

体圧を加圧しながら行うエアロビクス運動は心肺機能並びに筋機能を同時に向上させ得るか？
～効率のよいトレーニング方法の確立を目指して～

堀田 典生

目 次

要約	2
序論	3
研究 1	4
研究 2	11
総括	17
謝辞	17
研究成果発表	17
引用文献	18

体肢を加圧しながら行うエアロビクス運動は心肺機能並びに筋機能を同時に向上させ得るか？

～効率のよいトレーニング方法の確立を目指して～

堀田 典生 伊藤 守弘 尾方 寿好 西垣 景太

要約

自転車運動や持久走などの有酸素運動(エアロビクス運動)は、心肺機能を高めるトレーニングとして多くの競技スポーツのトレーニングメニューに組み込まれる。それと同時に、筋肥大や筋力の増強を狙った筋力トレーニング(レジスタンス運動)も様々な競技のトレーニングの一環として行われる。

筋肥大や筋力の増強のためには、最大筋力の 70%程度という強い負荷をかける必要があるため、比較的low負荷で行われるエアロビクス運動は、心肺機能・代謝機能の向上は期待できても、筋の形態・機能を改善させるには至らない。

ところで、約 10 年前、腕や脚の付け根を、約 180mmHg 程度の圧で圧迫しながらレジスタンス運動を行うという加圧トレーニングが日本で開発された。このトレーニング方法では、絶対に筋に効果を与えないような低負荷(最大筋力の 20%程度)でも筋肥大や筋力増強を生じさせる。

従って、脚や腕を加圧しながらエアロビクス運動を行えば、心肺機能のみならず、筋の形態・機能の改善・向上も“同時に効果的”に行うことができ得る。そのことを確認し、この新たなトレーニング方法により競技パフォーマンスの改善がみられるか否かを明らかにすることを目的とした。

被検者は学生トライアスロン競技選手とし、週 3 回 4 週間の自転車トレーニングを酸素摂取予備能の 55-70%強度にて実施した。両大腿部付け根を加圧してトレーニングを実施する群と、加圧しない対照群に無作為に振り分けた。両群共にトレーニングにより持久的運動能力は有意に増加したが、筋力に有意な向上は認められなかった。また、走、泳、自転車走の持久的運動パフォーマンスも有意な改善には至らなかった。

一方、非持久的鍛錬者を対象に、週 3 回 4 週間のトレーニングを酸素摂取予備能の 45-50%強度にて実施した場合、持久的運動能力は有意に増加し、加圧してトレーニングをする群のみ筋力の向上も認められた。

以上の結果より、加圧しながらのエアロビクス運動は、非持久的鍛錬者の有酸素性能力と筋機能を同時に向上させる効率的なトレーニングと言えるが、持久的運動選手の持久的運動パフォーマンスを改善させるには至らず、本トレーニング方法を競技スポーツに応用するためには、さらなる改善が必要とされることが示唆された。

序論

自転車運動や持久走などの有酸素運動(エアロビクス運動)は、心肺機能を高めるトレーニングとして多くの競技スポーツのトレーニングメニューに組み込まれる。それと同時に、筋肥大や筋力の増強を狙った筋力トレーニング(レジスタンス運動)も様々な競技スポーツのトレーニングの一環として行われる。

筋肥大や筋力の増強のためには、最大筋力の 70%程度という強い負荷をかける必要があるため(ACSM 2009)、比較的低負荷で行われるエアロビクス運動は、心肺機能・代謝機能の向上は期待できても、筋の形態・機能を改善させるには至らない。

ところで、近年トレーニングの効率化が求められている(Gibala et al. 2012)。例えば、全身持久力を高めるための高強度インターバルトレーニング(High-Intensity Interval Training: HIT)が、通常の持久性トレーニングの 1/10 の量で全身持久力を高めること、さらにそうしたトレーニングが糖尿病患者に有効とする研究がヒトで証明されている(Gibala et al. 2012)。この HIT のプロトコルの一つである Tabata protocol (Tabata et al. 1996, 1997) (日本生まれのプロトコル)が世界的にもよく用いられている。

私たちは、トレーニングの効率を上げるために、持続的な運動能力と筋機能を同時に高められないか検討することとした。そして、日本生まれの加圧トレーニング(特許: 2670421) (Sato 2005)とエアロビクス運動を組み合わせることで、この目的を達成できないかと考えた。なぜなら、加圧トレーニングでは、絶対に筋に効果を与えないような低負荷(最大筋力の 20%程度)でも筋肥大や筋力増強を生じさせることが証明されているからである。

従って、脚や腕を加圧しながらエアロビクス運動を行えば、心肺機能のみならず、筋の形態・機能の改善・向上も“同時に効果的”に行うことができ得る。そのことを確認し、この新たなトレーニング方法により競技パフォーマンスの改善がみられるか否かを明らかにすることを第一の目的とした。本研究では、この目的を達成するためにトライアスロン選手を選んだ。走・泳・自転車走の3種の競技パフォーマンスに対する影響を観察できることがその理由であった。

また、近年アメリカスポーツ医学会は、一般の方の健康の維持・増進のために、有酸素性能力の向上のみならず、筋力の増強の必要性を唱えている(Garber et al. 2011)。このことは、本邦における、ロコモティブシンドローム予防のためには筋力の向上が必要であるという姿勢と一致している。そこで、非持続的鍛錬者を対象にして、加圧しながらのエアロビクス運動により心肺機能のみならず、筋の形態・機能の改善・向上が同時に生じるか検討することを第二の目的とした。

これまでに、心肺機能と筋機能は別々にトレーニングされていたが、“同時に行い”そして、“両機能”の向上が認められるかを明らかにしようとする点に本研究の独創性が見いだせる。また、これまでに、加圧ウォーキングなど、体肢を加圧しながら有酸素運動を行うという試みはされている。しかし、それら試みは一般健常者を対象としたもので、運動競技者向けに実施されたものではない。本研究は、フィットネスという領域に加え、競技力向上のために、“同時に”心肺機能と筋機能を向上させ得る手段の開発並びに普及に力を入れようとするものであり、この点に新規性があるといえる。

また、加圧を行いながら自転車運動する事例はこれまでにない。競技スポーツの分野でトレーニング機器として大変に普及している自転車エルゴメータを利用して、その効果を評価しようとする点に実用性が認められ得る。

本研究の期待される結果は、大腿部を加圧しながら自転車運動を行うことで、心肺機能(持久的運動能力)と筋機能(筋量・筋力)を“同時に効率よく”，増強させることである。そして、この研究成果は以下のような効果を期待できると考えられた。

- A) トレーニングの効率化を提案できる。従って、従来と同じ時間でより多くのプログラムを消化することにつながり、基礎体力の向上だけでなく技術面の向上も期待でき、競技力向上に貢献し得る。
- B) 例えば、シンスプリントをはじめとした一過性の障害や怪我の際、下肢への負担軽減のために、自転車運動が用いられる。これまでは、自転車運動により心肺機能の維持はできても筋機能の低下は防ぐことができなかった。本トレーニング方法を用いることで、心肺機能の維持のみならず、筋力の維持にも働き、リハビリからの復帰やディトレーニングの影響を最小限に抑えることができる。そのため、競技スポーツ界のみならず、フィットネススポーツ界にも貢献し得る。
- C) 加圧トレーニングは通常のトレーニングよりも効果が早期に現れ、疲労を残すことが少ないという性質があるため、短期間のコンディショニングやテーピングなどに役立つ。故に、競技スポーツ界に貢献し得る。
- D) 国際宇宙ステーション開発により、宇宙での長期滞在が可能になった昨今、宇宙での効果的な身体トレーニングが重要視されている。なぜなら、宇宙飛行士は、週約6日1日約2時間程度もの身体トレーニングに時間を費やしているからである(Trappe et al. 2009)。国際宇宙ステーションにはすでに自転車エルゴメータが設置されているため(Trappe et al. 2009)、本方法は実現可能で大きな効果を宇宙滞在者に期待できる。もしも、現実化されれば、スポーツ科学の重要性を世界中の方々に認識してもらえらる契機となり得る。

研究1 加圧しながらの有酸素運動がトライアスロン選手の持久的運動パフォーマンスに及ぼす影響

(1)背景

自転車運動や持久走などの有酸素運動(エアロビクス運動)は、心肺機能を高めるトレーニングとして多くの競技スポーツのトレーニングメニューに組み込まれる。それと同時に、筋肥大や筋力の増強を狙った筋力トレーニング(レジスタンス運動)も、様々な競技のトレーニングの一環として行われる。

筋肥大や筋力の増強のためには、最大筋力の70%程度という強い負荷をかける必要があるため(ACSM 2009)、比較的低負荷で行われるエアロビクス運動は、心肺機能・代謝機能の向上は期待できても、筋の形態・機能を改善させるには至らない。

約 10 年前、腕や脚の付け根を、約 180mmHg 程度の圧で圧迫しながらレジスタンス運動を行うという加圧トレーニングが日本で開発された。Sato と Ishi の研究グループを中心に、これまで筋に効果を与えないと考えられてきた低負荷(最大筋力の 20%程度)でも筋肥大や筋力増強を生じさせることが報告された(Shinohara et al. 1998; Takarada et al. 2000b, 2002; Abe et al. 2005)。

従って、体肢を加圧しながらエアロビクス運動を行えば、心肺機能のみならず、筋の形態・機能の改善・向上も“同時に効果的”に行うことができ得ると考えられた。そのことを確認し、この新たなトレーニング方法により競技パフォーマンスの改善がみられるか否かを明らかにすることを目的とした。

本研究では、トライアスロン選手を対象にした。トライアスロンとは、スイム・バイク・ランの 3 種目を、この順番で 1 人のアスリートが連続して行う耐久競技を指す。水泳、自転車ロードレース、長距離走の 3 種目持久的運動能力を必要とする種目であり、トレーニングが 3 種のパフォーマンスに及ぼす影響を評価できるようにトライアスロン選手を研究の対象にすることにした。

(2)方法

1) 被検者

被検者は大学トライアスロン部に所属する大学生 11 人であり、ランダムに加圧群(男性 4 名、女性 1 名)と対照群(男性 5 名、女性 1 名)に振り分けた。年齢、身長、体重、競技歴は、加圧群にて、20.2±0.8 歳、166.2±9.3 cm、56.5±5.3 kg、1.9±1.0 年、対照群にて、20.2±0.7 歳、166.8±8.9 cm、57.0±4.7 kg、2.0±0.7 年であった(値は平均値と標準偏差)。全ての被検者に本研究の目的、方法を十分に説明した後、研究に参加することの同意を得た。本研究は、中部大学倫理審査委員会の承諾を得て行った。

2) 実験手順

4 週間のトレーニング前後にて測定を実施した。トレーニング後の測定は終了から 1 週間以内に実施した (図 1)。

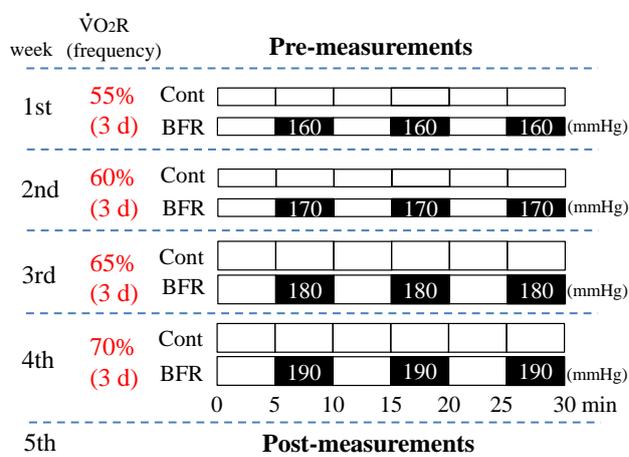


図 1 トレーニング並びに実験プロトコル

$\dot{V}O_2R$ は酸素摂取予備能を示す。Post-measurement(トレーニング後の測定)はトレーニング終了後 1 週間以内に実施された。黒く示されている 5 分間×3 にて加圧を数値の圧にて実施。Cont は対照群、BFR は血流制限群を示す。

3) トレーニング

被検者は、4週間の自転車エルゴメータ(Aerobike 75XLIII, COMBI wellness, Japan)を用いたトレーニングを1日30分、週3回の頻度にて実施した(図1)。トレーニング強度算出のために、自転車エルゴメータを用いた運動負荷試験を事前に実施し、その試験中に得られた安静時酸素摂取量と最高酸素摂取量から酸素摂取予備能($\dot{V}O_2R$)を評価した。 $\dot{V}O_2R$ は、最高酸素摂取量と安静時酸素摂取量の差から算出した。すなわち、

$$\text{運動強度} = (\text{酸素摂取量} - \text{安静時酸素摂取量}) \div (\text{最高酸素摂取量} - \text{安静時酸素摂取量})$$

$$\text{目標酸素摂取量} = \text{運動強度} \times (\text{最高酸素摂取量} - \text{安静時酸素摂取量}) + \text{安静時酸素摂取量}$$

1週目を55% $\dot{V}O_2R$ として、以降1週間ごと5% $\dot{V}O_2R$ ずつ上げた。ペダル回転数は90rpmとした。

加圧群は、幅6cmのカフ(SC5, D.E. Hokanson, USA)を両大腿部付け根に巻き(図2)、1週目を160mmHgで圧迫し、以降1週間ごとに10mmHgずつ上げた。この圧の設定は先行研究(Abe et al. 2006, 2009)に従った。この圧により、運動中静脈のみ遮断できることが証明されている(Burgomaster et al. 2003)。圧の調整は窒素ガスを用いたカフインフレーター(Occluder, ARCOSYSTEM, Japan)を用いた。血栓生成の予防のため、加圧は運動開始5分後から5分間として5分おきに3回(計15分)実施した。この時間は、安全に加圧トレーニングを実施するためのガイドライン(下肢では15-20分以上継続して加圧すべきでない)(Nakajima et al. 2011)に準じた。また、必ずトレーニング中からトレーニング後にかけての水分摂取を促した。

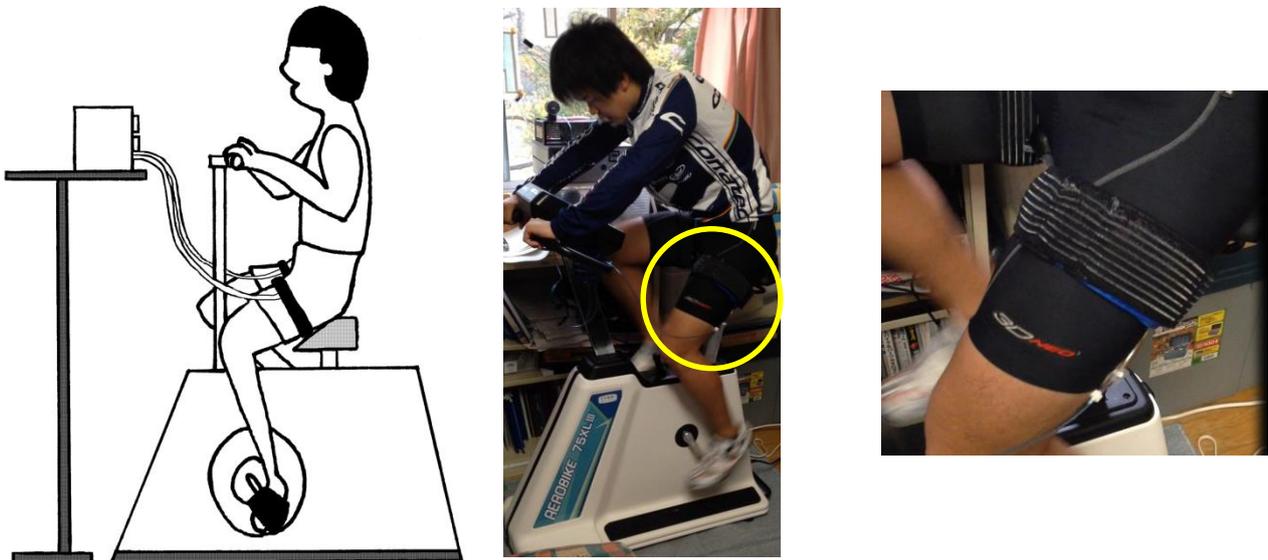


図2 加圧と有酸素運動を組み合わせたトレーニング

黄色の円を拡大させたものが写真右。両大腿部の付け根を160-190mmHgで圧迫し血流制限を行った。

4) 運動パフォーマンスの測定

泳力を評価するために、25m 温水プールを用いて、1500m タイムトライアルを実施した。走力を評価するために、5000m タイムトライアルを実施した。全天候型の400mトラックを用いた。どちらの測定においてもウォーミングアップのための時間を充分設けたが、その内容に関しては制限しなかった。

自転車のパフォーマンス評価のために、20 分間走行距離テストを実施した。被検者は指定されたロード用自転車(F95, FELT, Germany)に乗り、ローラー台(V130, MINOURA, Japan)を用いて実施した。距離はサイクルコンピューター(Watt Master, MINOURA, Japan, あるいは, STRADA, CC-RD420DW, CATEYE, Japan)で計測し、測定中のギアのチェンジは自由にした。本試験のためのウォーミングアップはスタート前 10 分と限定した。

5) 運動生理学的指標の測定

運動負荷試験中の酸素摂取量は呼気ガス分析装置(Aeromonitor AE-310s, Minato medical science, Japan)と自転車エルゴメータ(Aerobike 75XLIII, COMBI wellness, Japan)を用いて測定した。被検者は5 分の座位安静の後にウォーミングアップを目的に3 分間 0W の空こぎを行った。続いて、1 分間に 20W ずつ上昇するランプ負荷にて運動負荷試験を実施した。ペダル回転数は 60rpm とし、運動終了のポイントは、疲労困憊によりペダル回転数が 50rpm を下回った時とした。20 秒毎に平均した酸素摂取量の最大値を最高酸素摂取量として、有酸素能力の指標とした。

本研究では、膝伸展筋力測定台(T.K.K.5715, Takei Science Instrument, Japan)とストレインゲージ(T.K.K.5402, Takei Science Instrument, Japan)を用いて膝関節角度 100 度位(完全伸展が 180 度)にて静的な片脚膝伸展最大筋力を測定した。1 分程度の休憩をはさみ 3 回実施し、最大値を採用した。

また、筋の形態評価のために、大腿部全面の筋厚を超音波診断装置(Viamo, Toshiba Medical Systems, Japan)を用いて計測した。リニアプローブを、大腿部(大転子から膝関節の中央部)に垂直にあて断層画像を記録した。立位で測定し、プローブで組織を圧迫しないように注意した。皮下脂肪と筋肉の境目から大腿骨と筋肉まで境目までの距離を筋厚として測定した(図 3)。

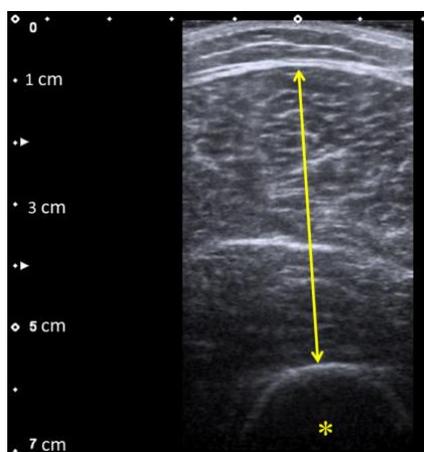


図 3 大腿部前面の筋厚の評価

皮下脂肪と筋肉の境目から大腿骨(*)と筋肉まで境目までの距離を筋厚として測定した。

6) 統計

値は平均値と標準誤差で示した。加圧しながらの自転車トレーニングの影響を検討するために、繰り返しのある2要因分散分析[時間(Pre vs Post), 群(加圧 vs 対照)]を行った。多重比較にはScheffe法を用いた。本研究では危険率5%未満をもって有意とした。統計解析にはStatView5.0ソフトウェアを用いた。

(3)結果

1) 運動パフォーマンス

図4は1500m泳タイムトライアルの結果を示している。主効果(時間)と時間×群の交互作用は認められなかった。

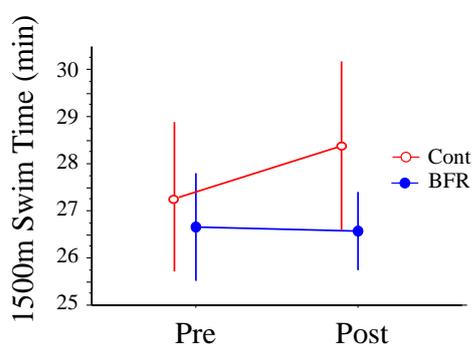


図4 1500m 泳タイム(分)

Pre: トレーニング前

Post: トレーニング後

Cont: 対照群

BFR: 加圧群

値は平均値±標準誤差

図5は5000m泳タイムトライアルの結果を示している。1500m泳タイムと同様に、主効果(時間)と時間×群の交互作用は認められなかった。

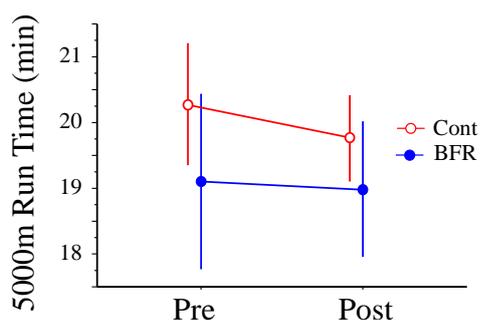


図5 5000m 走タイム(分)

Pre: トレーニング前

Post: トレーニング後

Cont: 対照群

BFR: 加圧群

値は平均値±標準誤差

図6は20分間自転車ディスタンストライアルの結果を示している。走・泳のタイムトライアルの結果と同様に、主効果(時間)と時間×群の交互作用は認められなかった。

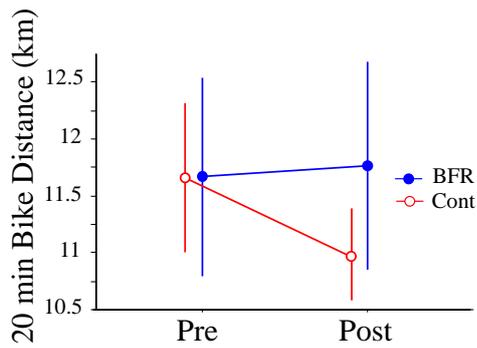


図6 20分間ロードバイク走距離(km)

Pre: トレーニング前
 Post: トレーニング後
 Cont: 対照群
 BFR: 加圧群
 値は平均値±標準誤差

2) 有酸素性に及ぼす影響

図7は最高酸素摂取量の結果を示している。対照群と加圧群では変化の仕方が異なるように見えるが、時間×群の交互作用は認められなかった。しかし、時間における主効果(P=0.017)が認められ、本トレーニングにより有酸素性を向上させることが分かった。下位検定では、対照群に有意差は認められなかったが、加圧群ではトレーニング前に比べてトレーニング後において増加傾向(P=0.053)であった。

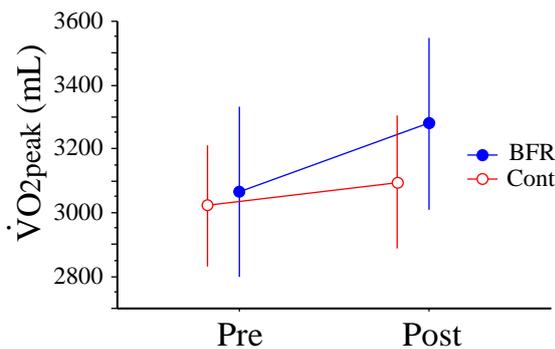


図7 最高酸素摂取量(VO_{2peak})

Pre: トレーニング前
 Post: トレーニング後
 Cont: 対照群
 BFR: 加圧群
 値は平均値±標準誤差

また、運動負荷試験中の最高負荷(図8)についても同様に、時間×群の交互作用は認められなかったが、時間における主効果(P<0.001)が認められた。下位検定においては、対照群、加圧群共にトレーニング前に比べて、トレーニング後において有意な増加が認められた(P<0.01)。

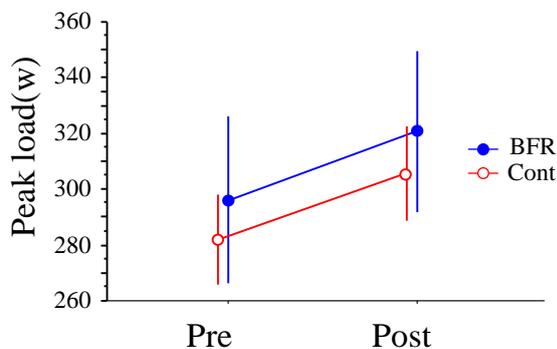


図8 運動負荷試験終了時の負荷(最高負荷)

Pre: トレーニング前
 Post: トレーニング後
 Cont: 対照群
 BFR: 加圧群
 値は平均値±標準誤差

3) 筋の形態・機能に及ぼす影響

図 9 はトレーニング前後の膝伸展最大筋力の結果を示している。主効果(時間)と時間×群の交互作用は認められなかった。

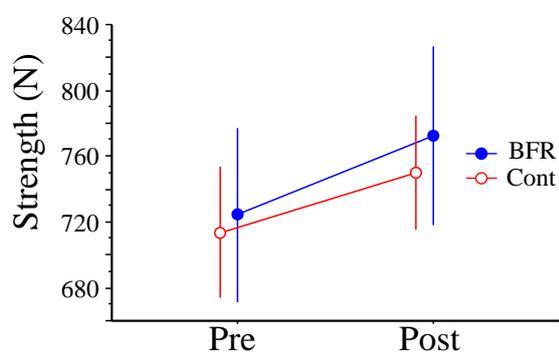


図 9 膝伸展最大筋力

Pre: トレーニング前
Post: トレーニング後
Cont: 対照群
BFR: 加圧群
値は平均値±標準誤差

図 10 はトレーニング前後の大腿部全面の筋厚の結果を示している。主効果(時間)と時間×群の交互作用は認められなかった。

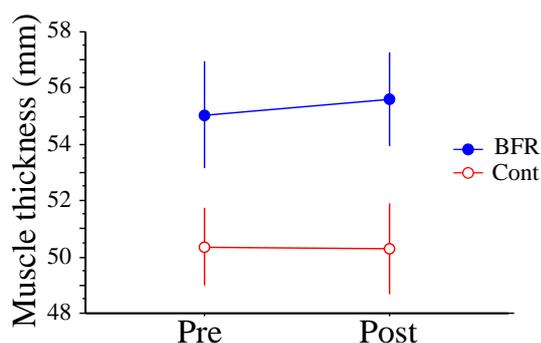


図 10 大腿部前面筋厚

Pre: トレーニング前
Post: トレーニング後
Cont: 対照群
BFR: 加圧群
値は平均値±標準誤差

(4)考察

本研究の目的は、加圧しながらの有酸素性トレーニングにより、有酸素性能力と筋機能の向上をもたらす、さらに運動パフォーマンスが向上するか検討することであった。自転車エルゴメータを用いた運動負荷試験において、最高酸素摂取量と最高負荷の時間における主効果(トレーニング前<トレーニング後)が認められた。すなわち、4週間のトレーニングにより有意な有酸素性能力の増加が認められた。しかし、全ての測定項目において、時間(トレーニング前 vs トレーニング後)×群(加圧群 vs 対照群)の交互作用は認められず加圧による血流制限は有意な効果をもたらさなかった。

自転車エルゴメータを用いた運動負荷試験における最高酸素摂取量と最高負荷の有意な増加は当然と言える。なぜなら、先行研究を参考にし、有酸素性能力を向上させ得る強度よりも高い強度にてトレーニングしたからである(Swain and Franklin 2002; Garber et al. 2011)。しかしながら、加圧しながら歩行トレーニングをすることで、加圧しない群よりも最大酸素摂取量が高くなったと報告した Abe et al. (2006)の先行研究とは一致しなかった。この理由は、年齢層の違い(高齢者 vs 若齢

者), 被検者特性の違い(非競技者 vs 競技者), 運動トレーニング様式の違い(歩行 vs 自転車)に起因すると考えられる。

これまでに、持久的運動能力と筋力を1つのトレーニングにより向上させた研究は過去に2件だけであり、一つは高強度インターバルトレーニング(Tabata et al. 1990)と一つは特殊なトレーニング装置を用いたものである(Hass et al. 2001)。従って、有酸素性能力と筋機能を同時に向上させることはいかに難しいかが分かる。本研究では、加圧群についてはトレーニングにより有酸素性能力の向上に加え、筋力が向上すると考えられた。しかしながら予想に反して筋機能は向上しなかった。この理由は、トレーニング期間の短さや頻度の少なさが少なからず影響していると考えられた。

本研究では、パフォーマンステストにおいても加圧と有酸素トレーニングの組み合わせによる顕著な効果は確認されなかった。被検者が現役の持久性アスリートであることでトレーニング効果が小さく有意な改善に至らなかったことが考えられた。従って、トレーニング期間延長や運動習慣の無い集団や定期的な持久性トレーニングを実施していない集団を対象にした研究の必要性が示唆された。

研究2 加圧に伴う血流制限下の自転車運動は、筋機能と有酸素性能力を同時に向上させるか

(1)背景

身体を動かすのに必要な器官、特に運動器に障害や委縮が起こり、自分で移動する能力が低下して要介護になる危険度が高い諸症状のことをロコモティブシンドロームという。日本整形外科学会が提唱している概念であり、2012年に厚生労働省が発表した第2次健康日本21では、10年後の2022年までにこのシンドロームに対する国民の認知度を80%まで上げることを目標に掲げている。

厚生労働省の調査によれば、要支援・要介護になる原因の1位は運動器障害であり、よく知られている脳血管障害や認知症よりも高率であることから、同シンドロームの予防は健康寿命延長の大きな要因となり得る。

ロコモティブシンドロームかどうかのチェックポイントとして、日本整形外科学会が挙げているポイントは、1)片脚立ちで靴下がはけない、2)家の中でつまずいたり滑ったりする、3)階段を上るのに手すりが必要である、4)横断歩道を青信号で渡りきれない、5)15分ぐらい続けて歩けない、6)2キログラム程度の買い物をして持ち帰るのが困難である、7)布団の上げ下ろしなどの家のやや重い仕事が困難である、の7点である。これらの多くは、骨格筋機能の低下が関与しており、筋力向上のためのレジスタンストレーニングが重要視されてきている。この傾向は、近年アメリカスポーツ医学会の健康の維持・増進のためには有酸素運動のみならずレジスタンストレーニングも必要であるという立場(Garber et al. 2011)とも一致している。

筋肥大や筋力の増強のためには、最大筋力の70%程度という強い負荷をかける必要があるため(ACSM 2009)、比較的低負荷で行われるエアロビクス運動は、心肺機能・代謝機能の向上は期待できても、筋の形態・機能を改善させるには至らない。しかしながら、腕や脚の付け根を、約180mmHg程度で圧迫し血流を制限することで、これまで筋に効果を与えないと考えられてきた低負荷(最大

筋力の 20%程度)でも筋肥大や筋力増強を生じさせることが報告されている(Shinohara et al. 1998; Takarada et al. 2000b, 2002; Abe et al. 2005). 従って, 脚や腕を加圧しながらエアロビクス運動を行えば, 心肺機能のみならず, 筋の形態・機能の改善・向上も“同時に効果的”に行うことができ得ると考えられる.

そこで本研究では, 脚を加圧し血流を制限しながらのエアロビクス運動により, 心肺機能のみならず, 筋の形態・機能の改善・向上が同時に生じるか確認することを目的とした.

(2)方法

1) 被検者

被検者は健康な 15 人であり, 5 名(B, C, F, H, K)は大学のスポーツクラブに所属し, 内 4 人(B, C, F, H)は選手であった. 4 人の内 2 名は定期的なレジスタンストレーニングを約 1 年間実施していた(F, H). その 2 名にはレジスタンストレーニングプログラムを変更せずに続けるように指示した. その他の被検者は定期的な運動習慣はないものの活発的な日常生活を送る人たちであった. 被検者の情報は以下の表に示した(表 1).

被検者をランダムに加圧群(9 名)と対照群(6 名)に振り分けた. 全ての被検者に本研究の目的, 方法を十分に説明した後, 研究に参加することの同意を得た. 本研究は, 中部大学倫理審査委員会の承諾を得て行った.

表 1 被検者の身体的特性

Group	Subject	Gender	Age (yr)	Hight (cm)	body mass (kg)	Club		Resistance Training
RBF	A	male	18	184.5	70.8			
	B	male	18	173.3	61.8	Ultimate	Player	
	C	male	19	184.5	72.6	Soccer	Goal keeper	
	D	male	19	169.5	68.0			
	E	male	33	172.5	63.0			
	F	male	20	167.2	69.2	Judo	Player	○
	G	male	25	174.6	94.4			
	H	male	20	171.2	70.2	Athletics	Discus thrower	○
	I	male	28	179.4	71.2			
Cont	J	male	27	172.4	55.4			
	K	female	20	168.0	65.6	Lacrosse	Asistant	
	L	male	21	182.0	76.4			
	M	male	20	171.5	61.4			
	N	male	19	174.5	60.8			
	O	male	20	164.4	55.6			

RBF:加圧による血流制限群, Cont:対照群, Ultimate: アルティメット競技者, 被検者 F と H は定期的なレジスタンストレーニングを 1 年間続けていた.

2) 実験手順

4週間のトレーニング前後にて測定を実施した。トレーニング後の測定は終了から1週間以内に実施した(図11)。

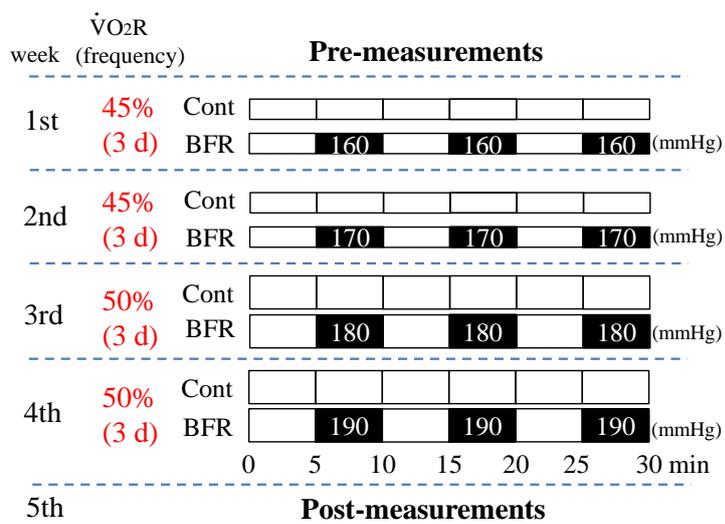


図11 トレーニング並びに実験プロトコル

$\dot{V}O_2R$ は酸素摂取予備能を示す。Post-measurement(トレーニング後の測定)はトレーニング終了後1週間以内に実施された。運動強度(% $\dot{V}O_2R$)が研究1のトレーニングと異なっていることに注意。研究1の55-70% $\dot{V}O_2R$ の運動強度に対して、研究2では45-50% $\dot{V}O_2R$ を採用した。Cont: 対照群, BFR: 加圧群

3) トレーニング

被検者は、4週間の自転車エルゴメータ(Aerobike 75XLIII, COMBI wellness, Japan, または, Aerobike 900U-ex, COMBI wellness, Japan)を用いたトレーニングを1日30分、週3回の頻度にて実施した(図11)。強度は、トレーニング前に測定した運動負荷試験より得られた酸素摂取予備能($\dot{V}O_2R$)を用い、1, 2週目を45%、3, 4週目を50% $\dot{V}O_2R$ とした。研究1(55-70% $\dot{V}O_2R$, 1週間ごと5% $\dot{V}O_2R$ ずつ増加)よりも低く設定した理由は、被検者が持久的鍛錬者ではなかったことによる。ペダル回転数は60rpmとした。ペダル回転数が研究1(90rpm)と異なる理由は、自転車競技者の一般的なペダル回転数と非鍛錬者のそれは異なり、一般的に用いられるペダル回転数を採用したことによる。

加圧群は、幅6cmのカフ(SC5, D.E. Hokanson, USA)を両大腿部付け根に巻き(図12)、1週目を160mmHgで圧迫し、以降1週間ごとに10mmHgずつ上げた。圧の調整は窒素ガスを用いたカフインフレーター(Occluder, ARCOSYSTEM, Japan)を用いた。血栓生成の予防のため、加圧は運動開始5分後から5分間として5分おきに3回(計15分)実施した。毎回のトレーニング中から後にかけて必ず500mLの水を摂取させた。

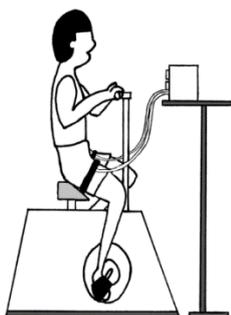


図12 加圧による血流制限下自転車運動トレーニングの様子

両大腿部の付け根を160-190mmHgで圧迫し血流制限を行った。

4) 運動生理学的指標の測定

運動負荷試験中の酸素摂取量は呼気ガス分析装置(Aeromonitor AE-310s, Minato medical science, Japan)と自転車エルゴメータ(Aerobike 75XLIII, COMBI wellness, Japan)を用いて測定した。被検者は5分の座位安静の後にウォーミングアップを目的に3分間0Wの空こぎを行った。続いて、1分間に20Wずつ上昇するランプ負荷にて運動負荷試験を実施した。ペダル回転数は60rpmとし、運動終了のポイントは、疲労困憊によりペダル回転数が50rpmを下回った時とした。20秒毎に平均した酸素摂取量の最大値を最高酸素摂取量として、有酸素性能力の指標とした。

本研究では、膝伸展筋力測定台(T.K.K.5715, Takei Science Instrument, Japan)とストレインゲージ(T.K.K.5402, Takei Science Instrument, Japan)を用いて膝関節角度100度位(完全伸展が180度)にて静的な片脚膝伸展最大筋力を測定した。1分程度の休憩をはさみ3回実施し最大値を採用した。

大腿部横断面積の推定は先行研究(Abe et al. 2006, 2010; Fujita et al. 2008)に従った。すなわち、大腿部(大転子から膝関節の真中)の周囲長をメジャーで測定し直径を算出し、超音波診断装置(Viamo, Toshiba Medical Systems, Japan)を用いて大腿部全面と後面の皮下脂肪の厚みを直径から除外し面積を算出した。

5) 血液凝固・線溶系因子の評価

本研究では、血流制限が血液凝固・線溶系因子に及ぼす影響を検討した。約5mLの血液を0.5mLの3.2%クエン酸ナトリウムが入った採血管へ上腕より採取した。直ちに15分間の冷却遠心(4°C, 3000rpm)(Model 2800, Kubota, Japan)を実施し血清を得た。血清は別の管に移し替え、分析まで-80°Cにて冷凍保存(Micro cool MC-100, TOMY, Japan)した。本研究では、血栓症の判定に用いられるDダイマーと、血液凝固・線溶系因子であるプラスミノゲンアクチベーター-インヒビタ複合体とトロンビン-アンチトロンビンIII複合の3つについて検討した。

6) 統計

値は平均値と標準誤差で示した。加圧しながらの自転車トレーニングの影響を検討するために、繰り返しのある2要因分散分析[時間(Pre vs Post), 群(加圧 vs 対照)]を行った。多重比較にはScheffe法を用いた。また、トレーニング前後の変化率を算出し、群間にてマンホイットニーU検定を実施して比較した。本研究では危険率5%未満をもって有意とした。統計解析にはStatView5.0ソフトウェアを用いた。

(3)結果

1) 筋機能・形態に及ぼす影響

図13Aはトレーニング前後の最大筋力の変化、図13Dはその変化率を示している。また、図13Bは大腿部の推定横断面積、図13Eはその変化率を示している。最大筋力において、時間・群における主効果は認められなかったが、時間×群の交互作用(P=0.04)が検出された(図13A)。さらに、下位

検定においては、対照群ではトレーニング前後に有意な差は認められなかったが、加圧群はトレーニング前に比べて有意に増加した(P=0.006). 加えて、トレーニング前からトレーニング後の変化率についても、対照群に比較して加圧群では有意な高値を示した(P<0.01). これらの結果は、定期的なレジスタンストレーニングを実施している被検者 F と H を、解析の対象から除外しても同じであった.

一方で筋横断面積については、時間における主効果や交互作用は観察されなかったが、群における主効果(P=0.01)が認められた. トレーニング前後の変化率については有意な差は認められなかった.

2) 最高酸素摂取量に及ぼす影響

図 13C は最高酸素摂取量のトレーニング前後の変化, 図 13F はその変化率を示している. 全ての被検者においてトレーニング後の最高酸素摂取量はトレーニング前に比べて増加し, 時間における主効果が検出された(P=0.03). しかし, 群における主効果, 時間×群の交互作用は認められず, 変化率においても有意な差は認められなかった.

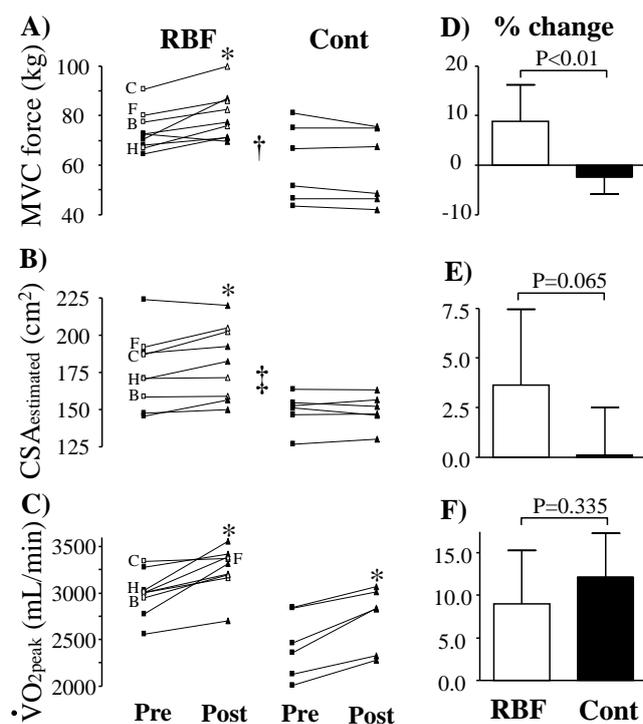


図 13 トレーニング前後の膝伸展最大筋力(MVC force), 大腿部推定横断面積(CSA_{estimated}), 最高酸素摂取量(VO_{2peak})とその変化率

RBF: 加圧に伴う血流制限群, Cont: 対照群, Pre: トレーニング前, Post: トレーニング後
B, C, F, H は表 1 の被検者に対応し運動クラブの選手を示している. *P<0.05 vs Pre, †交互作用あり(P<0.05) ††交互作用ありの傾向(P=0.066). グラフ A, B, C は各個人のデータを示している. グラフ D, E, F の値は平均値±標準誤差.

3) 血流制限を組み合わせたトレーニングが血液凝固・線溶系に及ぼす影響

表 2 は、トレーニング前後における血栓症の判定に用いられる D ダイマーと、血液凝固・線溶系因子であるプラスミノゲンアクチベーター-インヒビタ複合体とトロンビン-アンチトロンビン III 複合体の変化を示しているが、時間×群の交互作用や主効果は検出されなかった。

表 2 加圧に伴う血流制限が血液凝固・線溶系因子に及ぼす影響

	BFR				Cont			
	Pre		Post		Pre		Post	
TAT	1.77	± 0.67	2.92	± 3.99	2.20	± 1.07	2.37	± 1.18
t-PAIC	21.56	± 7.80	19.78	± 8.17	22.17	± 11.07	34.33	± 25.37
D-dimer	0.20	± 0.10	0.13	± 0.03	0.15	± 0.04	0.16	± 0.10

TAT: トロンビン-アンチトロンビン III 複合体, t-PAIC: プラスミノゲンアクチベーター-インヒビタ複合体, D-dimer: D ダイマー. BFR: 血流制限群, Cont: 対照群, Pre: トレーニング前, Post: トレーニング後. 値は平均値±標準誤差

(4)考察

本研究の目的は、加圧しながらの有酸素性トレーニングにより、有酸素性能力と筋機能の同時の向上が生じるか検討することであった。自転車エルゴメータを用いた運動負荷試験において最高酸素摂取量の時間における主効果(トレーニング前<トレーニング後)が認められた。すなわち、4 週間のトレーニングにより有意な有酸素性能力の増加が認められた。さらに、最大筋力においては、時間(トレーニング前 vs トレーニング後)×群(加圧群 vs 対照群)の交互作用が認められ、対照群ではトレーニング前後の有意な変化が認められなかったのに対して、加圧群はトレーニング前に比べてトレーニング後に有意な増加が認められた。以上のことから加圧に伴う血流制限と有酸素トレーニングの組み合わせにより有酸素性能力と筋機能は同時に向上することが明らかとなった。

有酸素性能力の向上は研究 1 の結果と同様であり、先行研究(Swain and Franklin 2002; Garber et al. 2011)を参考にした有酸素性能力を向上させ得る運動強度、時間、頻度に設定したため当然といえる。筋力の向上に関しては、筋肥大を生じさせるような高強度(最大筋力の 70%程度以上)ではなかったが、加圧に伴う血流制限により活動筋が強く酸性に傾き、それを引き金に成長ホルモンやインスリン様成長因子 1 などの分泌が促されることが、その機序の一つとして考えられた(Takarada et al. 2000a; Takano et al. 2005; Abe et al. 2005)。

これまでに、持久的運動能力と筋機能を 1 つのトレーニングにより向上させた研究は過去に 2 件だけであり、一つは高強度インターバルトレーニング(Tabata et al. 1990)と、一つは特殊なトレーニング装置を用いたものである(Hass et al. 2001)である。従って、非鍛錬者にも応用可能なトレーニングとして、世界で初めて有酸素性能力と筋機能を同時に向上させた研究であると言える。

本研究において、血栓マーカーやその他の血液凝固・線溶系因子はトレーニング前後の間、また

対照群と加圧群の間、さらにその交互作用において有意な差は検出されなかった。従って、本研究で用いた加圧に伴う血流制限による血栓が生成される有意なリスクはないと判断できる。この結果は、先行研究(Fujita et al. 2008)と一致する。

研究 1 と 2 の主な違いは、被検者(持久的鍛錬者 vs 主に非鍛錬者)とトレーニング強度(55-70% $\dot{V}O_2R$ vs 45-50% $\dot{V}O_2R$)である。前者については、研究 2 の方がトレーニング初期にみられるような神経系の適応などにより筋力の増加が検出しやすかった可能性がある。後者について、研究 1 のトレーニング強度は研究 2 のそれより最大で 20% $\dot{V}O_2R$ も高い。加圧トレーニングの特徴として高強度になると逆に効果が得られにくくなる(Wernbom et al. 2006)ということが知られており、この影響も否定できない。今後、トライアスロンや自転車競技者などの鍛錬者に対しても研究 2 で用いられた 45-50% $\dot{V}O_2R$ 程度まで下げて研究する必要がある。

総括

本研究では、脚を加圧し血流を制限しながらエアロビクス運動を行えば、心肺機能のみならず、筋の形態・機能の改善・向上も“同時に効果的”に行うことができ得ることを確認し、この新たなトレーニング方法により持久的競技パフォーマンスの改善がみられるか否かを明らかにすることを第一の目的とした。また、非持久的運動競技者を対象にして、加圧しながらのエアロビクス運動により心肺機能のみならず、筋の形態・機能の改善・向上が同時に生じるか検討することを第二の目的とした。

本トレーニング方法をトライアスロン競技者に 4 週間応用した結果、1) 持久的運動能力の向上は加圧をしない対照群と同じように有意に向上したが、2)筋力の有意な増加は認められず、3)さらに、走、泳、自転車走の 3 種の持久的運動パフォーマンスの改善には至らなかった。しかしながら、非持久的鍛錬者の集団に応用した結果、4)持久的運動能力の増加に加え、筋力の向上を認めた。

従って、本トレーニング方法は、非鍛錬者の有酸素性能力と筋機能を同時に向上させる効率的なトレーニングと言えるが、持久的運動選手のパフォーマンスを改善させるには至らない。本トレーニング方法を競技スポーツに応用するためには、さらなる改善が必要とされる。

謝辞

本研究は、財団法人上月スポーツ・教育財団第 9 回スポーツ研究助成事業の支援を受けて行われた。心からの感謝を申し上げます。

研究成果発表

(1)学会発表

1) 堀田典生. 加圧トレーニングの安全性の検証-微小重力環境での効果的なトレーニングを目指して- JAXA 宇宙環境利用科学委員会第 7 回「宇宙環境へ適応するための感覚 - 運動ゲインコントロール」についての研究チーム会合, 広島, 2012

- 2) 堀田典生, 西垣景太, 尾方寿好, 伊藤守弘, 石田浩司. 血流制限下筋力トレーニング中の血圧応答. 第16回日本体力医学会東海地方会, 三重, 2012
- 3) 堀田典生, 西垣景太, 尾方寿好, 伊藤守弘, 石田浩司. 血流制限をかけた筋力トレーニング時の高い昇圧反応と痛みの関連性. 第67回日本体力医学会大会, 岐阜, 2012
- 4) 堀田典生. 運動後虚血中の受動動作が換気応答に及ぼす影響. 第26回呼吸研究会, 岐阜, 2012
- 5) 堀田典生, 西垣景太, 石田浩司. 血流制限をかけた筋力トレーニング時の高い昇圧反応と筋代謝受容器反射の関連性. 第60回東海体育学会大会, 愛知, 2012
- 6) 堀田典生. 血流制限下の自転車運動は, 筋機能と有酸素能力を同時に改善する. JAXA 宇宙環境利用科学委員会第8回「宇宙環境へ適応するための感覚 - 運動ゲインコントロール」についての研究チーム会合, 京都, 2013
- 7) 堀田典生, 藤丸郁代, 近藤孝晴, 石田浩司. 4週間の血流制限下自転車トレーニングにより筋力と最高酸素摂取量は同時に高まる. 第68回日本体力医学会大会, 東京, 2013
- 8) 堀田典生, 石田浩司. 4週間の血流制限下自転車トレーニングが動脈スティッフネスに及ぼす影響. 第61回東海体育学会大会, 愛知, 2013

(2)受賞

- 1) 堀田典生. 『学術奨励賞』血流制限下筋力トレーニング中の血圧応答, 第16回日本体力医学会東海地方会, 三重, 2012
- 2) 堀田典生. 『一般の部, 最優秀賞』血流制限をかけた筋力トレーニング時の高い昇圧反応と筋代謝受容器反射の関連性, 第60回東海体育学会大会, 愛知, 2012

引用文献

- Abe T, Kearns CF, Fujita S, Sakamaki M, Sato Y, Brechue WF (2009) Skeletal muscle size and strength are increased following walk training with restricted leg muscle blood flow: implications for training duration and frequency. *Int J KAATSU Training Res* 5: 9-15
- Abe T, Kearns CF, Sato Y (2006) Muscle size and strength are increased following walk training with restricted venous blood flow from the leg muscle, Kaatsu-walk training. *J Appl Physiol* 100: 1460-1466
- Abe T, Sakamaki M, Fujita S, Ozaki H, Sugaya M, Sato Y, Nakajima T (2010) Effects of low-intensity walk training with restricted leg blood flow on muscle strength and aerobic capacity in older adults. *J Geriatr Phys Ther* 33: 34-40
- Abe T, Yasuda T, Midorikawa T, Sato Y, Kearns CF, Inoue K, Koizumi K, Ishii N (2005) Skeletal muscle size and circulating IGF-1 are increased after two weeks of twice daily “KAATSU” resistance training. *Int J KAATSU Training Res* 1: 6-12
- ACSM (2009) American College of Sports Medicine position stand. Progression models in resistance training for healthy adults. *Med Sci Sports Exerc* 41: 687-708

- Burgomaster KA, Moore DR, Schofield LM, Phillips SM, Sale DG, Gibala MJ (2003) Resistance training with vascular occlusion: metabolic adaptations in human muscle. *Med Sci Sports Exerc* 35: 1203-1208
- Fujita T, Brechue WF, Kurita K, Sato Y, Abe T (2008) Increased muscle volume and strength following six days of low-intensity resistance training with restricted muscle blood flow. *Int J KAATSU Training Res* 4: 1-8
- Garber CE, Blissmer B, Deschenes MR, Franklin BA, Lamonte MJ, Lee IM, Nieman DC, Swain DP (2011) American College of Sports Medicine position stand. Quantity and quality of exercise for developing and maintaining cardiorespiratory, musculoskeletal, and neuromotor fitness in apparently healthy adults: guidance for prescribing exercise. *Med Sci Sports Exerc* 43: 1334-1359
- Gibala MJ, Little JP, Macdonald MJ, Hawley JA (2012) Physiological adaptations to low-volume, high-intensity interval training in health and disease. *J Physiol* 590: 1077-1084
- Hass CJ, Garzarella L, de Hoyos DV, Connaughton DP, Pollock ML (2001) Concurrent improvements in cardiorespiratory and muscle fitness in response to total body recumbent stepping in humans. *Eur J Appl Physiol* 85: 157-163
- Nakajima T, Morita T, Sato Y (2011) Key considerations when conducting KAATSU training. *Int J KAATSU Training Res* 7: 1-6
- Sato Y (2005) The history and future of KAATSU Training. *Int J KAATSU Training Res* 1: 1-5
- Shinohara M, Kouzaki M, Yoshihisa T, Fukunaga T (1998) Efficacy of tourniquet ischemia for strength training with low resistance. *Eur J Appl Physiol* 77: 189-191
- Swain DP, Franklin BA (2002) $\dot{V}O_2$ reserve and the minimal intensity for improving cardiorespiratory fitness. *Med Sci Sports Exerc* 34: 152-157
- Tabata I, Atomi Y, Kanehisa H, Miyashita M (1990) Effect of high-intensity endurance training on isokinetic muscle power. *Eur J Appl Physiol* 60: 254-258
- Tabata I, Irisawa K, Kouzaki M, Nishimura K, Ogita F, Miyachi M (1997) Metabolic profile of high intensity intermittent exercises. *Med Sci Sports Exerc* 29: 390-395
- Tabata I, Nishimura K, Kouzaki M, Hirai Y, Ogita F, Miyachi M, Yamamoto K (1996) Effects of moderate-intensity endurance and high-intensity intermittent training on anaerobic capacity and $\dot{V}O_{2max}$. *Med Sci Sports Exerc* 28: 1327-1330
- Takano H, Morita T, Iida H, Asada K, Kato M, Uno K, Hirose K, Matsumoto A, Takenaka K, Hirata Y, Eto F, Nagai R, Sato Y, Nakajima T (2005) Hemodynamic and hormonal responses to a short-term low-intensity resistance exercise with the reduction of muscle blood flow. *Eur J Appl Physiol* 95: 65-73
- Takarada Y, Nakamura Y, Aruga S, Onda T, Miyazaki S, Ishii N (2000a) Rapid increase in plasma growth hormone after low-intensity resistance exercise with vascular occlusion. *J Appl Physiol* 88: 61-65
- Takarada Y, Sato Y, Ishii N (2002) Effects of resistance exercise combined with vascular occlusion on muscle function in athletes. *Eur J Appl Physiol* 86: 308-314

- Takarada Y, Takazawa H, Ishii N (2000b) Applications of vascular occlusion diminish disuse atrophy of knee extensor muscles. *Med Sci Sports Exerc* 32: 2035-2039
- Trappe S, Costill D, Gallagher P, Creer A, Peters JR, Evans H, Riley DA, Fitts RH (2009) Exercise in space: human skeletal muscle after 6 months aboard the International Space Station. *J Appl Physiol* 106: 1159-1168
- Wernbom M, Augustsson J, Thomeé R (2006) Effects of vascular occlusion on muscular endurance in dynamic knee extension exercise at different submaximal loads. *J Strength Cond Res* 20: 372-377