宇宙環境のストレスと宇宙食

立花正一[§], 中沢 孝, 渋川喜和夫

宇宙航空研究開発機構有人宇宙技術部宇宙飛行士健康管理グループ

Stress Factors under Space Environment and Space Food

Shoichi Tachibana[§], Takashi Nakazawa and Kiwao ShibukawaAstronauts Medical Operations Group, Human Space Technology & Astronauts Department,
Japan Aerospace Exploration Agency, 2-1-1, Sengen, Tsukuba, Ibaraki 305-8505

は じ め に

1961年4月に旧ソ連のガガーリン宇宙飛行士が初めて宇宙に飛び出してから既に50年を経ようとしている。有人宇宙開発もアメリカと旧ソ連が互いに覇権を争っていた「競争」の時代から、現在地上約400kmの軌道に建設が進む国際宇宙ステーション (ISS: 15カ国の国際共同プロジェクト) が象徴するように「協力」の時代に入っていると言える。我が国も今年3月と6月に「きぼう」(図1) という愛称の科学実験棟の主な部分 (船内保管室, 船内実験室, 及びロボットアーム) を相次いで打上げ, ISSに首尾よく取り付けただことで, このプロジェクトの主要なメンバーとして本格的に活動を始めた。来年2月にはJAXAの若田飛行士が我が国初の宇宙長期滞在 (3ヶ月) に挑み, ISS内での科学実験を本格化させると共に, 「きぼう」の最後のパーツである船外実験プラットフォームのISSへの組み込み作業に主体的に取り組むことになっている。2009年中にはISSの乗組員の数は3人から6人に倍増する予定で, その後は若田飛行士に続いてJAXA飛行士が次々と約6ヶ月の長期滞在ミッションに参加することになる。これまでスペースシャトルでの2週間ぐらいの短期ミッションしか経験の無かった我が国が, いよいよ6ヶ月間を基本とする長期宇宙滞在に参加するわけである。

宇宙環境におけるストレスと身体の変化

スペースシャトル等での短期宇宙飛行では, 飛行士の体に起こる変化は主に地上の重力状態 (1G) から開放されてほぼ無重力状態 (0G) になることにより引き起こされる。急性の変化であり「宇宙酔い」と「体液シフト」がおもな

医学的課題となる。「宇宙酔い」は乗り物酔いに似た現象で, 胃部不快感, 吐き気, 嘔吐, めまいなどが起こる。原因は平衡感覚や位置覚を担っている内耳の耳石やリンパ液の動きが無重力状態では乱されてしまうことや, これによって眼からの感覚情報と内耳からの感覚情報にミスマッチが起こることなどが推定されている。「宇宙酔い」は飛行士の60~70%に起こるよく知られた症状だが, 幸いなことに乗り物酔いに用いる薬剤が効くし, たいていは宇宙に滞在して数日後には症状は治まる。「体液シフト」は地上 (1G) で下半身に貯留していた血液や水分が, 無重力状態 (0G) では上半身に移動し, 顔のむくみや鼻閉感, 頭重感を引き起こすもので, 当初は不快な症状であるが, これも血管壁などにある圧力センサーが働くと, 体の中に「余分な水分がある」と判断し, 尿として排泄を促すので1週間もすると症状は消える。こうして特徴のある上半身優位の「宇宙人体型」(図2) ができて無重力空間への適応態勢が整う。

宇宙空間に数ヶ月の単位で滞在すると, 短期ミッションとは違った医学的な課題が出てくる。主要な課題は1. 筋・骨量の減少, 2. 宇宙放射線被曝, 3. 精神心理的ストレスの3つと考えられ, これらが慢性的に心身に影響を与えるといえる。そして今回のシリーズ「宇宙日本食の開発」で取り上げられている「宇宙での適切な食事」はこれらの医学的課題のいずれにも関連し, その有効な対策の一つとして有望視されているものである。

1. 筋・骨量の減少

人間が無重力状態に長く滞在すると, これまで重力に抗して体を支えていた下半身の筋肉や骨が働く必要がなくなるため, 細ったり弱くなったりする。これは寝たきりの患者や老人の足が萎えるのと極めてよく似た現象である。言い換えると筋肉や骨を頑健に保つためには, 絶えず運動に

〒305-8505 つくば市千現 2-1-1

[§] 連絡先 (Corresponding author), tachibana.shoichi@jaxa.jp

図 1 ISS (国際宇宙ステーション) に組立予定の日本実験棟「きぼう」

図 2 無重力での体液シフトと体型

宇宙では上半身優位の「宇宙人」体型となる：「宇宙医学・生理学」p107 より引用

よる荷重刺激を加えることが必要であることが最近わかってきている。これまでの長期滞在飛行士のデータによると、飛行士の下半身の骨量は1ヶ月に1～1.5%ずつ減少し6ヶ月滞在で約6%の骨量が失われ¹⁾、筋力は20%ぐらい減少するという。ちなみに地上で生活する老人の骨量減少は1年で1～2%であるから、無重力空間では実に10倍の速度で骨量減少が起きていることになる。これまで骨粗しょう症は老化が原因であると考えられていたが、若い飛行士でも重力による荷重刺激がなくなると骨粗しょう症と同様の現象を起こすことから、「荷重刺激」の重要性が見直されている。このように宇宙での筋・骨量減少に対抗するために、飛行士はISS内で数種類の運動器具(図3)を用いて1日2.5時間運動をするように日課が組まれている。

筋・骨量減少の対策として十分な栄養の確保も重要である。頑健な筋肉を維持するためには良質のタンパク質の摂取が必須であるし、骨量減少で失われるカルシウムの補給や骨形成に欠かせないビタミンDの補給も重要である²⁾。長期滞在に選ばれた飛行士に事前に行なう身体検査の中に

ビタミンDや骨量の測定も含まれているが、これで骨量が不足がちな飛行士にはフライト前からビタミンDの補給が行なわれている。宇宙食の開発に当たってはこれらの栄養素を十分に含有する食品が考慮されている。

2. 宇宙放射線被曝

宇宙放射線による被曝は宇宙飛行には避けて通れない課題の一つである。宇宙や太陽から飛んでくる放射能を帯びた粒子のほとんどは地球を覆う厚い大気層によって防御され、地上で生活する我々が放射線を浴びることはほとんど無い。しかし宇宙空間に暴露された飛行士は直接放射線の影響を受ける。宇宙船の薄い壁は被曝防御にはあまり役立たない。飛行士は1日に平均1mSv(ミリシーベルト)の放射線を受けるというが、これは胸のレントゲン写真を毎日2～3枚撮られるのに相当する。過剰な放射線を体に浴びるとDNAが傷つき発ガンの危険性が増し、また眼に直接浴びると白内障(レンズが白濁する)を起こしやすくなるため、飛行士が過剰な放射線を浴びないように、放射線技師が胸に着けている被曝計測バッジと同様の計測器で被

トレッドミル

自転車エルゴメータ

抵抗運動器

図 3 ISS 内で使用されている 3 種類の運動器具

飛行士はこれらを用いて 1 日 2.5 時間の運動をする

曝量を管理している。また太陽の黒点の活動が活発になると飛んでくる放射線も増えて危険な状況となるため、絶えず太陽活動を観測しその活動を予測している (宇宙天気予報という)。

放射線の被曝防御は今の技術ではまだ不十分で、飛行士を完全に守るすべは無いが、最近リコピンやβカロチンなど (カロチノイド) の抗酸化作用のある物質に被曝防御作用もあるという研究成果も発表されており、体の中から被曝防護をする可能性のある栄養素として期待される向きもある。また直接の被曝防護効果は無いにしても、十分な栄養の確保による健康維持は、体の免疫力を高め、多様なストレスへの耐性を高めるのに役立つのは事実であり、この点でも栄養の確保は重要となる。

3. 精神心理的ストレス

地上から遠く隔たった小さな人工建造物である宇宙船 (ISS) の中で、生まれ育った文化背景も母国語も違う多国籍の同僚クルーと寝起きを共にし、こなすべき任務も非常に多い飛行士の精神心理的なストレスは相当なものである。そのストレスの性質も短期ミッションと長期ミッションでは少し違ってくると考えている。短期ミッションのクルーは航空機のパイロットに例えられるのに対し、長期ミッションのクルーは遠洋航海の船乗りにならざるを得ない。ちなみに ISS も船に見立て左舷、右舷などという呼び方をする。遠洋航海ではたまに寄港し上陸が許されストレス解消もできるが、ISS の長期滞在クルーは眼下に見下ろす地球の美しい風景が許されるだけである。サリュートに 211 日間滞在した Lebedev というロシア人飛行士が出版した「宇宙飛行士の日記」³⁾ は、普段地上でなら何とも思わない些細な事でも蓄積するに従って“耐え難いもの”になること、時に同僚飛行士の一挙手一投足が鼻について苛立たしいものになることなどを率直に告白しており、その後の精神心理的対策の改善に役立った。このように長期滞在ク

ルーには滞在期間が長くなるにつれて特有の心理的变化が起こることも知られており、これらの精神的なストレスが高じて過誤や事故を引き起こさないようにいろいろな対策がなされている。地上の精神心理専門家による定期的な遠隔面接、家族や友人との定期的な交信、新聞や雑誌の電子的手段での提供、無人貨物機などによる地上からのプレゼント (クルー・ケア・パッケージと呼ぶ今風“慰問袋”) などである。

そしてもう一つ精神心理的に重要なのは「美味しい食事」の提供である。しかも登山の時のように適当に車座に座って銘々に携行食をガッツクのではなく (最近は登山隊の食事風景も優雅になっているのでちょっと失礼な例えかも)、食事用のテーブルや椅子を用意し、スプーンやフォークを使った「まともな食卓を囲む」雰囲気を作るように工夫されている。ISS 内での数少ない気晴らしの一つに「仲間と囲む食卓」が重要視されている。ただ無重力なるがゆえにナイフの使い勝手は悪く、代わりにパッケージなどを開けるためにハサミが多用されるようである。ISS には電子レンジは無いが、食事を暖める電熱器とお湯を供給する機器は完備しており、「暖かい」食事を取ることはできるようになっている。忙しい一日の終わりに仲間と一緒に囲む食事はホッと一息つける時間であり、食事が美味しければ会話も弾み、仲間との絆が一層強まり、ストレスも解消し明日への活力となる。

宇宙食の歴史

宇宙食の開発は弾道飛行 (弾丸が放物線を描くような飛び方) で宇宙空間をなぞる程度では必要なかったが、地球軌道上を何回も周回する飛行が可能になり、飛行士が宇宙で長時間を過ごし、空腹に対処する必要が生じる段階になってクローズアップされた。もっともアメリカ、ロシア (旧ソ連) とともにそれを見越して有人宇宙開発の準備段階で

図 4 マーキュリー計画時代の NASA の宇宙食

図 5 ロシアの宇宙食 (缶詰が多い)

当然宇宙食の開発に着手している。しかし当時は宇宙で食物を口に入れること自体が未知の体験であり、食べた物が順調に胃腸に運ばれ吸収されるかどうかについても専門家の意見が分かれた。

アメリカで最初にこの“冒険”にチャレンジしたのはマーキュリー 6 号で初の軌道飛行を成功させたジョン・グレン飛行士であった (1962 年)。マーキュリー計画 (1961～63 年) 時代の飛行士はチューブ入りや一口サイズの固形物、凍結乾燥した粉などを口にしなければならず、栄養補給はできるものの味の方は不評であったという (図 4)。

ジェミニ計画 (1965～66 年) 時代には、一口サイズの食品がぼろぼろと砕けないようにゼラチンで表面加工されたり、水分を含む食品が増えたりと改良がなされた。シュリンプカクテル、チキン料理、スコッチプリンなど今でも人気のメニューが登場している。

アポロ時代 (1968～72 年) になると食品の質も向上し種類も増える。お湯が使えるようになり、フリーズドライ食品の質の向上につながった。レトルト食品も登場し、スプーンを使って食事ができるようになった。ちなみに NASA はこの時代に宇宙食の安全性を確保するために HACCP (Hazard Analysis and Critical Control Points) という独自の管理法を開発したことは有名である。現在でもこの食品管理法が世界各国で応用されていると聞くと、宇宙開発技術が地上の産業に応用されたわかりやすい例の一つである。

スカイラブ時代 (1973～74 年) には、宇宙での食事風景が地上のそれに大きく近づいた。これまでの宇宙機に比べて格段に広いスペースを確保できたスカイラブでは食卓を備え、スプーンやフォークを使って、クルーが楽しく食卓を囲むという風景が出現した。また冷凍冷蔵庫を完備し、広い食品庫には 72 種類の食材がストックされた。

シャトル時代 (1981 年～) に入ると、さらに宇宙食の種類や質は充実し、もはや宇宙食はチューブ入りの栄養補給

目的だけの味気ない代物ではなく、一般の食品ストアに並べられている加工食品と同じものを宇宙用に転用した美味しい食品となった⁴⁾。

一方ロシアでは、1961 年にヴォストーク 2 号で 1 日を軌道上で過ごしたチトフ飛行士がはじめて宇宙食を食べたとされている。当初は、ピューレ (野菜などを煮てすりつぶしたスープ) や液状食が主体であった。ロシアでは伝統的に缶詰食品がよく使われており (図 5)、ISS でもロシア製宇宙食には多くの缶詰製品が含まれ、味にも定評がある。缶詰は食品保存法として長い歴史と伝統を持ち多くの利点を有すると認識しているが、宇宙食としての難点は打上時の重量ということになる⁵⁾。

最近では第 3 の宇宙大国となった中国の飛行士が軌道上で中華料理の宇宙食を楽しんだことが話題になった。この時飛行士は、「宮保鶏丁」 (角切り鶏肉の辛味あんかけ) や「魚香肉絲」 (細切り肉のからしいため) などを食べ、食後には漢方薬と栄養剤入りの飲料を飲んだと報道された。1960 年代の「宇宙食」と比べると格段の進歩が遂げられていることが理解できる⁶⁾。

宇宙日本食の開発⁶⁾⁷⁾

宇宙飛行士にとって、特に長期滞在クルーにとって「宇宙での食事」は心身両面で重要な役割を果たすことがご理解いただけたことと思う。ISS ではこの重要な宇宙食の供給はこれまでは豊富な経験を持つ米ロ両国が半々で受け持ち、他の国は“口出し”できなかった。しかし、現状の宇宙食にもいくつかの問題点があり、改善の余地が十分に残されていた。一つには種類の少なさである。現メニューは約 300 種類ほどあるが、献立にするとせいぜい 10 日分にしかならず、11 日目には同じ献立の繰り返しとなっていた。これについてはメニューを増やす努力が随時行なわれて、昨年 9 月からは 16 日周期となったが、今後もメニューの多様化は飛行士たちの強い要望でもある。二つ目には米ロ

が供給する宇宙食は味が濃く、脂質の多いメニューが多く、日本人には「重たい」感じが否めない点であった。長期滞在を予定する日本人飛行士からは、たまにはぜひ日本食を味わい、胃を休めるとともに故郷に思いを馳せたいという希望があった。また味の点でも優れ、欧米のメニューとは異なった「健康食」として定評のある日本食に外国人飛行士からも期待が寄せられていた。

以上のような状況も考慮し、大きなモジュール (実験棟) を作り、無人貨物機 (HTV) も種子島から打ち上げ予定であり、資金面でも相当の負担をしている我が国が、宇宙食開発の面でも国際貢献をアピールできるのではないかと考えた。来るべき日本人宇宙飛行士の長期滞在に向けて、何とか自前で宇宙食を開発し、日本人飛行士の健康維持増進に貢献するばかりでなく、同僚の外国人飛行士にも世界的に定評ある「日本食」を提供しようと試みたのである。2001 年から実施した米ロの宇宙食製造施設の調査、宇宙食製造に係る諸々の規則や制約の検討などを踏まえて、「これなら高い食品製造技術を誇る我が国が十分に対応できる」と判断した。

しかし、独自の宇宙食生産ラインを持つ NASA やロシア宇宙庁と違い、JAXA は小規模であり、とても自前でそのような施設を持つことは不可能である。2001 年の調査検討作業を依頼した日本食品科学工学会およびそれを構成する主要食品メーカーに協力を依頼して、2004 年から宇宙日本食の試作がはじめられた。並行して宇宙日本食の開発の将来の継続を見込んで「認証基準」と「認証システム」の整備も食品科学工学会にお願いして進めた。これは第 1 段階の試作に参加したメーカーの食品にとどまらず、一定の基準と条件を満たすメーカーの新しい食品を宇宙日本食として認定して種類を増やしていこうとする考えに基づくものであった。途中の作業では JAXA も不慣れなところがあり、いろいろと関係者に迷惑をかけることになったが、なんとか 2006 年 11 月には認証基準の制定にこぎつけ、2007 年 6 月には第 1 段の宇宙日本食 29 品目 (1 品目辞退で現在 28 品目) の認証を果たした。

食品メーカー同様に大変ご苦勞を頂いたのが専用のパッケージを作るメーカーである。打ち上げ時の厳しい条件に耐え、真空・無重力空間に浮かぶ密閉された人工環境である ISS 内に持ち込む機材や材料は、事前に厳しい検査をパスしなければならない。①材質が有毒ガスを発生しないこと (オフガス試験)、②燃えにくいこと、③飛行士の手を傷つけるようなシャープエッジ (尖った所) がいないこと、④相当な気圧変化 (高圧から低圧まで) や温度変化に耐えること、などである。高い技術能力を誇る我が国のメーカーであるので試験自体は全く心配していなかったが、試験前後の必要書類 (英文) の作成や NASA 担当者との調整に随分と手間がかかり、迷惑をおかけしたと記憶している。

ISS プロジェクトに参加している国は 15 カ国あるが、宇宙食を定常的に供給しているのは米ロの 2 カ国のみで、我が国が第 3 の国として近々供給することになる。宇宙日本食はこれまでに開発段階で JAXA 飛行士だけでなく各国の飛行士に何度も試食をしてもらっているが、うれしいことに大変好評で ISS 内で早く提供されることを心待ちにされている。先日の土井、星出飛行士のシャトル飛行の際にもこれらの宇宙食が披露され、NASA 飛行士達から喜ばれた。我々の試みに刺激を受けてヨーロッパやカナダでも独自の宇宙食の開発に着手しようとしており、食の面でも ISS プロジェクトの国際化が本格的に始動するきっかけを作ったと自負している。

宇宙食の今後の課題と可能性

現在の ISS 宇宙食メニューは 1960 年代の開発当初の宇宙食に比べれば、格段に美味しく種類も豊富となっている。それでもなお長期滞在のためには、品目が少なく、更なる多様化が望まれる。現在の ISS 宇宙食の多様化を制限している要因の一つに冷凍冷蔵庫が無いことがあげられる。科学実験用の冷凍冷蔵庫は性能のよいものが搭載されているので技術的には可能である。現在の進んだ冷凍技術を用いると食品の保存の可能性が大きく広がり宇宙食の開発にも自由度を与えることになるだろう。寿司や刺身などの宇宙化も不可能ではない。

ストレスと体の変化のところで、宇宙環境ではカルシウム、ビタミン D、タンパク質などが不足がちであることや、抗酸化作用のある物質が抗放射線作用もある可能性について触れた。これらの成分を補強した食品 (特定保健用食品) の開発も我が国が得意とするところであり、今後取り組む価値があると思われる。

また、現在は ISS という軌道上を周回する宇宙ステーションが有人宇宙開発の場であるが、将来月や火星の有人探査が本格的になされるとなれば、単に地上から食料を供給するだけではなく、現地での野菜、穀物、食用小動物の生産ということも考えなければならない課題である。すでに地上の閉鎖型生態系実験施設で 100% 人工環境の中で食料の生産を試みる実験が行われている。ISS 内でも植物の生育実験をしているが、将来の宇宙食への材料提供の可能性として見守りたい。

おわりに

宇宙で 6 ヶ月もの長期滞在を果たした飛行士は、地上に帰還してすぐに普通の生活に戻れるわけではないことをご存知だろうか。ISS 内でいかに予防のために運動を一所懸命しても、下半身の骨・筋の萎縮は完全には防止できず、地上で転倒して怪我をしたり、骨折したりするリスクがあるため、帰還後 1 ヶ月間は、整形外科から退院した運動選手のように注意深くリハビリテーションをする。面白いこ

とに、宇宙飛行士は胃腸に対してもリハビリテーションが必要なのである。長期間に渡り、種類の限られたレトルトとフリーズドライを中心とした“消化のよい”食べ物を口にしているわけで、口も胃腸も下半身の筋肉同様に“さぼっている”のである。地球に帰還して、急に「さあ歓迎パーティーだ!」ということで地上の山海の珍味やご馳走をいきなり胃袋に詰めると、たいてい胃袋が拒否反応を起こして吐き出してしまうのだ。私はこの話をロシアのベテラン飛行士から聞いて「なるほど!」と納得したものだ。言われてみればその通りである。リハビリには胃腸も忘れてはならない。

閑話休題。宇宙日本食の開発に当たっては 2001 年以来、日本食品科学工学会及び参加各社の皆様には一方ならぬご協力とご迷惑をかけてきた。食品の開発という JAXA の本来業務とは畑違いの分野に、ロケットや衛星を開発する時のような論理を持ち込み輦轡をかったことも記憶している。しかし、皆様の努力の結果がいよいよ実を結び、我々の悲願が達成される日も間近に見えてきていると思う。そうすれば我が国は長期滞在用の宇宙食を独自で開発した第 3 番目の国（中国はまだ短期飛行用の宇宙食）として自負

できる。さらには、これまでの努力で培われた技術は、災害時用の長期保存食の開発や特定保健用食品として応用されることも期待できる。この場を借りて、日本食品科学工学会および関連諸氏の多大なるご協力とご尽力に謝意を表したい。

文 献

- 1) LeBlanc, A. *et al.*, Bone mineral and lean tissue loss after long duration space flight. pp157-160. *J. Musculoskeletal Neuronal Interact* 2000 ; 1.
- 2) 関口千春, 栄養・代謝, 「宇宙医学・生理学」, 関口千春 他著, 宇宙開発事業団編 pp. 93-103 (1998).
- 3) Lebedev, V., Diary of a Cosmonaut : 211 Days in Space. Bantam Air & Space Series 4.N.Y.Bantam Books (1990).
- 4) Space Food. NASA Facts. FS-2002-10-079-JSC
- 5) 立花正一, 宇宙食の現在, 日仏工業技術, Tome 49 No. 2, 日仏工業技術会, pp. 82-85 (2004).
- 6) 立花正一, 中沢 孝, 宇宙食について : 宇宙日本食の開発を含めて, 宇宙環境利用の展望 平成 18 年度. 資源探査用観測システム・宇宙環境利用研究開発機構, pp. 131-139 (2007).
- 7) 立花正一, 宇宙開発の現状と宇宙食について, 食品と容器, 49, 缶詰技術研究会, pp. 228-234 (2008).

(平成 20 年 11 月 12 日受理)