

宇宙環境での筋力維持インテリジェントスーツの研究開発

志波直人, 吉光一浩, 松垣亮, 前田貴司, 田川善彦, 沼田喜四司

Study and Development of Intelligent suit to Maintain Muscles in Space

Naoto Shiba, Kazuhiro Yoshimitsu, Toru Matsugaki, Takashi Maeda, Tomohisa Inada*, Yoshihiko Tagawa*, and Kiyoshi Numada**

Kurume University School of Medicine, 67 Asahi machi, Kurume city, Fukuoka 830-0011 E-mail: nshiba@med.kurume-u.ac.jp

*Kyushu Institute of Technology **GOLDWIN technical service

We have developed intelligent suit that has function of “hybrid exercise” to maintain skeletal muscle force in a weightlessness environment. The “hybrid exercise” is designed to strengthen and maintain the muscles by using electrically stimulated antagonist muscles to resist volitional contraction of agonist muscles as they move through their range of motion. Virtual reality training system has been developed also utilizing the “hybrid exercise” to obtain amusement characteristics and sense of accomplishment of the exercise for astronauts.

Key words: disuse atrophy, musculoskeletal system, countermeasure

はじめに

宇宙空間での骨格筋廃用萎縮予防目的に、電気刺激骨格筋収縮を従来と逆に運動時対向する拮抗筋に与え、運動抵抗を作製する自発と電気刺激筋収縮の混合運動、ハイブリッドトレーニング法（図 1）の効果などについて、報告してきた^{1, 2, 3, 4)}。

今回、HYB 装置と同機構を組み込んだ宇宙空間で筋力維持効果のあるインテリジェントスーツの開発について報告する。

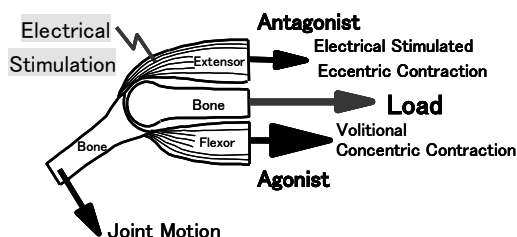


図 1. ハイブリッドトレーニング法. 関節運動時、拮抗筋に電気刺激を与え運動抵抗とする。主動作筋はより大きな自発筋収縮力を発揮し、骨には長軸方向に荷重が加わる。

電気刺激波形

皮膚表面電極を用いる骨格筋収縮のための電気刺激波形は、安全かつ効果的に骨格筋を

収縮する目的で 5,000Hz の搬送周波数を断続して 40Hz の刺激周波数を持ついわゆる Burst 波を採用した。搬送周波数、刺激周波数は疼痛と筋力の関係から求めた（図 2, 3）。

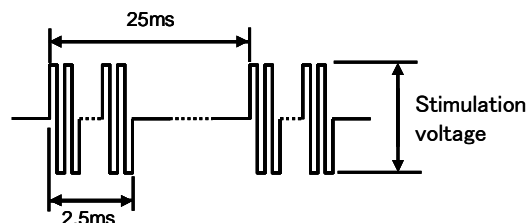


図 2. 刺激電流. 5,000Hz の搬送周波数, 40Hz の刺激周波数を持つバースト波。

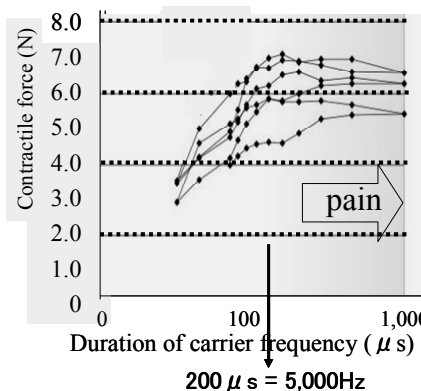


図 3. 電気刺激強度, 筋力, 疼痛, 搬送周波

数の関係. 約 5,000Hz が疼痛が少なく, 筋力が大きくなる.

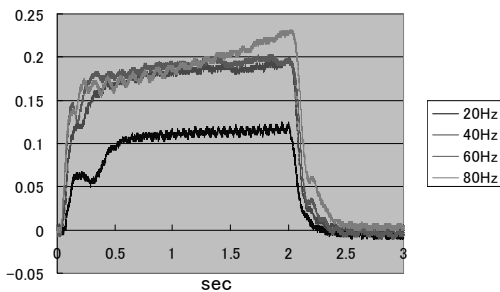


図 4. 刺激周波数と筋力の関係. 搬送周波数を 5,000Hz に固定し, 刺激周波数を変化させて筋力を測定. 40-80Hz では 20Hz の約倍の出力が得られる. 長時間刺激を続けるとこれらでは 20Hz に比較すると疲労し易いが, 本法の目的や消費電力を考慮すると, 40Hz が適当と考えられた.

ハイブリッドトレーニングの週 3 回, 1 回 20 分間程度の長期訓練では電気刺激の耐用性は増し, 徐々に電圧が上昇する. 安定した効果を得るには数週間の電気刺激に慣れるための期間を設けるべきである (図 5).

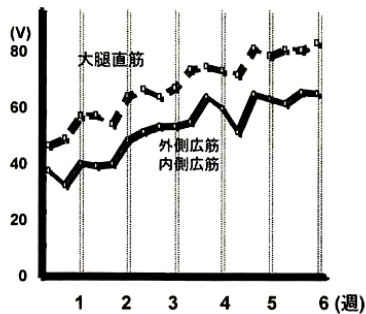


図 5. 6 週間の長期訓練中の電気刺激強度. 被検者の慣れに伴い, 刺激強度は上昇する.

ハイブリッドトレーニングシステム

ハイブリッドトレーニングのシステムを作製した (図 6). システムは刺激装置, 皮膚表面電極, 電線, 関節運動感知センサー, サポータ (電極の押さえと関節運動感知センサー取り付けのため), バッテリー, 充電器で構成され, 小型ケースに収納し, 携行が容易であ

る. 刺激装置は 4 チャンネルで汎用性の高い装置とし, 肘, 前腕, 膝, 下腿, 体幹の筋群に対応する. 刺激は関節運動感知モード, 電気刺激単独モードを選択が可能. バッテリーは NASA 認可のビデオ用充電式を使用.



図 6. 汎用ハイブリッドトレーニング装置一式. 装置の内容と重量は下記のとおり.

1) 刺激装置	575g
2) 充電式バッテリー	195g
3) 充電器	290g
4) 電極	10g
5) コード	145g
6) 関節運動感知センサ	140g
7) サポータ	50g
小計	1,405g
合計 ケース・予備電極含む	2,075g

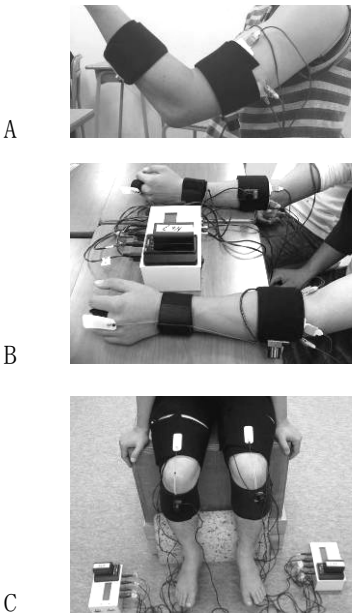
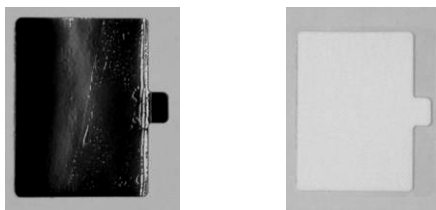


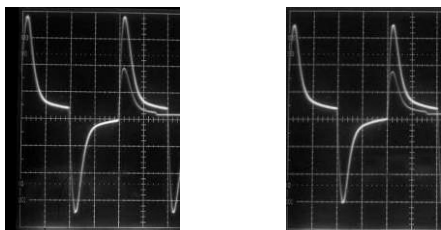
図 7. トレーニングの実際 A: 肘, B: 手関節前腕, C: 膝

皮膚表面電極

平成 17 年より積水化成製のプラスチックの薄いフィルムに銀をコーティングしゲルを貼付した皮膚表面電極を用いて実験を開始した。平成 18 年より，プラスチックに代わり，不織布として，銀に代わり酸化しにくい銀とカーボンの合成物をコーティングしゲルを貼付したものに変更した（図 8, 9, 10）。本電極は柔軟性に優れ筋肉の動きに追従しやすく安定性が向上した。通電物質の銀は経時変化・インピーダンス上昇の問題があるが，銀とカーボンの複合材料として，低インピーダンスを実現しつつ，経時変化を抑えた安定した性能が維持できる。また，使用後，皮膚からはがした後も表面を少量の水分で洗い流すことにより表面に付着した皮膚角質などを除去可能で連続使用によるインピーダンス上昇を抑制できる。



皮膚面（ゲル側） 非皮膚面（不織布側）
図 8．皮膚表面電極。不織布・銀カーボン・ゲル電極と電流計測。旧型ではプラスチックフィルムに銀／塩化銀をコーティングしゲルを貼付したものであったが，今回，銀／塩化銀に酸化劣化を起こしにくくするためにカーボンをコーティングした薄いフィルムと不織布を貼付，これにゲルを貼付している。



銀／塩化銀 銀／塩化銀／カーボン
図 9．刺激電流実測。新電極では，従来の銀の単独コーティングと比較して刺激電流にほとんど差は無く，インピーダンスの上昇は認めない。

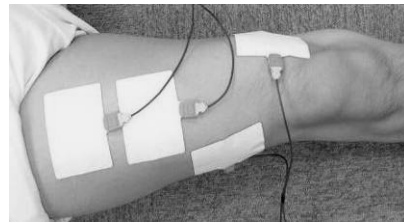


図 10．電極を大腿四頭筋に貼付した例

インテリジェントスーツ

現在，ハイブリッドトレーニング装置を組み込んだ筋力維持効果のあるインテリジェントスーツの開発を行っている（図 11）。

電極や電線の装着を容易にする方法が大きな課題のひとつである。インテリジェントスーツでは電線や電極の装着の手間を省略したもので，電極装着方法，電線などの開発段階で新たな機構を考案し，これらを取り入れた。これらの改良により，装着が容易となった。また，電線を着衣に組み込むとともに刺激装置を小型化して電源と分離するとともに，コントローラを非利き腕前腕部に設置して操作性も向上した。

これらの改良の結果，インテリジェントスーツは通常は着衣として使用できるが，トレーニングを行う際，使用者が第三者の補助なしに，①ウエスト部にバッグに装着された電気刺激と電源を取り付ける，②電極を取り付ける，③コントローラでトレーニングの設定を行う，の手順でトレーニングが開始可能となった。

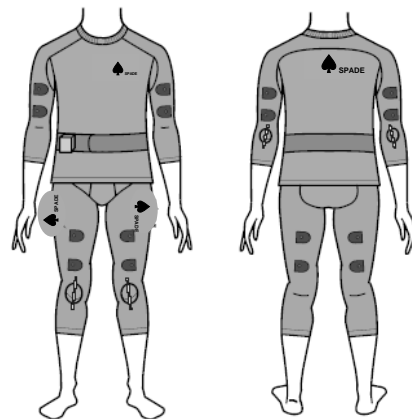


図 11．インテリジェントスーツのイメージ



図 1 2. 両肘屈伸用インテリジェントスーツ。電源と刺激装置を分離，小型化し，ウエストのバッグにそれぞれの装置を装着，電線はスーツに組み込む。スーツの生地は抗菌，防臭，保温に優れる生地を使用。

バーチャルリアリティトレーニング

さらに，バーチャルリアリティハイブリッドトレーニングシステムを作製，トレーニングに達成感，娯楽性を付加する（図 13）。宇宙飛行士の精神面への好影響も期待する。関節の動きと，運動抵抗を電気刺激の大きさとしてグラフィックスに再現する双方向性のシステムを作製した。さらに，行ったトレーニングの量などを自動的に累積して表示する。

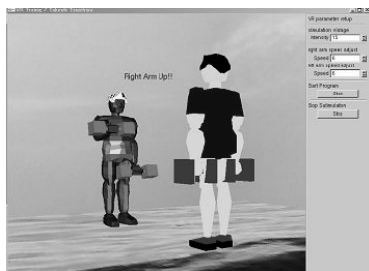


図 1 3. バーチャルリアリティトレーニングシステム。黒色のトレーナーの動きに合わせ運動する。手前が使用者。関節の動きは関節運動感知センサー，ダンベル（運動負荷）の大きさは電気刺激強度により再現する。

宇宙化への対応

宇宙フォーラム公募地上研究の一環として，電極のオフガス試験（燃焼試験）を行い，NASA

の宇宙船内の使用基準に適合することを確認した。衛生面では本電極は医療用で，日本食品分析センターにおいて行ったかび抵抗性試験では，菌糸の発育はみられなかった。生物学的試験として S010993 により皮膚一次刺激性試験，閉鎖パッチ感作性試験，細胞毒性試験のいずれも安全性の問題は認めなかった。

ハイブリッドシステムの電装品について，同様に公募地上研究の一環として electro magnetic compatibility test: EMC test を行い，NASA 規格の下，電磁波対策を行った。

今後の課題

宇宙化を前提としたインテリジェントスーツ，VR システムの改良，完成と，下腿，体幹での効果検証を行う。これと並行して臨床での廃用患者での効果検証と実用化を目指す。

この研究は日本宇宙フォーラムが行う公募地上研究により行われた。

参考文献

- 1) 志波直人，荻野美佐，田川善彦：廃用筋萎縮の取り組み—宇宙医学への応用が期待される電気刺激療法— リウマチ科，36(2)：211-217，2006.
- 2) Yanagi T, Shiba N, Maeda T et al: Agonist Contractions Against Electrically Stimulated Antagonists, Arch Phys Med Rehabil Jun;84(6):843-8, 2003.
- 3) Toshinori Iwasaki, Naoto Shiba, Hiroo Matsuse, et al: Improvement in Knee Extension Strength through Training by Means of Combined Electrical Stimulation and Voluntary Muscle Contraction. Tohoku J. Exp. Med., 209; 33-40, 2006
- 4) Hiroo Matsuse, Naoto Shiba, Yuichi Umezu, et al: Muscle Training by Means of Combined Electrical Stimulation and Volitional Contraction. Aviat Space Environ Med 2006; 77: 581-585.