

平成21年 6月 9日現在

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2006～2008

課題番号：18300187

研究課題名（和文） 荷重立位周期的水平揺動刺激と筋電気刺激による筋力増強法の研究

研究課題名（英文） Strengthening of Lower Extremity Muscles using Electrical Muscle Stimulation and Standing Shaking Board Exercise

研究代表者

河村 顕治 (KAWAMURA KENJI)

吉備国際大学・保健科学部・教授

研究者番号：40278974

研究成果の概要：荷重立位で周期的身体揺動刺激とそれに同期した筋電気刺激を同時に加えることのできる装置を開発した。この装置を用いて運動習慣のない健常な女子大学生6名に新しい筋力トレーニングを3ヶ月間行わせてところ、等速性膝伸展・屈曲筋力がそれぞれ38%と44%増加した。さらに膝前十字靭帯再建術後早期患者10人に新しい筋力トレーニングを3ヶ月間行わせてところ、CKCでの筋力測定では、患健側比でリハビリ前が平均46.6%であったが、3か月後の終了時は平均65.4%まで有意に改善した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	5,100,000	1,530,000	6,630,000
2007年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
2008年度	2,600,000	780,000	3,380,000
年度			
年度			
総計	11,100,000	3,330,000	14,430,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：人間医工学・(リハビリテーション科学・福祉工学)

キーワード：電気機器工学、生物・生体工学、医療・福祉、神経科学、リハビリテーション、電気刺激、閉運動連鎖、筋収縮

1. 研究開始当初の背景

現在、生活習慣病患者やその予備軍の数は膨大であり、身体活動を高めることがその予防に重要な役割を果たしている。しかし加齢に伴う体力の低下や骨粗鬆症、変形性関節症などの整形外科疾患あるいは種々の合併症のため通常の運動療法を行うことができない患者も増大している。これらの対象に無理なく効果的に運動効果を上げるリハビリテーション機器の開発が望まれている。

これまで行ってきた研究では、何らかの原因で歩行ができないような患者でも静止立

位をとらせて水平揺動刺激を加えると下肢筋を中心に筋収縮が誘発されることが観察されている。一方、筋電気刺激(EMS)は身体外部より電気刺激により末梢神経を刺激して筋収縮を誘発するものであり、寝たきりの患者や麻痺性疾患で自発的な運動ができない患者にも運動効果をもたらすことができる。最近になって、電気刺激による糖代謝改善効果などをはじめとしたエネルギー代謝・糖脂質代謝を活性化する手段として電気刺激を用いる研究が始まっている。

身体揺動刺激を加えた時には姿勢制御の

ために、必要とされる収縮力が低い時には耐疲労性が高い遅筋が主体に活動し、高い収縮力が必要になると収縮力が大きい反面疲労しやすい速筋が参加するリクルートメント特性と呼ばれるパターンで活動する。一方電気刺激で筋収縮をおこなう場合には、その収縮機構が随意運動と反対になる。すなわち速筋の支配神経は太く遅筋の神経は細いため、電気刺激の場合には太い神経繊維が先に刺激され速筋が収縮し、低い収縮力でも簡単に筋疲労を招くという逆リクルートメント現象が生じる。

そこで、周期的身体揺動刺激とそれに同期した電気刺激を同時に加えると刺激レベルが低くても遅筋と速筋の両方が活動し、相乗効果で効率的な運動刺激となるのではないかと考えられる。従来、廃用に陥った筋肉では電気刺激のみでは筋肥大まで到達することは非常に困難であったが、荷重立位では抗重力メカニズムで筋肉が能動的に活動するため、それに電気刺激を併用すると効率的な筋力増強効果が期待できる。

2. 研究の目的

本研究は、荷重立位で周期的身体揺動刺激とそれに同期した筋電気刺激を同時に加え、その相乗効果を詳細に検討し高齢者や障害者などの下肢筋力を安全かつ効果的に訓練することができる新しい Closed Kinetic Chain 型訓練機を開発するとともに、培養神経細胞を用いた研究手法で神経筋修復に最も適した電気刺激の手法を解明するものである。

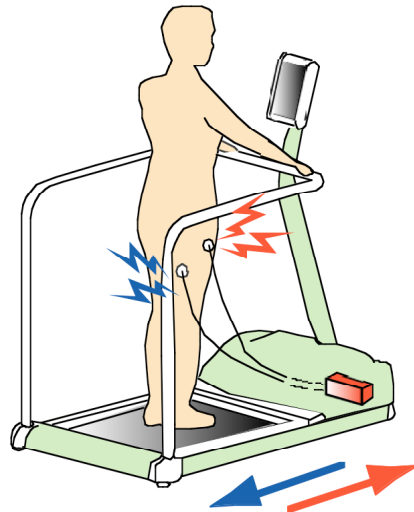
3. 研究の方法

(1) 人体における身体揺動刺激と電気刺激の併用作用の解析

本研究では仮説として「身体揺動刺激と電気刺激を同時に加えると刺激レベルが低くても遅筋と速筋の両方が活動し、相乗効果で効率的な運動刺激となる」ことを前提としている。そこで、まず健康若年者を被験者として仮説の検証を行った。

水平揺動刺激装置はモーターによる円盤の回転を床板に伝える仕組みで、サイン波での周期的に立位の被験者の足部を前後に揺らす刺激を加える。水平揺動刺激装置は振幅を 10 mm から 50 mm まで 5 mm 単位で調整でき（振れ幅は 20mm から 100mm）、振動速度を 1 秒間に 3 回転（3 rps）の速さまで上げることができる。基本的に前後揺動刺激は振れ幅を前後 80mm、1 秒間に 3 回転の速さで行った。電気刺激は前後揺動刺激のタイミングに合わせて大腿部前面と後面で被験者の耐えられる最大刺激を行った。筋電気刺激のタイミングは基本としては図のように搭乗板が前方の折り返し点に移動したとき大腿四頭

筋を中心とする前面の筋群を刺激し（赤色）、搭乗板が後方の折り返し点に移動したときハムストリングを中心とする後面の筋群を刺激した（青色）。

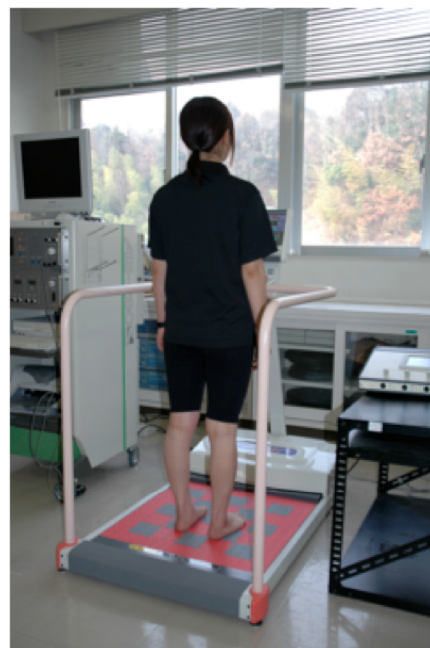


① 健康成人男性における呼吸代謝測定

健康成人男性 7 名（ 21.4 ± 2.0 歳）について呼吸代謝測定装置 AE-280SRC（ミナト医科）を用いて分析を行い静止立位と比較した。

② 健康成人女性における筋力増強効果の検討

健康成人女性 18 名（ 19.5 ± 0.7 歳）を前後揺動刺激群（A 群）、前後揺動刺激と筋電気刺激併用群（B 群）、コントロール群（C 群）の各群 6 名ずつに分け、介入前後で筋力を測定した。トレーニングは前述の条件で 1 回 20 分の運動を週 3 回の頻度で 12 週間行った。



③ 膝前十字靭帯再建術後早期患者における筋力増強効果の検討

対象は 10 人 10 膝（男性 4 人、女性 6 人）平均年齢 26 歳（14 歳～44 歳）、手術から開

始までの日数は平均 50.9 日 (36 日~62 日) であった。トレーニングは、揺動装置の上で、患側大腿部に低周波を流しながら行った。電極は、大腿部前面、後面に貼り、揺動装置の搭乘板が前方に揺れた時に前面の 2 か所で低周波が流れ、後方に揺れた時に後面 2 か所に低周波が流れる設定にした。揺動の速さ、低周波の強さは各自で調整した。器機的设计上最大の揺動刺激は 3 rps であり、被験者は約 1 週間で徐々に 3 rps まで刺激を上げていった。この時電気刺激も 3 Hz で行われる。膝関節軽度屈曲位で、両足を接地した CKC で行い、約 20 分から 30 分のトレーニングを週 3 回 3 ヶ月間継続した。週 3 回のトレーニングは各自の都合で行い、その他の筋力強化自主訓練は認めた。

筋肉量は、リハ開始前と、終了時 (3 ヶ月後) に CT 水平断撮影を行い、伸筋群と屈筋群の断面積を計測し、患側と健側の比較をした。筋力測定は GT-330 (オージー技研) を用いて CKC で行った。筋力測定は 1 ヶ月に 1 度装具装着下で行い、リハ開始前、1 ヶ月後、2 ヶ月後、3 ヶ月後の計 4 回測定した。

④ 健常高齢者における立位揺動刺激作用の検討

現在まで立位姿勢制御の strategies (反応様式) に関する研究は、1970~80 年代に Nashner らが基本的な足関節型と股関節型の様式が存在する事を示した事を契機として比較的知られるようになった。その後立位時の中枢性のバランス調整機能と共に、姿勢調節は自由度の高い task-specific な共同運動制御特性が重要であると認識されるに至ったといえる。しかしながら、主に筋電図学的な考察に基づく反応様式の分類は定性的なものであり、リハビリテーション領域などに有用と思われる定量的な評価を試みた例は少ない。本研究では、生体力学的な視点から運動学的な分類に基づいて反応様式を再定義する。これまでの研究成果から、後方揺動刺激時において、股関節型には刺激による体幹の慣性運動を伴い、代償動作として腹直筋などの反応と共に、股関節での屈曲反応が起きることを示した。関節周囲により大きな筋パワーが必要となる股関節型の評価が可能であると予測できる。実験的な評価を進めて検討を加えた。分析には骨格モデルによる力学的分析を行い、筋パワーを用いた分類を採用した。従来の股関節型とは、股関節軸の屈曲方向筋トルクが正で筋パワー正の時 (正で求心性、負で屈筋群の遠心性収縮) と言える。足関節型は足・股関節に伸展トルクがあり初期筋パワーが正の場合となる。

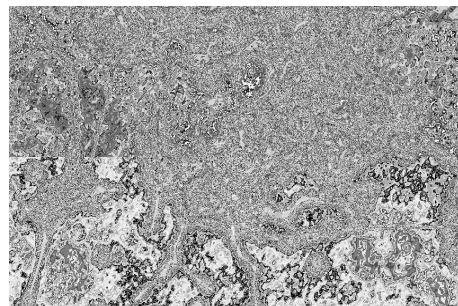
(2) 新しい電気刺激装置の開発

筋電計測機能付き EMS 装置の試作を行った。本研究では、第 1 に随意運動と電気刺激を併用した場合の筋線維組成の変化の基礎的検

討、第 2 に立位揺動刺激時の電気刺激による適切な刺激部位と、その刺激手法について検討を行うこととした。第 1 の検討においては等尺性 CKC 訓練用実験装置、およびそのインタフェース、更には訓練前後筋活動特性の記録用多チャンネル筋電位表面電極の基礎的検討を進めた。第 2 については、連続揺動刺激においては、基本的な足・股関節型をもとに新しい表現が必要であることが示唆された。例えば周波数を 2 Hz 以上に上げていくと反応のバラツキが大きくなっていく。これは筋電図でも確認できるが、股関節周囲筋のみならず、足関節周囲においても変化が大きくなる。単一揺動刺激では高齢化に伴い腰部の反応の遅れなどが顕著であることは実験を通じて確認しているが、連続揺動刺激時の反応についても更に検討を進めた。

(3) 電気刺激神経細胞培養による電気刺激の作用の解析

電気刺激そのものが神経の再生に効果があるというこれまでの研究成果に基づき基礎実験を行う。神経修復に最適な電気刺激の条件を求めるのが目的である。我々はこれまでに神経作用物質を迅速かつ鋭敏に検出できる画期的な培養神経細胞を開発し、PC12m3 細胞と命名した。PC12m3 細胞は NGF 単独では神経突起伸長が起こらないが、神経再生に有効な薬剤あるいは適切な物理刺激と組み合わせることによって神経突起伸長を起こす (図)。これを電気刺激の神経修復作用の解明に応用した。



4. 研究成果

(1) 人体における身体揺動刺激と電気刺激の併用作用の解析

① 健常成人男性における呼吸代謝測定

酸素摂取量は静止時 $5.6 \pm 0.6 \text{ ml/kg/min}$ 、前後揺動刺激を加えた状態が $8.5 \pm 0.8 \text{ ml/kg/min}$ 、前後揺動刺激と電気刺激を併用した状態が $15.3 \pm 2.0 \text{ ml/kg/min}$ であり、相互に有意差 ($p < 0.05$) を認めた。

② 健常成人女性における筋力増強効果の検討

12 週間の運動では等速性膝伸展・屈曲筋力 ($60^\circ / \text{s}$) が A 群においてそれぞれ 13% と 17% の有意な増加 ($p < 0.01$) を認めたが、B 群ではさらに 38% と 44% の著明な増加 ($p < 0.01$) を認

めた。C群では筋力の増加は認めなかった。
 ③膝前十字靭帯再建術後早期患者における筋力増強効果の検討

術後の筋萎縮が問題となる膝前十字靭帯再建術後患者 10 人（男性 4 人、女性 6 人、平均年齢 26 歳）に振れ幅前後 80mm、1 秒間に 3 回転の前後揺動刺激とそれに同期した電気刺激を患側大腿部に加える運動を 1 回 20～30 分間、週 3 回の頻度で 12 週間行わせた。CKC での筋力測定では、患健側比でリハビリ前が平均 46.6%であったが、3 か月後の終了時は平均 65.4%まで有意に改善した。筋力の改善は終了時には患側で平均 1.88 倍、健側で平均 1.31 倍といずれも有意に改善した。



④健常高齢者における立位揺動刺激作用の検討

結果は、(1)股関節型は足関節軸の下腿三頭筋等の初期遠心性収縮に続く大きな求心性収縮、及び股関節軸の大きな求心性筋パワーに特徴づけられる。(2)足関節型反応では揺動開始から体幹上部の最大前傾角度までの股関節筋エネルギーは、刺激直前体幹前傾角度に比例して大になる。従って、刺激開始直前の体幹角度が反応様式に大きく影響し、前傾角度が大きいと股関節型が起こりにくくなることが予測できる。高齢者では、反応の遅れにより青年に比して相対的に筋エネルギーが大きくなることが考えられると共に、視覚などの情報による立位姿勢保持の影響は大きいといえる。今後はデータを増やして検証すると共に、シミュレーションを実施する予定である。

高齢者の運動を行うには転倒防止の配慮が必要であり、転倒防止懸架装置およびハーネスを特注製作し臨床応用を開始した。

⑤筋力増強効果についての考察

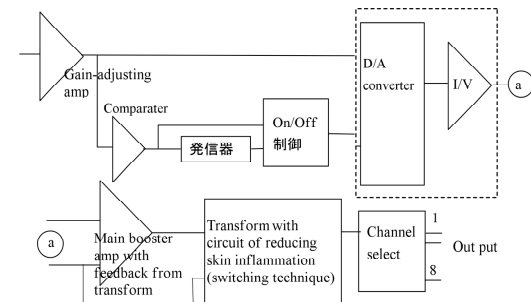
荷重立位周期的水平揺動刺激と筋電気刺激の併用は健常成人女性および ACL 再建術後患者に著明な筋力増強効果を示した。そのメカニズムとしてまず弱い電気刺激でも速筋が刺激されるという逆リクルート特性（逆サイズの原理）が考えられる。電気刺激は太い神経をまず刺激するので太い神経が支配する速筋が直ちに刺激されるのである。特に今回は 3Hz の揺動刺激に合わせて 3Hz という超

低周波で刺激されており 1 回 1 回の電気刺激が完全な筋収縮を引き出したと考えられる。さらに、揺動刺激が大腿の筋群を引き延ばしたところに電気刺激による収縮が起こるので、プライオメトリックな筋収縮が誘発されているのではないかと考えている。揺動刺激で素早いエキセントリックな筋活動が起こり、その直後に電気刺激でコンセントリックな筋収縮が行われるといわゆるストレッチ・ショートニング・サイクルと呼ばれる現象が起こっているのではないかと予想する。この特殊なストレッチ・ショートニング・サイクルが機能して、自覚的にはただ立っているだけにもかかわらず、驚くような筋力増強効果が得られたのではないだろうか。

(2) 新しい電気刺激装置の開発

電気刺激装置の開発においては、以下のような特徴を有するものとした。(1) 分配用スイッチングによる多チャンネル化を図り、電力消費を軽減、(2) フィードバック機能付き output transform による出力の安定化、(3) 制御インターフェース（外部同期タイミング）などである。

制御インターフェースは、被刺激筋の電気的応答を計測する筋電計などの他、同期刺激などの入出力タイミング信号の制御が可能である。また図において皮膚の炎症を抑制する方法は強制的に刺激時皮膚の分極電圧を放電することにより行う。前述の被刺激時の筋の電気的応答の計測にも必要なものである。従来の電極形状を工夫することによる刺激ノイズ軽減方法は完全には除去できないが、本手法では強制的に放電させ、安定した計測を可能にする。



ソフトウェアについては、刺激装置側では、SH8 ワンチップマイコンを搭載した構成とし、C 言語による開発が可能となっている。今後の課題としては、パソコン側のシステムに筋群毎の刺激を可能にしたり、フィードバック情報に基づいた刺激制御が可能のように検討を加えていく。

(3) 電気刺激神経細胞培養による電気刺激の作用の解析

我々は、ラット副腎髄質褐色細胞腫由来の神経細胞である PC12 変異細胞 (PC12m3) に直接電気を与え、その影響を調べている。100mA で 30 分通電したところ非常に高い神経突起の形成が観察されたが、電気刺激の時間

を 100mA で 60 分にしたところ多くの細胞はアポトーシスを起こした。

増殖因子やさまざまな外部刺激に応答する細胞内シグナル伝達経路は ERK、p38MAPK それに JNK の 3 つの経路が知られており、増殖因子は ERK に作用して細胞の増殖や分化に働き、サイトカインや物理的的刺激は p38MAPK と JNK に作用して主としてアポトーシスに働くことが見いだされている。今回、電気刺激は p38MAPK を介して神経分化と神経再生に働くことが p38MAPK の阻害剤である SB203580 を用いた PC12m3 細胞の実験により明らかとなった。さらに p38MAPK は転写因子の 1 つである CREB を活性化することで神経の活性化に働くことが判明した。

(4) 得られた成果の位置づけと今後の展望

人の筋肉は荷重立位で重力に抗して活動するが、合目的に必要な筋肉が動員される仕組みがあり『サイズの原理』という。速筋（白筋）は加齢とともに使われることが少なくなり早く衰える。一方、電気刺激は弱い刺激でも速筋を活性化するという性質がある。速筋は太い神経に支配されており、弱い電流はまず太い神経を刺激するからである。そこで、荷重立位周期的水平揺動刺激による抗重力メカニズムで遅筋（赤筋）を刺激し、揺動のタイミングに同期した電気刺激で速筋を活動させて、介護予防が必要とされる高齢者を安全かつ効果的にトレーニングできるシステムを開発するのが本研究の目標である。既に電気刺激の有用性に着眼して寝たきりの高齢者のための着衣型の電気刺激装置の開発が進められている。しかし我々は立位で荷重する CKC 運動の研究を長年行ってきており、寝た状態での単なる電気刺激だけでなく荷重位で電気刺激することに優位性があると考えている。荷重位では抗重力メカニズムが働き、人の持つ神経筋協調メカニズムを引き出すことができる。

本研究においてこの新しいトレーニングが若年者に有効であることは明らかになった。しかし、高齢者の筋肉は速筋を中心に著明な萎縮が見られるなど若年者とは異なった性質を持つ。さらに転倒骨折のリスクが高く、若年者と同様にトレーニングを行うことはできない。今後は新たに製作した転倒防止システムを利用して高齢者が安全かつ効果的に筋力トレーニングできるシステムの開発を行っていく必要がある。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 15 件)

①加納良男、平上二九三、元田弘敏、井上茂樹、友国由美子、河村顕治
薬剤高感受性 PC12 変異細胞内を用いた抗が

ん剤作用機序の解析

吉備国際大学保健科学部研究紀要、第 19 号、85-90、2009、査読無

②酒井孝文、河村顕治、宮地司
筋張力シミュレーション解析による変形性膝関節症の歩行分析

吉備国際大学保健福祉研究所研究紀要第 10 号、15-18、2009、査読無

③Kato S, Urabe Y, Kawamura K
Alignment control exercise changes lower extremity movement during stop movements in female basketball players.

The Knee. ;15(4):299-304, 2008、査読有

④河村顕治、加藤茂幸、加納良男、宮地 司、井上茂樹、松尾高行、阿部信寛、元田英一、鈴木康雄、グアン リー

Isokinetic Closed Kinetic Chain Exercise による膝リハビリテーション

吉備国際大学保健科学部研究紀要、第 13 号、85-89、2008、査読無

⑤加納良男、中桐佐智子、平上二九三、小池好久、三宅優紀、河村顕治

高浸透圧刺激による細胞内シグナル伝達機構の解析

吉備国際大学保健科学部研究紀要、第 13 号、57-61、2008、査読無

⑥Yoshio Kano, Noboru Horie, Shima Doi, Fumika Aramaki, Hidefumi Maeda, Fukumi Hiragami, Kenji Kawamura, Hirotochi Motoda, Yoshihisa Koike, Junichi Akiyama, Sueo Eguchi and Ken Hashimoto

Artepillin C Derived from Propolis Induces Neurite Outgrowth in PC12m3 Cells via ERK and p38 MAPK Pathways

Neurochem Res. ;33(9):1795-803, 2008、査読有

⑦ Shigeki Inoue, Hirotochi Motoda, Yoshihisa Koike, Kenji Kawamura, Fukumi Hiragami, Yoshio Kano

Microwave irradiation induces neurite outgrowth in PC12m3 cells via the p38 mitogen-activated protein kinase pathway

Neuroscience Letters ;432(1):35-9, 2008、査読有

⑧河村顕治

大腿直筋における CKC サイレント現象

日本臨床バイオメカニクス学会誌 Vol. 28, 375-379, 2007、査読有

⑨Kano Y, Nohno T, Shimada K, Nakagiri S, Hiragami F, Kawamura K, Motoda H, Numata K, Murai H, Koike Y, Inoue S, Miyamoto K

Osmotic shock-induced neurite extension via activation of p38 mitogen-activated protein kinase and CREB

Brain Res. 1154:1-7, 2007、査読有

⑩河村顕治

Closed Kinetic Chain Exercise
Journal of Clinical Rehabilitation
Vol.16 No.6 562-565、2007、査読無

①加納良男、中桐佐智子、平上二九三、小池
好久、河村顕治

高浸透圧刺激による神経細胞の分化
吉備国際大学保健科学部研究紀要、第12号、
103-107、2007、査読無

②河村顕治、加納良男、武田正則、古澤一成、
徳弘昭博

荷重立位での周期的床前後動揺刺激が脊髄
損傷患者の下肢筋群に及ぼす効果
吉備国際大学保健科学部研究紀要、第12号、
39-44、2007、査読無

③ Yoshihisa KOIKE, Soutarou IWAMOTO,
Yasuho FUKUMOTO, Fukumi HIRAGAMI, Kenji
KAWAMURA, Hirotohi MOTODA and Yoshio KANO
UVC irradiation induces neurite outgrowth
in PC12m3 cells via the p38 mitogen-
activated protein kinase and
transcription factor CREB pathway.
Tiss. Cult. Res. Commun. 25: 129-136, 2006、
査読有

④松尾高行、阿部信寛、河村顕治

Isokinetic Closed Kinetic Chain による下
肢筋力評価の有用性
スポーツ傷害 (J. Sports Injury) Vol.11:
23-25 2006、査読無

⑤松尾高行、阿部信寛、河村顕治

前十字靭帯再建術後患者における等速性閉
運動連鎖運動時の筋出力様式
日本臨床バイオメカニクス学会誌 Vol.27、
163-167、2006、査読有
〔学会発表〕(計7件)

①河村顕治

荷重立位周期的揺動刺激と筋電気刺激によ
る下肢筋力トレーニング
第20回日本運動器リハビリテーション学術
集会 2008年7月12日(東京・日本科学未
来館)

②河村顕治

荷重立位周期的水平揺動刺激と筋電気刺激
による筋力維持・廃用防止法
第45回日本リハビリテーション医学会学術
集会 2008年6月4日~6日(横浜)

③宮地 司、河村顕治

荷重立位周期的水平前後揺動刺激と筋電気
刺激による運動の呼気ガス分析
第18回日本臨床スポーツ医学会学術集会
2007年11月3日~4日(別府)

④宮地 司、河村顕治

荷重立位前後揺動刺激と筋電気刺激による
運動効果の検討
第43回日本理学療法学術大会 2007年5月
15日~17日(福岡)

⑤河村顕治

荷重立位での周期的床前後動揺刺激が脊髄

損傷患者の下肢筋群に及ぼす効果
第46回日本生体医工学会 2007年4月27日
(仙台国際センター)

⑥河村顕治

荷重立位周期的水平揺動刺激と筋電気刺激
による筋力維持・廃用防止法
平成18年度吉備国際大学学術シンポジウム
2007年2月10日(高梁市・吉備国際大学)

⑦河村顕治

荷重立位周期的水平揺動刺激と筋電気刺激
による筋力維持・廃用防止法
OUSフォーラム2006 2006年11月24日(岡
山市・岡山プラザホテル)

〔その他〕
ホームページ等

<http://www.kiui.ac.jp/~kawamura/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

河村 顕治 (KAWAMURA KENJI)
吉備国際大学・保健科学部・教授
研究者番号: 40278974

(2) 研究分担者

加納 良男 (KANO YOSHIO)
吉備国際大学・保健科学部・教授
研究者番号: 20224553
山本 敏泰 (YAMAMOTO TOSHIYASU)
岡山理科大学・工学部・教授
研究者番号: 20412158