地球外環境と人間*

谷島 一嘉**

Man in Space - from Medical Point of View / Kazuyoshi YAJIMA

Key words: space medicine, space physiology, space adaptation, deconditioning, demineralization, space radiation

1. 宇宙の環境

スペースシャトルやミールが地球を周回し、その中に人間が居住し、各種の宇宙実験をしている高度は、低高度地球軌道 (LEO) と呼ばれる約 300~400 km の宇宙空間である。1990 年代の後半から予定されている宇宙基地においても高度は約 500 km である。その外部環境は、百万分の 1 G 以下の微小重量と、十億分の 1 気圧の高真空と、 -100°C の低温と、種々の放射線と宇宙塵の世界である。しかし宇宙船の中は重量こそないが米ソ共 1 気圧の通常の空気と常温である。船外活動 (EVA) の時は、宇宙服の中は約 $1/3$ 気圧で、100% の純酸素を呼吸することになる。このような環境において、ソ連では最長 315 日間、アメリカでは最長 84 日間の長期宇宙滞在を経験している。

2. 人間の宇宙環境への適応と地上への再適応

宇宙に出ると、人間の体は地上での 1 G への適応から新たな宇宙空間での 0 G への適応を要求される。

図 1 に宇宙に出た時の人体の宇宙環境への適応状態の時間経過を示す。横軸が宇宙での滞在時間 (単位は月) で、上の線が臨床症状の発現するレベルを表している。図は発射直後に前庭神経の関与する宇宙酔い関係の機能が上の線を越え、臨床症状が発現することを示している。次いで体液およ

び電解質、心循環系が臨床症状を発現するほぼ限界まで変化している。しかしながらこれらの症状は間もなくおさまり、中段の線に示された宇宙の 0 G での適応状態の付近で落ち着くが、二つの機能だけは宇宙の適応状態に落ち着かず時間と共に増加していく。一つは骨とカルシウム代謝の問題で、もう一つは放射線被曝の問題である。これらについては後述する。

図 2 は地上に帰還した際のこれらの機能の変化で、宇宙に適応した諸機能、適応しない諸機能などが 4 週間程で地上の適応状態に戻ることを示している。この際に最も大きな問題が心循環系で、帰還直後に臨床症状の限界を大きく越えている。これは起立耐性が低下するという問題であるが、これについても後述する。またこの図が書かれてから既に 5 年が経過し、最新の知見では必ずしもこの図の通りではなくなっている部分もあるが、それも次の各論で述べることにする。

図 1 無重量状態に対する人体諸機能の適応の時間経過

* 原稿受付 昭和 63 年 1 月 14 日

** 日本大学医学部 (東京都板橋区大谷口上町 30-1)

図2 宇宙から地上に帰還した後の人体諸機能の回復の時間経過

図3 スカイラブ4号の飛行中と帰還後におけるコマンドーの左足の容積変化
(ソーントン, ホフラー, ランメル (1977) による)

3. 人体の諸機能の各論

3.1 循環系の変化

重量がなくなるため、地上では重力の影響で下半身に多く分布していた血液や組織間液が平均化されて、下半身から2 l程度の体液が上半身に移動する。図3にスカイラブ4号のコマンドーのデータを示す。この図は片足から得られたデータであるが、上肢の体液量はほとんど変化しないのに反し、下肢の体液量は大きく減少し、帰還後は急激に元に戻っている。その値は約1 l程度に達し、両足ではこの倍の量になる。頸動脈の圧受容器はこの体液の移動を中枢に伝えるが、中枢はこれを循環血漿量が増えた結果であると判断し、ADH分泌を抑制したり口渇感を抑えたりして体から余分な水分を排泄しようと反応する。その結果必要以上に水が排泄されて水バランスが負になり、血液は濃縮し、体重は約1~2 kg減少する。こうした状態で宇宙の微小重量に適応する。

また宇宙に出ると血液の重さがなくなるので心臓への負担が軽くなり、強い心臓は必要なくなって長い間には心サイズが小さくなる。

こうした循環系の一連の適応は、宇宙から地上へ再

図4 ジェミニ7号の14日間の飛行前後において15分間の70°ヘッドアップティルトを负荷した際のコマンドーパイロットの心拍数(上)、血圧(中)、足の容積の比較
(ペリー, カッターソン (1967) による)

び帰還する際に大きな問題になり、心負担の急激な増加に基づく血圧の低下、意識の喪失等、起立耐性の低下を引き起こす。これらの現象を循環系のデコンディショニングと呼んでいる。図4はジェミニ7号の14日間に飛行で生じた起立耐性の低下の一例で、ベッドに体を固定して強制的にベッドを70°引き起こすヘッドアップティルトという負荷を15分間与え、その時の心拍数、血圧、足の容積変化を飛行前と飛行後で比較したものである。飛行前は実線で、飛行後が点線で表してある。飛行前はいずれも大きな変化がないが、飛行後はベッドを引き起こしたとたんに収縮期血圧が低下し、脈圧がほとんどなくなり、それを代償するために心拍数が急激に増加している。足の容積もとめどなく増え続けるようで、何か容積のコントロールが失われたような印象を与える。

3.2 筋・骨格系の変化

重力がなくなると抗重力筋などを中心に筋肉の萎縮が生ずる。スカイラブ2,3,4号で得られたデータによれば、筋力の低下は上肢よりも下肢に著しいことが分かっている。211日宇宙に滞在したソ連の飛行士は帰還時に立つことも本を持つことも出来なかったという。

図5 スカイラブの飛行中と飛行後における尿中および糞便中に排泄されたカルシウム量
(ランボー、ジョーンストン (1979) による)

また同時にデミネラリゼーションと呼ばれる骨中の無機質の減少が起こり、特にカルシウムが結合蛋白と共に持続的に失われる。図5にやはりスカイラブで得られた尿中および糞便中からのカルシウムの喪失量を示すが、84日間の飛行中尿中カルシウムは1日170mg程度の排泄が持続し、糞便中のカルシウムに至っては排泄が徐々に増加して止まらない。試算によれば最悪の場合1年間で約25%のカルシウムがなくなるといわれている。このカルシウムの喪失が現在の宇宙飛行における最大の問題で、今のところ適当な対策が見つかっていない。カルシウムの喪失はオステオポローゼの原因となり、また排泄の過程で血中および尿中のカルシウム濃度が増大するので腎および尿路結石の危険性が増す。

このカルシウムの減少に伴って生じた骨の変化は以前は可逆性だと思われていたが、最近の研究から地上に戻っても完全に元の状態には戻らない不可逆性変化であることが分かってきた。こうなると宇宙滞在が長期にわたるほど骨の変形やオステオポローゼなどを考

えねばならず、飛行士達の予後の問題が大きくなる。宇宙に滞在する期間をどうするか、帰ってからの休養期間をどの位にするか、再び宇宙に出られる回数を何回で制限するか、などの問題が生じてくる。

3.3 神経系の変化

宇宙酔いは宇宙飛行士の約50%に生じ、宇宙に出た直後から発生している。表1に今までの宇宙飛行で宇宙酔いにかかった米ソの飛行士の数が挙げられている。左が宇宙船の種類、真中が飛んだ宇宙飛行士の数、右が宇宙酔いにかかった飛行士の数である。

宇宙酔いの症状は地上の乗物酔いと同じで、酔いの程度に応じて食思不振や胃の不快感から嘔吐までいろいろな段階があるが、地上の乗物酔いが徐々に増悪するのに比べて、宇宙酔いはいの何の前駆症状もなしにいきなり嘔吐することが特徴であるといわれる。それだけにもし起こると船内の汚染が大きな問題になるが、突然では急場の対策の取りようがない。ただし宇宙酔いは多くの場合、2,3日でおさまるといわれている。しかしまだ例数も少ないのははっきりした結論を出すのは危険である。長期間宇宙に滞在している内に再発することもあるかもしれない。

宇宙酔いはその発症において地上の動揺病との相関が見られないため、地上において種々の平衡感覚の検査をしても、その人間が宇宙酔いにかかるかどうかの予測が難しいので非常に厄介である。地上の動揺病に一番強かった宇宙飛行士が一番ひどい宇宙酔いにかかったという例もあり、この問題もまだしばらく解決されそうにない。

宇宙酔いの対策として現在NASAでは、スコボラミンとデキセドリンの複合剤のスコボデックスという薬を飛行士達に服用させている。ソ連では急激な頭の動きが宇宙酔いを発現させるとして、頭を体に固定して急激な動きを抑える器具を使用している。

3.4 放射線の影響

地球を取り巻く空気層や磁場、バンアレン帯等に遮られて地上まで到達しない種々の放射線が宇宙では問

表1 米ソの宇宙飛行における宇宙酔いの頻度
ソ連 (1981年現在)

米国 (1982年11月現在)			ソ連 (1981年現在)		
計	画	飛行士数 ¹⁾	宇宙酔い発生数	計	画
マーキュリー		6	0	ポストーク	6
ジェミニ		20	0	ボスホート	5
アポロ		33	11	ソユーズ	38
スカイラブ		9	5	アポロ・ソユーズ	2
アポロ・ソユーズ		3	0	サリュート5号	6
シャトル		12	5	サリュート6号	27
					宇宙酔い発生数
					1
					3
					21
					2
					2
					12

1) 宇宙酔いについての単独の症状または複数の症状を含む。症状の厳密な分類はされていない。

2) 1回以上飛行した数名の飛行士を含む。

図6 地球外近傍空間における磁場に太陽風の電子と陽子
が取りこまれてバンアレン帯が形成される図

題になる。図6に地球を取り巻く電磁場の状態を示す。現在の宇宙船の船体はこういった放射線に対して計算された許容量ギリギリの厚さしかなく、特に船外活動(EVA)に至っては宇宙服が薄くて放射線を十分防護出来ないで、長時間のEVAでは当然放射線被爆の問題が起こってくる。EVAの労働時間は今のところ1日8時間であるが、将来は再検討されるであろう。LEOといえども高度が500 km 近くなるとバンアレン帯の内側を構成しているプロトン帯の影響を考える必要がある。この帯は南大西洋の一部では高度が下がっており、400 km 程度の高度の飛行にまで影響を及ぼしそうである。今後予想される極点軌道飛行、特にオーロラ帯のEVAでは、放射能を帯びたプロトンや重粒子などが地球の磁場によって引き寄せられ、集中している地点なので、人体に与える影響も大きいことが予想される。船内にいても宇宙に滞在する時間が

長期になるほど放射線被爆量が増え続けるが、特にEVAに際しては余計問題が深刻になる。

3.5 精神的影響

宇宙での滞在が長期になるほど精神的健康が重要になってくる。孤独に耐え、他の乗員とも友好的・協調的な雰囲気を作り出しながら自分の義務を遂行するためには、精神的な強じんさに加えて自己の抑制、他人に対する協調性や思いやりなどが要求される。スペースシャトルによる第一次材料実験では1週間程度の飛行なので精神的な影響も比較的少ないが、宇宙基地になると予定では半年位の滞在になるので、何らかの問題が発生する可能性が増す。またこうした実験の遂行にはチームプレイが大切なので、宇宙飛行士個人の資質がいかに関係しているかというグループとしてのパフォーマンスが良いとは限らず、最近専らチームとしての生活・実験訓練の重要性が指摘されている。良く似た環境であると考えられる南極基地や原子力潜水艦でのデータが参考にされているが、それを現在および今後の宇宙飛行士の選抜や訓練にどのように反映させるかがこれからの課題として残されている。

4. 宇宙環境に望ましい人間特性

最後にまとめとして、今まで述べてきたような宇宙環境とそこで生活する人間の問題を考えると、これから始まる宇宙生活に望ましい人間特性として、少なくとも次のような資質が挙げられるだろう。

- (1) 圧の変化に耐性があること。
- (2) 心循環系の適応性が優れていること。
- (3) 体力が優れていること。
- (4) カルシウムや脂肪の排泄が多くないこと。
- (5) 孤独に強く、しかも協調性、適応性に富み、時に応じて指導力も発揮出来ること。