

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 7 月 31 日現在

機関番号：34523

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2012～2016

課題番号：24247046

研究課題名(和文)ヒトの持久的運動能力の生理人類学的研究

研究課題名(英文)Human exercise tolerance and physiological anthropology

研究代表者

古賀 俊策 (Koga, Shunsaku)

神戸芸術工科大学・芸術工学部・教授

研究者番号：50125712

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 33,800,000円

研究成果の概要(和文)：人類が直立二足歩行によって獲得した身体活動能力、とりわけ全身持久的運動能力は他の動物よりも優れた生理機能(循環調節や発汗など)によって支えられる。実際の持久的身体活動時には、活動強度や温度などの環境刺激が時間と共に変化する非正常状態が多くみられる。この状態では潜在的な統合生理機能(全身的協関)が顕著に抽出されるので、ヒトが進化過程で獲得した持久的運動能力の特性がより明らかになる。しかし、各々の生理機能(呼吸、循環、筋肉、体温など)が統合的に調節される仕組みについては不明な点が多い。今回は全身的協関がより顕在化する非正常状態に着目して、生理人類学的視点からヒトの持久的運動能力を総合的に検討した。

研究成果の概要(英文)：A key capability in hominid survival arose from the development of an erect, striding bipedal locomotion that could be sustained for prolonged periods and be readily responsive to rapid changes of velocity, i.e. the trait of "exercise tolerance". We found that acquiring the ability to maintain whole-body integration of the physiological system (cardiopulmonary-, muscle metabolic-, and thermal functions) during exercise enabled human beings to evolve endurance work capacity, which is strongly correlated with health. In particular, systematic study on non-steady state responses to exercise (as seen in our daily life) is a key issue, because the non-steady state stimuli elicit the potentials of the body homeostasis and its polymorphism.

研究分野：生理人類学

キーワード：全身持久的運動能力 直立二足歩行 非正常状態 全身的協関

1. 研究開始当初の背景

ヒトが地球上に広く分布して生存する上で、持久的な運動能力と環境適応能力(例、暑熱寒冷環境)の進化は不可欠であった。高次脳機能の発達に大きく関係すると考えられる持久的歩走行能力の進化によって、ヒトは長距離を継続的に移動し、獲物を追い続けたという説がある(Lieberman たち、2004)。ヒトは生理機能の統合的調節(全身的協関)を獲得した結果、潜在的な持久的運動能力を有し、この能力を有する者は健康と強く関連する呼吸・循環・体温などの各機能を統合的に亢進している。

しかし、現実の先進国環境では、人工環境と快適な生活環境の普及によってヒトが獲得してきた適応能力、とりわけ持久的な運動能力は低下し、運動不足による生活習慣病や熱中症などが生じている。そこで、人類が長い年月をかけて獲得した持久的運動能力を支える全身的協関の仕組みを明らかにすれば、人類が直面しているこの課題を解決できる可能性がある。

現在のヒトの生活に目を向けると、身体活動の強度や環境からの刺激は時々刻々と変化し、生体反応の恒常性を一時的に乱す。しかし、ヒトは非定常状態に対応して、生理機能を速やかに再調節する全身的協関(恒常性の維持)を発達させてきたと仮定される。そこで、今回の研究では非定常状態におけるヒトの統合的生理機能に着目した。

2. 研究の目的

(1) 非定常状態における酸素摂取動態の全身的な協関の解明: 運動時や環境(酸素濃度・温度など)変化時における酸素摂取の動的な応答(動態)とその規定要因の相互作用(全身的協関)を明らかにした。

(2) 非定常状態継続時(長時間曝露)における全身的な協関の解明: 運動負荷・環境温度の非定常状態が継続する状況に着目して、酸

素摂取動態と循環調節、および体温調節機能の全身的な協関を明らかにした。

3. 研究の方法

(1) 非定常状態における酸素摂取動態の全身的な協関

A. 酸素供給と需要のマッチング: 肺レベルの酸素摂取量($\dot{V}O_2$)、活動筋の酸素消費動態を反映)、および心拍数を連続的に測定した。

時間分解近赤外分光装置を用いて、活動筋微小循環レベルの脱酸素化ヘモグロビン(HHb、酸素供給と需要のバランスを反映)を計測した。活動筋 HHb の応答特性から活動筋 HHb の空間不均一性(筋の部位ごとの空間分布)が $\dot{V}O_2$ の増加を規定するかどうかを検討した。酸素供給量が増加する高強度のウォームアップ(W-up)運動を用いると、W-up 運動後の主運動における活動筋の $\dot{V}O_2$ の増加が速くなり、酸素不足が減少する。そこで、高強度の W-up 運動によって、組織の酸素需要がどのようにマッチ、あるいはミスマッチ(酸素不足)するのかを検討した。

B. 酸素供給と血圧調節のマッチング: 運動後低血圧に注目して、1 回目の運動の後、安静を保ち、運動後低血圧を確認した後、二回目の運動を行った。血圧、心拍数に加えて超音波ドップラー法で心拍出量(CO)を連続計測し、血圧(BP)=CO/TVC の式から、総末梢血管コンダクタンス(TVC)を算出し、BP の変化に対する中枢側(CO)と末梢側(TVC)、さらに $\dot{V}O_2$ との連関を線形・非線形近似モデルで定量化した。

(2) 非定常状態継続時(長時間曝露)における全身的な協関

運動継続に伴う体温上昇が活動筋の酸素摂取・循環動態・熱放散にどのような影響を与えるのかを検討した。具体的には、酸素摂取動態と大腿筋の脱酸素化ヘモグロビン濃度の局所分布、循環動態: 血圧・心拍数・

心拍出量、 体温・熱放散動態：食道温・皮膚温・発汗量・皮膚血流量をそれぞれ測定した。

4. 研究成果

(1) 非定常状態における酸素摂取動態の全身的な協関の解明

A. 酸素供給と需要のマッチング：

ヒトの運動開始時において活動筋深層部の HHb 応答が表層筋よりも遅くなった。したがって、深層筋の酸素不足は表層筋よりも少ないことが推測された。運動終了後の回復時においては、複数部位における HHb は運動時よりも減少したので、活動筋全体の酸素供給量の減少速度は酸素消費量よりも遅いこと（運動後過充血）が示唆された。したがって、今回計測した筋肉の部位において、運動中に生じた酸素不足は回復中に徐々に減少し、運動終了後では深層筋と表層筋の両方において酸素供給の制限はないことが示唆された。この様に、表層筋に加えて深層筋の酸素動態を計測することによって、活動筋酸素不足の空間的・時間的な不均一性が明らかになった。一方、活動筋 HHb の空間不均一性と肺レベルの $\dot{V}O_2$ の間には相関関係がなく、活動筋の部位ごとの酸素動態は、 $\dot{V}O_2$ の増加を規定しないことが示唆された。

高強度の W-up 運動によって、組織の酸素需要が活動筋の酸素動態に及ぼす影響を明らかにした。第1運動（W-up 運動）と第2運動において大腿直筋深層部における HHb の応答時間は表層部に比べて有意に遅かった。HHb は $\dot{V}O_2/Q$ を反映するので、表層筋に比べて遅筋線維が多く含まれ、運動中の筋温がより高い深層筋では、酸素供給が十分になって活動筋全体の $\dot{V}O_2$ と Q のバランスが改善され、酸素不足が減少したと推測される。

B. 酸素供給と血圧調節のマッチング：

運動後低血圧の成因を決定するために、下

肢自転車運動後の血圧の推移と同時に中心ならびに末梢循環を同時に測定した。中心循環側である心拍出量と総末梢血管コンダクタンス（TVC）による運動後低血圧への貢献では、ほぼ末梢側の要因によることが明らかとなった。また、測定された末梢 VC の中では、運動肢である下肢と非運動肢である上肢の VC 増大の両者が、全体の約 2/3 程度を説明することが示された。あわせて運動後低血圧出現時に水分摂取や糖質溶液摂取を行わせて消化管血流と競合させると、溶質溶液摂取に伴う内臓での VC 増大は他の部位の血管収縮で補償され、血圧は一定に保たれることがわかった。次に、下肢自転車運動中に上肢の最大下運動を付加した際の血行動態を検討した。継続中の下肢自転車運動に片腕肘屈曲運動を付加すると、血圧は増加し、それは内臓の VC 増大による再調整が行われたものと推測された。さらに上肢の最大運動では、血圧は著しく増大し、それは中心と末梢循環の両要因によるものであったが、同時に行っている下肢自転車運動における運動強度が無酸素性作業閾値(AT)以下の適度な運動であると血圧上昇の程度が抑制され、上下肢同時運動における酸素運搬と血行動態調節の間には何らかのマッチング機構が存在する可能性が示唆された。

(2) 非定常状態継続時(長時間曝露)における全身的な協関の解明

ヒトは運動時において活動筋への血流（酸素供給）を確保しつつ、熱放散を行なう。とくに、脳、筋肉、および圧受容器などの入力情報をもとに熱放散を調節しているが、各入力の相互協関については不明である（Kondo たち、2010）。とくに、体温の増加を伴う長時間の運動や高温下の運動では活動筋と皮膚との間に血流の競合（酸素供給 vs. 熱放散）が生じるが、全身の血圧調節（活動筋・皮膚の血管拡張 vs. 非活動組織の血管収縮）

については不明な点が多い。そこで、運動負荷・環境温度の非定常状態が継続する状況に着目して、酸素摂取動態と循環調節、および体温調節機能の全身的な協働を明らかにした。さらに、セントラルコマンド・筋代謝受容器および精神的刺激と運動時の発汗調節の関係に加えて、汗のイオン濃度と汗腺でのイオン再吸収能力について新たな知見が得られた。

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24件)

1. Okushima D, Poole DC, Barstow TJ, Rossiter HB, Kondo N, Bowen TS, Amano T, Koga S. Greater VO_2 peak is correlated with greater skeletal muscle deoxygenation amplitude and hemoglobin concentration within individual muscles during ramp-incremental cycle exercise. *Physiol Rep* 4:1-11, 2016. 査読有
2. Amano T, Ichinose M, Inoue Y, Nishiyasu T, Koga S, Kenny GP, and Kondo N. Influence of forearm muscle metaboreceptor activation on sweating and cutaneous vascular responses during dynamic exercise. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol* 310: R1332-1339, 2016. 査読有
3. Bowen TS, Koga S, Amano T, Kondo N, and Rossiter HB. The spatial distribution of absolute skeletal muscle deoxygenation during ramp-incremental exercise is not influenced by hypoxia. *Adv Exp Med Biol* 876:19-26, 2016. 査読有
4. Endo MY, Fujihara C, Miura A, Kashima H, and Fukuba Y. Effects of meal ingestion on blood pressure and regional hemodynamic responses after exercise. *J Appl Physiol* 120: 1343-1348, 2016. 査読有
5. Inoue Y, Gerrett N, Ichinose-Kuwahara T, Umino Y, Kiuchi S, Amano T, Ueda H, Havenith G, and Kondo N. Sex differences in age-related changes on peripheral warm and cold innocuous thermal sensitivity. *Physiol Behav* 164: 86-92, 2016. 査読有
6. Tsuji B, Honda Y, Kondo N, and Nishiyasu T. Diurnal variation in the control of ventilation in response to rising body temperature during exercise in the heat. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol* 311: R401-409, 2016. 査読有
7. Abe D, Fukuoka Y, and Horiuchi M. Economical Speed and Energetically Optimal Transition Speed Evaluated by Gross and Net Oxygen Cost of Transport at Different Gradients. *PLoS One* 10: e0138154, 2015. 査読有
8. Adami A, Koga S, Kondo N, Cannon DT, Kowalchuk JM, Amano T, and Rossiter HB. Changes in whole tissue heme concentration dissociates muscle deoxygenation from muscle oxygen extraction during passive head-up tilt. *J Appl Physiol* 118: 1091-1099, 2015. 査読有
9. Amano T, Ichinose M, Inoue Y, Nishiyasu T, Koga S, and Kondo N. Modulation of muscle metaboreceptor activation upon sweating and cutaneous vascular responses to rising core temperature in humans. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol* 308: R990-997, 2015. 査読有
10. Amano T, Inoue Y, Koga S, Nishiyasu T, and Kondo N. Influence of exercise training with thigh compression on heat-loss responses. *Scand J Med Sci Sports* 25 Suppl 1: 173-182, 2015. 査読有
11. Fujii N, McGinn R, Halili L, Singh MS, Kondo N, and Kenny GP. Cutaneous vascular and sweating responses to intradermal administration of ATP: a role for nitric oxide synthase and cyclooxygenase? *J Physiol* 593: 2515-2525, 2015. 査読有
12. Fukuoka Y, Poole DC, Barstow TJ, Kondo N, Nishiwaki M, Okushima D, and Koga S. Reduction of VO_2 slow component by priming exercise: novel mechanistic insights from time-resolved near-infrared spectroscopy. *Physiol Rep* 3: e12432, 2015. 査読有
13. Ichinose M, Ichinose-Kuwahara T, Kondo N, and Nishiyasu T. Increasing blood flow to exercising muscle attenuates systemic cardiovascular responses during dynamic exercise in humans. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol* 309: R1234-1242, 2015. 査読有
14. Koga S, Barstow TJ, Okushima D, Rossiter HB, Kondo N, Ohmae E, and Poole DC. Validation of a high-power, time-resolved, near-infrared spectroscopy system for measurement of superficial and deep muscle

- deoxygenation during exercise. *J Appl Physiol* 118: 1435-1442, 2015. 査読有
15. Koga S, Poole DC, Kondo N, Oue A, Ohmae E, and Barstow TJ. Effects of increased skin blood flow on muscle oxygenation/deoxygenation: comparison of time-resolved and continuous-wave near-infrared spectroscopy signals. *Eur J Appl Physiol* 115: 335-343, 2015. 査読有
 16. Okushima D, Poole DC, Rossiter HB, Barstow TJ, Kondo N, Ohmae E, and Koga S. Muscle deoxygenation in the quadriceps during ramp incremental cycling: Deep vs. superficial heterogeneity. *J Appl Physiol* 119: 1313-1319, 2015. 査読有
 17. Amano T, Ichinose M, Nishiyasu T, Inoue Y, Koga S, Miwa M, and Kondo N. Sweating response to passive stretch of the calf muscle during activation of forearm muscle metaboreceptors in heated humans. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol* 306: R728-R734, 2014. 査読有
 18. Endo MY, Fujihara C, Yamazaki C, Kashima H, Eguchi K, Miura A, Fukuoka Y, and Fukuba Y. Acute responses of regional vascular conductance to oral ingestion of fructose in healthy young humans. *J Physiol Anthropol* 33: 11, doi: 10.1186/1880-6805-33-11.2014. 査読有
 19. Inoue Y, Ichinose-Kuwahara T, Funaki C, Ueda H, Tochiwara Y, and Kondo N. Sex differences in acetylcholine-induced sweating responses due to physical training. *J Physiol Anthropol* 33: 13, doi: 10.1186/1880-6805-33-13.2014. 査読有
 20. Koga S, Rossiter HB, Heinonen I, Musch TI, Poole DC. Dynamic heterogeneity of exercising muscle blood flow and O₂ utilization. *Med Sci Sports Exer* 46: 860-876, 2014. 査読有
 21. Spencer MD, Amano T, Kondo N, Kowalchuk JM, and Koga S. Muscle O₂ extraction reserve during intense cycling is site-specific. *J Appl Physiol* 117: 1199-1206, 2014. 査読有
 22. Bowen TS, Rossiter HB, Benson AP, Amano T, Kondo N, Kowalchuk JM, Koga S. Slowed oxygen uptake kinetics in hypoxia correlate with the transient peak and reduced spatial distribution of absolute skeletal muscle deoxygenation. *Exp Physiol* 98: 1585-1596, 2013. 査読有
 23. Koga S, Wüst RCI, Walsh B, Kindig CA,

- Rossiter HB, and Hogan MC. Increasing temperature speeds intracellular PO₂ kinetics during contractions in single Xenopus skeletal muscle fibers. *Am J Physiol: Regul Integr Comp Physiol* 304: R59-R66, 2013. 査読有
24. 古賀俊策, 井上芳光, 近藤徳彦. ヒトの生理機能の全身的協働. 日本生理人類学会誌 18: 187-194, 2013. 査読有

〔学会発表〕(計3件)

1. 古賀俊策, Human adaptability to endurance exercise, 日本生理人類学会・国際シンポジウム, 2015年3月16日, 神戸大学.
2. 古賀俊策, 活動筋における酸素不足の不均一性, 呼吸研究会・運動と循環合同研究会, 2015年9月17日, 和歌山.
3. 古賀俊策, Human evolution of endurance exercise performance, 日本生理人類学会・米国人間生物学会合同シンポジウム, 2016年8月19日, ハワイ大学.

〔図書〕(計2件)

1. 古賀俊策. 有酸素能力. 日本生理人類学会 編集, 人間科学の百科事典, 丸善出版株式会社, 171-172頁, 2015.
2. 天野達郎, 近藤徳彦. 運動と体温 - 熱放散. 宮村実晴 編集, ニュー運動生理学, 真興交易医書出版部, 174-182頁, 2015.

〔その他〕

ホームページ等

http://www.kobe-du.ac.jp/faculty_member/s-koga/

6. 研究組織

(1) 研究代表者

古賀 俊策 (KOGA SHUNSAKU)
神戸芸術工科大学・芸術工学部・教授
研究者番号: 50125712

(2) 研究分担者

福場 良之 (FUKUBA YOSHIYUKI)
県立広島大学・人間文化学部・教授
研究者番号: 00165309

西保 岳 (NISHIYASU TAKESHI)
筑波大学・体育系・教授
研究者番号: 90237751

近藤 徳彦 (KONDOU NARIHIKO)
神戸大学・人間発達環境学研究科・教授
研究者番号: 70215458

福岡 義之 (FUKUOKA YOSHIYUKI)
同志社大学・スポーツ健康科学部・教授
研究者番号: 20265028