

# 宇宙環境で有効な骨格筋維持装置開発の研究 - Wearable device の完成へ向けて -

志波直人, 吉光 一浩\*, 松垣 亨\*, 稲田 智久\*\*, 田川 善彦\*\*

久留米大学リハビリテーションセンター、\*久留米大学 整形外科、\*\*九州工業大学 機械知能工学科

Study of development of effective device to maintain skeletal muscles in space

-Development of a wearable device to maintain skeletal muscles -

Naoto Shiba, Kazuhiro Yoshimitsu, Toru Matsugaki, Tomohisa Inada\* and Yoshihiko Tagawa\*.

Kurume University School of Medicine, 67 Asahi machi, Kurume, Fukuoka 830-0011

E-Mail: nshiba@med.kurume-u.ac.jp \*Kyushu Institute of Technology

Abstract: We have developed “hybrid training” (HYB) method by using electrically stimulated muscles to provide resistance to the active motion and prevent disuse atrophy of skeletal muscles. A wearable HYB device with virtual reality system (VR) was developed. A wearable device, which incorporated the suits, stimulator, battery, electric wires, electrodes, and joint motion sensors, was developed. The final goal of our study is to develop a ubiquitous device which provides the load on the body instead of the gravity to prevent the skeletal muscle atrophy without specific training program.

Key words: Disuse atrophy, Musculoskeletal system, Virtual reality, Countermeasure.

## はじめに

宇宙空間の無重力・微小重力環境下では、筋骨格系への力学的負荷が著しく減少し、深刻な筋骨格系の廃用萎縮が発生する<sup>1)</sup>。筋萎縮に対しては、コンパクトで効果的な方法が必要とされる。リハビリテーション医療で従来から用いられる骨格筋への電気刺激療法を応用し、主動筋の抵抗として、拮抗筋の電気刺激で得られる筋収縮を運動抵抗とした自発と電気刺激筋収縮の混合運動、ハイブリッド訓練法 (HYB) (Fig. 1) を考案し、その訓練効果などについて報告してきた<sup>2,3,4)</sup>。

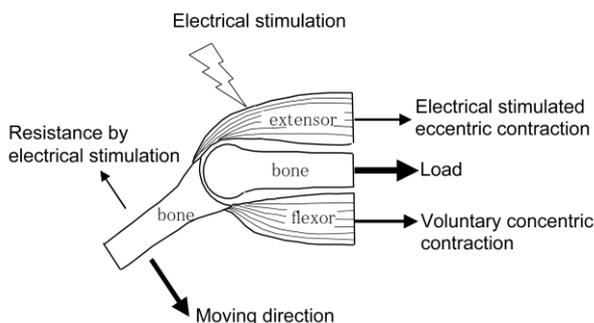


Fig. 1 : Hybrid training method has been developed by using electrically stimulated muscles to provide resistance to the active motion and prevent disuse atrophy of skeletal muscles in space.

HYB 装置は、刺激装置、電線、皮膚表面電極、関節

運動感知センサーより成る簡便な装置である<sup>2,3,4)</sup>。

しかしながら、訓練毎の装置装着の煩雑さの問題があり、これを容易に行うために、装置一式を組み込み、着用が可能なインテリジェントスーツを開発した。また、さらに HYB 装置を制御し、効果的な訓練を行うため、バーチャルリアリティー (virtual reality: VR) 装置の開発を行った<sup>4)</sup>。

## 方法

### I. インテリジェントスーツ<sup>5)</sup>

インテリジェントスーツは、直接身体に着用するものであり、長期の連続着用を想定した。

#### 1) 着衣部分

①素材・生地：保温，抗菌消臭，抗菌防臭，帯電防止，身体への密着性の5点を重要機能とした。

#### 2) 電極貼付方法について検討

電極貼付方法の違いによる電流変化を検討した。

#### 3) 操作性向上のための検討を行った。

### II. 刺激装置

インテリジェントスーツ用に、四肢、体幹に同時に対応できるチャンネル数に対応し、コンピュータで制御可能な刺激装置を設計、作製した。

### III. VR システム

HYB 装置の制御を行うことができ、訓練意欲の維持・向上が期待でき、訓練の記録が可能で後に訓練記録を参照できるシステムを作製した<sup>4,5)</sup>。

### IV. 微小重力での動作検証

前述の刺激装置、インテリジェントスーツ、ソフトウェアの組み合わせを用い、パラボリックフライトによる微小重力下でのシステムの動作実験を行った（使用機材：MU-300 型航空機、ダイヤモンドエアサービス株式会社、愛知）。実験では、上腕・大腿・体幹に対する HYB によるトレーニングを行い、微小重力下でのインテリジェントスーツや刺激装置の動作検証を行った。

## 結果

### I. インテリジェントスーツ<sup>5)</sup>

電気刺激装置、電線、電極、関節運動感知センサーを組み込んだ、着衣型 HYB 装置、インテリジェントスーツを作製した（Fig. 2）。

#### 1) 着衣部分

##### ①着衣素材・生地を検討

素材は、生地としての総合混率、綿 48.00%、レーヨン 22.50%、リヨセル 22.50%、ポリエステル 3.75%、ポリウレタン 3.25%とし、組成としては、原糸（綿・光電子レーヨン・マキシフレッシュ・AGposs の混合糸）75.0%と CSY（綿・ポリウレタンの混合糸）25.0%の 2 種類の糸の交編素材を採用した。

#### 2) 電極操作性向上

インテリジェントスーツ電極貼付部分をメッシュにて開窓部をつくり、スーツを着たまま電極貼付が可能な構造とした（Fig. 3）。貼付位置の探索を必要せず、電極貼付が極めて容易となった。

#### 3) 操作性向上のため検討

配線を着衣に組み込むことで無重力空間での浮遊の危惧を避け、着脱時の断線も防止した。

##### ①サポーター

運動時に電極貼付を安定し確実にするため、電極

部へのサポーターを装着した。

##### ②着衣時の工夫

運動により電極貼付位置が移動すると、骨格筋収縮が低下する。これを解消するために、肘関節では肘頭に、膝関節に関しては膝蓋骨部分に着衣が適合する形状とした。



Fig.2: Wearable device to maintain skeletal muscles in space by utilizing HYB system. The electric wires and joint motion sensors were also attached in the suits (Goldwin inc. Tokyo, Japan).



Fig.3: Electrodes position of the device. The suit was made with partly electric conductive meshes covering the motor points, which were designed to attach the electrodes (Sekisui Plastics, Tokyo Japan) onto them and stimulate the muscles adequately.

## II. 刺激装置

基本的な仕様は過去の報告と同様、刺激波形に電圧制御方式、搬送周波数 5000Hz、刺激周波数 40Hz のバースト波を採用した<sup>2,3,4)</sup>。今回作製した機器では、四肢、体幹の訓練が可能となるよう、刺激 20ch、センサー入力 8ch のコンパクトな一体型を開発した。装置はアルミニウムの軽量堅牢なケースで覆い、頑丈なコネクタや、誤ってスイッチに触れない、バッテリーが脱落しない構造とした。バッテリーは NASA 認可の充電型電池を採用した (Fig. 4)<sup>5)</sup>。



Fig.4: Stimulator and battery. Its size was 220mm in length, 140mm in width, and 55mm in height, and weight was 1,030g (Logical Product Inc., Fukuoka, Japan).

## III. VR システム<sup>4)</sup>

被験者に装着されたエンコーダのパルスは刺激装置内のカウンタ回路でカウントされRS-232C 通信を経てメインPC に送信される。メインPCでは関節角度に応じてコンピュータグラフィック (CG) アニメーションを描画する。同時に被験者の設定と関節角度から決定される刺激強度の指令値を刺激装置へと送信され、その指令値に応じ刺激される (Fig. 5)。

システムは、1) メインPC、2) 刺激装置、3) 被験者の装着装置の三要素から構成される。

1) メインPC (CG 描画用ディスプレイや刺激強度等の指令)

メインPC では以下の4つの処理を行っている。

①CG アニメーションの描画

②刺激強度、トレーニング時間等を設定するインターフェイスの表示

③刺激強度の決定

刺激開始時から強い刺激が入り不快感が生じないように、角度に応じた傾斜をつけている。過負荷を防止するために、47.5[V]以上の電圧がかかるとないようにリミッタを設けた。

④刺激装置との通信

メインPCと刺激装置間の通信はRS-232C 通信を使用しソフトウェアに依存なく無線通信に変更可能である。また通信速度は容易に変更可能であり、現行のシステムでは10Hz に設定した。

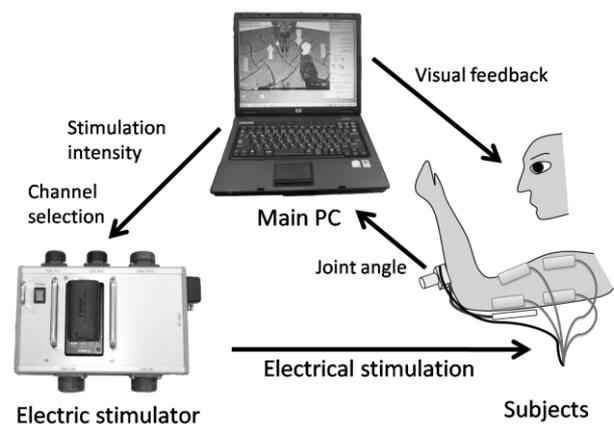


Fig.5: VR system for wearable device of HYB.

2) 刺激装置 (エンコーダパルスカウンタを兼務)

仕様については、II. 2) に示す。刺激装置で受信した指令電圧値は、メインPC から送信される文字列として、これに応じて刺激波形を出力する。また、センサーからの情報、エンコーダパルスはPLD (Programmable Logic Device) によってカウントする。このカウント値はメインPC からの指令電圧値を受信する毎にメインPC へと送信する。

3) 被験者の装着部品 (関節角度検出用エンコーダと刺激電極)

被験者の装着部品は刺激電極と関節角度検出用のエンコーダ、刺激電極 (株) 積水化成製ゲル電極

）である。関節角度検出用のエンコーダ（ワイヤ式リニアエンコーダ，DS-025，出力：10 パルス/mm トーエンジニアリング 東京）を用いた。

#### IV. 微小重力下での動作検証

1 回約 20 秒間の無重力実験を，許可時間 1 時間で，14 回実施し，これを計 4 回行った。刺激装置，インテリジェントスーツ，制御ソフトとも微小重力に起因する問題が発生する事なく，無事実験を終了した。HYB も想定通り実施できた。

#### 考察

HYB では，電気刺激による遠心性収縮を用いており<sup>2,3,4)</sup>，訓練に必要な筋張力をより低い強度で得られるという特徴がある。刺激強度については，現在，不快と感じる最大電圧の 80～90%で，等尺性で 20～25%MVC を採用するとともに，今回の装置には過電流防止のため，最大電圧を設定したリミッタを設けた。

現在の膝屈伸運動では，角速度 30 度/秒，センサーに遊びを設け，電気刺激立ち上がり 0.5 秒として，自発運動開始後徐々に電気刺激を与える制御を加えることで円滑な運動を実現するとともに，四頭筋刺激強度を最大耐用電圧の 80%，ハムストリング 90%と低めの刺激強度設定で，高齢者への実験，さらには健康者への廃用防止実験と，広範な被験者を対象とした実験を実施している。

VRシステムは訓練者の運動状態をPCのモニター上に，三次元モデルを用いて表示させるとともに，模範となる運動を行うモデルを表示し，このモデルに合わせて訓練を行うことができる。画面上には，訓練に関する情報が表示され，訓練中の運動状態を良好なものに保つほか，訓練者に，運動状態をフィードバックする。訓練中の関節角度，電気刺激強度などが記録され，後の解析などに利用できる。また，画面上に達成度を表示するなど，訓練意欲の維持，向上にも有用なシステムも開発した<sup>4)</sup>。

パラボリックフライトでの微小重力においても，地上と同様の想定した運動を行うことができ，無重

力環境下でも十分に HYB は可能であった。その詳細について検討中であるが，これらの結果から HYB による微小重力下での訓練方法やインテリジェントスーツの更なる改善が期待される。

宇宙用，臨床用ともに HYB 装置開発の最終目標は，本機器を装着することで，特別な運動をしなくとも，日常生活の中で運動負荷が得られ，運動効果を得ることができる，いわゆるユビキタス機器を開発することである。今後，は目的の達成に向け，さらに研究を続けていきたい。

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) 吉岡利忠，他：筋肉．骨カルシウム代謝．宇宙医学・生理学，宇宙開発事業団編，初版，東京，社会保険出版，p57-92，1998.
- 2) Ito T., et al.: Development of practical and effective hybrid exercise for use in weightless environment. Proc. of the 26th Annual Int'l Conf. of the IEEE, 4252-4255, 2004.
- 3) Hiroo Matsuse, Naoto Shiba, et al: Muscle Training by Means of Combined Electrical Stimulation and Volitional Contraction. Aviat Space Environ Med, 77: 581-585, 2006.
- 4) 吉光一浩，他：ハイブリッド訓練法による筋骨格系廃用委縮の予防—装着性・訓練効果向上のための工夫—．Space Utilization Research, 24; 281-282, 2008.
- 5) 山口仁美，他：筋骨格系維持のためのハイブリッド訓練用インテリジェントスーツ開発の研究，久留米医学会誌，71; 152- 159. 2008.