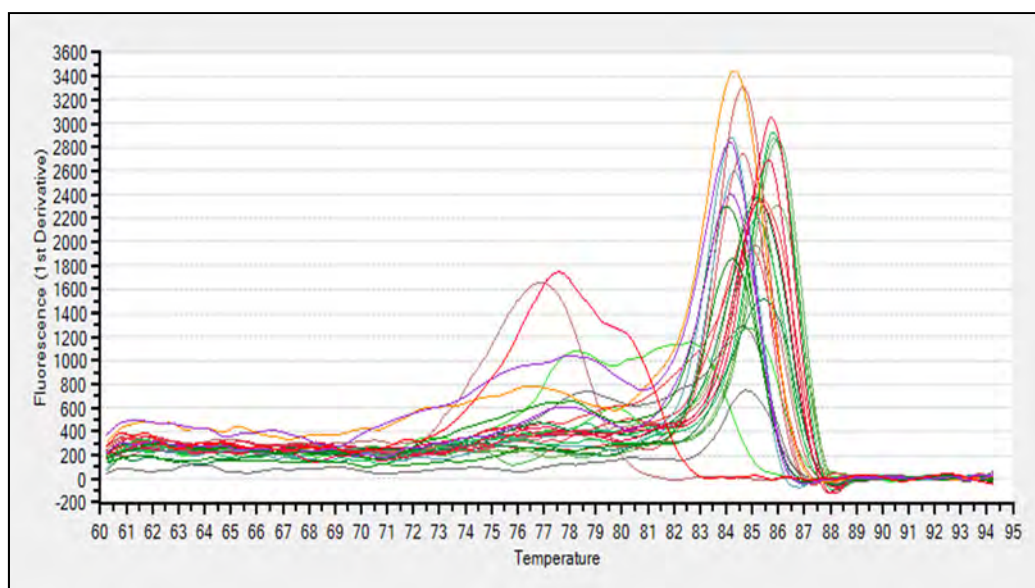


Fig 17: Dissociation Curve of GAPDH

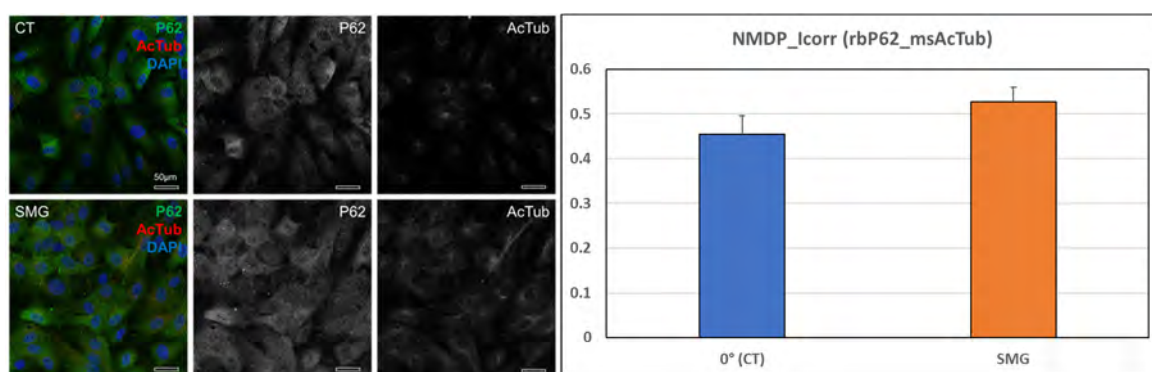


Fig 18: Correlation of p62 and α -Tubulin

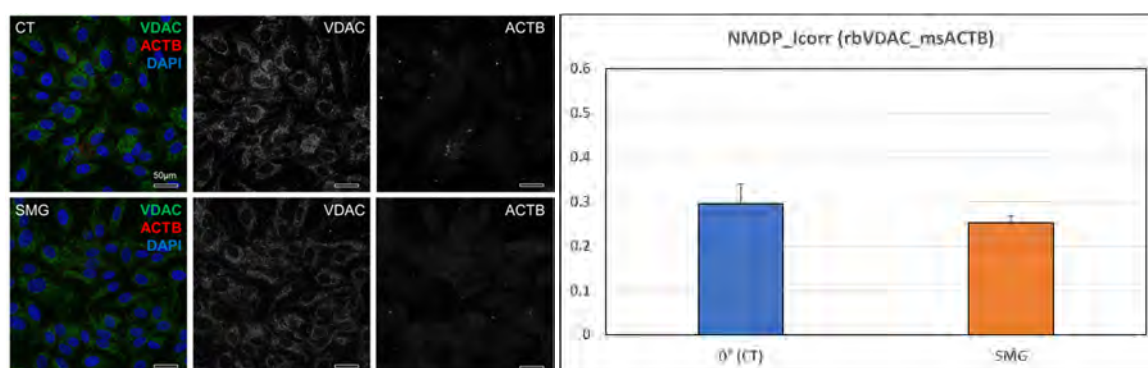


Fig 19: Correlation of VDAC and β -Actin

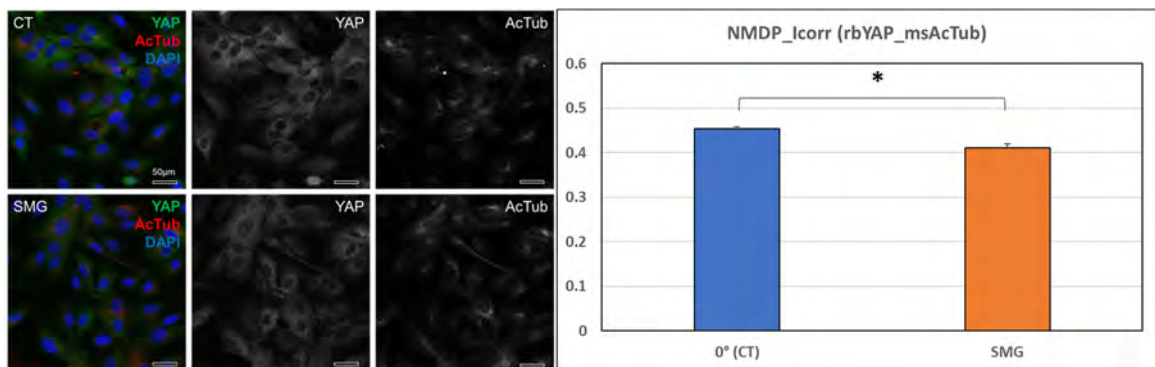


図 20: Correlation of YAP and α -Tubulin

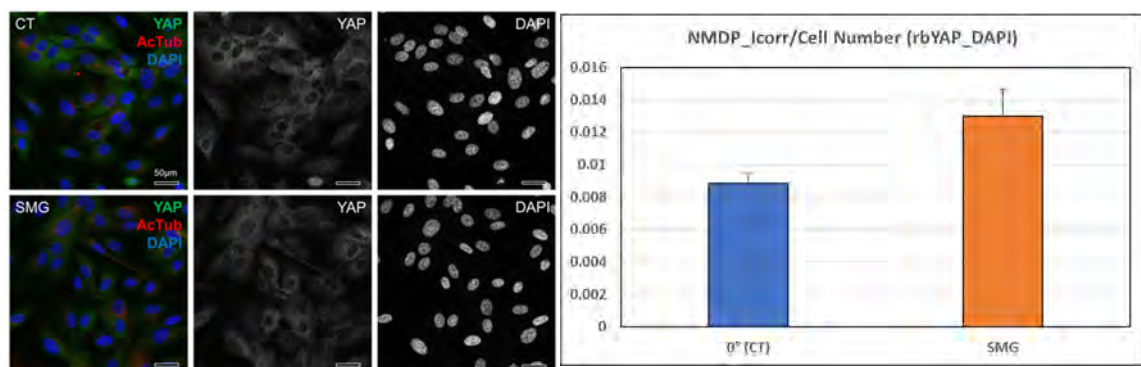


図 21: Correlation of YAP and DAPI

2.3.3. 徳島大学・宇宙栄養研究センターでの体験実習

1. 実施日 : 2023 年 2 月 17・18 日
2. 実施場所 : 徳島大学・大学院医歯薬学研究部・宇宙栄養研究センター
(〒770-8503 徳島市蔵本町 3-18-15)
3. 参加学生 : 8 名



図 22: 徳島大学の学生との意見交換会の様子。

2023 年 2 月 17 日、18 日に徳島大学・宇宙栄養研究センターにおいて、宇宙医学実習が開催された。京都大学より 3 名、東北大学、早稲田大学、日本獣医生命科学大学、慶応義塾大学、徳島大学よりそれぞれ 1 名ずつの、計 8 名の生徒が参加した。

今回の実習では、徳島大学内にある宇宙栄養研究センターの見学、徳島大学の二川健先生、内田貴之先生の講演、JAXA の東端晃先生、相羽達弥先生の講演、そして先生方や徳島大学医学部医科栄養学科生体栄養学分野の生徒との情報交換会が行われた。



図 23: 先生を囲んでの集合写真

実習内容・学んだこと

二川先生の講演:

2018 年に徳島大学に設立された「宇宙栄養研究センター」および 2023 年度から徳島大学大学院医科栄養学研究科に開講された「宇宙栄養学コース」の理念や活動についてご講演頂いた。

宇宙栄養研究センターについてのお話では、徳島大学の他学部の研究や、栄養学研究科のキャンパスが大学病院と併設しているという特徴を生かして進めておられる研究についてご説明頂いた。大豆食やコオロギ食についてのお話が大変興味深かった。

宇宙栄養学コースについてのお話では、栄養×リハビリテーション×災害食という、実際は繋がっているにも関わらず教育現場では別々に扱われてしまうことが多いテーマについて連携することの意義を理解することができた。先生がコースへの進学時の学費や、卒業後の就職先についても真剣に検討され、学生の立場に立ってサポートして下さることに感銘を受けた。さらに、今回の宇宙栄養学コースは、京都府立医科大学、国立健康・栄養研究所との連携であったが、今後は「宇宙」をキーワードに全国の大学院と連携し、繋いでいきたいというビジョンについてもお話くださった。

内田先生の講演:

内田貴之先生の講演では実際に宇宙実験を行った研究者として、宇宙実験の現場の様子や、実験内容についてご講演いただいた。

まず始めにご紹介いただいたのは実際の宇宙実験の現場についてのお話であった。このお話では例えば、いつ打ち上げ準備が始まるか分からない中で NASA の施設で待機し続けなければならなかったことや、実験機材が搭載されたロケットの打ち上げが失敗したことなど、宇宙実験を行う上での大変な面をご紹介いただいた。

次に実際の MayoLab 実験、Cell Mechanosensing 実験の内容についてのご講演をいただいた。実験内容の要点をつまんで記述すると、一般的に人類が一定期間の宇宙飛行をした際には筋萎縮が進展することが知られている。上の二つの実験はこの筋萎縮に対して、筋萎縮に至るメカニズムを明らかにするために実施された実験である。これらの実験では、微小重力下に置かれた筋細胞サンプルにミトコンドリアの断片化や、酸化ストレスの蓄積と ATP 生産に関わる代謝産物の変化、またサンプルのメタボローム解析によって cis-アコニット酸の蓄積が生じていたことを明らかにした。これらの実験データから、高い酸化ストレスへの感受性により容易に不活性化されるという性質を持ち、TCA サイクルにおいて cis-アコニット酸に関わる酵素であるアコニターゼに着目する

に至った。そこで、微小重力ストレスが加わることで酸化ストレスが増大し、そしてそれがアコニターゼの不活性化につながり、これを通じてミトコンドリアの形質異常やATP生産の低下を招き、このようなエネルギー代謝の変化が Cbl-b を通じた筋萎縮を生じさせているのではないか、という仮説が導かれたのである。またこの講義の最後には未だ解明されていない、微小重力下において筋細胞に酸化ストレスが生じるメカニズム、細胞が重力を感知するメカニズムについて現在実施中の Cell Gravisensing 宇宙実験などを通じて解明を試みていることをご紹介いただいた。

施設見学:

講義室から徳島大学医科栄養学棟に移動し、実際に食事介入臨床試験が行われている部屋や、植物栽培が行われている研究室、様々な実験機器の並んだいわゆる実験系のラボなど、三階に渡って施設見学をさせていただいた。特に印象に残っているのは植物栽培の実験装置であり、一見冷蔵庫のような箱の中で光の条件などを変化させながら人工的な植物栽培が行われていた。どこか近未来的であり、この研究が進んだ先には植物工場などが実現するのでは、という期待を抱いた。一方で、二川先生からは宇宙実験という輝かしい研究の裏には、地道で基礎的な研究の積み重ねがあるというお話もいただいた。何事も一足飛びに成し遂げることはできず、地に足をつけた研究が必要であると身の引き締まる思いであった。



図 24: 医科栄養学棟

JAXA 東端先生の講演:

東端先生の講演では、主に微小重力環境という特殊な環境下である ISS 内での実験の特性について講演していただいた。ISS は微小重力・宇宙放射線・高真空という 3 つの特性があり、これらの特性が動植物に地上では起こりえない影響を与える。例えば、筋肉・骨が弱くなる、免疫力が落ちる、バランス感覚が崩れるといった影響が動物に及ぶ。植物では、細く長く育ったり、茎や根の育つ方向が一定しない現象が起こる。

さらに、ISS 内での実験は研究者自身ではなく宇宙飛行士が代理に行う特性上、誰にでもできる実験系を考える必要がある。これは、簡単な実験系から最大限の成果が得られるように実験計画を考えている、ということだ。また、シャーレやピペット、大型器具や開放系の実験器具が使えないことから宇宙実験に特化した実験器具が必要になるそう。付け加えると、1G と μ G の両方で比較できる装置を持つのは日本のみである。

最後に、東端先生が仰っていた宇宙関連の生命科学研究の意義について紹介する。1 つ目は宇宙環境への適応に向けた生物研究。2 つ目は、宇宙環境と地球環境との違いから見えてくる生物の普遍的な性質である。例えば、重力の存在がカギとなる鶏の卵のふ化の話が挙げられる。3 つ目は、宇宙環境をツールとして利用すること。例として、有明海総合プロジェクトが挙げられる。講演内では、ISS で実際に行われた生命実験についての紹介も行われた。

JAXA 相羽先生の講演:

相羽先生からは「宇宙旅行者に対する宇宙医学研究」という題で、宇宙医学に関する研究事例や解決すべき倫理問題についてご講演いただいた。これまでに宇宙に滞在した宇宙飛行士から、SAS(いわゆる宇宙酔い)や視力の変化(とくに欧米系の方が遠視になりやすい)等の健康被害が報告されている。また筋力低下による体重

減少は、もとの体重に回復するまでに最低2年は必要である。さらに、循環系ふくめ身体が微小重力環境に適応するのに15 か月はかかると予測される。

すなわち近い将来、人類が長期間にわたり宇宙環境で暮らす可能性を鑑みるに、これらの体調変化を研究・理解することは急務である。そこで、これまで4つの民間医療ミッションが実施されてきた。その1つである米スペースX が打ち上げた Inspiration 4 は、はじめて71 時間のフリーフライヤーミッションを”民間人”だけで行ったミッションであり、宇宙環境が一般市民の健康や能力に与える影響・ストレスについて多くのデータが得られた。

Inspiration 4 は2021 年2 月に企画され、同年9 月に打ち上げと大変スピーディーなミッションであったが、今後民間旅行が増えた際「民間でどれだけ倫理審査を短くできるか」という問題は重要である。アメリカでは先を見越して WCG IRB(商業倫理審査委員会)による審査を導入した。しかしながら、そのメンバーは各会社の倫理”委員会”であり、倫理を請け負う専門の会社はいまだ存在していない。日本でもこうした委員会の設置や、倫理申請・承認のパッケージ化を行なうことで手続きの簡素化を狙うべきであると相羽先生は考えた。

最後に「民間における多組織のデータ共有ツール」についても言及された。NASA では CADRE という民間宇宙旅行を対象としたサンプルレポジトリを一般むけに公開している。我が国においてもこうした横断的なデータ管理や保存場所を設置することで、民間宇宙旅行の研究や実現が加速することが期待される。

情報交換会:

プログラム後には情報交換会が開かれ、教員と医科栄養学研究科の学生らとともに食事をしながら交流を深めた。会の中では宇宙栄養研究センターで開発された大豆パンとコオロギパンが提供され、その味や食感を楽しんだ(図 25)。

参加学生はそれぞれの出自や宇宙に興味を持ったきっかけ、宇宙への夢などを語り合った。各々の異なる専門分野から見た宇宙の捉え方を共有したことで、より多角的に宇宙を考える機会となった。また、医科栄養学研究科の学生とも、互いの研究内容や宇宙食への見解を語り合うなどして交流した。さらに、学生同士のみならず、教員とも交流した。宇宙への向き合い方のご助言や昨今の宇宙医学研究の動向を教えていただき、自身の宇宙への関わり方を見直すきっかけとなった。

この実習は、宇宙医学について学ぶという学習面だけでなく、このように宇宙に関心を持つ多様な分野の学生や研究者が交流できる場としても非常に貴重な機会であるといえる。



図 25: 大豆パン(左)とコオロギパン(右)

実習参加者の感想:

以前より二川先生の講義を通してコオロギ工場と植物工場を一体とした構想など、徳島大学宇宙栄養センターの取り組みには関心を持っていた。今回現地を見学させていただき、宇宙専門管理栄養士・理学療法士育成講座など、アカデミアにとどまらない広範な構想をお聞きし、視座を高めることができた。また、私の興味は宇宙開発が官民連携によって今後どのように発展し社会に貢献していくか、ということにある。実習を通じて研究者の立場からだけでなく、それらをサポートしている JAXA の方々のお話も聞くことができ、日本の宇宙開発研究の

現状や民間企業の役割をお伺いすることができ、非常に勉強になった。今回得た知見をもとに、更に考察を深めていきたい。

(京都大学大学院総合生存学館 3 年)

今回のプログラムでの最大の収穫は、宇宙分野は宇宙という特定の分野ではなく、物理や化学、生物といった様々な学問と緊密な関係にあり、どのような分野からでも宇宙分野に携われると分かったことだ。元々宇宙が好きだったものの化学・生命系の分野を専攻することになり、どこかで宇宙に関わりたいと思っていた自分にとって今回のプログラムは非常に有意義なものとなった。まだ専門分野が決まっていなかった大学 1 年生の冬に参加したプログラムであったが、将来宇宙に関係する仕事もできるようまずは目の前の勉学に励みたいと思う。

(慶應義塾大学理工学部生命情報学科 2 年)

宇宙医学というと健康変化や医療行為、ストレスが与える影響など医学研究が着目されがちで、専門外の私のような人間は蚊帳の外だと勘違いしていた。しかし、今回のテーマである宇宙食や諸制度の整備は、私の興味ドストライクであり大変有意義で収穫が多かったと思う。とくに制度整備は面白く、宇宙分野では実験装置や手続きなどあらゆるものの簡素化／軽量化を目指していることがよくわかった。またコオロギと大豆が生み出すうまい循環や、JAXA の方が有人に対して抱く構想も、自分の発想にはなく大変刺激的であった。

(早稲田大学基幹理工学術院 機械科学・航空宇宙専攻 1 年)

私は機能性宇宙食にもともと興味があり、今回のプログラムに参加した。先生方のお話しはもちろん、施設見学で実際に植物を栽培している装置を見学するなど、新たに学ぶことが多く、これからも興味を持って学び続けるモチベーションとなった。

しかし、今回の実習において一番刺激的だったのは、他の参加者の意見であった。私は普段栄養学や医学に関連した内容を授業で学んでいるが、それら以外の分野で普段学んでいる参加者が多かった。講演の質疑応答などで、自身の中にはなかった視点からの質問や意見を聞いて、自身の分野外の内容を学ぶことで、新たな疑問点やアイデアを得ることができるのではないかと気づくことができた。また、このようなプログラムに参加するのは初めてであったが、機会があればこれからも積極的に参加していきたいと思った。

(医学部医科栄養学科 3 年)

私は今回の宇宙医学実習を通して、宇宙分野の研究は特別なものばかりではなく、意外と身近なところにあるのだと感じた。例えば、施設見学では、研究分野の異なる私でも見たり、実際に使用したりしたことのある装置が多く見られた。お伺いした JAXA における仕事内容も、研究者に寄り添って研究の様々な調整を行うなど、想像していたよりもずっと地道なものであった。また、研究内容も様々な研究分野とのつながりがあるということを知ることができたことから、現時点では宇宙分野と関わりのない私でも、研究を続けていく過程で宇宙に関わる可能性があるかもしれないと感じた。今回の実習で、宇宙分野を身近に感じることは、研究において視野を広げることにつながり、これからの研究にプラスに働くと思う。

(京都大学農学部応用生命科学科 4 年)

私の専門分野は航空宇宙工学であり、今までも工学の観点から宇宙を見てきた。しかし今回のプログラムを受講し「有人宇宙プロジェクト」そのものへの考え方が変容した。今までの私は人類が月面に降り立つとき、火星に降り立つとき、月面に村ができあがるとき、それを作り上げるのは工学だと考えていた。しかし今回のプログラムを受講し「有人探査プロジェクトは工学的に実現可能になったからと言って、可能になるものではないし、なるべきものでもない」という考え方になった。なぜなら今回のプログラムで宇宙を舞台とする生理学という学問に触れ、また多様なバックを持つ受講生との交流を行う中で、有人宇宙プロジェクトが抱える非工学的課題に気がつくことができたからである。

このように、私は今回の医学的なプログラムにおいて自身の専門分野である工学を外側から考察する機会ができた。私自身、この先も工学の道を進み続けようと思っているが今回のプログラムのプログラムで培った広い視野をこれからも広げつつ自分の専門に向き合っていきたい。

(東北大学工学部機械知能・航空工学科 2 年)

この度は実習に参加させていただき、ありがとうございました。

プログラムの中で先生方のお話をお聞きし、自分の進路と今後の宇宙研究への向き合い方に自信を持てたことは大きな収穫でした。特に印象に残っているのが、二川先生が施設見学の際におっしゃった「宇宙研究は特別なものではなく、様々な分野の基礎的な技術と知識を組み合わせで行っている。」というお言葉です。学部卒業後に獣医学研究の道に進むことを考えている私にとって、専門分野で培ったスキルが宇宙研究に応用できる可能性があることは大変嬉しく思いました。自身のフィールドに誇りを持ち、ますます精進しようと思います。

また、学生同士の新たなつながりを得られたことは、自分の中で、実習に参加した重要な意義になりました。宇宙に関心を持つ学生が増えていることは漠然と感じますが、顔をあわせた直接の交流の機会は多くなく、今回のような機会は非常に貴重でした。さらに、「宇宙」で集まると興味深いのが、多様なバックグラウンドの方とお話ができることです。異なる専門分野の学生同士で意見を共有し、より様々な角度から宇宙を考えられるようになった経験は非常に刺激的でした。この実習で得られたつながりを、今後も大事にしたいと思います。

改めて、この度実習に参加させていただけたことを非常に嬉しく思います。二川先生と内田先生ならびに徳島大学宇宙栄養研究センターの皆様、東端先生、相羽先生、寺田先生、貴重な機会を下さり本当にありがとうございました。そして参加学生の皆様、宇宙についてたくさん語り合えて楽しかったです。今後ともよろしくお願い致します。

(日本獣医生命科学大学 獣医学部獣医学科 6 年)

私は作業療法というリハビリテーションの一種を専門としており、作業療法は患者さんの衣食住をはじめとした生活を支援することが専門であることから、宇宙における食を扱う宇宙栄養研究センターの取り組みに関心がありました。また、二川先生がすすめられた文部科学省宇宙航空人材プログラム 宇宙専門管理栄養士/理学療法士育成講座は、宇宙リハビリテーションを目指す者としては一大ニュースであり、意図や詳細を伺いたいという思いでプログラムに参加させていただきました。実習を通し、インターネットを検索しただけではわからなかった、二川先生の思いやビジョンに触れることができ、視野が広がったように感じました。懇親会では先生方とたくさんお話をさせていただくことができ、大変充実した時間を過ごさせていただきました。また、徳島大学医科栄養学科の学生さんとも交流することができました。二川先生は宇宙栄養学コース設立の狙いにおいて栄養学とリハビリテーション学の距離が遠いことについて指摘しておられましたが、私の経験としても、栄養学はリハビリテーショ

ン学と近い領域であるにも関わらず、栄養学の学生さんに関わった経験はこれまでほとんどありませんでした。突然おしかけた私たちを歓迎してくださり、栄養学を志したきっかけや行っておられる研究、今後どのような進路を目指されるのかなど、等身大の話をうかがうことができ、楽しい時間を過ごさせていただきました。

この度は、貴重な経験をさせていただきありがとうございました。今回の学びを糧に、よりよい宇宙社会の発展に寄与できるよう今後も努力していきたいと思います。

(京都大学医学研究科修士課程 2 回生)

2.3.4. 久留米大学・整形外科教室での体験実習

1. 実施日 :2023 年 2 月 22 日
2. 実施場所 :久留米大学・整形外科教室(〒830-0011 福岡県久留米市旭町 67)
3. 参加学生 :3 名

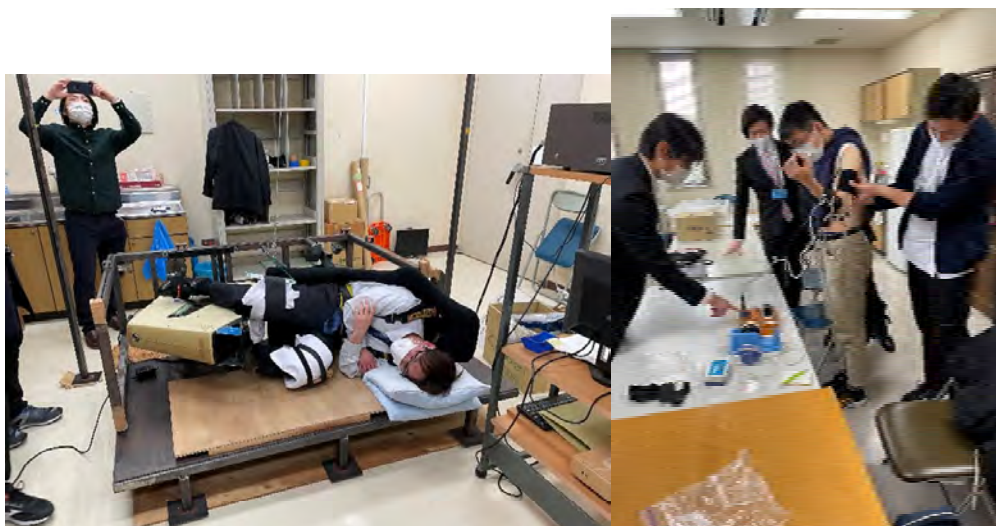


図 26: 実験機器の体験の様子。

近年、多くの国々が宇宙開発に積極的に取り組んでおり、近い将来一般市民も宇宙旅行を楽しむ時代が到来することが予想される。この急速に発展する宇宙開発を考慮すると、宇宙空間での人体の生理学的変化や解剖学的変化など、宇宙空間が人体に与える影響を理解することは必要不可欠であり、医療従事者として宇宙医学の理解を深めることは非常に重要と考えられる。今回、久留米大学のプログラムへの参加を通じて、今後の宇宙医学分野での自分達が果たせる役割を考えるきっかけを得ることを目的に、実習へ参加した。実習では、まず初めに先生方から講義をしていただき、その後体験を実施した。ここでは講義、体験、それらから学んだことについて3つに分けて記載する。

実習内容

講義について:

講義では、HTS(Hybrid Training System)、シュミレーションソフト、側臥位での自転車エルゴメータに関する実験について受講させていただいた。

- ① Hybrid Training System(Hybrid Training System)(田島先生、松瀬先生)

初めに、HTS(Hybrid Training System)についての講義を受講した。HTS とは電気刺激と随意運動を組み合わせた筋力トレーニングの方法である。通常、筋肉に対する電気刺激は随意運動を補助するために用いられるものであるが、随意運動に対する抵抗として電気刺激を用いるという逆転の発想により効率良くトレーニングを行い、限られた宇宙滞在の期間を有効に使うことができることが、HTS の利点である。また、将来的に開発が進むと思われる小型の宇宙船には、大きなトレーニング機器を持ち込むことは難しいが、この HTS であれば小さな電源と電極パッドのみで搭乗員の筋力トレーニングを行うことも、利点であると言える。HTS の仕組みは以下のようなものである。例えば腕を曲げる際に、伸びようとする肘側の筋肉に縮もうとするように電気刺激を加えれば、筋肉はそれに逆らって伸びなければならないため、負荷がかかる。また、腕を伸ばそうとする際は肘の内側の筋肉に電気刺激が加わり、負荷がかかる、といった具合である。

講義では若田宇宙飛行士を被験者として HTS の実験を行った際のお話を聞くことができ、実際の宇宙実験におけるスケジュールリングの難しさや、数名しかいない宇宙飛行士が世界中の宇宙実験の被験者となることに起因する制約についても学ぶことができた。実験直後にデータを取るため、地上帰還直前の期間に HTS の実験は行われた。下肢には他の実験があるため、上肢での実験となった。HTS の電圧調整のためフライト前の若田飛行士に HTS を装着してもらう際、NASA の職員しか若田飛行士に直接触れられないことの不便さがあった。宇宙において、若田飛行士に HTS の装着方法を指示するためのマニュアルを作成しなければならず、また、実験期間中に装置が壊れた時の対応を考えておく必要もある(そもそも壊れないように、実験装置は最新機器ではなく、宇宙での使用実績のある一昔前の装置を使わねばならない)。このようなさまざまな障壁を乗り越えて一つの宇宙実験が成り立つことを学ぶことができた。

講義の最後には実際に宇宙で若田宇宙飛行士がつけた HTS の装置を、装着させていただくという貴重な体験ができた(図 26 右)。

② シミュレーションソフト(田川先生)

次に、工学分野の視点からシミュレーションソフトについての講義を受講した。宇宙環境を想定した実験では人体の許容可能な負荷を超える可能性があり、倫理的な問題や人体への悪影響を考慮するとそのような実験を行うことは難しい。また、実際に宇宙で実験を行くことも難しいため、シミュレーションソフトを開発することが有効な手段となる。実際に開発したソフトを使用することで、人体にかかる負荷を想定するだけでなく、新しく開発した機器が宇宙環境において船体にどのような影響を与えるのかについてもシミュレーションすることができる。一方で、行ったシミュレーションがどの程度正確性があるのか悪影響が出ない範囲で人体実験を行い、その妥当性を検証する過程も必要になる。今回の講義の中でも人体実験とシミュレーション上では一部結果が一致しない部分が生じていたが、なぜそのような現象が生じたのか検証することは非常に難しく、難易度の高い問題に対峙していることを肌で感じた。

③ 側臥位での自転車エルゴメータ(大本先生)

最後に、側臥位での自転車エルゴメータに関する研究の講義も受講した。さまざまな制約により実際に宇宙空間で実験を行うことは難しいため、可能な限り宇宙に近い環境で実験を行うことが必要になる。無重力状態を作り出す手段として、従来からパラボリックフライト中に実験を行う方法が用いられてきた。しかし、パラボリックフライトでは短時間しか無重力状態を維持できないことから、定常状態に達するまで一定時間を必要とする有酸素運動などについては無重力下における影響を検討することが難しかった。そこで、今回の講義で紹介された実

験では、地上において可能な限り重力の影響を除くために側臥位で自転車エルゴメータを使用し、無重力状態を想定しながら酸素摂取量や一回拍出量などを計測していた。また、エルゴメータの角度調整を行うことで身体にかかる重力を微調整できることもこの実験方法では可能になる。宇宙に可能な限り近い環境で実験するための創意工夫を感じた。

体験について:

体験では、実際に側臥位での自転車エルゴメータや商品化された HTS について体験させていただいた。

① 側臥位での自転車エルゴメータ体験(図 26 左)

側臥位での自転車エルゴメータの体験では、装置についての説明をしていただき、実習者一人が実際に体験させていただいた。方法は対象者を自転車エルゴメータに固定し、エルゴメータごと横に倒すという非常に単純なものであったが、さまざまな創意工夫がなされていた。具体的には、側臥位で上になる下肢を上から吊るした紐で浮かせ、下になった下肢をスムーズに滑らせるためにタイヤがついたボードの上にのせる、側臥位で被験者が椅子から転落しないためにレースカー用のシートやシートベルトを使用して固定する、エルゴメータに関してはデータを直接収集できるようにカスタマイズするなど、多くの工夫がなされていた。また、装置はできるだけ安価に仕上げるために必要最低限でかつシンプルなデザインで作成していた。これらの技術は医学者だけでは作成できないものであり、医工連携の賜物だと感じた。

② 商品化されたHTS体験

先述の HTS は、下肢用のものが地上での商品化もされており(現在は発売されていない)、その体験をさせていただくことができた。下肢に電極パッドを装着し、使用者に適した電圧に調整した後、歩行モードやスクワットモードなどのモードを選んでその運動をすると、確かに運動に対する抵抗となるように電流が流れているのが確認できた。また、マニュアルがないと装着できないような宇宙実験時の HTS 装置に比べて非常に分かりやすい設計となっており、高齢者やリハビリ中の人でも使用しやすい工夫が感じられた。宇宙医学が必ずしも宇宙開発のためだけに役立つのではなく、地上社会に還元されていることを学ぶことができた。

実習で学んだこと

シミュレーションソフトや側臥位でのエルゴメータの実験などは宇宙に行くことが難しい状況の中で、宇宙環境を想定した実験を地上でどのように実施するのか試行錯誤の末にたどり着いた方法であり、そこには創意工夫や発想の豊かさ、さまざまな分野との交流が必要になってくることを学んだ。一方で、地上でのシミュレーションや実験は完全に宇宙空間を再現できるものではないことから、その妥当性について検証することは難しく、難易度の高い問題に対峙しているということを考えさせられる良い機会となった。また、宇宙開発は最先端でダイナミックなイメージがあったが、現状数名の宇宙飛行士しか対象者がいないことや、気軽に宇宙に行けないこと、宇宙では確実性や安全性の高い機器しか使用できないことなどから、地道に少しずつしか進むことができないことを理解した。さらに、宇宙環境は環境の一部であるため、実験をする上で地上でいかに役に立つのか、どのように社会に還元できるのか、広い視点を持ちながら考えていくことが非常に重要だということを学んだ。

「宇宙医学」という学問はまだ一般的に広く認知されているとは言い難く、研究室も少ないため、勉強する際はほとんどが書籍を読む・動画を見るなどに留まるのが現状であるが、そのような学習で得られるものにはやはり限界がある。今回の講義及び装置の体験を通して、論文や書籍に記載されることのない小さな話を含め、宇宙

医学の研究がどのように行われているのかを鮮やかさをもって学ぶことができた。今回の実習を通して学んだ知識や体験、地道なアイデア・工夫を参考に今後広い視野を持って活動していきたい。

2.3.5. フクダ電子株式会社での体験実習

1. 実施日 :2023 年 3 月 1 日
2. 実施場所 :フクダ電子株式会社(東京都文京区本郷 2-35-8)
3. 参加学生 :6 名

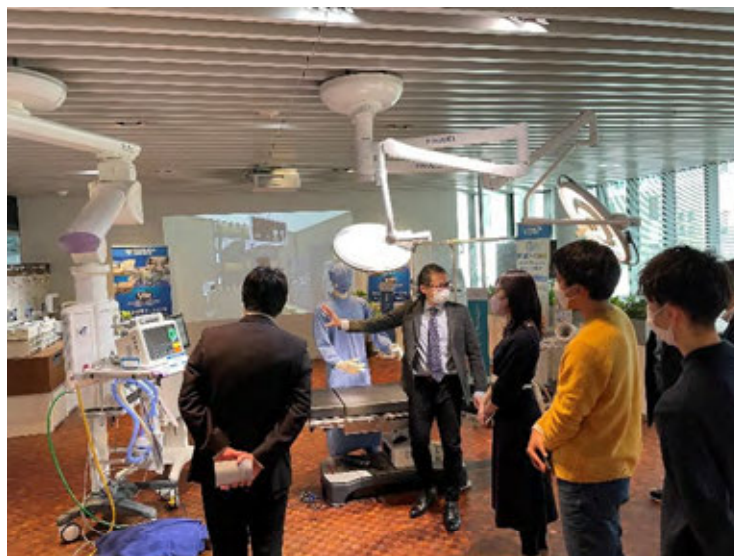


図 27: フクダ電子株式会社での見学の様子。

実習内容・学んだこと

フクダ電子株式会社で宇宙医療に関わる講義を受け、宇宙医学・宇宙医療に関わる議論を行った。実際に扱う医療機器も見学し、宇宙への応用の可能性についても説明を受けた。

講義について:

フクダ電子株式会社(以下 フクダ電子)(図 28)は心電計を祖業とし、脈波、人工呼吸器、生体モニター、診療支援システムの開発に進出してきた。最近では人工呼吸器のサポートから、災害時緊急サポートシステムも導出している。

医療機器市場の現況として、市場規模は米国が 1500 億米ドル、日本が 280 億米ドルであり、新興国が伸びているものの依然として日本の市場は世界 2 位と大きい。日本は治療機器を多く輸入に頼り、仕様や言語対応、規制、患者の新規機器受け入れの難しさなどのために国内勢の新規参入が難しい。そのためフクダ電子は検査機器を中心に国内の販売をかためる戦略を描いている。国内医療機器の課題として、人口減少による医療従事者減少、ロボット機器など医療機器の進歩による医療費高騰、ウェアブル端末増加等による機器への干渉があり、それぞれ医療機器による代替、機器の効率化、機器への影響低減法の開発により解決していく必要がある。一方で、医療機器の開発には販売まで 3 年から 5 年程度かかるため、ビジネス側によるコンセプト立案と市

場調査が研究開発の方向性に重要である。実際に JAXA へホルター心電図を提供した際は放射線防護や難燃性確保など追加の開発が必要であった。

宇宙医療を考える時には、誰のためか、何のためかというニーズの設定が非常に大切である。JAXA では医療技術ギャップを公表しており参考になる。その上で、ビジネスになるかどうかを十分に検討する必要がある。宇宙医療をビジネスとするには解決されていない課題が数多くある。例えば莫大な打ち上げ費用を回収できるのか、品質保証にどの基準を利用できるのか、医療機器業界団体で品質基準を作成すべきか（医療機器は ISO13485、宇宙技術は AS91100、JIS Q9100）、医療機器研究は臨床研究としてどう取り扱うべきか、PMDA で審査を行えるのか、地上と宇宙で検査診断を行うならば労災や法務上の取り扱いをどのようにすべきかなど、多数存在する。

深谷先生はフクダ電子の宇宙医療に関わる将来事業として、医療機器電源の安定化、医療情報のサマライズ、医療インフラとしての人工衛星による通信を検討している。宇宙医療だけでなく、いわゆる極限環境とされる遠隔地や災害被災地での応用を見込んだ提案である。予防医学が宇宙医学の応用先として提案されることが多いが、実際の医療分野における利益を考えると適用が難しい場合が多いため、地上における極限環境での医療を対象として提案を検討している。



図 28: フクダ電子株式会社(東京都文京区)

施設見学:

医療機器の見学(図 29)とともに、深谷先生による熱意あふれる講義があり、その後の議論も活発であった。議論は宇宙医学の定義にも及び、宇宙に関わる医療そのものを宇宙医学と称するのは難しいこと、体系化がまだ不十分であり宇宙のみを対象とするより関連する分野から専門性の 1 つとして研究開発、事業化を進めていくのがよいといった意見が交わされた。



図 29: ホルター心電図(左)。社内の機器展示(右)。

実習参加者の感想:

実習に参加する前、宇宙医学と予防医学の類似を指摘している文献を読み、所属している研究室が予防医学研究を行なっていることもあり、宇宙医学の予防医学への応用について特に興味を持っていました。しかし、実際に機械を送るとなった場合の試算を見せて頂いてかかるコストが現実的でないこと等の説明で、応用はまだまだ発展途上で、一筋縄ではいかないということを知ることが出来ました。医学の視点ではなく、企業独特の視点で宇宙医学を俯瞰出来て、意義深い実習となりました。

(京都府立医科大学医学部医学科3年生)

私自身、将来は宇宙医学×ビジネスの領域でキャリアを進めたいと思っており、大変興味深い話であった。特に宇宙領域はまだまだフロンティアで、まずはルールメイキングに関わっていくことが、プレイヤーになる上で重要だという観点は、今後のキャリアを考える上で重要なポイントであるように感じた。宇宙領域では、NASA や JAXA などの公的な組織から、民間の会社へと、プレイヤーの移行が進んでおり、公的な組織を目指すことに私自身あまり意義を感じていなかったが、ルールメイキングに関わっていくという意味では、NASA を目指すというのも一つの方向性であるように感じた。

(大阪公立大学医学部医学科5年)

心電計を作っていた企業が、世の中の変化に合わせて他の医療機器の販売や開発を行っていくというプロセスを詳しく聞けて、現状をしっかりと把握し、将来のための戦略を論理的に考えることの大切さを感じた。また、長年培ってきた技術の蓄積が期せずして、災害対策用のシステムに活かされたり、ISS に持っていく心電計に採用されたりといった事例をしり、技術を高め、自分の価値を上げることで思いがけないチャンスが舞い込んでくることを学んだ。宇宙医学に挑戦することを考えている自分にとって現場で働く方の生の見識を知ることができたのは大切な経験だった。

(横浜市立大学医学部医学科2年)

フクダ電子の深谷先生が非常にアグレッシブに活躍されて民間企業社員の立場から宇宙医学の推進に大きく貢献されている姿が印象的だった。一方で、宇宙医学の組織化や体系化が十分に進んでおらず、学術やビジネスにおけるマッチングが不十分であることも課題として強く感じた。今後、自らも若い頃からの疑問である人

類・地球・宇宙の起源探求のために、宇宙をフィールドに医師の立場で仕事をしたいと考えているため、私も機関の壁を越えて宇宙医学・医療を体系化・統合できるような働きができればと強く感じる。

(東北大学大学院医学系研究科博士課程 4 年(災害感染症学分野))

自分が今回の見学を通じて、そもそも現在の宇宙に関連している医療を「宇宙医学」と称していいのかということを考えるようになりました。現在、宇宙で行われている医療は宇宙飛行士の無重力空間での身体変化の計測や、製薬などが主です。しかし、私が宇宙に興味を持った理由は宇宙で点滴をどうやってするのか、であり、臨床について関心があります。これら全てを含めて「宇宙医学」とするのは、よくよく考えればかなり横暴なことなのかなと思うようになりました。だからこそ、深谷さんが宇宙医療と称されていたことが印象に残っています。今はどの道、打ち上げ費用が全てのボトルネックになっているので、これからの宇宙開発を期待しつつ、常に関心を向けていきたいと改めて思いました。

(大阪医科薬科大学医学部医学科 2 年生)

現代日本では、少子高齢化に伴い人口が減少しており、今後現役世代の医師不足が生じると考えられるが、そのような状況においても、平時に加え災害時や極限環境においては、人々に適時・適切に医療を提供することが求められる中、以下のことについて学んだ。

フクダ電子では、災害時に療養者への在宅酸素、在宅人工呼吸器の提供、災害時の安全と安心を守るための「フクダレスキューウェブ」により、気象庁の注意報・警報、被災地における詳細な災害情報をもとに、災害対策本部と被災営業拠点との連携を推進し、治療者一人ひとりの情報を把握して、所在確認情報を医療機関に迅速に報告して、治療者の安全を確保している。さらに、療養に必要な物資の供給にも役立っている。

国立極地研究所と宇宙航空研究開発機構において、宇宙での長期滞在と南極越冬生活における健康管理技術の向上を図ることを目的とした、特殊な日照時間の体内リズムへの影響、新しい運動トレーニング法の有効性、長期間入浴できない状態での皮膚の衛生管理技術、といった共同研究が実施され、極限に近い現場に具体的に役立ち、宇宙医学にも繋がる有用な成果が得られた。

宇宙医学の発展においては、地球上と大きく異なる、重力、日照、閉鎖空間の相違に基づいた人体への影響(心拍、血圧、呼吸、身体・器官の成長など)の調査・解明が急務であると考える。

(公立諏訪東京理科大学工学部 2 年)

2.3.6. 東京理科大学・スペースシステム創造研究センターでの体験実習

1. 実施日 : 2023 年 3 月 9 日
2. 実施場所 : 東京理科大学・スペースシステム創造研究センター(千葉県野田市山崎 2641)
3. 参加学生 : 5 名



図 30: モジュール見学の様子。

実習内容

東京理科大学スペースシステム創造研究センターの木村真一先生のご案内により、同施設の研究成果や現在進行中のプロジェクトについての説明・案内を受け、最後に参加者も含めた全員で今後の宇宙開発、宇宙医学における展望や問題点について Discussion を行った。

【スペースシステム創造研究センターについて】

宇宙と地上に共通する様々な課題を解決するために、地上⇄宇宙の好循環サイクルの形成により分野横断的な技術・人材を結集できる共創の場の構築を目指すことを目的に、2021 年 4 月に創設された。

現在進行中のプロジェクト:

① 拡張可能な居住区画・モジュール(東京理科大学と清水建設で共同開発)

(研究の背景)宇宙開発の初期においては、建築の素材の現地調達は困難であり、地上からの輸送が必要となる。そのため、輸送時にできるだけコンパクトで省スペースなモジュールが望まれるが、同時に、放射線の影響を軽減し、内部の気密性を保つことができる素材、設計でなくてはならない。

(特徴) 空気で膨らませるインフレータブル構造を採用しており、1m * 1m * 0.5m まで小さくたたんで輸送することができる。同じ薄さの金属と同程度まで放射線を遮蔽することができる。



図 31: 開発されたモジュール(左)とその内部(右)。

(現在の課題と今後の展望)

・外的損傷と宇宙線への対処

小隕石に代表される外的損傷や宇宙線から内部の人員を守る必要があるが、モジュールのみでの対応では限界がある。月面においては、解決策として地下に広がっている地下洞窟内や深いクレーター内に投下し展開することで、隕石や宇宙線の影響を緩和する案があがっている。また、限定的な外的損傷に関してはこのモジュールの拡張型という特性をいかして、AI で損傷を検知したら損傷部位を縮ませてその周囲を拡張することで損傷部位の穴埋めをしてしまう「自己修復型」モジュールへの発展が検討されている

・人員のストレスへの対処

宇宙空間では大きなガラスを使用することができないため、窓がなく閉鎖的な環境となり、人員のストレスへの影響が懸念される。このモジュールの内部の壁面には画像を投影することができ、地球のパノラマなどを投影することでストレス軽減を行うことができる。モジュールの内部の全面を窓化することを想定されていたが、窓枠、フレームを付ける事でリアリティを感じやすくなるとの学生からのアイディアもあり、よりストレス軽減につながる投影法が検証されている。

・探索型ユニットや探索拠点への発展

宇宙では脆弱なガラスを多用することができず、車のフロントガラスのように探索車の視認性を確保することが困難であり、有人探索の支障となることが予想される。このモジュールを走行型に改良し、同時に周囲に複数の自立走行型ロボットを走行させ、集めた画像データをリアルタイムで内部に投影することで、全面がフロントガラスのような状態で探索を行うことができる。あるいは、モジュールは動かさずにロボットのみを惑星・衛星の探査へむかわせ、モジュールの内部に統合した画像データを投影することで、コロニーから動かずに惑星探査を行うことも可能となる。



図 32: 装置プロトタイプ稼働状況の見学の様子。

②光触媒ユニットの開発

(研究の背景) 現行の国際宇宙ステーションでの長期滞在などで問題となっているのが、乗組員の排泄物などによる悪臭である。地上のように換気を行うこともできないため、持続的、自立的な消臭システムが求められている。

(開発の特徴) 酸化チタンに代表される光触媒は、その強い酸化分解力から、有機汚染物質の分解や殺菌・抗菌に効果を発揮する。光触媒は紫外線のみで繰り返し消臭効果を発揮し、長期耐用性があり、環境負荷も少ない。光触媒を用いた居住空間、ユニットの開発の研究が進められている。

③スペースデブリ（宇宙ごみ）を回収するシステム

(研究の背景) 活動が終了した人工衛星や、打ち上げ時や人工衛星の破損により放出される破片などのスペースデブリは秒速数 km の速度で軌道上を移動しており、今後の宇宙開発における脅威は日に日に増している。いわゆるケスラー-シンドローム(Kessler syndrome)は、地球周回軌道上のスペースデブリの密度がある限界を超えると、衝突・破壊の連鎖によって宇宙ごみが爆発的に増え、宇宙開発を行えなくなるという理論である。早急なスペースデブリの回収システムの開発が必要とされている。

(研究の特徴) デブリの位置は地上からだと km 四方での把握しかできず、デブリの大まかな位置がわかったあとはロボットが自律的にデブリを認識し、接近しなければならない。そのためには、ロボットの「目」となる高性能なカメラシステムが必要で、宇宙空間でも問題なく性能が発揮されなければならない。木村研究室では「はやぶさ2」や「こうのとり」へ搭載されたカメラシステムを開発した実績があり、ロボットの遠隔操作や自律制御、画像処理の研究を進めながら、デブリ回収システムの構築を進めている。質量をもったデブリの微小重力環境での挙動を二次元的に解析、体感するために、空気圧により物体を浮遊させることができる実験台を用いたシミュレーションが行われている。

実習で学んだこと

① 宇宙研究・研究全般での心構え

・ある物事を解明しようとする、細かい現象に注目してしまい研究が進まなくなってしまうということもあるので、ある狭い範囲の事柄に注視するだけでなく、研究の方向性を持ち広い視野で研究していくことが重要

- ・人脈や縁を大事に
- ・自分の当初の関心や動機を大事に維持し続ける

② 宇宙空間での精密機器に対する影響

(熱)

熱の伝導形態としては、対流・電導・輻射の 3 種類があるが、真空では空気による対流がなく、熱が逃げにくい。そのため、宇宙空間で日陰から日照に切り替わった後に急激な温度上昇をきたす。例えば、基盤では素材ごとに熱膨張率が異なり、急激な温度上昇により素材同士が剥がれてしまう可能性がある。ある衛星では日陰から日照になった際のみ姿勢が乱れる現象がみられたが、基盤が熱膨張により機能しなかったためと考えられる。

そのため、精密機器では事前に十分な熱耐性試験を行い、所定の機能、性能を発揮できるか確認する必要がある。Thermal shock chamber を用いることで、180℃と－80℃の空間を瞬時に入れ替えることができ、効率的に熱耐性試験を行うことができる。

(宇宙線)

宇宙線にはアルファ線、ベータ線、中性子線、陽子線などの粒子放射線と、ガンマ線や X 線のような電磁放射線がある。これら宇宙線が精密機器の半導体に照射されると、電離作用をおこし、誤作動や故障の原因となりうる。そのため、事前に放射線試験を行い、機器の耐用性を検証する必要がある。半導体は同じ製品でも製造ロットによって放射線耐用性が異なることがある。そのため、ロット管理を厳密に行われている。例えば、100 個同じロットの半導体を購入し、そのうち 3 個を放射線試験や実際の宇宙開発で問題なく使用できた場合は、それが宇宙線に耐えたという実績になり、同じロットの残りの 97 個の半導体の信頼性、付加価値が高まる。

実習参加者の感想:

医学生として今後宇宙医学にどうかかわっていくか悩んでいる段階において今回の実習に参加することで新たな視点を学ぶことができた。木村先生はいろいろな分野の研究をなさっていて、専門ではなかった分野についても、資料を読み解き理解し、技術者と議論なさっていたとのことであった。今後医学的な分野で宇宙開発をするにあたり、医学の知識だけでは解決できないことも多々あると考えられる。そのため、どんな分野でも積極的に様々な知識を身に付け、応用していく姿勢を持つことは重要だと感じた。医学的な知識があるからこそ応用できることに気づくことができるということもあると思うので、積極的に、探求心を持っていきたいと感じた。

(医学生の立場から)

木村先生のご研究や研究施設のご紹介、そしてディスカッションでは、宇宙開発において考慮すべき要素は自分が想像していたよりもはるかに多くあることを学びました。製品の品質はもちろん、昼夜の切り替えの遅さや切り替え時の急な温度変化、打ち上げ時の振動、などさまざまな要素があり、医学と宇宙開発の組み合わせを考える上での可能性が広がりました。宇宙での人間の居住スペースは空気が循環して用いられているためフレグランスの使用が不可であり QOL に影響するというお話も興味深かったです。多様なバックグラウンドを持つ参加者の方々がそれぞれの視点をもって先生に質問なさる様子からも宗教観・生死観の問題など新たな視点に気づくことができました。

(医学生・大学 1 年生の立場から)

今回の研修で、有人宇宙開発は夢物語ではないということが改めて実感できた。課題を正面から受けとめ様々なアプローチを行う研究室の様子を見て、自分自身も目標に向かって努力しようという気持ちが高まった。実際に見学し木村先生とお話しさせていただいたことで特に興味のある分野やアイディアをより明確にすることができたので、それらを参考に引き続き宇宙医学に対する理解を深めていきたい。

(医学生・大学 1 年生の立場から)

今回の実習を通じて、今後日本が宇宙開発の中枢に食い込んでいく方法としては、ロケットで競争するのではなく、より人類にとって必要不可欠な衣食住という点で鍵となるテクノロジー、ノウハウを握る点が最も現実的で効果的な方法であるという考え方を知り、感銘を受けた。その観点では、衣食住に加えて、医療も今後の宇宙開発で必要不可欠な要素であり、日本のプレゼンスを保つ上で重要と考えた。微小重力環境における循環動態、呼吸動態などの生理学的研究や薬理学的研究に加え、診断学や治療などの臨床的な研究も重要となる。これまで宇宙空間で外科手術が行われた例はないが、今後宇宙開発が発展し、月面やさらには火星など、期間に数日、数ヶ月を要する状況において外科手術を必要な疾患を発症する可能性は高まる。宇宙外科分野においては、微小重力環境でも簡便に操作でき、コンパクトな手術用ロボットおよび手術ユニットの開発、ナビゲーションを主とした手術支援 AI の開発が特に重要となってくると考えられる。

外科手術はリアルタイムでの画像と処置が必要であり、タイムラグがある術野の情報をもとに操作を行うことは危険性が高いため、ロボットによる地球からの遠隔手術は非現実的である。そのため、現地完結型の手術システムの構築が必要である。最も現実的なのは、許容されるタイムラグごとに宇宙開発圏を分けし、それぞれに医師を配置し基本的なロボット操作を学ばせ、専門外であっても AI のナビゲーション支援によって手術を行うという方法である。

別の問題点としては、微小重力環境において体内から血液、体液が出ると、空間を浮遊しほかの乗組員や機材を汚染、故障させる危険性が高いことを考慮しなければならない。そのため、手術ユニットのような隔離空間での作業が望ましい。また、体内との固定が緩やかな臓器は体外へ浮遊し、思わぬ臓器損傷を起こす可能性がある。汚染の最小限化や臓器の体腔内への保持という意味では、開胸手術や開腹手術よりも内視鏡外科手術の方がアプローチとして適していると考えられる。その意味では、遠隔手術とも相性がよいロボット手術が最も手術法として適していると考えられる。

現時点では宇宙外科手術のニーズは高くなく、資金調達や商業的な成果を得るには厳しい状況である。そのため、東京理科大学がかかげるような「宇宙と地球の Dual 開発」を行い、地上での外科の問題解決にも生かせるような枠組みの中で研究をスタートし、行っていくことが、部品の調達コストを下げ、商業的成果を得ながら研究を発展させるために重要と考える。

(外科医の立場から)

宇宙での死者がおこりう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。今後宇宙倫理学を問う中において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置いて滞在や治療で終わることのない人と宇宙での繋がりのひとつとして様々な場所や機会でも宇宙に携わる方々と問うていきたいと確信した。

(宗教家の立場から)

2.3.7. 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、「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4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。

今回の実習で学んだことは何か?

- IHI エアロスペースがどのような製品を作っているかがわかった。また、将来エンジニアとして宇宙開発に携わるために必要なマインドや技能について知ることができました。
- 宇宙開発産業の実際、例えばISSへの輸送ロケットの開発や実験モジュールの設計、防衛産業への貢献、有人宇宙開発に際した新規事業(宇宙での輸血方法の構築)
- 宇宙医学は、特別な分野ではなく、RNA抽出、qPCR解析、免疫染色など基本的な手技を含んでいるため、まずは細胞生物学や生理学の基本から学ぶ必要があるということ。データ解析した数値のみで考察するのではなく、細胞を実際に見て観察しながら実習するべきであったということ。
- 宇宙医学は、医学という大きな括りの一部であり、地上の医学や研究と横断的に考えることが必須であるということ。
- 講義で教えていただいたことはもちろん、普段他の分野で学ばれている方々がどのような視点で問題を考えているのかが、新しく大変勉強になりました。
- 宇宙栄養学の歩み、研究室で行われている研究について
- 宇宙栄養学に関する理念や大学院の構想について二川先生からお話をうかがうことができたことや、研究室の規模や学内での立ち位置を理解できたことが大きな収穫でした。理学療法士の先生方を中心とした宇宙リハビリテーション研究会のメンバーにも今回お話しいただいた内容を共有したいと思いました。
- 再三の通り、「宇宙」を前面に押し出すのではなく防災や健康など身近なテーマに結び付けることで分野をせばめず、支援の輪をひろげるという方法は賢いと感じた／実績を残している人ほど謙虚であること／コオロギパンのおいしさ(一個いくらなのか聞き忘れてしまった)
- ISSを用いた宇宙医学研究のインパクトやJAXAの支援形態、実際のプロセスなど。公的機関によるものと民間のものとの違い。仁川先生の構想されている大学院システムなど。
- 宇宙医学分野での研究はどんなことがなされているのかについて学びました。
- 今回の実習を通して学んだことについて、①宇宙実験を行う難しさと創意工夫について、②地上実験を行う難しさとその創意工夫についての順で記載する。まず、①宇宙実験を行う難しさと創意工夫について記載する。宇宙実験を行う際は、他の実験との兼ね合いやフライトスケジュール、機器や実験の安全性・確実性を求められることなどから様々な制約がある。実際に宇宙実験のお話を伺う中で、他の実験との兼ね合いから実験のデータ採取の身体部位を下肢から上肢に変更し、実験による影響をできるだけ取り除いたり、介入後のデータ収集を介入後すぐに行うためにフライトスケジュールの後半に実験を行っていくなど様々な工夫を凝らしていた。また、宇宙の微小重力ならではの実験の難しさもある。宇宙での筋力トレーニングは微小重力ゆえに、固定が重要になる。実際の実験場面では体幹部や手関節の固定をして可能な限り対象となる単関節の運動ができるよう工夫していた。さらに、実験で使用する機器の制約も多い。機器の安全性

のために一昔前の部品を使うなど、最先端のようで特殊環境ゆえに最先端から一步戻る必要があることや、他の機器に影響を与えない、他の機器からの影響を受けないことが必要になることから、その機器や実験を行うことによる船体への影響なども考慮する必要がある。次に②地上実験を行う難しさとその創意工夫について記載する。地上実験を行う際は、微小重力を再現するために様々な工夫が必要になる。上下方向や、身体を地面と平行にしての吊り下げ、側臥位など地上で使用できるものをフル活用し、様々なアイデアと工夫を重ねて実験の環境を整えていた。これらの様々なアイデアを生み出すためには、多くの学会や様々な分野の人と繋がりを持ち、視野を広げるといったお話も非常に印象的であった。また、地上で実験を行う上で人体に許容可能な範囲の負荷は直接人体実験を行えるが、許容範囲を超える負荷を与えることはできないことから、シュミレーションを活用して予測していくことができる。さらに、そのためにシュミレーションが適切であるかどうかを、人体が許容範囲の負荷で検証する過程も必要であり、多くのステップを踏む必要がある。ここまで今回の実習を通して学んだことについてその創意工夫をメインに記載した。これらのことを学んで感じたことは、宇宙の実験は特殊なことをするだけでなく、地道に身の回りで使用できるものを様々な工夫を凝らし、調整しながら行っていくことである。今回学んだことを踏まえて、大学院において今後宇宙実験だけでなく広い視点を持ちながら地道に工夫とアイデアを凝らして実験していきたい。

- 宇宙医学という学問として宇宙医療を捉えていいのかという疑問
- 医療機器の面から宇宙にアプローチするケースとして勉強になりました。現在私が携わっているのが感染症・創薬関連なので、シーズ導出の違いや宇宙での実証方式の違いなど、共通点と相違点が数多くあり良い学びになりました。
- これまで、宇宙医学は医学の視点でしかみたことがありませんでした(例えば宇宙医学は予防医学に似ていることから宇宙医学での研究成果は地上に還元できる、など)。しかし、今回の実習では、宇宙医学を実際の企業の視点から俯瞰することができ、予防医学のコストの高さや、市場価値があまり見出せないことなどを教えて頂き、大変驚きました。また、極限状態での医療や、新生児医療との類似性について御指摘がありましたが、初めて聞く考え方であり、非常に興味深く聞かせて頂きました。
- 宇宙で利用する想定 of 医療機器を開発する場合の課題とそのアプローチ
- 医学機器が想像以上に幅広い範囲で活躍しており、とても創造的な取り組みも行われていること
- 人類が宇宙で活動するために必要なカメラや居住空間といった技術。そして宇宙など研究するにあたり重要な考え方
- 最新の宇宙居住へむけての設備とデブリ回収の問題
- 製品品質の均一化(半導体など同じロットをまとめて購入し保管する)

一番印象に残ったことは？

- 社員の方とのお話がとても印象に残っています。実際にロケットや衛星の一部を設計している方のお話はとても面白く、また熱意が伝わってきて自分も鼓舞されました。
- 宇宙医療の際の輸血器の試作品を見させてもらったところ。
- 免疫染色の画像から、ターゲット 2 種類の遺伝子の局在は特性や、一つ一つの手技の意味や目的を先行研究を調べながら先生や学生とディスカッションしたこと。
- 共に応募で参加されていた藤井さんが、実験一つ一つの作業の意味を疑問に思い、その意味を追求していたこと。

- コオロギパン、大豆パンの試食
- 二川先生が宇宙に関する研究を目指す姿勢について、「自身の専門を極めてそれを応用する形も考えてみていただきたい」とお話しされていたこと
- 懇親会が楽しかったです。自分の専門であるリハビリテーションと関連の深い分野であるにも関わらず、学校に栄養学部がなかったことや、SMJYC 内でもまだ知り合えていないこともあって、栄養学の学生さんとこれまで関わった経験がなかったため、話をするのができてとても参考になりました。
- 相羽さんの民間有人利用の倫理規定をどうするか／だれが統率すべきかという問い。
- 公演の内容もさることながら、懇親会で実際にコオロギパンを食べ、様々なお話を聞くことができたこと。
- 松瀬先生、田島先生のハイブリッドトレーニングシステムのような宇宙空間でやられている実験を想像していましたが、宇宙医学の実験が当然全て宇宙空間でやられているわけではなく、シュミレーションや自転車を倒すなど様々な工夫をして代替しているところに衝撃を受けました。宇宙空間を想定した地上での実験をやる自分をずっと想像していましたが非常に困難でとても大変な課題に立ち向かってらっしゃる先生方に尊敬の念を抱きました。
- 「宇宙は特殊な環境だが、環境の一部でしかない」という言葉が強く印象に残っています。実験をするためにいかに地上で役に立つかという視点は重要で、地上や多くの場面に視野を広げて考えることで、社会に還元できる研究につながると感じました。また、HTS の実験の際に使用する固定具や側臥位での自転車漕ぎを実際に体験させていただき、貴重な体験をさせていただいたことはとても印象に残っています。
- 宇宙ビジネスのネックラインが輸送費で、宇宙医療も例外ではないこと
- 宇宙医学・宇宙医療がかなり属人的な研究分野で、一緒に仕事をしてシナジー効果を得る余地がまだまだありそうだと強く感じました。
- 上述しましたが、新生児医療と宇宙医学の類似性の指摘が非常に面白かったです。これから注目していきたいと思いました。
- 具体的にお金を示していただいて、現実性を検討していたスライドが印象に残っています。
- 災害の時に発動するシステム
- 質疑応答で先生の経歴のお話を含めて、研究に対する姿勢についての話
- 月面基地？宇宙テントとその内側での外部を撮すプロジェクションマッピング
- Discussion において、木村先生の宇宙工学への歩み

改善した方がよい点や今後の要望など

- SCB2 を心待ちにしております！
- 実験の前に、手技の目的や対象とした遺伝子や培養細胞の理由を事前に聞いて予習すべきだった。今回学んだ手技や生理学を修士課程での研究に生かして、博士課程では前庭感覚を刺激したときの脳や筋肉の重力応答を研究していきたい。
- 先生だけでなく、慈恵会医科大学の学生にも参加していただけたことは実習を大変スムーズにしていたと思います。学生同士の交流も大変楽しいものだったので、学生の負担は大きいかもしれませんが是非続けていただきたいです。
- 特にありません。

- 最後に懇親会を設けてくださり、交流が広がったと思うのですが、実習内でプログラムとして、宇宙食について学生同士で議論する場が設けられていればよりよかったと感じました。
- 参加人数が多く、開催時間が少なかったため、他の参加者学生さんの研究などについてあまり詳しく話を聞けなかった点は少し残念でした。懇親会だけではなく、公的なディスカッションの時間等があればもっといろいろな話をうかがえたかと思いました。
- 現地の方も、参加者も当日になってやることを知ったので少し受け身になってしまった。懇親会以外にも、たとえば事前オンラインや当日のディスカッションタイムの導入などで深い意味での意見交換会ができたのではないと思う。
- 特にありません。久留米大学の先生方や寺田先生、同じ宇宙医学に興味を持つ若手の方々とお話できて大変刺激になりました。
- 様々な準備や手配をしていただき、お忙しい中大変恐縮なのですが、訪問前にもう少し実習内容や期間についての情報を頂けると実習に参加しやすくなると感じました。
- 疑問点として、日本は医療の成長率は低いですが市場は大きいのでフクダ電子さんはドメスティックな企業で成り立ってるとのことでしたが、宇宙は成長率は高いが市場はほぼ 0 であることを考えると、企業は参加し辛く、日本企業が宇宙事業で世界シェアを取るのには難しいのかなと思いました。
- 特にありません。ご提案頂いた、学生どうしの交流の時間は大変有意義だと思います。
- 単純に宇宙でだけ使える医療機器はまだまだ課題が多いのかなと感じましたが、地球でのユースケースをいくつか想定できていれば十分現実的なのかなと感じました。
- 募集の時にできれば時間帯を分かっていたらよかった
- はしごしたりしてもっといろんな施設や研究室に見学に行きたいです。
- 当日の予定をなるべく早く知らせていただきたい。移動や宿泊の手配は早いほうが割引が使えたり予定が立てられるので。
- 受け入れ先の負担もあるとは思いますが、もう少し実習の時間があると良いと思いました。

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

- 自分の中でここ最近、将来宇宙開発に携わりたいという思いが揺らいでいたが、今回の訪問を通じてやはり宇宙開発にエンジニアとして携わりたいと思った。また、宇宙医学などの学際的な学問分野から宇宙に関わりたと思ったので、引き続き学科での勉強に励みつつ、今回のようなイベントに参加したい。
- 自分は研究という形で宇宙分野に関わりたと思っていて、今回のディスカッションで企業の研究と大学の研究の違い(利益と学術)を明確にすることが出来た。
- 今までは、脳埋め込み型プローブを用いて神経を刺激するなどマクロに生体の重力応答を研究していきたいと考えていたが、遺伝子単位で重力応答を研究するのも非常に興味深く、今後の研究内容の選択肢の一つとなった。
- 自分の中で、宇宙医学に特化して進路を決めようとはあまり考えていないが、研究や思考の中で「宇宙」「微小重力環境下」など宇宙医学に関わっていなければならないような仮定を設定できるというのは強みになると考えています。
- さらに宇宙と関わっていきたいと思いました。

- 二川先生のお話をお聞きし、宇宙と直接繋がりのない自身の専攻の研究の道に進み、極めた専門を宇宙に応用するという方針に自信が持てました。現在進もうと思っている方向に迷いなく一歩を踏み出すことができそうです。必ず「これだけは負けない」といえる自身の専門分野を確立し、将来の宇宙活動に貢献したいと思います。
- 宇宙開発における栄養学の重要性について改めて気づきました。また、少しではありますが、栄養学への理解の解像度が上がったと思います。
- 参加者の多くが、良くも悪くも文系理系や専攻、「宇宙医学」にこだわっている印象をうけました。反対に私はいまだに様々な分野に興味がある／手をつけてしまう性分なので、メーカー+副業やプロボノではなく幅広い事業を扱える職(それこそ JAXA, 省庁など)も将来の職として視野にいれるべきではないかとぼんやり考えています。
- 先生方や学生たちの熱意に、自身の研究にも刺激をもらうことができた。今後も様々なことに挑戦していきたい。
- はい。宇宙医学の研究やフライトサーजनが身近に感じ、今日お話を聞いてそれに携わる自分を想像することができました。また非常に困難な道だということも理解しましたので、今日お話を聞いてそれでも自分の将来をかけてやりたいことなのか再考する機会となりました。
- 宇宙リハビリテーションや電気刺激装置についてより深く学びたいと思いました。また、今後大学院で続けていく研究に加えて、将来的に何かしらの形で宇宙医学に関係する研究を行いたいと思いました。
- 自分は、救急医療・災害医療に興味があり、災害が極限環境下という観点において宇宙と重なる部分があるというのは大きな発見でした。宇宙に少ししかかる分野で色々してみることが大事だなと思いました。
- 実践的な宇宙医療はなおも未開拓の領域だと強く感じました。生命進化について深く知るために宇宙にも関わる仕事がしたいという希望をもとにもっていますが、より様々な情報を得ながら大学院修了後の進路を検討したいと考えております。
- 宇宙医学に興味を持っている他の医学生と繋がることができたことが非常に有意義だったと思うし、学生団体にも入れてもらうことができたので、今後宇宙医学に関わる機会は増えるだろうし、進路にも少なからず影響するのではないかなと思います。
- 宇宙で使える医療機器はやはり無理ではないと思いましたのでこれからも注視していこうと思います。
- あります。いろいろな着眼点から新しいアイデアを生み、産業を存続させようとしている企業の話聞き、柔軟な発想をもって今後の進路を決めていこうと思いました。
- 医学研究といったことだけでなく、視野を狭めず、研究においてや分野など幅広い視点をもち、いろんなことに携わり、勉強しできるようになりたいと感じましたし、積極的に活動していきたいと思いました。
- 大変役に立ちました。異分野の学生さんや技術者の方と意見交換が出来たのも有意義でした。
- 宇宙医学, 宇宙外科学の研究を進めていきたいとの気持ちを強くしました。

その他

- ためになる楽しい機会をありがとうございました。引き続き気になるイベント、講演あったら参加させていただきたいと思います。よろしくお願いします！

- 今まで、自分にとって漠然としていた宇宙開発や宇宙工学という分野が今回の工場見学を通して具体化できました。これをきっかけに自分の将来のキャリア構築がよりよいもの出来そうです。別のイベントがあれば、どんどん積極的に参加していきたいです。
- 慈恵の先生方や学生が外部の私たちに非常にオープンに親密に関わってくださったので、今後も慈恵の研究室に通いたいと考えている。
- 先生方とお話しをする機会を設けていただけたことは大変貴重でありがたかったです。また、本当に大変勉強になる機会でした。この度はこのような機会を設けてくださり誠にありがとうございました。
- 今回、自身の大学で開催されるプログラムに外部から参加するという形にはなりましたが、その分他の大学の参加者の方とたくさんお話しできたので貴重な経験となりました。またお話しした中で、自身の勉強不足を思い知り、興味の薄い分野への考え方も改めなければいけないと感じました。もう学部生として 2 年ほどしかありませんが、これからは自身の興味のある分野の知識を深めるだけでなく、他の分野も学ぶことで多方面からのものの見方も身に付けていきたいと思います。今回選考していただき、参加させていただき、本当にありがとうございました。
- 二川先生をはじめとした徳島大学の皆様、寺田先生をはじめとした京都大学宇宙ユニットの皆様、この度はご多忙中誠にありがとうございました。実習内でいただいた講義の内容はもちろん、参加学生や徳島大学の学生との繋がりこれから宇宙との関わりを考えていく際の糧になると思います。実習後も交流を続け、互いに議論をしたいです。また来年以降、他大学での宇宙医学実習にも参加させていただきたいです。重ねて、この度はありがとうございました。
- 今回は実習を開催してくださりありがとうございました。また、徳島大学の学生のみなさまも、あたたかく迎えてくださってとても楽しかったです。ありがとうございました。
- パック旅行の件など、いろいろと連絡をしましたが柔軟にご対応いただきありがとうございました。一部のメンバーとはかなり仲を深められたと感じています。今後も面白そうなテーマがありましたら、今後も申し込もうと考えています。また後輩にもぜひすすめたいと思います。
- 講義から懇親会まで様々準備していただいてありがとうございました。徳島大学の皆さんにもよろしくお伝えいただければと思います。
- 今回は 1 日という短い期間での参加だったにも関わらず採用して下さって本当にありがとうございました。大変刺激になる一日で心から感謝しております。また出口先生、寺田先生にもゆっくりお話をお聞きできる機会がありましたら大変嬉しいです。今後とも何卒よろしくお願い致します。
- 寺田先生。本日は貴重な機会を設けていただきありがとうございました。すごく勉強になる半日を過ごすことができました。今回興味がありながらも日程などで申し込めなかった企業や大学さんもありましたので、またこのような機会があればぜひ参加してみたいです。
- 短い時間でしたが非常に学ぶことが多く、有意義な時間となりました。機会があれば他のプログラムにも参加してみたいと思います。本当にありがとうございました。
- 寺田先生もお忙しいと思いますので、顔合わせや事後のディスカッションは SMJYC としてもご協力できればと思います。お気軽にお申し付けください。
- 今回は貴重なお話を伺うことができ、とても面白かったです。ありがとうございました。次回も可能であれば参加したいです。よろしくお願いします。

- 最先端のテクノロジーや研究に触れられるのは新たな発見や気づきに繋がるので機会があればまた参加したいです。
- 非常に宇宙医学へのモチベーションが高まる実習でした。お忙しい中ありがとうございました。

アンケート内容から、参加学生はそれぞれ多くのことを学んだことが分かった。詳細は、実習内容の項で記載しているため割愛するが、それぞれの実習先での特徴を中心に学習できたと感じる。印象に残っている点としては、見学内容だけではなく、特に研究者や現場の方々との交流や意見交換などの内容が挙がっていた。普段接しない方々からの話などが参考になったと思われる。実習での内容によって、今後の宇宙医学的取り組みやそれぞれの専門分野への取り組みに影響すると答えた学生が多かった。このことは、参加学生を医学・医療系学生のみならず、様々な分野から募集したことと関連がある可能性がある。宇宙医学というと特殊な分野でなかなか外部から参入しにくいと感じていた学生もいたようだが、実習を通じて一般的な方法を用いることや医学分野以外の専門もかかわっている分野だと理解してもらえたのではないと思う。改善点で挙げられていた点としては、事前にスケジュールが分かっていたほうが良いという点と、参加学生同士の交流の機会をもっと増やしてほしかったなどの意見が多かった。このことについては、本委託費事業の開始が10月からであったため、訪問先との調整にある程度時間を費やし、実際の訪問日の設定が年明けに集中してしまったことにある。そのため、訪問前のオリエンテーションなどが十分にはできず、参加学生の交流を促せなかった。次年度の改善点としては、訪問先の調整を順次済ませ、訪問者間の交流の時間、実習準備の時間を確保しようと考えている。また、実習全体の会合として、次年度早々に全体報告会を開催し、今回訪問した6か所の実習先でそれぞれ何を学習し、どう感じたかなどの成果共有を行う予定である(予定日:2023年6月18日)。特に訪問後にも継続して宇宙医学分野の活動に参加できるような体制を整える必要があると考えている。

2.3.8. 宇宙医学実習におけるコンセプトマップ解析(東京慈恵会医科大学における実習)

有人宇宙医学実習を通し、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東京慈恵医科大学での実習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、学生の実習理解度を評価した。今回は、中心テーマを「宇宙環境への生体適応」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実習初日と、実習5日間目の最終日にそれぞれ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 33)、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 34)。

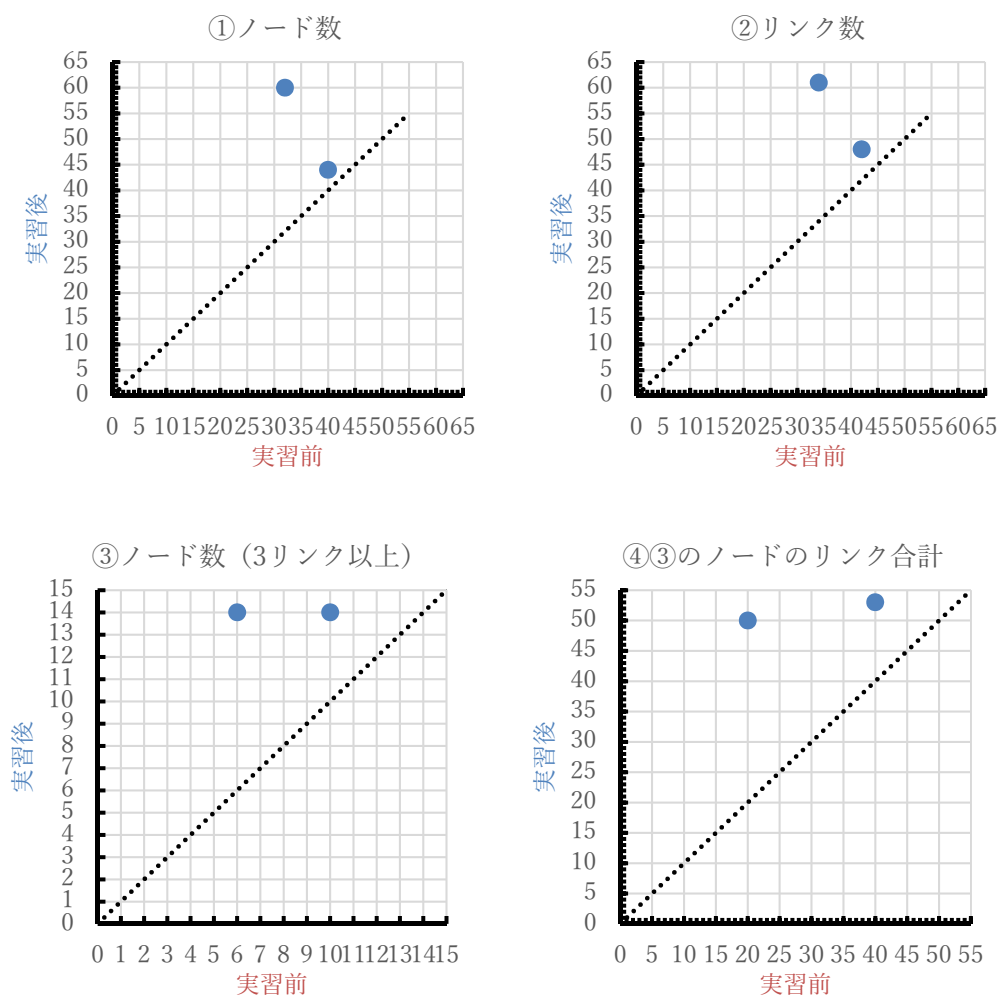


図 33: コンセプトマップにおける講義前後の関係

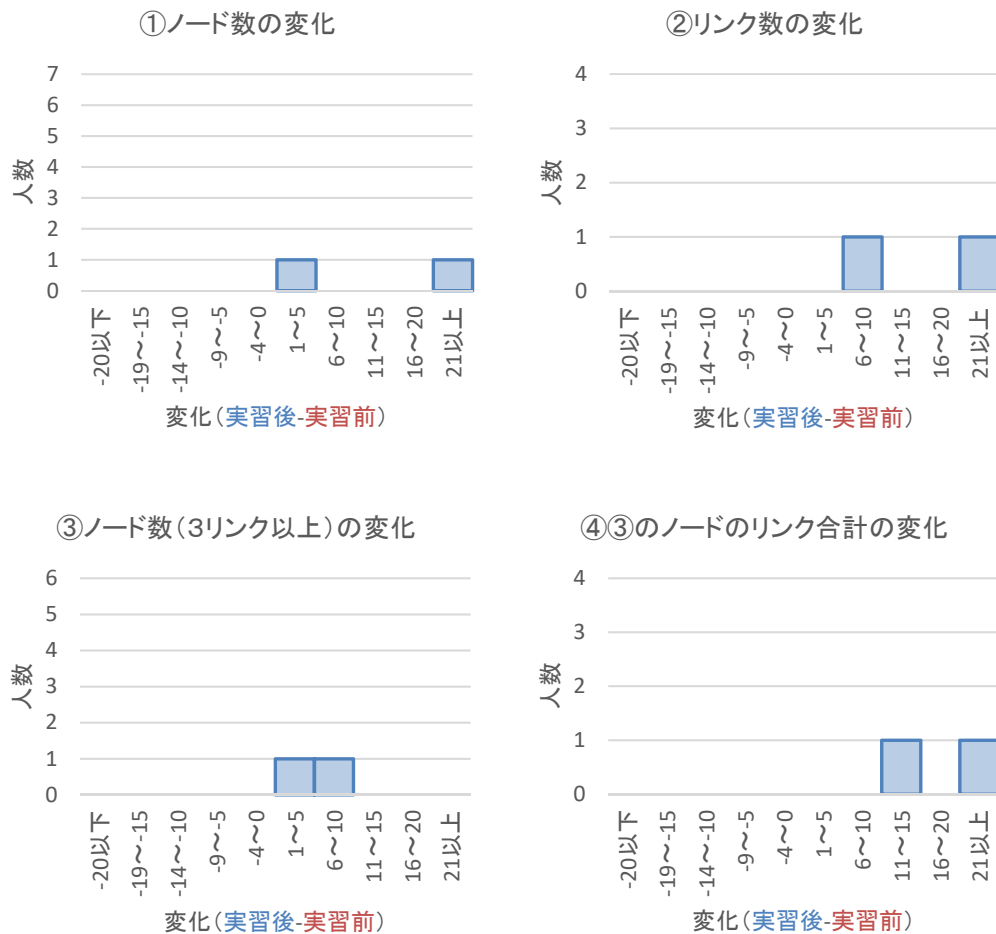


図 34: コンセプトマップにおける講義前後の変化量分布(ヒストグラム)

【ノード数の変化】

実習前の平均値は 36.0、実習後は 52.0 であり、約 1.44 倍となった。図 33-①と図 34-①を見てもわかるように、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。1 週間にわたる実習を体験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】

実習前後で平均値の変化は 38.0 から 54.5 となり、約 1.43 倍となった。こちらもすべての学生で増加した。実習後のコンセプトマップを見ると、実習内で経験した実験からの内容や専門外の単語も並ぶようになっており、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】

平均値は実習前の 8.0 から実習後は 14.0 となり、1.75 倍に増加した。これは、1 つのノードから派生したことを示しており、一つ一つの事柄に対して多くのことを学んだ結果と考えられる。

【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 30.0 から 51.5 へと約 1.72 倍に増加した。一方で図 34-④を見ると、30 増加した学生もいれば、13 増加に留まった学生もあり、2 名の学生間で差が生じた。これは両名のコンセプトマップのパターンに依存している可能性がある。

【ノードの内容変化】

- ・実習前にみられた「筋萎縮」というノードに加え、「廃用性筋萎縮」というノードを書く学生が多く、内容が具体化している。これは、実習期間中に筋萎縮についての講義を受け、とくに宇宙飛行士の筋萎縮と高齢者での廃用性筋萎縮の共通点が理解しやすかったためである。
- ・「筋萎縮」と「微小重力」をリンクさせていることは、Gravite を用いた模擬微小重力実験を経験した結果だと考えられる。実習内容の主要なテーマは筋萎縮であったため、実験作業中や講義中に見聞きした筋萎縮に関わる専門用語を記載する学生が多かったとみられる。

2.4. 生命倫理を中心とした宇宙倫理学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)：

京都大学宇宙総合学研ユニットで実施している宇宙倫理学教育プログラムに参加している中島浩彰氏に生命倫理の観点からインタビューを行った。中島氏は、京都市内のお寺の住職でもあり、宇宙で人が亡くなった際の対処方法などについて倫理的観点からの解決策などについて、宇宙倫理学教育プログラムで学んでいる。そのため、宇宙医学的観点からも人の死についてどのような対処ができるかなどをインタビューを通じて議論した。また、中島氏は宇宙医学実習の参加者として東京理科大学を訪問し、スペースシステム創造研究センターのセンター長である木村真一教授に宇宙での死への対策について質問などをし、議論を深めた。宇宙ミッション中に人が亡くなった際の対処方法などは、まだ十分に議論されていない点であることが判明した。特に人種も文化も異なる集団の中で、不幸にも死亡事故や病死などが生じた際にどのようにその方を弔うのかなどは重要な課題である。例えば宗教的な違いによるご遺体の扱いの違いや、国による作法の違いなど様々な問題点があげられる。現在は、健康な宇宙飛行士が宇宙ミッションを行っており、安全管理なども厳格に実施できる状況であるが、将来的には民間人が宇宙に行くことが想定される。その場合、不慮の事故が生じる可能性も高くなり、かつ身体的な基礎疾患がある方々であれば宇宙環境中に生命の危険が生じることも考えられる。そのため、宇宙で人が亡くなった際の対応策やその対処に対する規定作りなども近々の課題である。宗教家の立場からの中島氏の意見と宇宙倫理学を学ばれている立場からの中島氏の意見、そして我々宇宙医学教育プログラムを実施している側の意見をもとに議論していくことによって、この課題に取り組んでいく必要性を大いに感じた。

宇宙での生命倫理的問題について議論するために、次年度に宇宙医学委託費事業と宇宙倫理学委託費事業とで協力してワークショップなどを企画できないか検討をしている。ワークショップは、一般の方にも公開して、様々な方面からの意見をもとに議論できる場にしていく予定である。



図 35: 中島氏へのインタビューの様子

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. 2022 ASGSR (American Society for Gravitational and Space Research)

2022 年 11 月 9-12 日にヒューストンで開催された 2022 ASGSR (American Society for Gravitational and Space Research)でポスター発表を行い、本委託費事業について紹介を行った。アメリカにおいても宇宙医学に特化した教育プログラムは多く存在しておらず、特に本委託費事業においてはベッドレスト実験を教育プログラムに取り入れている点が注目を集めた。この学会には、本委託費代表者の寺田が留学していた NASA Ames Research Center の当時の同僚や上司なども参加しており、意見交換も行った。現在の NASA の外国人学生の受入れ状況なども確認し、将来的には NASA Ames Research Center へ日本人学生を派遣したい旨の相談も行った。NASA と大学での直接のやり取りで実現可能か、JAXA を通じて実施する必要があるかなど今後確認する点があるが、ぜひ派遣を実現したいと考える。



図 36: 2022ASGSR での発表の様子

2.5.2. 第 68 回日本宇宙航空環境医学会大会

2022 年 11 月 24－25 日に渋谷で開催された第 68 回日本宇宙航空環境医学会大会において、本委託費業務についてポスター展示をし、委託費事業への参加学生のリクルートと協力していただける研究者・教員の募集を行った。ポスター展示には多くの学生、研究者が来場し、本委託費事業の内容を説明した。参加を希望する学生などに十分な宣伝ができたと考える。また、ポスター展示には、企業の方（IHI やフクダ電子株式会社など）も見学に来られ、本プログラムの内容について興味を持っていただいた。そのことがきっかけになり、本年度の宇宙医学実習の訪問先として、IHI とフクダ電子株式会社の見学が実現した。また、学会のシンポジウムでは東京理科大副学長の向井千秋先生の講演があり、講演後に委託費事業の説明をさせていただき、東京理科大学スペースシステム創造研究センターへの訪問についても依頼し、実際に宇宙医学実習として実現した。また、本委託費代表者の寺田は学会の理事でもあるため、学会理事会でも本委託費の獲得について報告し、宇宙医学研究に対する教育事業を共に行っていくことを確認した。具体的には学会のメーリングリストを通じて、本委託費の教育プログラムへの参加募集の告知をお願いしたり、宇宙医学実習の訪問先としての受入れを学会員に依頼したり、HP 上の宇宙医学関連の情報を共同で実施したりすることを多くの理事から賛同いただけた。



図 37: 日本宇宙航空環境医学会大会でのポスター展示の様子



図 38: 向井千秋先生との記念撮影。

右から 1 番目が共同参画機関の田中邦彦先生、右から 2 番目が本委託費代表の寺田。

2.5.3. カザフスタン人研究者との交流

2023 年 1 月 26 日にカザフスタンから日本に留学している Dr. Galymzhan Issabekov が京都大学宇宙総合学研究ユニットの宇宙医学研究室を訪問し、宇宙医学教育について議論を行い、今後の国際協力についても話し合った。Dr. Issabekov は医師であり、中国やアメリカでの研究留学経験を有している。現在は武田財団からの支援を受けて埼玉県熊谷市にある熊谷総合病院の脳磁図脳画像センターに留学しているが、宇宙医学にも精通しており、特にカザフスタンの宇宙機関についても詳しい。そのため、カザフスタンでの宇宙飛行士の健康支援を含めた宇宙医学的取り組みについて説明していただき、その後、本委託費の教育プログラム内容についても説明した。学生教育にも大変興味を持っているため、宇宙医学をテーマに今後も継続して議論していき、共に活動する機会を設けたいということで意見が一致した。現在も Dr. Issabekov とは定期的にメールや zoom を通じて議論しており、今後の展開が楽しみである。



図 39: Dr. Galymzhan Issabekov の訪問の様子

2.5.4. 宇宙ユニットシンポジウム

2023 年 2 月 11 日（土）、12 日（日）に第 16 回宇宙ユニットシンポジウムが開催された。宇宙ユニットシンポジウムは、京都大学宇宙総合学研究ユニットが宇宙分野の情報発信のために毎年 2 月に開催しているアウトリーチ活動である。参加者は学内教員・学生に限らず、全国からの高校生や一般の方々も含めてバラエティ豊かな参加者が集まる。今年度のシンポジウム全体テーマは「宇宙開発時代をどう生きぬくか～大学の役割を問い直す」であり、大学がどのように宇宙開発に貢献できるのかを中心に議論した。

シンポジウム初日には、ポスターセッションとして一般からの出展も含め多くの方々との交流の場を提供した。また、基調講演として JAXA 津田雄一氏にやぶさ 2 に関する講演を行っていただき、多くの方の関心を集めた。ポスターセッションでは、本委託費事業での宇宙医学教育プログラムについてもポスター展示を行った（図 40）。すでに高校で宇宙を取り入れた教育を行っている教員の先生方ともお話ししていただき、宇宙医学分野に限らず宇宙分野全体としていかに教育課程が重要かを議論させていただいた。

シンポジウム 2 日目は 3 つのテーマセッションとパネルディスカッションを実施した。

セッション 1. 「宇宙科学技術開発の現場」

セッション 2. 「有人宇宙開発における人への対応」

セッション 3. 「宇宙開発をめぐる法と政治」

パネルディスカッション: 「宇宙開発と人材育成」

セッション 2 は、本年度のシンポジウムテーマに従って、宇宙医学分野で大学がどのような取り組みをしているかを紹介する目的でオーガナイズした。このセッション 2 では、群馬大学の高橋昭久先生と日本原子力研究開発機構の佐藤達彦先生をお招きし、それぞれ「宇宙での放射線と重力変化の複合影響」、「宇宙飛行士を宇宙線被ばくから適切に護る——有人火星探査の被ばくリスクはどのくらい？」という題名で宇宙放射線への人体影響を中心に講演を行っていただいた（図 41）。高橋先生はマウスを用いた重粒子線暴露の研究を実施されており、模擬微小重力が放射線の生物影響を助長するという非常に画期的な研究結果を報告いただいた。また、宇宙実験の経験も大変豊富で、宇宙実験遂行のための苦労したご経験などもお話しいただき、参加した学生にも大いに興味をそそる内容であった。佐藤先生は放射線暴露時の線量シミュレーションを自ら開発されたソフトウェアを用いて実施されている。放射線とは何であるのか、どのように生物に影響するのかを基礎的な事柄から分かりやすくご説明いただいた。また、人類が火星への有人ミッションを行った際の暴露線量なども予測されており、大変興味深い内容であった。

パネルディスカッションでは、パネリストの一人として高橋昭久先生にご登壇いただき、宇宙生物・医学分野での大学での人材育成の取り組みについてご紹介いただいた。研究分野においては、いかに学生の将来的なキャリアを確保してあげることが長く研究を続ける際には重要であるが、現状では非常に困難な状況であるなど、今後の人材育成の取り組みに重要なご意見を、実際の現場の先生からお聞きすることができた。

今年度のシンポジウムでは大学の取り組みとして人材育成にさらに力を入れていく必要性を益々実感した。



図 40: ポスターセッションで宇宙医学教育プログラムの展示をしている風景。



図 41: セッション2の講演後の質疑応答の風景。左が高橋昭久先生、中央が佐藤達彦先生。

2.5.5. 元 NASA 研究者との交流

2023 年 3 月 10-17 日にベルギーから Dr. Ann-Sofie Schruers とインドから Dr. Ravikumar Hosamani を招聘し、宇宙医学研究ならびにキャリア形成に関するセミナーを開催した。両名は本委託費事業の代表者の寺田が NASA Ames Research Center へ留学していた時の同僚であり、現在それぞれ母国に戻り研究活動を続けている。Dr. Schruers には女性研究者としてのキャリアに関して、「A career into Space biology and beyond」という題名でオンラインセミナーで講演いただいた(添付資料 4.4)。参加者は、宇宙医学分野でのジェンダー問題を議論している女子学生とコスモ女子という団体に所属している女性研究者が集まり、合計 10 名の女性が参加してくれた。セミナーの中ではベルギーやアメリカにおける女性研究者の地位と日本の状況の違いなどを中心に議論

した。また、学生からは宇宙医学分野でキャリア形成する際の重要な事柄についての質問などがあり、Dr. Schruers は自らの経験を基に誠意をもって回答していたことが印象的であった。

また、別日には Dr. Hosamani と Dr. Schruers の 2 人に宇宙医学研究についてのセミナーで講演をいただいた(図 42)(添付資料 4.5.、4.6.)。それぞれ「Fruit fly model for Astronaut's health」と「Spaceflight-induced bone loss: molecular mechanisms and countermeasures」という題名で研究紹介をしていただいた。Dr. Hosamani はショウジョウバエ(fruit fly)を用いた宇宙実験などを実施しており、ショウジョウバエと人との遺伝子情報の共通点が多い点や、モデル生物として優れている点などの説明や、NASA での研究経験について語っていただいた。ショウジョウバエの研究結果が宇宙医学分野にも応用できる点に学生は驚いていた。ま Dr. Shruers は NASA ではマウスを用いた放射線暴露実験をしており、宇宙放射線が骨量減少を誘発するメカニズムについて説明した。宇宙放射線による骨量減少には、ドライプラムの摂取が有効であることをデータを用いて示した。宇宙医学分野における対処療法(カウンターメジャ)の具体的な話が非常に興味深かった。人材育成や国際協力についても議論し、次年度以降に日本人学生の受け入れなどについても話し合った。Dr. Hosamani からはインドへ研究実習として日本人学生の受入れが可能であることを確認した。現在、必要な取り決めの締結などについて継続して話合っている。このセミナーには 18 名の学生が参加してくれた。

東京慈恵会医科大学ならびに帝京大学から教員と学生が訪問し、Dr. Hosamani と Dr. Schruers と宇宙医学に関する研究についての打ち合わせならびに、国際協力について議論した(図 43)。Dr. Hosamani と Dr. Schruers も日本の研究者との共同研究などにも非常に興味があり、今後の研究協力体制などが構築できればと期待する。

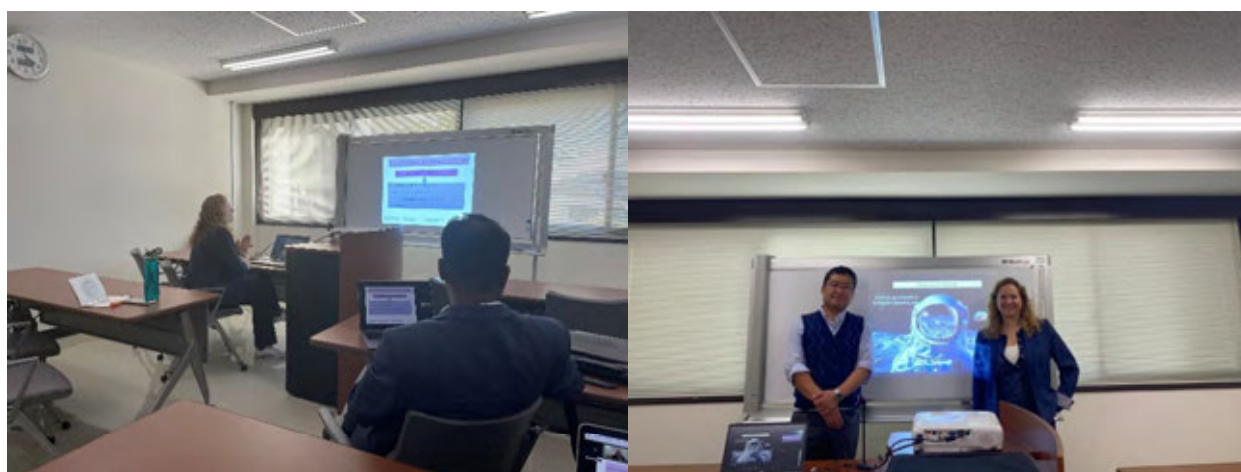


図 42: Dr. Ann-Sofie Schruers と Dr. Ravikumar Hosamani のセミナーの様子



図 43: 研究打ち合わせの様子(左)と集合写真(右)。

2.5.6. アウトリーチ活動

宇宙医学分野の啓蒙活動として、いくつかの講演を行った。まず 2022 年 11 月 19 日(土)に京都大学生存圏シンポジウム「宇宙での持続可能性を考える」において、宇宙医学の講演を行った。また、2022 年 11 月 13 日(日)に京都花山天文台の将来を考える会の後援会において、「宇宙環境における人への影響～宇宙医学のご紹介～」と題して、人が宇宙環境に滞在した際の体への影響についてオンライン講演を行った。両講演での参加者は京大関係者のみならず外部大学研究者や一般の方々も参加され、宇宙医学について理解していただく場になったのではないかと考える。参加者からは、微小重力による筋萎縮のメカニズムについての質問や、宇宙での生活環境についての質問などが挙がった。

また、小学生のお子さんから宇宙医学研究についての問い合わせがあったことをきっかけに、実現した出前授業について報告する。京都市内のノートルダム学院小学校 4 年生の岡井雛子さんが宇宙医学に興味があるということで問い合わせをいただいた。小学生などの初等教育課程の子供たちにも宇宙医学の重要性を説明する貴重な機会かと考え、京都大学宇宙総合学研究ユニットに招き、宇宙医学について解説を行った。当日は岡井さんとお母さんの 2 人で訪問されたが、非常に熱心なお子さんで自ら宇宙飛行士のことを精力的に調べていた。そこで、実際に人が宇宙に滞在した際にどのような影響があるかを研究する宇宙医学分野の研究紹介などをさせていただいた。学校の同級生にも是非このような分野の話を聞かせてあげたいということで、後日担任の先生にその旨を伝えるとおっしゃって帰宅された。その後、実際に学校内で要望を挙げていただき、ノートルダム学院小学校の先生方と事前打ち合わせを行い、宇宙医学の出前授業が実現した。出前授業では、小学校 4 年生から 6 年生の 3 学年に宇宙医学について授業を実施した。小学生がどのくらい宇宙に興味があるのか、今後宇宙を勉強したい子たちがどのくらいの割合いるのかなどを実感する機会となった。授業後の質疑応答では、宇宙飛行士の生活や宇宙環境による影響について詳細な議論ができた。後日、岡井雛子さんが発起人となり、ノートルダム学院小学校の中で宇宙クラブが立ち上げられ、多くの小学生が宇宙についての活動を継続している。



図 44: 岡井雛子(小 4)さん訪問の様子(左)。ノートルダム学院小学校での出前授業の様子(右)。

2.5.7. 取材対応

読売新聞の記者・船越翔さんが宇宙分野における人材育成の取り組みについて記事を作成したいということで、本委託費事業・宇宙医学教育プログラムへの取材の問い合わせがあり、宇宙医学教育について説明を行った。宇宙医学実習の取り組みについても説明したところ、実際に学生が参加して実験をしている姿を取材したいということで、東京慈恵会医科大学の実習期間中に見学ならびに学生へのインタビューを行った(図 45)。実際の記事については今後読売新聞の方に掲載予定である。



図 45: 慈恵医大実習中での読売新聞記者(右端)による取材活動の様子。

2.5.8. JAXA 教育センターとの打ち合わせ

JAXA 教育センターでは初等・中等教育向けの教育プログラムを提供しているということで、宇宙医学についても教育題材として取り入れていただきたいという相談をしたところ、教育センター長、計画マネージャーを交えて、宇宙医学教育の可能性について打ち合わせを行った。本委託費事業については高等教育課程を主にターゲットにしているが、初等・中等教育にも着目することによって、将来的には全体で一括した教育プログラムを構築し

たいと考えている。JAXA 教育センターではこれまで宇宙医学的な題材を扱ったことがないため、今後 JAXA Academy など宇宙医学をテーマにした回を作ってはどうかという提案があった。現在、JAXA Academy に合った内容の講義などができるかを検討中であるが、ぜひ実現したいと考えている。

2.5.9. 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。2022 年 12 月 5 日(月)には、日本原子力研究開発機構の佐藤達彦先生に、「宇宙飛行士や航空機乗務員を宇宙線被ばくから適切に護る——有人火星探査の宇宙線被ばくりスクはどのくらい?」という題名で講演をいただいた。宇宙線の被爆量についての議論を行った。

2023 年 1 月 18 日(水)には元 JAXA 健康管理グループ長の立花正一先生に、「月有人探査におけるストレスと心理学的課題——南極越冬隊の心理研究から学ぶ」という題名でお話していただいた。内容は本報告書の宇宙医学講義の項に記載しているので割愛するが、南極越冬隊員と宇宙飛行士という異なる立場であるが、閉鎖環境でのストレスの共通点について説明いただいた。

また、宇宙医学実習(東京慈恵会医科大学)での項でも記載したが、帝京大学の石岡憲昭先生にも宇宙渡航医療という観点から講演いただいた。さらに上記しているが、Dr. Ann-Sofie Schruers と Dr. Ravikumar Hosamani に英語でのセミナーを行っていただいた。

2.5.10. ロゴマークならびに HP 作成

宇宙医学教育プログラムのロゴマークと HP を作成し、多くの方に宇宙医学教育の啓蒙活動を行う準備をした(図 46、47)。HP 内では本教育プログラムの概要説明を行い、本プログラムに参画する教員・研究者のインタビュー記事を掲載した。第一弾のインタビューとして代表者の寺田の宇宙医学教育にかける思いなどを掲載した(添付資料 4.7.1)。また、第二弾として参画機関代表の田中邦彦先生のインタビュー記事を掲載した(添付資料 4.7.2)。さらに第三弾として、東京慈恵会医科大学宇宙航空医学研究室の 3 名の教員(南沢享先生、暮地本由己先生、谷端淳先生)の記事を掲載した(添付資料 4.7.3)。今後も順次、本プログラムに協力いただいている先生方の記事を掲載していく予定である。また、宇宙医学実習の見学内容やベッドレスト実験の情報など順次掲載していきたいと考えている。HP を通じて宇宙医学教育プログラムの重要性をさらに伝えたいと考える。



図 46: 宇宙医学教育プログラムの HP の表紙画像(<https://spacemedicine.usss.kyoto-u.ac.jp/>)。



図 47: 3 種類のロゴマーク(田中先生作成)。中央のマークは本プログラムの中心となるベッドレスト実験をモチーフにしたもの。

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、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名にお願いし、2023年3月22日(水)に京都大学東京オフィス@丸の内で開催した。この評価会は、関係者のみのクローズングではなく、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。開催の告知は、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(日本マイクロ重力応用学会(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、多くの団体に告知できた。その結果、外部から20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。

<外部評価会プログラム>

13:00-13:30 宇宙医学教育プログラムの紹介

京都大学での取り組みについて……寺田昌弘

13:30-14:00 宇宙医学実習参加学生の報告……藤井まなみ(オンライン)

14:00-14:30 岐阜医療科学大学での取り組みについて……田中邦彦(オンライン)

14:30-15:30 全体意見交換+評価者コメント

15:30-15:45 休憩

15:45-17:00 宇宙医学分野の今後についての意見交換

まず寺田からプログラムの紹介と京大での取り組みについて説明し、次に宇宙医学実習参加学生より実習体験について説明してもらった。最後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、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2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分野の今後について自由討論を行った。今年度は、JAXA の閉鎖環境実験の不具合事案が公表され、宇宙医学分野の研究にとっては非常にネガティブな状況であった。この状況は宇宙医学分野にとって危機的な状況でもあるが、別の観点から考えると新たな観点から取り組むチャンスであり、この分野の仕切り直しができる機会である可能性もある。そのため、外部からの意見を取り入れることも目的に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議論した。

表 2: 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。	● 将来の月面滞在、火星有人探査に向けての研究。長期滞在だけでなく、0.1-0.4G 環境における身体に関する変化についての研究、さらには有人月滞在などを踏まえた月面での医療を実施するといったことについての研究も進めていくことを期待したい。 ● 精神心理に関する計測・評価が含まれていないように思われる(実際には資料の量の都合上、記載されなかっただけかも知れませんが)。ベッドレスト実験でも精神心理面の計測を行うことは可能であり、人体に対するストレスの総合的な評価を行うという観点からも、精神心理面の計測・評価にもっと重点を置くことが望まれる。 ● ・今後、民間人による短期の宇宙旅行が増えることを想定すると、微小/低重力-1G 間の、重力変動に伴う身体変化とその対応策も、重要な課題と考えられる。特にこれまでのように、選抜・訓練を受けた職業宇宙飛行士以外の一般人が宇宙に行く場合は、その影響と対策を考慮しておく必要がある。 ● 令和4年の実施成果の図1にもありますが、宇宙放射線の影響としての酸化ストレス、閉鎖環境でのストレス、精神心理や感染症に関する研究テーマを進めることを期待したい。 ● 今後のアルテミス計画以後、月から火星へと活動の場を広げる場合、低重力の影響や惑星間飛行における渡航医学的視点の研究を望む。
(2) 教育プログラムの内容について	
評価できる点	● 生命倫理に関する調査を進めている点はユニーク。宇宙空間における生命のあり方について医学研究の中に取り込むことは重要。 ● 宇宙医学に関わる分野を一通り網羅していると考えられる点。 ● 実際に宇宙医学研究に携わる研究室・メーカーを訪問している点。 ● 本プログラムで受講した結果を学会発表している点。 ● 宇宙医学に関わる分野を網羅的にとらえ、さらに生命倫理に関する調査を取り入れている点や大学だけでなくメーカーや研究室を訪問し、知識を広げている点などプログラムとして大いに評価できる。

改善できる点	● 研究が微小重力の環境に留まっている点はまだ改善が出来るだろう。様々な重力環境での調査を進めることで、今後のアルテミス計画などへの対応などもより広く可能になるものと思われる。 ● 実習先としては、日本の宇宙機関である JAXA を含め、単なる施設訪問だけでなく、JAXA、及び日本が取り組む宇宙医学研究の方針について、議論する場を設けることが望ましい。 ● ベッドレスト実験に、本参加者がどの程度関わるのか明記されていないが、可能であれば、全体のプログラム、取得するデータの種類等、全体の計画立案にも関わることを望ましいと思われる。 ● 先に記載したように、精神心理を含めた、ストレスを全体的に評価するという視点を含めることが望まれる。 ● 生命倫理に関連する法律や宗教、異文化との交流、ジェンダー等も含めた議論の場を設けることを期待したい。 ● 精神心理、ストレスの計測・評価と同時に改善策についても研究プログラムに取り入れることを望む。
(3) 教育評価について	
評価できる点	● 放射線、低圧、閉鎖環境など、基本的なところは一通り抑えており、基礎医学の知見を応用した体制がきちんと出来ている。宇宙医学の教育としては適切な評価がなされている。 ● 参加した学生に学会発表を求めている点は高く評価出来る。 ● 学際性に偏ることない実践的教育であり、成果を学生自ら外部発信するなど、「見た、聞いた、やった」だけでなく積極的な外部発表は大いに評価できる。 ● 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は評価できる。
改善できる点	● 特になし。 ● 講義、実習等に参加した学生にレポートの提出、または試験を行っているのかがどうか記載されていない。可能であれば、単にアンケートだけでなく、レポートの提出を求め、本教育プログラムの一環とすることが望まれる。 ● 講義の受講生、各実習への参加者、及び学会発表者が、報告書では紐付けされていない。必ずしも個人名を出す必要はないが、各々のプログラムへの参加者と、学会発表者の関係性が分かる方が望ましいのではないかと。あるいは上記のレポート提出に代えることでも構わない。 ● この講義は大学院生向け講義とされているので、大学院生については単位認定されると思われるが、それ以外の学生については、単なる聴講に止まるのではないかと。受講認定書を発行しているのであれば、その証明書を含め、報告書に記載することが望まれる。 ● 今回の成果報告では分子生物学的研究が主であるように見えるが、生命倫理やメーカー等への訪問と議論があったと思われるので、参加学生の個々人の感想や議論等について、レポートを提出させまとめるのが望ましい。

	● 学生自ら研究テーマを考え、実験等の計画を立案させ、実際に実施させるか、案を発表させ、内容について妥当性を含めてみんなで議論する。
(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)	● 宇宙医学は多岐にわたり、基礎医学的な問題から栄養学や倫理学にまでまたがる幅広い研究が必要となるが、そうした研究教育プログラムが一通り揃えられていて、十分な学習環境が整備されていると思う。こうした研究教育プログラムをさらに発展させ、低重力環境での実験も出来るようになると素晴らしいと思われる。以上。 ● 実際に宇宙飛行士・宇宙旅行者を対象としたデータ取得、あるいは宇宙生物実験を行うには、実験機会の少なさや、宇宙で行える実験手技の限界、搭載・帰還するサンプル量の問題から、非常に制約が多いことが実情である。そのような実情を踏まえた、宇宙実験への参加、またはシミュレーションをプログラムに加えることも一案ではないか。 ● 宇宙環境は人体に様々な影響を及ぼし、また実験機会が限られていることから、NASA の Human Research Roadmap(HRR)に代表されるように、体系的な取り組みが必要とされる。このような宇宙医学研究に関わるに際しては、HRR のような研究戦略における、各実験の位置付けと、そのフィードバック(例:健康管理技術の向上)についても、考察に含めることが望まれる。 ● 計画書にもある通り、宇宙環境の特徴は微小重力、宇宙放射線、真空、そして閉鎖であり、それぞれ宇宙医学的要素が含まれるが、実際はそれらの複合環境であることを念頭にシラバス、実験等を考えることが望まれる。 ● SDGsの視点からのプログラムを加えてもよいのではないか。

外部評価者からのコメントは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が、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。特に宇宙医学講義において、京大生には単位を与えることは可能であるが、外部受講生は現状では単位取得はできないため、それに代わる修了証の授与などが学生のやる気や達成感を促進するために重要ではないかとのご意見もいただいた。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。

宇宙医学分野の今後についての意見交換では、やはり継続して宇宙医学研究を支える人材育成についての議論が多く出た。現状では、研究者個人のテーマとして宇宙医学研究が実施されているが、そこに所属した学生の就職先など、必ずしもこの分野内で確保できているわけではなく、多くの方がその点に不安を抱かれていることが確認できた。本委託費事業の宇宙医学教育プログラムの創設のきっかけはまさにその点にあるため、この委託費事業を通じて人材育成に貢献したいと改めて強く感じた。今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いきたい。

3. まとめ

本年度は本委託費事業の初年度ということもあり、宇宙医学教育プログラムの構築のための準備が中心であった。しかし、すでに京都大学宇宙総合学研究ユニットでは宇宙医学講義や宇宙医学実習の経験もあるため、その基盤を利用することにより、座学や実習についてはある程度スムーズに学生に提供できたと思われる。宇宙医学講義については、協力研究者も確保できており、すべての先生方は宇宙医学における人材育成の重要性についてはご理解いただいていることもあり、充実した講義内容を提供することができた。宇宙医学実習については、これまで東京慈恵会医科大学と岐阜医療科学大学の2か所のための経験しかなかったが、今年度はさらに訪問先を増やし、IHI、徳島大学、久留米大学、フクダ電子株式会社、東京理科大の5か所を新たに設定することができた。課題としては、スケジュール調整に時間がかかってしまったため、事前に参加学生に十分な情報を提供できず、準備時間の確保に苦労した点である。この点に関しては、次年度は十分な余裕をもって調整していく予定である。次年度に実施する模擬微小重力暴露実験(ベッドレスト実験)の準備については、岐阜医療科学大学の田中先生のご尽力の下、スムーズに進めることができた。岐阜医療科学大学ではすでに実施場所の確保や使用予定の装置の準備が完了している。京都大学でも使用予定の測定機器の準備が完了しており、次年度のベッドレスト実験実施が非常に楽しみな状況である。本プログラムのユニークな点としては、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を行っていくという点を挙げているが、今年度は宗教家である宇宙倫理学プログラムの参加者・中島氏と宇宙での人の生死についての議論を深めることができた。次年度には共同でワークショップの開催などを計画しており、宇宙医学のみでなく有人宇宙活動には倫理的観点や様々な分野が重要であることをさらに議論していきたい。アウトリーチ活動については、国内外への学会参加ならびにセミナー開催、出前授業、国際交流などを行うことができた。国内外の多くの研究者の協力を得て、今後も継続して宇宙医学分野の魅力的な交流やイベントを実施していきたい。また、HPも作成して益々、本教育プログラムの啓蒙活動に力を入れていきたいと考えている。

次年度はベッドレスト実験が実施される予定であるので、この貴重な実験・実習機会を活用して、今年度以上に人材育成に貢献できる内容を提供したいと思う。

4. 添付資料

4.1. 有人宇宙医学講義シラバス

科目ナンバリング		G-LAS13 80009 LJ89		G-LAS13 80009 LJ25		G-LAS13 80009 LJ95		
授業科目名 <英訳>	有人宇宙医学 Space Medicine			担当者所属 職名・氏名	総合生存学館 教授 山敷 庸亮 学際融合教育研究推進センター 特定准教授 寺田 昌弘 総合生存学館 准教授 水本 憲治			
群	大学院横断教育科目群		分野(分類)	健康・医療系		使用言語	日本語	
旧群			単位数	2単位	週コマ数	1コマ	授業形態	講義
開講年度・ 開講期	2023・後期	曜時限	水4		配当学年	大学院生	対象学生	全学向
(総合生存学館の学生は、全学共通科目として履修登録できません。所属部局で履修登録してください。)								
【授業の概要・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が移行して、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。								
【到達目標】								
宇宙環境が人へどのような影響があるかを理解する。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必要があるかなど、自身で考察する能力を養う。								
【授業計画と内容】								
1. 宇宙医学概要 寺田昌弘 Outline of Space Medicine (Masahiro Terada, Kyoto University)								
2. 宇宙での骨格筋への影響① 谷端淳 (慈恵医大) Influence on skeletal muscles in space 1 (Jun Tanihata, The Jikei University School of Medicine)								
3. 宇宙での骨格筋への影響② 志波直人 (久留米大) Influence on skeletal muscles in space 2 (Naoto Shiba, Kurume University)								
4. 宇宙での骨格筋への影響③ 河野史倫 (松本大) Influence on skeletal muscles in space 2 (Fuminori Kawano, Matsumoto University)								
5. 宇宙での姿勢制御 萩生翔太 Attitude control in space (Shota Hagio, Kyoto University)								
6. 宇宙での心循環系への影響① 南沢享 (慈恵医大) Effects on the cardiovascular system in space 1 (Susumu Minamisawa, The Jikei University School of Medicine)								
7. 宇宙での心循環系への影響② 岩瀬敏 (愛知医大) Effects on the cardiovascular system in space 2 (Satoshi Iwase, Aichi Medical University)								
8. 宇宙放射線の影響① 山敷庸亮 Effects on Cosmic Radiation 1 (Yosuke Yamashiki, Kyoto University)								
9. 宇宙放射線の影響② 山敷庸亮 Effects on Cosmic Radiation 2 (Yosuke Yamashiki, Kyoto University)								
10. 宇宙酔い 野村泰之 (日大) Space Sickness (Yasuyuki Nomura, Nihon University)								
11. 宇宙医学に基づいた宇宙服開発 田中邦彦 (岐阜医療科学大) Space Suit development based on space medicine (Kunihiko Tanaka, Gifu University of Medical Scinece)								
12. フライトサージャンの役割 嶋田和人 (JAXA)								
----- 有人宇宙医学(2)へ続く↓↓↓ -----								

有人宇宙医学(2) The role of Flight surgeon (Kazuhito Shimada, JAXA) 13. 宇宙飛行士リハビリテーション 山田 深 (杏林大学) The Rehabilitation for astronats (Shin Yamada, Kyorin University) 14. 閉鎖環境の影響 水本憲治 Impact of closed environment (Kenji Mizuoto, Kyoto University) 15. 宇宙生物実験 暮地本宙己 Space Biology Experiments (Hiroki Botimoto, The Jikei University School of Medicine)
【履修要件】
学部学生も聴講可能である。
【成績評価の方法・観点】
毎回の授業の際に小レポートを書かせ、毎回の教員が採点、全講義終了後に、全提出レポートの点数を総合して合否を判定する。なお、レポートは出席ではない。レポートを提出しても、0点となることがあることに注意。
【教科書】
使用しない
【参考書等】
(参考書) 授業中に紹介する
【授業外学修(予習・復習)等】
有人宇宙活動、宇宙医学に関して興味のある資料や文献、そしてメディア上の番組などは各自自習し、問題意識を持って取り組むこと。
【その他(オフィスアワー等)】
※オフィスアワーの詳細については、KULASISで確認してください。

4.1.1. 第1回宇宙医学講義スライド集

第1回 有人宇宙医学講義

京都大学宇宙総合学術研究ユニット

寺田 昌弘

文部科学省・宇宙航空科学技術推進委託費

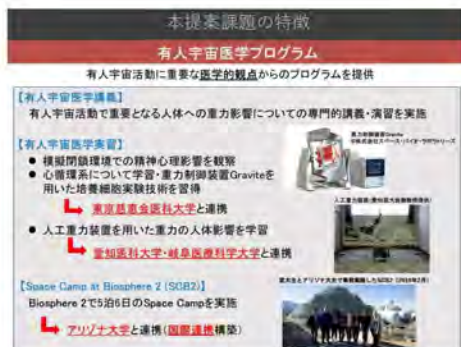
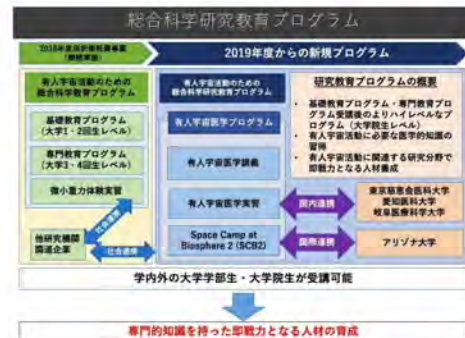
課題名：有人宇宙活動のための総合科学研究教育プログラムの開発と実践

課題の概要

本事業で新設する総合科学研究教育プログラムは、2016年度に本委託費事業に採択され実施してきた総合科学研究教育プログラムの発展型であり、より専門性を高めた人材育成プログラムである。これら全体プログラムを通して大学学部生から大学院生レベルを網羅し、有人宇宙活動に関わる分野で活躍できる人材を育成することが主目的である。有人宇宙活動には様々な学際分野が関連しており、異分野の融合により更なる発展が期待される。そのため、本プログラムでは様々な分野を網羅した講義・実習・社会連携を通じて、学生が学び、自ら考え、そして実践していく。従来の有人宇宙ミッションでの宇宙飛行士への人体影響の理解を深めるため、医学・生物学系の協力を図る。有人宇宙医学プログラムでは、東京慈恵会医科大学・愛知医科大学・岐阜医科大学と連携により、人が宇宙に展開する活動を総合科学探究として医学系から理解できる人材育成を目指す。また、国際宇宙教育プログラムに発展させる。本事業で学んだ学生は、高い専門性を持つと同時に有人宇宙活動を大域的に捉えることが可能になり、新しい有人宇宙ミッションの提案や宇宙産業の創出に積極的に貢献することができる。

本日の内容

- ・ 文科省委託費の説明
- ・ 有人宇宙医学講義の説明
- ・ コンセプトマップの作成
- ・ 有人宇宙医学講義の講師紹介
- ・ 宇宙医学概要



有人宇宙医学講義

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が移行して、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從事する人材育成を目的とする。

- | | | |
|--------|--------|-----------------------------------|
| 【第1回】 | 10月7日 | 宇宙医学概要 (寺田昌弘) |
| 【第2回】 | 10月14日 | 宇宙酔いと低圧症 (田中邦彦：岐阜医科大学) |
| 【第3回】 | 10月21日 | 宇宙生物実験 (葛地本吉：慈恵医大) |
| 【第4回】 | 10月28日 | フライトサーージャンの役割 (嶋田和子：筑波大学、元JAXA医師) |
| 【第5回】 | 11月4日 | 宇宙酔い (野村泰之：日大) |
| 【第6回】 | 11月11日 | 宇宙での姿勢制御 (萩生剛大) |
| 【第7回】 | 11月18日 | 宇宙での骨格筋への影響① (谷端淳：慈恵医大) |
| 【第8回】 | 11月25日 | 宇宙での心臓系への影響① (岩瀬敏：愛知医大) |
| 【第9回】 | 12月2日 | 宇宙での心臓系への影響② (南沢孝：慈恵医大) |
| 【第10回】 | 12月9日 | 宇宙での骨格筋への影響② (岡野史雄：松本大学) |
| 【第11回】 | 12月16日 | 宇宙での骨格筋への影響③ (志波康一：久留米大) |
| 【第12回】 | 12月23日 | 宇宙飛行とリハビリテーション (山田源：杏林大学) |
| 【第13回】 | 1月6日 | 宇宙放射線の影響① (山敷康亮) |
| 【第14回】 | 1月13日 | 宇宙放射線の影響② (山敷康亮) |
| 【第15回】 | 1月27日 | 閉鎖環境の影響 (永本憲治) |

講義受講による習熟度評価

第1回と第15回に各自にコンセプトマップを作成してもらい、講義受講前後のコンセプトマップの比較からどのような概念構成の変化があったのかを評価。

コンセプトマップ (概念地図) とは

コンセプト (概念) 間の関係を、ノードとリンクとリンク語を使って描いた図 (Novak & Gowin, 1984)

コンセプトマップの作成手順

- ・ 授業で学んだことをできるだけ思い出す。
- ・ 別紙 (A3) の中心テーマ「有人宇宙活動」の周りに、思い出したコンセプト (名詞・名詞句) を相互の関連性を考えながら配置し、リンクでつなぐ。
- ・ 可能な限りリンク語 (コンセプト間の関係性を説明する言葉) を書き入れる。
- ・ なお、覚えていない内容で作成することが重要であるため、講義の配布資料などを見ながら作成しないこと。



図1 「人間地図」を中心とした宇宙空間のコンセプトマップ
 出典：ノバク、J. & グーウィン、E. (1984) 『学習の地図』東京：丸善出版。p. 128
 【改訂】 Novak, J. D. & Gowin, E. B. (1984) Learning how to learn. New York: Cambridge University Press.

JAXAマウス飼育装置



Twins Study

A study new to NASA took place throughout the historical One-Year Mission beginning in March 2015 and ending in March 2016. The landmark Twins Study helped scientists better understand the impacts of spaceflight on a human body through the study of identical twins. Retired astronaut Scott Kelly spent one year in low-Earth orbit aboard the International Space Station while retired astronaut Mark Kelly, his identical twin, remained on Earth. The twins' genetic similarity provided scientists with a reduced number of variables and an ideal control group, both important to scientific investigation. Study investigations were selected as part of the Human Exploration Research Opportunities solicitation developed and managed by NASA's Human Research Program.



Scott Kelly (NASA astronaut, Ret.)
Crewed: ISSA



Mark Kelly (NASA astronaut, Ret.)
Crewed: ISSA



<地上の現象との共通点>

宇宙での筋・骨萎縮

(原因) 微小重力による廃用(使わない)ことによって生じる



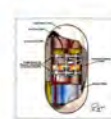
- ・長期臥床患者における下肢での現象
- ・高齢者での筋萎縮(サルコペニア)
- ・骨粗鬆症患者

<宇宙実験からのスピノフ>

他分野でのスピノフ



血液分析装置



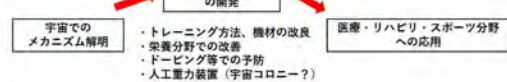
深部体測定装置



加温食分配機

骨筋分野では?

カウンターメジャーの開発



一例:

国際宇宙ステーションに長期滞在する宇宙飛行士の筋骨格系廃用性萎縮へのハイブリッド訓練法の効果

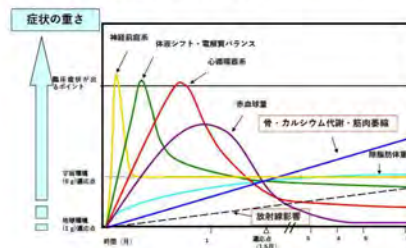
代表研究者 久留米大学 志波直人教授

概要 電気刺激と運動抵抗を与えるハイブリッドトレーニングにより、飛行前後における飛行士の筋力、筋量、骨量等を評価。筋骨格系廃用性萎縮の予防効果を確認する



人が宇宙で活動する時の課題発見!

宇宙開発の初期、宇宙環境に対するヒトの適応応答が系統的に調べられ、臨床医学的課題が明らかになった。



今後の宇宙分野



アメリカの民間宇宙活動...

1. コロニバ事故による宇宙実験の停滞
コロニバ事故により、宇宙開発スケジュールが白紙になる。
2003年2月1日の事故（STS-107）から2005年7月25日のシャトル復活（STS-114：野田宇宙飛行士乗組）まで2年半。
2. シャトルでの実験を想定した実験ステーションあるいはフリーフライヤーでの実験に振り替える検討。
→ステーション計画の不透明さ、ロシアとの共同作業の難しさ
3. 経年による実験テーマの難化への対応
→地上研究の推進、新しい解析法の導入
4. 研究チームのモチベーションの維持
5. 宇宙実験の目的、課題の明確化

宇宙船
寸法

船内実装室: 4.4m外径・11.2m長さ (円筒形)
船内保管室: 4.4m外径・4.2m長さ (円筒形)
船外実験プラットフォーム:
5.0m径×4.0m長さ×5.6m高さ

(標準)
船外バケット: 4.9m径×2.2m高さ×4.2m長さ (フレーム式)
ロケットアーム (機序方式)
アーム長: 9.9m高さ
アーム径: 1.9m高さ
総重量: 約27t
(等)
最大消費電力: 120VDC
寿命: 10年以上
構造材料: 炭素繊維複合材
構造重量: 炭素繊維複合材で最大4t
構造重量: 炭素繊維複合材で最大4t

船内保管室

4.4m

船内実装室

11.2m

エアロック

ロケットアーム

船外実験プラットフォーム

船外バケット

Saibo Rack On-orbit
Clean Bench (CB)
Cell Biology Experiment Facility (CBEF)
Cell culture incubation

High Definition TV System On-orbit
HDV camera
Multi-Function Controller

Kobaro Rack On-orbit
Gradient Heating Furnace (GHF)
Mammal processing

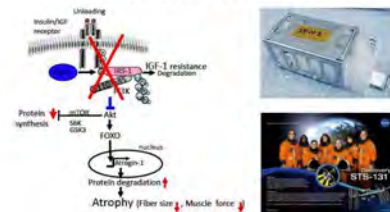
Ryukai Rack On-orbit
Flood Protection
Space station
RSCV
Payload

Launchnet In 2011 (HTV-2)
Multi-Purpose Small payload Rack
To be launched in ~2012
To be launched in ~2014

Aquatic Habitat
Fluorescence Microscopy
Electrostatic Levitation

Figure 1: Overview of the Experiment Unit (EU) and its components. The top row shows three views of the EU: a front view with internal components, a side view with a person inside, and a top-down view. The bottom row shows a close-up of the EU's base. Text labels identify the EU, CEU, PEU, MEU, and VMEU, and describe the CEU's specialized units for plant experiments, small animal experiments, camera operation, and measurement experiments.

目的	Cbl-bに注目しながら、どのようなメカニズムで筋肉が萎縮するかを明らかにする
概要	ラット筋芽細胞(L-6)をCBEFで培養し、10日後に筋肉成長因子(IGF-1)を加え、その後、地上で遺伝子・タンパク質について解析する



目的 骨芽細胞と破骨細胞に相当する細胞群を持つウロコを対象に、宇宙での骨代謝制御機構を解明する

イタリア宇宙機関が作製。
2009年、6匹のマウスを3ヶ月ISSで飼育。
内3匹が地上に帰還して、各研究者がサンプルシエアを行った。

(A) 国際宇宙ステーションさばう実験室の
ウス飼育実験装置 (MDS) で作業中の
SAの宇宙飛行士・コバヤシ・サトル
http://www.nasa.gov/mission_pages/st
on/research/experiments/665.html#i
pages

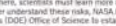
(B) 宇宙でのマウスの様子

项目名称	名称	开始年	期间	参加国家	进展	年迄	备注
MacDonnell Douglas Long-duration Life-Supporting Program		1965, 1966, 1970	30, 30, 30	4	US	60 Day Manned 25, 25, 25	65, 66-Day Orion Santa Monica, 90 Day mission Huntington
BIOS-3		1972-73	180	3	Russians Unmanned		BIOM, Russia
Lunar-Mars Life-Support System Test Project (LMLSTP)		1995 to 1997	15, 30, 40	4	US	20, 60	ISC.
HYDRABUS		1989	72	4 (1)	US	60	COMEX hyperbaric chambers, HYDRIX experiment.
ISEM/Gililatation Study for the European Manned Space Infrastructure		1990	28	6	Int.	6 males with 2 back bags	NEUTEC hyperbaric Chamber Complex
EXEMSI (Experimental Campaign for the European Manned Space Infrastructure)		1993	60	4 (1)	Int.	25-35 (26-38)	ESA
HUBS (Human Behavior Study)		1995	135	3	Russians Simulated	30, 32, 35	MIR Space Station, Simulation, BIOM
Simulation of Flight of International Crew on Space Station, SPINCS-96		1999	120, 240	4	Int. Russia	27-40	BIOM, Russia
MINI-EARTH		2003-2007	7, 14, 28	2	Netherlands	26-40	IES, Aernem, Japan
BIOSPHERE2		1991-1994	2 years, 8 (4)	Int.		27-43 and 24-37	BIOSPHERE2 Arizona, USA
BIOM500		2007-2011	15, 105, 60	6	Int.	24-37	BIOM, Russia



Assessing the risks of space radiation to human space travelers

As the National Aeronautics and Space Administration (NASA) prepares for future missions to the Moon and Mars, many of the health risks of cosmic radiation are still uncertain. Before humans can travel for extended periods outside Earth's atmosphere, scientists must learn more about the risks posed by cosmic radiation. To better understand these risks, NASA has teamed with the U.S. Department of Energy's (DOE) Office of Science to establish the NASA Space Radiation Laboratory (NSRL) at DOE's Brookhaven National Laboratory. There, scientists use beams of ions to simulate cosmic rays and assess the risks of space radiation to human space travelers and equipment.

NASA Space Radiation Laboratory - Brookhaven National Laboratory



シャトルの打ち上げ

これまで何が分かったか？

後脱離実験

パラボリックフライト実験

3Dクリノスタット

落下塔での実験

[illegible]

地球上の生き物は生まれてからすぐ重力の中で運動していただい重力がなくてはならないような事がわかってきた

トビは空を飛ぶけれど
ロケットの宇宙飛行士「レリ・ギョウコフ」さんは1968年1月16日から1968年1月21日まで、自由落下、1968年1月21日から1968年1月23日まで、自由落下の宇宙ステーション「ミール」で生活して、トビと飛行機について学ぶ事になった。

アメリカのロケット「シレン」で宇宙飛行士は77歳で9日間の宇宙飛行を行った。

宇宙で卵が孵る。鶏から子供へと成長することもできる卵生動物である
メカボが宇宙で産む卵と同じように宇宙でもできる卵生動物である。その子供は、母体にはいなくて子宮内を過ごし、一ヶ月で多くの成長

生まれてすぐの卵はかえらない。
生まれて少し地上に置いた卵はかえったぞ！

重力が無いと生き物にどのような影響があるのか、重力を利用した方が無くて生き物について仕組みについて解っても！

オービター：スペースシャトル コロンビア号
 打ち上げ：2003年1月16日午前10時39分（米国東部標準時間）
 帰還：リエントリーの際在空中分解
 飛行期間：16日
 搭乗員：リック・ハズバンド（コマンダー）他計7名

STS-135 (2011年7月) で終了

対策：

<飛行前>

軌道上滞在時に生じる筋・骨萎縮や有酸素能力の低下に対して、あらかじめ地上でこれらを向上させる目的で運動プログラムを行う

- ・打ち上げ1年前から体力トレーニングが開始される
- ・週3回、1日2時間で有酸素運動と抵抗運動などを行う

<飛行中>



週6日、1日あたり2.5時間（準備・ストレッチ30分、心臓器運動45分、抵抗運動45分、片付け・着替え30分）の運動をする

ペンギンスーツ

スーツに弾力バンドがついており、張力によって体に負荷がかかる



<帰還直後の様子>



<飛行後>

帰還直後の転倒による骨折や捻挫を防止し、飛行前の体力に回復させることを目的に行われる

第1フェーズ (帰還3日後まで)	介助つき歩行、パイプバス、マッサージ、ストレッチ
第2フェーズ (帰還2週間まで)	水中運動、歩行訓練、マッサージ、ストレッチ、有酸素運動、抵抗運動
第3フェーズ (帰還2週間以降)	個人に合わせた積極的なトレーニング

Ohtsuka et al., Jpn J Rehabil Med 43: 186-194, 2006

これまで行われてきた地上・宇宙実験

地上での模擬宇宙環境実験

<ヒト対象実験>

ベッドレスト実験



パラボリックフライト実験



ウォーターマージョン



閉鎖環境適応訓練設備



下半身除圧負荷装置



低圧環境適応訓練設備



前庭機能研究設備



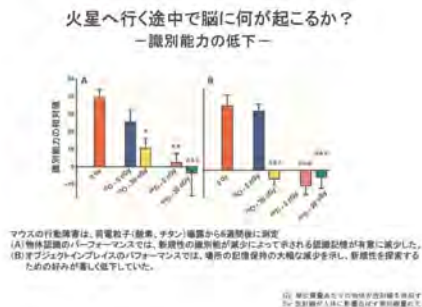
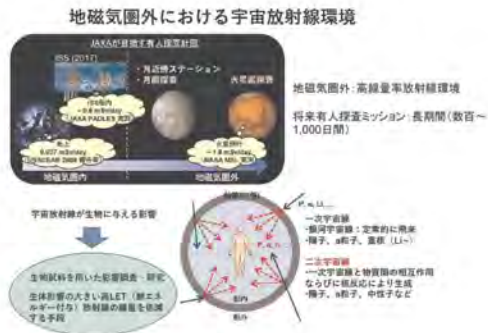
閉鎖環境の模擬実験 (Analog Mission 海外事例)

ハワイ大・NASA Hi-SEAS @ ハワイ 6名 1年



NASA @ JSC HERA 4名 45日間





宇宙での閉鎖環境

宇宙に人がいくと、精神心理にはどのようなストレスがかかるのでしょうか？
大きく、以下の三つにわけて調査研究・対処法の検討が行われています。

- ・隔離：地上と隔絶した環境で過ごす孤独感
- ・社会：異なる文化を持つ限られた人々と毎日寝食を共にして暮らす対人関係上のストレス
- ・危険：危険な環境で過ごす緊張感

そのため、宇宙に行くための求められる資質が問われ、選抜・訓練をへて「宇宙飛行士」が誕生します

- ・ストレス耐性
- ・協調性
- ・健康体
- ・専門能力
- ・言語能力
- ・宇宙に行きたい！

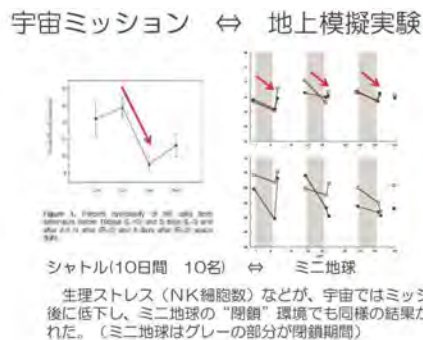
厳しい選抜試験
長い訓練期間
↓
宇宙飛行士

宇宙飛行士 ⇔ 地上の模擬実験

超過酷 ⇔ それほど過酷ではなく、リスク・ストレスをデザイン可能

スーパーマン ⇔ わりと普通の人

一般人被験者で、地上で行う模擬ミッションは、起こりうる危険の予知や、その対処法の検討、さらに、選抜方法の検討に有効



宇宙（閉鎖環境）での感染症対策

宇宙飛行士は打ち上げの10日前から外部との接触を断ち、隔離室で生活する（Quarantine）。このため、米航空宇宙局（NASA）はHSP（Health Stabilization Program）として隔離方法を規定している。
結核については、血液検査でチェックする。

UAE astronauts to be quarantined ahead of historic launch

17-year-old Al Manousfi and Sultan Al Nayefi to be placed in clean environment to avoid bringing germs up to the International Space Station. (Sci, 2018)

宇宙環境が人体に及ぼす影響要因

重力の変化
微小重力(ISS) ⇔ 過重力(打上げ、帰還時)
月 = 1/6 G 火星 = 3/8 G

- ① 体液の移動、心循環器系への負荷・体液シフト
- ② 神経・平衡感覚系の変化 → 宇宙酔い
- ③ 筋骨格系の変化→筋萎縮・骨量減少
- ④ 赤血球が約15%減少
- ⑤ 長期 → 血液、免疫、栄養代謝、等
- ⑥ 精神・心理への影響

宇宙放射線
⑦ 酸化ストレス
⑧ DNA損傷

【第11回】 12月16日 宇宙での骨格筋への影響③ (志波直人：久留米大)

氏名： 志波 直人 (しば なおと)

所属機関名： 久留米大学医学部

研究室名など： 整形外科教室

メールアドレス： nshiba@med.kurume-u.ac.jp

所属学会：

日本整形外科学会、日本宇宙航空環境医学会、日本臨床バイオメカニクス学会

自己紹介ウェブサイトURL：

<http://www.med.kurume-u.ac.jp/med/orth/> (現在、改定作業中)

講演タイトル：

宇宙環境で有効なトレーニング装置の研究と開発 ―宇宙両用の装置を目指して―

発表要旨：

活動性の低下により筋肉や骨は著しい廃用性の変化を来し、これは加齢による変化よりも著しい。宇宙飛行士は無重力による筋骨格系へのメカニカルストレスの著明な減少により、さらに著しい変化を来すが、これらは共通する部分も多く、その予防にも共通点を見出すことができる。臨床と宇宙での筋骨格系廃用性変化について解説するとともに、宇宙医学実験の結果と電気器具メーカーとの市販装置の共同開発について報告する。

研究、趣味、得意分野など簡単な自己アピールをお願いします：

歩行で重力とのバランスをとるため股関節周囲筋が収縮して体重の3倍の合力が加わる。私の宇宙医学研究の入り口は、股関節外科に関連するバイオメカニクスでした。

宇宙に魅せる思いを語ってください：

アポロ11号が月着陸した時、私は中学一年で月を見上げてあそこ人が立っていると感激したのを覚えています。有人宇宙活動の一助となればと思い研究を継続しています。



【第12回】 12月23日 宇宙飛行とリハビリテーション (山田深：吉林大学)

氏名： 山田 深 (やまだ しん)

所属機関名： 吉林大学 医学部

研究室名など： リハビリテーション医学教室

メールアドレス： yamada-shin@jlu.kyqj.cn

所属学会：

日本リハビリテーション医学会、日本宇宙航空環境医学会

自己紹介ウェブサイトURL：

<http://www.kyqj.cn/univ/graduate/medicine/education/staff/detail/?id=med42002>

講演タイトル： 宇宙飛行士のリハビリテーション

発表要旨：

宇宙長期滞在では筋萎縮、運動耐容能の低下といった様々な変化が身体に生じ、リハビリテーションが必要となる。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、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。

研究、趣味、得意分野など簡単な自己アピールをお願いします：

宇宙とともにアメリカンフットボールをこよなく愛し、仕事の傍ら母校医学部体育会の監督を務めています。練習とリハビリテーションのメニューはとても似ています。

宇宙に魅せる思いを語ってください：

宇宙から地球の片隅まで、人の生活あるところにリハビリテーションあり。日常の診療・研究が極限環境への挑戦につながっているとところに魅力を感じます。



宇宙医学概要

宇宙医学とは？

宇宙空間における人体の生理的変化とその対応策、病気の予防、宇宙環境を利用した病気の治療、宇宙空間における人間の生活設計などを対象とする医学。(大辞林)

人間が宇宙空間で生命を維持し、人体を防御する際に遭遇する諸問題を、医学的、心理学的、生理学的あるいは生化学的に研究する学問。(世界大百科事典)

宇宙医学の目的

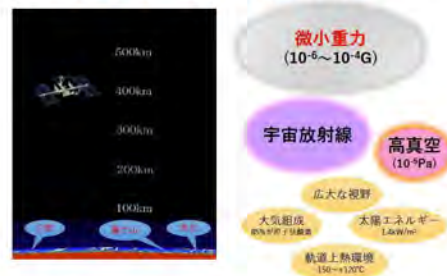
宇宙の環境が健康にどのような影響があるかを研究して、健康が害されるメカニズムをつきとめ、対策を生み出し、それらの影響を最小限に抑える努力を行って宇宙飛行士の健康と体力を維持することが「宇宙医学」の目的です。(JAXA HRPより)

宇宙飛行士の健康管理

宇宙環境を利用した医学研究

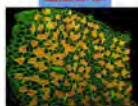
宇宙環境での人への影響

<宇宙ステーション軌道環境>



<骨格筋の特徴>

遅筋線維



速筋線維



遅筋線維：

赤色で、収縮が遅く瞬間的な大きな力は発揮できないが、持久性に優れている

速筋線維：

白色で、早い収縮を行い瞬発性に優れているが、疲れやすく持久力は弱い



微小重力環境下での骨・筋肉への影響

骨格筋への影響：

<筋萎縮>



コントロール群 後肢筋断面積 (3ヶ月)

Kawano et al., Am J Physiol Cell Physiol 285: C459-67, 2008.

・抗重力筋(遅筋優位な筋肉)の萎縮が顕著

・短期飛行(スペースシャトル)では、約10%萎縮

・腰部背筋：10.3%

・ハムストリング：8.3%

・下腿三頭筋：6.0%

・大腿四頭筋：6.0%

・ミール宇宙船による長期滞在(115日)では、約20%萎縮

・腰部背筋：18%

・下腿三頭筋：18%

・大腿四頭筋：12%



イーロンマスクの火星移住構想



民間主導の月探査
Blue Origin Blue Moon



宇宙医学の限界：

- 現在まで約500名ほどしか宇宙に行っていない。
- 宇宙実験の機会が少ない。
- 地上での宇宙の模擬実験は正確に宇宙環境を反映しているのか。



検証の機会が少ないため、正確な予測や予想ができていないのか？
現在の宇宙医学は、地球に帰還することをベースに考えている。



宇宙空間やハビタブル惑星へ居住できるのか？



今の宇宙医学では答えが出せない。
個人的には、時期が来れば人類は適応できると信じている。
地球（1G）に帰還しないのであれば、宇宙に適応したままでよい？

重要課題：

- ◆ 宇宙放射線の影響を解明すべき
- ◆ 精神心理的サポートを重視すべき
- ◆ 恒星間飛行中の娯楽を考えるべき

Back Up

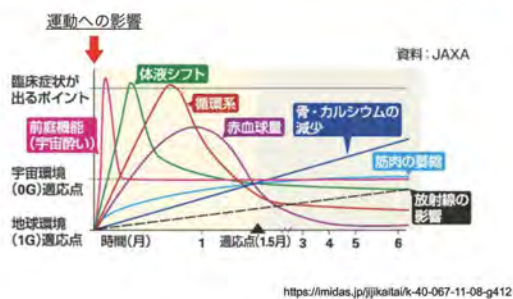
4.1.2. 第2回宇宙医学講義スライド集

2020年度後期 有人宇宙医学講義
担当：萩生 翔大（京都大学）

宇宙での姿勢制御

- 宇宙環境で運動できるのか？
- 身体運動における重力の影響とは？
- 長期間の宇宙滞在によって運動の仕方が変わる？

宇宙環境が人体に及ぼす影響



自己紹介



萩生 翔大 (Hagio Shota), Ph.D

京都大学 大学院人間・環境学研究科 専任講師
宇宙総合学ユニット

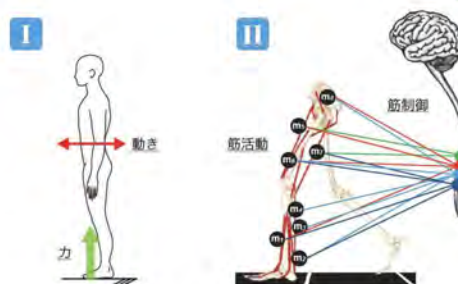
専門分野：身体運動制御学、神経科学
キーワード：自由度、運動学習



立位姿勢制御



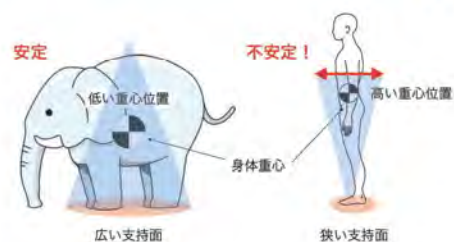
本講義の進め方



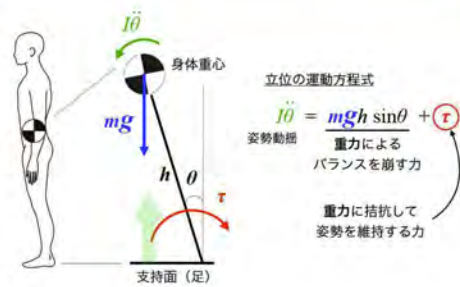
講義のアウトライン

- I 宇宙での運動を考えるための姿勢制御
宇宙滞在によって生じるバランス制御能力の変化
- II 宇宙滞在のために考えるべき筋制御問題
長期宇宙滞在によって生じる筋制御の変化
惑星探査ミッションを目指した今後の研究

ヒトの静止立位は非常に不安定



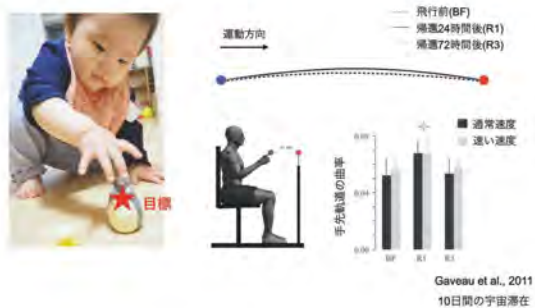
バランスを崩す力



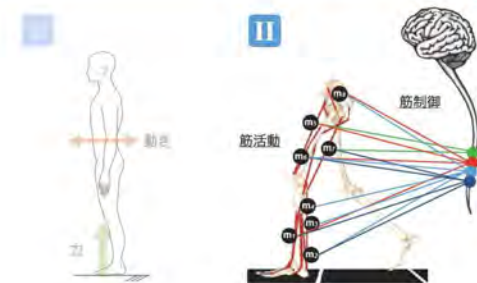
宇宙環境が運動を変える



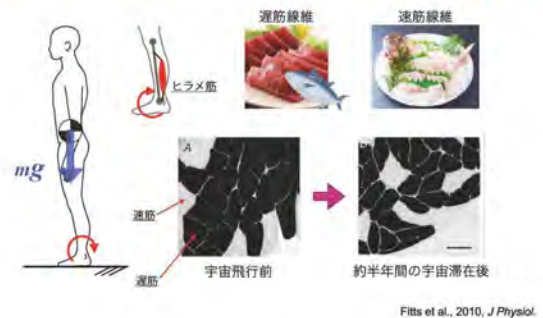
宇宙滞在前後のリーチング運動軌道の変化



講義のアウトライン



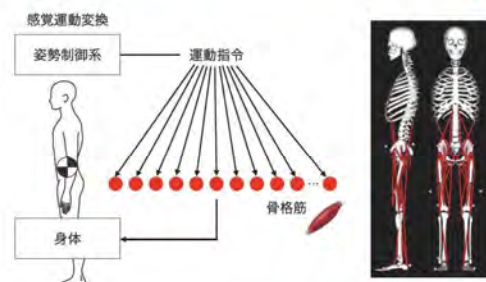
抗重力筋の萎縮



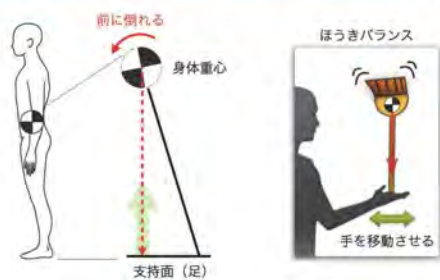
筋萎縮を抑えるための筋力トレーニング



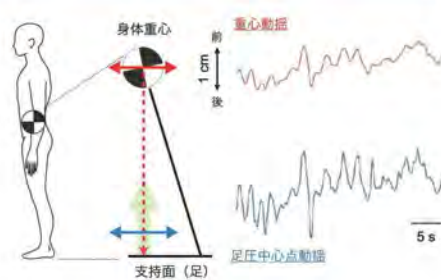
多くの筋活動が運動を生み出す



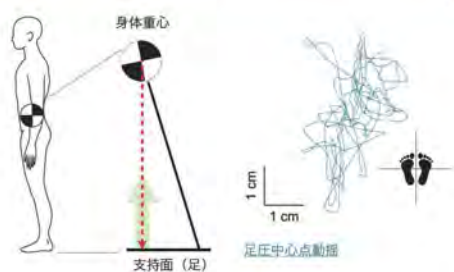
絶え間のないバランス制御



揺れながらバランスをとっている



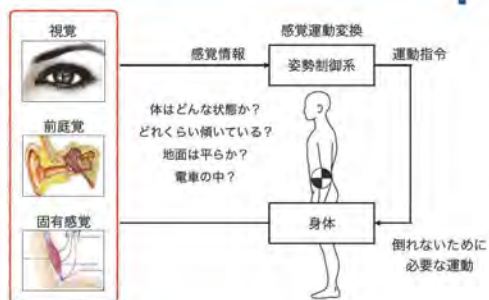
揺れながらバランスをとっている



立位を維持するための感覚運動制御



姿勢制御に関わる感覚センサー



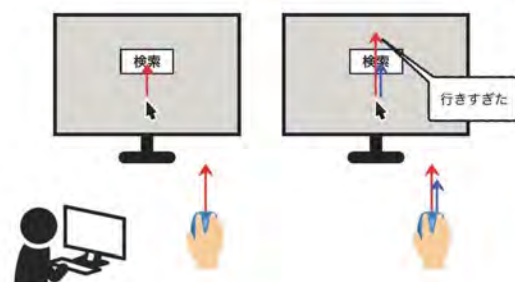
感覚運動変換はあらゆる運動制御の基礎



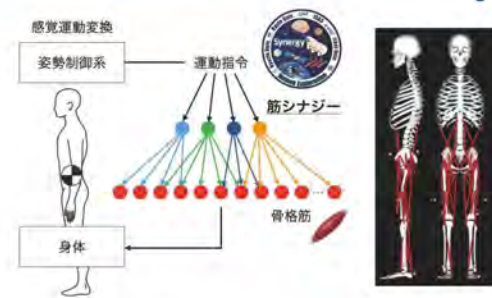
知識があるから運動できる



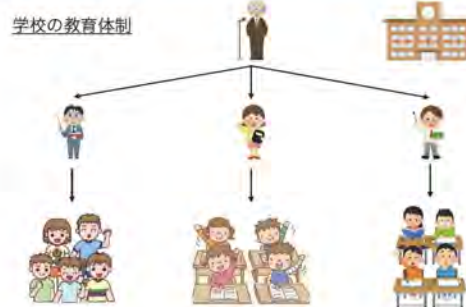
運動の知識は日々蓄えられている



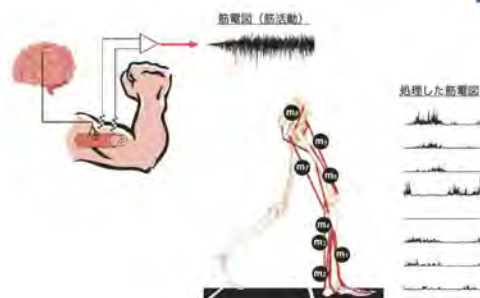
膨大な数の筋を制御するための仕組み



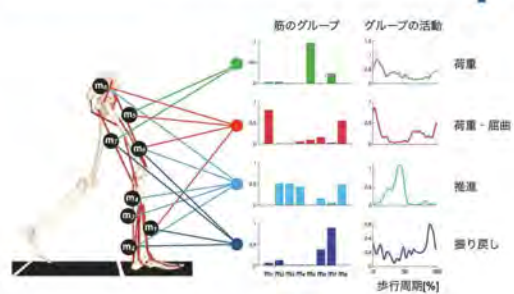
シナジーによる制御の簡略化



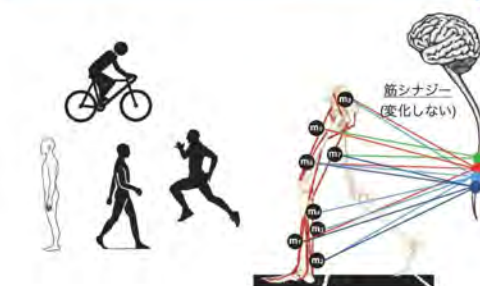
筋シナジーを定量する



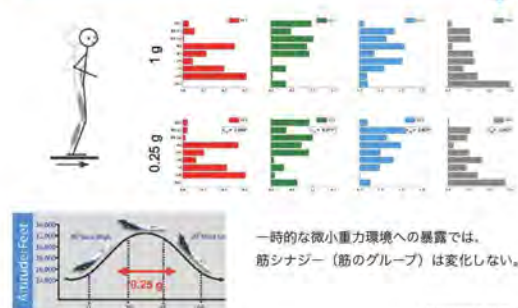
筋シナジーを定量する



筋シナジーはあらゆる運動の基礎

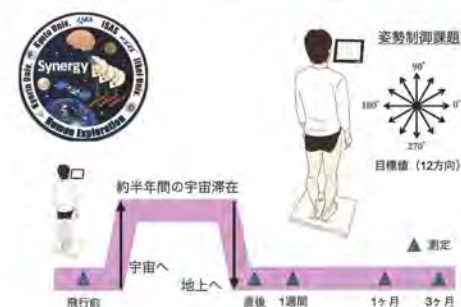


微小重力環境での筋シナジー



Holubarsch et al., 2019

長期宇宙滞在前後の立位筋シナジーの定量



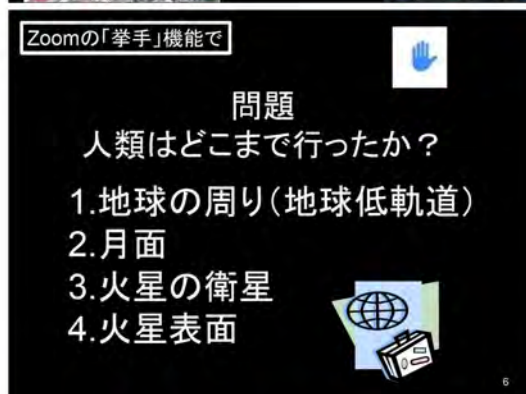
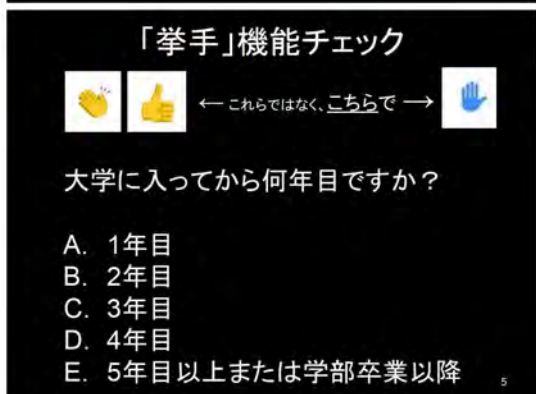
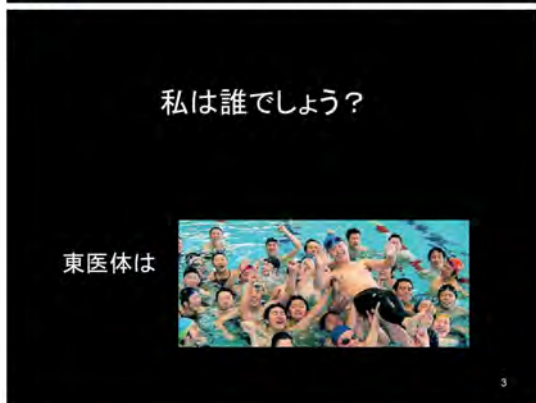
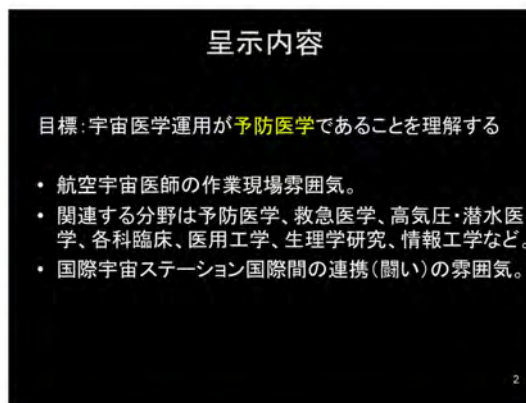
本日のまとめ

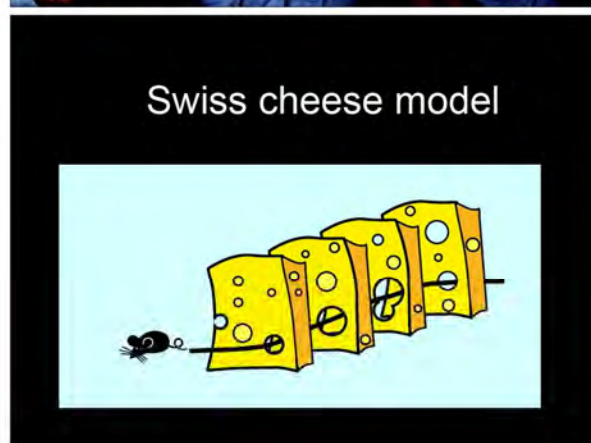
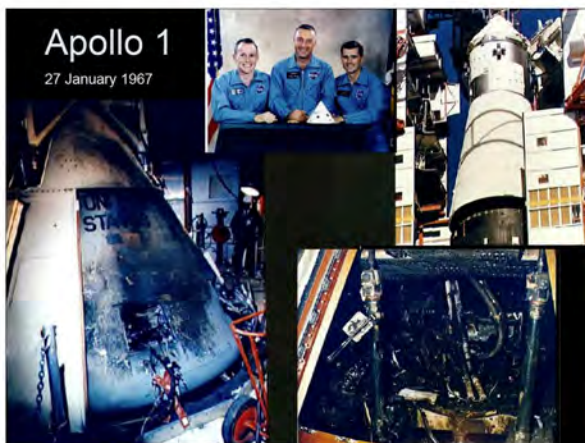
- ヒトは重力に抗して姿勢を制御している。
- 宇宙の新たな重力環境では、運動の知識を更新する必要がある。
- 長期宇宙滞在によって、筋シナジー（筋のグループ）が変化する。
- 筋シナジーが変化することで、帰還後、姿勢の安定性が低下する。

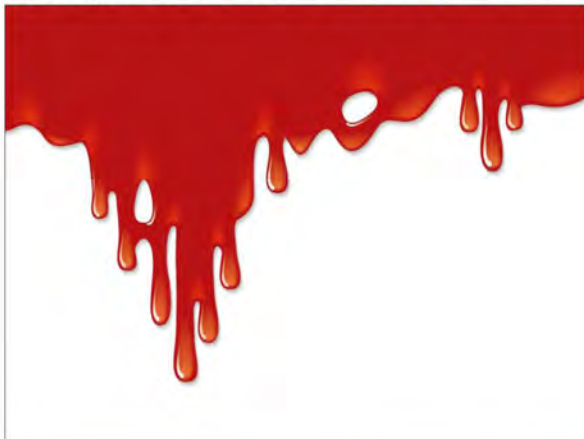
*授業後質問のある方は下記の获生e-mailをお願いします。

hagio.shota.3r@kyoto-u.ac.jp

4.1.3. 第3回宇宙医学講義スライド集







スペースシャトルでの回転椅子実験（肥塚実験2007）



International Space Station 23 May 2011
Exp27 STS-134



精神・心理学的問題

地上でのアナログ実験（閉鎖施設、南極、海底、洞窟、砂漠など）が実施されている。

・被験者の質が問題



197

Star City rotary chair vestibular training (tour)



睡眠の問題への対処

2ch EEG

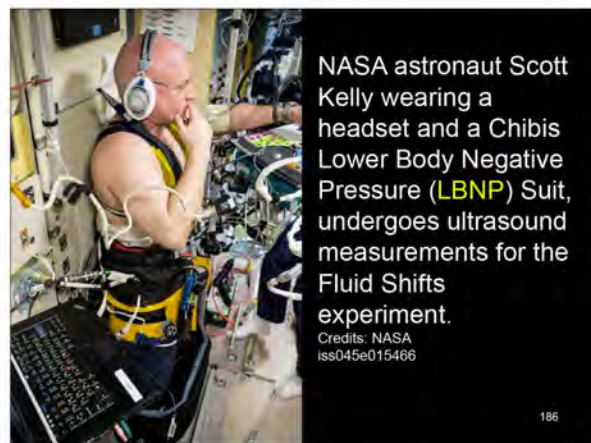
blue light

sleep pills



宇宙analogueの代表、Biosphere2（アリゾナ州）





NASA - JOHNSON SPACE CENTER

FLIGHT RULES

A13-202 FLUID LOADING

A. FLUID LOADING IS REQUIRED BY ALL CREWMEMBERS PRIOR TO DEORBIT. CREWMEMBERS WILL INITIATE FLUID LOADING 1 HOUR BEFORE DEORBIT TIG AND SHOULD BE COMPLETED BY E1. EACH CREWMEMBER WILL CONSUME 8 OUNCES OF WATER AND TWO SALT TABLETS OR 8 OUNCES OF OTHER APPROVED SOLUTION EVERY 15 MINUTES, ACCORDING TO THE FOLLOWING TABLE:

①(030994-1406) | ②(011801-7187A)

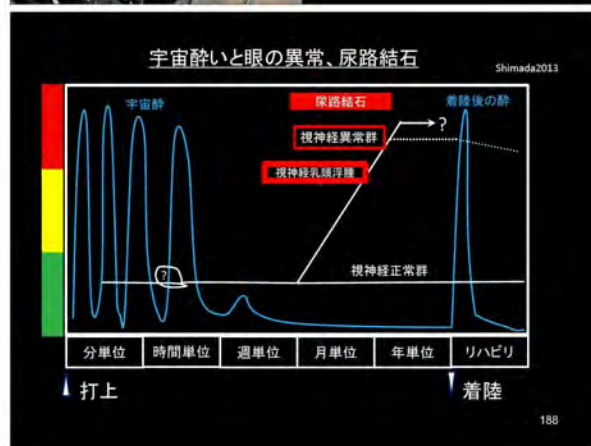
1 fl oz = 29.57 mL 1 oz = 28.35 g

FLUID LOADING AMOUNTS FOR ENTRY BASED ON BODY MASS:

PREFLIGHT CREWMEMBER MASS	NUMBER OF 8 OZ DRINK CONTAINERS	AND	NUMBER OF SALT TABLETS OR	APPROVED SOLN (OZ)
<120 LBS	3		6	24
120-155	4		8	32
156-190	5		10	40
>190 LBS	6		12	48

③(050420-7187) **1 lb = 0.45359 kg**

THE CREWMEMBERS WILL BE INSTRUCTED ON THE PROPER AMOUNTS PRIOR TO LAUNCH. REMINDERS CAN BE GIVEN DURING THE ENTRY DAY PMC, IF NECESSARY.



New England Journal of Medicineから 宇宙飛行士のロングフライト血栓症明らかに 地上での常識は通じない宇宙旅行時の予防策

2020/01/10

2020年1月2日発行のNEJM。頸静脈血流測定の研究の中で発見された1症例の報告。

11人のISSクルーのうちの1人に、飛行50日目のエコー検査で左内頸静脈血栓が発見された。エノキサパリンの皮下注射を43日間の後、補給船で届いたアピキサパンを90日目まで5mg/1日2回、2.5mg/1日2回に減量、地上への帰還4日前まで。帰還後10日では血栓は消失。

<https://medical.nikkeiip.co.jp/leaf/etc/med/evd/press/lecture/onomura/202001/563775.html>

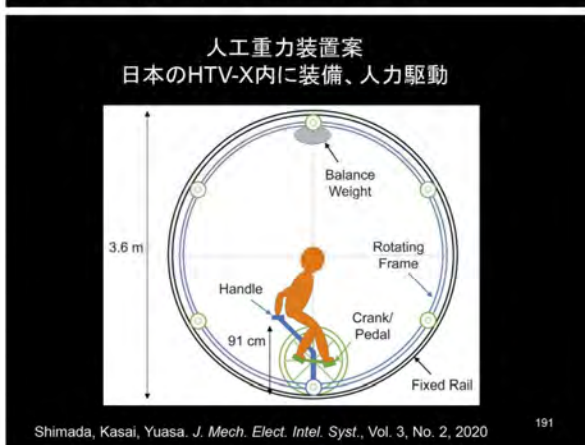
JAMA Network Open

Original Investigation | Cardiology

Assessment of Jugular Venous Blood Flow Stasis and Thrombosis During Spaceflight

Karim Marshall-Ginsburg, PhD, Steven S. Luedke, PhD, Anna V. Adenot, MD, PhD, Philippe Arthuis, MD, PhD, Scott A. Delpy, PhD, Douglas J. Elliott, PhD, Stuart M. C. Lee, PhD, Brandon A. Macias, PhD, David S. Martin, MD, James M. Patterson, MD, Robert F. O'Leary, PhD, L. Christine Roberts, MD, William J. Saxon, MD, Scott A. Delpy, PhD, Alan R. Sargent, PhD, Michael B. Stenger, PhD

Findings In this cohort study of 11 International Space Station crew members, 6 crew members demonstrated stagnant or retrograde flow in the internal jugular vein on approximate flight day 50, and 1 crew member developed an occlusive internal jugular vein thrombus during spaceflight.





(旧) 船外活動模擬用タンク・高気圧酸素治療装置



約5か月

川崎整形外科病院

歯科医師国試では必須知識のビスホスホネート顎骨壊死

ビスホスホネート系薬剤による治療中に、ある種の医薬品、局所（あご付近）への放射線治療、抜歯などの歯科処置、口腔内の不衛生などの条件が重なった場合、あごの骨に炎症が生じ、さらに壊死する顎骨壊死がみられることがあります。ビスホスホネート系薬剤による治療を受けていて、次の様な症状がみられた場合には、放置せずに医師・歯科医師・薬剤師に連絡してください。

「口の中の痛み、特に抜歯後の痛みがなかなか治まらない」、
 「歯ぐきに白色あるいは灰色の硬いものが出てきた」、「あごが腫れてきた」、「下くちびるがしびれた感じがする」、「歯がぐらついてきて、自然に抜けた。」

高気圧酸素治療と
ナノバブル水洗浄により
右下顎部疼痛は消失
炎症の再燃は認めない。



川崎整形外科病院

ガス壊疽症例



川崎整形外科病院



高気圧酸素治療
十ナノバブル水洗浄
18日目



iss059e092644

180

69歳女性

右下顎6番の根尖病巣とその周囲の顎骨壊死

関節リウマチに対してステロイド療法およびフォサマック（ビスフォスフォネート剤）内服。かかりつけ歯科医院で抗菌薬投与を受けるも、症状増悪

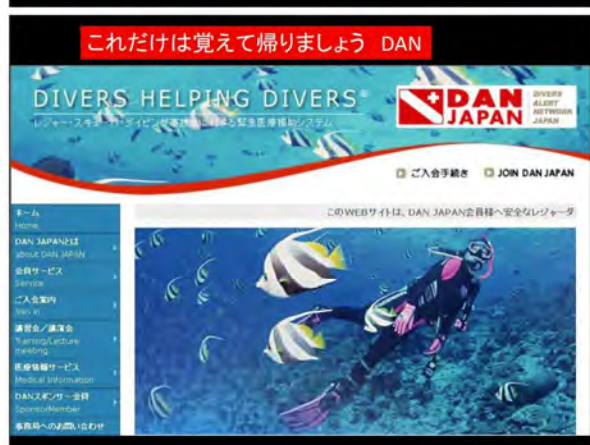
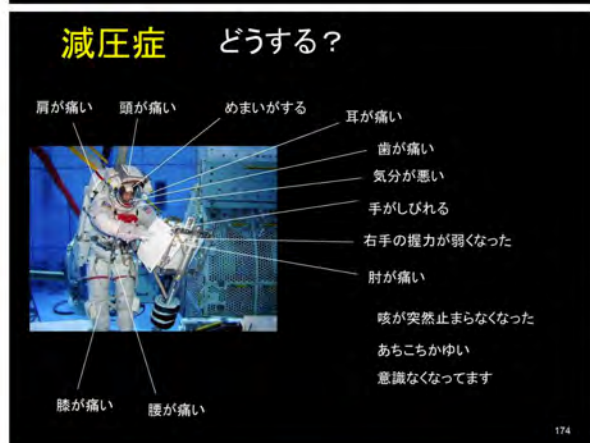
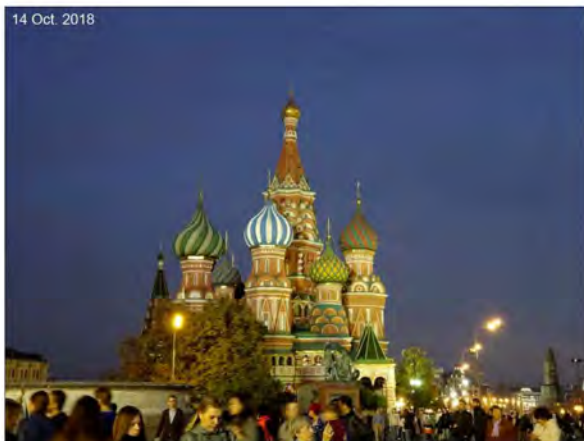


川崎整形外科病院

成果を出したぞ 宇宙医学
スペース・シャトル時代の
Fluid Loading Protocol



184





シャンプー(シャワーはありません)



散髪



ISS 38 & 39

164



アマチュア無線



どんな場所にしようとも
どんな時代に生きようとも

人とうんちは
いつでもいっしょ

2014年1月14日 茨城新聞



穴が小さいです...



トイレ(シャトル)



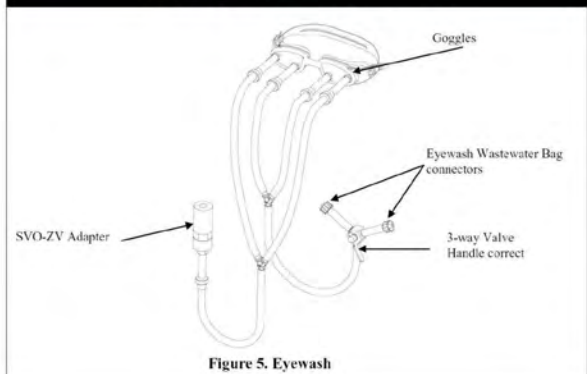
洗眼装置(旧モデル)



水を入れるのはどちらから？
1. 異物側
2. 健常側



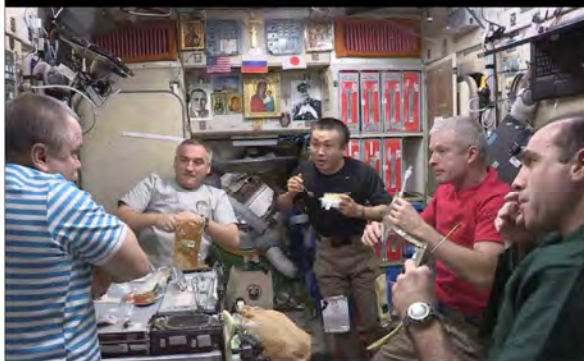
ISS Eyewash (現モデル)



宇宙の暮らし

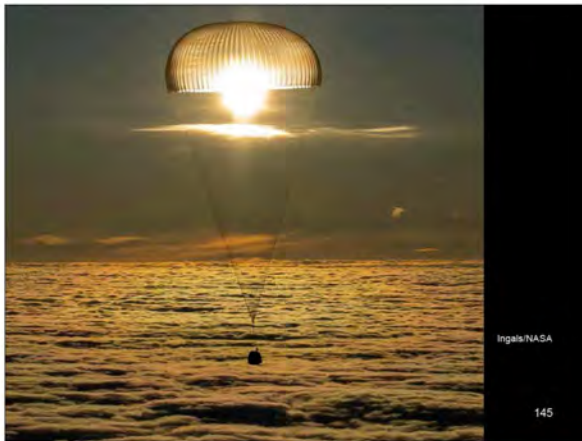


夕食はクルーが顔を揃える貴重な時間
露モジュールを使う



大西飛行士の食事例
ビタミンD 800 IU/日 付き





Ingels/NASA

145



NASA Photo

146



From the press site nearby Soyuz capsule to Russian Medical Tent

147



149

ISSの装備は救急車に及ばない。
医師がいるとは限らない。

150



ISS medical kit and Dr. Satoshi Furukawa (元東大第一外科)

ヒューストンの飛行士クリニック

At flight medicine clinic, astronauts get fixed before they go to space

NASAジョンソン宇宙センター

NASA JSCの薬剤師

NASAジョンソン宇宙センター (テキサス州ヒューストン) フライト・メディスン・クリニック中に薬局あり。 Tina Bayuse, Pharm.D.

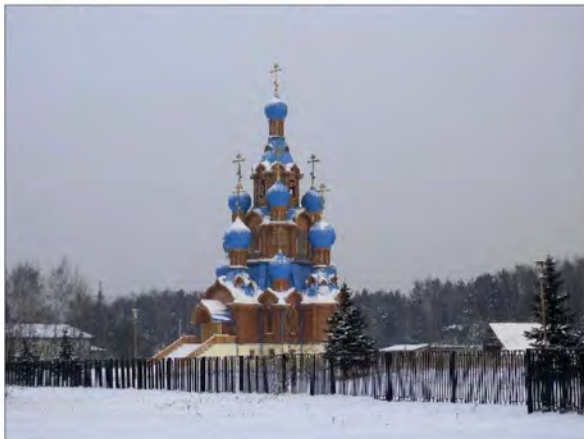
The space flight specialist



ロシア星の街



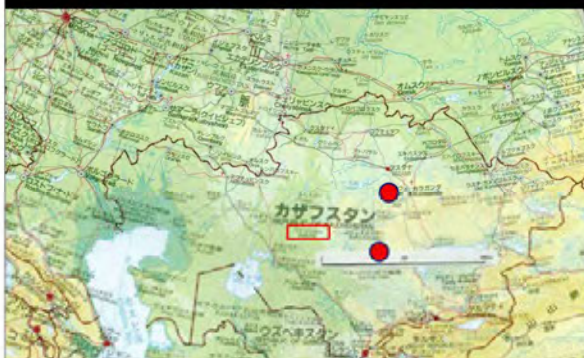
春になるとじゃがいもと肉しか出てきません



e-Bay



バイコヌールはカザフスタンにあるが今でもロシア人の街



国際調整



コロンバス(ヨーロッパ)

きぼう JEM

129

国際宇宙ステーション (International Space Station)

日本は12.8%の三番目のパートナーです。



130

国際宇宙ステーションは金星と同じくらい明るく眼で簡単に見えます。
動きが早いので時刻のみ予報で正確に確かめて下さい。

「ISS 肉眼」で検索 (FLASH) 当日に確認 アプリも



朝か夕方の薄明に見える



2020年10月27日 火星 つくば市

132



133

水上サバイバル訓練 ロシア黒海にて



訓練支援

黒海



冬季サバイバル訓練 (モスクワ郊外「星の街」)

136

京大・土井先生のスペース・シャトル飛行



121

船外活動(EVA)準備
脱窒素(純酸素吸入)中の土井飛行士
1997



STS-87

STS-87 (1997) 土井飛行士 日本人初のEVA



2008年 STS-123 (1 J/A) ISSへ土井飛行士
JEM / Kibo ELM-PS / JLP取り付けミッション



MISSION CONTROL CENTER - HOUSTON

127



S130E012016

宇宙放射線

福島の仕事よりは浴びません。
陽子、ヘリウムイオン、中性子を浴びるところが放射線業務とちよっと違います。
体外被曝です。



113

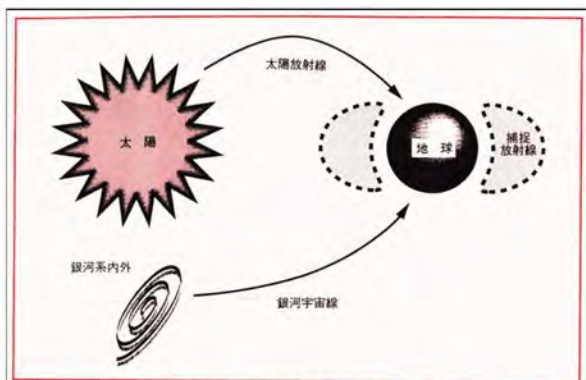
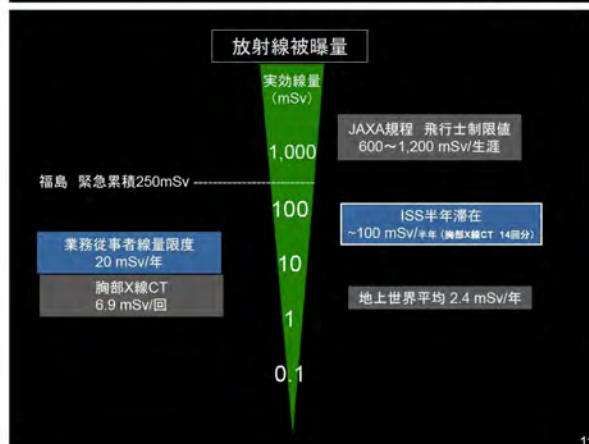


図1. 宇宙空間における3種類の宇宙放射線

立崎1997

Twitter post by @Astro_Satoshi (Satoshi Kubota, JAXA astronaut) dated June 21, 2011. The image shows him in a space suit holding a personal dosimeter (個人線量計). Below the image is a caption in Japanese explaining the purpose of the dosimeter and the radiation environment in space.



11

Image of Mount Everest with climbers. Text overlay: エベレストで一週に八名死亡. Below the image is a caption in Japanese mentioning the Project Possible expedition and the date of the photo (May 22, 2019).

117



www.nybline.com/item/20934_RL151Vintage_never_used_Book_Needles

スペース・シャトル運用
(短期飛行、~16日間)

119





ISSの1年間滞在での変化

染色体の末端についていて、年を取ると共に短くなる「テロメア」という構造は、スコットが宇宙にいる間に著しく伸びていた。しかしこのテロメアのほとんどはスコットが地球に戻って48時間のうちに短くなり、その後は地球を発つ前の状態で安定した。

<https://www.discoverychannel.jp/0000007511/>

RESEARCH ARTICLE

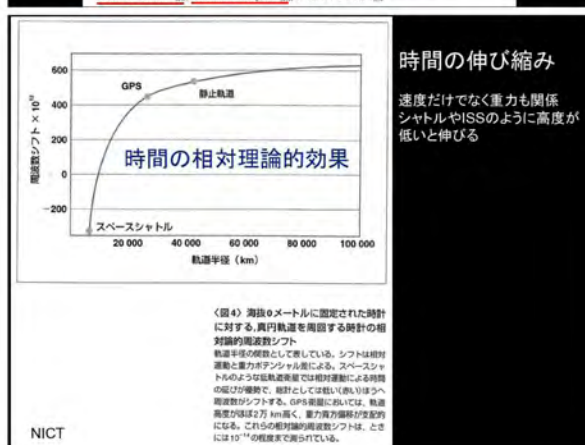
Garrett-Bakelman et al., Science 364, eaau8650 (2019) 12 April 2019

HUMAN PHYSIOLOGY

The NASA Twins Study: A multidimensional analysis of a year-long human spaceflight

Francine E. Garrett-Bakelman^{1,2,3}, Manjula Darshi^{1,2}, Stefan J. Green^{4,5}, Ruben C. Gur^{6,7}, Ling Liu^{8,9}, Brandon R. Macias¹⁰, Miles J. McKenna¹¹, Com Meydan¹², Tejaswini Mishra¹³, Jad Nasrini¹⁴, Brian D. Piening¹⁵, Lindsay F. Rizzardi^{16,17}, Kumar Sharma¹⁸, Jamila H. Siamerwa^{19,20}, Lynn Taylor²¹, Martha Hotz Vittaterna²², Maryam Afkarian²³, Ebrahim Afsharokoo²⁴, Sara Ahadi²⁵, Aditya Ambati²⁶, Manesh Arya²⁷, Daniela Bezdian²⁸, Colin M. Callahan²⁹, Songjie Chen³⁰, Augustine M. K. Choi³¹, George E. Chlipala³², Kevin Contrepols³³, Marisa Covington³⁴, Brian E. Crucian³⁵, Immaculata De Vivo³⁶, David F. Dinges³⁷, Douglas J. Ebert³⁸, Jason L. Feinberg³⁹, Jorge A. Gaidardis⁴⁰, Kerry A. George⁴¹, John Gontislas⁴², George S. Grillo⁴³, Alan R. Hargens⁴⁴, Martina Heer⁴⁵, Ryan P. Hilary⁴⁶, Andrew N. Hoofnagle⁴⁷, Vivian Y. H. Hook⁴⁸, Garrett Jenkinson^{49,50}, Peng Jiang⁵¹, Ali Keshavarzian⁵², Steven S. Laurie⁵³, Brittany Lee-McIntire⁵⁴, Sarah E. Lumpkin⁵⁵, Matthew Mackay⁵⁶, Mark G. Maccubbin-Cline⁵⁷, Ari M. McInnis⁵⁸, Tyler M. Moore⁵⁹, Kishori Nakharia⁶⁰, Hernal H. Patel⁶¹, Robert Pietrzyk⁶², Varsha Rao⁶³, Bintaro Saito^{64,65}, Denis N. Salins⁶⁶, Jan M. Schilling⁶⁷, Dorothy D. Sears⁶⁸, Caroline K. Sheridan⁶⁹, Michael B. Stenger⁷⁰, Rakei Tryggvadottir⁷¹, Alexander E. Urban⁷², Tomas Vaisar⁷³, Benjamin Van Esen⁷⁴, Jing Zhang⁷⁵, Michael G. Ziegler⁷⁶, Sara R. Zwart⁷⁷, John B. Chazotte⁷⁸, Craig E. Kundero⁷⁹, Graham B. I. Scott⁸⁰, Susan M. Bailey⁸¹, Mathias Bassner⁸², Andrew P. Feinberg⁸³, Stuart M. C. Lee⁸⁴, Christopher E. Mason^{85,86,87}, Emmanuel Mignot⁸⁸, Brinda K. Rana⁸⁹, Scott M. Smith⁹⁰, Michael P. Snyder⁹¹, Fred W. Turek⁹²

109



宇宙医学の宿題

20世紀 宇宙酔い



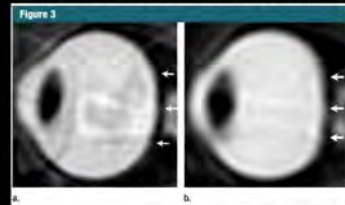
21世紀 眼の異常



Radiology (online March 13, 2012)
Larry A. Kramer, MD, Ashot E. Sargsyan, MD, Khader M. Hasan, PhD,
James D. Polk, DO and Douglas R. Hamilton, MD, PhD

長期飛行での眼の異常

眼球の扁平化が敏感な指標



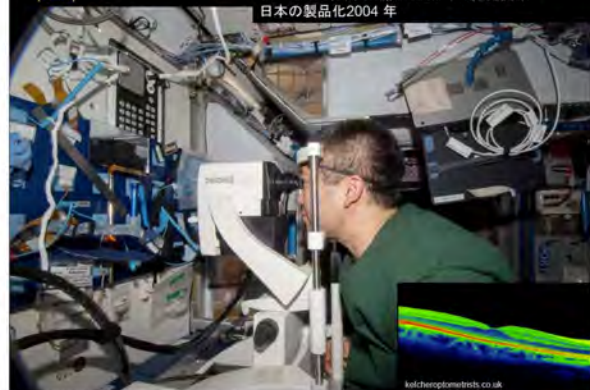
98

眼底カメラ 大西卓也飛行士 2016年7月27日



Optical Coherence Tomography (OCT)

1990 年山形大学教授丹野直弘教授、特許庁に出願
MIT 1991 年米国出願、1996 年に発売開始
日本の製品化2004 年



keithoptometrists.co.uk

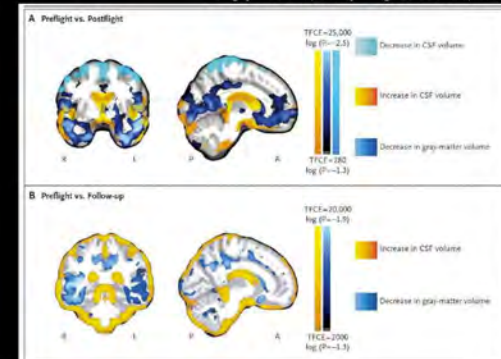
Video 1

Changes to the Brain
Astronauts after
Spaceflight

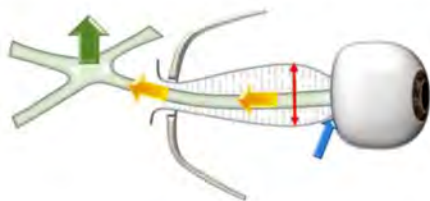
VIDEOS
1 2 3 4 5 6

Video 1. Upward Shift of the Brain
1. In sagittal view, the brain shifted 5 mm upward after spaceflight. 2. 25% decrease in volume of the brain after spaceflight.

ロシア人飛行士を被験者とした研究でも脳の部位により容積変化あり
Brain-Volume Changes in Cosmonauts at Three Time Points.
n engl j med 379;17 nejm.org October 25, 2018



102



図：長期飛行を終えた帰還後の宇宙飛行士に、眼球後部平坦化（青矢印）や視神経鞘拡大（赤矢印）が、MRI画像で報告



JAMA Ophthalmology 2018
京都大学工学研究科 熊谷、弘法リハビリテーション病院(2019年度) 橋本、大阪大学医学部研究科
103

火星に行くにはぜひこれを

人工重力



space station Skylab



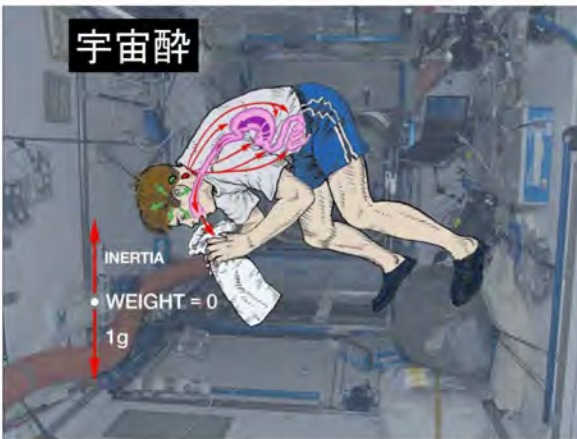
飛行機でも20秒くらいなら無重力にできる(NASAジェット)



ISS / ARED(resistive) CVIS Treadmill Velo-ergometer



宇宙酔

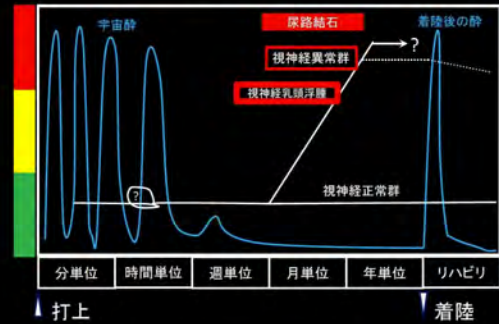


スペースシャトルでの回転椅子実験 (肥塚実験2007)



宇宙酔いと眼の異常、尿路結石

Shimada2013



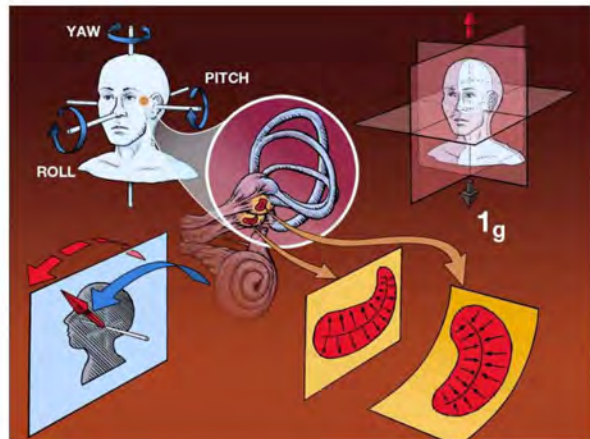
90

宇宙医学の宿題

20世紀 宇宙酔い

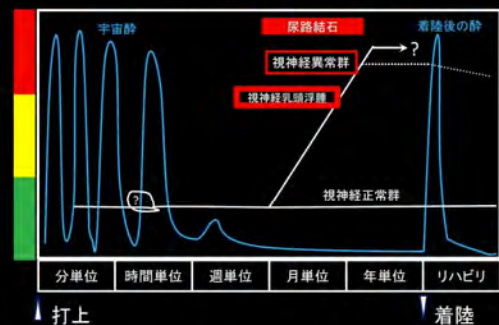


21世紀 眼の異常

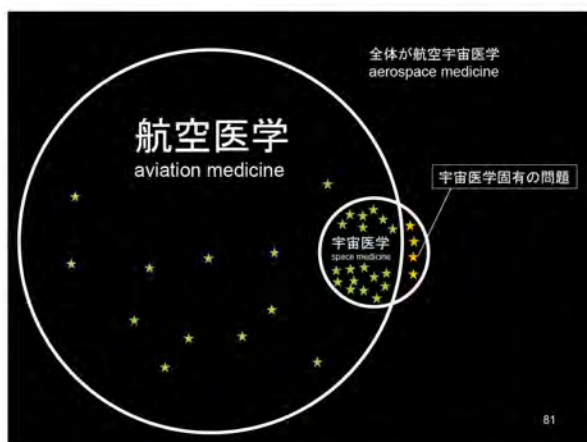


宇宙酔いと眼の異常、尿路結石

Shimada2013



96



健康管理のサイクルとしては

- 医学選抜 selection
- 維持 retention (定期健診、必要になれば治療)
- 検疫隔離 quarantine (~10日間)
- 飛行中管理 telemedicine
- 着陸前管理 rehydration
- 着陸支援・救急対応・搬送 medical evacuation
- リハビリテーション

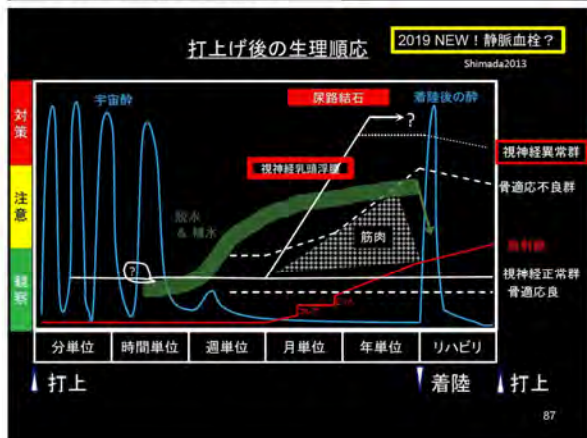
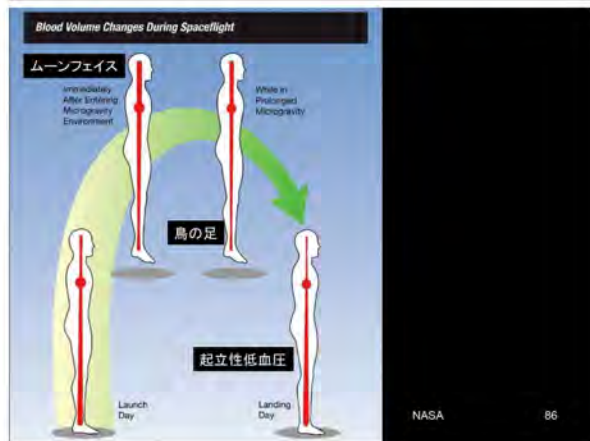
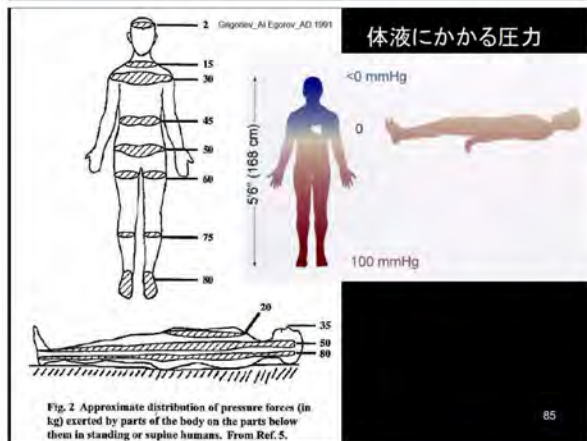
82



Space Vehicle environment
宇宙環境はどう地上と違うのか？
Microgravity
Social Confinement + closed life support
Space Radiation

微小重力と放射線が
地上と宇宙船内で異なる

ISSではネズミはペイロードだけだが、細菌は仲間



宇宙船内 0

重力の違い

地表 1

火星 1/3

月面 1/6

日本で初めてのコスモノート秋山さん
Первый космонавт Японии- это господин
Тоёхиро Акияма.



73

日本人初の宇宙飛行士 秋山豊寛氏(TBS)
(1990年12月2日打ち上げ「ソユーズTM11」) TBS → 福島(農業) → 三重(農業?)



74

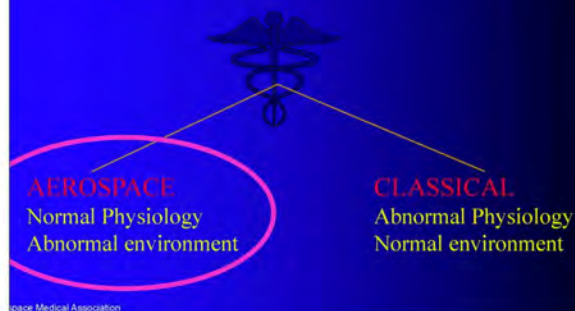


これは何?



iss059e

Approach to Aerospace Medicine



Space Medical Association

Board Certification in Aerospace 専門医制度 Medicine

- After completing one of these residencies with at least one year of experience, one can sit for the American Board of Preventive Medicine exam and obtain board certification in the specialty area of Aerospace Medicine.

specialty - subspecialty
予防医学 - 一般予防医学
- 産業医学
- 航空宇宙医学
- 高気圧医学

Space Medical Association

航空宇宙医学 航空医学

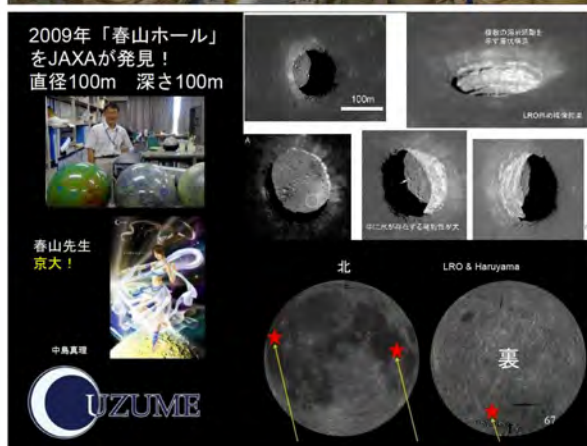
- 航空生理学—いわゆる研究
- Flight Surgeon他 (認定は組織ごと)

宇宙医学

- 宇宙生理学—いわゆる研究
- 医学運用
(医師) Flight Surgeon 臨床医学・産業医
(その他) BioMedical Engineer (BME),
trainer, etc.



80



微生物のコントロール

Planetary Protection

6. 放射線による滅菌

4. 空力加熱による滅菌

2. 天体衝突による物質放出

1. 火星上の潜在的な微生物密度

7. 火星衛星への天体衝突による堆積層形成(放射線防制層)

5. 火星衛星への衝突(クレーター形成)

- 高速衝突による滅菌(衝突滅菌)
- 火星岩石の粉碎 & 砂塵への混合
- 衛星軌道への飛散・衛星への再降着

フォボス上の生存微生物数の時間変化

火星表面のフォボス塵揚塵

ズニル形成衝突事件からの経過時間(年)

© JAXA・千原工大・東工大・東大・東洋

あるかもしれない未来

58

SpaceX Axiom Space-1ミッション 2021 ?

AX-1 prime crew	
Spacecraft commander	Michael López-Alegría シャトル飛行3回、船外活動10回
Spaceflight participant	Tom Cruise「映画の」
Spaceflight participant	Doug Liman 「The Bourne Identity監督」
Spaceflight participant	TBA

Wikipedia

59

SpaceX Aims for Orbital Flights of Prototype Mars Ship Next Year

Elon Musk

前澤友作 ?

60

NASAの月面着陸 ???

To speed development and lower costs, NASA is using Broad Agency Announcements to contract for Gateway elements.

61

NASA、月面着陸計画の宇宙服公開 可動性向上

AFPBB News 2019年10月15日 (第279)

【AFP＝時事】米航空宇宙局は15日、米首都ワシントンの本部で、次世代宇宙服2種類の試作品を公開した。2024年までの実施を目指す有人月面着陸計画「アルテミス」で使う予定。

公開されたのは、船内用の宇宙服「オリオン乗員生命維持システム」と船外活動用の与圧服「船外探査移動ユニット」。

発表は巨大な米国旗が飾られたホールで行われ、宇宙服担当技術者のクリスティーン・デービス氏が赤、青、白のxEMUを着て登場。腰、腕、脚の部分のベアリング機構により、可動域が大幅に広がったことを説明した。

xEMUは延長・短縮が可能で、1サイズだけですべての宇宙飛行士が着用できる。NASAは今年3月、女性宇宙飛行士のみの船外活動を計画していたが、Mサイズの宇宙服が足りなかったために中止せざるを得なかった。新型の宇宙服であれば、同様の失態は起こらない。

あなたはこれに税金払いますか？

日本、米国の月着陸に参加 施設建設協力、正式表明へ

共同通信 2019年10月17日 (第56)

内閣府の宇宙政策委員会は17日、米国が2024年までに目指す月面着陸計画への参加を決めた。政府は年内にも正式に米国に伝達する。月を周回し、宇宙飛行士が拠点にする小規模施設の建設で技術協力する方針だが、日本人飛行士が月周回軌道や月面を目指すことができるかどうかは不透明だ。

63

ありそうな未来

64

GHSって何？



Globally Harmonized System

49

呼吸毒

NTO = N_2O_4 = 四酸化二窒素
+
MMH = Monomethylhydrazine
=モノメチルヒドrazilin

—ミサイル医学



GHSラベル
The Globally Harmonized System of Classification and Labeling of Chemicals

51



参考資料 3-3

国連 GHS

GHSとは(1)

GHS は国際的に推奨されている化学品の危険有害性の分類・表示方法です

国連GHS制定の背景

近年、多種多様な化学製品が全世界で広く利用されており、その中には人や環境に対する危険有害性を有するものも多く含まれています。一方で、こうした危険有害性の情報を伝達するための規則等は国や機関によって様々であり、同じ化学製品であっても異なる危険有害性情報が表示されたり、伝達されることもあります。しかし、化学製品が世界中に流通している今日、国や機関によって表示内容等が異なる状況では、化学製品の安全な使用・輸送・廃棄は困難です。

このような状況から、国際的に推奨された分類・表示方法の必要性が認識されるようになり、2003年7月には、国連経済社会理事会において「化学製品の分類および表示に関する世界調和システム（The Globally Harmonized System of Classification and Labeling of Chemicals）」（GHS）の実施促進のための決議が採択されました。

国連GHS文書

GHSの基本は国連GHS文書です

52

着水



9 July 2001

53





S128E010004

ソユーズ(有人、手前)とISS無人補給機プログレス



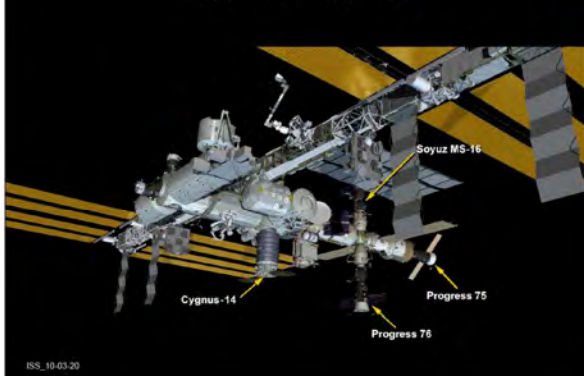
NASA iss030e032132

SpaceX Dragon (CRS-8) 無人ISS補給機

NASA



ある日のISS (図) NASA



ISS_19-03-20



国際宇宙ステーションの貨物機

スペースエックス社 (米国、NASA契約)
ファルコン9ロケット ドラゴン回収貨物船

ロシア ソユーズロケット プログレス貨物船

ヨーロッパ (ESA) アリアン5ロケット ATV貨物船

9 Dec 2015

日本 H-IIロケット HTV貨物船

オービタル・サイエンセズ社 (米国、NASA契約)
アンタレスロケット シグナス貨物船

日本のHTV無人ISS補給機

iss061e026343 NASA

10発で終了済、次はHTV-X型



ISS 無人補給機 Orbital ATK社 Cygnus



NASA



THE LAUNCHPAD

IRENE KLOTZ

IT'S BEEN A PIVOTAL YEAR FOR the Soyuz program. After decades of being the only way to get to the International Space Station, the Russian-made spacecraft is now being used to launch commercial satellites and even to deliver cargo to the moon. The Soyuz is also being used to launch the first Russian-made satellite, the Spektr-RG, which will be used to study the universe. The Soyuz is also being used to launch the first Russian-made satellite, the Spektr-RG, which will be used to study the universe.

Dosvedanya, Baby

It's been a pivotal year for the Soyuz program. After decades of being the only way to get to the International Space Station, the Russian-made spacecraft is now being used to launch commercial satellites and even to deliver cargo to the moon. The Soyuz is also being used to launch the first Russian-made satellite, the Spektr-RG, which will be used to study the universe. The Soyuz is also being used to launch the first Russian-made satellite, the Spektr-RG, which will be used to study the universe.

Soyuz MS-17

the 145th crewed flight of a Soyuz spacecraft

2020年10月14日
打上後3時間=2周でISSにドッキング
Rubins (HIV研究者、42歳、2飛行目、最後のNASAソユーズ座)



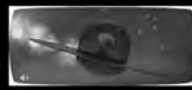



東京理科大学
2020年
10月17日

新日教育会議
東京理科大学
10月17日

新日教育会議
東京理科大学
10月17日

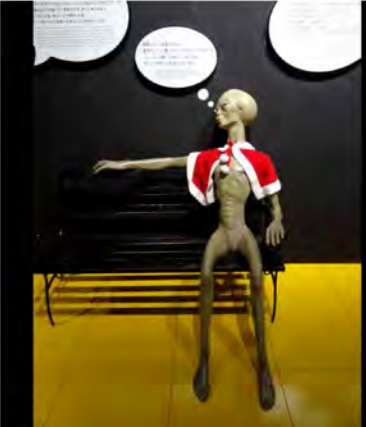
現在の有人用宇宙船



有人 ソユーズロケット・宇宙船

ロシア製。国際宇宙ステーションへ全飛行士と貨物を運ぶ。打上げはカザフスタンのバイコヌール基地、着陸はカザフスタンの草原。有人打上げ~130回。



TenQ

2006年9月15日 中国、「天宮2号」宇宙ステーション打上

ISSとは関連なく中国人民解放軍独自

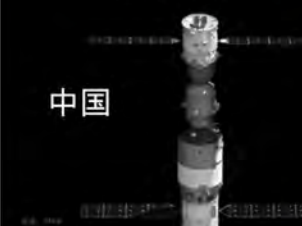
ANN NEWS

「宇宙強国」入り目指す中国
新実験室の打ち上げに成功

来月に有人宇宙船「神舟11号」とドッキング
→ 飛行士が30日間滞在し 実験を行う予定

「天宮2号」と「神舟11号」 可視光

天宮二号衛星可視光カメラ撮影画像



中国

「天宮2号」と「神舟11号」 赤外線



小型衛星は23日午前7時31分に天宮2号から切り離され景海鵬氏と陳冬氏は衛星が天宮2号の下をかすめ飛ぶ動画を撮影

2016年10月27日

小型衛星「伴星2号」は「天宮2号」と共に軌道上を40日近く飛行したあと、「天宮2号」から切り離され撮影

SpaceX Crew Dragon

(写真はDEMO-2有人試験飛行ミッションのEndeavourカプセル)

国際宇宙ステーション ISS 往復用



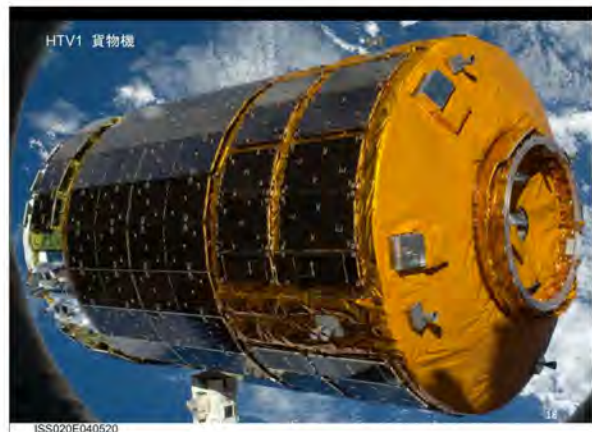
2019年7月、タイで11日間出家しました。
還俗したので今は在家です。



有人宇宙飛行

- ・ 今まで宇宙へ行った人間は、～560名
- ・ 滞在期間は最長満437日(露ポリャコフ医師)
- ・ 骨粗鬆症など、ちょっと変わった問題あり
- ・ 宇宙観光旅行? - 課題あり。吐きまくり?
- ・ 宇宙医学の基礎は予防医学、航空医学

19



20



13年ぶりにJAXA飛行士の募集

5. 募集開始までの主な予定

これまでのJAXA主体による募集・選抜、訓練と異なり、民間企業と連携を強化し、募集・選抜、訓練に企業ノウハウや新しいアイデアを活用することを想定している。また、多くの方々に応募していただけるよう、募集開始までの間、広報活動やイベント(以下、例示)を想定している(実施時期未定)。

- 例) ・野口、星出によるISSからのメッセージ、SNS等を用い展開
・オンラインワークショップにおける国際宇宙探査と募集内容の説明会
・過去の募集・選抜試験、海外の募集・選抜の説明会
・募集・選抜経験者・宇宙飛行士、選抜受験者等による講演会

今回の募集開始までの予定は以下の通り。

- ～2020年末 募集・選抜、訓練に関する情報提供要請 (RFI)
- 2021年初頭 情報提供者との意見交換
- 2021年春頃 募集・選抜、訓練に関する提案募集開始
(「募集・選抜」と「訓練」のいずれか、あるいは両方を提案)
- 2021年夏頃 募集・選抜、訓練を実施する企業の選定
- 2021年秋頃 募集要領発表 (募集開始)

1. JAXA宇宙飛行士採用履歴

	募集期間	応募者	結果発表	結果
第1回	1983年12月1日～ 1984年1月31日	533名	1985年8月7日	毛利 衛 向井 千秋 土井 隆雄
第2回	1991年7月1日 ～8月31日	372名	1992年4月28日	若田 光一
第3回	1995年9月1日 ～10月20日	572名	1996年5月29日	野口 聡一
第4回	1998年2月9日 ～4月30日	864名	1999年2月10日	古川 聡 星出 彰彦 山崎 直子
第5回	2008年4月1日 ～6月20日	963名	2009年2月25日 ※2009年9月8日	大西 卓哉 油井 亀美也 ※金井 宣茂



24



それで...なぜ耳鼻咽喉科が？

Historical ties between otolaryngology-head and neck surgery and aviation and space medicine

BOBBY R. ALFORD, MD, and JAMES H. ATKINS, JR, MD, Houston, Texas

Otolaryngology-head and neck surgeons have been involved in the development of aviation and space medicine since the beginning of this century. More than 75 years ago, otolaryngologists revised the physical examination for pilots, organized "boards of medical examiners" to test pilot applicants, coined the term "flight surgeon," and helped organize the first medical research laboratories at Hazelhurst Field in New York. These laboratories were transformed in 1922 into the School of Aviation Medicine at Brooks Field, Texas, which in turn subsequently was relocated to Randolph Field, Texas. During World War II the Director of Research at the school was Colonel Paul A. Campbell, MD, an otolaryngologist. In 1959, the school moved back to Brooks Air Force Base and was renamed the Aerospace Medical Center. Since manned space flight began in the 1960s there have been many joint research efforts between principal investigators in otolaryngology-head and neck surgery and NASA. Several otolaryngology-head and neck surgeons have served or currently serve as consultants and advisors to many of NASA's standing committees. The space environment offers a new frontier for development and research in the specialty and for better understanding of vestibular function and related disorders. (Otolaryngol Head Neck Surg 1998;118:52-54.)



私の近況

60歳
定
年

個人事業

筑波航研

2019年4月1日

無人衛星 (1957年10月4日) は63周年

59周年

Юрий Алексеевич Гагарин
1934年3月9日 - 1968年3月27日
1961年4月12日 有人宇宙飛行
1時間50分
Кедр

Yuri's Night 毎年4月12日

筑波宇宙センター



パート仕事をしています。

つくば献血ルーム

東京国際空港診療所
パイロット身体検査など



4.1.4. 第4回宇宙医学講義スライド集

大学院分野横断型講義
「有人宇宙医学」第12回
2020年12月23日

宇宙飛行とリハビリテーション

杏林大学医学部
リハビリテーション医学教室
山田 深

国際宇宙ステーション：ISS

International Space Station



世界15か国が参加
2000年より長期滞在ミッション

©NASA/JAXA
©NASA

ISSまでの移動手段



スペースシャトル(米国)
1981年～2011年



ソユーズ宇宙船(ロシア)
1967年～

ドラゴン宇宙船



スペースX社
が開発・運用

野口総一宇宙飛行士搭乗
2020年11月15日打ち上げ

©NASA

Liftoff of NASA's SpaceX Crew-1 Mission



クルードラゴン宇宙船運用1号機 (SpaceX Crew-1) 打上げ直前の様子©JAXA/NASA

各極のスペースセンター

Gagarin Cosmonaut Training Center	Tsukuba Space Center	Johnson Space Center
Baikonur Cosmodrome	Tanegashima Space Center	Kennedy Space Center



筋萎縮

A: Pre-Flight



ヒラメ筋

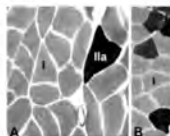
B: Post-Flight



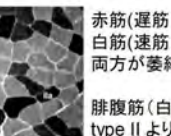
•筋断面積の減少
10~15% (ISS)

Fitts RH, 2013

腓腹筋



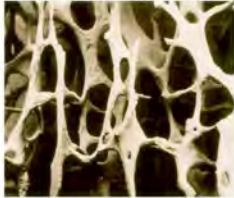
赤筋(遅筋 type I)
白筋(速筋 type IIa, IIb)
両方が萎縮



腓腹筋(白筋)よりもヒラメ筋(赤筋)、
type II よりも type I が萎縮

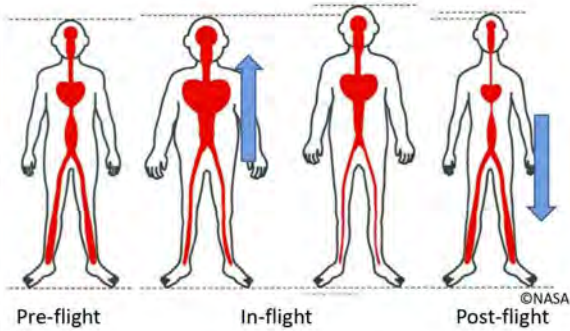
骨量低下

NIH Consensus Development Panel on Osteoporosis. JAMA
285 (2001): 785-95

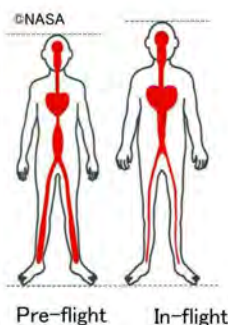



Bone Mineral Densityの減少:
1カ月でおおよそ1.0~1.5%
(現在は1カ月で0.3~0.5%)

体液シフト



身長の変化

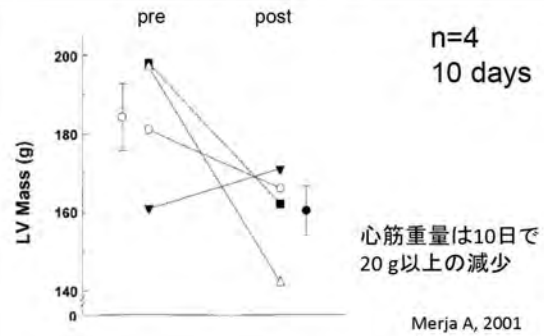


身長は1~3%程度伸びる。
(Thornton et al, 1977)

- 質問紙による調査では、69%の宇宙飛行士が腰痛を訴えた
- 腰痛はフライト初期に最も強く、次第に軽減



心筋の萎縮



腰背部痛

症状のあった宇宙飛行士の腰椎MRI



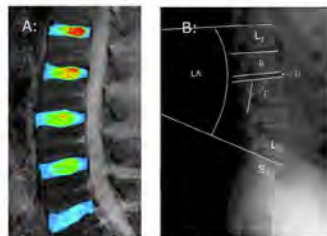
腰痛を生じる原因として椎間板の変性については諸説あり。傍脊柱筋の萎縮によっても。(Chung et al, 2016)

NASAの宇宙飛行士321名中、44名が椎間板ヘルニアと診断されたコントロール群の4.3倍に相当。(Johnston et al, 2010)

Bailey JF, et al, 2018

脊柱の変化

椎間板水分含有量および脊柱前彎



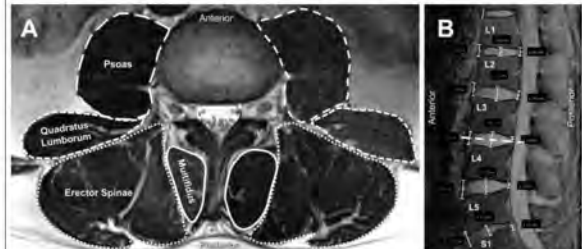
Bailey JF, et al. Spine J 18 (1): 7-14, 2018

Been E, Kalichman L. Spine J 14 (1): 87-97, 2014

- N=6
ISS astronauts
- A 椎間板の水分含有量をT2緩和時間より算出
➢ 飛行前後で有意な変化なし
- B 脊柱前彎角度を算出
➢ 飛行前と比較し、11.1°の減少 (p=.009)

脊柱の変化

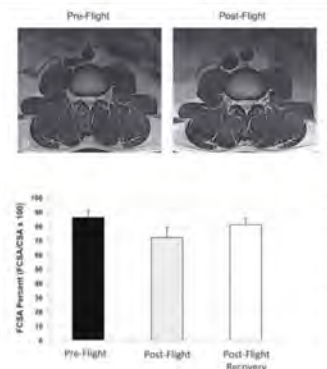
傍脊柱筋の断面積(L3/4)および椎間腔の高さ



Chang et al. Spine 41 (24): 1917-24, 2016

N=6
ISS astronauts

脊柱の変化



- 除脂肪筋が筋全体の断面積に占める割合は、飛行前の86%から72%にまで減少 (p<0.05)
- 椎間腔の高さは飛行前後で変化なし

Chang et al. Spine 41 (24): 1917-24, 2016

身体機能の維持と運動

飛行前 打上2年前~前日	飛行中 約6ヶ月	飛行後 帰還当日~45日間
- 日常の健康維持 - 各種訓練時の障害／外傷予防 - 軌道上での運動機器操作の習熟	- 飛行中の健康維持 - 障害／外傷予防 - 船外活動や帰還後に向けた身体機能の維持	- 日常生活への早期復帰 - 飛行前の健康状態への回復(リハビリテーション)
2時間/回 2回/週	2.5時間/回 6回/週	2時間 6回/週 (45日間)

体力機能測定室(筑波宇宙センター)



飛行中のトレーニング

T2(Treadmill 2)



- Harnessを着用
- Active Mode と Passive Mode
- Speed, Load, Resistanceの設定が可能
- Activeは最大20 km/h, Passiveはランナーに依存

(画像: NASA及びJAXA提供)

25

飛行中のトレーニング

CEVIS

(Cycle Ergometer with Vibration Isolation and Stabilization System)



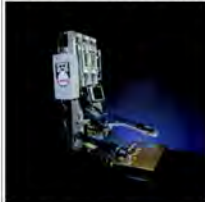
- Recumbent式に近い運動様式
- 25~350 Watt
- 30~120 rpm

31

飛行中のトレーニング

ARED

(Advanced Resistive Exercise Device)



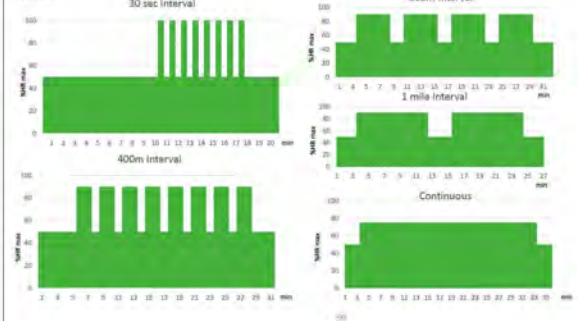
- 真空シリンダーとフライホイールで地上のフリーウェイトと同じ負荷特性を再現
- 最大600 lbs.
- Bar & Cable Exerciseで30種類以上の運動が可能



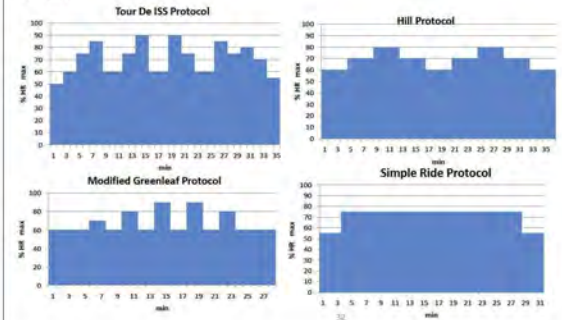
How to train?



T2処方



CEVIS処方



飛行中のトレーニング

・主な種目と強度

部位	パターンA	パターンB	パターンC	パターンA	パターンB	パターンC
大腿部	Squat	Single Leg Squat	Sumo Squat	Squat	Single Leg Squat	Sumo Squat
下腿部	Heel Raise	Heel Raise	Heel Raise	Heel Raise	Heel Raise	Heel Raise
腰背部	Dead Lift	Sumo Dead Lift	Dead Lift	Dead Lift	Sumo Dead Lift	Dead Lift
肩背部	Romanian Deadlift	Romanian Deadlift	Romanian Deadlift	Romanian Deadlift	Romanian Deadlift	Romanian Deadlift
胸部	Shoulder Press	Shrug	Shoulder Press	Shrug	Shoulder Press	Shrug
腕部	Bent Over Row	Upright Row	Bent Over Row	Upright Row	Bent Over Row	Upright Row
腕部	Bench Press	Bench Press	Bench Press	Bench Press	Bench Press	Bench Press
上腕部	Biceps Curl	Triceps Extension	Biceps Curl	Triceps Extension	Biceps Curl	Triceps Extension
体幹部	Crunches/Sit up	Crunches/Sit up	Crunches/Sit up	Crunches/Sit up	Crunches/Sit up	Crunches/Sit up

week/day	1	2	3	4	5	6
1	低	低	低	低	低	低
2	低	低	低	低	低	低
3	低	中	高	低	中	高
4	中	高	低	中	高	低
5	高	低	中	高	低	中
6	低	中	高	低	中	高
7	中	高	低	中	高	低
8	高	低	中	高	低	中

低: 12 reps (70%1RM) 中: 8 reps (80%1RM) 高: 6 Reps (85%1RM)

飛行中のトレーニング

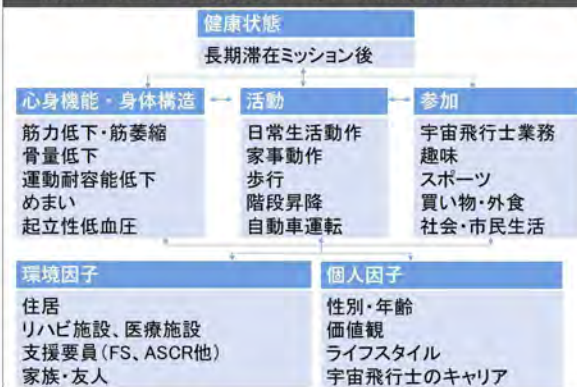
- ・毎日2.5時間(有酸素1時間、抵抗運動1.5時間)が計画

睡眠 (8.5時間)	朝食・ 身構い (1.5時間)	仕事準備 (1.5時間)	仕事	昼食 (1時間)	仕事 (計6.5時間)	報告 (0.5 時間)	運動 (もろもろ 含む) (2.5時間)	夕食・ 身構い等 (2時間)	睡眠
---------------	-----------------------	-----------------	----	-------------	----------------	-------------------	-------------------------------	----------------------	----

- ・1週間の運動処方例

		月	火	水	木	金	土	日
有酸素	種目	Interval	Conti.	Interval	Conti.	Conti.	Interval	休養日
	機器	T2	CEVIS	T2	T2	CEVIS	T2	
抵抗	Session	1	2	3	1	2	3	
	負荷	低	中	高	低	中	高	

帰還後宇宙飛行士の生活機能と障害

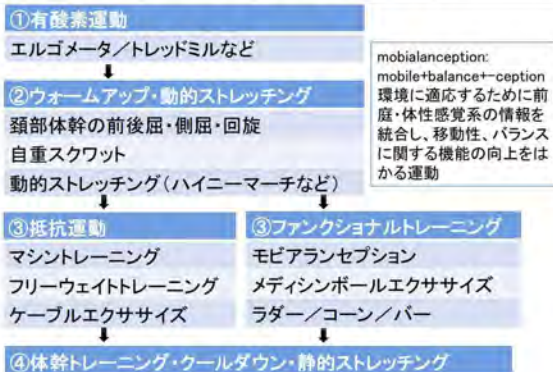


帰還後のリハビリテーション

帰還後リハビリテーションの変遷

当初ミッション 2009年 若田飛行士 ～	NASAに支援を依頼 ・ ジョンソン宇宙センター(JSC)で45日間のリハビリを実施。 ・ NASA ASCRが指導し、JAXA ASCRはオブザーバー参加。
2016年 大西飛行士	・ NASA監督下でJAXA ASCRが運動プログラムを管理。 ・ JSC帰還後21日で日本に帰国。
2018年 金井飛行士	・ JAXA ASCRが運動プログラムを管理。 (必要に応じてNASAに助言を求める) ・ JSC帰還後9日で日本に帰国。

リコンディショニングの構成



ミッション中の生理的対策業務

- ・トレーニング機器の習熟(飛行前)
- ・デイリーブリーフィング
- ・ダウンリンクデータの解析(毎週)
- ・運動処方の改定とアップロード
- ・PEC(毎月)及びPMCへの参加(適宜)
- ・AREDリアルタイムフィードバック(ミッション中1回)
- ・EVA(Extravascular Activity)前の体力評価

PEC: Private Exercise Conference
PMC: Private Medical Conference

帰還後のリハビリテーション

帰還からリハビリテーション開始まで

- カザフスタンに着陸。JAXA-FSとともにヒューストンへ移動。
 - 翌日よりジョンソン宇宙センター(JSC)でJAXA ASCRがリハビリテーションを開始。
- ※JSCには帰還後の宇宙飛行士のための宿泊施設と、リハビリ施設を兼ねたジムが設けられている。
※今後は着陸(着水)地点が米国となる見込み。

帰還後のリハビリテーション

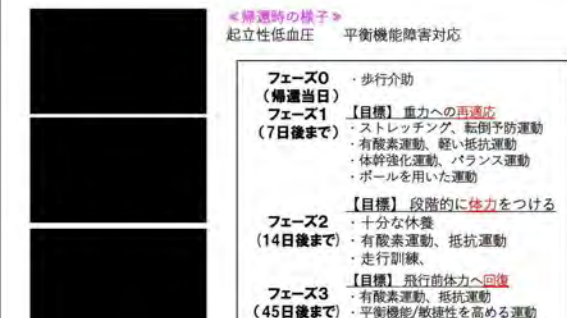
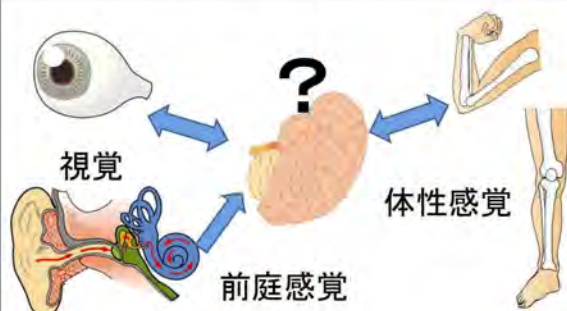


写真: NASA及びJAXA提供 | 出品: 神山慶 | 宇宙飛行士と宇宙飛行士 助成リハビリテーション | 第2巻 7月 | Dimensions | 21

重力への適応



有酸素運動

1. 自転車エルゴメータ
(リハ開始日から)
2. 免荷式トレッドミル
(7日後から)
3. トレッドミル
(21日～28日後から)



飛行前後の身体機能・運動能力評価

ファンクショナルフィットネステスト

項目	内容
長座位体前屈	腰部とハムストリングスの柔軟性
コーンアジリティ	移動と方向転換における敏捷性
腕立て伏せ	2分間に反復できる回数
懸垂	連続して実施できる回数
腹筋	2分間に反復できるクランチの回数
ベンチプレス (1RM*)	スミスプレスマシン (Cybex社製)
レッグプレス (1RM*)	スクワットプレスマシン (Cybex社製)
握力	デジタル握力計 (竹井機器工業社製)

*1RM:
1回持ち上げるこ
とのできる最大
負荷量
(one repetition
maximum)

- ②筋力(等速性運動) 飛行前、R+5～7、
- ③有酸素性能力(酸素摂取量) R+30で実施

ファンクショナルフィットネステスト

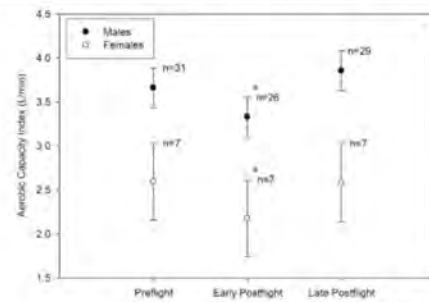
MEASURE	PREFLIGHT $\mu \pm SD$	POSTFLIGHT $\mu \pm SD$	% CHANGE $\mu \pm SD$
Sit and Reach *	17.29 $\pm$ 3.53	15.88 $\pm$ 3.49	-8.0% $\pm$ 9.5
Cone Agility *	12.87 $\pm$ 1.02	14.23 $\pm$ 1.37	11.0% $\pm$ 11.8
Push-ups	48.35 $\pm$ 17.19	46.21 $\pm$ 16.7	3.1% $\pm$ 47.0
Pull-ups	9.13 $\pm$ 5.35	8.27 $\pm$ 4.35	-0.6% $\pm$ 41.2
Sliding Crunches	102.8 $\pm$ 30.8	100.0 $\pm$ 26.9	-0.9% $\pm$ 16.1
Bench Press (kg)	76.9 $\pm$ 22.3	76.8 $\pm$ 21.6	0.68% $\pm$ 9.9
Bench Press (lb)	169.6 $\pm$ 49.1	169.5 $\pm$ 47.6	
Leg Press (kg)	278.5 $\pm$ 60.6	269.8 $\pm$ 57.2	-2.8% $\pm$ 7.2
Leg Press (lb)	614.0 $\pm$ 133.6	594.8 $\pm$ 126.1	
Hand Grip	102.3 $\pm$ 19.7	96.7 $\pm$ 18.0	-4.9% $\pm$ 8.6

* : p < 0.01

- ・柔軟性と敏捷性が低下
- ・腕立てや懸垂などは維持

(Laughlin, ASBMR 2015)

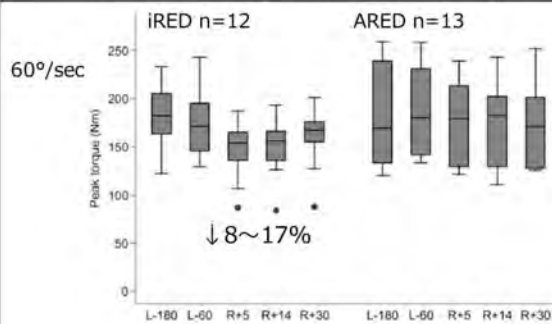
有酸素性能力の経過



(Moore, ASBMR, 2015)

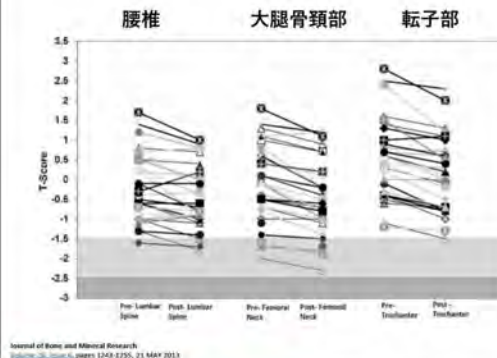
- ・飛行後の有酸素能力の低下は1か月程度で飛行前の水準まで回復

等速性筋力 (Trunk Extension)



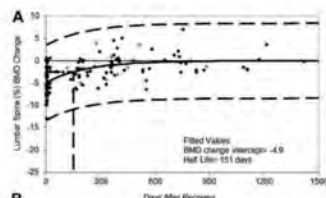
English KL, et al. Aerosp Med Hum Perform 86(12 Suppl): A68-77, 2015

骨量低下

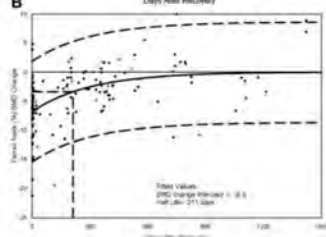


Journal of Bone and Mineral Research
Volume 28, Number 5, pages 1249-1255, 21 MAY 2013

腰椎



大腿骨頸部



Journal of Bone and Mineral Research
Volume 28, Number 5, pages 1249-1255, 21 MAY 2013

ISS滞在後45日間のリハビリテーション

心身機能と活動・参加

- ・初期にはめまい、2週間程度で日常生活は自立
- ・筋力、有酸素性能力は30日でほぼ飛行前の水準
- ・骨量の回復には時間を要する
- ・敏捷性、バランスの回復が重要

環境因子と個人因子

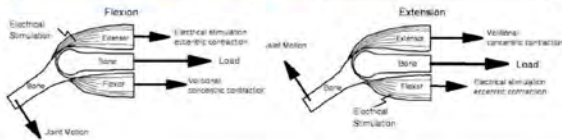
- ・日本人宇宙飛行士の高齢化
- ・相応の施設設備と人員(生活環境、救急体制も含め)



運動機器の開発

ハイブリッドトレーニング

電気刺激で筋肉を鍛える。
小型軽量・高効率



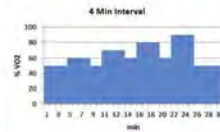
	Contents	Total time	Energy Expenditure including 3h-EPOC
SIT (JAXA protocol1)	30 sec (120%VO _{2max}) 15 sec (rest) Repeat 7 times	5 min	109 kcal
HIAT (JAXA protocol2)	3 min (85%VO _{2max}) 2 min (50%VO _{2max}) 3 min (85%VO _{2max}) 2 min (50%VO _{2max}) 3 min (80%VO _{2max})	13 min	182 kcal
MICT (control)*	40 min (60~65%VO _{2max})	40 min	363 kcal

MICT: moderate-intensity continuous training
SIT: sprint interval training



Matsuo, 2012.

トレーニングプロトコル



インターバルトレーニング

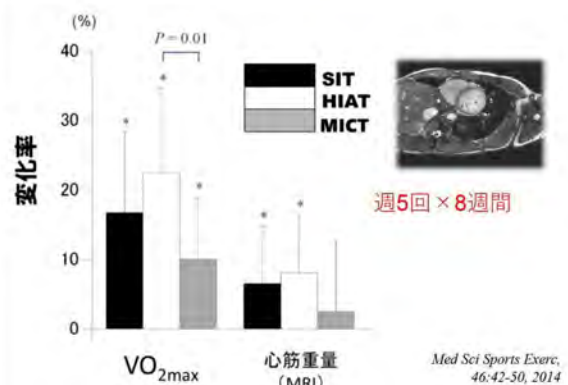
- ・持久力
- ・心筋肥大
- ・カロリー消費

J-HIAT

3 min (85% VO_{2max})
2 min (50% VO_{2max})
3 min (85% VO_{2max})
2 min (50% VO_{2max})
3 min (80% VO_{2max})



JAXA's High Intensity Aerobic Training: J-HIAT



Med Sci Sports Exerc, 46:42-50, 2014

プロトコルによるエネルギー消費量の差は180 - 250 kcal

ISSで宇宙食として使われている

レトルトボークカレー (222 kcal, 200 g) に相当。

これをMARS 500ミッションにあてはめて試算すると・・・

プロトコルによるエネルギー消費量の差は

270 - 540 kgの食料搭載量に相当

※MARS 500ミッション

520日間 (火星往復)、6名のクルー

100 - 200 g × 6 times/week exercise ×
75 weeks × 6 members

レトルトボークカレー



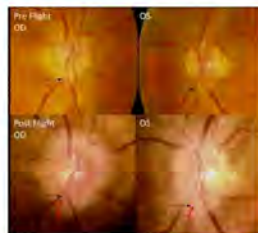
© JAXA

トレーニングプロトコル

・抵抗運動は週6日間必要か？

月・木	火・金	水・土
Squat	Single Leg Squat	Sumo Squat
Heel Raise	Heel Raise	Heel Raise
Dead Lift	Sumo Dead Lift	Dead Lift
Shoulder Press	Shrug	Shoulder Press
Bent Over Row	Upright Row	Bent Over Row
	Bench Press	
Biceps Curl		
		Cable Triceps Extension
Crunches	Crunches	Crunches

Spaceflight Associated Neuro-Ocular Syndrome



Otto 2012

・飛行士4人に3人が視力障害の訴え

次のミッションに向けて

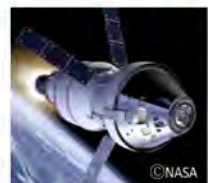
より遠くへ、より安全に

飛行中

- ・処方 (種目、頻度、強度)
- ・運動機器
- ・SANS、深部体温上昇
- ・薬理学、栄養学

飛行後

- ・環境因子 (重力を含む)
- ・疲労と外傷
- ・リハビリ継続期間



© NASA

4.1.5. 第 5 回宇宙医学講義スライド集

東京慈恵会医科大学 2020/10/21 京都大学宇宙総合学研究会ユニット
大学院分野横断型講義「有人宇宙医学」第3回

宇宙医学・生命科学研究

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

暮地本宙己

自己紹介

北海道出身

1999年3月 北海道旭川東高等学校 卒業
2006年3月 旭川医科大学医学部医学科 卒業
2008年3月 札幌徳洲会病院初期研修 修了
2012年3月 旭川医科大学大学院 修了(医学博士)

2012年4月 旭川医科大学解剖学講座 助教
2017年4月 帯広畜産大学保健管理センター 特任准教授
2019年4月 東京慈恵会医科大学宇宙航空医学研究室 講師

主な資格：
宇宙航空医学認定医
日本医師会認定産業医

仕事人生における究極の目標
宇宙医学分野の領域発展に貢献し、
日本の宇宙産業を振興させること！

慈恵医大宇宙航空医学研究室

メンバー

南沢孝教授
暮地本宙己 各瑞洋助教

宇宙航空医学研究室は昭和40年4月に開設され、日本の医学部で最古の50年以上の歴史を持つ宇宙医学研究施設である。
重力制御装置を用いた模擬微重力実験や、宇宙滞在した動物の解析を行っている。
京都大学宇宙総合学ユニットと連携して宇宙人材育成を行っている。
宇宙に行くとき生体に何が起きるのかを研究・解明することを目指している。

宇宙医学とは

「普通では生命維持不可能な環境」へのヒトの滞在・活動をサポートする**極限環境医学**の一分野。

1903年 ライト兄弟の動力機初飛行(航空医学)
1953年 ヒラリーのエベレスト初登頂(高地医学)
1961年 ガガーリンの有人宇宙初飛行(宇宙医学)
1965年 アルゼンチン軍南極点到達(極地医学)

宇宙医学は宇宙空間における諸条件(微小重力や放射線(宇宙線)、船内閉鎖環境など)が人体・生命に及ぼす影響を解明し、宇宙飛行士の有人宇宙活動を総合的にサポートする学問である。

臨床医学・産業医学(作業環境・健康管理) 基礎医学科学研究

宇宙医科学を学ぶために

宇宙生命科学入門
Space Physiology and Medicine
宇宙航空医学入門

宇宙生命科学入門：宇宙生物実験について網羅的に、非常に分かりやすく書かれている。最もオススメ。
Space Physiology and Medicine：宇宙医学・生理学について系統的に学べる。手元に置き、随時読んで学びたい一冊。
宇宙航空医学入門：日本の宇宙医学の学会である日本宇宙航空環境医学会刊行の教科書。航空医学に多くのページが割かれているが、宇宙医学についても学ぶことができる。

宇宙環境の特徴

宇宙環境の特徴：微小重力

重力がない環境では……

無対流 無浮遊 無沈降

微小重力下では「無対流」、「無浮遊・無沈降」のほか、「無静水圧」、「無容器浮遊」を加えた4つの効果が作用する。

宇宙環境の特徴：宇宙放射線

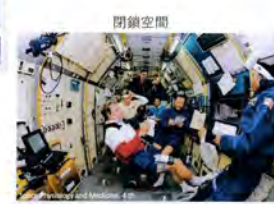
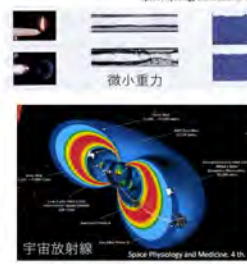
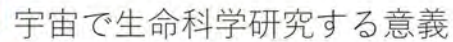
名称	実体	電荷	発生の特徴
α線	ヘリウム原子核	2+	不安定な原子核が壊れ安定な原子核になるときに発生する
β線	電子(陽電子)	- (+)	
γ線	光子	なし	電子の運動にブレーキがかかったときに発生する
中性子線	中性子		核分裂、核反応など

放射線の種類

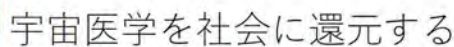
- 宇宙空間では太陽系からの放射線(太陽粒子線)や太陽系外からの放射線(銀河宇宙線)が存在する。
- 地球の磁場で捕獲された放射線が赤道上空を帯状に取り囲む(ヴァン・アレン帯)。
- 地表とISSでの放射線量は100-200倍程度の差がある。



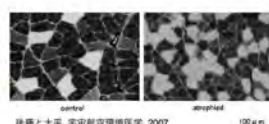
- ・ISSなどの宇宙環境は、地上と隔絶されている。
- ・事故や障害のリスク、対人関係などのストレスが非常に高まる。
- ・閉鎖環境における微生物汚染・感染症の問題もある。



- ・ 宇宙空間は物理的・心理的に大きく地上と異なる環境にある。
- ・ 宇宙に滞在している宇宙飛行士の健康管理のために、基礎的知見となる基礎医学研究が必要。
- ・ 宇宙空間へのアクセスが非常にハードルが高く、研究の絶対的な数が少ないため未知の部分が多い。
→ **新天地を開拓したい人々に向いた領域である。**

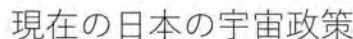
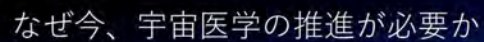


- ・現在の宇宙医学は、宇宙飛行士の健康管理・作業環境管理を主眼に置いている。
- ・現実的には**宇宙に滞在可能な人が宇宙飛行士のみに限られている**ため、宇宙医学は地上で生じる（大勢の）人々に直接には役立たず、産業への波及効果も小さい。
- ・微小重力で起る現象や生理変化を、再生医療へ応用したり、老化現象と比較し介入することで社会への貢献が試みられている。



例1:
地上よりも微小重力環境で胚性幹細胞が効率よく細胞塊を形成できることに注目し、人工臓器形成法を開発することで再生医療に役立たせる。

例2：
宇宙潜在による微小重力環境への曝露と、加齢による骨格筋の応用性萎縮(サルコペニア)の類似性に注目し、宇宙での筋萎縮分子メカニズムを検討して **サルコペニア防止**に役立たせる。



技を盡して
在る位に
滞大にら
人が自ける
有術増付い



宇宙開発の主たる潮流	世界各国の動き	世界産業界の動き	日本の動き
米・ソの宇宙開発競争 NASA設立(1958) ソ連衛星打上げ(1957) ランダット計画(1972) スカイラプ計画(1973) G-IMP計画(1978)	欧：社会インフラとしての開発 ESA設立(1975) ESA設立(1975) ESA設立(1975) GSP計画(1978)	国産・地産企業の誕生 イタルスペース社設立(1964) ユニカル社設立(1977)	宇宙産業体制構築 日本宇宙産業振興会設立(1964) 東京宇宙航空研究所設立(1964) NASA加盟(1969)
宇宙利用の国際プロジェクト スペースシャトル打上げ(1981) 国際宇宙ステーション(計画発表1984) 米露スペースシャトルとミール宇宙ステーション・ロシア計画(1995)	欧：産業化の推進 ユロスペース設立(1980) SPOTイメージング衛星(1982) SESAT設立(1985)	巨大企業グループの誕生 ロッキード・マーティン設立(1995) ボーイングとマダソン・スペースシステム(1997) バイダックス(2000)	ロケット・産業界の法人化 三菱重工業宇宙事業部設立(1970) HII ロケット(1981) 日本宇宙科学事業団設立(1984) 初音衛星計画(1992) HIIロケット(1994)
欧米の産業化推進 CDP2050(2005) 米：有人宇宙飛行計画(2003) 中：無人月面探査(2007) エリアスグループ再編(2014) アリアン5打ち上げ(2015)	新興国参加による多様化 ロケット産業(2003) 中：無人月面探査(2007) 印：月面探査機打ち上げ(2015)	ベンチャー・買収歩み アーバンスペース創設(2000) iSOの買収と再編(2001) スペースファクトリー創設(2002) ウェブスターとアリアスが合併(2004)	宇宙産業利用拡大 JAXA飛空定(2003) 民間宇宙飛行士計画(2007) 民間宇宙飛行士計画(2007) 民間宇宙飛行士計画(2007) 民間宇宙飛行士計画(2007) 民間宇宙飛行士計画(2007)

内田, 2017より加筆・改定

- ・宇宙産業の構造は約60年間で大幅に変化している。



(2017 SIA State of Satellite Industry Report より)

- 2017年の世界宇宙産業市場規模は約37兆円で、10年間で倍増している。
- 2030年頃までに70兆円に到達する予測となっている。
- 宇宙産業における消費者向けサービスが近年台頭している。



	企業向け	消費者向け
深宇宙 (月・火星・小惑星)	深宇宙探査・開発	宇宙旅行や 宇宙ホテルなど
地球近傍 宇宙	衛星インフラの構築 軌道上サービス(微小重力実験など)	
地上から 宇宙へ	宇宙へのアクセス (ロケットや宇宙機の開発・製造・打ち上げ)	
地上	衛星および衛星データ活用 (IoTを通した産業デジタル化への貢献)	

- ・2017年の世界宇宙産業市場規模は約37兆円で、10年間で倍増している（内訳は宇宙へのアクセスと衛星活用が多い）。
- ・宇宙産業における消費者向けサービスが近年台頭している。



宇宙産業における医学の位置付け



Space Medicine in the Era
of Civilian Spaceflight
N Engl J Med. 2019;
380: 1053-60.

*既に7名の民間人宇宙
旅行者が存在すること
が明記されている。

民間人宇宙飛行における宇宙医学上の留意点：

- ・事前の既往歴把握
- ・打ち上げ時の宇宙酔い
- ・食欲・栄養状態の変化
- ・腰痛の増悪
- ・尿閉
- ・骨密度低下
- ・宇宙飛行関連神経眼症候群（SANS）
- ・フライト中の心理的ストレス
- ・フライト中の限られた医療資源
- ・インフォームドコンセントを含む法的課題

宇宙医学は、宇宙飛行士に限定された領域から一般社会に直接貢献する領域へ進化途上にある。



今後、宇宙医学に求められること

1. 宇宙飛行士の作業環境管理・健康管理。
2. 宇宙環境が生体細胞に与える影響の基礎研究成果を地上の医学に還元・応用する。
3. 宇宙に滞在・活動する**民間人の診療・保健**。

宇宙医学は、地上の医学と同様に、一般人に直接的に必要な医学へと進化すると考えられる。



本日のまとめ

1. 将来的に、宇宙医学・生命科学領域の社会的重要性が増し、領域も拡大することが予想される。
2. 自身の専門技術や独自性を身につける。
3. 様々な分野の人との出会いを大切に、チャンスをつかむ。

「衰えない筋肉をつくる」ための骨格筋研究

河野 史倫

松本大学・大学院健康科学研究科

The diagram illustrates the timeline of space exploration and the corresponding research needs. It features three main visual components: the International Space Station (ISS) on the left, the Artemis mission plan in the center, and human exploration of Mars on the right. Below these images is a blue timeline bar with labels for 2020, 2030, and Future. A central box labeled 'Body function decline response countermeasures' spans the timeline, with sub-boxes indicating specific research areas: 'Long-term space station environment', 'Long-term space station environment', 'Space radiation', 'Low gravity', and 'Space station environment'.

抗重力筋

重力下において姿勢保持のために持続的に活動する骨格筋

(a) 地球下での姿勢 (地上) vs. 宇宙飛行中の姿勢 (宇宙飛行)

(b) Fiber Size (% Change) for Type I and Type II muscle fibers in different muscles.

Muscle	Type I (%)	Type II (%)
Lat	-10	-15
MB	-10	-15
TA	10	15
VL	-10	-15
Rect	-10	-15
Gastrocn	-10	-15

(c) パラボリックフライト (宇宙飛行)

ISS長期滞在（約180日）クルーにおけるヒモ系筋線維サイズ変化

クルー No.	サイズ比 (vs. 飛行前)	ISS滞在中の運動方法選択	
		エアロビックス (分/日)	レジスタンス (リット)
A	28%	E: 170, T: 85	6日
B	111%	E: 296, T: 312	数日
C	63%	E: 128, T: 32	3~5日
D	62%	E: 123, T: 71	3~5日
E	72%	E: little, T: 200	情報なし
F	24%	E: 55, T: 77	5日
G	78%	E: 135, T: 198	ほぼ毎日
H	74%	E: 90, T: 274	ほぼ毎日
I	89%	E: 110, T: 146	ほぼ毎日

Trappe et al. J Appl Physiol 2004; 97: 658-665, 2005 / Fitts et al. J Physiol 2005; 569: 62, 2010 / 小川

研究の着眼点

レジスタンストレーニング

超長期宇宙滞在
物資補給不可能な1年間以上の宇宙滞在
筋萎縮・筋機能低下
運動制限
重力環境での自立活動

除脂肪体重変化

遺伝子発現との相関

個体差発生の仕組みを応用

船内での運動方法
地上での準備

身体機能低下しにくい
体質づくり

**骨格筋量は、
体全体の約40%を占める**

骨格筋の役割:

- ① 強力発揮することで関節を動かす(→エネルギー消費)
- ② 耐糖能・・・インスリンの作用により糖を取り込む
- ③ ホルモンやマイオカインの分泌
- ④ 活性酸素や代謝産物の処理

筋線維のタイプ分類

収縮特性	代謝特性
速い (Fast)	解糖系 (Glycolytic)
遅い (Slow)	酸化系 (Oxidative)

ミトコンドリア酵素染色

The diagram illustrates the relationship between muscle fiber types and activity levels. It features a horizontal axis with three main activity levels: 瞬発的な活動 (Explosive activity), 持続的な活動 (Sustained activity), and 不活動 (Inactive). Below this axis are three fiber types: FG (Fast Glycolytic), FOG (Fast Oxidative Glycolytic), and SO (Slow Oxidative). Arrows indicate the transition between these states: a blue arrow from FG to FOG labeled '瞬発的な活動', an orange arrow from FOG to SO labeled '持続的な活動', and a black arrow from SO back to FG labeled '不活動'.

On the left, under the heading '速筋' (Fast-twitch muscle fibers), are the characteristics: 収縮速度 (Contraction speed), 筋サイズ (Muscle size), and 筋パワー (Muscle power). Below these is a box labeled '身体能力向上' (Improvement in physical ability). An image of a fast-twitch muscle fiber is shown.

On the right, under the heading '遅筋' (Slow-twitch muscle fibers), are the characteristics: エネルギー消費 (Energy consumption), 耐糖能 (Glucose tolerance), 筋持久力 (Muscle endurance), and ストレス耐性 (Stress resistance). Below these is a box labeled '健康維持・増進' (Maintenance and improvement of health). An image of a slow-twitch muscle fiber is shown.

At the bottom, a large orange arrow points from left to right, indicating a progression or transition. To its left, under the heading '・加齢で神経剥離 (サルコペニア)' (With aging, nerve detachment (Sarcopenia)), are the conditions: 筋萎縮性側索硬化症 (ALS) (Muscular atrophy amyotrophic lateral sclerosis), 肺疾患 (COPD) (Lung disease (COPD)), and 筋状態で分解 (Muscle state with degradation). To its right, under the heading '・ほぼ起こらない' (Almost never happens), are the conditions: 遅筋が多い動物ほど寿命が長い (The more slow-twitch muscle fibers, the longer the lifespan of the animal).

酸素消費能力

→ エネルギー産生の許容量
→ 運動強度が高いほど酸素需要も高い

Figure 1 consists of two graphs. The left graph plots '酸素消費量 (L/min)' (Oxygen consumption) on the y-axis against '運動強度' (Exercise intensity) on the x-axis. A red line shows a linear increase in oxygen consumption with intensity until it reaches a point labeled 'ベリングザフ' (Anaerobic threshold). Beyond this point, the line plateaus. A vertical dashed line marks the '最大酸素摂取量' (Maximum oxygen uptake). The right graph shows the '運動中の骨格筋動員' (Skeletal muscle recruitment during exercise) as a triangle divided into '有酸素' (Aerobic) and '無酸素' (Anaerobic) regions. The aerobic region is orange and the anaerobic region is blue. As intensity increases from '低' (Low) to '高' (High), the proportion of aerobic metabolism increases and anaerobic metabolism decreases.

国際的な共同研究チーム

日本での地上実験実施

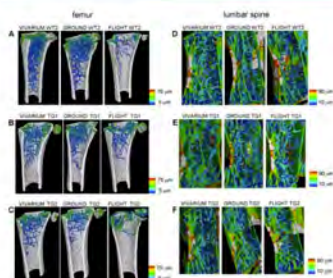


2019年9月19日 大阪大学・豊中キャンパス

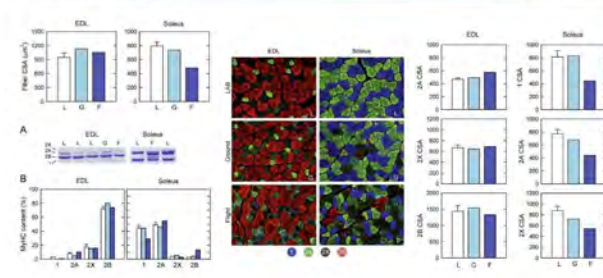
科学論文の発表



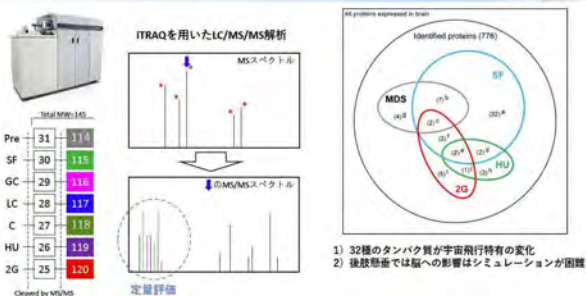
骨構造への影響



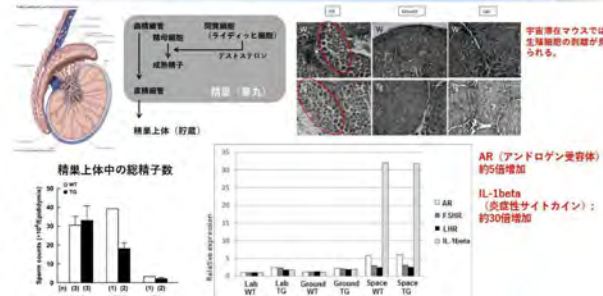
骨格筋への影響



脳への影響



精子形成への影響

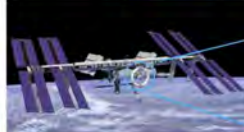


人工重力 (Artificial Gravity)

1970年代にイメージされたスペースコロニー



NASAが構想するノーチラスX



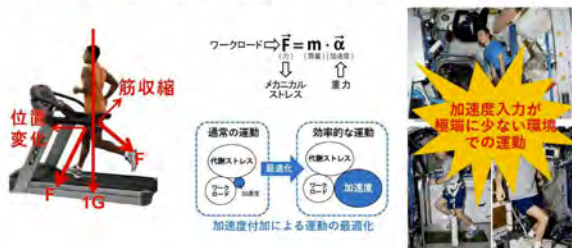
MDSを使用した過重力実験

MDS-HyperG

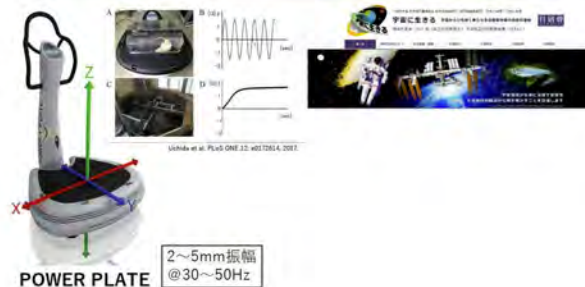


“加速度”という生理刺激パラメータ

仮説：運動効果の一部は“加速度”によって獲得されているのでは？

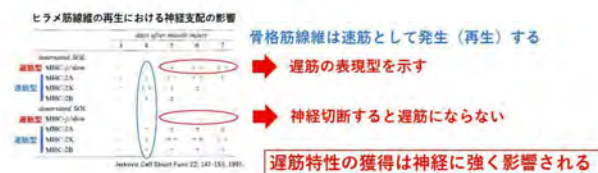


全身振動による加速度刺激



骨格筋の神経支配

運動しても完全な遅筋にはならないのに・・・
遅筋は発生的に遅筋になれるのは何故？



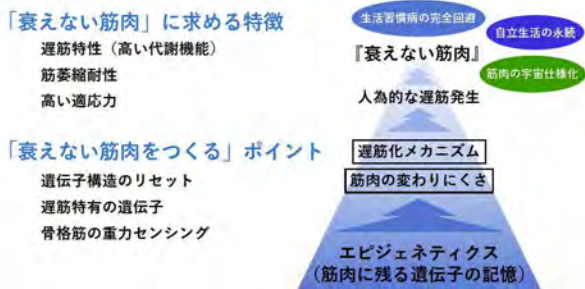
全身振動による加速度刺激



最適な運動



まとめ



Thank you
for
your attention.

