

腕運動における非定常状態の ガス交換応答動態

神戸芸術工科大学 古賀俊策

Gas Exchange Kinetics During Arm Exercise

by

Shunsaku Koga

*Department of Physical Education and Ergonomics
Kobe Design University, Kobe, Japan*

ABSTRACT

At equivalent power output and oxygen uptake, the heart rate in the arm cranking is higher than that in leg cycling but the stroke volume in the arm cranking is lower than that of the leg cycling. However, little is known for the transient changes of these parameters. In particular, there are few data on the early transient changes (phase I) in oxygen uptake (\dot{V}_{O_2}) and heart rate (HR) and the relationship between the kinetics of these parameters and work rate in the arm cranking. Since the arm exercise at steady state decreases venous return and increases anaerobic glycolytic response, it is considered that an increase in \dot{V}_{O_2} in phase I of the arm exercise would be small and that of the phase II would prolong.

To test this hypothesis, the time dependent change in \dot{V}_{O_2} and HR were measured when the intensity of the arm cranking was increased from rest to the constant work (25, 37 and 50) and it was compared to those in the leg exercise. Gas exchange and HR were measured breath by breath in 5 male subjects. The increase in \dot{V}_{O_2} and HR in the phase I of the arm cranking and leg cycling had good cor-

relation with work rate. The increase in \dot{V}_{O_2} in the phase I of the arm exercise was lower than that of the leg exercise, suggesting that the immediate adjustment of cardiac output to the arm exercise was impaired. The significant difference of \dot{V}_{O_2} response in phase I to different types of exercise may reflect the difference of the rate and volume of venous return which due to the muscle exercised, the different degree of vasoconstriction and the effect of higher intrathoracic pressure. An increase in HR in the arm exercise was higher than that in the leg exercise and this suggested that an increase in \dot{V}_{O_2}/HR in this phase of the arm exercise was lower than that of the leg exercise. The results indicate that an increase in the stroke volume of the arm exercise might be attenuated. The kinetics of \dot{V}_{O_2} response in the arm exercise prolonged compared to that in the leg exercise at the same work rate.

The difference might be explained by a decreased venous return and higher anaerobic glycolysis which occurs early stage of the arm exercise associated with isometric exercise and a greater recruitment of fast twitch motor units. These findings provide useful information to explain the kinetics of gas exchange in arm exercise.

要 旨

腕運動における非定常状態のガス交換応答動態の研究は数少ない。腕運動の定常状態では脚運動のそれに比べて静脈還流が阻害され乳酸量もより高いことから、第1相および第2相の応答動態に差異が生じると予想された。この仮説を検証するために、5人の被験者による腕クランキング(25, 37, 50 W)と脚ペダリングの運動(25, 50, 150 W)および $\dot{V}_{O_{2max}}$ 50%の強度による運動を行った。

プレス・バイ・プレスによる肺胞ガス交換測定と心拍数(HR)の測定を数回反復した。安静時から第1相にいたる \dot{V}_{O_2} の増加はすべての負荷強度で腕運動の方がより低くなった。第1相では腕

運動のより高いHRが認められ、心拍出量と一回拍出量の増加制限が示唆された。 \dot{V}_{O_2} の平均応答時間(MRT)は腕運動において各負荷強度でより大きくなったが、同一の相対負荷強度では有意な差は生じなかった。以上の結果から、第1相と第2相の \dot{V}_{O_2} および循環系の応答動態は脚運動のそれに比べて阻害されると考えられた。

緒 言

足が不自由で車椅子生活をしている人達の運動不足解消の指標あるいはボート、カヤックなどのトレーニング処方を検討するためにこれまで腕運動における定常状態の生体応答が調べられてきた。しかし、日常生活やスポーツ等における身体活動は、その強度、期間、リズム、パターンなど

が時間とともに複雑に変化し、生体反応は必ずしも定常的であるとは限らず、むしろ非定常的であることが多い。したがって、非定常状態における過渡特性を調べるために breath-by-breath 法によるガス交換動態の測定が実施されてきたが、腕運動におけるガス交換応答動態を調べた研究は少ない。

腕運動では脚運動に比べて循環応答が異なり^{2,5,16)}、乳酸量もより高いことが報告されているので^{5,6,14)}、非定常状態におけるガス交換動態にも差異が生じると予想される。とくに、腕運動の定常状態では脚運動のそれに比べて静脈還流の阻害による血流制限と無酸素的解糖反応の増加が生じることから、第1相および第2相の応答動態に制限がみられると予想される。腕運動におけるガス交換応答の非定常状態の特性を詳細に検討することは、車椅子の人や健康人の日常的な身体活動における生体応答の正しい評価や健康増進にとっても必要である。本研究の目的は腕運動の非定常状態におけるガス交換応答動態を検討することである。

1. 方 法

成人男子5名を被験者として自転車エルゴメータ(コンビ社製, Model 50)による椅座位姿勢での腕クランキングおよび脚ペダリングの運動負荷実験を実施した。腕運動実験ではエルゴメータのクランキングの軸は被験者の肩の高さに調節した。

毎分30 W(ワット)ずつ疲憊に至るまで負荷強度が増加するランプ負荷によって酸素摂取量($\dot{V}O_2$)の最高値(Peak $\dot{V}O_2$, または $\dot{V}O_{2max}$)と換気・ガス交換諸量より無酸素性作業閾値(AT)を求めた¹⁸⁾。5分間の安静後に、5分間の一定強度負荷(腕運動25, 37, 50 W, 脚運動25, 50, 150 W)を課すテストを負荷強度とガス交換変動の程度(ノイズ)に応じて4~8回反復した¹¹⁾。

さらに、 $\dot{V}O_{2max}$ 50%の等しい相対的負荷強度で両者の運動様式におけるガス交換動態を比較するために、脚運動で平均100 Wの負荷強度実験も加えた。安静時のガス交換データを測定した後、被験者は呼気の終了時に運動を開始した。運動を開始する時点でのエルゴメータのフライホイールの慣性に対して、運動前から実験補助者がフライホイールを回転させ、運動開始の時点に同期して、被験者はペダリングを開始した。

被験者は吸気量と呼気量を測定するために呼吸バルブ(Hans Rudolph, 2700)の吸気側と呼気側にそれぞれつけられたニューモタコグラフ(Dynascience, No. 3)を介して呼吸した。呼吸気ガスの濃度はマウスピースの近傍から連続的にサンプルされて、質量分析計(Marquette, MGA-1100)で分析された。呼吸信号と心電図の信号はADコンバータ(カノープス, Analog Pro I)によってコンピュータ(日本電気, PC-9801 VM 2)に取り込まれた。肺泡レベルにおけるプレス・バイ・プレスのガス交換諸量を推定し^{1,7,9)}、HRは一拍動ごとに測定した。

各被験者の応答データを1秒間隔値に補間した後、1秒間隔値の標準偏差値の3倍以上を除く平滑化処理を施した¹¹⁾。ガス交換動態と心拍数の動態の近似計算には1秒間隔値を反復テストによって平均した平均応答値を用いた¹⁹⁾。運動開始直後にガス交換値が急激に増加する期間(約15~20秒)を第1相とし、この期間における応答データの平均値を第1相の値とした。

つぎに、定常状態(第3相)に至るまでの非定常状態を第2相とした。今回の研究では、定常状態に到達するまでの相対的な応答時間を平均応答時間(MRT)として求めた¹⁵⁾。MRTは運動開始時点から終了時点まで一次指数曲線を当てはめた近似計算による時定数を計算して得られた。時定数は非線形最小二乗法によって求め⁸⁾、同様の手

法を HR , \dot{V}_{O_2}/HR (酸素脈) の計算に用いた。腕運動と脚運動における応答動態の比較には t 検定を用い、有意差を 5% 水準で検討した。また、応答動態の値は平均値で示した。

2. 結 果

2.1 ランプ負荷運動に対する応答

表 1 に腕および脚ランプ負荷運動において求められた最大負荷強度, $\dot{V}_{O_{2max}}$ (Peak \dot{V}_{O_2}), VT (換気閾値) を示した。腕運動における最大負荷強度は脚運動の値の 43.4% (平均) を示した。 $\dot{V}_{O_{2max}}$ は腕運動において脚運動の 54.8% を示し、腕運動の VT は脚運動の 55.0% を示した。

図 1 には 1 人の被験者における \dot{V}_{O_2} の応答動

態を負荷強度別にプロットしたものを示してある。また図 2 には、同じ被験者の 50 W における \dot{V}_{O_2} の応答動態を腕運動と脚運動に分けてプロットした。

2.2 第 1 相の応答動態

腕運動における \dot{V}_{O_2} の第 1 相の増加は、脚運動におけるそれよりも低かった (図 3)。この傾向はすべての負荷強度において認められ、安静時から第 1 相への増加率の平均は腕運動では 47.5% (25 W), 54.9% (37 W), 72.3% (50 W) であり、脚運動ではおのおのの負荷強度で 63.9% (25 W), 79.4% (50 W), 120.9% (150 W) であった。さらに、 $\dot{V}_{O_{2max}}$ 50% の相対負荷強度においても腕運動での値がより低かった。

表 1 Characteristics of subjects.

Subj. No.	Age (yr)	Peak \dot{V}_{O_2} (l/min)		Highest Work (Rate, W)		VT (l/min)	
		Arm	Leg	Arm	Leg	Arm	Leg
1	29	1,764	3,151	124	295	949	1,895
2	40	1,641	3,508	110	290	1,013	2,000
3	20	1,546	3,070	112	233	972	1,915
4	20	1,418	1,982	101	199	842	1,111
5	23	1,543	2,729	102	250	893	1,564

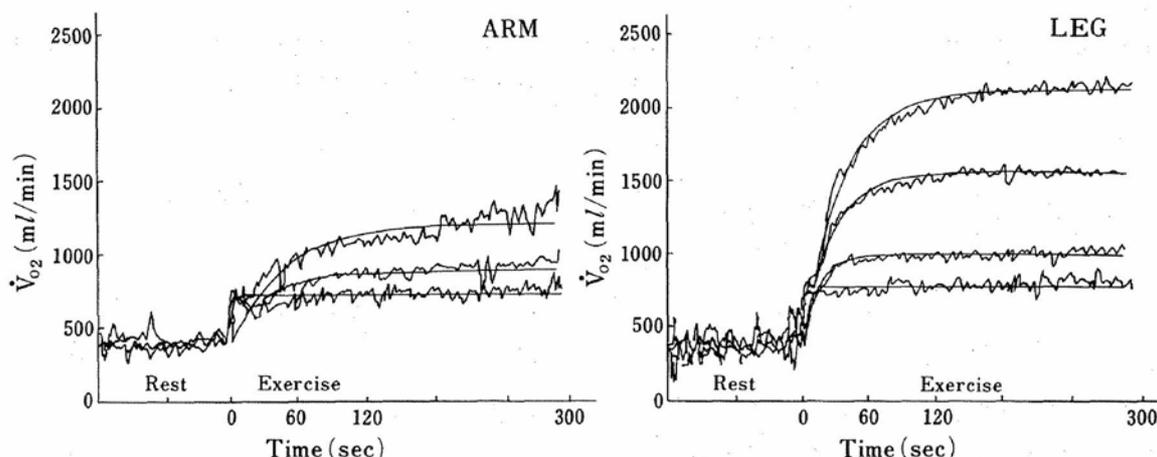


図 1 The \dot{V}_{O_2} responses of one representative subject to the different work rates in arm and leg exercise. The best-fit exponential curves are also shown for each work rate

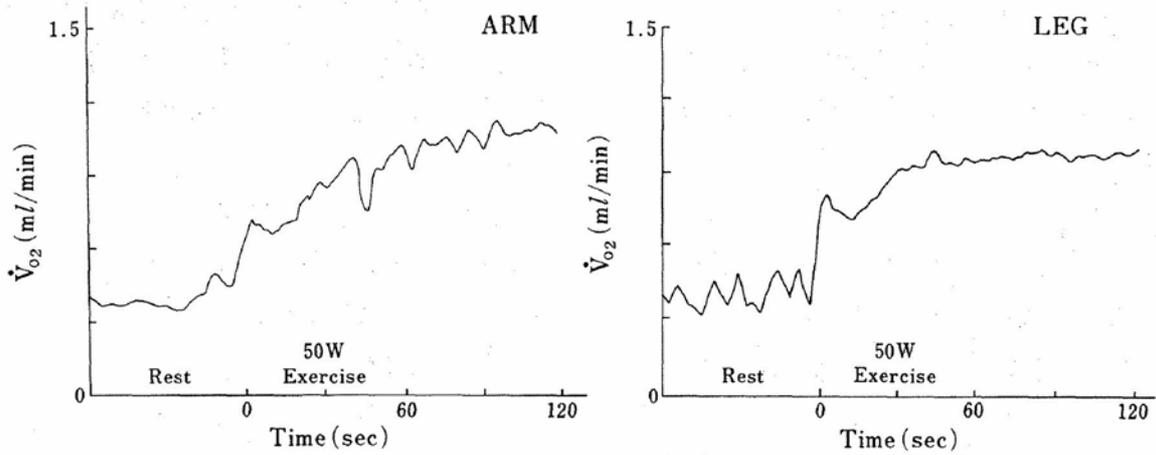


図2 Breath-by-breath \dot{V}_{O_2} from rest to 50 W exercise transition of arm and leg exercise in a single subject. The increase in \dot{V}_{O_2} during phase I and II was markedly less in the arm than in the leg exercise

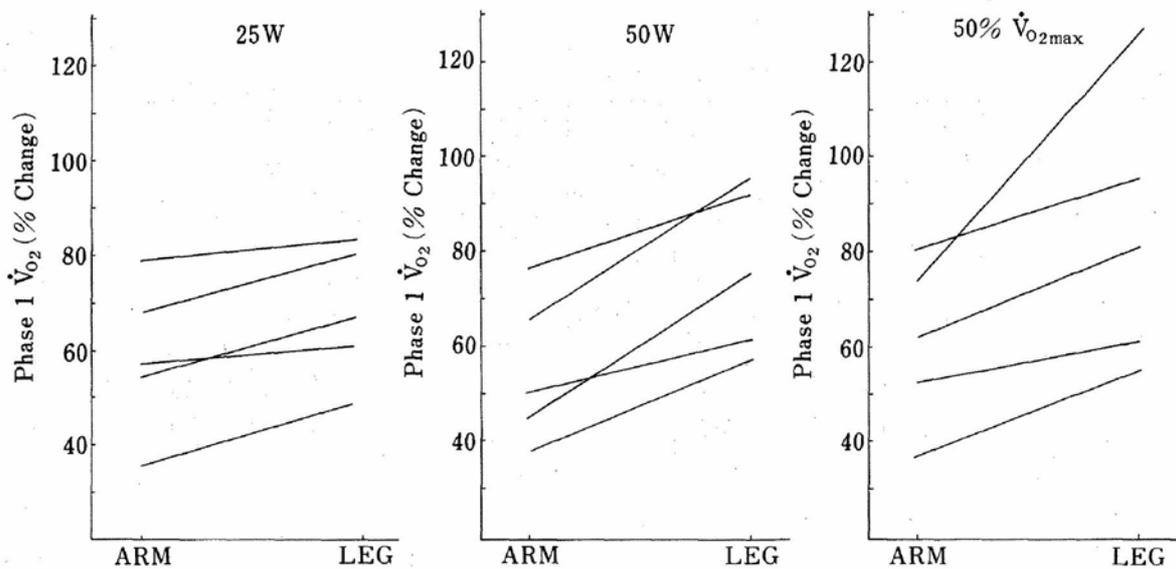


図3 Comparison of the phase I increases of \dot{V}_{O_2} for arm and leg exercise. The phase I increases above resting values for \dot{V}_{O_2} in arm exercise were lower than those in leg exercise

\dot{V}_{O_2} の第1相の応答は両者の運動様式において負荷強度の増加とともに増加した。しかし、負荷強度に対する \dot{V}_{O_2} の増加率は運動終了時の第3相の値に比べて第1相の値の方が低かった。

第1相における HR の増加は、腕運動時の値が脚運動時のそれよりも大きく (図4)、腕運動では平均値で 12 拍/分 (25 W)、16 拍/分 (37 W)、18 拍/分 (50 W) であり、脚運動ではそれぞれの

負荷強度で、8、11、15 拍/分であった。負荷強度の増加に対する HR の増加率は \dot{V}_{O_2} と同様、第3相の値に比べて第1相の値の方がより低いことが示された。 $\dot{V}_{O_{2max}}$ 50% の負荷強度では運動様式の間には有意な差はみられなかった。

\dot{V}_{O_2}/HR (O_2 pulse, 酸素脈) は第1相において、腕運動における値が脚運動における値よりも低く (図5)、安静値以上の増加量は腕運動で 29

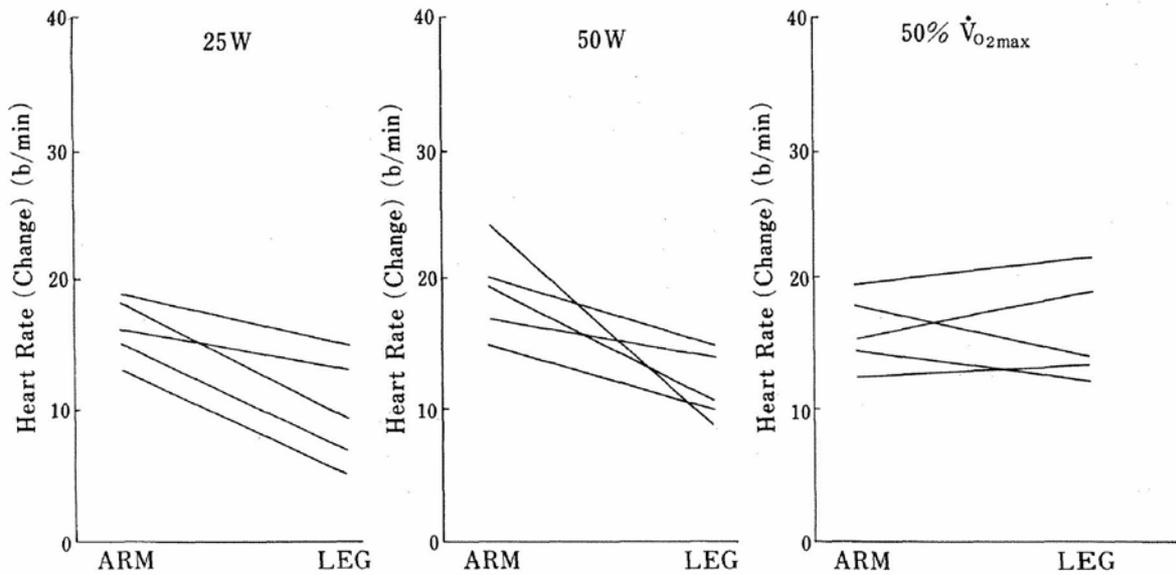


図4 Comparison of the phase I increases of HR for arm and leg exercise. The phase I increases of HR in arm exercise were higher than those in leg exercise

ml/拍 (25 W), 36 ml/拍 (37 W), 43 ml/拍 (50 W) であり, 脚運動では各負荷強度で 45, 57, 77 ml/拍であった. 負荷強度の増加に対する \dot{V}_{O_2}/HR の増加率は, \dot{V}_{O_2} , HR と同様の傾向がみられた.

2.3 第2相の応答動態 (平均応答時間)

図6には一次指数曲線の近似から求められた \dot{V}_{O_2} の MRT を示した.

\dot{V}_{O_2} の MRT は腕運動における値が脚運動における値よりも大きく, 平均値として, 腕運動では 32.5 秒 (25 W), 45.2 秒 (37 W), 47.9 秒 (50 W) に対して, 脚運動ではそれぞれの負荷強度において 22.3, 31.7, 40.8 秒であった. しかし, \dot{V}_{O_2max} 50% の相対負荷強度では, 両者の運動の間には MRT の有意な差はなかった.

負荷強度の増加にともなって MRT は運動様式にかかわらず増加し, 負荷強度に対する MRT の非線形性が示された.

HR の MRT は両方の運動様式において負荷強度の増加に比例して増加したが, 腕運動と脚運動の間には有意な差がみられなかった.

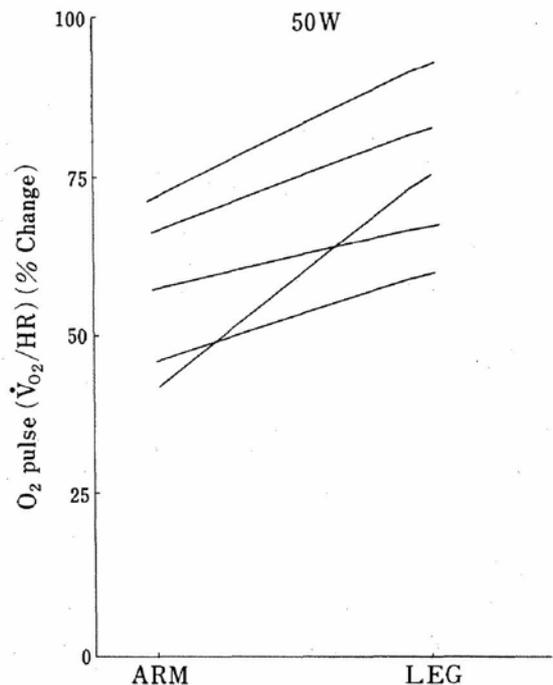


図5 Relative increases above resting values of O_2 pulse (\dot{V}_{O_2}/HR) for arm and leg exercise. O_2 pulse increases in this phase were lower during arm exercise.

\dot{V}_{O_2}/HR の MRT は腕運動のそれが脚運動のそれよりも大きいことが示された. 負荷強度との

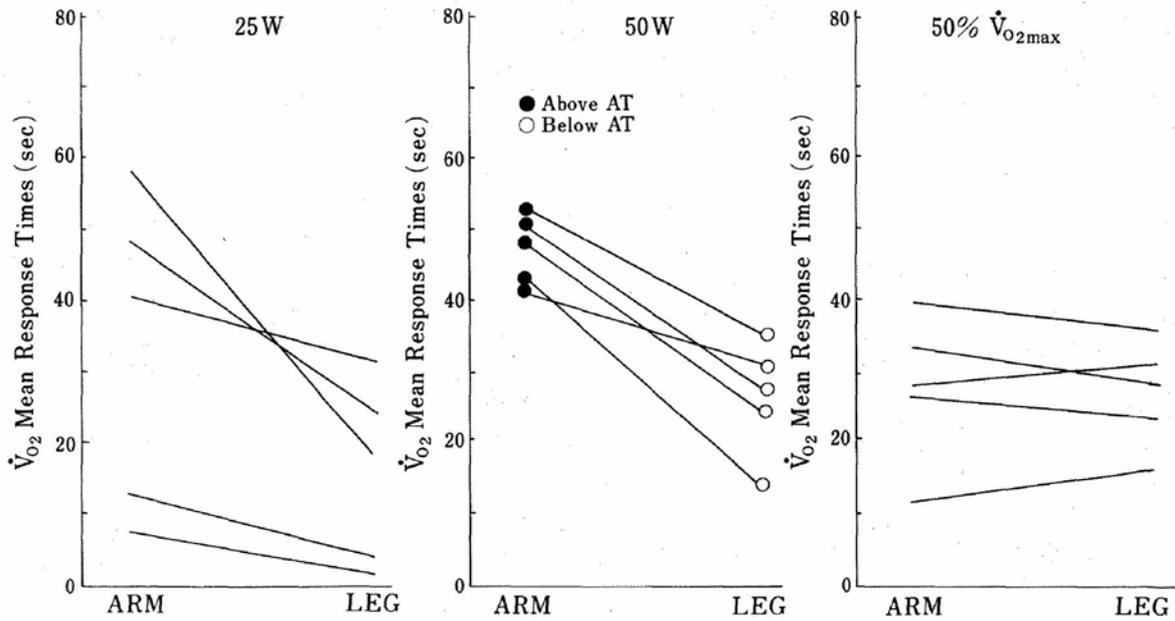


図6 Mean response times for \dot{V}_{O_2} at each of the work rates for arm and leg exercise. The second phase of \dot{V}_{O_2} response kinetics was prolonged during arm exercise compared with leg exercise at work rates of 25 W and 50 W

関係において、脚運動では 50 W 以上の負荷強度においては \dot{V}_{O_2}/HR の MRT はほとんど変化しなかった。一方、腕運動では \dot{V}_{O_2}/HR の MRT は負荷強度に比例して増加する傾向を示した。

3. 考 察

3.1 第1相の応答動態

腕運動における \dot{V}_{O_2} の第1相の増加は、脚運動におけるそれよりも低いことが示されたが、cardiodynamic 仮説¹⁷⁾にしたがえば第1相における腕運動時の心拍出量 (\dot{Q}) の増加が脚運動のそれに比べて低いことが示唆される。従来から研究の対象とされてきた脚運動の開始直後約 15 ~ 20 秒間では、動静脈の酸素量較差 ($C(a-v)O_2$) がほとんど変化しないことから、第1相における \dot{V}_{O_2} の増加は \dot{Q} の増加によって生じるという説が cardiodynamic 仮説である。

近年、Casaburi たち⁴⁾によって、脚運動開始直

後の第1相においても、混合静脈血の O_2 飽和度が低下することが明らかにされたが、 \dot{V}_{O_2} の変化に対するその寄与の割合は約 35% と計算された。したがって第1相の \dot{V}_{O_2} の応答動態に対して \dot{Q} の動態が及ぼす影響は大きいものと思われる。腕運動と脚運動における第1相の \dot{V}_{O_2} の有意な違いを循環系の要因から考察した場合、第一に静脈還流量の違いが考えられる。腕クランキングによる運動様式はグリップやハンドルを把握する動作に静的筋収縮が含まれるため、筋肉ポンプの活動が低下し、静脈還流量の促進が阻害されると考えられる^{2, 10, 16)}。また腕運動時においては、血管収縮作用および胸腔内圧が脚運動時よりも増加するため、静脈還流量の増加が抑えられ、 \dot{Q} の動態に影響が生じると考えられる。

第1相の \dot{V}_{O_2} の応答と負荷強度の関係については、運動様式にかかわらず負荷強度の増加とともに第1相の値も増加した。しかし、絶対的負荷

強度 (W) と相対的負荷強度 ($\% \dot{V}_{O_2 \max}$) を等しくした場合でも、腕運動における第1相の \dot{V}_{O_2} の増加がより低いことは \dot{V}_{O_2} の定常状態に到達する上で第2相における増加への依存が高いことを示している。

第1相における HR の増加は、腕運動時の値が脚運動時のそれよりも大きく、この傾向はすべての負荷強度において示された。したがって \dot{V}_{O_2} / HR はこの期間において腕運動ではより低い値を示した。前述の cardiodynamic 仮説にしたがえば第1相の \dot{V}_{O_2} / HR の応答動態は、一回拍出量 (SV) の応答動態を示唆すると考えられる。以上のことから、第1相の SV の増加は脚運動に比べて腕運動でより低く、その原因として前述のように静脈還流の阻害が考えられる。

第1相における \dot{V}_{O_2} の増加は \dot{Q} の増加の他に安静時における静脈血の貯留特性によっても影響を受ける¹⁵⁾。とくに腕筋群と脚筋群では静脈血流量が異なり、また非活動筋における血管運動作用も異なるので、これらの点については今後の検討を要する。

3.2 第2相の応答動態 (平均応答時間)

\dot{V}_{O_2} の MRT は腕運動における値が脚運動における値よりも大きく、この傾向は各負荷強度において認められた。腕運動では第1相の \dot{V}_{O_2} の増加が低いため、第2相における \dot{V}_{O_2} の増加による調節が必要となる。しかし、第2相においても \dot{V}_{O_2} の応答が脚運動のそれよりも遅く、腕運動の第2相における酸素不足量は脚運動のそれよりも多い。

脚運動における従来の研究においても、無酸素性作業閾値 (AT) 以上の負荷強度における MRT は AT 以下の負荷強度における MRT よりも大きいことが指摘されている^{3, 15)}。さらに、腕運動においては AT よりも低い負荷強度で運動開始直後に過渡的な乳酸量の増加が生じ \dot{V}_{O_2} の応答を遅らせることが報告された⁶⁾。

腕運動における \dot{V}_{O_2} の応答遅れの代謝系要因としては、速筋線維の比率が脚筋群よりも高いことや、等尺性筋収縮をとまなう腕運動では速筋線維の動員比率が高いことが考えられる。

腕運動における \dot{V}_{O_2} の MRT がより大きい理由として、この他に循環系の要因も考えられる。HR の MRT は両方の運動様式において負荷強度の増加に比例して増加したが、腕運動と脚運動の間には有意な差がみられなかった。脚運動においては、SV は第1相で急激に増加し¹³⁾、第2相ではほとんど増加せず定常状態に達することから、第2相の \dot{Q} の応答動態は HR のそれと近似する。

腕運動においては、第1相および第2相の \dot{Q} と SV の応答動態に関する研究がなされておらず、第2相における \dot{Q} と HR の近似の有無を論ずることは出来ない。しかし、第1相では腕運動の \dot{V}_{O_2} / HR の増加がより低いことから、第2相でも SV が増加し続けることも考えられる。

\dot{V}_{O_2} / HR の MRT は腕運動のそれが脚運動のそれよりも大きいことが示された。脚運動では第2相の SV がほとんど変化しないことから、第2相の \dot{V}_{O_2} / HR の動態は $C(a-\bar{v})O_2$ の動態をあらわすと考えられている¹⁵⁾。今回の研究では、脚運動の \dot{V}_{O_2} / HR の MRT は 50 W 以上の負荷強度ではほとんど同じであり、Sietsema たちの結果¹⁵⁾と一致する。腕運動では \dot{V}_{O_2} / HR の MRT は負荷強度に比例して増加する傾向を示した。したがって腕運動の第2相では、SV の増加とともに $C(a-\bar{v})O_2$ の増加が同時に生じ、負荷強度に比例して、両者の応答遅れが著しくなると考えられる。このように、腕運動の第2相においては、第1相と同様、静脈還流量の増加制限による循環動態への影響が、 \dot{V}_{O_2} の応答動態にも大きく反映されている。

相対的負荷強度を等しくした場合、両者の運動様式の間には \dot{V}_{O_2} 、HR、 \dot{V}_{O_2} / HR それぞれの MRT に有意な差を生じなかった。この結果は先

行研究の結果⁵⁾と一致するものであり、相対的強度を等しくかつ AT 以下に設定した場合、第 2 相の応答動態に差がないことを示している。

\dot{V}_{O_2} の MRT は負荷強度の増加にともなって運動様式にかかわらず増加した。従来、脚運動では負荷強度の変化に対する \dot{V}_{O_2} の MRT や時定数の変動が論議されており^{3,12,17)}、AT 以上の負荷強度では \dot{V}_{O_2} drift のために MRT が増加し、非線形性の応答が生じる³⁾。腕運動においては本研究の結果と同様に、負荷強度の増加にともなって V_{O_2} の half time (第 3 相の値の 50% に到達するまでの時間) が増加することが指摘されている⁶⁾。

第 2 相の \dot{V}_{O_2} 応答動態を示すパラメータとしては、第 1 相の終了時点から第 2 相期間まで一次指数曲線を近似させ時定数を求める方法が一般的である。しかし、第 1 相を含めて近似した MRT の値と第 2 相時定数の間にはほとんど差がないという報告³⁾がある。また、AT 以上の負荷強度では \dot{V}_{O_2} drift が生じることから、異なる負荷強度および異なる運動様式の間で相対的な応答時間を求めるためには MRT を用いても差しつかえないと考えられる。

む す び

結論として、腕運動における非定常状態つまり、第 1 相と第 2 相の \dot{V}_{O_2} および循環系の応答動態は脚運動のそれに比較して阻害される傾向を示した。このことは定常状態における腕運動の応答に関する研究報告に基づいた今回の研究仮説に一致した。本研究の結果は車椅子の人や健康人の日常的な身体活動における生体応答の正しい評価や健康増進にとって必要であり、かつ意義の大きいことと考えられる。

謝 辞

本研究の共同研究者として神戸大学教育学部保健体育科 近藤徳彦先生および同大学院 島名孝

次氏を追記したい。両氏には実験の補助、測定データの分析および考察に多大の援助を賜った。ここに感謝の意を表します。

文 献

- 1) Beaver, W. L., Lamarra, N., Wasserman, K.; Breath-by-breath measurement of true alveolar gas exchange, *J. Appl. Physiol., Respirat. Environ. Exercise Physiol.*, 51 (6) 1662-1675 (1981)
- 2) Bevegard, S., Freyschuss, U., Strandell, T.; Circulatory adaptation to arm and leg exercise in supine and sitting position, *J. Appl. Physiol.*, 21 (1) 37-46 (1966)
- 3) Casaburi, R., Barstow, T. J., Robinson, T., Wasserman, K.; Influence of work rate on ventilatory and gas exchange kinetics, *J. Appl. Physiol.*, 67 (2) 547-555 (1989)
- 4) Casaburi, R., Daly, J., Hansen, J., Effros, R.; Abrupt changes in mixed venous blood gas composition after the onset of exercise, *J. Appl. Physiol.*, 67 (3) 1106-1112 (1989)
- 5) Cerretelli, P., Shindell, D., Pendergast, D. P., diPrampo, P. E., Rennie ; D. W., Oxygen uptake transients at the onset and offset of arm and leg work, *Respiration Physiology*, 30, 81-97 (1977)
- 6) Cerretelli, P., Pendergast, D., Paganelli, W. C., Rennie, D. W.; Effects of specific muscle training on the V_{O_2} on-response and early blood lactate, *J. Appl. Physiol., Respirat. Environ. Exercise Physiol.*, 47 (4) 761-769 (1979)
- 7) 古賀俊策, 対馬清造, 高橋恒雄, 池上晴夫; Breath-by-breath による肺胞ガス交換推定法, *Annals Physiol. Anthropol.*, 6 (1) 25-30 (1987)
- 8) 古賀俊策, 池上晴夫; 運動時のガス交換動態パラメータの推定における問題点, 第 3 回生体・生理工学シンポジウム論文集, 35-38 (1988)
- 9) 古賀俊策, 対馬清造, 高橋恒雄, 池上晴夫; Breath-by-breath 法による口腔と肺胞における運動時ガス交換動態の相違, *体力科学*, 38 (4) 151-164 (1989)
- 10) Koga, S. Kondo, N ; Gas exchange kinetics during arm exercise, Oxford Conference, 5th Meeting on Control of Breathing and its Modelling Perspective. (1991)
- 11) Lamarra, N. Whipp, B. J., Ward, S. A., Wasserman, K.; Effect of interbreath fluctuations

- on characterizing exercise gas exchange kinetics, *J. Appl. Physiol.*, **62** (5) 2003-2012 (1987)
- 12) Linnarsson, D.; Dynamics of pulmonary gas exchange and heart rate changes at start and end of exercise, *Acta Physiol. Scand. Suppl.*, **415**, 1-68 (1974)
 - 13) Loeppky, J. A., Greene, E. R., Hoekenga, D. E., Caprihan, A., U. C. Luft.; Beat-by-beat stroke volume assessment by pulsed Doppler in upright and supine exercise, *J. Appl. Physiol., Respirat. Environ. Exercise Physiol.*, **50**, 1173-1182 (1981)
 - 14) Pendergast, D., Cerretelli, P., Rennie, D. W.; Aerobic and glycolytic metabolism in arm exercise, *J. Appl. Physiol., Respirat. Environ. Exercise Physiol.*, **47** (4) 754-760 (1979)
 - 15) Sietsema, K. E., Daly, J. A., Wasserman, K.; Early dynamics of O₂ uptake and heart rate as affected by exercise work rate, *J. Appl. Physiol., Respirat. Environ. Exercise Physiol.*, **67** (6) 2535-2541 (1989)
 - 16) Stenberg, J., Astrand, P. O., Ekblom, B., Royce, J., Saltin, B., Hemodynamic response to work with different muscle groups, sitting and supine, *J. Appl. Physiol.*, **22** (1) 61-70 (1967)
 - 17) Wasserman, K., Hansen, J. H., Sue, D. Y., Whipp, B. J.; Principles of exercise testing and interpretation, Lea and Febiger, Philadelphia, 40-41 (1987)
 - 18) Whipp, B. J., Davis, J. A., Torres, F. Wasserman, K.; A test to determine parameters of aerobic function during exercise, *J. Appl. Physiol., Respirat. Environ. Exercise Physiol.*, **50** (1) 217-221 (1981)
 - 19) Whipp, B. J., Ward, S. A., Lamarra, N., Davis, J. A., Wasserman, K.; Parameters of ventilatory and gas exchange dynamics during exercise, *J. Appl. Physiol., Respirat. Environ. Exercise Physiol.*, **52** (6) 1506-1513 (1982)