

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：33708

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24620010

研究課題名(和文)次世代宇宙服要素の研究

研究課題名(英文)Development and evaluation of new suit components for extravehicular activity

## 研究代表者

田中 邦彦(Tanaka, Kunihiko)

岐阜医療科学大学・保健科学部・教授

研究者番号：60313871

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：予備呼吸を行わずとも減圧症を引き起こさない高与圧、しかも高可動性の船外活動用宇宙服関節機構と、より快適かつ高効率な冷却下着を開発、検証した。関節機構については伸縮素材+金属フレーム付ジャバラ機構およびシールド付ベアリング機構で、圧較差0.65気圧でも高い可動性を確保できた。冷却下着については自己発汗式蒸散冷却下着に任意噴霧装置を付与した下着で、衣服内湿度を上げることなく高い皮膚冷却効果を得ることができた

研究成果の概要(英文)：Joint structures that need not pre-breathing due to high inside pressure, and have high mobility for extravehicular activity suit are developed and evaluated. Combination of high elastic material and bellows with metal frames, and shielded bearings were most useful at the pressure difference of 0.65 atm. Further, comfortable and highly effective cooling garment were developed and evaluated. Self-perspiration with evaporative cooling garment and wearer-controlled mist structure was effectively lowered the skin temperature without raising humidity in the garment, rather than simulated current cooling garment.

研究分野：生理学一般・宇宙医学

キーワード：宇宙服 減圧症 体温調節 関節可動域 熱中症 宇宙飛行士 予備呼吸 国際宇宙ステーション

## 1. 研究開始当初の背景

国際宇宙ステーションに本邦の実験モジュールが設置され、運用が行われている。宇宙ステーション内部は地上同様 1 気圧に与圧されているが外部の宇宙空間は高度真空であるため、モジュールの修理・調整、人工衛星回収といった船外での活動には専用の宇宙服を着用する必要がある。またアメリカ合衆国は今後月探査、火星探査を目指すといわれるが、有人探査あるいは基地建設にあたっては船外活動用宇宙服を着用する必要がある。本邦の実験モジュールを自ら維持する、あるいは合衆国の計画に追従のみならず対等に協力するためには独自の船外活動技術を有することが将来的には必要であると考えられる。

(1) 現在米国、日本の宇宙飛行士に使用されてきた船外活動用宇宙服 (Extravehicular Mobility Unit, 以下 EMU) は内部を純酸素で 220mmHg (約 0.3 気圧) に与圧している。これは地上 1 気圧に比較して非常に低圧であるため、関節痛や血管内気泡といった減圧症を予防する必要がある。宇宙飛行士は約 24 時間かけて徐々に室内与圧を下げつつ血管内窒素分圧を低下させるという「予備呼吸」を行っている。与圧を高くすれば減圧症の危険は低下し、予備呼吸時間は短縮することができるが、外部は高度真空であるため、その圧較差によって服はさらに膨張し、可動性が低下する。しかし言い換えれば、可動性が確保できるのであればより高い与圧を行っても支障がないと言える。

これまでに我々は EMU のような非伸縮性素材による構成でなく、ゴムのような弾力性・伸縮性を有する素材を用いることで高い可動性が得られると考え研究を続けてきた。つまり高い弾力性、特に収縮力を有する素材は与圧によって進展すればするほどもとの形に戻ろうとする力も大きくなるため身体の動き、つまり筋肉の収縮を補助する役割を果たすため、可動性が改善するで

あろうと考えた。予備呼吸が不要である最低条件は「純酸素」による与圧で「0.65 気圧」といわれる (Webb et al. 1998)。そこで伸縮性素材を用いてグローブを作成し、圧較差 0.65 気圧でも破裂しないという安全性を確認したのち、健常者の手を挿入し手指の可動性を可動域と筋電図振幅で評価した。その結果、圧較差 0.65 気圧の伸縮性グローブは現行のような 0.3 気圧の非伸縮性グローブよりも可動性が高いことを証明した。今後、より大きな関節について高い与圧と高い可動性という矛盾するコンセプトの両立が必要となる。

(2) EMU は大別してスーツ部分と、圧力や衣服内環境調節等を行う生命維持装置とで構成される。

生命維持装置は通常背部に取り付けられており、主要な機能は与圧と温度調節である。

現行の宇宙服は前述のとおり膨張により可動性が低下しているため、着用下での作業には多大な労力を必要とする。その結果飛行士の体温ならびに服内温度は上昇する。放置すれば作業効率が低下したり、飛行士に熱中症を引き起こしたりといった不都合が考えられるため、冷却下着を着用することになる。現在使用されている冷却下着は皮膚に密着させたスパンデックス生地表面に這わせたチューブ内に、生命維持装置で冷却した水を下着循環させることによって身体を冷却している (Liquid Cooling and Ventilation Garment; 以下 LCVG)。しかしこの方法では、皮膚表面からの汗の蒸散を妨げるため宇宙飛行士には不快感を生じさせる。さらに、堅いチューブが身体の可動性も低下させてしまう。したがって、より汗の蒸散を促進しつつ高い冷却効果を得る方法が必要とされる。

## 2. 研究の目的

(1) 肘関節、膝関節といったより大きな蝶番関節と肩関節、股関節といった大きな球関節について圧較差 0.65 気圧で高い可動性を有する機構の開発と検証を行う

(2) 汗の蒸散を促進し、さらに高い冷却機能を有するとともに、より高い可動性を有する冷却下着の開発と検証を行う。

## 3. 研究の方法

### (1) 関節機構

- ・ 気密かつ伸縮性とくに収縮性を有する素材を検討した。
- ・ 屈曲・伸展の可動域を拡大させるために回転式水平ジャバラ、時計バンド等に使用されているジャバラプレス、ジャバラ折り、ミウラ折り、引きバネ、金属フレームジャバラ等を製作、有用性を検証した。
- ・ 気密を保持しつつ、前腕の回内、回外運動を容易にするためのスラストベアリング、二重ラジアルベアリング+折り返し構造、ラジアルベアリング+シール構造を作成し、可動性を検討した。

### (2) 冷却下着

- ・ 市販の速乾下着(以下 Normal)、EMU と同径、同長の冷却水還流用チューブを に編みこんだもの(simulated LCVG; 以下 s-LCVG)、新規に考案した、EMU よりも大径、短チューブを に縫製し、それに冷却水を還流させるのみならず、滲出させるための小孔を設置し、下着からの蒸散による気化熱で冷却を同時に行う「自己発汗および蒸散式冷却下着」( Self-Perspiration and Evaporative Cooling Suit; 以下 SPEC suit)を開発した。
- ・ 上記3種類のスーツを着用し、自転車

エルゴメーターにて 30W, 60W, 90W, 120W の運動を負荷した。

- ・ 運動前・中・後で皮膚温、衣服内湿度を計測した。
- ・ さらに、着用者が自身の意思で噴霧し、任意に冷却を行うことができる装置を付与した Wearer-controlled SPEC suit(以下 w-SPEC suit)を作成し、同様の計測を行った。

## 4. 研究成果

### (1) 関節機構

- ・ メーカーの協力を得て気密層となるクロロプレンに、拘束層となる弾性不織布で被覆し、さらにその間に熱伝導性を低下させるチタン層を加工した素材を入手した。これによって伸縮性を有する気密層・拘束層に断熱層を加えた一体型素材で厚さ0.3mm を実現した。その素材の伸展時と収縮時の張力を測定した。
- ・ 可動域を拡大させるために 回転式水平ジャバラ、時計バンド等に使用されているジャバラプレス、ジャバラ折り、ミウラ折り、引きバネ、金属フレームジャバラ等を製作、有用性を検証した。その結果伸縮率の大きさ、可動域の大きさ等から金属フレームジャバラが最も有用性が高くまた応用性も高いと判断した。内層の伸長性が高すぎると、その内層が与圧時にプリーツ構造(ヒダ)の間に入り込むように膨張し可動性を低下させることがわかったため内層を3重構造とし、伸縮性を維持しつつ過膨張を防止した。またジャバラと伸縮性素材のみではプリーツが均一に伸長せず一部分のみに負荷がかかったため、フレームに索状構造を付与し均一に拡張させ、また過膨張を防止した。この

索状構造と内層改良によって0.65気圧においても大関節の可動性を確保できた。この構造で特許申請を行った。これらの構造がなければ与圧時には全く稼働させることができないが、改良後も球関節として全方位に稼働させることは困難であり、索状構造を中心とした2方向の稼働性にとどまった。したがってその他の方向についてはベアリングで補助することとした。

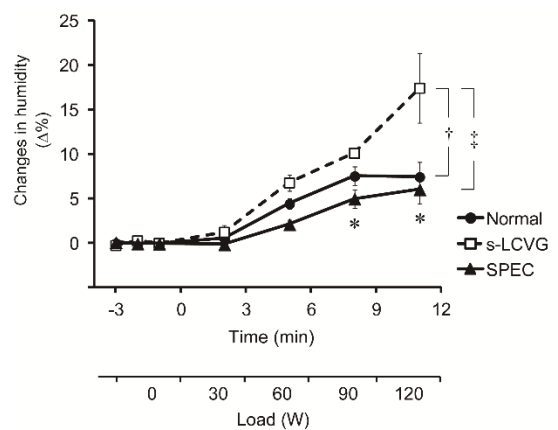
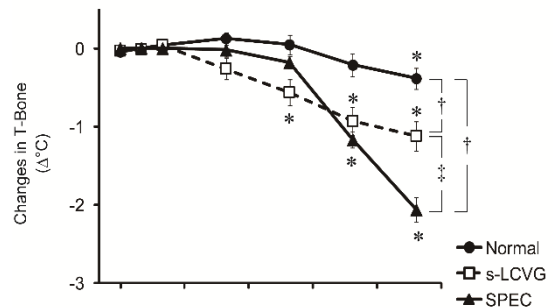
通常のラジアルベアリングでは与圧時の気密保持性ならびに軸方向の耐荷重性が低いことから、まず スラストベアリングを採用した。しかしながら耐荷重性は大きいものの気密を可動性の両立性が低く、二重ラジアルベアリング+折り返し構造を考案し、上肢部分を作成した。この方式では特にベアリングに気密構造を追加することなく、高い可動性と気密性を両立することができた。宇宙服上肢が作成できた時点での特許申請を考慮している。一方、折り返し構造を不要することなく、これまでのラジアルベアリングにシール構造を付与し、さらに気密グリースを充填した ラジアルベアリング+シール構造の作成、検討を行った。その結果、可動性はやや低下するものの0.65気圧の圧較差で気密性を保持することが可能であった。しかも に比較して簡便な構造であるため、を基本的なベアリング構造として採用することとした。

## (2)冷却下着

- Normal, s-LCVG, SPEC suit について運動中の皮膚温(図上)と衣服内湿度(図下)を計測した。皮膚温は水冷式のほうが早くから低下を認めたと運動継続によって次第に自己

発汗スーツの蒸散を伴った冷却効果の方が高くなった。また冷却水を滲出させているにもかかわらず、衣服内湿度は SPEC suit のほうが s-LCVG よりも有意に低く、快適と考えられた。

- 一方、SPEC suit においては、冷却開始直後、充分量の冷却水が滲出・蒸散するまでの間、還流量が s-LCVG に比較して少ないため冷却効果が小さかった。そこで着用者が任意に噴霧できる装置を付与した w-LCVG で同様の計測を行った。計測開始時の噴霧が冷却水の滲出を促進したため、冷却効果の大幅な改善を認めた。この際にも衣服内湿度の上昇は s-LCVG よりも小さかった。



## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計2件)

1. Tanaka K, Nakamura K, Katafuchi T. Self-perspiration garment for extravehicular activity improves skin cooling effects without raising humidity. Acta Astronautica 104: 260-265, 2014.
2. Tanaka K. Development and Evaluation of a Glove for Extravehicular Activity Space Suit without Prebreathing. J Ergonomics S2: 002. doi:10.4172/2165-7556.S2-002, 2013

[学会発表](計6件)

1. Tanaka K, Nakamura, K, Abe C, Morita H "Roles of vestibular function for maintaining arterial pressure during head-up tilt." The 11th WORLD CONGRESS of the International Society for ADAPTIVE MEDICINE. May 27 - 30, 2015 Yonago シンポジスト
2. 田中邦彦, 間野忠明「予備呼吸不要な船外活動用宇宙服の開発」第26回宇宙生物科学会大会 平成24年9月27日 徳島
3. 田中邦彦, 岩瀬敏、西村直記、高田真澄、高田宗樹、佐藤麻紀、安部力、岩田ちひ
4. 田中邦彦, 間野忠明「新しい宇宙船外活動用冷却下着の開発と検証」第59回日本宇宙航空環境医学会大会 平成25年11月22日 倉敷
5. 田中邦彦, 間野忠明「新しい宇宙船外活動用冷却下着の開発と検証」日本宇宙生物科学会 第28回大会 平成26年9月22日 大阪
6. 田中邦彦, 長尾大輝、岡田高輔、間野忠明「新しい船外活動用冷却下着の改良と検証」第29回宇宙生物科学会 平成27年9月26日 東京

[図書](計2件)

1. Tanaka K, Webb P, Hargens AR: Development and Evaluation of Mechanical Counter Pressure Glove for Extravehicular Activity in Space. In: Adaptation Biology and Medicine vol. 7 Popescu, LM ed. 411 - 420, 2013. ISBN: 978-81-8487-214-9
2. 田中邦彦「宇宙服」立花正一編 宇宙空間と人体メカニズム pp. 124 - 149.

[産業財産権]

出願状況(計2件)

1. 名称: 蛇腹構造 (内部高与圧かつ高稼働性蛇腹)  
発明者: 田中邦彦  
権利者: 神野学園  
種類: 特許  
番号: 特願 2015-098085  
出願年月日: 平成27年5月13日  
国内外の別: 国内
2. 名称: 冷却衣服 (自己発汗式蒸散服)  
発明者: 田中邦彦  
権利者: 神野学園  
種類: 特許  
番号: 特願 2015-140231  
出願年月日: 平成27年7月14日  
国内外の別: 国内

取得状況(計1件)

名称: Knight Suit  
ナイトスーツ  
発明者: 田中邦彦  
権利者: 田中邦彦  
種類: 登録商標  
番号: 第5524061号  
取得年月日: 平成24年9月28日  
国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

田中邦彦(TANAKA, Kunihiko) 60313871  
岐阜医療科学大学・保健科学部・教授  
研究者番号: 60313871

(2) 連携研究者

岩瀬敏(IWASE, Satoshi)

愛知医科大学・医学部・教授

研究者番号: 90184879

保田浩志(YASUDA, Hiroshi)

放射線医学総合研究所

放射線防護研究センター チームリーダー

研究者番号: 50250121