様式Ｃ－１９

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成２４年　５月３０日現在

機関番号：２５４０６
研究種目：基盤研究(B)
研究期間：2009～2011
課題番号：２１３７０１１１
研究課題名（和文）　新たなヒト有酸素性作業能力評価方法の開発

研究課題名（英文）　The methods for evaluating the aerobic working capacity

研究代表者
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

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は，ヒトの身体活動を支える有酸素性作業能力評価のための運動テストにおける，新たな負荷方法を検討し，開発することであった。結果として２つの新たな負荷方法が提案された。1）日常の身体活動を模したような，非定常状態の連続であるサイン波状に運動負荷が変動する運動を用いる方法，2）指数関数的に負荷が漸増する運動を用いる方法，であった。特にサイン波状負荷運動テストについては，基礎的ならびに実用的な視点から詳細な検討を加え，新たな具体的手法が提案された。

研究成果の概要（英文）：The main purpose of this study was to develop the new techniques of work rate forcing for estimating the aerobic working capacity of humans. The proposed techniques are based on; 1) the sinusoidally fluctuated work rate forcing which simulates the non-steady state physical activities of daily life, and 2) the exponentially incremental work rate forcing, as an alternative way to the conventional ramp-mode exercise test With respect to the sinusoidal exercise, the responses of O2-cascade related variables (i.e. from pulmonary VO2 to O2-utlization in active muscle) and their coordination were examined. Furthermore, the physiological linkage, that is, circulatory adjustments among the O2-cascade related and non-related variables (including the cerebral and non-exercising limb circulations) were explored.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合　計
2009年度	7,900,000	2,370,000	10,270,000
2010年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
2011年度	2,700,000	810,000	3,510,000
年度			
年度			
総　計	14,000,000	4,200,000	18,200,000

研究分野：生物学
科研費の分科・細目：応用人類学
キーワード：生理人類学，全身的協関，有酸素性作業能力，運動負荷試験

１．研究開始当初の背景

ヒトの有する多元的な生理機能特性のひとつに，進化の過程で獲得してきたにもかかわらず，今日的な社会では，発揮される場面が極めて少なくなり問題視されつつある適応能の一つである「身体作業能力」があげられる。日常生活を支える身体活動は，基本的に，動員される骨格筋組織への適切な酸素供給によって支えられる。すなわち，外呼吸－循環－内呼吸という生理的な連関で支えら

れる酸素の流れ(O2-cascade)が，円滑かつ適切に機能する必要がある。このような酸素の流れが支える身体活動能（有酸素性作業能力：aerobic working capacity: AWC）といったヒトの全身的協関を研究することは，生理人類学に課せられた基本的テーマの一つである。

現在，生理人類学も含めた各種関連領域で使用される，有酸素性作業能力測定のための運動負荷テストの負荷様式は，最大酸素摂取量（VO2max）や無酸素性作業閾値（AT）の評価を目的としたランプ負荷（一定の率で運動強度が増加する）運動テストと，VO2 などのパラメータの動特性の評価を目的としたステップ負荷（ある瞬間に次の負荷へ階段状に運動強度が増加する）運動テストの両者が主である。日常生活における身体活動を考えると，その運動強度が一定であることはあまりなく，むしろ常に変動する。そのような時々刻々と負荷が変動する運動負荷に対して，身体は，酸素の流れを円滑に調節し，いかに素早く追従させていくか（追従性の良否）が重要となる。その目的には，その実現の容易さから，後者のステップ負荷テストが用いられてきた。しかし，ステップ運動テストでは，その過渡応答の期間が 2-3 分以内と短く，また呼吸循環系応答自体の変動（例えば１呼吸，１心拍動毎の変動）が大きいため，１回のステップ負荷運動テストの測定のみから，それら生理応答の追従性（動特性）を精度よく評価することは困難であるという問題点が指摘されている。

一方，前者のランプ負荷運動テストには，初めて運動テストを受ける対象者に対して，具体的な運動負荷の漸増率をうまく選択することが困難という問題点があることが，調査などを目的とした現場で指摘されている。そこで，その代案として，指数関数型の負荷様式（STEEP と呼称，Northridge et al., *Br Heart J*, 1990）が提案され，代表研究者たちは STEEP をすでに理論解析し，幅広い対象者で負荷漸増率選択が不要，運動能力の低い対象者でも同一プロトコールで長い運動継続時間（解析データ数）が確保され AT 判定が容易，いずれにしても絶対的な総運動量が相対的に減少（被験者負担の軽減），といった利点を有する可能性が高いことを指摘してきた［Fukuba et al., *Med Biol Eng Comput*, 2000］。

２．研究の目的

そこで本研究では，ステップ負荷による動特性評価のための運動テストの欠点を克服するために，サイン波状負荷を採用し，その実用的な方法の確立を主な目的として，基礎的・応用的な実験を行い，その妥当性を検討することとした。あわせて，ランプ負荷運動テストに変わるアイディアとして，すでに理論的には検討してきた指数関数型負荷運動テスト（STEEP）の有用性と限界を，実験的に明らかにすることとした。それらの結果に基づき，新たな有酸素性作業能力の評価方法を具体的に提案することをめざすことが，本研究の最終的な目標であった。

３．研究の方法

(1) サイン波状負荷を用いた新たな運動負荷テスト法の開発に関する方法論的研究

運動強度がサイン波状に変動する周期として,具体的にどのような周期を採用すべきかを検討した。健康な男性７名（19-22 歳）を被験者として，サイン波状負荷運動テストを，通常の脚自転車エルゴメータを用いて行った。サイン波負荷の運動強度は AT 以下の範囲を想定し，上限を 60% of VO2max，下限を 20 W となるよう設定した。検討する周期としては，2，4，6 分を１周期とする３種類を設定した。プロトコールは，4 分の安静の後，サイン波の上・下限の中間に相当する強度での一定負荷運動を 30 分間行い,その後，サイン波状負荷変動を，2 分周期では 7 回，4 分周期では 4 回，6 分周期では 3 回繰り返した。プロトコール中を通して，肺のガス交換諸量と，中心循環諸量として心拍数(HR)，平均動脈血圧(MAP)，心拍出量(CO)などを連続的に測定した。各変数の応答には，以下のサイン波が非線形最小二乗法でフィットされた（$y(t)= M + A*\sin((2*\pi/T)*t-\theta)$，ここで T（周期）=120 or 240 or 360 s，M，A，θ：応答の平均レベル，振幅，位相)。推定された位相（°）と A/M（×100；%）を，それぞれ動特性を表す追従性ならびに変動性の指標とした。

(2) サイン波状負荷を用いた新たな運動負荷テスト法の開発に関する基礎的研究

上記の１の実験結果をへて［以下の研究結果の項における(1)も参照]，4 分周期のサイン波変動が採用されたので，それを用いた運動テストにおいて，生理的な基礎的検討を行った。

① 脚自転車エルゴメータ運動による呼吸循環系諸変量の動特性についての検討

運動時の酸素運搬を支える呼吸-循環の全身的協関を,特に筋血流以外の末梢循環に着目して検討した。健康な男性 9 名（19-24 歳）を被験者として，(1)と同様，上限を約 60% of VO2max，下限を 20 W となるサイン波負荷運動を行った。プロトコールは，上・下限の中間に相当する強度での一定負荷運動を 30 分間行った後，4 分を１周期としたサイン波状運動を 4 回繰り返した。このプロトコール中を通して，肺のガス交換諸量，中心循環とし

てHR, MAP, COを，末梢循環として脳血流（中大脳動脈（MCA）と総頚動脈（CCA））と非運動肢血流（上腕動脈（BA）)，さらに前額部，前腕部，手掌部の皮膚血流（SBF）と発汗量(SR)を測定した。

② 両膝伸展運動負荷装置による呼吸循環系諸変量の動特性についての検討

上述の①の実験では，運動負荷装置を通常の脚自転車エルゴメータを使用したため，運動肢（下肢）への血流が測定できないという問題点が残ったので，運動中の大腿動脈(FA)血流の測定が可能な，自作の両膝伸展運動負荷装置を用いてサイン波状変動の運動を課すこととした。被験者は健康な男性10名（18－23歳）で，サイン波状負荷の上限は60% of VO2max，下限は20 Wとした。プロトコールは，サイン波の上・下限の中間に相当する強度での一定負荷運動を10分行った後，4分を1周期としたサイン波状に運動強度が変動する運動を4回繰り返した。プロトコール中を通して，ガス交換諸量や中心循環諸変量に加えて，末梢循環として運動肢・非運動肢への血流を，それぞれFA，BAで測定した。さらに活動筋での酸素消費の指標として，主働筋である大腿直筋と，補助筋である外側広筋の筋組織でのdeoxy-Hbを連続的に測定した。また,大腿部のSBFとSRも同時に測定した。

③ 動物実験による活動筋での酸素消費動態に関する基礎的検討

ラット活動筋内の微小血管内の酸素分圧(PmvO2)を酸素クエンチング法により定量し，筋への電気刺激の周波数をサイン波状に行った際のPmvO2動態を観察した。

(3) 指数関数型運動テストに関する検討

指数関数型負荷運動テスト（STEEP）の有用性と限界を，これまでの標準であるramp負荷法と同時に実施し，測定された諸変量の比較を行うことで，STEEP法の有用性と限界を検討した。31名の健康な成人男女を被験者として，ランダムな順序で，自転車エルゴメータを用いたramp負荷とSTEEP負荷の運動テストを実施した。被験者は自転車上で１分間の安静，４分間の20Wでのウオーミングアップ運動（負荷強度；WRBL=20W）の後に，以下の式で示されるような負荷漸増様式で疲労困憊まで運動テストを行った。

ramp法：$WR(t)=WRBL+S\cdot t$，ここで$S=12$（女性）あるいは20（男性）W/分,

STEEP法：$WR(t)=WRBL\cdot \exp(a\cdot t)$［$a=0.2$/分］，ここで，WR(t)は時刻t(分)における運動強度である。運動テスト中を通して，ガス交換諸変量と心拍数がbreath-by-breathで連続測定された。従来のramp負荷テスト中とSTEEP負荷テスト中のガス交換諸変量を解析して，4種のaerobic parameter（VO2max，AT, VO2の平均応答時間［MRT；サイン波状運動でいう追従性に相当］，ΔVO2/ΔWR［一種の運動効率の逆数に相当］）を推定，算出した。

４．研究成果

(1) サイン波状負荷を用いた新たな運動負荷テスト法の開発に関する方法論的研究

肺でのVO2,やHR,COといった諸変量では，サイン波負荷変動に対してサイン波上の応答を示した。推定された位相は，運動負荷のサイン波の周期が短くなるにつれて（6→4→2分周期），有意に遅れ，変動性も減少した（例：VO2位相（°）：6分［36］，4分［51］，2分［70］，変動性（%）：6分［33.1］，4分［29.6］，2分［17.0］，以下，結果は平均値で表示）。結果を全体として俯瞰すると（表1を参照），6分と4分周期の間には有意差がみられないものが多かったのに対して，2分ではほぼすべての応答で6分と4分との間に有意差が認められたので，サイン波状運動負荷入力としては4分周期を採用すべきであると結論された。

表1.各周期での主な変量での追従性（位相：度）の結果（m：平均，SD：標準偏差）

追従性［位相（°）］						
周期	2分		4分		6分	
変量	m	SD	m	SD	m	SD
HR	59.8	6.6	45.3	9.7	36.7	7.9
CO	52.2	11.9	46.7	17.6	38.4	11.1
MAP	51.0	29.4	31.0	12.2	26.2	5.6
VO2	69.9	6.5	51.5	2.3	35.6	4.5
VCO2	82.6	19.6	63.8	6.1	47.5	10.0
VE	99.1	26.3	64.7	8.9	49.7	14.0

(2) サイン波状負荷を用いた新たな運動負荷テスト法の開発に関する基礎的研究

① 脚自転車エルゴメータ運動による呼吸循環系諸変量の動特性についての検討

非運動肢のBAの血流では，サイン波上の運動負荷変動に対して逆位相の現象（175°）が認められ，大きな変動性（32.3%）を示した。一方，脳循環では，サイン波負荷変動に対して,MCAの血流ではやや遅れた追従性(位相：73°）をもつ変動が認められたが，その変動性は極めて小さく（4.1%），自己調節機構の強い関与が示唆された。CCAでは，3名の被験者で血流に明らかな逆位相の追従性が認められたものの，他の被験者6名では周期性変動が認められず，この点の解明は今後の課題であった。

② 両膝伸展運動負荷装置による呼吸循環系諸変量の動特性についての検討

図１に解析結果の一例を示す。肺 VO2 の位相は 61°，CO(中心性 O2-delivery)は 45°，運動肢への FA の血流（末梢性 O2-delivery ）は 53°，活動筋での O2-utilization である大腿直筋の deoxy-Hb は 49°，外側広筋（両膝伸展運動の場合には補助筋）の deoxy-Hb は 35°であった。つまり，CO，FA 血流，大腿直筋（主動筋）の deoxy-Hb の追従性の間に有意な差異は認められなかったが，これら

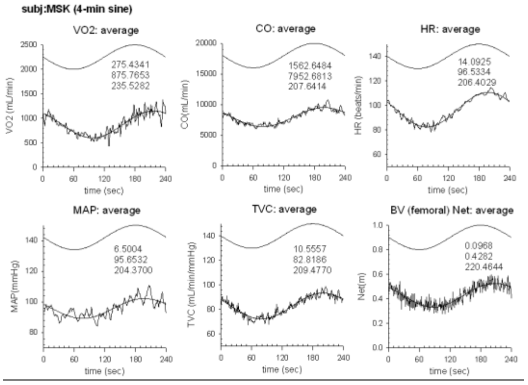

図 1. 主な諸変量のサイン波への追従の一例

と比較して,肺 VO2 には位相遅れがみられた。deoxy-Hb は活動筋での動静脈血酸素較差(a-vO2diff.)を反映するので，主働筋である大腿直筋の deoxy-Hb の追従性と，肺における a-vO2diff.(=VO2/CO)の追従性（78°）の位相差（29°=78-49，約 20 秒に相当）が，活動筋と肺の間に存在する循環系の time lag と考えられた。

③ 動物実験による活動筋での酸素消費動態に関する基礎的検討

サイン負荷を 120 秒周期で 10 回繰り返した場合に，微小血管内の酸素分圧(PmvO2)はやはり遅れた追従を示すことが認められ,ヒトでの筋赤外線分光法による deoxy-Hb の結果を裏付ける知見がえられた。今後は，収縮負荷の応答に対する動特性の定量化なども行い，酸素の供給-消費バランスについて明らかにする必要がある。

これらの(2)の一連の研究結果をまとめると，肺 VO2 から主動筋の O2-utilization までの酸素の流れは，ほぼ同じ位相でうまく連関して機能していることがわかった。したがって，サイン波状負荷運動テスト中，肺でのガス交換をサイン波でフィットして定量化することで，大気から活動筋への酸素の流れにおける全身的協関を評価できる生理的根拠をえることができた。一方，全身の循環系における統合的調節として，脳循環の自動調節や，非活動筋である上肢への血流配分には，異なる調節系が関与している可能性が強く示唆され，今後の新たな基礎的研究課題として浮び上がった。

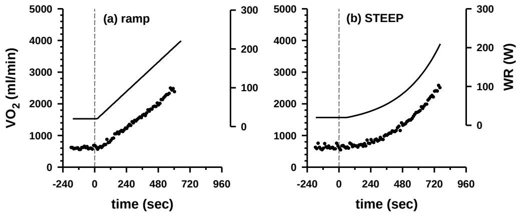

図 2. 両運動テストでの VO2 応答の一例

(3) 指数関数型運動テストに関する検討

STEEP 法と ramp 法からえられた４種の aerobic parameter を比較する（図２：測定の一例）と，VO2max と AT（VO2 表示）には，両方法間で平均値に統計的な有意差はなく，高い相関性のある回帰直線がえられ，一致性が認められた。一方，STEEP 法によって求められた MRT とΔVO2/ΔWR においては，ramp 法に比べてばらつきが大きく，また両 parameter 共に両方法の間に一致性は認められなかった。調査などでの STEEP 負荷法の適用を考えると，負荷の漸増が前半は緩除で後半が急峻となること，運動終了時点の均一性，相対的な総仕事量の減少といった特徴から，高齢者や体力の弱い対象者の AT と VO2 peak の実測には有用であることが指摘される。ただし現時点では，MRT とΔVO2/ΔWR の推定には方法論的な限界があり，使用が制限されることが認識された。STEEP 法の応用に関しては今後，さらに検討する必要があるものと考えられる。

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９件）

① Ikemura T, Hayashi N. Ocular circulatory responses to exhaustive exercise in humans. *Eur J Appl Physiol* (accepted, in press) 査読有 DOI: 10.1007/s00421-012-2313-0

② Fukuba Y, Shinhara Y, Houman T, Endo MY, Yamada M, Miura A, Hayashi N, Sato H, Koga S, Yoshida T. VO2 response at the onset of heavy exercise is accelerated not by diathermic warming of the thigh muscles but by prior heavy exercise. *Res Sports Med* 査読有，20: 13-24, 2012 DOI: 10.1080/15438627.2012.634672

③ Koga S, Poole DC, Y Fukuoka, LF. Ferreira, N Kondo, E Ohmae, TJ. Barstow. Methodological validation of the dynamic heterogeneity of muscle deoxygenation within the quadriceps during cycle exercise. *Am J Physiol* 査読有，301: R534-R541,

2011
DOI: 10.1152/ajpregu.00101.2011

④ Y Kano, DC Poole, M Sudo, T Hirachi, S Miura and O Ezaki. Control of microvascular PO2 kinetics following onset of muscle contractions: Role for AMPK. *Am J Physiol* 査読有, 301: R1350-1357, 2011
DOI: 10.1152/ajpregu.00294.2011

⑤ Hayashi N, Someya N, Fukuba Y. Effect of intensity of dynamic exercise on pupil diameter in humans. *J Physiol Anthropol* 査読有, 29: 119-122, 2010
DOI: 10.2114/jpa2.29.119

⑥ Someya N, Endo MY, Fukuba Y, Hirooka Y, Hayashi N. Effects of a mental task on splanchnic blood flow in fasting and postprandial conditions. *Eur J Appl Physiol* 査読有, 108: 1107-1113, 2010
DOI: 10.1007/s00421-009-1316-y

⑦ Miura A, Shiragiku C, Hirotoshi Y, Kitano A, Endo MY, Barstow TJ, Morton RH, Fukuba Y. The effect of prior heavy exercise on the parameters of the power-duration curve for cycle ergometry. *Appl Physiol Nutr Metab* 査読有, 34: 1001-1007, 2009
DOI: 10.1139/H09-103

⑧ Fukuba Y, Sato H, Sakiyama T, Yamaoka M, Yamada M, Ueoka H, Miura A, Koga S. Autonomic nervous activities assessed by heart rate variability in pre- and post-adolescent Japanese. *J Physiol Anthropol* 査読有, 28: 269-273, 2009
DOI: 10.2114/jpa2.28.269

⑨ Miura A, Yamamoto N, Yamaoka M, Ueoka H, Yamada M, Kuno SY, Sato H, Fukuba Y. Effect of aerobic leg exercise training on subcutaneous adipose tissue of thigh in young Japanese women. *J Physiol Anthropol* 査読有, 28: 247-250, 2009
DOI: 10.2114/jpa2.28.247

〔学会発表〕(計 7 件)

① Koga S, Fukuoka Y, Kondo N, Fukuba Y, OhmaeE, Inoue Y. Evaluation of aerobic work capacity during a non-steady state following exercise onset. 10th International Congress of Physiological Anthropology, September, 2010, Fremantle, Australia

② Fukuba Y, Myouken S, Yamada M, Kashima H, Miura K, Miura A, Endo MY. Effects of Aerobic Exercise in Early Evening on the Following Nocturnal Sleep. ACSM Conference on Integrative Physiology of Exercise, September, 2010 Florida, USA

③ Fukuba Y, Kajimoto C, Yamada M, Koga S, Endo MY. Post-exercise hypotension: The effect of water drinking during exercise. Experimental Biology 2010, April, 2010, Los Angles, USA

④ Yamada M, Endo MY, Fukuba Y. Blood pressure response during recovery after moderate leg cycling exercise: the role of carotid baroreflex control. Experimental Biology 2010, April, 2010, Los Angles, USA

⑤ Fukuba Y, Yamada M, and Endo MY. Carotid baroreflex regulation to central and peripheral circulations during recovery after moderate leg cycling exercise. 57th Annual meeting of American College of Sports Medicine, June, 2010, Baltimore, USA

⑥ Fukuba Y. Blood pressure response during recovery after moderate leg cycling exercise in humans. British Councilによる国際研究交流事業(PMI2)によるシンポジウム[Oxygen uptake kinetics: Systems integration and future directions]での招待講演, August, 2010, Leeds, UK

⑦ Sudo M, Kano Y. Eccentric exercise training-induced skeletal muscle hypertrophy is augmented by concomitant blood flow restriction. 56th Annual meeting of American College of Sports Medicine, June, 2009, Seattle USA

〔図書〕(計 7 件)

① 福場良之, 三浦 朗. ガス交換のモデリング, 身体運動と呼吸・循環機能, 真興交易(株)医書出版部, 2012(印刷中)

② 福岡義之. 低酸素環境下での呼吸調節, 身体運動と呼吸・循環機能, 真興交易(株)医書出版部, 2012(印刷中)

③ 古賀俊策. 活動筋の酸素動態不均一性, 身体運動と呼吸・循環機能, 真興交易(株)医書出版部, 2012(印刷中)

④ 狩野 豊. 毛細血管における酸素拡散, 身体運動と呼吸・循環機能, 真興交易(株)医書出版部, 2012(印刷中)

⑤ 林 直亨. 眼底血流, 身体運動と呼吸・循環機能, 真興交易(株)医書出版部, 2012(印刷中)

⑥ 山岡雅子, 染矢菜美. 内臓血流, 身体運動と呼吸・循環機能, 真興交易(株)医

書出版部，2012（印刷中）

⑦ 福場良之，山岡雅子，上岡はつみ．運動と呼吸調節，カラダの百科事典，丸善，2009，pp.352-355

６．研究組織

(1)研究代表者

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

(2)研究分担者

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

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

林　直亨（HAYASHI NAOYUKI）
九州大学･健康科学センター･准教授
研究者番号：80273720

狩野　豊（KANO YUTAKA）
東京電通大学・電気通信学部・准教授
研究者番号：90293133

(3)連携研究者

三浦　朗（MIURA AKIRA）
県立広島大学・人間文化学部･教授
研究者番号：30190581

山岡　雅子（YAMAOKA MASAKO）
県立広島大学・人間文化学部･助教
研究者番号：30336911