

# 有人人工重力研究の歴史と展望

## 国際宇宙ステーションを越えて、月基地、火星探査へのロードマップ

岩瀬 敏, 西村直記, 田中邦彦, 間野忠明

愛知医科大学生理学, 岐阜医療科学大学

*History and Prospective of Manned Artificial Gravity Research, Beyond ISS, Application to the Moon Surface Base and Martian Expedition*

*Satoshi Iwase, Naoki Nishimura, Kunihiro Tanaka, and Tadaaki Mano*

*Aichi Medical University and Gifu University of Medical Science,*

*Yazako-Karimata 1-1, Nagakute 480-1195 and Ichihiraga Nagamine 795-1, Seki 501-3822, Japan*

Abstract: Artificial gravity is produced by centrifuge on the spacecraft, and it is beneficial for the crew members for the prevention of physiological deconditioning during microgravity exposure. The history and prospective of artificial gravity are described, and incorporation of the device into the Moon base or Martian expedition is discussed.

### 1. はじめに

長期宇宙飛行のリスクには、放射線、心理学的孤立、生理学的デコンディショニングなどがある。人工重力は、無重力状態において、重力を加えることにより、無重力により生ずるデコンディショニングを予防するものであるが、遠心力を利用して有効で、効率的なヒトのデコンディショニングを予防するのに適した系であるといえる。長期間宇宙飛行に伴う宇宙飛行デコンディショニングには、骨喪失、筋萎縮、心血管系デコンディショニング、「宇宙酔い」などがあるが、適切な人工重力の適用により防止できると考えられている。しかしながら、宇宙における人工重力研究は限られており、国際宇宙ステーションにおけるヒトを対象とした遠心機は、いまだに実現していない。人工重力研究開発の目的として、遠心機を宇宙船に搭載する前に、どのくらいの重力レベル、重力勾配、回転数、1日の回転時間、どのくらいの回転頻度が適切か、という問題点を解決する必要がある。

### 2. 人工重力の必要性

有人宇宙探査は、これまで地球低軌道 (low earth orbit, LEO) あるいは、月往復に限られていた。このようなミッションの期間は、数日から数週間の間であり、最近になり国際宇宙ステーションへのやや長期滞在が6ヶ月にわたって行われるようになった。このように短期間における無重力曝露は、あまり人体に影響を及ぼさないし、すぐに元の状態に戻る。しかし、探査が月、小惑星、火星、さらに苑外に及ぶようになると、ミッション期間は飛躍的に延長せざるを得ない。この長期間無重力曝露の結果、宇宙飛行士が重力場に復帰すると、好ましくない機能異

常が発生する可能性が生ずるわけである。

無重力の影響として、米航空宇宙局 NASA が挙げている項目には、1. 視力変化, 2. 尿路結石, 3. 感覚運動変容, 4. 骨折, 5. 行動異常, 6. 有酸素能力低下, 7. 健康異常, 8. 尿閉, 9. 起立不耐性, 10. 腰痛, 11. 不整脈, 12. 薬剤の影響, 13. 椎間板損傷, などがある。最近注目されている障害に、体液移動のため脳圧亢進を招き、宇宙飛行士に緑内障を生ずる、というものがある。このような視力障害は、宇宙飛行のごく初期に生ずるものであるから、現在、一番の問題となっている。もしこのような仮説が確立すると、深宇宙ミッション時に将来障害を残すからである。したがって脳圧亢進に対する有効な対抗措置を講じなければいけないし、その場合、人工重力は最も有効な手段となり得る。

無重力の影響を減弱するための対抗措置が開発され、その中には現在使用されている方法もある。たとえばウェイトトレーニングや有酸素トレーニング、食餌性に多くのカルシウムを摂取する、あるいは薬物性に、無重力状態に対する生理学的適応を軽減するために使用されている。その変化には、抗重力筋や構造の変化、体液の再配分、重力受容体の機能、などが挙げられている。このような現在使用されている対抗措置は、ある系統のみに焦点を絞り、他の系は考えていない。これらを別々に行うことは、時間がかかり、それぞれの対抗措置に高度の技術を要する。さらに、このような対抗措置は、LEOでの6ヶ月にわたるミッションでも、そんなに生理学的な保護ができてはいない。

宇宙飛行中の生理学的デコンディショニングに影響する最重要因が、重力負荷と刺激の喪失ならば、最も有効な対抗措置は、重力を負荷してやることに

疑いはない。人工重力 artificial gravity, AG は、地球上の重力を、遠心機あるいは持続的な直線加速により、発生させるやり方である。現状における微小重力に対抗する措置は、1 つずつなのに対し、人工重力は多くの系に対して、総合的な対抗措置となり得る。

### 3. 人工重力の歴史

人工重力は古い概念である。おそらくその起源は 19 世紀にさかのぼる。Konstantin Tsiolkovsky が、軌道上宇宙飛行の自由落下に、ヒトの身体が十分に反応しないことに気付いたことに始まる。この問題を解決するため、彼は宇宙ステーションを回転させ、遠心力による加速度によって重力を作り出すことを提案した。その後、Einstein は、加速度が重力と区別が付かないという等価原理を示した。その後、Werner von Braun のような科学者や Arthur C. Clarke, Stanley Kubrick といった作家が、宇宙船を回転させることで、人工重力を生じさせ、宇宙飛行による不具合を解消しようとするものである。

1959 年頃になり、NASA でも人工重力を早期の宇宙船に取り入れる必要性が、論議されるようになってきた。しかし、比較的短期のミッションであったため、早期には取り入れられることはなかった。早期の宇宙ミッションでは、比較的短期な無重力曝露は、人体にほとんど影響を及ぼすことがなかったことが判明したが、それはさらに長期の宇宙飛行計画が、人体に深刻な影響を及ぼす可能性を示唆していた。しかし最終的には、搭乗員の健康、安全、操作能力が、不可逆的なリスクを負うまでには達していなかっただけであった。1960 年代を通じて、NASA は長期の宇宙飛行ミッションにおける人工重力の必要性に関する議論を、行っていたのである。



図 1. Tsiolkovsky と彼の考案した人工重力居住区を含む宇宙船。

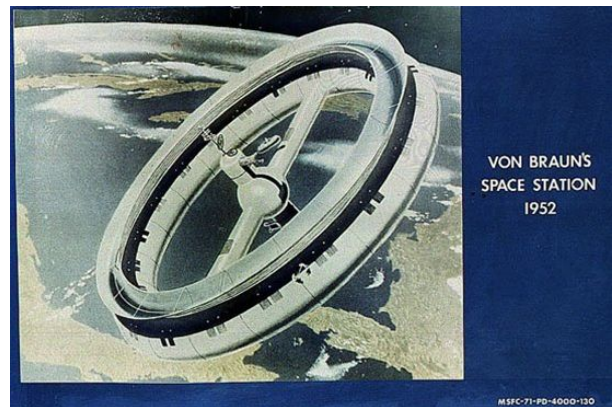


図 2. 1952 年にフォン・ブラウンが構想した宇宙ステーション。遠心力により人工重力を発生させる。

1970 年代になり、Skylab 計画が行われ、かなりの長期間、無重力状態に曝露されても、元に戻らないということはないことが判明した。この 20 年間に、Mir や国際宇宙ステーション ISS 計画により、系に特異的な対抗措置（筋トレや有酸素運動を合わせた方法）を行ってれば、少なくとも 6 ヶ月なら生理学的には元に戻らないことが認められた。しかし最近になり NASA の発表したさらに深宇宙への到達目標を達成するには、議論が必要なことが分かってきた。まずは LEO を越えて月表面への長期滞在や火星往復への 1000 日ミッションである。このような到達地点の延長から、人工重力に対する考えを変えなければならないことが判明してきた。そのため、ワークショップが開かれ、人工重力研究に対する国際合意をする必要がでてきた。そして技術的にも宇宙船をどのように回転させるかという実用性を議論する必要がでてきた。

### 4. 人工重力の必要性

実際、宇宙計画の早期における多くの火星ミッションは、人工重力を勧奨している。ほとんどは、回転体を宇宙船の中に設置するという方法をとっている。しかし現在ではこの方法は、その技術困難性と採算、エネルギーの面から推奨できない。回転体の中で生活し、火星などの表面で非回転生活を行い、さらに帰還時には回転するという生活が、地球上の 1 G に再適応できるか、という問題点は、今のところ、誰もわからない。最近の研究により短腕式の回転体中での高頻度回転に、人体は適応できるという示唆が行われた。したがって宇宙船を回転するという方法より、生活居住空間に短腕式遠心機を設置し、人工重力を治療的に供給するという考えが主流となってきた。これなら、簡便で、デザインとしても可

能ではないだろうか。

運動負荷は、現在の宇宙飛行における主要な骨格筋系、心循環系、骨代謝系に対する対抗措置として採用されているし、感覚運動系にも有効かもしれない。ISS 計画の中でも、十分な運動を行えば、上記4系の対抗措置となり得ることが、証明されている。これまでの研究で、筋骨格系や心循環系への影響が最適なプロトコルは、いわゆる **Sprint protocol** と呼ばれるもので、これは筋トレと有酸素運動を組み合わせる運動処方である。エルゴメーター、トレッドミル、さらには **Advanced resistive Exercise Device, ARED** と呼ばれる機械を組み合わせ、270 kg (600 ポンド)までの体重負荷に耐えるように作られている。2014 年のデータ (Ploutz-Snyder) によれば、ARED の使用で、筋力、骨電解質密度、骨強度は、亢進するとのことである。

LEO の長期間宇宙飛行時に運動を対抗措置として使用する現在のデータによれば、**Sprint** のようなプロトコルを使用すれば、火星往復の期間ぐらいならば、筋力、骨強度、筋操作性、有酸素運動能力を維持することは可能であろう。しかしそれに人工重力を加えることで、運動プログラムをより効率的にし、航行中の搭乗員の時間を無駄に使用しないと思われる。

長期間の深宇宙有人探査において、運動処方は必須であるが、人工重力を負荷することが宇宙飛行重量、出力、時間などを減らし、運動をより効率的にすることになるかという疑問は残る。多くの宇宙機関が深宇宙への有人ミッションを考える上では、人工重力は必須であるため、搭乗員への至適処方を研究開発し、生理学および人体要因について考慮する必要があると考えている。

## 5. 人工重力の要素

### 5-1) 定義

現在までに連続的人工重力を発生させるには、遠心力を利用した重力印加が最至適と考えられる。それには、①宇宙飛行船を、中心周りに回転させる、②2つの宇宙船を結合させ、真ん中を軸として回転させる、③宇宙船内に短腕式遠心機を設置する、の3案が考えられる。

### 5-2) 重力レベル

負荷する最低の重力レベルをどの位にするかは、重要な要因となる。通常は遠心機の縁で測定するが、心循環系を重視する研究者は心レベルでの測定を基準とする。

### 5-3) 重力勾配

回転体の中での遠心力は、身体における軸に近い側と縁に近い側で差が生ずる。これを重力勾配というが、 $p=d/2(h^2-r^2)\omega^2r$  ( $h$ : 軸から足先の距離,  $r$ : 軸から頭の距離,  $\omega$ : 角速度)で与えられる。しかし、無重量の影響を大きく受けるのは、足先の血管であるため、この勾配もむしろ有利に働くのではないかと考えられる。

### 5-4) コリオリ力

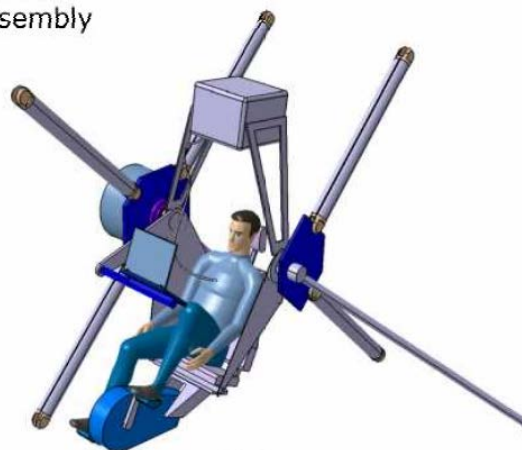
回転開始時と終了時には、コリオリ力が働くが、それほど大きな影響はないと考えられている。

## 6. これまでの宇宙研究における人工重力

短腕式遠心機に関しては、多くの研究がこれまでに行われてきており、特に地上研究では、IBMP の研究や NASA の研究が知られている。一方で、実際に搭載する遠心機では荷重の問題もあって、あまり、実行に移されなかったが、IMAG プロジェクトが2005年に提案された。このプロジェクトは残念ながら中止された。

2009年、ヒトの遠心機計画が筆者を中心に提案され、AGREE プロジェクト(Artificial Gravity with Ergometric Exercise)と呼ばれた。本計画は初めて人工重力が有効であることを無重力下で試験するものであったが、回転振動がISSに悪影響を及ぼすというボーイング社からの危惧により、残念ながら中止された。

Assembly



## 7. 将来的ロードマップ

2014年2月19-20日、NASAのAmes Research Centerにおいて、International Workshop on Research and Operational Considerations for Artificial Gravity Countermeasuresが行われた。世界各国から人工重力研究者が集まり、宇宙飛行における人工重力の現状について報告が行われた。筆者は、演題を発表し、さらに Artificial Gravity with Exercise Group のメンバーと研究打ち合わせを行



った。その結果が NASA Evidence Report として発表された。それに基づき、2016 年、2 月 12 日、Texas の Galveston において The International

Roadmap for Artificial Gravity Research が開催され、筆者も日本における人工重力研究の現状について発表し、将来的なロードマップが提唱された。

Gap	Objective	Platform	Task	2016				2017				2018				2019				2020				2021				2022				2023				2024				> 2024			
				1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4				
1	AG Level	Earth	G dose-response in plants using RPM																																								
			G dose-response in cell cultures using RPM																																								
			G dose-response in cell cultures using bioreactor																																								
			G dose-response in rodents during SRC																																								
			G dose-response in rodents during development																																								
		Analog	G dose-response using computational models																																								
			G dose-response in rats during suspension																																								
			G dose-response in humans during suspension																																								
			G dose-response in humans during water immersion																																								
			G dose-response in humans during head-up tilt (HUT)																																								
		ISS	G dose-response in humans during parabolic flight																																								
			G dose-response in plants using EMCS on board the ISS																																								
			G dose-response in cells using Kubik on board the ISS																																								
			G dose-response in cells using Biolab on board the ISS																																								
			G dose-response in mice using MHU on board the ISS																																								
		G dose-response in rats using RCF on board the ISS																																									
2	Mars Gravity	Earth	Martian gravity in humans during body unloading																																								
			Martian gravity in humans during HUT bed rest																																								
			Martian gravity in returning ISS crew during HUT																																								
		CubeSat	Martian gravity in bacteria during AG in CubeSat																																								
		ISS	Martian gravity in rats using RCF on board the ISS																																								
3	AG Duration	Earth	Intermittent rotation in rats after SRC on Earth																																								
			Intermittent rotation in rats during SRC on Earth																																								
			Intermittent rotation in humans during HDT bed rest																																								
			Intermittent rotation in humans during dry immersion																																								
			Intermittent rotation in osteoporotic patients																																								
			Continuous rotation in humans in live-aboard habitat																																								
		CubeSat	Continuous rotation in bacteria during AG in CubeSat																																								
ISS	Intermittent rotation in rats on board the ISS								</																																		

提唱されたロードマップ

AG	Artificial gravity		HRP AG Research Plan
CCA	Cross-coupled angular accelerations		Added after AG Workshop
DSH	Deep Space Habitat		
EMCS	European Multicultivation System		
HUT	Head up tilt		
HDT	Head down tilt		
ICP	Intracranial Pressure		
ISS	International Space Station		
LRC	Large radius centrifuge		
MHU	JAXA Mouse Habitat Unit		
RCF	NASA Rodent Centrifuge Facility		
RPM	Random Positioning Machine		
SRC	Short radius centrifugation		
SRR	Slow Rotating Room		
VIIP	Visual Impairment due to Intracranial Pressure		

この表の 4 の Health の場所に、短腕式遠心機を人工重力として使用し、長期の生理的デコンディショニングを防止する計画が記載されている。特に、脳圧に及ぼす影響や、視力障害に対する影響が付け加えられ、交叉結合性角速度（コリオリ力との相互関係）についての研究を進めるべきであるという示唆は、興味深い。NASA により提唱されたロードマップが順調に進んでいくのを祈るのみである。

## 6. おわりに

人工重力研究の歴史と展望について述べた。これまでに行われている IMAG プロジェクト、AGREE プロジェクトの中断は残念なことであったが、これから 10 年のロードマップが示されたことは僥倖であった。JAXA の協力の下、これからの日本における人工重力研究を進めていきたい。