



関西宇宙医学スタディーツアー 2019 春

2019. 3. 28,29

於 大阪医科大学・京都大学



「減圧症予防」と「可動性」を両立する宇宙服を目指して



岐阜医療科学大学院保健医療学研究科 教授・研究科長

田中邦彦 先生

概要

宇宙服に関する講義で、人類の宇宙進出と宇宙服の発展の歴史や、現在の宇宙服の問題点、最新の宇宙服モデルについて話していただきました。また、講義後には宇宙医学に携わる道や医学者としてのキャリアについて座談会形式で議論を行いました。

講義まとめ

1. 地球外活動と宇宙服の歴史

- ・マーキュリー計画（1958-1963）：アメリカ初の有人宇宙飛行 …0.2~0.34 気圧純酸素
- ・ジェミニ計画（1961-1966）：月面着陸を視野に入れた開発 …0.25 気圧純酸素
- ・アポロ計画（1961-1972）：人類初の月面着陸 …0.3 気圧純酸素

初期の宇宙服は、航空機パイロット用の与圧服を改良したものであった。

宇宙服内気圧は、減圧症防止と可動性確保の観点から重要な要素。

減圧症予防のための血液の脱窒素には23時間かかり、緊急事態に対処しにくいことが課題となっている。

ISLE (In-Suit Light Exercise Protocol) であれば脱窒素は3時間で済むが、長時間の船外活動（7時間ほど）の前に、快適とは言えない宇宙服を着て、単調な運動を3時間も行う（長時間の重労働の前にさらなる運動負荷をかける）ことは望ましくない。

- ・宇宙服の意味
 - ① 酸素の確保
 - ② 減圧症回避
 - ③ 放射線やチリから身を守る
 - ④ 体温維持

減圧症：

低気圧下で血液に溶けている気体が放出され気泡となり、血管に詰まる症状。

船外活動を行う際は、減圧症の予防に血液の脱窒素を行う。



2. EVA-suit (船外活動用宇宙服) EMU (船外活動 UNIT) の構造について

- ・冷却下着 →水を循環させ、活動中に生じた熱を奪い、体温を下げる。
- ・気密層 →分厚いビニールで体を覆うことで酸素が外に逃げないようにする。
- ・拘束層 →気密層が破裂しないようにする。
- ・断熱・防護層→真空にすることによって温度が伝らないようにする。また、チリから身を守る。
(宇宙では太陽光の当たり方によって、超高温にも超低温にもなる。)

なお、指先は作業がしやすいように気密以外の機能を減らされている。非常に冷えやすいため、指先はヒーターで温めている。

3. 宇宙服の抱える問題

- ・減圧症と可動性のパラドックス

宇宙服内の気圧を下げる→宇宙との気圧差が小さくなり可動性は上がるが、体内に溶け込んでいる窒素などが血液から放出され気泡が生じやすく、減圧症になりやすい。準備時間が長くなる。

宇宙服内の気圧を上げる→体内に溶け込んでいる窒素などが気圧が高いため気泡にはなりにくく、減圧症にはなりにくい、宇宙と服内の気圧の差が大きくなり、可動性が下がる。準備時間は短くなる。

	気圧↑	気圧↓
可動性	×	○
減圧症	○	×

【解決策 1】 気圧を下げつつ、減圧症の発症確率を下げる。

- ・カルフォルニア大学サンディエゴ校で開発された MCP スーツ

宇宙服の締め付けにより、気圧の不足分を補う。

→問題点：掌や脇下や股下など関節の屈側に均等に加圧されない。

【解決策 2】 気圧をあげつつ、可動性をあげる。

研究の結果、0.65 気圧までであれば減圧症にならない。減圧症にならないように気圧を上げながら、その気圧で可動性が保てるように宇宙服の構造を考える。

- ・ Hard Suit

気圧差で変形しない、硬い素材でできた宇宙服。ベアリング構造を関節部位に多く入れることにより可動性を保持。

→問題点：月で船外活動を行った場合、レゴリスは非常に細かい砂であるので、それがベアリングの隙間に詰まってしまうと動かなくなる。また、宇宙飛行士の関節とスーツの関節が完全一致しないと動けない (オーダーメイドとなりコストがかさむ)。



4. 現在開発中の宇宙服

関節部位をジャバラにし、あらかじめ曲がりやすい構造にしておく。

ジャバラ部分の膨張を防ぐため、ジャバラ中に関節部位を取り巻くようにリングを通したり、ジャバラの腹同士を糸で結んだりしている。

作って実験してみると動かないことも多く、その原因を探るのもなかなか大変とのこと。

座談会でのお話

- ・元々宇宙を専門にしようとしてた訳ではない。たまたま研究室の先生が宇宙服研究を始めた。
- ・国際学会で生理学の世界的権威にポスターを褒めてもらったことがきっかけで研究の道に。
- ・「大学に、5年もすれば戻りたくなるよ。」
 - 1年目：新しいことができるようになる。
 - 2年目：予測ができるようになる。
 - 3年目以降：同じことの繰り返し。飽きてくる。
(常に先を見て、新しいことを求めている人は、臨床では飽きてしまうかもとのこと。)
- ・教授になっても研究をしている。それが本来あるべき姿だと思う。
- ・日本で宇宙医学をやると、JAXA に頼ることになるのでキャリアが不安定になりがちなのだと感じた。
- ・アメリカでもポストをあげると言われたがこれ以上向こうでやっても一緒かなと思ったので日本に帰ってきた。



参加者の感想・疑問点 (回答もいただきました)

感想

- ・宇宙服の改良への Try and error をほぼ一人でされていることに驚愕したとともに、理想形へ近づけていくことへの難しさや研究のシビアさ、日本と海外での研究者に対する待遇の違いについて知り考えるきっかけとなった。
- ・宇宙服を作るうえで生理学の知識を要したり、また宇宙服の実用実験を通じて異なる分野での仮説を立てられたりというように、様々な分野の知識が結びついていくのが興味深かった。
- ・医者立場から出なければ、宇宙服としての人体を宇宙から守るという根本的な機能を失うため、まず自分自身が完成させなければいけないという強い信念を持って厳しい状況で研究をなされているのを伺い驚いた。



- ・先生は、鼓膜心臓反射の研究もされていて、鼓膜の温度を下げると心拍数が下がり、これが生活習慣病の増える世界で大変重要な意味を持っていて、また、鼓膜の発生の起源が魚の潮の温度を感じる側線であるという話は、個人的に1番感動した。
- ・宇宙医学と一口に言っても様々な世界があり、宇宙服開発にも医師として関わられている方がいると知りました。キャリア観も含んだお話は非常に興味深かったです。自分も医学者として貢献できる分野をもっと広い視野で探していこうと思います。
- ・宇宙服の研究をやりたいと言う人も、研究テーマが見つからず研究が続かないとおっしゃっていたことについて、例えば現状の宇宙服のどういう点が嫌だろうか？と、どう問いを見つけるかが大切だと思った。
- ・宇宙服における問題点として、与圧による減圧症のリスクと可動性が相反していることにある。高与圧では減圧症のリスクは下がるが、可動性は下がる。一方、低与圧では、減圧症のリスクは上がるが、可動性は上がる。減圧症のリスクと可動性のどちらかを選べば、減圧症のリスクを下げるほうにシフトするはずである。そのため弾性の素材を利用しながら加圧していき、かさばらずに可動域の細部まで含めて可動性を確保できるかがポイントとなる。言葉にするのは簡単だが、現実にはなかなか想像通りにはいかず、試行錯誤の連続であるが、一步一步より質の高いものを目指そうとする研究の一端を知ることができた。個人的には、MCP スーツの細部に均等に与圧がかからないところを日本の技術で補えば、より実践的なものとして役割を果たせるのではないかと思う。
- ・宇宙医学に必要なだが、繋ぐことができていない技術が数多くあるのではないか？と思った。うまく連携を取っていくべきだと思う。



素晴らしい。その通りです。

- ・宇宙服をやる人が少なすぎると思う。知名度の問題。今は JAXA の威を借りるしかない。これは宇宙服に限った問題ではないかもしれない。



逆に数が少ないのでオンリーワンになりやすい。

- ・宇宙には「寝心地」みたいなものがないのだろうか？人間は丸まった姿勢を自然に取るようになっており、「この姿勢で寝るのが一番自然なんですよ」と石原先生もおっしゃっていたが、実際は身体を固定している。睡眠時は、もう少し寝心地のいい姿勢で固定したり、「快眠の姿勢」に押さえつけるようにすると良いと思う。



- ・宇宙には「寝心地」みたいなものがないのだろうか？人間は丸まった姿勢を自然に取るようになっており、「この姿勢で寝るのが一番自然なんですよ」と石原先生もおっしゃっていたが、実際は身体を固定している。睡眠時は、もう少し寝心地のいい姿勢で固定したり、「快眠の姿勢」に押さえつけるようにすると良いと思う。
- ・宇宙服一つにしても、「快適性」などはまだまだ気にされないフェーズにあると思った。
- ・先生のお話を伺い、学生や臨床医として日々勉強や研究をする中で、常に宇宙医学に興味を持ち続けることで、宇宙と関われる機会を逃さないことが大切だと感じました。
- ・学生に考えられることはないか？
- ・専門的な工学知識が無くても入り込んでいけるところがあると思うので、そこを開放して欲しい。

疑問点

- ・月面活動など、人が船外活動を行う必要があるのに、宇宙服の開発環境が整っていないことが不思議で、その理由はなんなのか？



現在、船外活動を行う場面は国際宇宙ステーションしかありません。また、非常に危険な作業ですので、新しいものを作ってリスクを犯すよりはこれまでうまくいってきた実績のあるものを使用した方が確実に安全です。今後新しくステーション開発、月面着陸をあらためて目指すのであれば、新しい宇宙服を提案できる可能性が出てくると思います。

- ・宇宙服の仕組みを消防服やリハビリの器具に応用できる可能性があるという話を聞いて、もっと予算が下りても良いのではないかと思った。また、大学等で宇宙工学系の開発をしている人と協力するより、消防服やリハビリ器具の開発などを行なっている企業とチームを組んだ方が話が通じやすいのではないかと思ったが、その方面との繋がりには生まれえないのか？



仰るとおりです。現在田中が主に進めているのは、宇宙服に最も重要な「減圧症予防」と「可動性」の矛盾解決です。そこはなかなか地上応用が難しいところですが、自衛隊の衣服を作っているメーカーにご協力いただいています。消防服に応用できるのは防護服の部分ですので、今回あまり詳しくお話しできませんでした。温度調節に関しては現在、ハウス農業やスポーツ分野の方たちと話を進めております。



京都大学宇宙総合学研究ユニット 特定准教授

寺田昌弘 先生

概要

京都大学宇宙総合学研究ユニットの目的や、今後の有人宇宙学の展望についてお話しいただきました。

講義まとめ

- ・ 京都大学宇宙総合学研究ユニットの目的；
部局の枠を超え新たに「宇宙総合学」の構築を目指す。
 - ・ 学生の教育→学生パラボリックフライト（微小重力下）実験、有人宇宙学実習など
 - ・ 一般向け →お寺で宇宙学、宇宙落語など
- ・ 花山天文台（京大・山科）1924年設立
初代台長：山本一清
アマチュア天文学の先駆けとなった。
- ・ 宇宙で木は育つ？
真空状態でも木は生育すると考えられており、その実験を行っている。
- ・ 有人宇宙学：人間・時間・宇宙を築く学問
宇宙における持続可能な社会基盤を構築
- ・ 霊長類学との融合
チンパンジーの瞬間的な記憶力の実験

参加者の感想

- ・ 有人宇宙学という視点から宇宙に関わる学問を俯瞰することができ新鮮だった。
- ・ 京大宇宙ユニットが学生や一般人が有人宇宙学について学ぶ機会を広く設けていることを知り、感銘を受けた。機会があればぜひ私も参加させていただきたいと思った。
- ・ 「お寺で宇宙学」や「宇宙落語」など、アカデミックな内容から少し離れたコンテンツを行うことで、純粹に宇宙に親しみを持つことができ、とても良いなと思った。
- ・ 人類の宇宙進出の過程を、過去の霊長類の進化と照らし合わせて考えるという発想が面白かった。
- ・ すでに世界は、単に宇宙飛行士が一時的に宇宙へ行くことを超えて、宇宙に新たな社会を築いて“真の宇宙進出”を目指していることを知り、鳥肌が立った。



京都大学宇宙総合学研究ユニット 特定教授

土井隆雄 先生

概要

人類が宇宙空間で社会を作るために必要なことや、実際に宇宙空間に滞在した感想についてお話しいただきました。

講義まとめ

1. 宇宙では何が必要か？

1人では何もできない。自給自足の生活をするには社会が必要。
宇宙で社会を作るための学問が有人宇宙学。

2. 研究室で木を育てている理由

木は生活に必要なもの(食べ物、住居、プラスチックなど)の元になる。真空中で木を育てることができれば、リソースを確保できる。真空中で変質しないことも利点。

→木を使って人工衛星が作れる？

- ・加工が簡単
- ・紫外線でいつかは分解される
- ・宇宙ゴミ・環境汚染対策

3. 実際に宇宙に行ってみた感想

2週間くらいの滞在では、帰還後あまり身体的不調は感じない。すぐに適応できる。

→宇宙医学は長期滞在のためのもの。

宇宙ゴミ：

任務を終えた人工衛星や、それに伴う人工物が地球周回軌道に残り、今後の宇宙開発において問題となっている。また、地球に落とされた人工衛星も成層圏突入時に数ミクロンのアルミナとなり、成層圏・海洋を汚染している。

参加者の感想

- ・地上で行なっている全てのことが宇宙につながっているのだと感じた。
- ・土井先生に今回お話していただいて、その人柄と興味をひく話し方から、宇宙飛行士という職業がどのようなものか垣間見えたような気がし、憧れがより一層強くなった。
- ・宇宙ゴミを回収する方法について何かないかと考えたことはあったが、処理しやすい材質で衛星を作るという発想をしたことはなかったため、問題解決には柔軟な考え方が必要だと感じた。



宇宙空間での筋力維持は可能か



京都大学人間・環境学研究科 教授

石原昭彦 先生

概要

微小重力、宇宙放射線の存在など地球上とは条件が異なる宇宙空間において、体（特に筋肉）にどのような変化が起きるのか、また、その変化への対処法についてお話しいただきました。

講義まとめ

微小重力、宇宙放射線の影響により、人体には様々な変化が現れる。

宇宙空間では筋力が低下する。

筋の種類や部位によって収縮の程度は異なっており、特に体を支えたり歩いたりするのに使う持久的な筋肉（遅筋繊維）の収縮が顕著だった。

筋萎縮を和らげる方法

1. 宇宙飛行前のトレーニング

筋萎縮するので、事前に筋繊維を太くしておく。

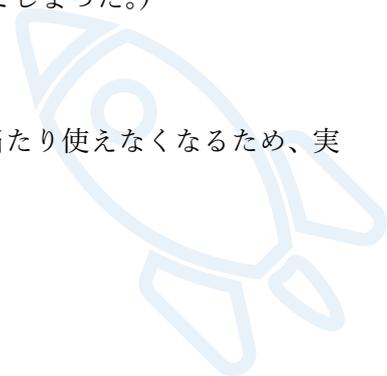
長期の宇宙滞在にはほとんど効果がないかもしれない。

（ネズミの実験では、鍛えた筋肉は3ヶ月程度で元の大きさまで萎縮してしまった。）

2. 遠心力の利用

衛星を回転させることにより火星と同程度の重力（1/3G）を作る。

ただし、小型の衛星では目が回ってしまい、大型の衛星では宇宙ゴミが当たり使えなくなるため、実現は難しい。





3. 代謝の減少・増大

・冬眠

コールドショックプロテイン：低温状態で筋等の修復を促すタンパク質

・高酸素濃度

高酸素濃度下では、筋の増強、老化の防止といった効果が現れる

かつて地球上には巨大な生物が多くいたが、それを支えていたのは30%の酸素濃度であった。

人間の血液に取り込める酸素量には余裕があり、酸素カプセルに入ることにより多くの酸素を血中にとかすことが出来る。カプセルから出ればそのうち効果は抜けてしまうが、それでも健康に寄与する。

宇宙飛行士の筋力低下は、長期になると地上のトレーニングではフォローしきれないため、宇宙空間で継続的に酸素カプセルを利用してもらい、筋力を維持させたい。

4. 遺伝子操作

PGC-1 α （筋持久力に関する）、TGF- β （筋繊維を太くする）を操作する。

ただし、全身の筋肉が一気に変わってしまうため、部位ごとの調節ができない。

参加者の感想

- ・酸素カプセルの研究は、宇宙飛行士だけでなく一般人も体験できる研究で、研究成果が多くの人の目に留まりやすいと感じた。地上と宇宙にまたがった研究成果から、宇宙に興味を持つ人が出てくると良いと思う。
- ・ISSは宇宙空間にあるカプセルのようなものなので、ISS内の空気を酸素カプセルと同様の状態にすれば宇宙飛行士のパフォーマンスの向上・体力維持に役立つのではないかと思った。
- ・遺伝子操作による筋維持の話聞いて、関連因子を目的筋付近に注射したりして筋力を操作できれば、帰還後のトレーニングが楽になるのではないかと思った。
- ・宇宙エレベーターや火星移住についての小話を聞いて、宇宙医学はそれ自体が目的なのではなく、人類が宇宙に進出するという目的のための手段のようなものだと思った。





複雑な動きを実現するシナジー



京都大学大学院人間・環境学研究科 教授

神崎 素樹先生

概要

人体が行う複雑な動きを実現するには各筋肉に送る指令も複雑化します。その負担を減らすため、指令は全て別々に送られているのではなく、動きごとに決まったまとまりごとに送られているとする概念「シナジー」があります。神崎先生にはその「シナジー」についてお話しいただきました。

講義まとめ

神崎先生のシナジーについての講義のまとめは、未発表の内容を含むため割愛させていただきます。





終わりに

2019 年春関西宇宙医学スタディーツアーでは、筋やシナジーなど医学関係の講義の他にも、宇宙服や有人宇宙学についての講義など、宇宙に関する多方面に渡る講義を受けることができました。その分野の最先端の研究をしていらっしゃる先生方のお話はとても考えさせられる部分が多く、視野を広げる貴重な経験となりました。宇宙医学スタディーツアーでは直接先生とお話しする機会があり、ふとした疑問についても議論したりすることができるので、興味を持たれた方はぜひ次の機会にご参加ください！

最後になりましたが、今回スタディーツアーでご講義くださった田中先生、寺田先生、土井先生、石原先生、神崎先生に深く御礼申し上げます。



Space Medicine Japan Youth Community について

Space Medicine Japan Youth Community は、宇宙医学について学び活動する、学生を中心とした若手コミュニティです。

宇宙医学の研究者の方々に訪問するスタディーツアーや、講師をお招きしての講演会、Facebook 等を用いた情報発信を行なっています。

メンバー、サポーターも随時募集しております！興味のある方は、

spacemedicine.japan@gmail.com までご連絡ください。

Facebook は右の QR コードまたは下記 URL からアクセスしてください。

<https://www.facebook.com/pg/spacemedicinejapan/>

