

宇宙総合学研究ユニット NEWS 2020 年 9 月号



大学院分野横断型講義「有人宇宙医学」のご案内

授業科目名：有人宇宙医学

対象学生：大学院生、学部生（聴講可）

曜日限：水曜日 4 限

場所：総合生存学館大講義室（2F）

* コロナ感染症予防対策のためオンライン開催の可能性あり

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。

授業計画：

- 【第 1 回】10 月 7 日 宇宙医学概要（寺田昌弘）
- 【第 2 回】10 月 14 日 宇宙服と低圧症（田中邦彦：岐阜医療科学大）
- 【第 3 回】10 月 21 日 宇宙生物実験（暮地本宙己：慈恵医大）
- 【第 4 回】10 月 28 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 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（萩生翔大）
- 【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 宇宙での心循環系への影響①（岩瀬敏：愛知医大）
- 【第 9 回】12 月 2 日 宇宙での心循環系への影響②（南沢享：慈恵医大）
- 【第 10 回】12 月 9 日 宇宙放射線の健康影響（浜田信行：電中研）
- 【第 11 回】12 月 16 日 宇宙での骨格筋への影響②（志波直人：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（山田深：杏林大学）
- 【第 13 回】1 月 6 日 宇宙放射線の影響②（山敷庸亮）
- 【第 14 回】1 月 13 日 宇宙放射線の影響③（山敷庸亮）
- 【第 15 回】1 月 27 日 閉鎖環境の影響（水本憲治）

* 講師の都合により、授業日程が前後する可能性がある。

大学院分野横断型講義「有人宇宙学」のご案内

授業科目名：有人宇宙学

対象学生：大学院生、学部生（聴講可）

曜日限：水曜日 5 限

場所：総合生存学館大講義室（2F）

* コロナ感染症予防対策のためオンライン開催の可能性あり

概要・目的：有人宇宙活動を宇宙に恒久的に人類社会を創造する活動であると定義する時、人類が宇宙に展開するための新しい総合科学：人間－時間－宇宙を繋ぐ有人宇宙学が必要となる。有人宇宙学は、宇宙－時間（宇宙の進化）、時間－人間（生命の進化および文明の進化）、人間－宇宙（宇宙開発の進化）の4つの進化過程を司る学問である。それは、宇宙に人間社会を創ろうとする試みが、自然科学分野のみならず、人文社会科学分野にも幅広く関係していることによる。この講義では、人類が宇宙における持続可能な社会基盤を構築するために何が必要なのか、自然科学的・人文社会科学的に解説する。理工系ばかりでなく人文社会系学生が、宇宙における持続的社会の構築という命題の中に、自分の研究分野との接点を見つけ、自分の研究の新たな意義と新しい方向性を見出すことをめざす。

授業計画：

【第1回】10月7日 有人宇宙学1（土井隆雄・山敷庸亮・田口真奈）

【第2回】10月14日 有人宇宙学2（土井隆雄）

【第3回】10月21日 宇宙探査工学（清水幸夫；JAXA）

【第4回】10月28日 有人宇宙学演習1（山敷庸亮）

【第5回】11月4日 宇宙生命科学（保尊隆享；大阪市立大学）

【第6回】11月11日 宇宙木材利用（村田功二）

【第7回】11月18日 宇宙医学（寺田昌弘）

【第8回】11月25日 宇宙環境工学（山敷庸亮）

【第9回】12月2日 宇宙霊長類学（湯本貴和）

【第10回】12月9日 宇宙法（青木節子；慶応大学）

【第11回】12月16日 宇宙人類学（岡田浩樹；神戸大学）

【第12回】12月23日 有人宇宙学演習2（山敷庸亮）

【第13回】1月6日 宇宙居住学（稲富裕光；JAXA）

【第14回】1月13日 有人宇宙学演習3（土井隆雄・山敷庸亮・田口真奈）

【第15回】1月27日 フィードバック

* 講師の都合により、授業日程が前後する可能性がある。

大学院分野横断型講義「宇宙学」ご案内

授業科目名：宇宙学

曜日限：木曜日 1 限

場所：総合生存学館大講義室（2F）

* コロナ感染症予防対策のためオンライン開催の可能性あり

概要・目的：我々がこの世界でいかに生存してゆくかを考えるためには、まず我々が生きている世界、即ちこの宇宙とそこにおける人間の位置づけについて知らねばならない。地球とそこに住む生命、そして人間は宇宙開闢以来の進化の帰結として生まれたのであり、今も地球環境は宇宙から様々な形で影響を受けている。そして人類の活動範囲が地球を出て宇宙にまでひろがりつつある現在から未来において、地球外という未知の環境は人類の心身と社会現象に様々な変容を引き起こすと予想される。人類史、生命進化、天文学等の様々な時間スケールで見た時の環境の自然変動と、人類自身が生み出した科学技術によって引き起こされる変化は、どちらも人類の存在そのものを脅かすリスクとなりうる。この授業ではまず自然科学が明らかにしてきた宇宙の歴史と現在の姿、そして人類生存圏の拡大の営みとしての宇宙開発の現状とそこから生じつつある人文社会学的な問題群を概説し、人類の生存に関わるようなリスクにどう向き合ったよいかについて議論を行う。天文学等の高度な自然科学の知識を前提とはしないが、基礎的な物理学等を使って定量的に現象を把握する演習は随時行う。

授業計画：

- 【第 1 回】 人間の宇宙観の変遷
- 【第 2 回】 宇宙史概観
- 【第 3 回】 人類生存圏としての太陽地球環境
- 【第 4 回】 地球と生命の歴史
- 【第 5 回】 地球外生命、宇宙人、宇宙文明
- 【第 6 回】 太陽系外惑星
- 【第 7 回】 宇宙開発利用の現状と将来
- 【第 8 回】 人類の生存を脅かす宇宙規模災害
- 【第 9 回】 宇宙政策
- 【第 10 回】 宇宙人類学入門
- 【第 11 回】 ハビタブルな第二の地球を求めて
- 【第 12 回】 ハビタブルな系外惑星のリスク
- 【第 13 回】 宇宙の極限建築
- 【第 14・15 回】 リフレクションと議論

今後の宇宙学セミナー・関連イベントなど

日時	内容	開催方法
9月30日(水) 15:00~	第3回宇宙学セミナー タイトル：宇宙のあちこちで磁場を測って目指す先 講師：松岡彩子先生（京都大学 地磁気センター） 事前申込方法： 下記のリンクから事前申し込みをお願いいたします。 このミーティングに事前登録する： https://kyoto-u-edu.zoom.us/meeting/register/tJYpfuyhrDMsG9UPjnj-1gvwSRQOLGjsWXgR 登録後、ミーティング参加に関する情報の確認メールが届きます。 当日、確認メールにある「ここをクリックして参加」、あるいは登録画面にある「この URL をクリックして参加してください」からご参加ください。	Zoom によるオンライン開催 (事前申込制)

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

今月号の研究紹介記事について

今月号の研究紹介記事ですが、岐阜医療科学大学の田中邦彦教授に執筆をお願いしました。宇宙ユニットでは、2019 年度から文部科学省宇宙航空科学技術推進委託費の支援を受けて、「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」を行っています。その中で、有人宇宙医学プログラムを実施しており、田中邦彦教授にご協力いただいています。

今後も宇宙ユニットの活動にご協力いただいている外部の先生方にもご執筆をお願いする計画です。ぜひ皆さん、楽しみにしていただければと思います。（寺田昌弘 記）

圧と呼吸と宇宙服

田中邦彦

（岐阜医療科学大学）

宇宙空間で活動しようとするなら、宇宙服が必要。正確には**船外活動用宇宙服** (Extravehicular Activity Suit; EVA suit)である（図1）。

地球上で我々は絶え間なく空気を吸い込み、そして吐いている。これを呼吸、もしくは細胞レベルでのガス交換＝内呼吸と区別して**外呼吸**と呼ぶ。

日々の生活の中で、この「呼吸」はそれほど意識しない。泳いだり、全力で走ったり、あるいは昨今のコロナ禍において、マスクが張り付くなど、「息苦しさ」を自覚したときのみ、空気・酸素の存在を意識し、またそれがなくては生きていけないことも再確認させられる。空気・酸素は当然、呼吸し生きていく上で非常に重要なことは言わずもがなではあるが、もうひとつ、日

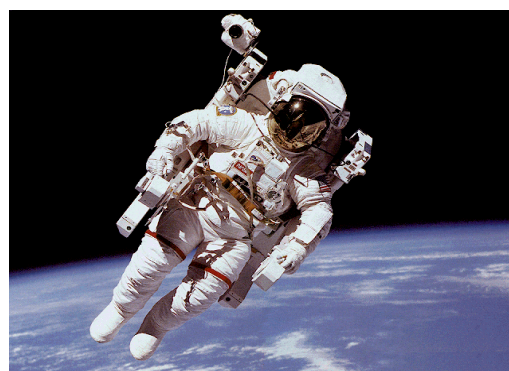


図1 船外活動用宇宙服 ©NASA

常生活においては全く意識されることがないにも関わらず、非常に重要な役割を果たしている。身体の「**圧迫**」である。

海面レベルで我々の体は 1 気圧の空気で圧迫されている。 $1013\text{hPa} \approx 1\text{kg}/\text{cm}^2$ である。つまり手指の爪ほどの面積を 1kg もの空気が抑えつけていることになる。重たくて仕方がないはずなのだが意識していない。生来、それが日常であり、空気がなかった場合と比較できないからであろうと思われる。しかし、これが宇宙空間＝高度真空であれば話が変わる。呼吸ができなくなるだけではなく、身体への圧迫も失われるのである。宇宙空間で活動すること、そのための宇宙服について考えるにあたっては空気の役割として、呼吸よりもこの「**圧迫**」のほうが、より難題なのである。呼吸を行うためだけであれば、宇宙空間であってもボンベからマスクを通じて空気を送り込めばよい。いやいや、それでは**皮膚呼吸**ができなくて死んでしまうではないか、という反論をよく耳にする。「007 ゴールドフィンガー」で世界一美しい死体と称された、金粉を全身に塗られた死体の印象があまりに強いからであろうと思われる。全身に金粉を塗られ、皮膚呼吸ができなくなったため窒息死したという設定を、地球上の多くの人々が信用している。しかし、人体は皮膚呼吸など行っていない。そうでなければ、マスクにしか空気を送り込まないスキューバダイビングで、1 時間も潜っていられるわけではないのである。では、なぜ首から下の身体も圧迫＝与圧しなければならないのか。一言で言えば「**減圧症**」を引き起こすからである。前述のスキューバダイビングをされる方は、講習で細かく説明されるためご存知であろう。急激に身体にかかる圧を低下させると、溶け込んでいる空気、特に分圧の高い窒素の溶解度が低下し、血液中や関節内で気泡を形成してしまうのである。特に皮膚の直下にある静脈は壁が非常に薄く柔軟なため、外圧の影響を非常に強く受ける。手背（手の甲）にある血管を押さえると、簡単に凹む、あるいは心臓よりも下に手を位置した時に膨れ上がった血管が、高い位置に手をあげると凹んで見えなくなるということは日常的に経験するところである。つまり身体周囲の気圧が下がるとこの気圧低下によって血管が拡張し、血管内圧すなわち静脈圧が低下するのである。静脈圧、その中を流れる血液にかかる圧が低下すると、溶け込んでいる気体が気泡化して出現するというのは、ちょうどビールやコーラの缶を開けた際に、缶内の気圧が下がり、溶けきれなくなった二酸化炭素が気泡となるのと同じ現象である。これを都市伝説では、「宇宙では血液が沸騰する」という言い方をしているが、沸騰ではなく単なる溶解度の低下である。この気泡化した窒素が血液循環によって肺に運ばれると、肺の毛細血管を閉塞する。この状態では、いくら空気を吸い込んでも血液が還流できないため、ガス交換ができなくなり**窒息死**する。これを予防するために首から下も同様な気圧で同様に与圧する必要がある。

現在米国、そして日本で使用されている宇宙服は、内圧を **0.3 気圧**に、**酸素のみ**で与圧している。これはアポロ時代から変わっていない様式である。国際宇宙ステーションの内部は地上同様 1 気圧に与圧しているため、それに比較すると、与圧しているとはいえ、非常に低圧である。したがっていきなり宇宙服を装着して船外で活動すると、この減圧症を引き起こしてしまう。そこで宇宙飛行士は船外活動前に、約 24 時間かけて、徐々に船内の圧力を下げ、血中の窒素を呼気と共に吐き出していくという、「**予備呼吸**」を行っている。

ではなぜ宇宙服内圧を 1 気圧に与圧しないのか。ここに「**可動性**」と言う宇宙服本来の目的に関する問題が浮上するからである。

宇宙空間では、宇宙服の外側は高度真空であり、宇宙服内部のみ圧力が存在する。この内外圧

較差によって、宇宙服は風船のように膨張してしまう。この膨張によって可動性が非常に低下してしまうため、宇宙服内の与圧は可能な限り低く抑制したいのである。

地上あるいは宇宙ステーション内部 1 気圧中の酸素分圧は 0.21 気圧であるから、酸素のみで与圧するのであれば 0.21 気圧で生存可能である。NASA 仕様の宇宙服は剰余性を確保するという観点から、0.3 気圧に与圧している。**ロシア製は 0.39 気圧**である。要するに、減圧症予防のためにはできるだけ高い与圧を行いたい、可動性の確保という観点からはできるだけ与圧を下げたいという矛盾に陥ることになる。しかし言い換えれば、可動性が確保できるのであれば、高い与圧も可能であり、より安全ということになる。

ではどれだけ与圧すれば予備呼吸なしでも減圧症を引き起こさず、生存あるいは活動が可能となるか。ここに興味深い研究がある。米国の空軍で行われた実験であるが、徐々に気圧を下げに行って、どこで減圧症を発症するかという検証である(1)。現在では倫理的に許されそうにない検証である。まず赤い線が血液中の気泡の、青い線が**関節痛**の出現率である(図 2)。

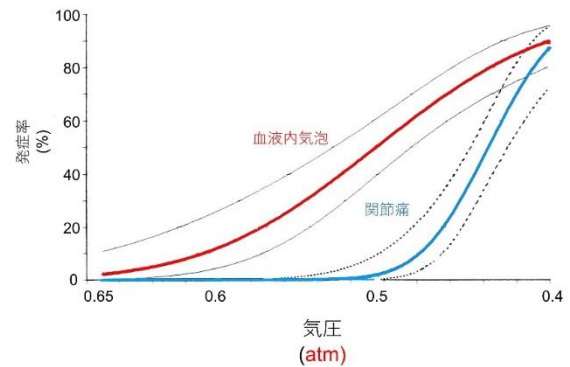


図 2 気圧と減圧症出現率
(Webb et al. 1998 より改変)

いずれも減圧症の現象であるが、「関節痛が起こる」すなわち減圧症の症状を自覚するよりも遥かに早く、血中に気泡が出現しているのである。気泡が出現しているにも関わらず気圧を下げていくと関節痛が出現し、その時点で計測終了である。この結果を見ると **0.65 気圧**であれば被検者が減圧症を発症しないことになる。したがって 1 気圧から予備呼吸なしに宇宙服を装着して宇宙空間へ飛び出すには、宇宙服内圧を最低 0.65 気圧に与圧していなければならないこととなる。これに続く検証で 0.65 気圧でも、**純酸素**の方が、酸素窒素混合気よりも減圧症の危険性が低いことも分かっている (2)。

そこで筆者は 0.65 気圧であっても、高い可動性を確保する方法をこれまで検証してきた。まず宇宙服の構造であるが宇宙服の構造は身近な例で言えば、検診あるいは病院等で使われている血圧計と同じ構造をしている。つまり空気を入れ、その空気を逃さないゴム/ビニールの層と、その破裂を防ぐために周囲を覆っている布とで構成される。宇宙服における、これらの層は筆者が宇宙服の勉強を始めた当時には適切な日本語が存在しなかったため、**気密層**、**拘束層**という訳を充てた。現在の宇宙服は、気密層・拘束層はそれぞれ、非常に頑丈なビニールとダクロンやゴアテックスといった強固な布で構成しているが、筆者はこの双方に**伸縮性**の高い素材を用いた。伸縮性素材は膨張すればするほど収縮力が高くなり、筋力の補助をさせることができるため、現在使われている伸縮性のない宇宙服よりも、手の部分については高い可動性を得ることができた (3)。しかし肩関節や股関節といった大きな関節部分についてはこの伸縮構造の有効な可動性を得ることが困難であったため、拘束層に**フレーム付きジャバラ**を使用することで 0.65 気圧での可動性を確保している (図 3、4) (4)。

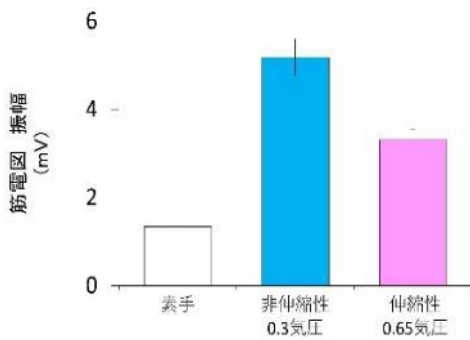


図 3 手指屈曲に必要な筋力

0.65 気圧であっても伸縮性の方が現行 0.3 気圧よりも小さい力で手指を動かすことができる。



図 4 肩関節にフレーム付きジャバラを採用した高与圧宇宙服モデル

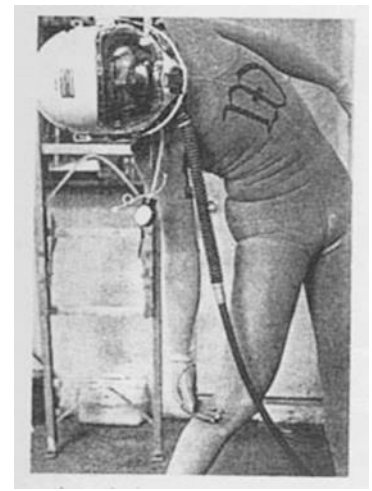


図 5 ヘルメット内のみに酸素供給、身体は伸縮性素材で与圧した MCP スーツ

一方で、身体に対して「圧力」が必要なだけであれば、気圧でなくても宇宙服そのもので締め上げる「接触圧」によっても加圧できるのではないかという発想で研究されたのが**弾性と圧式(Mechanical Counter Pressure; MCP) スーツ**である(図 5)。

この方法であれば宇宙服が膨張することはないため、非常に可動性が高くなる。筆者はこの接触圧が気圧の代替になるかどうかを検証した。皮膚血流を計測しつつ、この MCP スーツを着用すると、その締め付けによって血流が低下するのである。しかしその後周囲の気圧を下げれば下げるほど、血流が回復してくる(図 6)。すなわち身体にかかる圧力は、気圧と接触圧が相殺しあっている = 接触圧であっても気圧の代替となり得る = 身体周囲に空気がなくても接触圧をかけていれば減圧症を引き起こさない、と考えられる(5)。しかしこの MCP スーツには大きな欠点がある。手指あるいは脚といった、円柱形で強固な構造部分については有効な圧力が得られるのであるが、手掌や腋窩といった平坦もしくは陥凹部分には有効な圧力が得られないのである(図 7)。気圧による与圧ではこういったことは起きない。この陥凹部分に対する与圧を解消するアイデアを筆者はすでに有しているが、いかに伸縮性、特に収縮力を維持しながら 0.3 気圧相当の圧力をかけられる素材が今現在、特に体幹部については存在しないため検証が滞っている。しかし上記同様逆転の発想によって、その部分が解決できるのであれば膨張しない、非常に可動性の高い宇宙服が完成するものと考えられる。

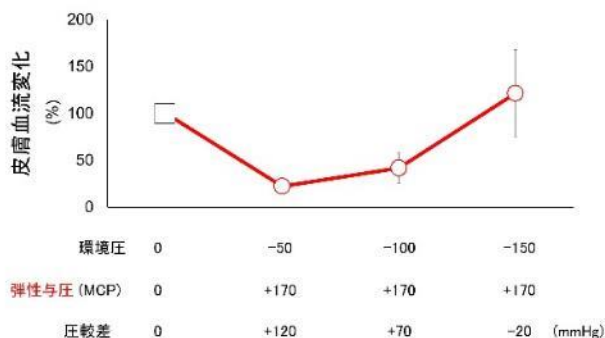


図 6 MCP スーツ(手袋)を着用し、チャンバー内の気圧を徐々に下げていった時の血流変化

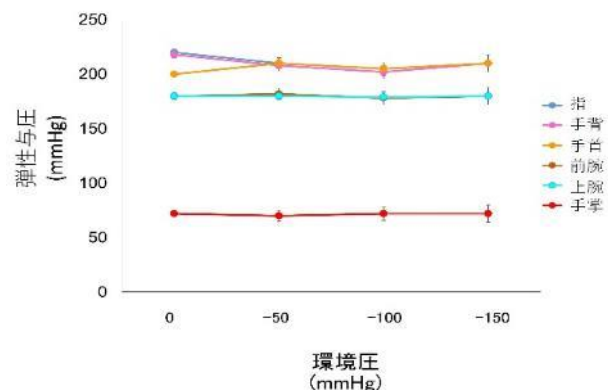


図 7 MCP スーツの接触圧

現在多国籍の宇宙機関によるゲートウェイ計画が発表され、本邦においては有人与圧ローバーの開発、米国においてはアルテミス計画と言った有人宇宙開発など、宇宙服が必要となるであろう状況が計画されている。宇宙服研究・開発の重要性はさらに高まるものと思われるが、その**出発点**においては医学的検証・知見が重視されることを望んでやまない。

文献

1. Webb JT, Olson RM, Krutz RW, Jr., Dixon G, Barnicott PT. Human tolerance to 100% oxygen at 9.5 psia during five daily simulated 8-hour EVA exposures. Aviat Space Environ Med. 1989 May;60(5):415-21.
2. Webb JT, Pilmanis AA. Breathing 100% oxygen compared with 50% oxygen: 50% nitrogen reduces altitude-induced venous gas emboli. Aviat Space Environ Med. 1993 Sep;64(9 Pt 1):808-12.
3. Tanaka K, Ikeda M, Mochizuki Y, Katafuchi T. Mobility of an elastic glove for extravehicular activity without prebreathing. Aviation, Space, and Environmental Medicine. 82: 909-912, 2011.
4. 蛇腹構造（内部高与圧かつ高稼働性蛇腹）出願人：神野学園，発明人：田中邦彦（出願番号 特願 2015-098085 特開 2016-210366 特許第 6325485 号）
5. Tanaka K, Waldie J, Steinbach G, Webb P, Tourbier D, Knudsen J, Jarvis C, Hargens A: Skin microvascular flow with and without a mechanical counter pressure space suit glove. Aviation, Space, and Environmental Medicine 73: 1074-8, 2002.

宇宙ユニットの活動やイベントについては、下記サイトをご覧ください。また、宇宙ユニットや本 NEWS に関する皆様のご意見等も気軽に下記メールアドレスまでお送りください。

京都大学 宇宙総合学研究ユニット

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

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

編集人：平井颯

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