

ベッドレストによる宇宙飛行デコンディショニングに対する人工重力の有用性—人工重力プロジェクトへの参加

愛知医科大学 生理学第2 岩瀬 敏, 菅屋潤壹, 高田宗樹
循環器内科 伊藤隆之

名古屋大学総合保健体育センター 石田浩司, 秋間 広, 片山敬章

聖隷クリストファー大学 看護学部 渡邊順子

日本大学医学部社会医学 平柳 要, 岩崎賢一, 塩澤友規

早稲田大学 福永哲夫, 増尾善久

金沢大学教育学部 増田和実

名古屋工業大学 下村吉治

聖マリアンナ医科大学 耳鼻咽喉科 肥塚 泉
神経内科 加茂 力

国立健康・栄養研究所 石見佳子

国立感染症研究所 布施 晃

Effectiveness of Artificial Gravity on Space Flight Deconditioning Induced by Bedrest—Participation in International Multilateral Artificial Gravity Project

Satoshi Iwase, Junichi Sugeno, Hiroki Takada

Department of Physiology, School of Medicine, Aichi Medical University
Takayuki Ito

Department of Cardiology, School of Medicine, Aichi Medical University

Koji Ishida, Hiroshi Akima, Keisho Katayama

Research Center of Health, Physical Fitness, and Sports, Nagoya University
Yoriko Watanabe

Department of Nursing, Seirei Christopher College

Kazumi Masuda

School of Education, Kanazawa University

Yoshiharu Shimomura

Nagoya Institute of Technology

Izumi Koizuka (Department of Otorhinolaryngology),

Tsutomu Kamo (Department of Neurology)

St. Marianna University School of Medicine

Yoshiko Ishimi

National Institute of Health and Nutrition

Akira Fuse

National Institute of Infectious Disease

Abstract: An apparatus for artificial gravity and ergometric exercise load was manufactured. Using this apparatus, we examined how artificial gravity is effective to prevent spaceflight deconditioning induced by simulated weightlessness using bedrest. Based on this results,

an international project, named International Multilateral Artificial Gravity Project was proposed by NASA, IBMP, and DLR. Using this opportunity, we would like to re-set the apparatus in Aichi Medical University, and co-operate to the international project employing the same protocol of bedrest studies adding the exercise load to artificial gravity.

1. はじめに

人工重力は、遠心力を利用して、回転体の中のヒトを含む生物に重力を負荷するもので、無重力状態となる宇宙飛行中に起こるデコンディショニングを予防する対抗措置として用いられる。

日本における人工重力研究においては、最初は長腕式の 6~9G の重力加速度が負荷できるタイプが開発され、高 G に対する耐性を訓練できるようにしたものであった。その後、スペースシャトルやミールによる宇宙飛行が可能となった後は、短腕式の宇宙船に搭載可能な人工重力負荷装置が考案され、1990 年代の初頭に、日本大学医学部宇宙医学研究室の谷島一嘉らにより製作されたゴンドラタイプの人工重力負荷装置が、本邦初の無重力状態に対する対抗措置としての実用的な人工重力装置と言える。

その後、谷島のアドバイスのもと、筆者らは 1990 年代の後半から 2000 年代の初頭にかけて、棒型の人工重力および運動負荷装置を製作した。

2. 棒型人工重力負荷装置の成果

本装置を用い、筆者らは 3 回のベッドレストを行って、2002 年の Stockholm における第 23 回国際重力生理学会に発表し、注目を集めた。そこで、マサチューセッツ工科大学の Lawrence Young にアプローチを受け、その装置の概要と成果を話したところ、非常に興味を持ったようである。

3. Vancouver における国際宇宙飛行会議

2004 年になり、Young から Vancouver での国際宇宙飛行会議で、人工重力の講演を依頼され、ワークショップでこれまでの成果を報告した。この会議において、Young を議長、谷島を副議長とした作業部会が結成され、岩瀬もその一員としてこの作業部会に協力することになった。その場で国際多面的人工重力プロジェクトの合意が報告され、プロジェクトの概要が披露された。

それによると、人工重力プロジェクトにより決められなければならない事項として、人工重力を、骨、筋、循環器、神経、前庭系、等の有効な対抗措置とするために、

① 生理的機能を維持するためには、どれくらいの人工重力が必要なのか

- 1) 生理的閾値はどのくらいの有効重力なのか
- 2) 飛行中に必要な最低重力、至適重力はどれくらいなのか

3) 月面上、火星上で、人工重力は必要なのか

② 回転遠心器の許容あるいは至適 回転半径と角速度はどのくらいなのか

1) 回転性の人工重力の生理的結果のうち、不都合はあるのか

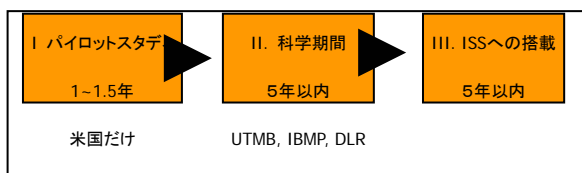
2) 角速度および g 傾斜等の生理的限界はどのくらいなのか

3) 間歇的適用の至適頻度はどのくらいなのか

③ 人工重力を補助するために必要な附加的対抗措置には何があるか

ということを決める必要がある。

現在のところ、国際多面的人工重力プロジェクトの予定は、以下のものであり、



パイロットスタディのフェーズが、1~1.5年、科学探索の期間が5年以内、そして、国際宇宙ステーションへの搭載を5年以内で行う予定である。

パイロットスタディは、現在のところ、アメリカのテキサス大学医学部（University of Texas Medical Branch）において、科学探索は、テキサス大学医学部、ロシアの医学生物学問題研究所（IBMP）そして、ドイツの宇宙航空医学研究所（DLR）において行う予定である。

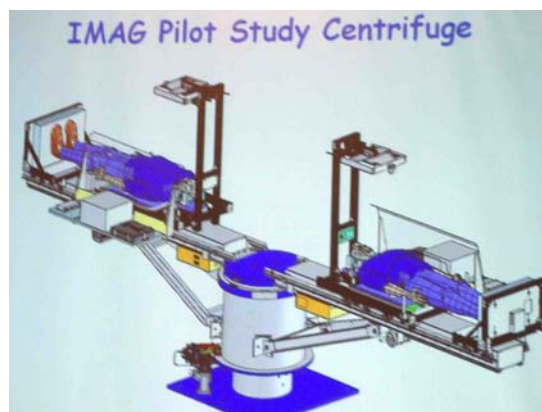
そして、この期間において、以下の5項目の検査を行うことになっている。それは、

- ①骨、筋、循環器、神経に対する処方—間歇的人工重力を使用
- ②人工重力の至適（頻度、 g 、 ω 、期間、運動、つまり、重力加速度の大きさ、遠心器の角速度、どれくらいの頻度で、どれくらいの長さ、負荷をかけるか、さらにどれくらいの運動負荷をかけるか、という諸項目を決定する）
- ③Z軸方向への重力の閾値、すなわち、どれくらいの大きさの重力加速度が足方向に加わると、どれくらい耐えられるかという限界を確認すること。
- ④ヒトの順応能力の検査、足方向への重力の閾値は、負荷を繰り返すことにより増加するかを確認すること。
- ⑤飛行テストへの準備（処方、効果、前庭反応、つまり、③の条件がどれが指摘であるか、それがどのくらいの効果があるか、回転負荷の前庭反応はどれくらいで、それがどのくらい乗員の作業に影響するのか。

である。

すでにパイロットスタディは開始されており、主任研究員に William Palloski が選ばれている。L. Young が共同研究員、そして、骨、筋、心循環器、神経、栄養、免疫、心理、生物静力学の8チ

ームが構成されている。



国際多面的人工重力プロジェクトにおいては、上記のような遠心器を使用する予定であるが、これは、筆者らが製作した遠心器を両側に構えた方式となっており、すでにこれは完成しているとのことである。

第1フェーズにおけるパイロットスタディについては、すでに終了しており、その内容は、以下のように規定されていた。

被験者は、宇宙飛行士の候補者から選択され、半数が男性、半数が女性で、16名をコントロール群、16名を人工重力負荷群とした。デコンディショニングの刺激としては、 -6° 、21日間のヘッドダウンベッドレストとし、対抗措置は、足先で $2.5g$ とした。

下の写真は、実際の人工重力負荷装置である。



これに対し、筆者らは2つの問題点を提議した。1つは、足先ではなく、心臓における負荷重力で標準化すべきである、という点である。これは被験者の身長が異なる点を補うためである。もう1つは負荷重力が中心から離れるに従って、大きく

なる重力勾配は、むしろメリットであるという点である。これは、心循環系デコンディショニングの原因の1つとして、下半身の血管反応性の低下が挙げられるため、その低下を補うためには、下半身により強い負荷重力がかかる方が有利であると考えられたためである。この提議は、次期のGrazにおけるHuman in Space Symposiumにおいて討議されることになった。

骨の評価は、DEXA, pQCT, MRI, BMD, さらに形態を評価した。筋の評価は、ヒラメ筋のバイオプシーによる組織型, 等張性運動, MRIによる形態の評価, 心循環器系は、ティルト, 起立耐性, 酸素摂取量により評価, 神経は平衡能検査により, さらに免疫系, 心理テスト, 栄養の臨床的評価を行った。

国際多面的人工重力プロジェクトの目的として、提案の有効性の立証と方法論の確立の2点に絞った。まず、提案の有効性として、①被験者選択の基準, ②医学的モニタリングの必要性, ③医療的対抗措置の方法性, ④実験制御の方法論, ⑤各系の評価法の標準化の5点に関する立証を検討する予定である。方法論の確立としては、対抗措置としての有効性の確立を目的として、21日間-6°ベッドレストにより誘発される①骨粗鬆症, ②筋萎縮, ③心血管系デコンディショニング, ④前庭系の変化という問題点が、短半径, 間歇的人工重力負荷により解決できるかという点を評価することである。

3. GrazにおけるHuman in Space Symposium

2005年6月にAustriaのGrazにおいて、Human in Space Symposiumが開催された。ここでも、人工重力の作業部会が開かれ、筆写が出席した。ここでの問題は、上述の負荷重力の基準点と重力勾配であった。幸い、筆者らの主張が受け入れられ、作業部会の提案書には基準点は心臓に、重力勾配はメリットであると記載されることになった。

4. Kölnにおける第26回国際重力生理学会

同学会においては、シンポジウムの1つとして、人工重力が採用され、筆者はシンポジストとして日本における人工重力研究とその成果について発表した。

5. 福岡における国際宇宙飛行会議

2005年11月、福岡において国際宇宙飛行会議が開催され、ここでも作業部会が開かれ、最終提案書が採択された。この会には、谷島と筆者が参加した。

6. 遠心器の移設と新ベッドレストプロジェクトの発足

これまで名古屋大学に設置されていた遠心器は、筆者の愛知医科大学への異動に伴い、同大に移設された。新しい研究班も発足し、本年国際多面的人工重力プロジェクトに沿ったプロトコルを用いて、ベッドレストが行われる予定である。日本が国際的にリードしてきた人工重力の分野で、さらなる研究の発展が期待される。

References

1. Hirayanagi K et al. Med Sci Monit 11: CR570-575, 2005.
2. Iwase S. Acta Astronaut 25: 2631-2638, 2005
3. Akima et al. Aviat Space Environ Med 76: 923-929, 2005
4. Iwasaki et al. Eur J Appl Physiol 94: 285-291, 2005
5. Iwase S et al. J Gravit Physiol 11: P243-244, 2004
6. Katayama K et al. Aviat Space Environ Med 75: 1029-1035, 2004
7. Hirayanagi K et al. Auton Neurosci 110: 121-128, 2004