

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 2 日現在

機関番号：33910

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23700788

研究課題名(和文) 加圧トレーニングの安全性と血管に及ぼす効果の検証

研究課題名(英文) The effect of exercise with blood flow restriction on vascular function

研究代表者

堀田 典生 (HOTTA, Norio)

中部大学・生命健康科学部・講師

研究者番号：60548577

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円、(間接経費) 1,080,000円

研究成果の概要(和文)：サルコペニアやロコモティブシンドローム予防にレジスタンストレーニング(RT)は欠かせない。血流制限しながらRTを行う方法は、低負荷で筋肥大や筋力増強に導き得る。しかし、筋に及ぼす影響を通常のRTと同じにした場合、通常RTに比べて実施中の血圧応答は大きく、慢性的な影響として血管を硬くすることを助長し得る。定期的な血流制限下有酸素運動の実施は、血管を硬くすることなしに持久的運動能力と筋力を向上させる。

研究成果の概要(英文)：To prevent sarcopenia and locomotive syndrome, resistance training (RT) is essential. RT with blood flow restriction (BFR) has been shown to elicit increases in muscle size and strength even at low intensity. However, to the extent that the effect on the muscle was the same, blood pressure response to RT with BFR was significantly higher than that of regular RT, and arterial stiffness seemed to be augmented by the succession of RT with BFR. On the other hand, periodic aerobic exercise with BFR significantly heightened both aerobic capacity and muscle strength without an increase in arterial stiffness.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：健康・スポーツ科学・スポーツ科学

キーワード：血流制限 レジスタンストレーニング 有酸素運動 動脈コンプライアンス 動脈スティッフネス 運動生理学

1. 研究開始当初の背景

サルコペニアやロコモティブシンドロームの予防にレジスタンストレーニングは欠かせない。事実、アメリカスポーツ医学会も健康の維持・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を実施すべきであるとの見解を近年示している(Garber et al., 2011)。

筋肥大・筋力増強のためには、高負荷(最大筋力の70%程度以上)を用いたレジスタンストレーニングが不可欠であるが(ACSM, 2009)、血圧の上昇が強いため広く応用できない。それに対し、加圧トレーニングとして知られる血流制限下レジスタンストレーニングは、低負荷で筋力増強・筋肥大が期待できるため過度な昇圧応答が抑えられると期待できる。

血流制限下トレーニング(加圧トレーニング、特許第2670421号)は日本で生まれ、日本人研究者達によりその効果や機序が証明されてきた画期的な方法である(佐藤ら, 2009)。四肢の根元を加圧し、血流を制限しながらレジスタンストレーニングを行うことで、加圧しない場合と比べて効率的に筋肥大・筋力の増加が期待できる。

静脈のみを遮断し得る圧を加えることにより、筋収縮の結果生じた乳酸や水素イオンなどの代謝産物が留まり、比較的軽運動に相当する負荷量でも、筋肉が激しい運動をした時の状態に陥る。それが強い刺激となり、成長ホルモンなどが大量に分泌され筋タンパク同化に寄与することが、このトレーニング効果の機序の一つだと考えられている。

血流制限下トレーニングの優れた点は、低強度の負荷でも筋肥大や筋機能の改善を示す点であり、負荷強度が最大筋力の20%程度でかつ短時間で筋肥大や筋力が増加することが報告されている。また、トレーニング効果が通常のトレーニングよりも早期から導きだされる点も非常に魅力的であるといえる(佐藤ら, 2009)。

ところで、運動中は、活動筋の代謝要求に応えるために適切に呼吸・循環応答は増強される。この応答は“運動昇圧応答”と呼ばれている。運動昇圧応答に貢献する機序の一つに“筋代謝受容器反射”がある。これは、筋で生じた代謝産物により筋の代謝受容器が興奮し、呼吸・循環中枢を刺激することで心拍や血圧が上昇するというものである。

例えば、運動した直後に活動肢を加圧し虚血することで、筋活動をしなくても留まった代謝産物が筋代謝受容器を刺激し、心拍や血圧の上昇を容易に引き起こすことができる。また、我々は、酸が運動昇圧応答に関与し得る筋機械受容器の機械刺激に対する応答性を増大させることも報告している(Hotta et al., 2010)。

従って、血流制限下トレーニングのように代謝産物を留め、強い酸性に筋を暴露させな

がら行うトレーニングでは、逆に運動昇圧応答が強まり、血圧などの循環応答が過度に高くなり、運動中の心事故や脳血管障害などにつながる可能性は否定できない。しかしながら、血流制限下トレーニング中の運動昇圧応答に関しては結果が一致していない(Ozaki et al., 2013; Vieira et al., 2013)。そこで、我々は血流制限下レジスタンストレーニング中に過剰な血圧上昇などの運動昇圧応答が起きないかを検討した(研究1)。

これまでにレジスタンストレーニングは、健康の維持増進に好ましいものとして考えられてきた。しかし、2004年に、比較的強い筋力トレーニングの継続は中心動脈のコンプライアンス(伸展性・弾性)を下げるという好ましくない効果があることが介入研究により発表され(Miyachi et al., 2004)、多くの研究が同じ現象を報告した。血流制限下トレーニングは、(1) 低負荷で通常の高負荷トレーニングの効果が期待できること、(2) 長期的には、血管内皮機能改善効果が期待でき、中心動脈のコンプライアンスを上げる方向に働くと考えられていること(佐藤ら, 2009)、を鑑みると中心動脈のコンプライアンスを下げることなく、骨格筋に対するトレーニング効果が得られる可能性を秘めている。

そこで、筋肥大、筋力は増強するが、動脈コンプライアンスが下がり得るレジスタンストレーニングと同等の骨格筋に対する効果を得ることができる定期的な血流制限下トレーニングが、動脈コンプライアンスに及ぼす影響を検討した(研究2)。

定期的な有酸素運動は動脈機能を改善することが知られている。また、先に述べた定期的なレジスタンストレーニングに伴う動脈コンプライアンス低下は、レジスタンストレーニング実施後に有酸素運動を行うことで負の効果を相殺できるという報告もされている(Kawano et al., 2006)。つまり、有酸素運動と血流制限を組み合わせることで、筋力増強が期待でき、また仮に血流制限下有酸素運動中の昇圧応答が、通常の有酸素運動に比べて高かったとしても、動脈コンプライアンスは低下しないと考えられる。

そこで、血流制限と有酸素運動の組み合わせにより有酸素性能能力向上のみならず筋力増強が見られるか、また血管機能に及ぼす影響を検討した(研究3)。

2. 研究の目的

(1) 研究1

筋への影響(筋力増加の程度)を等しくした、高負荷低回数レジスタンストレーニングと血流制限下の低負荷高回数レジスタンストレーニング中の血圧応答を比較し、もしも違いがあるのであればその機序を検討すること。

(2) 研究 2

筋への影響を等しくした(筋力増加の程度)、高負荷低回数レジスタンストレーニングと血流制限下の低負荷高回数レジスタンストレーニングを定期的に継続した場合の血管に対する慢性効果を明らかにすること。

(3) 研究 3

定期的な血流制限下の有酸素運動が有酸素機能と筋機能及び血管機能に及ぼす影響を検討すること。

3. 研究の方法

本研究の被検者は全て健康な 18 歳以上の男性あるいは女性とした。十分な説明を行った後にインフォームドコンセントを取得した。また、全ての研究は、中部大学倫理委員会の承認の下で実施された。

(1) 研究 1

7 名の被検者は、以下の 2 試行の右腕アームカール運動をランダムオーダーにて実施した。

①平均 68%1RM(最大挙上重量)の負荷にて 1 セット 8 回目標を 5 セット(セット間インターバル 1 分)(通常試行)。

②平均 32%1RM の負荷にて 1 セット 25 回目標を 5 セット(セット間インターバル 15 秒)、実施直前から、180mmHg の圧を上腕の付け根に加えて血流制限をした(血流制限試行)。

血圧の測定は、約 50 秒おきに左の上腕からオシロメトリック法にて自動血圧計(Tango+, Sun Tech Medical, USA)を用いて測定した。また運動中の自覚的運動強度(RPE)を Borg スケールにて、運動中の上腕の痛みを視覚アナログスケール(VAS)にて評価した。また、運動中の血圧の最大値と安静時の差を血圧応答とした。

同様の 7 名の被検者は、2 分の安静の後に、右腕を用いた 2 分間の静的肘屈曲運動(肘関節 90 度位)を行った。負荷は 90 度位の静的最大肘屈曲筋力の 25-30%とした。終了約 10 秒前より 250mmHg の圧にて上腕の付け根を幅 4cm の特注カフにて圧迫し、2 分間の運動後虚血を実施した。1 分おきに血圧をオシロメトリック法にて自動血圧計(Tango+, Sun Tech Medical, USA)を用いて測定し、筋代謝受容器反射による昇圧反応を観察した。

(2) 研究 2

20 人の被検者はランダムに以下の 2 群に振り分けられた。1 回あたりの両腕アームカールトレーニングの内容は研究 1 に従った。週 3 回の頻度にて 4 週間実施した。

①対照群(n=8)：研究 1 の通常試行を片腕ずつ両腕実施。

②血流制限群(n=12)：研究 1 の血流制限試行を片腕ずつ両腕実施。

トレーニング前後にて、超音波診断装置(Viamo, Toshiba Medical Systems, Japan)を用いた FMD 検査による血管内皮機能(%FMD)と、血圧-脈波検査により動脈ステIFFネスの指標である動脈硬化指数(CAVI)の計測を行った。また、肘屈曲最大筋力の計測を実施した。

(3) 研究 3

15 名の被検者はランダムに以下の 2 群に振り分けられた。

①対照群(n=6)：通常の 30 分の自転車運動。

②血流制限群(n=9)：30 分の自転車運動開始 5 分後から 5 分毎血流制限を大腿部の付け根で実施(図 1)。

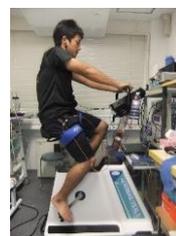


図 1) 血流制限下自転車運動トレーニングの様子

両大腿部の付け根を 160-230mmHg で圧迫し血流制限を実施。

被検者は、8 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。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(VO_2R)を用い、1, 2 週目を 45% , 3, 4 週目を 50%, 5, 6 週目を 55%, 7, 8 週目を 55% VO_2R とした。ペダル回転数は 60rpm とした。

血流制限のための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。幅 6cm のカフ(SC5, D.E. Hokanson, USA)を両大腿部付け根に巻き(図 1)、圧は 160mmHg から開始し 1 週ごとに 10mmHg ずつ上げた(8 週目では 230mmHg)。

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。トレーニング実施日では、トレーニング中からトレーニング後にかけて必ず 500mL の水を摂取させた。

8 週間のトレーニング前後と 4 週間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。

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の空ぎぎを行った。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55rpm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(VO_{2peak})として、有酸素性能力の指標とした。

本研究では、膝伸筋筋力測定台(T.K.K.5715, Takei Science Instrument, Japan)とダイナモメータ(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。

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も検討した。

4. 研究成果

(1) 研究1

図2は通常試行と血流制限試行の収縮期血圧応答を示している。繰り返しのある2要因の分散分析[Mode(通常, 血流制限), Exercise(安静, 最大値)]の結果, 両試行とも有意に増加したが, 収縮期血圧及び拡張期血圧に交互作用が見られ, 変化の仕方が血流制限試行の方が大きいことが分かった。心拍数には交互作用は認められなかった。

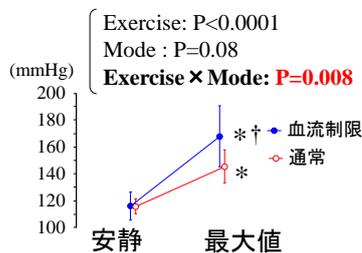


図2) 血流制限下アームカール運動が収縮期血圧応答に及ぼす影響

* $P<0.05$ (vs. 安静), † $P<0.05$ (vs. 通常試行), 最大値は運動中の最大値を示している。値は平均値±標準偏差

この血圧応答の違いを検討するために、ボルグスケールにより評価した運動中のRPE, VASにより評価した運動中の痛みの違いを検討した結果, RPEに両試行間の差は認められなかったが, 痛みは血流制限試行の方が有意に強かった。しかしながら, 血圧の過応答との有意な相関関係は認められなかった。

一方, 血流制限による血圧の過応答と運動後虚血による筋代謝受容器反射による血圧上昇の間において有意な相関関係が認められた(図3)。

(2) 研究2

図4は4週間のトレーニング前(Pre)と後(Post)における肘関節角度90度位の最大筋力

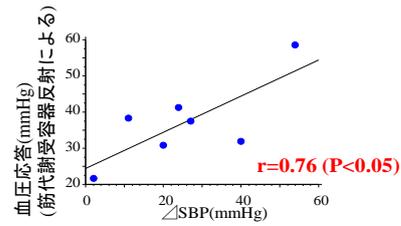


図3 血流制限下運動中の血圧応答と運動後虚血による筋代謝受容器反射との関係

ΔSBP: 血流制限下トレーニング中の収縮期血圧応答

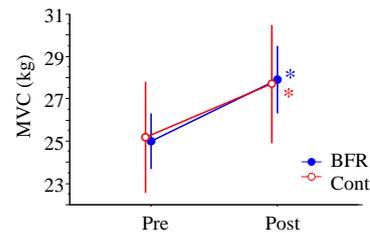


図4 4週間のトレーニング前(Pre)と後(Post)における最大筋力(MVC)

BFR:血流制限群, Cont:対照群, * $P<0.05$ (vs. Pre), 値は平均値と標準偏差

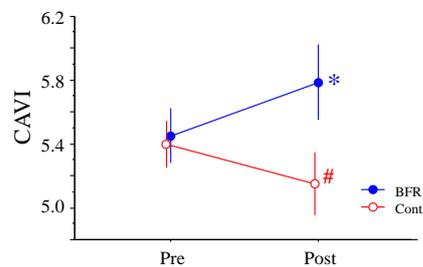


図5 4週間のトレーニング前(Pre)と後(Post)における動脈硬化指数(CAVI, 単位なし)

BFR:血流制限群, Cont:対照群, * $P=0.076$ (vs. Pre), # $P<0.05$ (vs. Pre), 値は平均値と標準偏差

(MVC)を示している。繰り返しのある2要因の分散分析[介入(Pre, Post), 群(BFR(血流制限群), Cont(対照群))]の結果, 両群ともに有意に増加したが, 交互作用は認められなかった。

図5は4週間のトレーニング前(Pre)と後(Post)における血管硬化指数(CAVI)を示している。CAVIを動脈スティッフネスの指標とし, 繰り返しのある2要因の分散分析[介入(Pre, Post), 群(BFR, Cont)]を用いて解析した結果, 交互作用が認められた。対照群はPreに対してPostで有意に低下し, 血流制限群では, 増加傾向であった($P=0.076$)。

FMD検査による血管拡張反応(%FMD)を繰り返しのある2要因の分散分析[介入(Pre,

Post), 群(BFR, Cont)]の結果, 交互作用は認められず. Pre と Post 間の有意差も認められなかった.

(3) 研究 3

8 週間のトレーニング前(Pre), 4 週間後(4wks), 8 週間後(8wks)における最高酸素摂取量(VO_{2peak})と膝伸展最大筋力(Muscle Strength)を繰り返しのある 2 要因の分散分析[介入(Pre, 4wks, 8wks), 群(BFR(血流制限群), Cont(対照群))]にて解析した. VO_{2peak} の変化率には交互作用が認められなかったが, 両群ともに有意に増加した(図 6). 一方, Muscle Strength は, 交互作用が認められ, 8wks において Pre よりも有意に増加した(図 7).

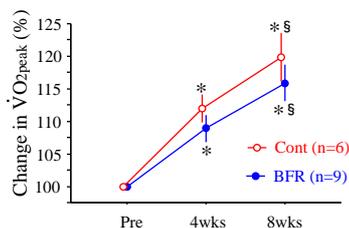


図 6 8週間のトレーニング前(Pre), 4週間後(4wks), 8週間後(8wks)における最高酸素摂取量(VO_{2peak})の変化(%)

BFR:血流制限群, Cont:対照群, * $P<0.05$ (vs. Pre), § $P<0.05$ (vs.4wks), 値は平均値と標準誤差

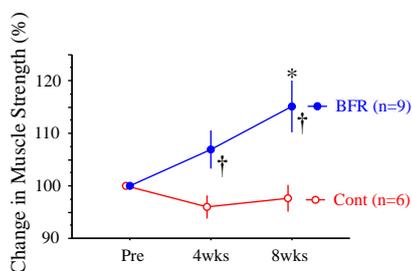


図 7 8週間のトレーニング前(Pre), 4週間後(4wks), 8週間後(8wks)における膝伸展最大筋力(Muscle Strength)の変化(%)

BFR:血流制限群, Cont:対照群, * $P<0.05$ (vs. Pre), † $P<0.05$ (vs.Cont), 値は平均値と標準誤差

図 8 は, 血流制限群のみを対照にしたトレーニング中の平均血圧(MBP)応答を示している. 血流制限をしている最中(BFR)の血圧応答が高くなるのが分かり, この高い血圧が動脈ステイフネスを増加させると考えられた. しかし, トレーニング前後における動脈ステイフネスの有意な変化は認められなかった. 本研究にて扱った D ダイマー, プラスミノー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 3 つ

血液凝固・線溶系因子について, 繰り返しのある 2 要因の分散分析[介入(Pre, 8wks), 群(BFR, Cont)]にて解析したが交互作用はなかった. また, トレーニング前後においても有意な変化は認められなかった.

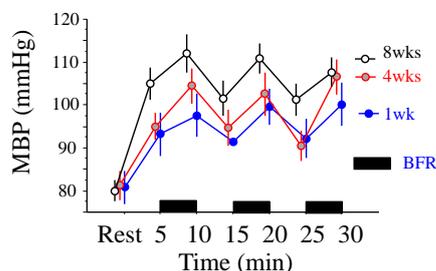


図 8 8週間のトレーニング 1 週目(1wks), 4 週目(4wks), 8 週間目(8wks)におけるトレーニング中の平均血圧(MBP)

BFR:血流制限, 値は平均値と標準誤差

(4) 研究のまとめ

通常の高負荷低回数レジスタンストレーニングと低負荷高回数の血流制限下トレーニングにおいて, 筋力のような筋機能に及ぼす影響を等しくした場合, (1) そのトレーニング中の血圧応答は後者のトレーニングの方が有意に大きくなった. (2) また, その機序の一つとして, 血流制限に伴う筋代謝受容器反射亢進が関与していることが示唆された. (3) そして, 4 週間の定期的なトレーニングにより, 低負荷高回数の血流制限トレーニングでは 動脈ステイフネス増加を助長し得ることが示唆された.

血流制限下トレーニングの優れた点は, 低負荷で筋肥大・筋力増強などを見込める点であることから, レジスタンストレーニングよりも筋への負担度が小さい有酸素運動に応用しても筋機能の向上が見込め, さらに有酸素運動のもつ動脈コンプライアンス増加作用を鑑みた場合, 動脈ステイフネスの増加を抑え, 筋力増強が見込めることが予想された.

予想通り, (4) 血流制限下自転車トレーニングにより, 動脈ステイフネスを増加させずに, 有酸素性運動能力のみならず筋力も増加することが示された.

(5) 本成果の位置づけ

サルコペニアやロコモティブシンドロームの予防にレジスタンストレーニングによる筋肥大・筋力増強は欠かせない. 加圧トレーニングとして知られる血流制限を行いながら筋活動を実施する方法は, 低負荷で筋肥大や筋力増強などの効果を得ることができるため, 大変に画期的な方法であるといえる.

本トレーニング方法は, 骨格筋への影響ばかりが注目され, これまで血管に及ぼす影響

を検討した研究は希少であった。そのためトレーニングで得られる筋機能(筋力)への影響を等しくした条件下、通常のレジスタンストレーニングと血流制限下のレジスタンストレーニング中の血圧応答や、それらを定期的に実施した場合の動脈に及ぼす影響を検討した研究は非常に価値があるといえる。

また、本研究では、定期的な有酸素運動に血流制限を加えることにより、有酸素性能力と筋力を同時に高めることができ、さらに動脈ステイフネス増加を防ぐことを世界で始めて明らかにすることができた。

(6) 本成果の実践的な意味

急性効果に関して、私たちは血流制限下レジスタンストレーニング中の血圧は、通常のそれよりも過剰に強まり得ることを示した。このことは、動脈硬化や虚血性心疾患など心臓や血管にリスクがある集団に対しては、血流制限下レジスタンストレーニングの応用を慎重にしなければならないことを示唆している。しかし、反対の結果を示している研究報告(Ozaki et al., 2013)もあるため、さらなる研究が必要であると考えられる。

血流制限下レジスタンストレーニングの慢性効果に関して、私たちは動脈ステイフネス増加を助長し得ることを示した。このことは、血流制限下レジスタンストレーニングにより骨格筋への良好な効果は期待できるが、血管には好ましくない影響を及ぼすことを示唆している。しかし、先行研究(Ozaki et al., 2013)と結果が一致していないため、研究の継続が望まれる。

定期的な血流制限下有酸素運動により、動脈ステイフネスを増加させることなしに、有酸素性能力のみならず筋力も増強し得ることが示唆された。本研究で計測した尺度だけで考慮した場合、この運動方法は普及が期待される。さらに、国際宇宙ステーションにおいてもトレッドミル走や自転車エルゴメータを利用した自転車トレーニングはすでに実施されているため、宇宙医学への応用も期待できる。しかしながら、血流制限を加える期間は血圧応答が大きくなることは事実であり、その応用には正しい専門的知識や指導者の適切な助力が必要となり得る。

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 8 件)

(1) 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イフネスに及ぼす影響. 第 61 回東海体育学会大会, 愛知, 2013 年 11 月 3 日

(2) 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 年 9 月 23 日

(3) 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 年 3 月 9 日

(4) 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 年 10 月 27 日

(5) 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 年 9 月 13 日

(6) 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 年 9 月 16 日

(7) 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 年 3 月 17 日

(8) 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 年 3 月 9 日

[その他]

(1) ホームページ等

① 1 年目の成果報告

http://www3.chubu.ac.jp/faculty/hotta_norio/hot_ab/kaken2/

② 2 年目の成果報告

http://www3.chubu.ac.jp/faculty/hotta_norio/hot_ab/kaken/

③ 3 年目の成果報告

http://www3.chubu.ac.jp/faculty/hotta_norio/hot_ab/kaken%202013/

(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

6. 研究組織

(1) 研究代表者

堀田 典生 (HOTTA, Norio)

中部大学・生命健康科学部・講師

研究者番号: 60548577

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

石田 浩司 (ISHIDA, Koji)

名古屋大学・総合保健体育科学センター・

教授

研究者番号: 50193321