

科学研究費補助金研究成果報告書

平成21年 4月30日現在

研究種目：基盤研究(B)
研究期間：2005～2008
課題番号：17300207
研究課題名（和文） 身体不活動及び運動トレーニングが身体機能に及ぼす宇宙医学的研究
研究課題名（英文） The effect of training on physical capacity during unilateral limb unloading in humans.
研究代表者 秋間 広(Hiroshi Akima) 名古屋大学・総合保健体育科学センター・准教授 研究者番号：40292841

研究成果の概要：

ヒトが宇宙で滞在することによって生じる身体機能の減退を防ぐため、どのようなトレーニングが効果的であるのかについて地上モデルを用いて検討した。実験期間中に片脚に体重をかけないようにする宇宙滞在モデルを用いて、高強度インターバルトレーニングを一日おきあるいは二日おき、高強度インターバル+筋力トレーニングを一日おきに行った。その結果、一日おきに高強度インターバル+筋力トレーニングを行うと筋力、筋量、呼吸循環系などの運動機能を全般的に維持できることが示された。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	4,200,000	0	4,200,000
2006年度	3,500,000	0	3,500,000
2007年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
2008年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
総計	14,700,000	2,100,000	16,800,000

研究分野：運動生理学

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：宇宙医学，対抗措置，運動機能，骨格筋，呼吸循環系

1. 研究開始当初の背景

宇宙空間にある一定期間滞在すると身体機能が著しく低下する。本研究計画は身体不活動に伴う骨格筋および呼吸循環系の変化を生理学・分子生物学的に捉え、どのような運動処方がこれらの機能を維持するために有効であるのかを宇宙医学の観点から検討することである。本計画では比較的新しく開発された“片脚サスペンション”を身体不活動モデルとして用いる。これは片足の体重支持活動を可能な限り少なくし、実験期間中は不活動状態を保ちながら日常生活を送るというモデル

ある。ちょうど、足の骨折で松葉杖を使って日常生活を送る姿を想像すると理解しやすい。

本研究では科学研究費の交付期間内に、1) 身体不活動モデルを確立させる(17年度)、2) 本モデルで生じる骨格筋および呼吸循環系の適応を生理学的・分子生物学的手法を用いて検討する(17年度)、3) 骨格筋および呼吸循環系の機能低下を防ぐための運動処方を確立する(18～20年度)ことである。

2. 研究の目的

宇宙研究開発機構(JAXA)の長期ビジョン

によると、日本の宇宙開発においても今後有人宇宙飛行を行っていくことが示されている。一方、アメリカやロシアとの国際協力によって日本人宇宙飛行士の短期宇宙飛行の実施および国際宇宙ステーションにおける長期宇宙飛行が行われようとしている。さらに、ごく限られた人に対してではあるが、宇宙観光旅行も数年前より現実化してきており、今後、さらに人類が宇宙空間に滞在する機会が増えることが予想される。

ヒトが宇宙滞在に一定期間滞在することによって、身体機能の減退が生じることがよく知られている。特に、筋萎縮、筋力低下、最大有酸素能力低下などの運動機能に関連する能力の低下が報告されており、これは宇宙滞在時の宇宙飛行士の任務や地球帰還後の健康維持等に重大な影響を及ぼすことが予想される。このような運動機能減退に対する対抗措置として、いくつかの運動処方が考えられているが十分な検討がなされていないのが現状である。

本研究では宇宙滞在を地球上でシミュレーションした片脚サスペンションモデルを用いて、20日間のシミュレーション実験中に行った運動処方の影響について検討した。用いた運動処方は自転車エルゴメータによる高強度インターバルトレーニングである。これは我々の先行研究において、高強度インターバルトレーニングを行うと筋萎縮、筋機能低下および最大有酸素能力低下が抑えられることが示されていたためである (Akima et al. 2005, Katayama et al. 2004)。

3. 研究の方法

実験に用いた被検者はのべ 43 名であった。その内訳は以下に示した。なお、被検者は全て若年男性であった。

(1) 年度毎の実験概要

① 2005 年度

被検者：片脚サスペンションのみを行う群が 8 名。しかしながら、この実験は最初の予備的な実験で倫理上の問題点を指摘されたため、今回の報告からは外すこととする。

② 2006 年度

被検者：片脚サスペンションのみを行う群 (以下、Cont 群) 5 名、片脚サスペンション中に一日おきに高強度インターバルトレーニングを行う群 (以下、Tr10 群) 6 名。

③ 2007 年度

被検者：片脚サスペンションのみを行う群 2 名、片脚サスペンション中に一日おきに高強度インターバルトレーニングを行う群 1 名、片脚サスペンション中に二日おきに高強度

インターバルトレーニングを行う群 (以下、Tr5 群) 7 名。

④ 2008 年度

Cont 群 6 名、片脚サスペンション中に一日おきに高強度インターバル+レジスタンストレーニングを行う群 (以下、TrRe 群) 6 名。

(2) 片脚サスペンション

片脚サスペンションは Tesch ら (2000) を参照した。すなわち、非実験脚に約 10 cm の厚底靴を履き、実験脚は実験期間中、体重負荷がかからないように被検者に指示した。移動については厚底靴と松葉杖を使ってバランスをとりながら行うように指示した。

(3) インターバルトレーニング

自転車エルゴメータを用いて、実験脚のみによるインターバルトレーニング (計 25 分間) を行った。用いた運動負荷は以下のようであった：

40%Vo_{2peak} で 2 分、60%Vo_{2peak} で 3 分

40%Vo_{2peak} で 2 分、70%Vo_{2peak} で 3 分

40%Vo_{2peak} で 2 分、80%Vo_{2peak} で 3 分

40%Vo_{2peak} で 2 分、80%Vo_{2peak} で 3 分

40%Vo_{2peak} で 2 分、80%Vo_{2peak} で 3 分

なお、Vo_{2peak} は最高酸素摂取量で実験前に測定した。

(4) レジスタンストレーニング

レジスタンストレーニングとしては動的なレッグプレス運動を用いた。実験脚での最大挙上重量 (1RM) の 70% 負荷 (70%1RM) で 10 回を 4 セット (セット間は 1 分休息)。

(5) 等尺性最大筋力および最大挙上重量

等尺性膝伸展動作時の最大筋力 (MVC) の測定は関節角度 90 度において、実施した。最大挙上重量 (1RM) はレッグプレスマシンを用いて、測定を行った。

(6) 筋体積の測定

磁気共鳴画像法 (MRI) を用いて、実験脚の大腿部における横断像を 11 枚撮影した。撮影された横断から大腿四頭筋の部分の体積を算出した。

(7) 骨格筋機能的磁気共鳴画像 (mfMRI)

安静時および動的な膝伸展運動後に mfMRI を撮影し、大腿四頭筋の部分の MRI の信号変化から運動時の筋機能について評価した。

(8) 骨格筋の成長因子

外側広筋の筋生検により得られた筋サンプルを用いて、骨格筋の成長因子について検討した。

(9) 最高酸素摂取量

自転車エルゴメータを用いて、漸増負荷による片脚ペダリングを疲労困憊まで行わせ、最高酸素摂取量を測定した。

(10) 運動時の筋酸素動態

持続的な等尺性膝伸展時の筋酸素動態について、近赤外分光装置を用いて評価した。

(11) 大腿動脈の血管径

超音波エコーを用いて、安静時における収縮期の大腿動脈血管径について評価した。

4. 研究成果

4年間の研究成果の流れとしては、(1)2006年と2007年は高強度インターバルトレーニングの頻度の違いが身体機能に及ぼす影響を調べ、(2)2008年度は高強度インターバルと筋力トレーニングが身体機能に及ぼす影響に分類することができる。

(1) 2006年と2007年の結果

図1にMVCの変化について示した。MVCはTr10群およびTr5群、さらにCont群ともに有意に低下した。

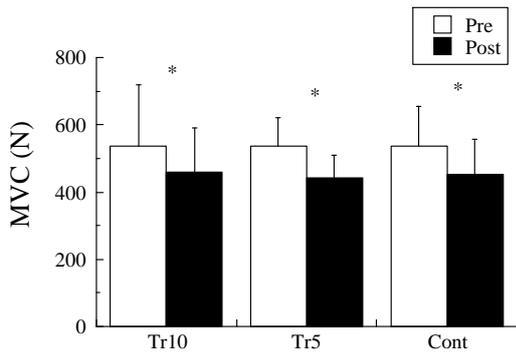


図1 随意最大筋力の変化

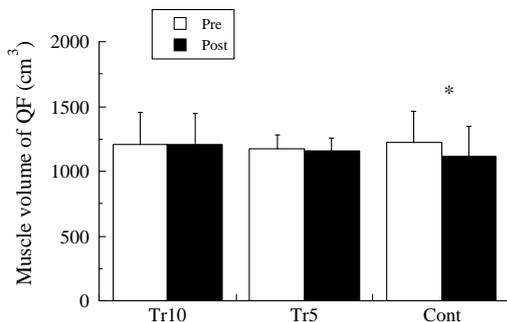


図2 大腿四頭筋 (QF) の筋体積

図2に大腿四頭筋の筋体積について示した。

大腿四頭筋の筋体積は、Tr10群およびTr5群においては、Preと比較してPostにおいて有意な差は認められなかったが、Cont群においては、約8%の有意な低下が認められた。このことから、高強度インターバルトレーニングは大腿四頭筋の筋量を維持する手法として有効であることが示された。

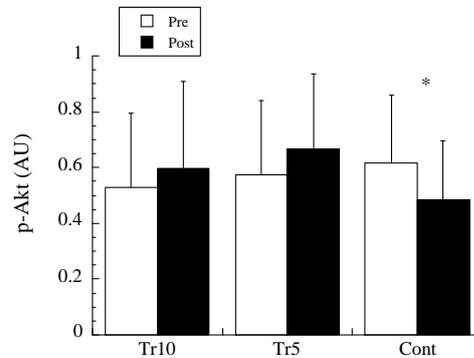


図3 リン酸化されたAktの蛋白発現量

図3には骨格筋の肥大に重要な働きをされていると考えられているp-Aktの蛋白発現量がTr10群およびTr5群では維持され、Cont群で有意に減少した。したがって、Tr10群およびTr5群の筋体積が維持されたのはこのp-Aktが何らかの関係していることが示唆された。

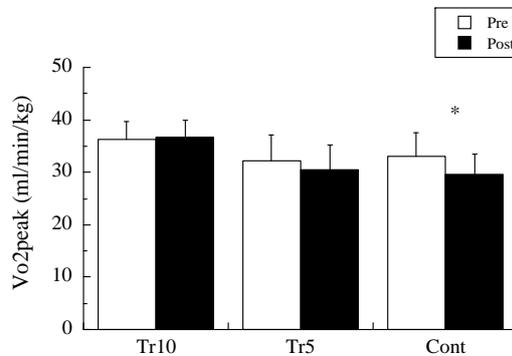


図4 片脚ペダリングによる最高酸素摂取量

図4には実験脚での片脚ペダリングによる最高酸素摂取量について示した。Tr10群とTr5群にはPreとPost間に有意な差は認められなかったが、Cont群では10%の有意な低下が認められた。

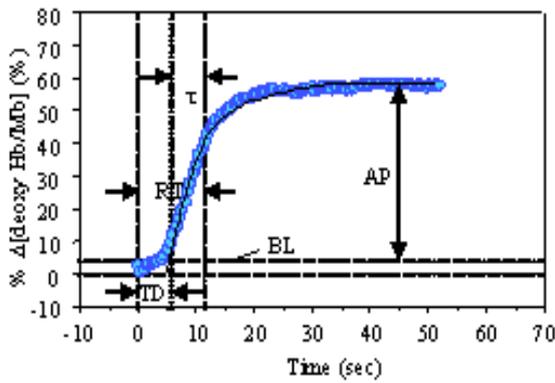


図5 等尺性膝伸展運動時の酸素化動態の概要 AP: amplitude, BL: base line, τ : time constant, RT: reaction time

表1 近赤外分光法によって得られた運動時の筋酸素化動態

Parameter	Time	CON (n=8)	TR 5 (n=8)	TR 10 (n=6)
AP	pre	107.5 ± 28.6	79.3 ± 22.0	81.0 ± 5.7
(%)	post	90.7 ± 27.4	86.2 ± 18.2	79.7 ± 38.7
TD	pre	3.8 ± 1.1	4.1 ± 1.9	4.6 ± 2.0
(sec)	post	5.1 ± 1.5 *	5.3 ± 2.1 *	5.0 ± 2.3
τ	pre	5.8 ± 2.4	7.0 ± 2.2	7.7 ± 2.0
(sec)	post	8.0 ± 2.0 *	7.9 ± 2.6	9.1 ± 3.2
RT	pre	9.6 ± 2.2	11.0 ± 3.3	12.4 ± 2.8
(sec)	post	13.0 ± 2.8 *	13.3 ± 4.5 *	14.1 ± 5.2
$0.63AP/\tau$	pre	12.5 ± 3.8	8.2 ± 4.2	7.1 ± 2.3
(%/sec)	post	7.9 ± 4.2 *	7.6 ± 3.0	5.4 ± 1.8

Values are means ± SD. AP: amplitude, TD: time delay, τ : time constant, RT: response time, MVC: maximum voluntary contraction. *: $p < 0.05$ vs pre.

図5には等尺性膝伸展運動時の酸素化動態の概要および表1にはその結果について示した。Tr10群ではいずれのパラメーターにおいても実験前後で統計的に有意差は認められなかった。Cont群では遅れ時間(TD), 時定数(τ), 反応時間(RT), 酸素化の変化率($0.63AP/\tau$)において有意な変化が認められ、Tr5群に関してはその中間的な変化を示した。この結果はインターバルトレーニングの頻度の違いが鮮明に表れたものであると考えることができる。

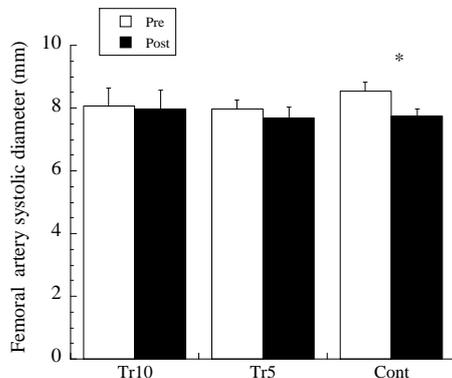


図6 安静時における収縮期の大腿動脈血管

径

図6には安静時における収縮期の大腿動脈血管径について示した。Tr10群およびTr5群においては、動脈血管径が維持されたが、Cont群においては有意に減少した。

(1) 2008年の結果

図7にMVCの変化について示した。高強度インターバル+筋力トレーニングを行ったTrRe群のMVCおよび片脚サスペンションのみのCont群ともにMVCの有意な低下が認められた。

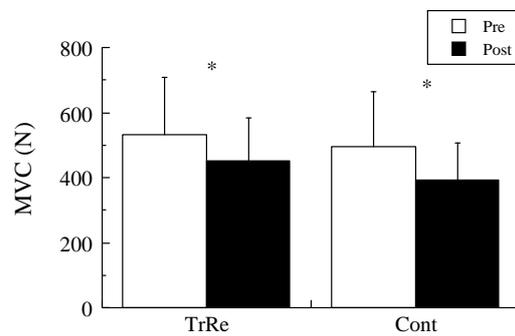


図7 随意最大筋力の変化

図8にはレッグプレスによる最大挙上重量(1RM)の変化について示した。TrRe群では1RMがPostにおいて維持されたが、Cont群では有意に低下した。したがって、図7および図8を考え合わせると、筋力測定動作による特異性があるものの、今回行ったトレーニングは筋力を維持させるのには十分であったものと思われる。

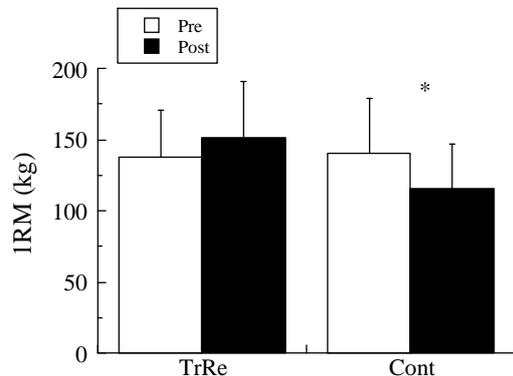
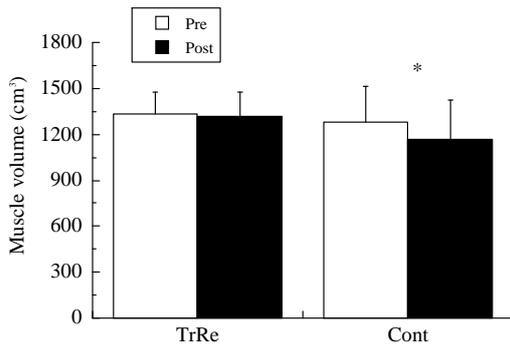


図8 レッグプレスによる最大挙上重量の変化

図9には大腿四頭筋の筋体積の変化について示した大腿四頭筋は TrRe 群では維持され、



Cont 群においては有意に低下した。

図9 大腿四頭筋の筋体積の変化

表2に筋酸素動態の結果について示した。筋酸素動態については、TrRe 群の τ が実験後の測定において有意に低値を示したことから、今回用いたトレーニングが酸化能力の向上に寄与していたことを示唆している。

表2 近赤外分光法によって得られた運動時の筋酸素動態

Parameter	Time	CON (n=6)	TR (n=5)
AP	pre	76.6 ± 13.1	106.8 ± 31.9
	post	91.4 ± 15.0	89.1 ± 4.8
TD	pre	4.6 ± 2.0	6.4 ± 1.6
	post	6.0 ± 1.9	6.3 ± 2.7
τ	pre	9.0 ± 3.7	10.6 ± 3.5
	post	9.5 ± 7.3	8.9 ± 3.4*
RT	pre	13.6 ± 5.6	17.0 ± 4.8
	post	15.5 ± 9.0	15.3 ± 5.6
$0.3AP/\tau$	pre	6.1 ± 2.1	7.1 ± 3.3
	post	7.8 ± 3.3	7.1 ± 2.7

Values are means ± SD. AP: amplitude, TD: time delay, τ : time constant, RT: response time, MVC: maximum voluntary contraction. *: p < 0.05 vs pre.

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3件)

1. Akima, H., Hotta, N., Sato, K., Ishida, K., Koike, T., Katayama, K.: Cycle ergometer exercise to counteract muscle atrophy during unilateral lower limb suspension. *Aviat. Space Environ. Med.*

(accepted for publication). 査読あり

2. Furuichi, Y., Masuda, K., Takakura, H., Hotta, N., Ishida, K., Katayama, K., Iwase, S., Akima, H.: Effects of intensive interval training during unloading on muscle oxygenation kinetics. *Int. J. Sports Med.* (accepted for publication). 査読あり
3. Hotta, N., Sato, K., Katayama, K., Koga, S., Masuda, K., Miyachi, M., Akima, H., Ishida, K.: Oxygen uptake kinetics following 20 days of unilateral lower limb suspension. *J. Physiol. Sci.* 56: 347-353, 2006. 査読あり

[学会発表] (計22件)

1. 秋間 広: 片脚サスペンション中のインターバルおよびレッグプレストレーニングが筋機能・形態に及ぼす影響. 第63回日本体力医学会, 2008年9月18日(大分).
2. Akima, H.: Effects of low frequency intensive interval training on muscle atrophy and function during unloading. The 55th Annual Meeting of American College of Sports Medicine (Indianapolis, IN, USA), May 30, 2008.
3. 渡邊航平: 片脚サスペンション中のインターバルトレーニングが漸増負荷運動時の筋動員に及ぼす影響. 第62回日本体力医学会, 2007年9月14日(秋田).
4. Katayama, K.: Effect of intensive interval training during unilateral lower limb unloading on aerobic capacity. 第62回日本体力医学会, 2007年9月14日(秋田).
5. 片山敬章: 片脚サスペンション中のインターバルトレーニングが有酸素性運動能力に及ぼす影響—トレーニング頻度の違いによる影響について—. 第62回日本体力医学会, 2007年9月14日(秋田).
6. 秋間 広: 片脚サスペンション中の低頻度インターバルトレーニングが筋機能・形態に及ぼす影響. 第62回日本体力医学会, 2007年9月14日(秋田).
7. 古市泰郎: 片脚サスペンション中のインターバルトレーニングが下肢筋酸素動態に及ぼす影響. 第62回日本体力医学会, 2007年9月14日(秋田).
8. Furuichi, Y.: Effect of intensive interval training during unilateral lower limb unloading on the muscle oxygenation kinetics. The 54th Annual Meeting of American College of Sports Medicine (New Orleans, LA, USA), May

- 31, 2007.
9. Akima, H.: Intensive interval training prevents muscle atrophy during unloading. The 54th Annual Meeting of American College of Sports Medicine (New Orleans, LA, USA), May 31, 2007.
 10. 秋間 広: シンポジウム: 身体不活動による筋萎縮と運動処方. 第11回日本体力医学会東海地方会, 2007年3月18日(名古屋).
 11. 河野 寛: 局所的不活動による血管機能低下に対するインターバルトレーニングの抑制効果. 第61回日本体力医学会, 2006年9月26日(神戸).
 12. 佐藤耕平: 片脚サスペンション中のインターバルトレーニングが運動時の呼吸循環応答に及ぼす影響. 第61回日本体力医学会, 2006年9月25日(神戸).
 13. 秋間 広: 片脚サスペンション中のインターバルトレーニングが筋機能・形態に及ぼす影響. 第61回日本体力医学会, 2006年9月24日(神戸).
 14. Sato, K.: The influence of unilateral lower limb suspension on cardiorespiratory response during exercise. The 53rd Annual Meeting of American College of Sports Medicine (Denver, CO, USA), May 31, 2006.
 15. Akima, H.: Unilateral lower limb suspension induced atrophy as a model of unweighting. The 27th International Gravitational Physiology Meeting (Osaka, Japan), Apr. 25, 2006.
 16. 秋間 広: 下肢サスペンションおよびベッドレストによる筋萎縮の比較. 第51回日本宇宙航空環境医学会, 2005年11月12日(神奈川).
 17. 佐藤耕平: 20日間の片脚サスペンションが運動時の呼吸循環応答に及ぼす影響. 第16回日本女子体育大学附属基礎体力研究所研究フォーラム, 2005年10月15日(東京).
 18. 佐藤耕平: 片脚サスペンションによる運動時の呼吸循環応答の変化. 第60回日本体力医学会, 2005年9月24日(岡山).
 19. 秋間 広: 片脚サスペンションによるヒト骨格筋の機能と形態の変化. 第60回日本体力医学会, 2005年9月24日(岡山).
 20. 石田浩司: 片脚サスペンションによる運動開始直後の呼吸・循環応答の変化. 第60回日本体力医学会, 2005年9月23日(岡山).

21. Hotta, N.: Effect of unilateral lower limb suspension on the oxygen uptake kinetics at the start of exercise. The 6th International Head-Out Water Immersion Symposium (Aichi, Japan), Sep 20, 2005.
22. Akima, H.: Neuromuscular adaptations to unilateral lower limb suspension in humans. The 6th International Head-Out Water Immersion Symposium (Aichi, Japan), Sep 20, 2005.

[その他]

<http://www.htc.nagoya-u.ac.jp/~akima/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

秋間 広 (HIROSHI AKIMA)

名古屋大学・総合保健体育科学センター・准教授

研究者番号: 40292841

(2) 研究分担者

石田 浩司 (KOJI ISHIDA)

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

片山 敬章 (KEISHO KATAYAMA)

名古屋大学・総合保健体育科学センター・准教授

研究者番号: 40343214

佐久間 邦弘 (KUNIHIRO SAKUMA)

豊橋技術科学大学・体育保健センター・准教授

研究者番号: 60291176

(3) 連携研究者

増田 和実 (KAZUMI MASUDA)

金沢大学・教育学部・准教授

研究者番号: 50323283

宮地 元彦 (MOTOHIKO MIYACHI)

国立健康・栄養研究所・身体活動調査研究室・室長

研究者番号: 60229870