

令和3年度地球観測技術等調査研究委託事業

「長期宇宙滞在者を食と運動で支える
“宇宙専門管理栄養士/理学療法士”の育成」

委託業務成果報告書

令和4年5月

徳島大学

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、国立大学法人徳島大学が実施した令和3年度「長期宇宙滞在者を食と運動で支える“宇宙専門管理栄養士/理学療法士”の育成」の成果を取りまとめたものです。

目次

1. 委託事業の目的	1
2. 令和3年度実施計画	1
3. 講義実習プログラムの開発について	2
4. 大学院連携協定締結の準備について	6
5. 新規大学院コースの設置申請の準備について	6
6. 宇宙専門管理栄養士/宇宙専門理学療法士の認定制度の施行申請について	7
7. その他各施設独自の取り組みについて	10
1) 徳島大学	10
I. 機能性宇宙食を開発する意義について	10
2) 京都府立医科大学	16
I. 人材育成のための実習内容例（博士課程の研究内容例）	16
3) 医療基盤・健康・栄養研究所	18
I. 災害食と宇宙食の類似性に関する検討	18
II. 宇宙日本食認証製品の栄養成分表示の現状と具体的なメニュー例の検討	26
8. まとめ	31

1. 委託事業の目的

「機能的宇宙食」の研究開発を目指して設立され、宇宙栄養学を専門基盤として専門家を育成してきた「徳島大学宇宙食品産業・栄養学研究センター(以下、宇宙栄養学研究センター)」の活動をより発展させ、宇宙での栄養や運動の総合的な支援ができる、“宇宙専門管理栄養士または宇宙専門理学療法士”とも呼ぶべき宇宙医療のプロフェッショナルの育成を目的とする。具体的には、これまで我が国の栄養学を牽引してきた、国立研究開発法人 医薬基盤・健康・栄養研究所国立健康・栄養研究所と徳島大学医学部医科栄養学科、リハビリテーション医学を牽引してきた京都府立医科大学リハビリテーション医学教室、さらには、本提案参加者が理事を務める日本栄養・食糧学会や日本リハビリテーション医学教育推進機構が連携し、宇宙専門管理栄養士/理学療法士の認定制度の設立を目指す。

2. 令和3年度実施計画

1) 講義/実習プログラムの開発

徳島大学、京都府立医科大学、医薬基盤・健康・栄養研究所の三施設において、それぞれの得意な分野を中心に、教育プログラムを開発する。具体的には、徳島大学は宇宙栄養学と機能的食品学、京都府立医科大学は宇宙医学の基礎、宇宙リハビリテーション医学と宇宙運動学、医薬基盤・健康・栄養研究所は災害栄養学など特殊環境の栄養学、宇宙食材の調理法などのプログラム(4単位分以上)を作成する。実際に開発したプログラムを、既存の大学院生などにパイロット授業として実施できるよう大学当局に働きかける。

実習プログラムとしては、徳島大学と連携大学院契約を締結済みであるJAXA (Japan Aerospace Exploration Agency ; 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構)等と連携し、宇宙食メニューやリハビリテーション治療の開発現場を体験してもらう。つまり、実施体験型重視のプログラムを開発する。

2) 大学院連携協定締結の準備

三施設における、「宇宙食」と「宇宙での運動」に関する教育・研究の連携がスムーズに進むように、三施設共通の大学院連携協定を、令和4年度に締結できるように協議を開始する。なお、この包括協定を締結するのは、徳島大学、京都府立医科大学および医薬基盤・健康・栄養研究所の三者である。

3) 新規大学院コースの設置申請の準備

徳島大学、京都府立医科大学、医薬基盤・健康・栄養研究所の三者による大学院連携協定を令和4年度に締結予定であることを踏まえ、既存の学位との調整を図りながら、新規コース(宇宙管理栄養士コース/宇宙理学療法士コース)を徳島大学、京都府立医科大学に設置申請を行うための準備を行う。

4) 宇宙専門管理栄養士/宇宙専門理学療法士の認定制度の施行申請

公益社団法人 日本栄養・食糧学会や一般社団法人 日本リハビリテーション医学教育推進機構と連携し、宇宙栄養専門管理栄養士/宇宙専門理学療法士の認定に必要な大学院前期課程と後期課程の授業カリキュラムを完成し、宇宙専門管理栄養士/宇宙専門理学療法士の認定制度を施行するための準備を行う。

以下に、令和3年度に実施した事項を項目毎に報告する。

3. 講義/実習プログラムの開発について

1) 講義/実習プログラムの開発

①プログラム開発の基本方針

宇宙空間は無重力環境である。宇宙医療のプロフェッショナルを育成するために、無重力環境が身心にどのような影響を与えるかを学び、また、対処の方法を学ぶプログラムが必要となる。さらに、新たな知見を見いだし、対策を講じられる人材を育成するプログラムを構築していかねばならない。まず、これまで明らかにされてきた研究内容を調査した。

無重力に近い環境を地上で構築する手段として実現可能なものに、被検者を寝たままの状態におく方法がある。重力の影響を排除する最も簡便な状況であり、国際宇宙ステーションに宇宙飛行士が長期滞在するに際し、さまざまな研究が地上で行われた。17週間に及ぶ、健常成人を寝たままの環境に置く研究では、筋組織が15%減少していた (Adrian D J Bone Miner Research 5:843-850, 1990)。9日間の宇宙滞在で、筋組織は7%減少したとの報告もある。また、実際に宇宙で長期間滞在した宇宙飛行士では、1か月の宇宙滞在中で骨密度は1%減少することが明らかにされた (LeBlanc A JMNI 1:157-160, 2000)。健常成人を17週間寝たままの環境に置く研究では、骨密度は0.9%減少していた (Adrian D J Bone Miner Research 5:843-850, 1990)。さらに、無重力状態では、血液が体内を循環しやすいため、地上で必要とされるほどの心拍出量は要求されず、筋活動量が地上ほど多くない。よって、身体が宇宙環境に順応する結果、血圧は低下して心筋は萎縮し、前述の通り骨格筋は萎縮するとともに、循環血漿量は低下し貧血となる。

宇宙環境は、地上での不動が身体に及ぼす影響(廃用症候群)と酷似していることが判り、これを予防し、治療していくリハビリテーション治療での訓練が、宇宙環境においても重要であり、実際に国際宇宙ステーションの船内で筋力増強訓練や持久力訓練が行われている(表1)。

表1 宇宙環境と酷似する地上での不動が身体に及ぼす影響

・運動器障害(筋量・筋力・骨量の低下、関節拘縮) 高齢者の2週間安静で筋量2割減少
・呼吸・循環機能低下(換気量の低下、血圧低下、貧血、 心筋菲薄化、下肢静脈血栓症)
・摂食嚥下障害(誤嚥性肺炎)
・消化管機能障害(逆流性食道炎、便秘)
・精神障害(うつ状態、せん妄)

一方、宇宙環境では行動範囲が制限される。1960年代に、5名の若者に3週間臥床したまま生活をさせ、前後に体力の指標として最大酸素摂取量を測定した研究がある (Saltin B, Circulation. 38(5 Suppl), VII1-78, 1968.)。3週間の臥床安静で半分近くまで数値が低下する被検者がいたが、その後のトレーニングプログラムで回復している(図1)。この研究の被験者を30年後と40年後に集め、同じく最大酸素摂取量を計測した結果を見ると、40年後に計測した最大酸素摂取量は、20歳時に3週間臥床した直後の計測結果とほぼ同じであった(図2)。これらのことから、行動が制限された状況で、身心にどのような変化が起こるのかを知り、食生活を改善すること、機能性食材を摂取することや運動することで身体にどのような効果があるのかを、基礎的なことから学ぶカリキュラムが必要と考えた。さらに、これらをしっかり学んだ上で、宇宙で身心を健康な状態に維持するための方策を立てられるよう、いくつかの研究を遂行し、論理的思考ができる人材を育成すべきと考えた。

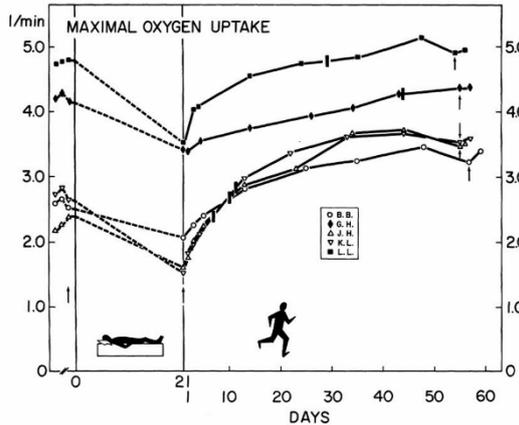


図1 3週間臥床とその後のトレーニングによる
体力(最大酸素摂取量)の変化
Saltin B, Circulation. 38(5 Suppl), VII1-78, 1968.

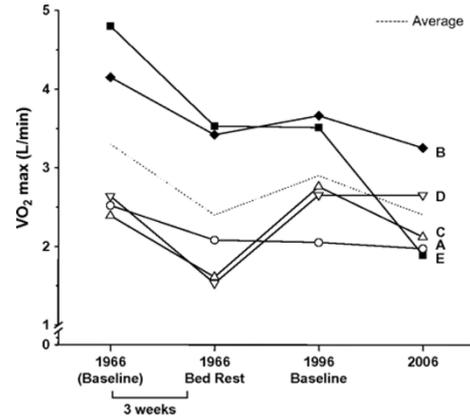


図2 3週間臥床直後と30年・40年後の
体力(最大酸素摂取量)の比較
McGavock LM, J Gerontol A Biol Sci 64A, 2693-299, 2009.

②カリキュラムの構築

これまでに記述した内容を踏まえた上で、カリキュラムに含まねばならない必須項目を、以下のようにまとめた。各2単位(90分の講義を15回)合計6単位の講義を行う予定である。

I. 「宇宙医学の基礎/宇宙栄養学/機能性食品学」

1. 有人宇宙開発の歴史と宇宙医学
2. 無重力環境下における身体応答
3. 宇宙環境における身体機能維持
4. 宇宙開発の展望
5. 宇宙栄養学の意義
6. 宇宙食開発の歴史/宇宙日本食とは
7. 宇宙飛行士の栄養/機能性宇宙食
8. スポーツ栄養
9. 高齢者の栄養
10. 宇宙農学の意義
11. 人類の食糧問題：食品ロスとSDGs
12. フードテクノロジー革命
13. 植物工場
14. ゲノム編集・組換え食品
15. 培養肉/昆虫食/代替肉

II. 「宇宙リハビリテーション医学/宇宙運動学」

- ・リハビリテーション医学・医療総論

 1. リハビリテーション医学・医療の意義
 2. リハビリテーション医学・医療の歴史
 3. わが国におけるリハビリテーション医学・医療の現状

・リハビリテーション医学・医療に必要な基礎医学

4. 臨床解剖
5. 循環・呼吸の臨床生理
6. 骨格筋の解剖と生理
7. リハビリテーション医学・医療に必要な運動学
8. 不動による合併症
 - ・宇宙空間で行うリハビリテーション診療
9. 診断のポイント、検査・評価法
10. 訓練の進め方・ポイント・リスク管理
11. 運動療法（筋力増強訓練と持久力訓練）
12. 作業療法
13. 電気刺激療法の基礎と実際
14. リハビリテーション診療と栄養管理
15. メンタルヘルスとその対応

III. 「災害栄養学など特殊環境の栄養学/宇宙食材の調理法」

1. 特殊環境の栄養学一般
2. 宇宙における栄養基準
3. 宇宙食と災害食の類似性
4. 災害時における栄養基準
5. 災害時における食・栄養の現状
6. 災害食開発の歴史
7. 日本災害食とは
8. 食品の保存・管理
9. 特殊環境での献立・調理・衛生
10. 栄養アセスメントのポイント
11. 宇宙における健康問題と栄養
12. 災害時等における健康問題と栄養
13. 要配慮者の栄養課題とおもいやり災害食
14. 災害時の食支援の実際
15. 遠隔地からの栄養支援・受援

③実習の内容

実習は、講義で得た知識を使って研究を遂行し、修士・博士課程における学位の取得に繋がっていかねばならない。そのために、実習に必要な物品を購入し、どのように使うか検討を重ね、1例として、有人宇宙飛行中の不動による変化の予防に関する研究をテーマとするプロトコルを考案した。このプロトコルで、重要な役割を果たす非観血的携帯型心拍出量モニター（AESCUONミニ、Osyka Medical社）と理学診療用器具低周波治療器（G-TES、株式会社ホームイオン研究所）を

備品として購入した。詳細は、7. その他各施設独自の取り組みについての2) 京都府立大学の項目を参照されたい。宇宙食や災害食に関する実習は、徳島大学や医薬基盤・健康・栄養研究所で行っている機能性宇宙食や災害食の開発現場に短期間参画することで実習とすることを考案した。また、実習は主に博士課程（大学院の後期課程）で行う予定であるが、徳島大学の場合、現在JAXAと実施予定の共同宇宙実験の地上模擬実験（JAXAまたは徳島大学で宇宙実験の予行演習を行う）に参加してもらう予定でJAXAと交渉している。リハビリテーション医学の実習に関しては、運動療法の実施現場を医学科のポリクリのような形式で見学してもらう予定である。災害食の開発に資する研究に対しては、過去の災害時に既に収集したデータを用い、その解析などを通じて災害栄養学の問題点をつかみ取る実習内容とし、災害栄養学の研究現場の模擬体験をしてもらう。

④運用方法（コンテンツの充実、教育システムの構築）

宇宙栄養学専門コースの設置のためには、②で示した講義コンテンツを充実していく必要がある。三施設の担当者より優れた知識・技術を有している国内の著名な先生を招聘し、特別講義を行ってもらった。実際、以下のような特別講義を実施し、宇宙栄養学専門コースの講義内容の充実を図った。

講師1：宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所学際科学研究系 教授 稲富 裕光

日時：令和4年2月16日（水） 16時00分～17時30分（1.5時間）

場所：オンライン

演題：国際宇宙探査時代における人類の活動圏拡大

講師2：東北大学大学院生命科学研究科 准教授 日出間 純

日時：令和4年3月11日（金） 16時00分～17時00分（1時間）

場所：徳島大学医学部基礎第一講義室とオンラインによるハイブリッド

演題：高紫外線・低重力環境が植物生育に及ぼす宇宙植物科学研究

講師3：東北大学大学院生命科学研究科 教授 東谷 篤志

日時：令和4年3月11日（金） 17時10分～18時10分（1時間）

場所：徳島大学医学部基礎第一講義室とオンラインによるハイブリッド

演題：モデル生物線虫Cエレガンスを用いた宇宙から加齢研究

三施設に分かれて大学院生が在籍するため、講義システムはWeb方式（Moodle）を利用する。令和3年度は、株式会社メディアアトリエに委託して、システムの基本構造を作成した。このシステムは多くの大学で用いられており、講義の映像配信はもちろんのこと、レポートの採点、学生と教員のコミュニケーションも容易にできる優れた教務システムである。次年度より内容を充実（上記の内容の講義をアップロード）していく予定である。

4. 大学院連携協定締結の準備について

3施設における教育・研究の連携をスムーズに進めるために、3施設共通の大学院連携協定が結ばれるよう協議を開始しなければならない。本事業が正式に採択されたあと、徳島大学、京都府立医科大学および医療基盤・健康・栄養研究所の事務担当者と協議を開始し、2022年2月に、三者間で包括協定と大学院連携協定を進めることについて確認をとり、令和3年年度末には、包括協定案と大学院連携協定案を考案した。現在その批准にむけて、各施設で事務的な手続きを進めているところである。

5. 新規大学院コースの設置申請の準備について

本事業の計画書に「医療基盤・健康・栄養研、京都府立医科大学、徳島大学の三者による大学院連携協定の締結し、既存の学位との調整を図りながら、新規コース（宇宙管理栄養士コース/宇宙理学療法士コース）を徳島大学、京都府立医科大学に設置申請を行う。」としている。

そこで、徳島大学では、京都府立医科大学並びに医療基盤・健康・栄養研のスタッフが本プロジェクトによる新設コースの大学院生の教育・研究の指導を円滑に行えるように、医科栄養学研究科内に宇宙栄養管理栄養士コース（仮称）を設置し、京都府立医科大学の三上靖夫氏および、医療基盤・健康・栄養研の笠岡（坪山）宜代氏を客員教授として招聘する準備を進めた。

一方、京都府立医科大学は、前段階として令和4年度の本学大学院履修概要に宇宙医学を学ぶことをカリキュラムの中に取り入れた。その内容の一部を表2として示す。うまく運用できることが確認出来たら、このカリキュラムの一部を令和5年度に設ける新規大学院のコースに繋げていくことを予定している。また、京都府立医科大学においても、徳島大学の二川 健氏、および医療基盤・健康・栄養研の笠岡（坪山）宜代氏を客員教授として招聘することが決定された。

表2 京都府立医大学大学院博士課程統合医科学専攻（総合コース）のシラバス内容（抜粋）
機能制御・再生医学分野〔リハビリテーション医学〕

担当教員	教授 三上 靖夫	講師 大橋 鈴世
		講師 河崎 敬
講義の目的		
超高齢社会を迎え、平均寿命と健康寿命の差を縮めるために、リハビリテーション医学・医療の重要性が高まりつつある。リハビリテーション医学は、運動器障害、脳血管障害、循環器や呼吸器などの内部障害、摂食嚥下障害など多岐に渡る障害を診る医学であるが、新しい理論、新しい技術が取り入れられ、日進月歩の分野である。講義を通してリハビリテーション医学を正しく理解することを目的とする。		
到達目標		
1. 宇宙環境で生じる体内の変化を学び、近い環境である安静臥床がもたらす弊害を説明できる。 2. 脊髄損傷や脳卒中など、中枢神経の障害に対する生体物理刺激療法を用いたリハビリテーション治療について説明できる。		
講義の内容（計画）		

【講義A】（1年次）

リハビリテーション医学・医療が対象とする「活動」について理解を深め、活動を賦活化していくために取り組むべき「運動学習」に関する講義を行う。活動が低下する安静臥床状態や宇宙空間で生じる問題についても学ぶ。広いリハビリテーション医学の分野をできるだけカバーして講義を行う。注目を浴びているフレイルやサルコペニアについての最新情報についても講義を行う。

※ この講義の一部の内容を、本事業でのプログラムに充て、動画を作成してアップロードして予定である。

新規大学院コースの始動は令和5年4月を目指している。多くの大学院生にこのコースを選択してもらうためには、広報が非常に重要であり、株式会社メディアアトリエに委託して図3のようなHPを構築した。先述のプログラム内容などすべてをこのHPで公開する予定である。

図3 本プロジェクトのHPの1ページ目



6. 宇宙専門管理栄養士/宇宙専門理学療法士の認定制度の施行申請について

1) 宇宙専門管理栄養士（仮称）の認定制度について

本事業が正式に採択されたあと、公益財団法人 日本栄養・食糧学会[会長 加藤久典（東京大学教授）]と断続的に会談し、3月19日（土）の令和3年度第6回理事会にて宇宙食専門認定制度検討委員会の設置が認められた。その委員会設置申請書を表3に示す。

表3 宇宙食専門認定制度検討委員会 設置申請書

委員会設置申請書		
		2022年 3月 7日
社団法人日本栄養・食糧学会 会長 殿		
(1)申請者氏名(代表)	二川 健	
所属機関名称	徳島大学 大学院医歯薬学研究部/宇宙栄養研究センター	
職位	教授/センター長	
所在地	徳島市蔵本町3-18-15	
電話番号	088-633-9248	
ファックス番号	088-633-7086	
E-mail	nikawa@tokushima-u.ac.jp	
(2)検討会の名称	宇宙食専門認定制度検討委員会	
(3)目的	人類の宇宙への生存圏拡大に食や食糧において貢献しうる人材を育成するための認定制度を設立する。	
(4)任務	宇宙栄養学や宇宙農学の専門性を担保するための、講義や実習の科目、単位数や審査方法などに関する規則や組織を決める。	
(5)委員会の構成	氏名	所属
委員長	二川 健	徳島大学
副委員長	松井 利郎	九州大学
委員	三浦 豊 笠岡(坪山) 宣代 三上 靖夫 瀬川 博子	東京農工大学 医療基盤・健康・栄養研究所 京都府立医科大学 徳島大学
(6)年度別検討事項の概要	令和4年度:認定制度の規約、組織を決める。 令和5年度:認定制度の細則、実施方法を決める。 令和6年度:実施	
(7)年度別予算	令和4年度:20万円(会議や関係機関への交渉のための旅費など) 令和5年度:20万円(会議や関係機関への交渉のための旅費など) 不足分は、文科省宇宙航空科学技術推進委託費より拠出予定	
(8)検討期間	令和4年4月から令和6年3月の2年間	
(9)その他	代表理事の吉田博先生にオブザーバーをお願いしたいと存じます。	

2) 宇宙専門理学療法士（仮称）の認定制度について

上記の認定制度の施行に関し、宇宙医学を専門とする療法士の認定制度を、一般社団法人 日本リハビリテーション医学教育推進機構において策定する方針とした。本機構は、リハビリテーション関連の教育を充実させることを目的に、2018年に設立され、さまざまな学会が社員団体として参画している。すでにテキストの発刊や研修会の開催など積極的に活動している。本機構の主な取り組みに、リハビリテーション専門職の教育・認定があげられている。京都府立医科大学の三上靖夫氏は、本機構および研修委員会の委員長を務めており、2022年3月8日（火）に開催された理事会において、宇宙における健康管理の研究成果をリハビリテーション医療へ活用するための認定研修会・認定制度構築を検討していくことを提案し、理事会としての承認を受けた。今後、

そのプランを提示し、認定制度の確立を行うこととなった。本機構のホームページの記されている概要と、取り組みを図4に示す。

図4 日本リハビリテーション医学教育推進機構ホームページ (<https://jrme.or.jp/>)

日本リハビリテーション医学教育推進機構について

6つの主要な取り組み

- 1

リハビリテーション医学・医療教育における教材作成

テキスト作成

e-learning配信

市民向けの教育活動
- 2

リハビリテーション医学・医療教育に関する研修会開催

リハビリテーション科医向けの研修会開催

関連専門職向けの研修会開催
- 3

リハビリテーション専門職の教育・認定

総合力のある専門職の教育と認定
- 4

リハビリテーション医学・医療の質向上に対する研究・開発

先端医療・機器・装具等の開発

AI

創薬

その他
- 5

リハビリテーション医学に関連する学術団体の運営支援
- 6

学術倫理の支援

社員団体

(2021年12月現在)

社員団体名	社員代表者	社員団体 役職
日本リハビリテーション医学会	久保 俊一	理事長
日本急性期リハビリテーション医学会	田島 文博	理事長
日本回復期リハビリテーション医学会	才藤 栄一	理事長
日本生活期リハビリテーション医学会	水間 正澄	代表理事
日本義肢装具学会	坂井 一浩	理事長
日本脊髄障害医学会	島田 洋一	理事長
日本集中治療医学会	西田 修	理事長
日本股関節学会	杉山 肇	理事長
日本在宅医療連合学会	石垣 泰則	代表理事
日本耳鼻咽喉科頭頸部外科学会	村上 信五	理事長
日本骨髄間葉系幹細胞治療学会	本望 修	代表理事
日本ステイミュレーションセラピー学会	安保 雅博	理事長
京都リハビリテーション医学会	三上 靖夫	副理事長
日本CAOS研究会	菅野 伸彦	会長
日本リウマチリハビリテーション研究会	佐浦 隆一	代表世話人
日本骨転移研究会	酒井 良忠	幹事
日本慢性期医療協会	武久 洋三	会長
日本リハビリテーション病院・施設協会	斉藤 正身	会長
回復期リハビリテーション病棟協会	三橋 尚志	会長
慢性期リハビリテーション協会	橋本 康子	会長
地域包括ケア病棟協会	仲井 培雄	会長
全国老人保健施設協会	東 憲太郎	会長
日本理学療法士協会	斉藤 秀之	会長
日本作業療法士協会	中村 春基	会長
日本言語聴覚士協会	深浦 順一	会長
日本義肢装具士協会	野坂 利也	会長

※青字の 団体名は各団体のホームページへリンクしています。

社会への貢献

寛容社会 (Inclusive Society) の実現

障害のある人も、障害のない人も、大人も、子供も、いろいろな社会的立場の人が心を聞き合い安心して生活できる「寛容」な社会の実現にリハビリテーション医学・医療が貢献します。

7. 各機関における講義/実習プログラムの開発におけるさらなる取り組みについて

1) 徳島大学

I. 機能性宇宙食を開発する意義について

【はじめに】

21世紀は宇宙大航海時代と呼ばれており、有人宇宙探査計画が目白押しである。しかしながら、宇宙環境に最適な食事形態はまだ見出されていない。寝たきりや宇宙フライトなど、筋に力学的負荷がかからない状態が継続することにより生じる骨格筋の萎縮は廃用性筋萎縮と呼ばれ、急激な筋萎縮が起こることで運動機能が著しく障害される¹。廃用性筋萎縮のメカニズムの解明やその予防法・治療法について研究が行われているが、未だ不明な点が多い。これまでの研究では、酸化ストレスとそれにより誘導されるタンパク質のユビキチン化が骨格筋タンパク質の分解を引き起こすことが明らかにされている。そこで、我々は廃用性筋萎縮のカギとなる酸化ストレスとユビキチン化に焦点を当て、抗酸化作用を持つポリフェノールや大豆たんぱく質の機能性について明らかにした。それらを利用することにより、宇宙飛行士の安全・安心な宇宙活動を支えていきたい。

【廃用性筋萎縮とは】

平均寿命と健康寿命の間には乖離があり、高齢者が寝たきりとなることがある。高齢者でなくても、疾病や外傷の急性期に長期間のベッド上安静が強いられることがある。このような不動の状態では全身に様々な機能障害（廃用性症候群）が生じ、中でも廃用性筋萎縮は運動機能を著しく低下させる。運動機能の低下には、筋タンパク質の減少が原因と考えられている。通常の力学的負荷がかかる状態にある筋は絶えず合成と分解を繰り返し、そのバランスが保たれることで一定の筋量が維持されている。しかし、不動の初期段階では筋タンパク質の合成低下、分解亢進のため骨格筋は急速に萎縮する。筋タンパク質の減少には、筋タンパク質分解系のリソソーム系、カルシウム-カルパイン系、ユビキチン-プロテアソーム系が関与している。これまでに、骨格筋では筋特異的ユビキチンリガーゼが恒常的に活性化していることが報告されており、ユビキチン-プロテアソーム系による筋タンパク質の分解メカニズムが重要視されている²。

加齢に伴い運動量が減少するため、高齢者では特に廃用性筋萎縮を生じやすいと報告されている³。筋萎縮の原因に加齢が含まれることから、廃用性筋萎縮はサルコペニアと同一視されることが多い。しかし、サルコペニアは運動や食事などの環境因子、生活習慣病などの疾患といった複数の原因が複雑に関わっており、比較的長期間でゆっくりと進行する慢性的な病態である。さらに、骨格筋の線維化や脂肪化が進み、再生能が低下するため、筋繊維自体の数が減少することが廃用性筋萎縮と異なる点である⁴。両者ともに加齢による筋萎縮という点では共通であり、有人宇宙開発が進み、超高齢社会を迎えた今、メカニズムの解明に向けて研究が進められている。

【廃用性筋萎縮の機序】

①活性酸素種（ROS）の蓄積による酸化ストレス

生体内では、ミトコンドリアによるエネルギー産生のため、活性酸素種（Reactive oxygen species; ROS）が絶えず発生している。ミトコンドリアは、発生したROSを処理して無毒化させることができ、体内で適度な量が保たれている。ROSは免疫系にも利用されているため、適度な量が維持されていることが生体にとって有益である。しかしその一方で、ミトコンドリアに機能障害が生じた場合、ROSの処理がうまくできなくなり、過剰なROSが生体内に蓄積し、細胞障害を与える。このように、ROSが生体内で過剰になり、酸化的障害を及ぼしている状態を酸化ストレスという。これまでの研究では、酸化ストレスが筋タンパク質分解経路の制御因子であることが明らかにされている。また、無重力や加齢に伴い、ROSの産生が増加することも報告されており、宇宙飛行士や高齢者は酸化ストレスによる筋萎縮を引き起こしやすい⁵。

②Cbl-bによるIGF-1シグナルの抑制

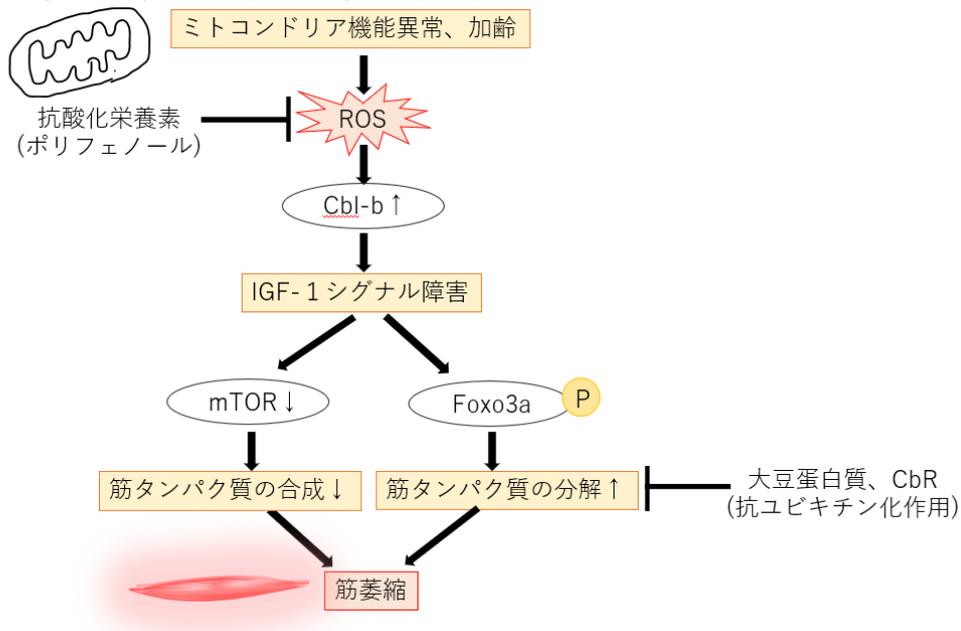
酸化ストレスの原因となるROSの蓄積は、ERKのリン酸化を介して、Egr-1, 2のmRNAおよびタンパク質の発現上昇を引き起こす。その後、Egr-1, 2は、ユビキチンリガーゼCasitas B-lineage lymphoma-b (Cbl-b)の発現を誘導する。Cbl-bは、中央部にユビキチンリガーゼの機能を

特徴とする RING フィンガードメインを、N 末端にはリン酸化したチロシンとの結合ドメインを有する。骨格筋のタンパク質分解にはユビキチン-プロテアソーム系タンパク質分解経路が重要視されており、Cbl-b もそのひとつであることが明らかになっている。

IGF-1 シグナルにおいて IRS-1 はシグナル伝達の中間体として機能している。Cbl-b は、IRS-1 をユビキチン化することにより IRS-1 タンパク質の分解を誘導し、IGF-1 シグナルを障害する。IGF-1 シグナルの障害は mTOR 活性を低下させ、筋タンパク質の合成を抑制する。さらに、FOXO 依存的に MAFbx/atrogenin-1 などの筋萎縮関連遺伝子の転写を引き起こし、筋タンパク質の分解を促進することで、筋萎縮を誘発する⁶(図 5)。

以上より、廃用性筋萎縮には、ROS による酸化ストレスと、その下流因子であるユビキチンリガーゼが大きく関わっていることが分かった。酸化ストレスと、それにより誘導されるユビキチンリガーゼを阻害することが廃用性筋萎縮の予防につながると考えられる。

図 5 筋萎縮を抑制する機能性食品の作用機序



【グルココルチコイドによる骨格筋の筋萎縮】

廃用性筋萎縮とは異なるが、同一の経路を介して引き起こされる筋萎縮にグルココルチコイドによる骨格筋の萎縮があげられる。グルココルチコイドは副腎皮質から分泌されるホルモンの1つであり、糖質やタンパク質、脂質などの代謝や免疫反応、ストレス応答の制御に関わる。デキサメタゾン(Dex)は、長時間作用型の合成グルココルチコイドであり、炎症性疾患の治療薬として最もよく使われる。しかし、副作用として筋タンパク質の分解を促進、合成を抑制することで骨格筋の萎縮を誘発することが分かっている⁷。Dex が筋萎縮を引き起こす過程では、グルココルチコイド受容体 (GR)が古典的な標的である Krüppel-like factor 15 (KLF15)を誘導する経路と、非古典的な NADPH オキシダーゼ (NOX) の発現を介した ROS 産生による 2つの経路がある。

KLF15 はジンクフィンガー転写因子ファミリーのひとつであり、BCAA (分岐鎖アミノ酸) を分解する酵素の発現を増加させることで、細胞内の BCAA の異化を促進する。BCAA は骨格筋の同化経路である mTOR を活性化することから、KLF15 は mTOR 活性を抑制する因子であると報告されている。さらに、KLF15 は FOXO を介して E3 ユビキチンリガーゼである MAFbx1/atrogenin-1 および MuRF-1 発現量を直接的に増加させ、骨格筋の異化調節因子として作用する⁸。つまり、KLF15 の発現に伴い mTOR を介した筋タンパク質の同化抑制と、ユビキチンプロテアソーム依存性の筋タンパク質の分解が誘導される。

ROS 産生の経路は、GR が NADPH オキシダーゼ (NOX) mRNA の発現を増加させることが原因となる。NOX は、NADPH を電子供与体として、O₂ への電子伝達を触媒することにより ROS を産生することが明らかにされている⁹。NOX により過剰な ROS 産生が引き起こされること

で、廃用性筋萎縮と同様に ROS を介した Cbl-b 発現誘導、IGF-1 シグナルの抑制による筋タンパク質の減少が引き起こされると示唆される。

以上より、廃用性筋萎縮だけでなく、グルココルチコイドによる骨格筋の萎縮の予防法としても、ROS の過剰な産生を抑制する方法、および、ユビキチンリガーゼの阻害法が有効であると示唆された。我々は、筋萎縮の予防を目的として、抗酸化栄養素のポリフェノール、ユビキチンリガーゼ Cbl-b の阻害食材である大豆タンパク質について着目した。

【廃用性筋萎縮の予防法】

①抗酸化栄養素の役割

(i) ケルセチンの ROS 抑制効果

ポリフェノールは、野菜に含まれる天然化合物で、高い抗酸化活性、核酸や酵素と相互作用する構造的な柔軟性を持っている。ポリフェノールは、ユビキチンリガーゼ MAFbx1/atrogin-1 や MuRF-1 などの筋萎縮関連タンパク質を減少することで、Dex 誘発性の筋萎縮を効果的に抑制することが多くの研究で明らかにされている^{10,11,12}。ケルセチンは、タマネギやブロッコリーなどの身近な野菜に豊富に含まれているポリフェノールであり、ラジカルを補足することにより ROS を処理することができる。そこで、我々はケルセチンによる廃用性筋萎縮の抑制効果を評価するために、1 日間あるいは 14 日間のケルセチン摂取を行なった C57BL/6J マウスに坐骨神経切除により筋萎縮を誘導し、坐骨神経切除後 4 日目に筋湿重量および筋繊維径を測定した。その結果、14 日間のケルセチン摂取を行なった群でのみ筋萎縮の抑制が見られた。この結果から、ケルセチンが廃用性筋萎縮を抑制するためには、ある一定量のケルセチンが標的骨格筋に蓄積することが必要であることを明らかにした。また、坐骨神経切除マウスのミトコンドリアを標的として、食事性ケルセチンがミトコンドリアの生合成の低下を予防することも分かった¹³。以上のことより、ケルセチンの摂取はミトコンドリアの機能低下による ROS の増大を抑制することで、廃用性筋萎縮を抑制すると考えられる。

(ii) モリン

モリンはケルセチンの構造異性体で、黄色の色素を持つバイオフィラボノイドである。しかし、骨格筋に対するモリンの影響についての報告は少ない。そこで、我々は骨格筋萎縮に対するモリンの効果を評価するために、マウス C2C12 筋管細胞を Dex で処理し、モリン投与群、非投与群において筋萎縮関連分子、筋管径、ROS 産生量を測定した。その結果、モリンが C2C12 筋管細胞における Dex 誘発性の ROS の蓄積を有意に抑制した。また、Dex による筋管径の萎縮や、筋萎縮に関連するユビキチンリガーゼである MAFbx1/atrogin-1、MuRF-1、Cbl-b の発現を効果的に抑制した。

IGF-1 シグナルの下流分子である Foxo3a のリン酸化が増加すると、Foxo3a は核外に移行し転写能を失うため、筋萎縮関連ユビキチンリガーゼの発現が減少する¹⁴。このことから、モリンによる筋萎縮関連ユビキチンリガーゼの発現抑制が IGF-1 シグナルを介しているかどうかを明らかにするため、モリンの存在下または非存在下で Dex 処理した C2C12 筋管細胞における Foxo3a のリン酸化を調べた。その結果、モリン非存在下では C2C12 筋管細胞における Foxo3a の総発現量を増加させたが、リン酸化された Foxo3a のレベルを有意に低下させた。興味深いことに、モリン存在下では逆の結果が生じ、Foxo3a 総量の低下とリン酸化 Foxo3a 量の増加を示した。これにより、モリンは Foxo3a のリン酸化を促進し、筋萎縮関連ユビキチンリガーゼの発現抑制を行っていることが分かった¹⁵。以上の結果から、モリンは ROS を軽減することで、筋タンパク質のユビキチン化の抑制を行っており、筋萎縮を効果的に予防することが示唆された。

(iii) プレニル化ポリフェノール

プレニルフラボノイドの一種である 8-プレニルナリンゲニン(8-PN)はビールの原料となるホップの含有成分であり、健康維持・増進効果に関与する食品因子として期待されている。そこで我々は 8-PN の筋萎縮抑制効果を検討した。8-PN を 18 日間与えた C57BL6/J マウスに、坐骨神経切除による廃用性筋萎縮を誘導したところ、骨格筋の重量低下が抑制された。また、8-PN 投与群では、AKT のリン酸化が活性化しており、筋タンパク質分解に関与する MAFbx1/atrogin-1 の発現は減少を示した。このことから、8-PN はユビキチン-プロテアソーム系の抑制を介して骨格筋タンパク質分解を抑えたことが明らかとなった。

次に、プレニル化の生理機能を調べるために、C57BL6/J マウスに 8-PN、あるいはナリンゲニ

ンの混合飼料を与え、廃用性筋萎縮の抑制効果を評価した。その結果、8-PN 投与群では骨格筋の萎縮が抑制されたが、ナリングニン投与群では効果が見られなかった。このことから、プレニル基を導入することで骨格筋での生理機能が向上することが明らかとなった¹⁶。また、8-PN の体内動態を解析すると、8-PN はナリングニンよりも消化管から吸収されにくいいため、長期間の摂食により骨格筋に対してナリングニンを上回る高濃度で蓄積されることが分かった。以上の結果より、プレニル化したポリフェノールを豊富に含む食材は習慣的に摂取することで、より強い機能性を発揮できると示唆された。

②Cbl-b を阻害する栄養素

(i) Cblin ペプチドの発見

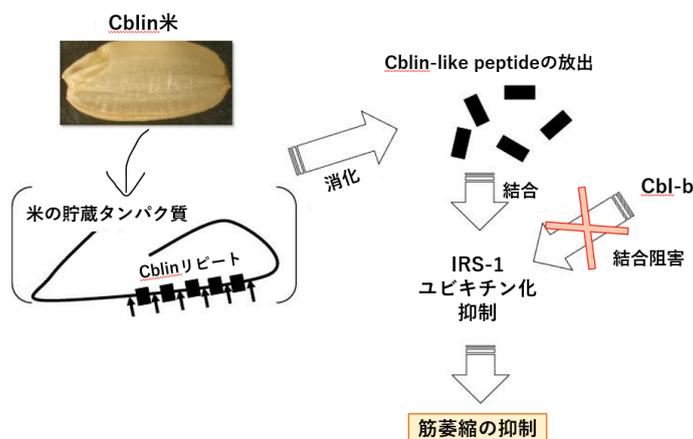
廃用性筋萎縮で発現が増大するユビキチンリガーゼ Cbl-b は、IRS-1 のユビキチン化と分解を促進することにより、IGF-1 シグナルを負に制御する。そのため、筋タンパク質の合成障害による筋萎縮の抑制には、Cbl-b のユビキチン化活性を阻害することが有効であると考えられる。一般に、ユビキチンリガーゼは基質タンパク質における特定のペプチドの立体構造を認識して結合する。Cbl-b は、基質タンパク質のリン酸化されたチロシンを認識して結合する。そのため、IGF-1 シグナル伝達に伴って引き起こされる IRS-1 のチロシンリン酸化部位を中心にペプチドを人工合成し、このペプチドを Cbl-b の阻害剤という意味合いで”Cblin”(Cbl-b inhibitor)と名付けた。この Cblin ペプチドは、IRS-1 の強いユビキチン化阻害作用があり、坐骨神経切除やグルココルチコイドホルモンによる筋萎縮の抑制に有効である。

(ii) Cblin-rich rice (CbR) の筋萎縮抑制作用

我々は抗筋萎縮作用を持つ食品を作るために、Cblin ペプチドを豊富に含むトランスジェニック Cblin 高発現米(CbR :Cblin peptide-enriched rice)を作製した(図6)。これは、イネのグルテリン遺伝子に、キモトリプシン消化によって生成される 15 個の Gln-Asp-Gly-Tyr-Met-Pro-Trp(Cblin-like peptide)リピートをコードする DNA 断片を挿入したもので、Cblin ペプチドを豊富に含ませることに成功した。さらに、胃でのキモトリプシンの認識と消化のために Gln と Trp を挿入し、挿入したペプチド配列の発現と放出の効率を高めた¹⁷。この CbR 摂食群では、野生型イネ摂食群と比較して、除神経により誘発されたカエルの脚骨格筋の萎縮を有意に抑制できたことを報告している。しかし、Cblin ペプチドがマウスにおいて吸収されるかどうかは明らかにされていない。そこで、我々は Asp-Gly-Tyr-Met-Pro が腸で吸収されるか、さらに、CbR がマウスの筋萎縮を抑制するかを調べた。まず、CbR における 15 個の Cblin ペプチドリピートの消化性を評価した。その結果、経口摂取された CbR に含まれる Cblin ペプチドが上皮細胞からタイトジャンクションを経由してマウスの血液中を循環することを明らかにした¹⁸(in press)。

図6 CbR の構造と作用機序

Akama, K. et al. Biosci Biotechnol Biochem. 85, 1415-1421. (2021) 一部改変



次に、坐骨神経切除を行ったマウスを用いて、CbR の経口摂取による抗筋萎縮効果を評価した。その結果、CbR 摂取群では、坐骨神経切除による筋萎縮を抑制することが明らかとなった。さらに、CbR 摂取群では坐骨神経切除を行っても、IRS-1 およびその下流で制御される筋萎縮関連遺伝子である MAFbx1/atrogen-1 や MuRF-1 遺伝子発現量が抑制されていた。

この結果より、Cblin ペプチドが、その代謝物と相乗的に作用して、マウスの筋萎縮を抑制することを示した。以上のことから、CbR を含んだ標準的な食事は、ヒトの筋萎縮を予防し、治癒させるための代替的なアプローチになる可能性が示唆された。

(iii) 大豆タンパク質

大豆タンパク質やその由来のペプチドは、運動後の筋損傷の緩和やたんぱく質合成の促進に有効である。我々は、大豆タンパク質を含む食事が、カルシウム-カルパイン系を介したタンパク質分解を抑制することで、運動による骨格筋のタンパク質分解を防ぐことを明らかにした¹⁹。食事で摂取した大豆タンパク質は、骨格筋のタンパク質ターンオーバーに影響を与える。しかし、廃用性筋萎縮に対する大豆タンパク質の影響については明らかにされていない。そこで、我々はCblin ペプチドと類似配列を持つ大豆タンパク質の一種であるグリシニンに着目し、グリシニンが坐骨神経切除による筋萎縮を抑制するかどうかを調べた。その結果、グリシニン食投与群では、グリシニン含有量に比例して、全脛骨筋の湿重量および横断面積が増大した。また、グリシニン食は全脛骨筋内の IRS-1 のユビキチン化を抑制し、その量を増大させた上、IRS-1 の下流シグナル分子である AKT も活性化した²⁰。この結果から、グリシニンは、廃用性筋萎縮を抑制することが示唆された。

さらに、ヒトを対象とした食事介入試験においても同様の結果が得られた。この実験では、寝たきり傾向にある患者に1ヶ月間、1日あたり約8グラムの大豆タンパク質を摂取させた。その結果、大豆タンパク質を摂取した寝たきり傾向の患者は、摂取前と比べ筋力が有意に上昇した。このことから、大豆タンパク質は、寝たきり患者の筋力減少の抑制にも有効であることが分かった²¹。

【おわりに】

本稿では、ROS の蓄積やユビキチン化を介した廃用性筋萎縮の作用機序、予防法について概論した。我々の最新の研究から、筋萎縮を抑制する新しい抗酸化物質としてケルセチン構造異性体であるモリンの ROS 軽減作用が明らかになった。また、CbR の開発により、筋萎縮抑制作用のある食材を新たに作る事ができた。このように、特定の栄養素や食材が筋萎縮抑制作用を示すという研究結果も蓄積されつつある。今回紹介したプレニル化ポリフェノールを多く含む食材や大豆タンパク質を組み合わせることで、さらなる効果が現れる可能性がある。すでに効果を実証された物質についても検討を続け、廃用性筋萎縮を予防する新たな食品への実用化にも貢献することで、21 世紀の有人宇宙開発や超高齢社会に挑んでいきたい。

参考文献

1. Tischler, M. E. *et al.* Different mechanisms of increased proteolysis in atrophy induced by denervation or unweighting of rat soleus muscle. *Metabolism* **39**, 756–763 (1990).
2. Ikemoto, M. *et al.* Space shuttle flight (STS-90) enhances degradation of rat myosin heavy chain in association with activation of ubiquitin-proteasome pathway. *FASEB J.* (2001) doi:10.1096/fj.00-0629fje.
3. Wall, B. T., Dirks, M. L. & Van Loon, L. J. C. Skeletal muscle atrophy during short-term disuse: Implications for age-related sarcopenia. *Ageing Research Reviews* vol. 12 898–906 (2013).
4. Brack, A. S. *et al.* Increased Wnt Signaling During Aging Alters Muscle Stem Cell Fate and Increases Fibrosis. *Science (80-.)*. **317**, 807–810 (2007).
5. B, C. *et al.* Mitochondrial function and apoptotic susceptibility in aging skeletal muscle. *Aging Cell* **7**, 2–12 (2008).
6. Nakao, R. *et al.* Ubiquitin Ligase Cbl-b Is a Negative Regulator for Insulin-Like Growth Factor 1 Signaling during Muscle Atrophy Caused by Unloading. *Mol. Cell. Biol.* **29**, 4798 (2009).

7. Shimizu, N. *et al.* Crosstalk between Glucocorticoid Receptor and Nutritional Sensor mTOR in Skeletal Muscle. *Cell Metab.* **13**, 170–182 (2011).
8. Schakman, O., Kalista, S., Barbé, C., Loumaye, A. & Thissen, J. P. Glucocorticoid-induced skeletal muscle atrophy. *Int. J. Biochem. Cell Biol.* **45**, 2163–2172 (2013).
9. Espinoza, M. B. *et al.* Cortisol Induces Reactive Oxygen Species Through a Membrane Glucocorticoid Receptor in Rainbow Trout Myotubes. *J. Cell. Biochem.* **118**, 718–725 (2017).
10. Otsuka, Y. *et al.* Quercetin glycosides prevent dexamethasone-induced muscle atrophy in mice. *Biochem. Biophys. Reports* **18**, 100618 (2019).
11. Yoshioka, Y., Kubota, Y., Samukawa, Y., Yamashita, Y. & Ashida, H. Glabridin inhibits dexamethasone-induced muscle atrophy. *Arch. Biochem. Biophys.* **664**, 157–166 (2019).
12. Alamdari, N. *et al.* Resveratrol prevents dexamethasone-induced expression of the muscle atrophy-related ubiquitin ligases atrogin-1 and MuRF1 in cultured myotubes through a SIRT1-dependent mechanism. *Biochem. Biophys. Res. Commun.* **417**, 528–533 (2012).
13. Mukai, R. *et al.* Preventive effect of dietary quercetin on disuse muscle atrophy by targeting mitochondria in denervated mice. *J. Nutr. Biochem.* **31**, 67–76 (2016).
14. Hirasaka, K. mitogen-activated protein kinaseMAPK 2. 筋萎縮に關与するユビキチンリガーゼの特徴. 日本栄養・食糧学会誌 **67**, 291–297 (2014).
15. Ulla, A. *et al.* Morin attenuates dexamethasone-mediated oxidative stress and atrophy in mouse C2C12 skeletal myotubes. *Arch. Biochem. Biophys.* **704**, 108873 (2021).
16. Mukai, R. *et al.* Prevention of Disuse Muscle Atrophy by Dietary Ingestion of 8-Prenylnaringenin in Denervated Mice. *PLoS One* **7**, (2012).
17. Akama, K. *et al.* Functional rice with tandemly repeated Cbl-b ubiquitin ligase inhibitory pentapeptide prevents denervation-induced muscle atrophy in vivo. *Biosci. Biotechnol. Biochem.* **85**, 1415–1421 (2021).
18. Nakao, R. Oral intake of transgenic rice containing ubiquitin ligase inhibitory Cblin pentapeptide prevents atrophy in denervated skeletal muscle of mice. *NPJ Sci. food* (2021) doi:10.18356/70f31899-ru.
19. Nikawa, T. *et al.* Effects of a soy protein diet on exercise-induced muscle protein catabolism in rats. *Nutrition* **18**, 490–495 (2002).
20. Abe, T. *et al.* Soy Glycinin Contains a Functional Inhibitory Sequence against Muscle-Atrophy-Associated Ubiquitin Ligase Cbl-b. *Int. J. Endocrinol.* **2013**, 11 (2013).
21. Hashimoto, R. *et al.* Effects of dietary soy protein on skeletal muscle volume and strength in humans with various physical activities. *J. Med. Investig.* **62**, 177–183 (2015).

2) 京都府立医科大学

1. 人材育成のための実習内容例（博士課程の研究内容例）：有人宇宙飛行中の不動による変化の予防に関する研究（ベルト電極式骨格筋電気刺激を併用したハイブリット運動の開発）

【はじめに】

国際宇宙ステーション（International Space Station: ISS）の建設など宇宙開発が発展し、ヒトの長期滞在が可能となってきた。しかしながらISSの微小重力環境下では、力学的負荷などの減少により、骨格筋量の減少のみならず、呼吸・循環および自律神経活動などが著明に低下し、帰還後の社会生活復帰は容易ではない。予防には筋力増強訓練や有酸素運動が有効であり、実際にISSでは週6回、1日あたり2.5時間程度の運動が行われている。一方で、宇宙飛行士は限られた時間で多忙な業務を遂行する必要があるため、運動の効率化が期待されている。宇宙大航海時代に向けて、より短時間で高い効果が得られる運動プロトコルの開発が必要である。

運動の効率化を求める1案として、電気刺激療法（Electrical muscle stimulation: EMS）を併用したハイブリットトレーニングがある。具体的には、拮抗筋へのEMSにより随意運動に対するトルクを増加させ、抵抗運動を行うことで骨格筋量の減少を予防する方法が報告されている。しかし、従来のEMSは、単一の筋に刺激部位が限局することや、電気刺激の出力を高めていくと皮膚表面に疼痛が生じるため、十分な筋収縮を得られないといった問題が存在する。本研究で用いるベルト電極式骨格筋電気刺激（Belt electrode Skeletal muscle Electrical Stimulation: B-SES, 図71）は、腰部、大腿部、足部にベルト状の電極を装着し電気を筒状に流すことで、下肢全体の筋収縮が可能である。また電極面積が大きく、1か所あたりの電位分布が分散でき、皮膚表面への疼痛を抑えながら従来のEMS以上に筋収縮が誘発できる。さらに総骨格筋量の約70%を占める下肢全体など広範囲の筋収縮が誘発できることから、筋ポンプ作用が促進され、運動中の循環血液量が増加する。すなわちB-SESを併用することは同強度・容量の運動であっても、骨格筋量の減少に対する高い予防効果のみならず、呼吸・循環および自律神経への負荷が増加することが予測され、より効率的な運動プロトコルへの発展が期待できる。

本研究では、有人宇宙飛行中の不動による変化（廃用性変化）に対する効率的な予防方法を運動の側面から新たに開発することを目的とし、B-SESを併用したハイブリットトレーニングが呼吸・循環および自律神経活動におよぼす影響を明らかにする。



図7：B-SES

【方法】対象は健常成人を登録する。除外基準は先天性心疾患を有する者や自律神経作動薬を内服中の者とする。また呼吸・循環活動への影響を最小限にするため、対象には実験の1週間よりスポーツを行わないように指示する。運動種目は1) 上肢用エルゴメータ（AE3-70、昭和電気株式会社）、2) 自転車エルゴメータ（V77i、セノー株式会社）を用いた有酸素運動とする。1)および2)の運動条件は、負荷量をKarvonen法（運動強度：60-80%）より目標心拍数を算出し範囲内に設定、リズムを120bpm、時間を実際にISSで行われている有酸素運動の実施時間およびB-SESの先行研究を参考に20分とする。B-SESは理学診療用器具低周波治療器（G-TES、株式会社ホームアイオ

ン研究所)を用いる。刺激条件は、周波数4Hz、パルス幅250 μ s、刺激電流を運動遂行が可能な最大許容閾値とする。計測は1)および1)とB-SESを併用、2)および2)とB-SESを併用する場合の計4条件で行う(図8)。なお計測はそれぞれ5分間の安静ののち開始する。

【検討・評価方法】

臨床変数は呼吸活動(酸素摂取量、換気量、呼吸数)、循環活動(心拍数、心拍出量、一回拍出量、心係数、酵素化ヘモグロビン、脱酵素化ヘモグロビン)、自律神経活動(交感神経活動、副交感神経活動、交感神経活動/副交感神経活動)、疲労感(ボルグスケール)とし、開始時より5分毎に記録する。なお呼吸活動はウェアラブル呼気ガス分析装置(VO2 MASTER MW-1100、KORR Medical Technologies社)、循環活動は非観血的携帯型心拍出量モニター(AESCULONミニ、Osypka Medical社 図9)および近赤外分光測定装置(NIRO-200NX、浜松ホトニクス株式会社製)、自律神経活動はメモリー心拍計(LRR-05、株式会社ジー・エム・エス)および心拍変動リアルタイム解析プログラム(MemCalc/Bonaly Light、株式会社ジー・エム・エス)を用いて計測を行う。統計学的解析は1)と1)にB-SESを併用した場合および2)と2)にB-SESを併用した場合における臨床変数をそれぞれ比較する。また運動途中で中止した場合は、その理由を記録する。

【医療・福祉への応用】

B-SESを併用したハイブリットトレーニングが呼吸・循環および自律神経活動におよぼす影響を明らかにすることは、ISSにおける効率的な運動方法の開発への一助となる。また、ヒトが宇宙に長期滞在する際の健康維持につながる予防法の確立にむけた研究でもある。超高齢社会を迎えたわが国では、健康寿命の延伸に向けた取り組みが重要視されている。とりわけ高齢者の身体不活動による不動による合併症(廃用性変化)は、死のリスクを伴う問題である。このような高齢者特有の症状は、微重力環境における変化と類似したメカニズムで発生することが明らかとなっている。治療には強度の高い運動が推奨されているが、運動耐容能の乏しい高齢者には十分な運動は行えない。安全性を優先した強度の低い運動が行われているが、十分な効果が得られるとは言えない。B-SESを併用することは他動的に筋収縮を広範囲かつ増幅できることから、強度の低い運動の補填につながる。すなわちISSなど微重力環境における廃用性変化を効率的に予防する運動プロトコルが開発できれば、わが国の高齢者医療にむけても福音となることが予測される。



図8 : B-SESを併用した有酸素運動
a:上肢用エルゴメータとB-SSESを併用
b:自転車エルゴメータとB-SSESを併用



図9 非観血的携帯型心拍出量モニター

3) 国立研究開発法人 医療基盤・健康・栄養研究所

特殊な環境下における栄養の教育プログラムを開発するため、プログラムの構成を検討した。特に、宇宙環境と共通点がある災害時（被災地、避難所等）における食・栄養の課題や改善策は、宇宙における食・栄養の課題をも解決できる可能性がある。また、宇宙における食・栄養の課題やノウハウは、地上の災害時の食・栄養の課題を解決できる可能性を秘めている。すなわち、宇宙環境と被災地の両方の視点で食・栄養の問題を検討することは、双方型の課題解決につながる可能性が期待できる。そこで、令和3年度は、宇宙環境と災害時の特殊環境として共通性の観点から、特に食に焦点を当て、災害食と宇宙食の類似性について調査し比較検討を行った。また、日本オリジナルの宇宙食としてJAXAが認証を行っている宇宙日本食について、将来の宇宙における栄養支援にどの程度寄与できるか、宇宙日本食の既存製品の栄養価、具体的な組み合わせメニューの作成を通じて現状の問題点の抽出を行った。実際の宇宙環境の実態、歴史的背景については学術論文から情報を入手することが難しかったため、各種書籍や解説記事、文献等を取り寄せて把握した。

今後、これらの調査結果を、宇宙専門管理栄養士を育成するための教育プログラムに反映させる。さらに、明らかとなった宇宙食の課題については、これらの課題を解決するための実習としてプログラムに組み込み、自らが課題解決を行える教育プログラムを構築する予定である。

1. 災害食と宇宙食の類似性に関する検討

【はじめに】

宇宙飛行士は、閉鎖・隔離された環境での長期間に渡る生活が強いられることなどによる、ストレスに晒される。宇宙環境では様々な生体変化が生じ、栄養の必要性も増大する¹。宇宙での食事は、ライフラインが限られた宇宙環境においても、健康に任務を行うための栄養補給だけでなく、精神面からのサポート、コミュニケーションのツールとしても不可欠である¹¹。一方で近年、自然災害の多発により食料備蓄のニーズが高まっている。集団生活のストレス、電気やガス等のライフラインが不十分な被災地では、災害関連死を防ぐために食・栄養補給のための災害食が不可欠である。実際に避難所では、ガスが使えて調理ができる環境では食事の質が改善することを報告している²。また、災害時に、日常の食品を食べられる環境を用意することで、避難者の非日常的な環境下でのストレスを軽減する役割も期待される。このように、環境が類似する宇宙と被災地では、食事の環境にも共通点が存在する³。

災害食として日本では世界に類を見ない認証制度が存在する。日本災害食は、一般社団法人日本災害食学会が、災害食のなかで、同学会が示す日本災害食基準を満たしていることを認証する食品である⁴。自然災害による被災生活を支え、被災者の健康二次災害の発生防止に役立てることを目的とし、災害食に必要な条件を整理し、消費者の商品選択を資するとともに、備蓄推進に役立てるために災害食の規格化することを目的として開発された。災害時に役立つこと、及び日常でも積極的に利用可能な加工食品が認証されている⁵。

一方、宇宙日本食は、企業などが提案する食品のなかで、JAXAが定める宇宙日本食認証基準を満たしていることをJAXAが認めた食品である⁶。国際宇宙ステーション（ISS）に滞在する宇宙飛行士に、日本食の味を供給し、長期滞在の際の精神的なストレスを低減させることを目的と

している。また、宇宙飛行士の国際宇宙ステーション（ISS）でのパフォーマンスの維持・向上を図ることを目的として開発されている。日本人宇宙飛行士だけでなく、国際パートナーの宇宙飛行士に供給した実績もある。宇宙日本食は、日本の家庭で普段食されている範囲を対象としており、ラーメンやカレーといった伝統的な和食ではない食品の認証実績もある。

このように、災害食と宇宙食にはそれぞれの認証制度が存在するが、環境が類似している両者の認証制度がどのように類似しているのかについては明らかになっていない。そのために、災害食と宇宙食の活用方法や販売ルート等もそれぞれが独立して行っている。

そこで本研究では、日本災害食と宇宙日本食の要求事項、及び認証製品の比較を行い、共通点を検討し、今後の災害食、及び宇宙食の発展の一助とすることを目的とした。

【方法】

①日本災害食と宇宙日本食の認証制度の類似性

災害食と宇宙食の認証制度の類似性を検討するため、日本災害食学会が認証している日本災害食の認証基準、およびJAXAが認証している宇宙日本食の認証基準の要求事項の比較検討を行った。日本災害食学会およびJAXAのホームページに掲載されていた認証基準を用いて、両者の認証基準の各項目を精査し、内容を「食事の範囲」、「設備・体制」、「食品に対する要求」の3区分に分類し、比較検討を行った。

②災害食と宇宙食の認証された製品の類似性

実際に認証された製品の類似性を検討するために、認証された製品の比較検討を行った。認証製品を用途や喫食する状況を考慮し、食事バランスガイドの分類に基づきにカテゴリ分けを行った⁷⁾。「主食」、「副食」、「牛乳・乳製品」、「果物」、「菓子・嗜好飲料」、「調味料」、「サプリメント」の7区分に分類した。「主食」は主に炭水化物の供給源となる食品とした。「副食」は食事バランスガイドにおいて副菜、及び主菜にあたる食品をまとめて分類した。さらに、主にカルシウム等の供給源となる「牛乳・乳製品」、主にビタミンCやカリウムの供給源となる「果物」、間食として食され適度に楽しむ「菓子・嗜好飲料」に加え、味を調えるための「調味料」、錠剤やカプセル状で栄養補助を目的とする「サプリメント」とした。認証製品のなかには、複数の食品をセットしたパッケージとして認証を取得しているタイプも存在したため、そのようなパッケージ食品については、セットを外して別々の製品として分類した。また、複数の食品群を混合し、ペースト状にした嚥下補助食品（例：主食と副食）は、ペースト状にする前の食品で分類した。栄養強化バーの様な食品は、間食での摂取を想定し菓子・嗜好飲料に分類した。

【解析方法】

日本災害食と宇宙日本食の認証制度の比較については、要求事項の各項目の内容の概要を作成し、類似する項目ごとに表としてまとめた。災害食と宇宙食の認証された製品の比較については、「主食」、「副食」、「牛乳・乳製品」、「果物」、「菓子・嗜好飲料」、「調味料」、「サプリメント」の7区分に分類された製品の数をカウントし、それぞれの食品数および認証製品に占めるパーセンテージを算出して比較した。

【結果】

①日本災害食、及び宇宙日本食の要求事項数、認証製品数と申請企業/団体数

認証基準の要求事項は、日本災害食では6項目、宇宙日本食では8項目であった(表4)。また、実際に認証されている製品は日本災害食171製品、宇宙日本食47製品であった。

表4 日本災害食、及び宇宙日本食の要求事項数、認証製品数と申請企業/団体数

	日本災害食	宇宙日本食
要求事項 項目数	6	8
認証製品数 (2021年6月16日現在)	171	47
社/団体数	21	26

②日本災害食と宇宙日本食の認証制度の類似性

表5に日本災害食と宇宙日本食の認証制度の類似性を示した。

表5 日本災害食と宇宙日本食の認証基準の比較

	類似性	日本災害食基準	宇宙日本食基準	宇宙食の災害食への転用可能性	災害食の宇宙食への転用可能性
範囲	食品の範囲	日本人の食生活において馴染みがあり、かつ災害時に有用な食品(サプリメント等も含む)であること。	一般的な日本の家庭にて用いられている食品、またはそれをベースに開発された食品であること。	○	○
	喫食条件	①そのまま喫食できる	軌道上(ISS)に設置されている調理設備で調理可能であり、また、摂食に不都合のないこと。	○	○
		②温のれば喫食できる(発熱剤が付いている)	該当項目なし		
		③注水すれば喫食できる	注水/注湯器 注水(常温)で調理可能であり、また、摂食に不都合のないこと。		
		④注湯すれば喫食できる	注湯(約60°C~85°C(温度調節は不可)) 加水/湯量 25mlの倍数で最大 200mlで調理可能であり、また、摂食に不都合のないこと。		
⑤温のれば喫食できる(加熱が必要である)	加熱器 加温(接触加熱約80°C(温度調節は不可))で調理可能であり、また、摂食に不都合のないこと。				
設備・体制	開発・製造・供給の体制	開発・製造・継続的な供給を行うために十分な体制を有すること。	開発・製造を行うのに十分な体制を有すること。 継続して宇宙日本食を供給できる体制を有すること。 検査等の手続きに対応できる体制を有すること。	○	検査等の手続きに対応できる体制が必要となる
	設備設置場所	製造は固定場所で行うこと。但し、国内・国外を問わない。	製造設備は、日本国内に設置すること。	○	△ 製造設備が国内のものに限る
有すべき設備	○	製造及び検査に必要な設備を有すること。	開発・製造を行うものは、以下の設備を有すること。 (1) 製造用設備 (2) 申請食品を製造する設備 ・容器包装詰加圧加熱殺菌食品(レトルト食品)においてはレトルト殺菌装置 ・加水食品においてはドラム乾燥、噴霧乾燥、凍結乾燥等の乾燥装置 ・その他の食品によっては当該食品の製造装置 (3) 包装設備 ・真空包装機等の包装機器 (4) 品質管理用設備 ・分光光度計、クロマトグラフ、減圧検査用機器等の分析機器	○	△
	衛生管理体制	○	次のいずれかの基準を満たす施設にて製造を行うこと。 (1) ISO22000、FSSC22000等の国際規格の認証を取得している施設。 (2) JAS 認定工場 (3) 上記(1)から(3)には該当しないが、HACCPに沿った衛生管理計画を有し、自治体等の認証を受けているか、質研の保健所による検査などで衛生管理に問題ないことが明確である施設。	製造施設は、次のいずれかの基準を満たすこと。 (1) 食品衛生法による総合衛生管理製造過程の承認施設 (2) HACCPの認証を取得している施設 (3) ISO22000の認証を取得している施設 (4) FSSC22000の認証を取得している施設 (5) 上記(1)~(4)と同等の衛生管理体制(衛生管理責任者を含む)を有していることを証明でき、審査機関がそれを妥当と判断した施設	○

	検査体制 ⁶⁾	○ ⁶⁾	保存試験等において、検査を実施する機関は、以下のいずれかの基準を満足すること。 ⁶⁾ a. 食品衛生法に基づく登録検査機関であること。 ⁶⁾ b. 健康増進法に基づく登録試験機関であること。 ⁶⁾ c. JAB (The Japan Accreditation Board for Conformity Assessment : 公益財団法人 日本適合性認定協会) から (ISO/IEC 17025 試験及び校正を行う試験所の能力に関する一般要求事項) に基づき試験所認定を受けた機関であること。 ⁶⁾	認証における検査を実施する機関は、以下のいずれかの基準を満足すること。 ⁶⁾ (1) 食品衛生法に基づき、厚生労働大臣に対して登録検査機関として登録された機関 ⁶⁾ (2) 健康増進法に基づき、厚生労働大臣に対して登録試験機関として登録された機関 ⁶⁾ (3) JAB (The Japan Accreditation Board for Conformity Assessment : 財団法人 日本適合性認定協会) から ISO/IEC 17025:1999 (試験所及び校正機関の能力に関する一般要求事項) に基づき試験所認定を受けた機関 ⁶⁾	○ ⁶⁾	○ ⁶⁾
食品に対する要求 ⁶⁾	衛生性 ⁶⁾		該当項目なし ⁶⁾	宇宙飛行士の食中毒等を予防するための衛生性を確保していること。 ⁶⁾	○ ⁶⁾	○ ⁶⁾ 該当項目はないが衛生管理・検査体制で衛生性を保証 ⁶⁾
	栄養性 ⁶⁾		該当項目なし ⁶⁾	MMOP-NWG による「360 日以内の ISS 長期宇宙飛行時の栄養要求 (ISC-28038)」を可能な限り満足する献立作成に寄与する食品であること。 ⁶⁾	○ ⁶⁾	△ ⁶⁾
	品質 ⁶⁾	○ ⁶⁾	(1) 常温 (20°C±15°C) で輸送、保管、販売できる製品であること。 ⁶⁾ (2) 1 年以上の販売実績があること。 ⁶⁾	常温での保管・輸送が可能であること。 ⁶⁾ 軌道上での供食に問題が生じないよう、十分な品質を有すること。 ⁶⁾	1 年以上の販売実績が必要となる ⁶⁾	軌道上で十分な品質を有することが必要となる ⁶⁾
			(1) 常温での保管・輸送が可能であること。 ⁶⁾ (2) 室温低温 (常温の範囲を超える) になる場所 (屋外倉庫・車内など) での保管・輸送が可能とする場合は、取扱を提示すること。 ⁶⁾	(1) 申請食品は、食品の品質に影響を与えずに高温輸送が可能であること。特に、輸送時に保持すべき温度範囲がある場合は、その温度範囲も定義すること。 ⁶⁾ (2) 高空引き等を行い、体積の縮小を図ること。 ⁶⁾		
保管・輸送性 ⁶⁾		(1) 常温での保管・輸送が可能であること。 ⁶⁾ (2) 室温低温 (常温の範囲を超える) になる場所 (屋外倉庫・車内など) での保管・輸送が可能とする場合は、取扱を提示すること。 ⁶⁾	(1) 申請食品は、食品の品質に影響を与えずに高温輸送が可能であること。特に、輸送時に保持すべき温度範囲がある場合は、その温度範囲も定義すること。 ⁶⁾ (2) 高空引き等を行い、体積の縮小を図ること。 ⁶⁾	○ ⁶⁾	× ⁶⁾	
	保存性 ⁶⁾		常温で6か月以上の賞味期間があること。 ⁶⁾	9 ヶ月間の軌道上運用に加えて、地上や軌道上での保管期間も考慮して、少なくとも製造後 1.5 年以上の賞味期間を有すること。 ⁶⁾	○ ⁶⁾	○ ⁶⁾ 求められる保存期間に差異があるため、そのままの転用は難しい ⁶⁾
	容器包装 ⁶⁾		(1) 輸送、保存中の温度・湿度変化に耐え、積み重ねても損傷しにくいなど強靱な包装容器を用いること。 ⁶⁾ (2) 外装は、輸送・保管上の強度を有すること。 ⁶⁾	申請食品の包装は、輸送、打上げ、軌道上等で加えられる圧力、及び温度の変化に耐えることを保証すること。 ⁶⁾ 原則として、JAXA 指定パッケージ (JAXA 支給品) を用いること。 ⁶⁾ 申請食品の容器包装外装には食品の識別、宇宙飛行士の摂食時のガイド等のために食品名称、認証番号、食べ方、質量、賞味期限、製造記号等をわかりやすく記載したラベル (JAXA 支給品) を見やすい位置に貼付すること。 ⁶⁾ パッケージにシズル写真やロゴ等のデザインを使用する場合は、パッケージデザイン基準を満たすこと。 ⁶⁾	○ ⁶⁾	× ⁶⁾

③食品の範囲について

認証基準の食品の範囲における要求事項は、日本災害食は「日本人の食生活において馴染みがあり、かつ災害時に有用な食品(サプリメント等を含む)であること」、宇宙災害食は「一般的な日本の家庭にて用いられている食品、またはそれをベースに開発された食品であること」と類似性があった。また、喫食条件における要求事項にも、「そのまま喫食できる食品であること」、「注水すれば喫食できる食品であること」、「注湯すれば喫食できる食品であること」、「温めれば喫食できる食品であること」の4条件が共通していた。一方、「発熱材が付属され温めれば喫食できる食品」は、日本災害食でのみ認められていた。

④設備・体制について

認証基準の開発・製造・供給の体制における要求事項は、「開発・製造・継続的な供給を行うために十分な体制を有すること」が共通していた。一方、宇宙日本食でのみ「検疫等の手続きに対応できる体制を有すること」が条件となっていた。

認証基準の設備設置場所における要求事項は、日本災害食では、「製造は固定場所で行うこと。

但し、国内・国外を問わない」となっていた。一方、宇宙日本食では、「製造設備は、日本国内に設置すること」となっており、両者で差異を認めた。

認証基準の有すべき施設における要求事項は、日本災害食では、「製造及び検査に必要な設備を有すること」のみであったが、宇宙日本食では「製造用設備・申請食品を製造する設備・包装設備・品質管理設備」を有することが求められていた。日本災害食と比較して、宇宙日本食において、より細部まで要求事項の記載があったが、両者で類似性が確認できた。

認証基準の衛生管理体制における要求事項は、「HACCP、ISO22000、FSSC22000等の認証を取得している衛生管理体制、もしくはそれに準ずる衛生管理体制であること」と共通していた。認証基準の検査体制における要求事項は、「保存試験等において、検査を実施する機関が、食品衛生法に基づく登録検査機関・健康増進法に基づく登録試験機関・JAB (The Japan Accreditation Board for Conformity Assessment：公益財団法人 日本適合性認定協会) から (ISO/IEC 17025 試験及び校正を行う試験所の能力に関する一般要求事項) に基づき試験所認定を受けた機関のいずれかであること」と共通していた。

⑤食品に対する要求について

認証基準の食品の衛生性における要求事項は、宇宙日本食でのみ存在し、「宇宙飛行士の食中毒等を予防するための衛生性を確保していること」となっていた。日本災害食の要求事項に本項目に該当する箇所はないが、日本災害食における衛生管理体制の要求事項を満足することにより、宇宙日本食での本項目の要求事項を満足することが叶う内容であった。

認証基準の食品の栄養性における要求事項は、宇宙日本食でのみ存在し、「ISS参加宇宙機関の医学パネル栄養ワーキンググループ (MMOP-NWG) による「360日以内の ISS 長期宇宙飛行時の栄養要求 (JSC-28038)」を可能な限り満足する献立作成に寄与する食品であること」となっていた。日本災害食の要求事項に本項目に該当する箇所はなかった。

認証基準の食品の品質、及び保管・輸送性における要求事項は、「常温で輸送、保管できる製品であること」が共通していた。一方、日本災害食でのみ、「常温で販売できる製品であること」、「1年以上の販売実績があること」が要求されていた。また、宇宙日本食でのみ、「軌道上での摂食に問題が生じないよう、十分な品質を有すること」、「真空引き等を行い、体積の縮小を図ること」が要求されていた。

認証基準の食品の保存性における要求事項は、日本災害食では、「常温で6か月以上の賞味期間があること」となっていた。一方、宇宙日本食では、「少なくとも製造後 1.5年以上の賞味期間を有すること」となっており、両者で差異が認められた。

認証基準の食品の容器包装における要求事項は、災害日本食では、「輸送、保存中の温度・湿度変化に耐え、積み重ねても損傷しにくいなど強靱な包装容器を用いること」、「外装は、輸送・保管上の強度を有すること」となっていた。一方、日本災害食では、「申請食品の包装は、輸送、打上げ、軌道上等で曝される圧力、及び温度の変化に耐えることを保証すること」、「原則として、JAXA 指定パッケージ (JAXA 支給品) を用いること」、「申請食品の容器包装外面には食品の識別、宇宙飛行士の摂食時のガイド等のために食品名称、認証番号、食べ方、質量、賞味期限、製造記号等をわかりやすく記載したラベル (JAXA 支給品) を見やすい位置に貼付すること」、「パ

パッケージにシズル写真やロゴ等のデザインを使用する場合は、パッケージデザイン基準を満たすこと」となっていた。両者で強靱な容器包装が要求されている点で類似性が確認できたが、日本災害食と比較して、宇宙日本食において、より強靱な容器包装が要求されていた。また、宇宙日本食においては、外装に対する要求も認められた。

⑥認証されている製品について

認証されている製品の内容は、日本災害食では、「主食」(アルファ化米等)が126製品(68.9%)と最も多く、次いで「副食」25製品(13.7%)、「菓子・嗜好飲料」18製品(9.8%)、「調味料」11製品(6.0%)、「サプリメント」2製品(1.1%)、「牛乳・乳製品」1製品(0.5%)、「果物」0製品(0.0%)となっていた(表6)。一方、宇宙日本食では、「副食」が17製品(36.2%)と最も多く、次いで「菓子・嗜好飲料」14製品(29.8%)、「主食」13製品(27.7%)、「調味料」2製品(4.3%)、「牛乳・乳製品」1製品(2.1%)、「果物」、及び「サプリメント」0製品(0.0%)となっていた。

表6 日本災害食と宇宙日本食の認証製品の比較

	日本災害食		宇宙日本食	
	個	%	個	%
合計	183	100.0	47	100.0
主食	126	68.9	13	27.7
副食	25	13.7	17	36.2
牛乳・乳製品	1	0.5	1	2.1
果物	0	0.0	0	0.0
菓子・嗜好飲料	18	9.8	14	29.8
調味料	11	6.0	2	4.3
サプリメント	2	1.1	0	0.0

【考察】

災害食と宇宙食の類似性を検討する目的で日本災害食、及び宇宙日本食の認証基準を比較した。宇宙日本食と日本災害食の認証基準には類似性や共通点が多いことが明らかになった。両者の認証基準には、「食事の範囲」、「設備・体制」、「食品に対する要求」の3区分すべてで、要求事項の類似性や共通点が認められた。また、実際に認証された製品を7分類して比較したところ、日本災害食で最も多かったのは主食(アルファ化米等)であり、宇宙日本食で最も多かったのは副食であった。

喫食条件における要求事項は、「そのまま喫食できる食品であること」、「注水すれば喫食できる食品であること」、「注湯すれば喫食できる食品であること」、「温めれば喫食できる食品であること」の4条件が共通していることが明らかになった。これは、両者ともに特殊環境における喫食

を目的とし、限られた設備で簡単に調理し喫食できる製品であるからと考えられる。また、「発熱材が付属され温めれば喫食できる食品」は、日本災害食でのみ認められていた。これは、災害時の熱源確保の難しい状況を想定した喫食条件である。したがって、将来、月面移住や火星探査計画で基地から離れた地域での作業など熱源確保が困難な状況での宇宙食の喫食が必要となった場合、遠隔地でも温かい食事を食べるための工夫が必要になる可能性が考えられる。しかし、現在のところISS上の微小重力下では熱対流が発生しないこともあり、宇宙日本食でこの条件は認められていない。

認証基準の食品の保存性における要求事項は、日本災害食、及び宇宙日本食認証基準において、それぞれ「常温で6か月以上の賞味期間があること」、「少なくとも製造後1.5年以上の賞味期間を有すること」となっており、両方で要求する保存期間に差異があることが明らかになった。これは、災害食がローリングストックによる備蓄を推奨していることが背景に存在する⁸。一方、宇宙日本食が、9ヶ月間のISS上運用に加え保管期間を考慮するからである。しかし、両者ともに長期間の保存を想定して開発されている。また、日本災害食認証製品には、7年の保存期間を有する製品も存在する⁴。将来、月面移住や火星探査計画では、宇宙食は現在より長期間の賞味期間を必要とする予想される。長期間の保存期間を有する宇宙食の開発には、災害食の応用やノウハウやエビデンスの活用もできると考えられる。

日本災害食認証製品は171製品と、宇宙日本食認証製品の47製品より充実していることが明らかになった。しかし、日本で災害食や備蓄食として販売されている製品は多数存在する。その中で日本災害食認証を受けている製品はごく僅かである。多くの災害食や備蓄食が認証を受けていない。したがって、171製品が日本災害食認証を受けている現状が充実しているとは考えられない。一方、宇宙日本食認証製品に関しても充実しているとは考えられない。食に多様性を確保することは、QOL向上にも繋がる。ISS長期滞在の初期段階は、アメリカ航空宇宙局（NASA）とロスコスモス（ロシア）の宇宙食のみで運用されていた。その後、2004年にISS計画の国際パートナー国がISSに宇宙食を供給できるようになり、日本での宇宙食製造も始まったが、現在もISSの宇宙食の多くはNASAとロスコスモスが供給している。将来、月面移住や火星探査計画では、宇宙飛行士は現在より長期間宇宙での生活を強いられることも予想されている¹²。長期間の宇宙生活における宇宙飛行士のQOLを向上させるためにも、NASAとロスコスモスの宇宙食以外の宇宙食の充実が期待される。

実際に認証された製品については、日本災害食ではアルファ化米などの「主食」が68.9%を占めることが明らかになった。これは、被災急性期の生命維持に、水とエネルギーの摂取が不可欠であることが影響していると考えられる⁹。被災地の避難所では、被災亜急性期の炭水化物に偏った食事が問題となった事例も発生した²。また、農林水産省の「災害時に備えた食品ストックガイド」では、最低三日分の食料を家庭備蓄することが望ましいとされている⁸。しかしながら、日本における家庭での食料備蓄率は依然として高くない¹⁰。防災食品市場は近年緩やかに伸長しているが依然として規模は大きくなく¹³、宇宙食の災害食への活用は、義務的な食料備蓄のイメージを一新し、夢のある宇宙につながることで、防災備蓄への関心を引き上げることも期待できるかもしれない。

一方、宇宙日本食では「主食」、「副食」がそれぞれ27.7%、36.2%とバランス良く認証されて

いた。また、「菓子・嗜好飲料」も29.8%を占めていたが、これは宇宙日本食が、精神的ストレスを解消させることを目的にしている影響と考えられる。日本災害食、及び宇宙日本食の両方で「果物」の製品は存在しなかったが、両方で異なった理由が考えられる。宇宙日本食では、既に乾燥果物の宇宙食が存在し、生鮮果物も地上から届くため必要ないからと考えられる。一方、日本災害食では、果物が長期保存に向かないからと考えられる。しかし、ビタミン類は被災亜急性期に不足しやすい栄養素として挙げられ⁹、宇宙食の災害食への活用に期待される。

現状、宇宙日本食では、日本災害食とは違い、錠剤やカプセル状のものやサプリメントは認証していない。これは、宇宙日本食が、国際宇宙ステーション（ISS）に滞在する宇宙飛行士の健康を維持するための栄養を確保することだけでなく、おいしくバラエティ豊かな食事をとることにより精神的ストレスを低減させ、気分をリフレッシュし、パフォーマンスの維持・向上を図ることを目的としているからである。しかし、将来の月面移住や火星探査においては、宇宙食での生活がより長期間になることが予想される。その際、錠剤やカプセル状のものやサプリメントの活用も考えられる。

以上のことから、災害食と宇宙食の双方向型の活用の可能性が示唆された。また、日本災害食、及び宇宙日本食の充実の必要性が示唆された。本研究で、日本災害食、及び宇宙日本食の両方で、食品企業以外の企業や団体の製品が認証されている事例が存在した。また、同一企業が日本災害食、及び宇宙日本食の両方で認証製品を製造している事例もあった。今後益々、日本災害食、及び宇宙日本食の認証製品が増加し、活用されることが期待される。

【結論】

災害食と宇宙食は極めて共通点が多いことが明らかとなった。災害食の宇宙食への応用は、現在の宇宙食をより充実したものにするだけでなく、将来の月面移住や火星探査にむけてノウハウやエビデンスの応用にも活用できると考えられる。また、宇宙食のノウハウを災害時に活かすことで宇宙食の地上実装が可能となる。宇宙食の災害食への応用は、「ワクワクする防災備蓄」につながり、防災備蓄への関心を引き上げることも期待できる。自然災害が多発する近年、家庭での防災備蓄の普及率を引き上げることは急務と言える。今後、災害食と宇宙食の双方向型の活用を進めることで、両者の充実、発展につなげたい。

参考文献

- 1) Smith et al., The nutritional status of astronauts is altered after long-term space flight aboard the International Space Station. *J Nutr* 2005; 135:437-443
- 2) Tsuboyama-Kasaoka, N., Hoshi, Y., Onodera, K., et al. What factors were important for dietary improvement in emergency shelters after the Great East Japan Earthquake?. *Asia Pac Clin Nutr*. 2014; 23: 159-166.
- 3) 中沢孝. 宇宙食の現状と災害食への活用, *Science & Technology Trends*, 2014;144, 15-23
- 4) 日本災害食学会. 日本災害食 <http://www.mmjp.or.jp/TELEPAC/d-food/certification.html> (2021年4月11日アクセス可能)
- 5) 日本災害食学会. 日本災害食認証基準 <http://www.mmjp.or.jp/TELEPAC/d->

- food/certificationstandards_JAXA-JDF.pdf (2021年4月11日アクセス可能)
- 6) 宇宙航空研究開発機構. 宇宙日本食認証基準 https://humans-in-space.jaxa.jp/library/item/healthcare/food/spacefood_document_d.pdf (2021年4月11日アクセス可能)
 - 7) 厚生労働省. 「食事バランスガイド」について. <https://www.mhlw.go.jp/bunya/kenkou/eiyou-syokuji.html> (2021年4月11日アクセス可能)
 - 8) 農林水産省. 災害時に備えた食品ストックガイド. <https://www.maff.go.jp/j/zyukyu/foodstock/attach/pdf/guidebook-3.pdf> (2021年4月11日アクセス可能)
 - 9) Tsuboyama-Kasaoka N, Purba MB. 2014. Nutrition and earthquakes: experience and recommendations. *Asia Pac J Clin Nutr* 23: 505-513.
 - 10) Harada M, Tsuboyama-Kasaoka N, Oka J, Kobayashi R. Association between personality traits and food stockpiling for disaster. *PLoS One*. 2021.12;16(12):e0259253
 - 11) 田島眞. 宇宙食 人間は宇宙で何をたべてきたのか. 共立出版. 2016.910
 - 12) 宇宙生命科学の進歩と医学応用への展望. 医学あゆみ. Vol. 279. 2021.11.6
 - 13) 災害大国日本で注目を集める防災食品市場の現状と展望. 矢野経済研究所.2020.3.31

II. 宇宙日本食認証製品の栄養成分表示の現状と具体的なメニュー例の検討

【はじめに】

初期の宇宙食は「喉に食べ物がつまるといけない」との懸念から、チューブやトレイに入れたものペースト状のものが多く、離乳食に近い形態であったため、宇宙飛行士からの評判も良くなかった^{1,11}。その後、ヒトは無重量状態でも問題なく食べ物を飲み込め、消化できることがわかり、現在宇宙食は種類も豊富となってきた^{11,12}。

2011年ISSが完成すると、宇宙での長期滞在が可能となり、それに伴って課題も明らかになってきた。災害時の避難生活ではライフラインが不十分であり²、避難生活の長期化により高血圧や高血糖の健康問題が生じ、支援ニーズが上昇する³。同様に宇宙生活のストレス、電気やガス等のライフラインが十分でない宇宙ステーションでは、健康を維持し安全な食・栄養補給のための食事が不可欠である。食事状況の悪化は、健康状態の悪化にもつながる。長期化する中で、栄養素の摂取不足を防ぎ、かつ生活習慣病を予防するため、栄養バランスのとれた適正量を安定的に確保する観点は重要な位置づけとなっている。

宇宙での生活で栄養を確保するためには、安全性、保存性、喫食性等において適していることが求められる。日本では独自の宇宙食の認証制度として宇宙日本食が存在する⁴。宇宙日本食は、JAXAが示す宇宙日本食の基準を満たしていることを認めた食品である。宇宙ステーションでの生活を支え、滞在者の健康二次災害の発生防止に役立てることを目的とし、宇宙食に必要な条件を整理し、商品選択に資するとともに、規格化することを目的として開発された。しかしながら、これら宇宙日本食の認証製品の栄養面について十分な情報は得られていない。

そこで、本研究では、JAXAより認証された宇宙日本食を対象として、栄養素の含有量がどの

程度記載されているのか、栄養成分表示の実態を調査した。さらに、既に認証されている宇宙日本食製品がどの程度の栄養を満たすことができるのかについて、具体的な組み合わせメニューを考案して検討した。

【方法】

① 対象

JAXAが認証している宇宙日本食のデータベースを対象とし、すべての宇宙日本食のリストアップを行った。2021年11月4日～11月10日時点でJAXAのホームページに掲載されていた認証製品情報から、それぞれの製品の情報をインターネットで調査した。JAXAのホームページに記載がない製品情報については、個別に商品をサーチして当該製品の情報が掲載されているページから情報を収集した。栄養成分表示について、情報利用の優先順位は、JAXAホームページ、製造メーカーの公式ホームページを優先し、情報が得られない場合には、公式通販サイトやパッケージ写真から情報を入手した。宇宙日本食の栄養成分表示について、エネルギー、たんぱく質、脂質、炭水化物、ビタミン、ミネラル、食塩相当量含有量が書かれているか否かを調べ宇宙日本食の栄養価データベースを作成した。栄養素ごとに、栄養成分表示が記載されている製品数をカウントし、パーセンテージを算出した。

②組み合わせ献立の作成

宇宙日本食データベースを参照し、日本人の食事摂取基準2020に近づけるための組み合わせメニューを考案した。

【結果】

① 栄養価表示が確認できた宇宙日本食製品

JAXAにより認証されている宇宙日本食は47製品であった(表7)。エネルギーおよび食塩相当量について表示が確認できた宇宙日本食は47製品であった(100%)。しかし、たんぱく質、脂質、炭水化物の栄養成分表示が確認できた宇宙日本食は、わずか11製品(23.4%)であった。

表7 栄養価表示が確認できた宇宙日本食製品

	表示が確認できた製品数	表示が確認できなかった製品数
エネルギー	47	0
たんぱく質	11	36
脂質	11	36
炭水化物	11	36
食塩相当量	47	0

② 考案した宇宙日本食の組み合わせメニュー

作成した宇宙日本食の栄養価データベースを用いて、既に認証されている宇宙日本食を用いた組み合わせメニューを3日間分考案した。組み合わせメニューは、朝食、昼食、間食、夕食に分けて作成した(表8)。

表8 考案した宇宙日本食の組み合わせメニュー

1日目朝食	2日目朝食	3日目朝食
赤飯	山菜おこわ	スペース日清焼そばU.F.O.
日清スペースカップヌードルカレー	イワシのトマト煮	白がゆ
サバ醤油味付け缶詰	粉末緑茶	ホテイやきとり(たれ味)宇宙用
粉末緑茶		
1日目昼食	2日目昼食	3日目昼食
ホテイやきとり(柚子こしょう味)宇宙用	日清スペースハヤシメシ	白飯
おにぎり 鮭	森永ミルク生活	サンマの蒲焼き
おにぎり 鮭	スペースからあげクン	スペースまるとっとアジ(燻製しお味)
粉末ウーロン茶	粉末ウーロン茶	粉末緑茶
1日目間食	2日目間食	3日目間食
バランス栄養食ブロックタイプ(チーズ味)	亀田の柿の種(宇宙食)	SPACE ビスコ
イオンドリンク	羊羹(小倉)	粉末ウーロン茶
キシリトールガム(ライムミント)	黒飴	ピーチゼリー
		宇宙食 特濃ミルク 8.2
1日目夕食	2日目夕食	3日目夕食
白飯	白飯	レトルト ビーフカレー
味付海苔	日清スペースシーフードヌードル	ブルーネエキストラクト
サンマの蒲焼き	サバの味噌煮	北海道産牛肉とミニトマトのハンバーグ
粉末緑茶	粉末ウーロン茶	白飯
		粉末ウーロン茶

宇宙日本食組み合わせメニューの栄養価を表9に示した。エネルギーは3日間平均2058kcalで、食塩相当量は、3日間平均9.3gであった。しかし、たんぱく質、脂質、炭水化物については表示が確認できた製品数が少ないために計算を行わなかった。

表9 考案した宇宙日本食の組み合わせメニューの栄養価

	エネルギー(kcal)	食塩相当量
--	-------------	-------

1日目	2051	9.8
2日目	2088	9.9
3日目	2034	8.1
平均	2058	9.3

【考察】

宇宙日本食認証製品において、栄養成分表示の実態についてインターネットを用いて調査した。エネルギーおよび食塩相当量について表示が確認できた宇宙食は47製品（100%）であった。宇宙日本食認証製品の3日間組み合わせメニューでは、エネルギーは3日間全て2000kcalを満たすことが出来た。食塩相当量は、3日間平均9.3gであった。しかし、宇宙滞在時に摂ることが必要な栄養素のうち、特にたんぱく質、ビタミン、ミネラル類は、ほとんどの宇宙食で含有量が表示されていないかった。宇宙日本食に含まれる栄養素について十分な情報が得られないことが明らかとなった。

宇宙環境においても、食品からの栄養摂取は健康な生活を維持するためにも重要である⁵。宇宙環境と共通点が考えられる災害時においては、特に重点的な栄養基準が示されている。エネルギー、たんぱく質、ビタミンB₁、ビタミンB₂、ビタミンCである⁶。たんぱく質は身体に不可欠であり、不足すると筋肉内のたんぱく質を使わざるを得ず エネルギー源が筋肉になるため、結果的に筋肉量や筋力の低下につながる。実際に宇宙空間で16日間飼育されたラットでは腓腹筋の萎縮がみられ、たんぱく分解が生じていることが報告されている⁷。これらは運動機能や活動量が低下し、宇宙滞在生活に大きな影響を与える。ビタミンB群は、水溶性であり、食事からの摂取が制限された場合、短期間で欠乏症を生じることが報告されている。ビタミンB₁を完全に除去した食事を与えた場合、2週間で血中ビタミンB₁濃度が減少し、4週間以内に欠乏症状が生じる⁸。ビタミンB₁の欠乏症状は脚気であり、手先や足先の麻痺、下肢の浮腫の症状を呈する。末梢神経障害や心不全に至る場合もある。さらにビタミンB群は炭水化物の燃焼に不可欠な栄養素であり、災害時等で炭水化物過多の食事では必要量が増加する⁹。ビタミンCについても、多くの宇宙食で含有量が表示されていないかった。ビタミンCは保存中に減衰することが知られており、長期間保存の加工食品では含有量を正確に示せないという問題点もある。しかしながら、宇宙滞在時のストレスや循環器疾患の予防の観点からもビタミンCの積極的な摂取は不可欠である。

栄養素の含有量が不明である食品が多いことは、宇宙滞在時の栄養評価に大きな影響を与える。評価に用いる栄養基準は、現在はNASAが設定した欧米人の体格をもとにした基準が使用されている。日本人の体格での必要量についても文献調査を行ったが、十分に明らかにされておらず、この点も栄養評価に大きな影響を与える。宇宙食の含有量が記載されていない場合にはその栄養素の過不足の評価ができない。特にたんぱく質、ビタミン、ミネラル類の摂取量の評価が出来ない事は、食事の質の改善、健康障害が生じた際の提案の根拠が得られないことになる。最近、絶食後の過栄養によるリフィーディング症候群のリスクが災害時にも無視できないことを報告した¹⁰。宇宙環境においても栄養不足の評価はリフィーディング症候群の予防の観点からも重要である。宇宙食の栄養含有量が十分に把握できない場合には、宇宙滞在者の食事を改善するための対策の遅れにつながる可能性もある。

日本における栄養成分表示の義務はエネルギー、たんぱく質、脂質、炭水化物、食塩相当量である。本研究の結果から、実際に作成した組み合わせメニューにおいてもエネルギーと食塩相当量のみしか算出できなかった。限られた宇宙日本食であっても組み合わせ次第で、エネルギーや食塩相当量を栄養の参照量に近づけることが可能であることが明らかとなった。しかし、宇宙食として滞在時の栄養補給に使用される製品は、栄養の参照量に対してどの程度満たしているかを示さなければ、宇宙滞在時の栄養評価が出来ない。今後は、宇宙滞在時の栄養の重要性を伝えるとともに、宇宙日本食においても栄養表示を促す取り組みが不可欠であると考えられる。

【結論】

宇宙滞在時に生命維持として必須である宇宙食のうち、宇宙日本食の栄養成分表示を調査したところ、たんぱく質、ビタミン、ミネラル類がほとんど表示されていなかったことが明らかとなった。今後は、宇宙滞在者の栄養摂取状況を把握するためにも、宇宙食を災害食へ活用する双方向型の課題解決のためにも¹³、宇宙食への栄養成分表示が望まれる。

参考文献

- 1) 宇宙航空研究開発機構. 宇宙食の歴史 <https://humans-in-space.jaxa.jp/faq/detail/000521.html> (2021年4月11日アクセス可能)
- 2) Tsuboyama-Kasaoka, N., Hoshi, Y., Onodera, K., et al. What factors were important for dietary improvement in emergency shelters after the Great East Japan Earthquake?. *Asia Pac Clin Nutr.* 2014; 23: 159-166.
- 3) Tsuboyama-Kasaoka N, Ueda S, Ishikawa-Takata K. Food and nutrition assistance activities at emergency shelters and survivors' homes after the Great East Japan earthquake, and longitudinal changes in vulnerable groups needing special assistance. *Int J Disaster Risk Reduct.* 2021;66:102598.
- 4) 宇宙航空研究開発機構. 宇宙日本食認証基準 https://humans-in-space.jaxa.jp/library/item/healthcare/food/spacefood_document_d.pdf (2021年4月11日アクセス可能)
- 5) 松本暁子：宇宙での栄養 宇宙航空環境医学Vol. 45, No. 3, 75-97, 2008
- 6) 厚生労働省健康局：避難所における食事提供の計画・評価のために当面の目標とする栄養の参照量について（平成23年4月21日）
- 7) Ikemoto M, Nikawa T, Takeda S, Watanabe C, Kitano T, Baldwin KM, Izumi R, Nonaka I, Towatari T, Teshima S, Rokutan K, Kishi K. Space shuttle flight (STS-90) enhances degradation of rat myosin heavy chain in association with activation of ubiquitin-proteasome pathway. *FASEB J.* 2001 May;15(7):1279-81.
- 8) 桂英輔、人体ビタミンB₁欠乏実験における臨床像についてビタミン, 1954; 7, 708-713
- 9) Tsuboyama-Kasaoka N, Purba MB. Nutrition and earthquakes: Experience and recommendations. *Asia Pac J Clin Nutr.* 2014;23:505-13
- 10) 関本（孫田）みなみ, 笠岡（坪山）宜代, 西信雄 .災害時の栄養とリフィーディング症候

群 日本災害食学会誌 2022; 9 in press.

- 11) 田島眞. 宇宙食 人間は宇宙で何を食べてきたのか. 共立出版. 2016.9.10
- 12) ティム・ピーク. 宇宙飛行士に聞いてみた. 日本文芸社. 2018.12.31

- 13) 災害大国日本で注目を集める防災食品市場の現状と展望. 矢野経済研究所. 2020.3.31

8. まとめ

本業務の令和3年度の目的はほぼすべて達成することができた。今後は、カリキュラムに沿って、実際のコンテンツの制作にあたる予定である。3施設間の協定の締結は、次年度に完了する見通しであり、その協定を活かしてより充実したプログラムやホームページコンテンツの作成を目指していく予定である。また、宇宙専門管理栄養士（仮称）と宇宙理学療法士（仮称）の認定制度については、日本栄養・食糧学会および日本リハビリテーション医学教育推進機構とそれぞれ連携して構築する方向で進んでいる。次年度に、具体的な構築の道筋をつけていくこととする。