

平成21年6月12日現在

研究種目：基盤研究（A）  
 研究期間：2006～2008  
 課題番号：18207019  
 研究課題名（和文） ヒトの運動能と環境適応能の全身的な協関－非定常状態に注目して－  
 研究課題名（英文） Whole body integration of work capacity and adaptation to environment in humans - non-steady state responses

## 研究代表者

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

研究成果の概要：人類が有する合理的な適応能力を明らかにすることによって、将来の望ましい生活環境への示唆が得られる。身体活動や環境刺激の強度やパターンなどが時間とともに変化する非定常的な場合に注目して、日常生活の活動状況と環境条件をシミュレートした。痛みを伴わずにヒトの生物科学的特性を連続的に測る最新の生体計測技術を駆使して、ヒトの運動能と環境適応能の全身的な協関（酸素摂取－循環－体温調節能力の連携）を考察した。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	23,700,000	7,110,000	30,810,000
2007年度	11,800,000	3,540,000	15,340,000
2008年度	3,000,000	900,000	3,900,000
年度			
年度			
総計	38,500,000	11,550,000	50,050,000

研究分野：生物学

科研費の分科・細目：人類学・生理人類学

キーワード：ヒトの運動能力，環境適応能，全身的な協関

## 1. 研究開始当初の背景

人類は直立二足歩行による運動適応・移動能力と厳しい自然環境への適応能力を獲得し、科学技術の発達によって地球上に広く分布してきた。しかし、人工環境の普及とアメニティ（快適環境）の充実は、ヒトの適応能力を劣化させている。本来、人類が有する合理的な適応能力を明らかにすることによって、将来の望ましい生活環境への示唆が得られよう。全身的な協関の上に成立するヒトの運動能と環境適応能については、生理人類学、人類生物学、応用生理学の分野で、継続的に研究が実施されてきた。しかし、身体活動や環境刺激の強度やパターンなどが時間と

もに変化する非定常的な場合に注目して、ヒトの運動・環境適応能の全身的な協関を研究した報告は数少ない。また、自然環境の気候条件は時々刻々と変動し、人工気候の条件も急激に変化することが多い。

## 2. 研究の目的

非定常状態において、呼吸・循環・筋肉・体温調節がどのように連携協関するのかについては、国内外でほとんど研究されていない。最新の生体計測技術を用いて、非定常状態におけるヒトの運動能と環境適応能の全身的協関を明らかにすることは、独創的・先駆的な点といえよう。本研究では、非定常状

態におけるヒトの運動能と環境適応能の全身的な協関を考察することを目的とした。

### 3. 研究の方法

#### (1) 酸素摂取機能の全身的協関

肺一循環一運動筋における酸素摂取機能の全身的協関を明白に抽出する方法を採用した。特に、運動開始時における肺レベルの酸素摂取動態が、運動筋微小循環レベルの酸素供給と利用のミスマッチに依存するのかを検討した。

#### (2) 循環機能の全身的協関

運動開始・継続・終了時における、活動筋、非活動筋、心臓、脳血流（中大動脈血流速度、頸動脈血流量）および内臓血流（腎動脈、上腸間膜動脈、腹腔動脈）などの連続的な計測を実施した。

#### (3) 体温調節機能の全身的協関

環境温急変時の体温調節応答を検討した（例、室内から室外あるいは室外から室内へ急激に移動した場合）。次に、外的な温熱負荷変化と内的な温熱負荷変化（運動）での体温調節特性を比較することにより、体温調節機構の全身的協関を検討した。各温度負荷の間に食道温、皮膚温、発汗量と皮膚血流量、心拍数、血圧および一回拍出量を測定した。これらのデータを動的特性の定量化という観点から分析した。さらに、加齢に伴う汗腺機能の低下機序をアセチルコリン誘発性発汗による直接刺激性発汗（汗腺自体の要素を反映する）と軸索反射性発汗（交感神経節後線維の要素を反映する）から検討した。

### 4. 研究成果

#### (1) 酸素摂取機能の全身的協関

①運動開始時における肺レベルの酸素摂取 ( $VO_2$ ) 動態が、運動筋微小循環レベルの酸素供給と利用 [ $VO_2/Q$  (血流)] のミスマッチに依存するのかを検討した。運動開始直後では、大腿筋の  $VO_2/Q$  を反映する脱酸素化Hb+Mb濃度の相対変化 ( $\Delta Hb$ ) に時間的・空間的な不均一性が認められた。初期成分に続いて指数関数的に増加する急成分においても、立ち上がりに部位差が見られた。そのメカニズムとしては、部位ごとの還流圧と筋線維動員パターンの違いが、微小循環血流のフィードバック再配分調節と筋肉細胞の酸素消費をそれぞれ不均一にした結果と考えられる。

②高強度の繰り返し運動実験では、前運動（ウォームアップ）に比べて、主運動の  $\Delta Hb$  応答は均一になったが、肺レベル  $VO_2$  の第2相時定数とは関連がないことが認められた。したがって、微小循環の  $VO_2/Q$  の均一化による酸素供給の増加は、活動筋の動的応答を制限しないと推測される。さらに、時間分解近赤外分光計測による  $Hb$  絶対値 ( $PO_2$  の応答に近似) の動的応答（遅れ時間、時定数）は、 $\Delta Hb$

のそれと差がないことが示された。

③活動筋の  $VO_2$  と微小循環の動静脈酸素量差 ( $Hb$  絶対値から推定) の動態計測から、毛細血管レベルの血流量 ( $Q$ ) を推定した。運動開始直後の  $Q$  の応答は  $VO_2$  よりも有意に速くなった。遠位側の外側広筋の  $Hb$  絶対値の増加は他の部位よりも大きくなった。活動肢全体に酸素を供給する血管、および末梢血管のレベルでは、運動開始時の  $VO_2$  応答は酸素供給の制限を受けないことが示唆された。

#### (2) 循環機能の全身的協関

①運動開始に伴う中心循環血液配分機構を検討するために、非活動筋の代表的部位である腹部内臓領域への配分として上腸間膜動脈、脾動脈、腎動脈の血流応答を検討した。その結果、運動開始に伴う血管収縮と血流減少の程度には地域性が存在することがわかった。

②運動後の適切な血流配分について、運動後の血圧と各器官・臓器への血流を同時測定した。運動肢の下肢および非運動肢でも骨格筋の血管は拡張し続け、血圧低下を防ぐ機構の存在は観察されなかった。この一時的なミスマッチにより運動後に1時間程度、血圧は低下したままであり、全身的協関のしこみを紐解く糸口が示唆された。

③姿勢変化時の自発性血圧変動に対する血管抵抗の変動は、上肢・下肢の動脈血管において、血管の自己調節と同じパターンの変動をしていることが示された。立位姿勢により下肢血管に静水圧が加わった場合には、下肢血管の自己調節の反応時間が短縮することが示唆された。また、頭下げ姿勢時により下肢血管に対する静水圧が減少した場合には、下肢血管の自己調節の働きが弱まることが示唆された。

④精神作業と食事が消化器系の血流に与える影響を明らかにした。実験1として、上腸間膜動脈 (SMA) と腹腔動脈 (CA) の血流を測定し、精神作業が消化器系の血流に与える影響について検討した。実験2では、食事後の両動脈血管血流応答の詳細な時系列を検討した。その結果、精神作業はSMAの血管抵抗のみ増加させること、また食後では、CA、SMAともに、食事開始直後から血流が増加し始めるがその支配領域の機能差によって、両血流応答の時系列が異なることを明らかにした。

#### (3) 体温調節機能の全身的協関

環境温の急激な変化やサイン状の変化に伴うヒトの熱放散反応の動的特性を検討するために、新しい環境試験室を構築した。また、外的な温熱負荷変化と内的な温熱負荷変化（運動）での体温調節特性を比較することにより、体温調節機構の全身的協関を検討した。さらに、アセチルコリン誘発性発汗による直

接刺激性発汗（汗腺自体の要素を反映する）と軸索反射性発汗（交感神経節後線維の要素を反映する）を20～70歳で比較検討した。

①体温調節機構の動的特性として、環境温をサイン状（1周期20分、振幅10℃：20℃から30℃）に変化させ、皮膚温や皮膚血流量の周期に対する遅れ時間と振幅変化から、体温調節機能の動的特性を評価することができた。

②安静温熱負荷時の体温調節反応と運動時のそれを比較し、安静時では前腕へ供給される血液と前腕から戻ってくる血液は体温上昇に伴いほぼ直線的に変化し、また、前腕から戻ってくる血液は、上腕の表在性静脈を通る。一方、運動時にはこれらの変化は直線的ではなく、体温上昇初期に一旦低下したのち、増加するという変化を示し、運動に伴う血流配分調節が特に上腕の導管血管の血流に影響していた。

③上述の安静時と運動時に非活動肢導管血管の静脈血流量を、表在性血管と深在性血管で測定することにより、非活動肢の皮膚と筋の血流変化を分離して評価できる可能性が示唆された。

④環境温が上昇するようなときの体温調節反応と運動時のそれでは調節に関わる要因が異なり、それぞれの温度変化（体温変化）に全身の生理学的負荷が大きくなるように協働した調節が行われていることが推察された。

⑤汗腺自体の要素をより反映する直接刺激性発汗は加齢に伴い減弱し、逆に交感神経節後線維の要素をより反映する軸索反射性発汗は代償的に亢進することが示唆された。直接刺激性発汗の減弱は大腿で、軸索反射性発汗の亢進は前腕で顕著であり、これらの加齢的变化は60歳代から観察された。

最終的に、研究結果の全てを用いて非定常状態におけるヒトの運動能と環境適応能の全身的な協働を総合的に検討した。

## 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19件）

①Saitoh T, Ferreira LF, Barstow TJ, Poole DC, Ooue A, Kondo N, Koga S. Effects of prior heavy exercise on heterogeneity of muscle deoxygenation kinetics during subsequent heavy exercise. *Am J Physiol (Regul Integ Comp Physiol)*, 2009. in press. 査読有

② Ichinose KT, Inoue Y, Hirata M, Shamsuddin AKM, Kondo N. Enhanced heat loss responses induced by short-term

endurance training in exercising women. *Exp Physiol* 94: 90-102, 2009. 査読有

③Fujii N, Honda Y, Hayashi H, Soya H, Kondo N, Nishiyasu T. Comparison of hyperthermic hyperpnea elicited during rest and submaximal, moderate intensity exercise. *J Appl Physiol* 104: 998-1005, 2008. 査読有

④Fujii N, Honda Y, Hayashi K, Kondo N, Koga S, Nishiyasu T. Effects of chemoreflexes on hyperthermic hyperventilation and cerebral blood velocity in resting heated humans. *Exp Physiol* 93: 994-1001, 2008. 査読有

⑤Ichinose M, Saito M, Fujii N, Ogawa T, Hayashi K, Kondo N, Nishiyasu T. Modulation of the control of muscle sympathetic nerve activity during incremental leg cycling. *J Physiol* 586: 2753-2766, 2008. 査読有

⑥Someya N, Endo MY, Fukuba Y, Hayashi N. Blood flow responses in celiac and superior mesenteric arteries in the initial phase of digestion. *Am J Physiol (Regul Integ Comp Physiol)* 294: R1790-1796, 2008. 査読有

⑦Endo MY, Suzuki R, Nagahara N, Hayashi N, Miura A, Koga S, Fukuba Y. Differential arterial blood flow response of splanchnic and renal organs during low-intensity cycling exercise in women. *Am J Physiol (Heart Circ Physiol)* 294: H2322-2326, 2008. 査読有

⑧Ooue A, Ichinose-Kuwahara T, Inoue Y, Nishiyasu T, Koga S, Kondo N. Changes in blood flow in the conduit artery and veins of the upper arm during leg exercise in humans. *Eur J Appl Physiol* 103: 367-373, 2008. 査読有

⑨ Hayashi N, Someya N, Hirooka Y, Koga S. Ambient temperature affects glabrous skin vasculature and sweating responses to mental task in humans. *J Physiol Anthropol* 27: 227-231, 2008. 査読有

⑩Koga S, Poole DC, Ferreira LF, Whipp BJ, Kondo N, Saitoh T, Ohmae E, Barstow TJ. Spatial heterogeneity of quadriceps muscle deoxygenation kinetics during cycle exercise. *J Appl Physiol* 103:

2049-2056, 2007. 査読有

⑪ Ferreira LF, Koga S, Barstow TJ. Dynamics of noninvasively estimated microvascular O<sub>2</sub> extraction during ramp exercise. *J Appl Physiol* 103: 1999-2004, 2007. 査読有

⑫ Nishiyasu T, Hayashida S, Kitano A, Nagashima K, Ichinose M. Effects of posture on peripheral vascular responses to lower body positive pressure. *Am J Physiol (Heart Circ Physiol)* 293: H670-676, 2007. 査読有

⑬ Ichinose M, Koga S, Kondo N, Nishiyasu T. Modulation of the spontaneous beat-to-beat fluctuations in peripheral vascular resistance during activation of muscle metaboreflex. *Am J Physiol (Heart Circ Physiol)* 293: H416-424, 2007. 査読有

⑭ Endo, MY, Kobayakawa, M, Kinugasa R, Kuno S, Akima H, Rossiter HB, Miura A, Fukuba Y. Thigh muscle activation distribution and pulmonary V<sub>O2</sub> kinetics during moderate, heavy and severe intensity cycling exercise in humans. *Am J Physiol (Regul Integ Comp Physiol)* 293: R812-820, 2007. 査読有

⑮ Fukuba Y, Endo M, Ohe Y, Hirotohi Y, Kitano A, Shiragiku C, Miura A, Fukuda O, Ueoka H, Miyachi M. Central circulatory and peripheral O<sub>2</sub> extraction changes as interactive facilitators of pulmonary O<sub>2</sub> uptake during a repeated high-intensity exercise protocol in humans. *Eur J Appl Physiol* 99: 361-369, 2007. 査読有

⑯ Fukuba Y, Kitano A, Hayashi N, Yoshida T, Ueoka H, Endo MY, Miura A. Effects of femoral vascular occlusion on ventilatory responses during recovery from exercise in human. *Respirat Physiol Neurobiol* 155: 29-34, 2007. 査読有

⑰ Ooue A, Ichinose-Kuwahara T, Shamsuddin AK, Inoue Y, Nishiyasu T, Koga S, Kondo N. Changes in blood flow in a conduit artery and superficial vein of the upper arm during passive heating in humans. *Eur J Appl Physiol*. 101: 97-103, 2007. 査読有

⑱ Kondo N, Inoue Y, Koga S, Nishiyasu T. The effect of non-thermal factors on heat

loss responses during exercise in humans. *Environmental Ergonomics* 12: 241-244, 2007. 査読有

⑲ Inoue Y, Ichinose KT, Ogura Y, Kubota T, Ueda H, Ooue A, Kondo N. Sex differences in the effects of physical training on sweat gland function. *Environmental Ergonomics* 12: 276-279, 2007. 査読有

[学会発表] (計2件)

① 齊藤 満、近藤徳彦、井上芳光、藤原勝夫、ヒトにおける運動時の全身的協働、日本生理人類学会大会シンポジウム、2008年6月、大阪市立大学

② 井上芳光、迫田 妙、一之瀬智子、大上安奈、近藤徳彦、古賀俊策、膝伸展運動時における高齢者の大腿動脈血流量、日本生理人類学会第57回大会、2007年10月、福岡

[図書] (計2件)

① 古賀俊策、福岡義之、朝倉書店、酸素ダイナミクス研究会編、からだと酸素の事典：運動時の酸素動態 2009年、印刷中

② Taylor NAS, Kondo N and Kenney WL. Human performance in the heat: The physiology of acute heat exposure, In *Physiological bases of human performance during work and exercise*. Eds: Taylor NAS, Groeller H and McLennan PL, Springer, 2008

## 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・デザイン学部・教授  
研究者番号：50125712

### (2) 研究分担者・連携研究者

井上 芳光 (INOUE YOSHIMITSU)  
大阪国際大学・人間科学部・教授  
研究者番号：70144566

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・大学院人間総合科学研究科・准教授  
研究者番号：90237751

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