6

宇宙医学とリハビリテーションへの
先端機器の応用Application of Advanced Equipment to Space Medicine
and Rehabilitation

大本将之* 志波直人*

Masayuki Omta

Naoto Shiba

Key words : 宇宙飛行士／廃用症候群／リハビリテーション／ハイブリッドトレーニング／産官学連携

要旨

微小重力により、宇宙飛行士の筋骨格系は著しい廃用性変化をきたす。火星探査では狭い宇宙船内での運動が必要となるが、従来の宇宙飛行士用の訓練装置は大型で使用が困難である。ハイブリッドトレーニング装置は、運動時に動作を妨げる拮抗筋を電気刺激して得られる筋収縮を運動抵抗とし、小型で自身の体内で運動抵抗を発生させることから、このような制約が大きい環境下での使用が可能である。

2009年、国際宇宙ステーション利用研究に採択され、本装置を1名の宇宙飛行士の非利き腕に装着し、週3回4週間、計12回のトレーニングを行い、廃用予防改善効果を検証した。同時に5年間の産学協同研究により、下肢用トレーニング装置が市販された。

宇宙医学における
リハビリテーションの役割

微小重力による力学的負荷・メカニカルストレスの減少により、宇宙飛行士の筋骨格系には著しい廃用性変化をきたす。1～2週間の宇宙空間滞在により腓腹筋の筋萎縮が1%/日であり、ベッドレストの2倍、高齢者の半年分の筋萎縮に相当する。長期宇宙滞在では、毎日約2時間運動しているが、下肢筋力は帰還時に少なくとも10～20%は低下する。これは、ARED (Advanced Resistive Exercise Device) と呼ばれる大型ウェイトトレーニング装置を使用し改善傾向にはあるが、飛行前の筋力を維持するまでには至っていない。帰還後の対策として、45日間は毎日約2時間のリハビリテーショ

ンが行われ、動的・静的ストレッチ、バランスクッション、水泳、メディシンボール、体幹筋トレーニング、ラダードリル、ラバーバンド装着下での走行、障害物走などが行われる¹⁾。

骨量減少に関しては、1カ月の宇宙滞在で腰椎は約0.9%、大腿骨頸部で約1.5%減少し、地上での骨粗鬆症の約10倍の速さに相当する。帰還後の骨量回復に3～4年を要するが、宇宙飛行士の廃用性骨萎縮発生に関する研究で、骨粗鬆症治療薬ビスフォスフォネートとAREDとの組み合わせが有効であることが明らかとなっている²⁾。

今後、計画されている火星探査などは、より狭い宇宙船内で長期間の運動を必要とするが、従来のトレーニング装置は大型であり、小型の宇宙船では使用が困難である。

ハイブリッドトレーニング研究

ハイブリッドトレーニング装置 (Hybrid Train-

* 久留米大学医学部整形外科学教室
(〒830-0011 福岡県久留米市旭町 67)
E-mail : omotomasayuki@med.kurume-u.ac.jp

図1 上腕に装着したハイブリッドトレーニングシステム (Hybrid Training System : HTS)

刺激装置、電極、関節運動センサよりなる簡便な装置である。肘伸展時、センサが運動を感知して二頭筋は電気刺激され遠心性収縮して自発的伸展運動の抵抗となる。同時に主動拮抗両筋が収縮し、挟まれた骨には長軸方向の荷重が加わる。屈曲では筋肉の関係がこの逆となる。

ing System : HTS)³⁾は、運動時に動作を妨げる拮抗筋を電気刺激して得られる筋収縮を運動抵抗とするトレーニング方法である。電気刺激と自発の筋収縮の混合運動で、電気刺激による筋力を運動抵抗として体内で発生させる。すなわち、センサーにより運動を感知して随意運動に合わせて拮抗筋が電気刺激収縮し、主動筋の運動抵抗となる(図1)。

電気刺激遠心性収縮ではより大きな張力が得られるので、通常の電気刺激による筋トレとは異なり、より少ない電気刺激で同等の張力が得られる。電気刺激筋収縮は速筋優位の収縮となり、乳酸産生が優位となるが、主動筋は遅筋が主に活動しており、乳酸はその自発運動のエネルギー源として用いられる。いわゆる乳酸シャトルの理論により、速筋で生成された乳酸が遅筋で再利用され効率よく運動ができるため、乳酸が蓄積しにくく、疲労しにくい特徴がある。装置は小型で運動時に装着して使用でき、自宅や医療・介護施設のほか、十分なリハビリテーションの設備がない場所、さらには宇宙飛行士など、運動の制約や制限が大きい環境下での使用が可能と考えられ、久留米大学、九州工業大学、宇宙航空研究開発機構 (Japan Aerospace Exploration Agency : JAXA) が共同で研究開発を実施した。

1. 筋力増強・筋肥大効果

HTS で 10 回 10 セットの肘屈伸運動を週 3 回 12 週間行ったところ、肘伸展筋力が約 33% 増強し、上腕三頭筋断面積が約 17% 増大、肘屈曲では 18% 増強、上腕二頭筋断面積が 17% 肥大し、電気刺激のみの訓練より筋肥大を認めた³⁾。ロコモティブシンドローム対策として実施した高齢者実験では、HTS で週 2 回 12 週間の膝屈伸運動 (10 回 10 セット) で、膝伸展筋力が約 39% 増強、大腿四頭筋断面積が約 9% 増大し、大型のトレーニングマシンと同等の訓練効果が得られた⁴⁾。

2. 全身的效果

嫌気性閾値以下での自転車エルゴメータ運動に HTS を組み合わせたところ、ペダル駆動による運動負荷と酸素摂取量との関係は、従来の有酸素運動と同様に直線的であった。エルゴメータに HTS を併用した運動は、非併用群に比較し酸素摂取量が約 26% 増加した。このことから、有酸素運動中でも HTS で新たに運動抵抗をつくるのが可能であり、それは全身的有酸素運動であることが確認された⁵⁾。現在、筋骨格系解析ソフト AnyBody (Denmark) を用いて、地上での実験とシミュレーション結果を比較し、検証を行っている。

また、運動直後に炎症性サイトカインの inter-

図2 国際宇宙ステーション実験で使用した HTS 装置

国際宇宙ステーションに滞在する宇宙飛行士用に作製した、宇宙飛行士が非利き腕に装着して、両肘交互屈伸運動を計 100 回実施した。これを週 3 回、4 週間計 12 回行い、非装着の利き腕をコントロールとして評価を行った。

leukin (IL)-6 (筋肉由来) は上昇するが、継続的に長期運動療法を実施することで、そのベースラインは低下してくる。メタボリック症候群 (非アルコール性脂肪肝) 35 名を対象とし 2 群に分けて実施した 12 週間の訓練で、同様の運動効果の血液生化学的検証でもインスリン抵抗性、肝機能の改善とともに、IL-6 の明らかな低下がみられ、これらの結果から、HTS の全身的效果が期待されている⁶⁾。このような運動の多くの臓器に対するクロストークは広く注目されており、HTS についても 2015 年米国肝臓学会機関誌の総説で紹介された⁷⁾。

国際公募 国際宇宙ステーション利用研究

2009 年度の国際公募国際宇宙ステーション利用研究テーマとして採択され 2014 年に実施した実験では、HTS を 1 名の宇宙飛行士の非利き腕に装着し、週 3 回 4 週間、計 12 回のトレーニングを実施した (図 2)。トレーニングは肘の屈伸を左右交互に 10 回ずつ、1 分間の休息を挟んで 10 回、計 100 回実施し、長期無重力環境滞在で宇宙飛行士に起こる筋肉や骨の萎縮に対する予防改善効果を検証した⁸⁾。

フライト前後における MRI を用いた上腕の筋容量測定で、HTS 実施側で 8.2% 増加していたが、非

実施側では 0.2% 減少し、宇宙ステーション内で計測した計測テープによる上腕周囲径の計測では、トレーニング側が逆に 2.5% 減少していた。米国航空宇宙局 NASA で計測した骨密度では、HTS 実施側上肢が 4.6% 増加し、非実施側で 1.2% 減少していた。筋量は実施側で 10.6% 増加したが、非実施側では増加していなかった。脂肪は逆に実施側で 12.6%、非実施側で 6.4% それぞれ減少していた。宇宙ステーション内で計測した周囲径でトレーニング側が減少していたのは、脂肪量減少によるためと推察された。

宇宙飛行士は、栄養などの管理が厳格に実施されるが、全身の筋骨格系が廃用状態へと傾く。このような状態で、片方上肢にのみ HTS による運動負荷を与えた結果、筋量、骨量が増加した。宇宙飛行士を対象としており、被験者数での限界はあるが、今回の結果は、筋骨格系へのメカニカルストレスが局所の筋骨格系の維持・増強には不可欠であることを再認識する結果となった。

産学協同研究、装置の市販化

高齢者のロコモティブシンドロームによる筋骨格系の脆弱性変化の改善、健康寿命の延伸を目指して、HTS のセンシングや装置の装着性を高めた下肢トレーニングに使用できる装置を、パナソニッ

図3 パナソニック社から市販された歩行用 HTS 装置「ひざトレーナー」

クと久留米大学でおおよそ5年間の産学協同研究・開発を実施して市販化した(図3)。装置は歩行時に大腿部に使用して、歩行周期をセンシングして拮抗筋を刺激収縮させる HTS モード、大腿四頭筋、ハムストリング同時収縮モード、スクワットモードなどの屋内トレーニングモードが選択できる。

HTS モードでは、歩行中の大腿四頭筋、ハムストリングが主にストレッチされる際に、電気刺激収縮を加え、歩行中の有酸素運動中に筋トレの抵抗運動を加えるものである。歩行中の電気刺激は、歩行周期の踵接地直前から踵離地まで大腿四頭筋を刺激し、踵離地から踵接地までハムストリングを刺激する。つまり、膝関節が曲がる時に大腿四頭筋を刺激し、膝が伸びるときにハムストリングを刺激し、電気刺激による筋収縮は常に遠心性筋収縮になる。

現在は一般のトレーニング装置としてパナソニックから市販されているが、今後は本来の目的である医療用として装置を改良していきたい。

おわりに

運動により活動性を維持することは、運動器の廃用である骨萎縮や筋萎縮を予防・改善し、転倒骨折の予防につながる。HTS は無重力環境に長期滞在する宇宙飛行士の筋量と骨密度を増加させ、

効率的に筋骨格系へのメカニカルストレスを与えることができる方法と考えられた。宇宙医学と臨床医学の共通点は多く、両者の同時進行と相互フィードバックが可能である。今後も宇宙医学の研究継続と共に、臨床で使用する装置の研究開発を継続していきたい。

文 献

- 1) 大島 博：宇宙医学とリハ。先端医療シリーズ 40 リハ医とコメディカルのための最新リハビリテーション医学（上月正博，生駒一憲，芳賀信彦 編）。先端医療技術研究所，東京，2010；pp18-21
- 2) Leblanc A, Matsumoto T, Jones J, Shapiro J, Lang T, Shackelford L, Smith SM, Evans H, Spector E, Ploutz-Snyder R, Sibonga J, Keyak J, Nakamura T, Kohri K, Ohshima H : Bisphosphonates as a supplement to exercise to protect bone during long-duration spaceflight. *Osteoporos Int* 2013 ; **24** : 2105-2114
- 3) Matsuse H, Shiba N, Umezaki Y, Nago T, Tagawa Y, Kakuma T, Nagata K, Basford JR : Muscle training by means of combined electrical stimulation and volitional contraction. *Aviat Space Environ Med* 2006 ; **77** : 581-585
- 4) Takano Y, Haneda Y, Maeda T, Sakai Y, Matsuse H, Kawaguchi T, Tagawa Y, Shiba N : 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** : 77-85
- 5) Omoto M, Matsuse H, Takano Y, Yamada S, Ohshima H, Tagawa Y, Shiba N : Oxygen uptake during aerobic cycling exercise simultaneously combined with neuromuscular electrical stimulation of antagonists . *J Nov Physiother* 2013 ; 185. doi : 10.4172/2165-7025.1000185
- 6) Kawaguchi T, Shiba N, Maeda T, Matsugaki T, Takano Y, Ito M, Sakata M, Taniguchi E, Nagata K, Sata M : Hybrid-training of voluntary and electrical muscle contractions reduces steatosis, insulin resistance and IL-6 levels in patients with NAFLD : a pilot study. *J Gastroenterol* 2011 ; **46** : 746-757
- 7) Berzigotti A, Saran U, Dufour JF : Physical activity and liver diseases. *Hepatology* 2016 ; **63** : 1026-1040
- 8) Shiba N, Matsuse H, Takano Y, Yoshimitsu K, Omoto M, Hashida R, Tagawa Y, Inada T, Yamada S, Ohshima H : Electrically stimulated antagonist muscle contraction increased muscle mass and bone mineral density of one astronaut—initial verification on the international space station. *PLoS One* 2015 ; **10** : e0138519