

AGREE プロジェクトの進展：人工重力＋運動の効果に関する多国間協力計画

岩瀬敏、西村直記、菅屋潤壹、William H. Paloski、Laurence R. Young、Jack J.W.A. van Loon、Floris Wuyts、Gilles Clément、Jörn Rittweger、Rupert Gerzer、James Lackner

Progress of AGREE (Artificial GRavity with Ergometric Exercise) Project — Multilateral Project on the Effectiveness of Artificial Gravity with Exercise

Satoshi Iwase, Naoki Nishimura, Junichi Sugeno, William H. Paloski, Laurence R. Young, Jack J. W. A. van Loon, Floris Wuyts, Gilles Clément, Jörn Rittweger, Rupert Gerzer, James Lackner
Aichi Medical University, Nagakute, 480-1195
E-Mail: s_iwase@nifty.com

Abstract: AGREE proposes the first in-flight testing of the effectiveness and acceptability of short radius artificial gravity (AG) as a countermeasure to human deconditioning on orbit. The concept is a very old one, although the implementation using a short radius centrifuge is relatively new. The ground based research supporting the in-flight AG validation we propose has been extensive, and includes research at ground centrifuges under the direction of the members of the investigator team in Nagoya/Nagakute, Houston/Galveston, Boston, Antwerp, Köln and Toulouse. We propose to use the unique opportunity of testing astronauts on the ISS for this purpose. In order to appreciate the deconditioning problem which AG is designed to alleviate, we summarize a few of its more important aspects.

Key words: International Space Station, Space deconditioning, artificial gravity,

1. はじめに

AGREE プロジェクト(Artificial GRavity with Ergometric Exercise) 計画は、短腕遠心機による人工重力の有効性と受容性の宇宙飛行中における最初の試験を軌道上のヒトデコンディショニングに対する対抗措置として提唱するものである。短腕遠心機を使用するという実施は比較的新しいものであるが、概念は非常に古いものである。この研究を支持する地上研究は、多施設により行われている。提唱されている飛行中の人工重力の検証は、精力的に行われ、多くの研究が地上設置の遠心機により行われている。

本計画は、2009年に「ISS利用ライフサイエンス及び宇宙医学分野国際公募」が、ヨーロッパ宇宙機関が中心になって実施され、2010年6月に採択されたものである。本稿においては、その採択から「実験科学的要求」の提出に至るまでのどのように準備が進められていったかを記載するものである。

2. NASAからの提案とAgencyの役割について

2010年6月9日、JAXAから通知があり、9月11日、最初の調整会において、agency間の合意状況についての説明があり、JAXAはHTVを利用して打ち上げる、ESAはハードウェアの開発、NASAは設置場所の提供を行うと合意された。NASAからの検討状況について、次シャトルでPermanent Multipurpose Moduleを打ち上げ、本装置の設置候補場所として提供されると説明があった。

9月27日から10月1日にかけてチェコのプラハで行われたInternational Astronautical Congress

2011においてAGREEプロジェクトについて発表した。さらに平行して行われたScience Team Meetingにおいて、NASAからの提案について話し合われた。一定回転速度の問題については、バッテリー補助回転装置を導入することと、連続可変ギアの使用を提案することになった。運動様式については、エルゴメーターのみでなく、側関節回転方式も検討することとした。データシェアリングは、検討課題とした。ESAより実際のモデルが供給されるのは2012年度になろうと報告があった。

同年10月26-28日に幕張テクノガーデンで開催された第39回ISLSWG(International Space Life Science Working Group)会合で、27日にプロジェクトの概要について説明した。

3. 第1回国際ワーキンググループ会合

2011年1月26-27日、東京宇宙フォーラムにおいて、国際ワーキンググループ会合が行われた。科学者グループからは、岩瀬、西村、Paloski、Young、Wuytsが出席し、以下の項目が決められた。①恒久多目的モジュールに遠心機を設置することにした。②実施の可能性については、次期IWGに延期する。③研究者グループは実験科学的要求ESRを2月末までに作成することにした。④第2回IWGは5月から6月の期間にオランダのESTECにおいて開催することにし、それまでにESRを完成させることにした。⑤研究者グループは、暫定的なプロトコルを作成した。⑥各機関は第2回IWGに向けて実施するかどうかの決定を進行させることにした。

4. パリにおける研究者会合とヒューストンにおける ESR の進行

研究者グループは、2011 年 3 月にパリで行われた IAA (International Astronautical Association) Spring Meeting に際して、会合を開き、ESR の完成について討議した。さらには同年 4 月にヒューストンで行われた IAA Human in Space Symposium において集まり、ESR の内容について討議を進めた。さらに次期 IWG の日程を決定した。

5. ESTEC において開かれた第 2 回国際ワーキンググループ会議

同年 6 月 23-24 日にオランダの Noordwijk にある European Space Research and Technology Centre (ESTEC)において、第 2 回 IWG が開催された。ここでは ESA から PMM 内における遠心機の設置モデルが示された。

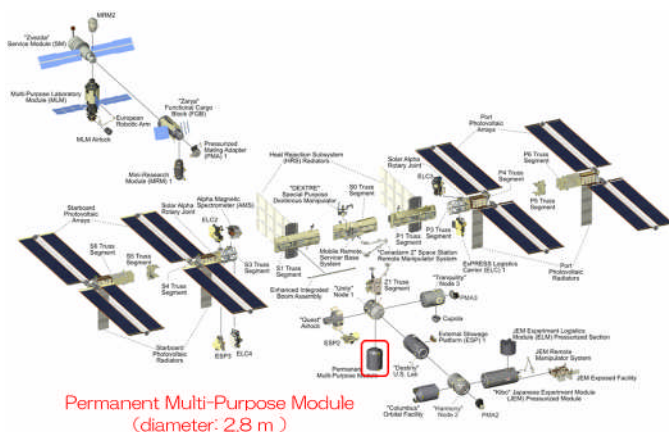


Fig. 1. Site of Permanent Multipurpose Module in the International Space Station

上記のように PMM の中に設置することが予定され、その設置の様子は、以下のような状態になることが示された。また、その回転部は、その下の図のように設置されることが示された。

それに対し、科学サイドから、質問が行われ、詳細な仕様について検討が重ねられた。

実験科学要求書の明確化

1. 体液移動に伴う重心の移動を考慮すべき。1G で最大 1 kg の 1 m の移動が 30 分で、0.5 kg の 0.2 m の移動が胸腔内から腹部に 1 分で起こる。
2. 被験者に応じた座席、頭部位置を迅速に行えるように仕様を整える。ハンドル位置、肩角度、肘角度を 0°から 90°まで可変とする。科学的要求として、背方向へのリクライニングを最大 170°まで可能とする。頭部の重心を回転軸から 0.3 m 以内に納める。可能ならば回転軸よりも

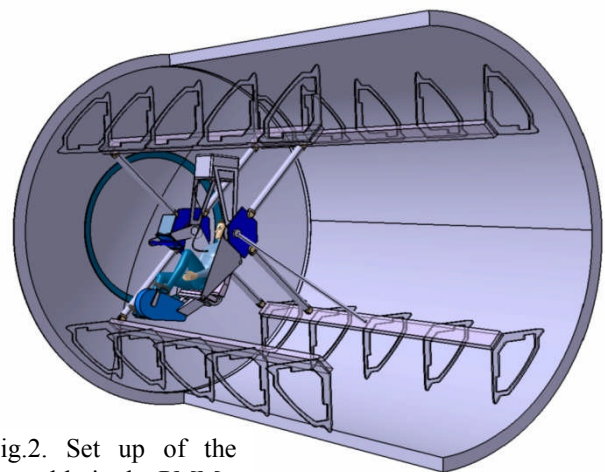


Fig. 2. Set up of the assembly in the PMM

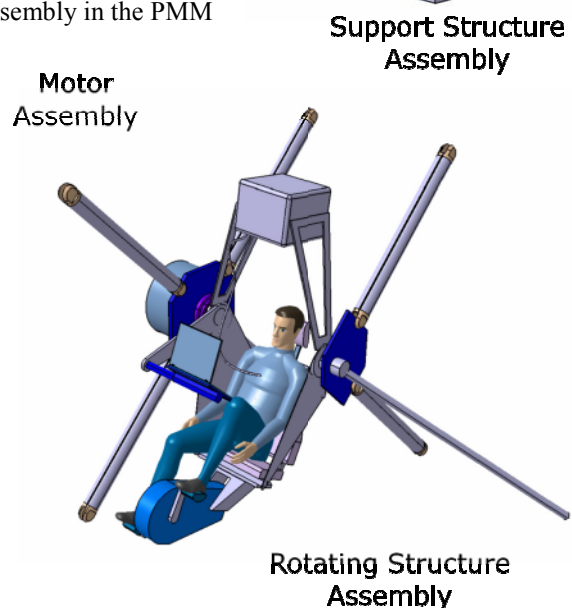


Fig. 3. Structure of the assembly

下方に設定できるようにする。座席の高さ、位置を放射線上、接線方向上の両方向に設定可能にし、頭部角度、頭部支持部の高さも同様に設定可能とする。可能なら足部とペダルを固定できるようにし、クランク内の力を測定できるようにする。

3. 加速、減速のセッティングを通常は $10^\circ/\text{s}^2$ で $5 \sim 15^\circ/\text{s}^2$ に設定可能とする。
ピッチ方向（風が顔に当たる方向）に $60^\circ/\text{s}^2$ の加速度においては見当識障害を起こさない。それ以上だと起こす可能性があるし、それ以下ならば問題はない。両耳軸を軸とした回転は、前方向（顔に風）や後方向（後頭部に風）の両方ができるようにする。身体を座席に固定するシステムを強固にする。
4. 眼球運動をビデオ記録する。運動中の心拍数、エルゴメーターの負荷、回転スピード、遠心スピードをフィードバックする。また、臀部にお

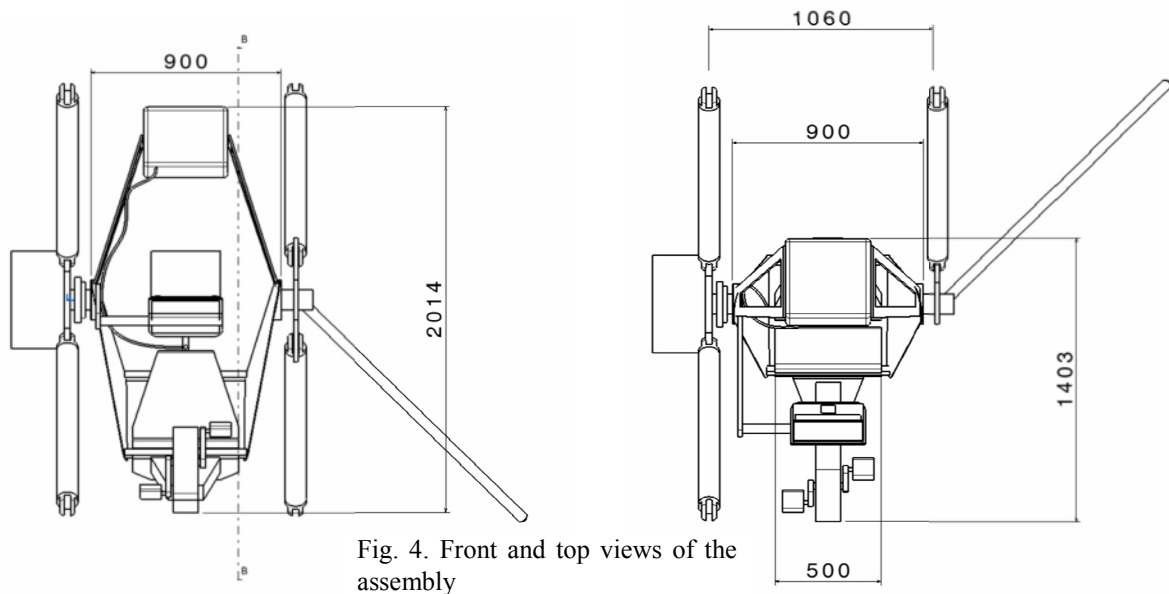


Fig. 4. Front and top views of the assembly

Front view

ける 3D 加速度計を設置し、体幹にかかる加速度を計測する。

5. 被験者のモニタリングを以下のように行う。評価回転時に、心拍数を心電図（三電極で）、持続的血压波、4 筋（ヒラメー腓腹筋、前脛骨筋、大腿四頭筋、ハムストリング）の筋電図、呼吸（レスピトレース）のモニタリングを行う。可能ならば前頭葉赤外線スペクトロメーターによる脳血流量測定を行う。無線あるいはスリッティングを利用した 30 チャンネルのモニタリングを行う。モニターはラップトップコンピューターあるいはヘッドマウントディスプレイによる。

6. San Jose における Science Team Meeting

2011 年 11 月に国際重力生理学会と米国微小重力学会が開催された際に、科学チームが集まって実験科学要求書 (ESR) を完成させるための討論を行った。さらに、NASA の ASCR (Astronaut Strength, Conditioning, and Rehabilitation) により、対抗措置プログラムとしての良好な評価を得たため、このプロトコルを科学者側としては採用することにした。

また、飛行時におけるモニタリングの検討を行い、科学チームとしての合意を以下のように得た。

- 心循環器系と体温調節系の評価
- 心エコー
- 有酸素運動能力の評価
- 筋容量の MRI による測定
- 身体傾斜の知覚評価
- 骨代謝の測定
- 免疫学的評価
- マイクロニューログラフィによる交感神経活動記録

Top view

以下に ASCR より示された推奨プロトコルを示す。

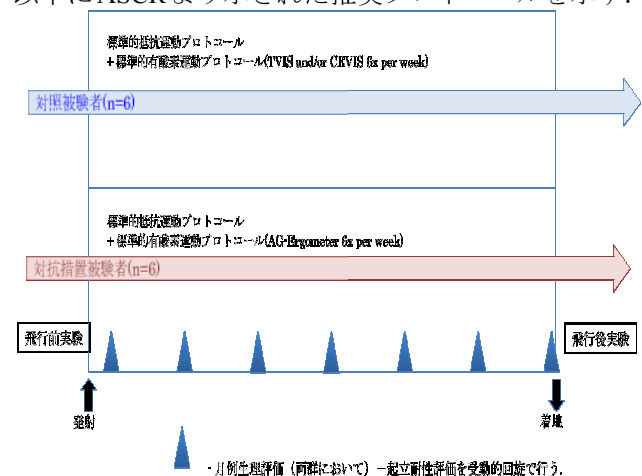


Fig. 5. Training Protocol on ISS

本プロトコルは、科学側が提唱したプロトコルよりもさらに宇宙飛行士にトレーニングを要求するが、科学側としては本プロトコルよりも好ましいと考える。

仕様も以下のような要求を行った。

- 回転速度: 最大回転速度は、60 rpm (360 deg/sec) で、回転中心から心臓までの距離を 30 cm としたとき、心レベルで 1.2 G の人工重力負荷ができるものとする。
- 自転車エルゴメーターと足置きの様子は準備的なものとし、準備段階において追加的な運動装置も考慮するものとする。
- 重力レベルと運動負荷は被験者が制御できるものとする。被験者が受け取る表示には、心レベルにおける印加重力、遠心機の数値、エルゴメーターの負荷、心拍数とする。遠心機の数値とエルゴメーターのトルクは被験者が調節できるものとする。

- 飛行中の遠心機走行中のデータ収集は、国際宇宙ステーションのコンピューターシステムに記録するものとし、次の試験までに装置機能異常の補正を可能とするため、地上での解析のためのダウンロードは、1日で完了するものとする。

さらに以下の宇宙医学上の問題点も検討された。

- 「宇宙酔い」：Skylab M131 の回転椅子の所見からは、おそらく問題にはならない。
- 回転時の失神時：可能性はあるが、エルゴメーターによる対抗措置を伴ったベッドレスト時の回転時の状況からは、その確率は低い。しかし、訓練や自動的なモニターにより防止可能である。
- 信頼性：地上からあるいは遠心機搭乗者以外の別の搭乗員による実時間モニターとしての日常的な操作としては、実際のでないかもしれないが、最初あるいは2回目の遠心機回転時(少なくとも第1回目では)地上あるいは別の搭乗員によるモニタリングはおそらく有用で必要ではないかと思われる。
- 有効性：地上研究からは、循環器系の状況(有酸素運動能、起立耐性)、筋能力(筋力、筋耐久力)、感覚運動能力(身体感覚制御、バランス、運動)、さらに骨構造は、対照と比較して、より優れたものとなっている。
- 飛行中の定期的な運動能力の評価をすることで、心循環器系の状態の推移を知ることができ、もし必要なら訂正もできる。
- その他の指摘すべき点
 - 2か月後のトレッドミル訓練が減少する(現状の基準からいって)という着陸後の神経筋・運動能力の評価
 - 実時間モニタリングの忠実性。
 - 搭乗員に要求される時間—医療作業と科学との兼ね合い。
 - AGREE 計画に対する地上準備研究の質と徹底性

以上の検討をもとに、科学チームは次年度においてプロトコルを練ることにした。

7. 次年度への検討

その後、JAXA との検討を経て、以下の検討が行われていることが判明した。(2012年1月27日現在)

1. International Space Life Science Working Group における検討内容概要について

1) NASA の ASCR のレビューによると、医学運用側からは大きな問題は認められず、本テーマをおおむね支持する、との報告があった。

2)しかし、NASA によっては問題ないとされた ISS 装置の観点でボーイングが構造等への評価を実施したところ、アクティブな振動制御システムが必要と

され、開発コスト、スケジュールへの影響が大きな懸念となっているとの報告があった。

3) 簡易的な環境制御生命維持システムによる分析によると、PMM (永久的多目的モジュール) 内で宇宙飛行士が運動する際の熱や CO₂ については基本的には大きな問題はないとされた。

4) ESA (ヨーロッパ宇宙機関) が年末に予定していた企業による詳細検討はまだ実施されていない。

とのことであった。

一方で、来年度においては、打ち上げ用の遠心機と同様の仕様の遠心機を作成し、ベッドレストを行うことを予定している。本遠心機については、共同研究者の西村による報告を参照されたい。

改訂前の要求書 (ESR) においては、運動負荷として自転車エルゴメーターのみが記載されていたが、地上実験の結果から足関節を動かす運動 (プッシュアップ) を加えた方が下腿筋に及ぼす運動効果が大きいことが示唆されたため、装置をそのような仕様に要求することにする。

8. おわりに

1年半にわたる検討を経て、ようやく ISS human centrifuge の仕様が完成した。このように6か国からのチームを編成し、それをまとめていくには、連絡と忍耐と説得の繰り返しであることを十分に認識した。日本発の各国をまとめる研究がこれからも提案されることを期待したい。