

第7章 ハイブリッドトレーニングシステムの運用評価

志波 直人¹、山田深²、大島博²

1. 背景

南極観測隊は、重力の有無という大きな差はあるが、遠隔で極限的な閉鎖環境で活動を行うという点で宇宙飛行士との類似点がある。また、冬季には基地内での生活を余儀なくされる中で、隊員の活動性低下も懸念されることから本研究が計画された。

2. 目的

南極観測隊員から被験者を募り、日本宇宙フォーラムの公募地上研究において宇宙環境での利用が期待され開発された、ハイブリッド訓練装置(HTS)を一定期間使用し、1)HTSの効果を検証するとともに、2)遠隔地の極限的な閉鎖環境における運用の問題点等を確認する。

3. 対象・方法

JAXA 有人倫理委員会の承認を得た。被験者：第50次南極観測隊員から被験者 10 名、平均年齢 36,9 歳。トレーニング：週3回、1回19分間のいす座位交互膝屈伸を行い、全16週間を実験期間とし、前半8週間を通常の座位膝屈伸運動、後半 8 週間を HTS による膝屈伸運動とした。評価：実験開始前から 16 週まで 4 週毎、体重、体脂肪率、下肢筋力、大腿周径を計測した。

4. 結果

障害発生は無かったが、10名の被験者のうち4名で、通常業務により完了できなかった。実験を完了した6名の評価では、筋力は膝屈曲筋力が HTS 後、約45%増加していたが、膝伸展筋力、大腿周囲径、体重、体脂肪に明らかな変化は見られなかった。幾つかの装置の不具合の報告とともに、操作性の改善等、被験者からの意見や要望があった。

5. 考察

南極の長期閉鎖環境においても、HTS は有害事象発生無く、実験を終了した。閉鎖環境下での評価方法の確立とともに、長期のトレーニング継続のために、モチベーションの維持は重要な要素であり、装置の装着性、操作性の向上も不可欠である。今回の南極での実験の成果を受けて、今後の国際宇宙ステーションの無重力環境や、低重力環境下である月面長期滞在などでの実用化に繋げたい。

¹ 久留米大学

² 宇宙航空研究開発機構宇宙医学生物学研究室

はじめに

宇宙の微小重力環境では、筋肉や骨は重力による力学的な負荷が減少するため著しく萎縮する。その予防は長期間の宇宙滞在のために解決すべき重要課題と位置付けられている。この対策として、平成14年から「宇宙環境利用に関する公募地上研究制度(JAXA、日本宇宙フォーラムの助成)」により、宇宙環境でも使用が可能なハイブリッドトレーニングシステム(Hybrid training system: HTS)を考案、装置を開発した(図1)。HTSは通常の電気刺激によるトレーニングとは逆に運動時に拮抗筋に電気刺激を与え主動筋の運動抵抗とするものであり、自発筋収縮と電気刺激筋収縮の混合運動であり、装置がコンパクトという特徴があり、複数の実験で効果が報告された¹⁻⁸⁾。これまでの実験では装置装着やトレーニングの実施において、常に開発グループの医師や理学療法士が実務を担当してきた。しかしながら宇宙環境では、宇宙飛行士自身がトレーニングを実施することになり、極限的な閉鎖環境で使用した際のトレーニング方法や装置の問題点等の運用上の実際が不明であった。

南極観測隊は1年間の任務を実施するが、とくに、極夜が訪れる冬季においては、外出することも困難となる。南極では重力が存在するという、宇宙との大きな違いはあるものの、このような極限的な閉鎖環境、さらには隊員が宇宙飛行士と同年代の健康な方たちであるという、共通点がある。そこで、南極観測隊員から被験者を募り、公募地上研究で宇宙飛行士用での使用を前提として開発されたHTSを一定期間使用し、1)冬季に同トレーニング法の効果を検証し、2)遠隔地における装置運用の問題点等を確認することを本研究の目的とした。

南極での実験の成果を受けて、今後の国際宇宙ステーションの無重力環境や火星探査、低重力環境下である月面長期滞在やなど有人宇宙開発での、実用化につなげることが本研究の意義である。

3. 対象・方法

本研究は、JAXA 有人倫理委員会の承認を得て行われた。対象は十分な説明を受けた後、実験の内容を理解し承諾した、健常男性10名の被験者であった。

1) 実験準備

(1) HTS(アクティブリンク社製)

① 電気刺激装置(図2)

4チャンネルの電気刺激装置を作製した。電気刺激に必要な同数の電線、関節運動感知センサを含む。また、刺激用電極は医用材料として用いられるものを使用した。

② ウェア(ゴールドウィン社製)

電極位置の探索が不要となるウェアを作製した。イス座位での膝屈伸運動を前提として、座位のフィッティングを優先し、端座位姿勢のモデルで採型した(図3)。サイズは3種類とし、前もって被験者を採寸し、被験者の体格に合わせて準備した(図4)。

(2) 筋力測定装置の作製

極地でのトレーニング効果の評価には大きな制限がある。このため、簡易型筋力測定装置ハンドヘルドダイナモメーター(HHD)を利用した筋力測定装置を自作した(図5)。HHDは携帯容易で簡便な筋力測定装置であるが、膝屈伸運動のような大きな筋力では、評価する側の力が被験者の筋力に抵抗して保持できず、正確な測定が困難となる。そのため、膝屈伸筋力測定中に身体を固定して正確な筋力評価が可能な本装置の作製が必要となった。自作した膝関節等尺性筋力測定器の妥当性、信頼性を検証するための予備実験をあらかじめ実施した。対象は、健常成人男性14名(28肢)、平均年齢 22.1 ± 2.1 歳であった。作製した筋力測定装置と、信頼性の高い筋力測定装置 KIN-COM との比較を行った。測定方法は、作製した装置で両脚ともに各3回、KIN-COMの等尺性モードにて両脚の膝関節伸展・屈曲筋力を同様に測定した。結果は、両機器間の関連性に関して、伸展筋力では相関係数 $r=0.77(p<0.0001)$ 、屈曲筋力では相関係数 $r=0.67(p<0.0001)$ であった。また、作製した膝関節等尺性筋力測定器における伸展筋力の級内相関係数は0.95、屈曲筋力の級内相関係数は0.86であった。これらの結果より、自作した膝関節等尺性筋力測定器は再現性のある筋力測定ができると判断、本装置を昭和基地へと搬送して、筋力評価に臨んだ。

(3) DVD マニュアルの作成

被験者説明用に動画マニュアルを作成した。

(4) 観測隊被験者・医師説明

第50次南極観測隊を対象として、平成20年11月13日、国立極地研究所において関係者に概要説明後、書面を作成し隊員に配布して被験者を募るとともに、平成20年12月1日、国立極地研究所において希望する被験者志願者に説明を実施した。

2) 実験の実施

トレーニング: 先行研究¹⁻⁷⁾と同様に条件を設定した。週3回、1回19分間のイス座位交互膝屈伸運動(屈曲3秒、伸展3秒、10回1セット、セット間休憩1分間、計10セット)を行い、前半の8週間をイス座位膝屈伸運動(電気刺激なし)、後半の8週間をHTS使用(図5)とした。

評価: ①トレーニング効果としてトレーニングによる体重、体脂肪率、膝関節90度における膝伸展・屈曲筋力、大腿周囲径(膝蓋骨上縁10cm)、体重、体脂肪率に及ぼす効果を検証した。なお、筋力については自作測定装置を用いそれぞれの評価時に左右3回計測を行い、それぞれの最大値を用いて評価を行った。②遠隔地における装置の運用上の問題点を確認。

評価時期: 全16週間の全トレーニング期間で、訓練前、4週目、8週目(コントロール終了、HTS開始前)、HTS開始4週目、同8週目とした。

統計処理はコントロールでは訓練前のベースラインに、HTSでは8週目のコントロール終了HTS開始前をベースラインとして、それぞれ中間4週目と終了8週目の値を比較し、有意水準を $p<0.05$ とした。

3) 問題発生時の対応について

被験者には評価項目と別に、トレーニング毎に被験者自身がチェックシートに、電気刺激の状態、装置装置の状態、皮膚、筋肉、その他の体調の変化について記載した。また、南極と同仕様様の電気刺激装置 2 組、筋力測定装置 1 台を久留米大学病院に設置して、南極で問題が発生した際に直ちに対応ができる体制を整えた。昭和基地との連絡には e-mail を使用した。

4. 結果

10 名の被験者のうち 6 名が長期実験を完了したが、4 名が除雪作業などの屋外での業務の理由で予定されたトレーニング、筋力評価が途中から行われていなかった。トレーニング中、全ての被験者で皮膚、筋肉の疼痛等の障害発生は無かった。データ解析については、実験が完了した 6 名で行った。

1) トレーニング効果について

前値をコントロールにおけるベースライン、コントロールの 8 週を HTS におけるベースラインとして、運動効果を検討した。HTS では、同トレーニング開始前と比較して、膝屈曲筋力は 4 週で 44% ($p < 0.005$) 増加し、8 週で 45% 増加していた ($p < 0.0005$) (表 1)。膝伸展筋力については有意な変化はみられないものの、4 週でやや増加した後、8 週では逆に 10% 程度低下していた。なお、大腿周径は平均値で 5mm 増加したが有意ではなく、体重、体脂肪率にも変化はみられなかった。

2) 運用上の問題点

以下の 4 つの問題点が明らかとなった。

(1) ウェアと配線の装着性

電極の配線がウェアとは一体ではなく別になっており、煩雑であった。配線をウェアと一体化する検討を要する。

(2) 電気刺激装置操作性と安定性

再現性の無い液晶表示エラー、電気刺激強度低下が発生した。復旧して実験継続は可能であったが、基本的な装置の見直しを要する。

(3) 電極の操作性と安定性

電極の一部にクリップで電線を接続する方法を採用したが、操作が煩雑であり、同部がトレーニング中に外れることもあった。より確実なプラグ式の接続方法が望まれる。

(4) 長期使用でのモチベーションの維持

本来は隊員の余暇・娯楽時間にトレーニングを設定していたためもあり、回を重ねるごとに継続のモチベーションが低下した被験者が存在した。上記の問題点もその原因となっていたが、バーチャルリアリティシステムを採用するなど、娯楽性を付加することも、モチベーションの維持には有効と考えられた。

5. 考察

被験者に何ら障害なしに実験を完了できた。しかしながら、10名のうちの4名で業務の問題でトレーニングとデータ取得が完了できなかった。実験中断の理由は、除雪作業等、屋外での作業によるものがその理由とされたが、トレーニングの継続にはモチベーションの継続が重要であり、そのためには装置の装着性、操作性の向上が不可欠と考えられた。

過去の先行研究では、HTSでは膝伸展筋力は増加していたが²⁾、今回は明らかな増加がみられず、有意差はみられないものの8週で逆に10%程度の低下がみられた。この原因を検討したところ、伸展筋力測定時に、測定器に接する下腿前面が強く圧迫されるために、一部被験者で同部に疼痛が生じていたことが報告された(図4)。このために、十分に本来の伸展筋力が発揮できなかったことが一因と考えられた。一方、屈曲筋力測定では、下腿後面の筋容量の大きな部分(ふくらはぎ)が筋力測定器との接触面となるため、このような現象は起きなかったと考えられた。予備実験では作製した装置は計測結果の再現性が得られたが、被験者の観測隊員の筋力が想定以上に大きく、伸展筋力で予備実験被験者の1.5倍以上あり、パッド部分の緩衝が不十分となり、疼痛を発生したことが伸展筋力測定値低下の主要因と考察した。

先行研究では筋力増加と共にMRIを用いた筋断面・容積計測で、いずれも筋は肥大していた^{1, 2, 3)}。今回の研究ではMRI評価が困難であり大腿周径を計測したが、平均値で5mm程度の増加はみられるものの、有意な増加はみられなかった。とくに大腿部筋肉の発達した被験者では、計測する高さで周径が大きく異なるため、正確な測定の困難さが考えられた。これらは、閉鎖環境下での評価の困難さを示すものであった。宇宙環境においてはさらに制限があり、実施可能な評価方法を検証し確立する必要がある。

体重や体脂肪率に変化がみられなかったが、これには、トレーニング以外にも食事など、生活習慣の影響が大きく、詳細な検討には、これらの条件を整える必要がある。

また、コンピュータとの接続による訓練履歴の自動取得、バーチャルリアリティーによる娯楽性の付加もトレーニング継続のモチベーション維持には重要な要素と考えられる。これには宇宙フォーラム公募研究のパラボリックフライト⁷⁾に用いたシステムが有用と考えられた(図6)。今回の実験結果での問題点をもとに、装置の改良を実施し、現在、実用化に向けた準備が進められているが、HTSはエルゴメータとの併用が可能であり、現在地上での検証実験を実施している⁹⁾。

6. まとめ

南極の長期閉鎖環境において、HTSは有害事象の発生無く、実験を終了した。閉鎖環境下での評価方法の確立とともに、長期のトレーニング継続のために、モチベーションの維持は重要な要素であり、さらなる装置の装着性、操作性の向上も不可欠である。今回の南極での実験の成果を受けて、今後の国際宇宙ステーションの無重力環境や、低重力環境下である月面長期滞在などでの実用化に繋げたい。

7. 謝辞

第50次南極観測隊の10名の被験者の皆様、実験の実施にご協力いただいた、井口まり医師、森川健太郎医師に深謝いたします。貴重な研究の機会を与えていただきました、日本宇宙航空研究開発機構、国立極地研究所の関係者の皆様に深く感謝いたします。

【参考文献】

1. Tojirou Yanagi, Naoto Shiba, Takashi Maeda, Kiyohiko Iwasa, Yuichi Umezu, Yoshihiko Tagawa, Shigeaki Matsuo, Toshiyasu Yamamoto, Kensei Nagata, and Jeffrey R. Basford: Agonist Contractions Against Electrically Stimulated Antagonists, Arch Phys Med Rehabil.. 2003 Jun;84(6):843-8
2. Yoshio Takano, Yoshihiro Haneda, Takashi Maeda, Yutaka Sakai, Hiroo Matsuse, Takumi Kawaguchi, Yoshihiko Tagawa, Naoto Shiba: Increasing Muscle Strength and Mass of Thigh in Elderly People with the Hybrid-Training Method of Electrical Stimulation and Volitional Contraction. Tohoku J Exp Med, 2010, 221 (1): 77-85
3. Hiroo Matsuse, Naoto Shiba, Yuichi Umezu, Takesi Nago, Yoshihiko Tagawa, Tatsuyuki Kakuma, Kensei Nagata, and Jeffrey R Basford: Muscle Training by Means of Combined Electrical Stimulation and Volitional Contraction. Aviat Space Environ Med 2006; 77: 581-585.
4. 志波直人:宇宙環境で有効な骨格筋維持装置開発の研究.—微小重力でトレーニング可能な着衣組み込み型装置の開発—JAXA/JSF 宇宙環境利用に関する公募地上研究ニュース.Vol.11. 7-8, 2009. <http://www4.jsforum.or.jp/news/gbran11.pdf>
5. 志波直人,松瀬博夫,吉光一浩,田川善彦:宇宙環境で有効な骨格筋維持装置開発の研究—ハイブリッドトレーニング法による Wearable device の開発研究—<尖端シンポジウム>宇宙からみたりハビリテーション医学. Jpn J Rehabil Med 2009; 46(12): 758-763
6. Kazuhiro Yoshimitsu, Naoto Shiba, Hiroo Matsuse, Yoshio Takano, Tohoru Matsugaki, Tomohisa Inada, Yoshihiko Tagawa, and Kensei Nagata: Development of a Training Method for Weightless Environment Using Both Electrical Stimulation and Voluntary Muscle Contraction. Tohoku J Exp Med, 2010; 220 (1): 83-93
7. Takumi Kawaguchi, Naoto Shiba, Yoshiro Takano, Takashi Maeda, Michio Sata: Hybrid-Training of Voluntary and Electrical Muscle Contractions Decreased Fasting Blood Glucose and Serum Interleukin-6 Levels in Elderly People: A Pilot Study. Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism, 36(2): 276-282, 2011.
8. Paillard, T.: Combined application of neuromuscular electrical stimulation and voluntary muscular contractions. Sports Medicine, Volume 38, Issue 2, 2008, Pages 161-177
9. Hiroo Matsuse, Naoto Shiba, Yoshio Takano, Shin Yamada, Hiroshi Ohshima, Yoshihiko Tagawa: Cycling exercise to resist electrically stimulated antagonist increases oxygen uptake: a pilot study, Journal of Rehabilitation Research and Development, in press.

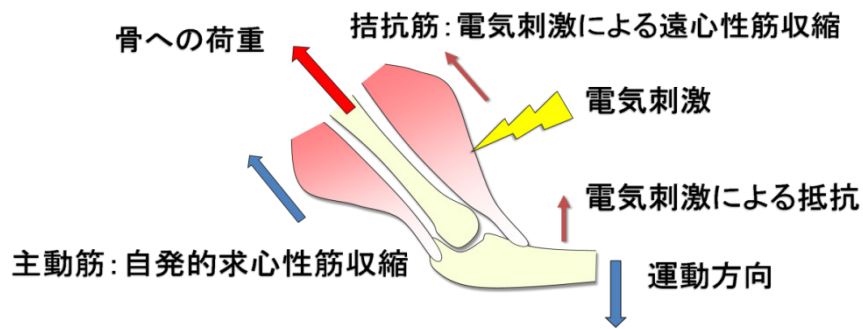


Fig.1 ハイブリッドトレーニング。図は伸展運動。屈曲運動では主動、拮抗がこの逆となる。運動時拮抗筋を電気刺激して、運動抵抗とする。主動作筋は自発求心性、拮抗筋は電気刺激遠心性収縮となり、自発と電気の混合運動でハイブリッドトレーニングとした。



Fig.2 電気刺激装置と電線、電極クリップ、関節運動感知センサ



前面



後面



前面



後面

Fig.3 ウェアはイス座位モデルから作製

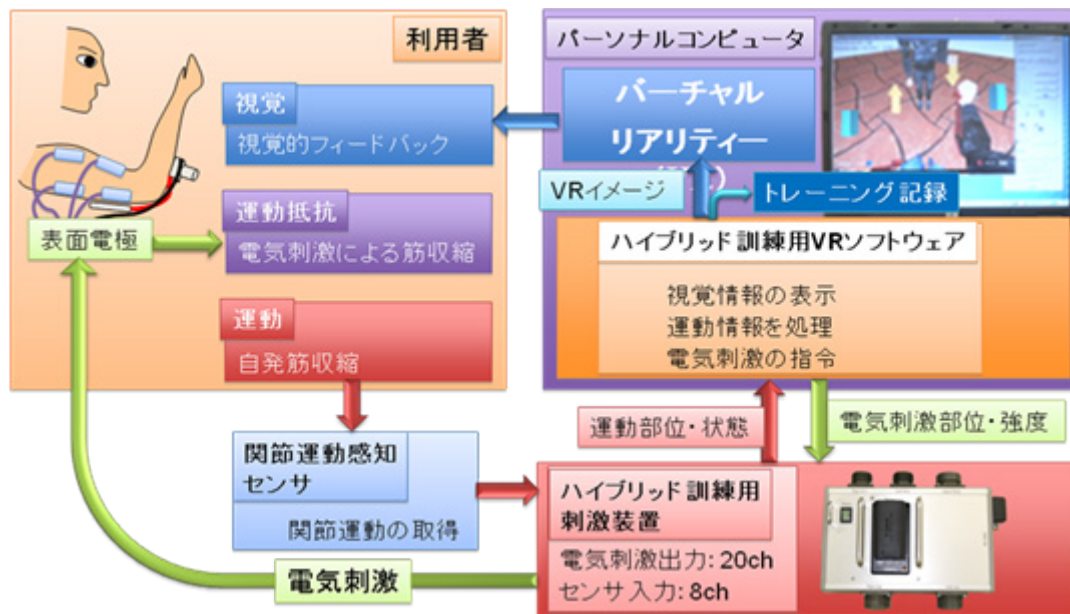
Fig.4 作製したウェア



Fig.5 作製した筋力測定装置: イスの矢印の位置に市販のハンドヘルドダイナモメーター(HHD)を装着する。左図は膝屈曲用に設定。膝伸展では HHD は逆向きとなる。右上は被験者接触部分を大型化した新たに作製したパッド。



Fig.6 昭和基地内での HTS を用いたトレーニング

Fig.7 パーチャルリアリティーを用いた統合的 HTS^{5,7)}

使用者はモニター上のインストラクターの動きに合わせてトレーニングを行う。トレーニングの内容（刺激強度、関節運動の状態等の履歴）はコンピュータに記録され、随時使用者自身が達成度の確認を行うことができるとともに、データの管理に用いる。

Table1 トレーニング効果。前値をコントロールにおけるベースライン、コントロールの8週をHTSにおけるベースラインとして、運動効果を検討した。HTSでは、同トレーニング開始前と比較して、膝屈曲筋力は4週で44% ($p < 0.005$) 増加し、8週で45%増加していた ($p < 0.0005$)。他の結果に有意差はみられなかった。 * $p < 0.005$ 、** $p < 0.0005$

		コントロール			ハイブリッドトレーニング	
		前	4週	8週	4週	8週
膝伸展 (N)	平均値	611.4	614.8	651.1	663.5	581.1
	標準偏差	146.0	122.3	112.7	162.0	143.3
膝屈曲 (N)	平均値	272.7	304.1	309.2	444.6*	448.3**
	標準偏差	36.3	78.9	54.6	127.2	100.7
大腿周囲径 (cm)	平均値	49.8	50.2	50.7	50.8	51.2
	標準偏差	2.3	3.2	3.2	2.4	3.0
体重 (Kg)	平均値	82.9	83.2	82.3	未計測	83.6
	標準偏差	9.6	9.8	9.3	未計測	10.3
体脂肪率 (%)	平均値	24.4	21.8	24.1	未計測	24.9
	標準偏差	2.1	7.9	2.3	未計測	2.6



夏を迎える頃の昭和基地



極夜期正午頃の昭和基地