

急激な負荷変化に関する予測が 呼吸循環応答に及ぼす影響

奈良女子大学 定本 朋子

Effects of Prediction Induced by Prior and Different Instructions about Abrupt Change of Workload on The Cardiorespiratory Responses to Exercise

by

Tomoko Sadamoto
Graduate School of Human Culture
Nara Women's University,
Division of Integrated Sciences
Chair of Human Behavioral Sciences

ABSTRACT

To study the effect of prediction induced by prior and different instructions about an abrupt change of workload on the cardiorespiratory responses to the ensuing exercise, fifteen healthy volunteers performed the same bicycling exercise under three conditions in which the instructions about the load change were *no*, *true*, or *false*. The workload of the bicycling exercise in all three conditions was stepwisely increased from 40 % to 50 % of maximal oxygen uptake level at 5 min after the start of exercise. Before the change of workload, both *true* and *false* conditions elicited the same magnitude of anticipatory increase in minute ventilation, heart rate, and mean arterial blood pressure (MAP), whereas the *no* condition had no effects. After the increase of workload, three conditions produced different responses in the hemoglobin oxygenation (oxy-Hb) and the index of muscle blood flow (MBF) in the exercising thigh muscles measured by near-infrared spectroscopy. The magnitude of the reduced oxy-Hb in response to the

abrupt increase of workload was lower in the *true* condition than other conditions. Concurrently, the MBF in *true* condition was significantly increased more than other conditions. The less reduction of oxy-Hb and the higher MBF in the *true* condition resulted in the lowest increase of MAP. These results suggest that the predictive and voluntary control resulting from the prior and different instructions about load change can modify the cardiorespiratory adjustment to the ensuing exercise.

要 旨

負荷変化に関する予測が運動時の呼吸循環応答に及ぼす影響を明らかにするため、負荷変化について、正しく教示されている True 条件、逆の教示が与えられている False 条件、負荷変化に関する教示のない No 条件を設定し、同一負荷の自転車作業を 15 名の被験者が 3 回繰り返した。作業負荷は、運動開始 5 分目に 40% $\dot{V}O_{2max}$ から 50% $\dot{V}O_{2max}$ へステップ状に上昇させるように設定した。True と False 条件では、負荷変化前に予期応答がみられ、換気量、心拍数、平均血圧が両条件共に同程度上昇していた。教示条件に対応した呼吸循環応答は、負荷変化後の筋血流量、酸素化ヘモグロビン、平均血圧に現れていた。正しく負荷変化を予測できる True 条件では、No や False 条件に比べ、活動筋血流量が確保され、その結果酸素化ヘモグロビンの低下も少なく、昇圧反応も抑えられていた。このように負荷変化に関する予測の相違が同一強度の運動であっても、その呼吸循環応答を変調することが明らかとなった。

緒 言

スポーツ場面では、予測し得ない事態の変化が頻繁に生じる。たとえばゲレンデを滑降するスキーヤーは、予測できない突風や雪面の変化に遭遇し、動きを乱し、記録を遅延させることもある。逆に、予測による先取り行動が大幅に記録を向上させることもある。このように、「予測」はヒトの運動パフ

フォーマンスを決める重要な要素といえる。

予測制御に関するこれまでの研究をみると、大部分が随意運動の制御に関するものであり、自律神経活動の予測制御に関する研究は殆どなされていない⁶⁾。しかし、交感神経活動が運動開始以前から亢進することや^{6, 9)}、運動を予想したり想像するだけで運動発現時と同様の呼吸循環応答を生じさせるセントラルコマンドの役割が、近年、報告されてきている^{2, 7, 10)}。これらの報告は、運動時の呼吸循環応答が時間遅れなく、予測的に制御できることを示唆するものである。このような先行研究を踏まえ、本研究では、負荷変化に関する予測がその運動時における呼吸循環応答に及ぼす影響について検討した。具体的には、急激に負荷を上昇させた場合、その負荷変化について、正しく教示されている True 条件、逆の教示が与えられている False 条件、負荷変化に関する教示のない No 条件、における呼吸循環応答を検討し、これらの結果から、「予測の有無」と「予測内容の相違」が呼吸循環機能に及ぼす影響について明らかにすることである。

1. 方 法

1. 1 被験者

健康な女子大学生 16 名 (年齢: 20 ± 1 歳, 身長: 161 ± 7 cm, 体重: 56 ± 7 kg, 最大酸素摂取量 ($\dot{V}O_{2max}$): 2150 ± 290 ml/min) が実験に参加した。実験の目的および手続きを説明した後、被験者全員から実験参加の承諾書を得た。

1. 2 実験手続き

本実験に先立って、漸増負荷自転車作業時の最大酸素摂取量 ($\dot{V}O_{2max}$) を各被験者について測定した。本実験日には、練習試行として、自転車作業負荷が $40\% \dot{V}O_{2max}$ から $50\% \dot{V}O_{2max}$ へ上昇する試行と、 $40\% \dot{V}O_{2max}$ から $25\% \dot{V}O_{2max}$ へ低下する試行 (各強度1分間) を、各1回ずつ練習した。本実験の自転車作業負荷は3教示条件間で同一にし、運動開始5分後に、 $40\% \dot{V}O_{2max}$ から $50\% \dot{V}O_{2max}$ へとステップ状に上昇する負荷とした。コンピュータ (PC9821Xc, NEC) により負荷制御が可能な自転車エルゴメータ (Corival 400, LODE) を本実験には用いた。

No条件では、「基準負荷 ($40\% \dot{V}O_{2max}$) から負荷の変化があれば、それにあわせて対応し、前もって負荷変化に準備したり、構えたりする必要はありません」という教示を与えた。True条件では、負荷変化に関する正しい情報、すなわち「運動開始5分目に負荷が上昇するので ($50\% \dot{V}O_{2max}$)、目前にあるタイマーをみながら、負荷上昇に対する準備をしておいてください」と教示した。False条件では、実際の負荷変化とは逆の教示を与えた。つまり「運動開始5分目に負荷が低下するので ($25\% \dot{V}O_{2max}$)、目前にあるタイマーをみながら、負荷低下に対する準備をしておいてください」と教示した。これら教示内容の説明は各条件試行の前に行い、教示内容を被験者の目前に提示した。また3条件共通の教示として、自転車作業を60rpmのピッチ音に合わせて行うことを付け加えた。

No条件とTrue条件の実施順は被験者間でカウンター・バランスしたが、False条件は各被験者の最後に行うことにした。これは、False条件が被験者の予想を裏切る条件であるため、他条件に先行すると、No条件とTrue条件であっても予想を裏切られるのではないかという心理作用が働くことを低減させるためである。具体的には、8名の被験者

がNo→True, →False条件の順に、残る7名がTrue→No→False条件の順に実験を行った。条件間の休息は8分間とした。全ての実験は、十分に換気した室温下 ($24 \pm 1^\circ\text{C}$) で行った。

1. 3 測定項目

呼気ガスの分画値を呼気分析用質量分析計 (WSMR-1400B, WESTRON) を用いて計測し、また換気流量を差圧流量計 (フライフッシュ型ニューモタコ, WESTRON) により計測した。分画値および流量の信号を、コンピュータ (PC9821BA, NEC) に50Hzで取込み、酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$) と毎分換気量 ($\dot{V}E$) を計測した。胸部双極誘導法により心電図を (1272&7747, NEC 三栄) 導出し、R波同期パルス信号を出し、R-R間隔から心拍数 (HR) を算出した。右手第三指に巻いたフィナプレスカフ (2300TM, Ohmeda) から指動脈血圧波形を計測し、1拍動毎の収縮期血圧、拡張期血圧および平均血圧 (MAP) を算出した。なお自転車作業時の被験者の右腕は心臓位に合わせた測定台に置くようにした。近赤外分光装置 (HEO-100, OMRON) のセンサーを右脚の外側広筋上に固定し、活動筋の酸素化ヘモグロビン量 (oxy-Hb) 及び総ヘモグロビン量 (total-Hb) の相対的変化を測定した。本研究では総ヘモグロビン量を筋血流量 (MBF) の指標とした¹⁾。また、自転車のペダル回転数 (RPM) を、右ペダルを挟むように設置したフォトセンサー (OMRON) により計測した。呼気ガスの測定を除く信号を、16ビットA/Dボードを介して100Hzでコンピュータ (PC9821Xc, NEC) に取り込み、実験後に解析した。

1. 4 データ処理と統計的検定

負荷上昇に対する3条件間の相違をみるため、基準負荷時からの変化量を計測した。各測定項目は運動開始後3.5~4.5分 (基準負荷時) ではほぼ定常値を示していたので、その間の50秒のデータを平均し、その平均値を基準値とした。そし

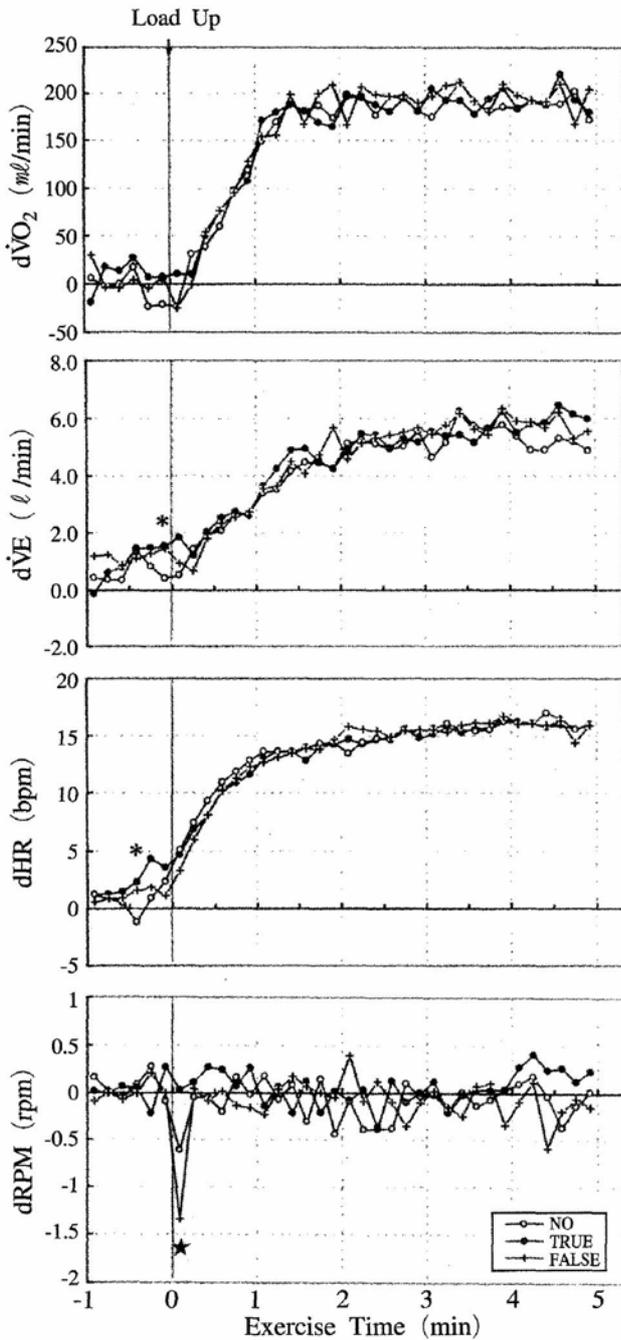


図1 負荷上昇に対する酸素摂取量 ($d\dot{V}O_2$), 毎分換気量 ($d\dot{V}E$), 心拍数 (dHR), および自転車ペダル回転数 ($dRPM$) の変化量。 (*は負荷変化前の平均値において, No条件に比べTrueおよびFalse条件が共に有意差を示した時点, ★は負荷変化後の平均値において, True条件がFalse条件あるいはNo条件との間に有意差を示した時点を表している)

て基準値からの変化量 (d) を各項目について算出した。各項目の d 値について, 対応のある2要因 (3教示条件 \times 運動時間) の分散分析 (ANOVA) を行い, その結果, 主効果あるいは交互作用が有意であった場合には, Tukey法を用いて平均

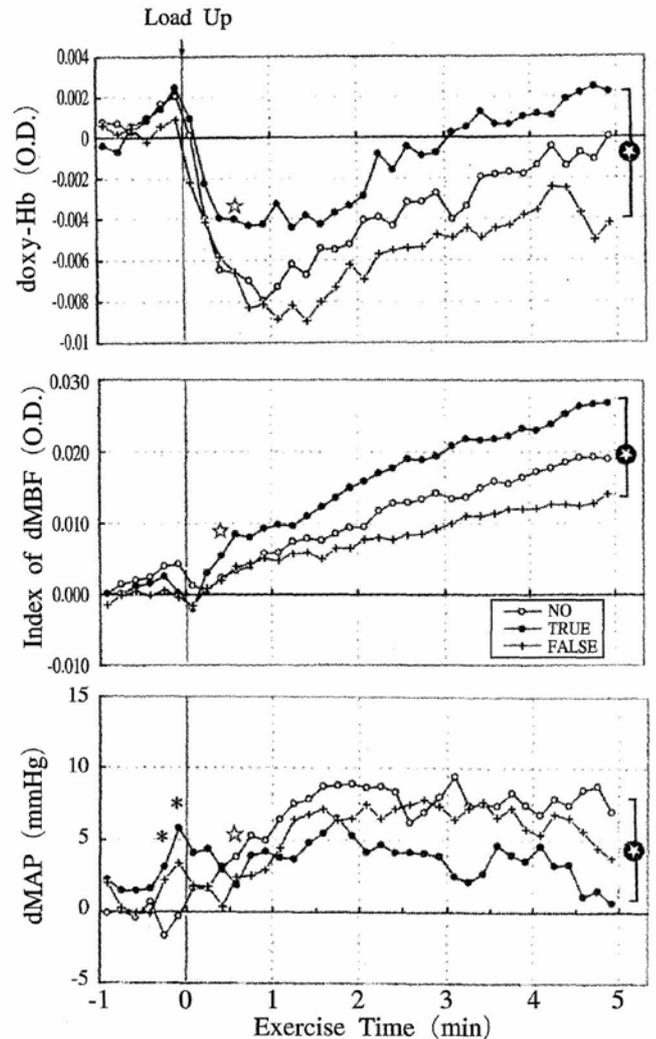


図2 負荷上昇に対する酸素化ヘモグロビン (doxy-Hb), 筋血流 (MBF) 指標, 平均血圧 ($dMAP$) の変化量。
(★はANOVAの結果, 主効果が有意であったことを示し, ☆は負荷上昇後の平均値において, True条件が他の2条件に比べ有意差が出現する開始時点を表わしている)

値間の差を検定した。分析には, SPSS統計パッケージを用いた。本研究の有意水準は5%とした。

2. 結果

2.1 負荷変化前の応答

負荷変化前には, $d\dot{V}E$, dHR , $dMAP$ において予測の有無の影響がみられていた (図1, 2)。これらの項目では, 負荷変化直前 (10~30秒前) におけるTrueとFalse条件の値が, No条件に比べ, 有意に上昇していた。しかし, 負荷変化に関する教示内容が異なるTrueとFalse条件間を比

較すると、両条件間の相違はなく、いずれの項目においても、共に等しい上昇がみられた。

2. 2 負荷変化後の応答

3条件間の教示の相違は、doxy-Hb, dMBF, dMAPの応答において明らかとなった(図2)。doxy-Hbをみてみると、True条件では、負荷上昇に対するoxy-Hbの減少が低く抑えられ、また3分後では減少から増加に転じたことがわかる。一方NoとFalse条件では、oxy-Hbの減少が大きく、また減少している時間も長い。このような筋の酸素供給動態における相違は、dMBFにもみられている。True条件のdMBFは、No条件とFalse条件に比べて有意に高い値を示している。さらにdMAPをみると、True条件では、負荷変化後後半における値が他の2条件よりも有意に低いことがわかる。

自転車回転数のdRPMをみると(図1)、True条件では負荷変化前後で一定値が維持されるが、No条件とFalse条件では、負荷上昇10秒後において、大きくdRPMが低下している。しかしその後におけるdRPMには、3条件間の差はなく、ほぼ等しい値(60回転/分)を示していた。負荷変化後のdHRには条件間の相違はみられず、また $\dot{V}O_2$ は負荷変化の前後をとおして、3条件間の相違はなく、ほぼ等しかった(図1)。

3. 論 議

3. 1 負荷上昇前の予期応答

負荷変化前のMAP, $\dot{V}E$, HRにおいて、負荷変化に準備する予期応答がTrueとFalse条件にみられていた。この予期応答は、自転車回転数のRPMおよび $\dot{V}O_2$ に3条件間に相違がなかったことから考えると、運動量が増えたのではなく、教示に伴う意識的準備が関与したと考えられる。先行研究においても^{2, 4, 7, 10}、筋収縮が生起しない条件や、運動を想像(イメージ)する条件において、顕著な呼吸循環応答が現われることが知ら

れている。神経筋接合部を薬物ブロックした被験者に、種々の強度の握力発揮を行わせると、筋収縮が起らないにもかかわらず、MAP, HR, $\dot{V}E$ が通常の筋力発揮時と同様に上昇することが報告されている⁴。しかも想像した運動強度に応じた上昇がみられることも指摘されている。また健常なヒトにおいても^{2, 10}、動的脚力運動のイメージをするだけで実際の運動時に近い $\dot{V}E$ やHRの上昇がみられることも報告されている。本実験においても、TrueやFalse条件では、負荷変化前の時期に、負荷変化を被験者がイメージしていたと考えられ、その結果、予期応答が生じたのではないかと推察される。

しかし本実験の結果では、TrueとFalseの両条件が教示内容の違いにもかかわらず、等しい応答を示していた。この結果は先行研究とは異なる点といえる。これは本実験では練習が少なく、被験者が教示内容に対応した予期応答を形成できなかったためではないかと考えられる。これまでにも予期応答がトレーニングや経験により変動することは既に報告されている^{6-7, 10}。例えばMcArdleら⁷は、トレーニングされた陸上選手であれば走行距離(50m~3000m種目)に応じたスタート前のHR上昇がみられるが、一般人ではどの種目においてもHR上昇が同一になることを指摘し、合目的な予期応答を生むには、学習や経験期間が必要であることを明らかにしている。

3. 2 負荷上昇後からの応答

負荷上昇後における活動筋のoxy-HbとMBFの応答には、教示条件に伴う予測の相違が反映されていた。True条件では、MBFが増大し、oxy-Hbの低下が最も抑えられていた。一方NoとFalse条件では、MBFの増加量が低く、oxy-Hbの低下が顕著となっていた。これらの結果は、活動筋の血流不足がTrue条件では少ないが、No条件、特にFalse条件ではかなり進行していることを示している。このような条件間の相違は、まず負

荷上昇直後にみられたRPMの急激な低下が関与していたと考えられる。自転車のペダル回転数RPMをみると、荷上昇10秒後の値がTrue条件では一定値を維持するが、NoとFalse条件では、荷上昇に対応できず、急激に低下していた。本実験で用いたエルゴメーターが、回転速度の変動に対して仕事率を一定にするようにコンピュータ制御されているため、このRPMの低下は、仕事率の速度成分を低下させると同時に力成分（つまり負荷）を増大させたと考えられる。このような速度成分の低下および力成分の増大は、ペダルを回転させる活動筋の等長性筋収縮時間を延長させ、また高い張力発揮を要求することになったと考えられる。そのため、NoとFalse条件における活動筋のoxy-Hbが、True条件よりも低下し、続く運動後半においても、そのoxy-Hbの低下が持続されたのではないかと推察される。

さらに、教示内容に伴うストレスレベルの違いが影響したのではないかと考えられる。先行研究によると^{3, 5)}、暗算やメンタルストレステスト (Stroop's color word conflict test) 時には、前腕の筋血流量が増大すると報告され、その血流増加には、高位中枢からの制御が働くといわれている。延髄にある循環中枢は、視床下部をはじめ高位中枢から種々の神経性連絡を受けている⁸⁾。高位中枢のどの部位からどのような神経連絡があるのかは明らかではないが、本実験における教示条件は、先行研究における暗算やメンタルストレスと同様の働きをもたらしたのではないかと考えられる。つまり負荷変化に関する教示により、負荷が「上がると準備する」True条件が、「低下すると準備する」False条件や、変化したら「対応すればよい」No条件に比べると最もメンタルストレスが高くなっていたと考えられる。このような教示に伴うストレスレベルがそれに応じたMBFの変動を引出し、ひいてはoxy-Hbの相違を招いたのではないかと推察される。

このようなNoとFalse条件におけるMBFの低下はoxy-Hbと共に、MAPの条件間の相違にも関与したと考えられる。たとえ一定負荷の自転車作業によって産出される代謝産物が条件間で等しかったとしても、その代謝産物を洗い出す血流がNoとFalse条件では低下していたため、筋中の代謝産物濃度が高くなったのではないかと考えられる。このような代謝産物濃度の上昇は、活動筋のoxy-Hbの低下と共に、筋の代謝受容器を刺激する要因になったと推察される。これまでの研究によると⁸⁾、活動筋中の代謝受容器が刺激されると、筋求心性神経を經由して循環中枢から反射性に交感神経活動（主に血管を支配する交感神経活動）の亢進が起こるといわれている（これを筋の代謝受容器反射と呼ぶ）。この反射機構が働くと血管収縮が生じ、その結果、著しい血圧上昇がみられることが知られている。本実験では、活動筋中の代謝産物を直接計測していないが、oxy-HbおよびMBFにおける結果から推察すると、NoとFalse条件では、活動筋に血流不足が生じ、それに伴って代謝産物濃度が高くなり、そのため代謝受容器反射が亢進させられたのではないかと考えられる。そして、最終的には同一負荷の自転車作業であっても、より大きなMAPが生じたと考えられる。一方、True条件では、このような血流不足とそれに伴う代謝産物の蓄積が抑えられ、また代謝受容器反射の活性も抑えられたため、低いMAPが生じたと考えられる。

4. まとめ

負荷変化に関する予測は、負荷変化前の準備期における呼吸循環応答を上昇させるように働くが、その予期応答には予測内容の違いは反映されてはいなかった。予測内容に対応した呼吸循環応答の相違は、負荷変化後におけるoxy-Hb, MBF, MAPに現れることが明らかとなった。正しく負荷変化を予測できるTrue条件では、Noや

False条件に比べ、活動筋血流が確保されるため、筋虚血も少なく、昇圧反応も抑えられることが示された。

文 献

- 1) De Brasi, R.A., M. Ferrari, A. Natali, G. Conti, A.M. Mega, A. Gasparetto; Noninvasive measurement of forearm blood flow and oxygen consumption by near-infrared spectroscopy, *J. Appl. Physiol.*, **73**, 1388-1393 (1994)
- 2) Decety, J., M. Jeannerod, D. Durozard, G. Baverel; Central activation of autonomic effectors during mental simulation of motor action in man, *J. Physiol.*, **461**, 549-563 (1993)
- 3) Freyschuss, U., P. Hjemdahl, A. Juhlin-Dannfeld, B. Linde; Cardiovascular and sympathoadrenal responses to mental stress: influence of β -blockade, *Am. J. Physiol.*, **255**, H1433-H1451 (1988)
- 4) Gandevia, S.C., K. Killiam, D.K. McKenzie, M. Crawford, G. M. Allen, R.B. Gorman, J.P. Hales; Respiratory sensations, cardiovascular control, kinaesthesia and transcranial stimulation during paralysis in humans, *J. Physiol.*, **470**, 85-107 (1993)
- 5) Halliwill, J.R., L.A. Lawler, T.J. Eickhoff, N. M. Diets, L.A. Nauss, M.J. Joyner; Forearm sympathetic withdrawal and vasodilatation during mental stress in humans, *J. Physiol.*, **504**, 211-220 (1997)
- 6) 松川寛二; 意識下行動時の交感神経活動と予測性, 循環器科, **39**, 321-329 (1996)
- 7) McArdle, W.D., G.F. Foglia, A.V. Patti; Telemetered cardiac response to selected running events, *J. Appl. Physiol.*, **23**, 566-570 (1967)
- 8) Mitchell, J.H.; Neural control of the circulation during exercise, *Med. Sci. Sports Exercise*, **22**, 141-154 (1990)
- 9) Sadamoto, T. and K. Matsukawa; Cardiovascular responses during spontaneous overground locomotion in freely moving decerebrate cats, *J. Appl. Physiol.*, **83**, 1451-1460 (1997)
- 10) Wuyman, B., S.H. Moosavi, J. Decety, L. Adams, R.W. Lansing, A. Guz; Imagination of dynamic exercise produced ventilatory responses which were more apparent in competitive sportsmen, *J. Physiol.*, **482**, 713-724 (1995)