

脊髄損傷者のレース用車椅子走行における生理学的応答

高木 聡子

PHYSIOLOGICAL RESPONSES DURING PUSHING OF A RACING-WHEELCHAIR
IN ATHLETES WITH SPINAL CORD INJURY

SATOKO TAKAGI

Abstract

The purpose of this study was to investigate the physiological responses during pushing of a racing-wheelchair. Five subjects with spinal cord injury (T4~L1) participated in two experiments. In the first experiment, the subjects pushed a racing-wheelchair mounted on a roller. Pulmonary ventilation ($\dot{V}E$), oxygen uptake ($\dot{V}O_2$), heart rate (HR), blood lactate concentration (LA), and rating of perceived exertion (RPE) were measured to examine the physiological responses during submaximal and maximal tests of wheelchair exercise. The mean value of $\% \dot{V}O_{2max}$ at ventilatory threshold (VT) was $60.7 \pm 5.3\%$. $\dot{V}O_2$ increased curvilinearly with speed, and HR increased with speed, forming an S-shape. HR increased linearly with increasing $\dot{V}O_2$ before the VT, then showed a steeper parabolic rise to almost maximum, followed by a flat phase. In the second experiment, during 1500-m and 5000-m wheelchair races and a half-marathon, $\dot{V}E$, $\dot{V}O_2$, and HR were measured to reveal the physiological characteristics of wheelchair racing as a competitive sport. During the 1500-m and 5000-m races by four subjects, the mean values of $\% \dot{V}O_{2max}$ were $73.1 \pm 7.3\%$ and $66.0 \pm 13.3\%$, respectively. During the half-marathon by one subject, $\% \dot{V}O_{2max}$ reached 72.1%. These data suggest that wheelchair endurance athletes compete at very high intensity (over VT level) in wheelchair races.

(Jpn. J. Phys. Fitness Sports Med. 1998, 47: 73~86)

key words: spinal cord injury, racing-wheelchair, wheelchair endurance athlete, ventilatory threshold, maximal exercise

I. 緒 言

医学の発達により、現在では脊髄損傷者の寿命が延び、人生を楽しむため、また健康を維持するために車椅子スポーツが盛んになってきている。車椅子マラソンも最初は普段用車椅子を用いてのもので、記録も現在の最高レベルの2倍近くのタイムであったが、レース用車椅子の性能と選手の競技力向上のため、現在では日本においてもプロ選手がでてくるようになった。車椅子スポーツの盛んなアメリカでは車椅子レースのためのキャンプが開催されており、車椅子の調整の仕方やレースの作戦などを一流選手がコーチしている³⁰⁾。そういった中で、運動が車椅子生活者に与える影響について多くの研究がなされるようになり、肥満や成人病予防のために、代謝系、呼吸器系、循

環器系の機能評価としての運動負荷テストも普及しつつある。最大運動時の生理学的応答やそのトレーニング効果に関する報告もいくつかあり^{10, 14, 24)}、車椅子生活者の1日のエネルギー消費量についての報告もある²³⁾。その一方で、車椅子スポーツを行う選手の競技力向上のための研究調査は数少ない。日本では大分国際車椅子マラソンが国際大会として開催され16年が経過しているが、その大会成績と選手の持久性能力との関係は明らかでなく、タイムと最大酸素摂取量などには関係がみられず、上肢長、肺活量には有意な相関があったという報告がされている³¹⁾。最近では、車椅子5分間走の平均速度と車椅子マラソンのタイムに有意な相関があったとの報告もある³⁶⁾。また、レース用車椅子走行中の筋電図測定により、その結果を車椅子マラソンのトレーニングとして

の筋力トレーニングに活用した事例も報告されており⁵²⁾, フォーム分析の重要性も指摘されている^{31,36)}. 生理学的実験としては車椅子レース中の心拍数測定も行われているが³⁵⁾, それをどのようにトレーニングに活用したらよいかは今後の課題となるだろう. 車椅子での1500 m 走において, 平均速度と PWC₁₇₀ および PWC₁₈₀ に有意な相関があったが, 5000 m 走では相関がなく, PWC_{75% HRmax} とは1500 m 走, 5000 m 走ともに相関がなかったとの報告がある³⁷⁾. 健常者の持久性競技においては, 特にランニングでは, 競技成績と様々な生理学的指標との関係について数多くの報告があり^{7,13,28,39,43~45)}, ボートやカヌーでは, その競技特性と持久性能力との関わりについて研究されている^{34,38,46)}. しかし車椅子マラソンにおいては, 競技成績とどのような生理学的指標が関係しているのかが明らかでないというだけでなく, レース用車椅子走行中の生理学的応答についての報告も数少ない^{11,27,35)}.

本研究では, まず第一の実験として, レース用車椅子での走行における, 脊髄損傷者の最大運動時と換気性作業閾値 (VT) での生理学的応答を知るために, ローラー上で漸増運動負荷テストを行い, 換気量 ($\dot{V}E$), 酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$), 心拍数 (HR), 血中乳酸濃度 (LA), 主観的運動強度 (RPE) を測定した. そして, 最大下でのいくつかの固定速度における走行を行い, 速度に対する生理学的応答や, 測定項目間関係をみた. 次に, 第二の実験として, トラックやロードでのレース用車椅子走

行 (1500 m 走, 5000 m 走, ハーフマラソン) 中の $\dot{V}E$, $\dot{V}O_2$, HR を測定し, その競技としての特徴を探る試みを行った. このふたつの実験により, レース用車椅子走行の際の生理学的特徴を知り, 車椅子レースに有効なトレーニングを行うためのデータを収集することを本研究の目的とする.

II. 方 法

A. ローラー上の走行での測定

1. 対 象

対象は脊髄損傷者 (T4~L1) 男性5名で, 平均年齢 29.4 ± 3.8 歳, 車椅子生活 6.0 ± 0.7 年, 車椅子マラソン歴 1.6 ± 1.5 年のレクリエーションランナーである. 対照として, 車椅子マラソンの関係者で車椅子操作にある程度慣れている23歳の健常男性1名についての測定を行った (表1). 測定の際に, すべての対象者に本研究の目的, 内容を説明し, 実験への参加の同意を得た.

2. 運動内容

1) 漸増運動負荷テストの実施: トレーニング用車椅子ローラー9-9C (チャンピオン, 大阪) の上に対象者各々のレース用車椅子を固定した. この際, 実走時と似た抵抗になるよう対象者が普段のトレーニング時に工夫している点を取り入れて設置した. 車椅子の重量や大車輪のサイズは表1に示した. 3分間安静の後, 速度 5.0 km/h から始めて, 3分ごとに 5.0 km/h ずつ漸増した. 車椅子にはタイヤ回転数をセンサーでカウントし速度を算出する速度計が付いており, 対象者はそれ

Table 1. Personal data concerning the subjects.

	Age (years)	Level of Lesion	Years in Wheelchair	Years of Racing	Height (cm)	Weight (kg)	Arm Length (cm)	Skinfolds (mm)		Weight of Wheelchair (kg)	Size of Wheel (inch)
								Tricep	Subscapular		
KB	28	L1	7	0.5	170	52	77.3	5	15	8.0	26
KS	34	T6	6	4	168	54	72.8	4.5	8.5	8.4	26
MT	24	T4	6	1	170	47	74.8	3	6	8.0	27
OD	29	T11	6	0.5	172	52	74.5	4.5	9	6.5	26
TN	32	T12	5	2	174	64	76.2	7.5	23.5	7.4	27
Mean	29.4		6.0	1.6	170.8	53.8	75.12	4.9	12.4	7.66	26.4
SD	3.8		0.7	1.5	2.3	6.3	1.72	1.6	7.0	0.74	0.5
KY	23	Able-bodied			168	64	71.4	11	13.5	8.0	26

を見ながら指定速度に合うように車椅子を走行させた。対象者自身が続行不可能と判断した時点で、自主的に運動を終了した。

2) 固定速度走行テストの実施：ローラー上に対象者各々のレース用車椅子を固定し、3分間安静の後、5.0, 7.5, 10.0, 12.5, 15.0, 17.5, 20.0, 22.5, 25.0, 27.5 km/h の各速度で5分間走行した。各走行と走行の間には約15分間の安静時間をはさんだ。対象者自身が続行不可能と判断した時点で、自主的に運動を終了し、その時の速度以上での測定は行わなかった。

3) 健常者はローラー上の車椅子走行と同じ速度で、トレッドミル上のランニングをあわせて実施した。

4) トレーニングによる変化をみるため、3名については、2か月の間をおいて2回の測定を実施した。1回目の測定の際には固定速度での走行は5.0, 10.0, 15.0, 20.0, 25.0 km/h のみ行ったが、2回目ではそれよりも段階を細かくし、前述2)のようにその間の速度での測定も行った。トレーニング内容は、1名については週2回のトレーニングで、1回はロードでのハーフマラソン、もう1回はトラックでのインターバルトレーニングなどであった。あとの2名は週1回のトレーニングで、1名は主にロードでのハーフマラソン、もう1名はトラックでのインターバルトレーニングなどを実施していた。

3. 測定項目

1) K2 システム (COSMED, ITALY)²⁶⁾ を用いて $\dot{V}E$, $\dot{V}O_2$, HR を5秒ごとに測定した。

2) YSI ラクテートアナライザー MODEL 27L (YELLOW SPRINGS INSTRUMENT, USA) で LA を測定した。安静時と各運動直後に手指の先より採血した。

3) 各速度での RPE (Borg et al.^{3,33)} の new scale をもとに筆者が日本語訳) を central point と arm point に分けて記録した。ただし本研究では単なる参考値として扱った。

4. 分析方法

1) 固定速度での各走行の終了直前30秒間の値をそれぞれの速度における測定値とした。

2) 各測定項目の最大値については、漸増運動負荷テストの運動終了直前30秒間の値、あるいは固定速度の走行における最大の測定値、いずれか大きいほうの値を採用した。

3) 漸増運動負荷テストの結果より、酸素摂取率が最も高く、 $\dot{V}O_2$ に対して $\dot{V}E$ が急増する点を VT とした。

B. トラック、ロードでの走行における測定

1. 対象

ローラー上の走行での測定と同一の脊髄損傷者5名を対象とした。

2. 測定内容

1500 m 走, 5000 m 走, ハーフマラソンを実施。4名の対象者が、陸上競技用トラック(1周160 m)で1500 m 走と5000 m 走を行い、そのうちの1名はサイクリングロードでのハーフマラソンも行い、その時の $\dot{V}E$, $\dot{V}O_2$, HR を K2 を用いて5秒ごとに測定した。そして、5000 m 走については、ロードでの5000 m 走行中(実際の大会)にパルスウォッチ MRC-1200 (POLAR ELECTRO OY, FINLAND) で HR を5秒ごとに測定した(対象4名)。さらに、ハーフマラソンにおいては、公園内ジョギングコース(1周2100 m)での21 km 走行中の HR をパルスウォッチで5秒ごとに測定した(対象3名)。陸上競技用トラックと公園内ジョギングコースでの測定においては、1周ごとのラップタイムもあわせて記録した。

III. 結 果

A. ローラー上のレース用車椅子走行における、最大、最大下運動時の生理学的特徴

安静時, VT, 最大運動時における脊髄損傷者5名の生理学的応答の平均値と標準偏差は表2のとおりである。

速度増加に対して $\dot{V}O_2$ は二次関数的に増加した(図1)。HRの上昇は速度に対してS字状で、つまり変曲点があり、VT付近までは $\dot{V}O_2$ と同様に速度が増すほど上昇の割合は大きくなったが、それを超える速度では上昇の割合は減少していった(図2)。HRの上昇の様子は HRmax 付近を除けば $\dot{V}E$ の上昇の様子に似ていた。速度に

Table 2. Physiological responses at rest, ventilatory threshold (VT) and maximal exercise.

	REST	VT	MAX
$\dot{V}E$ (l/min)	11.09 (0.58)	33.94 (4.49)	80.52 (25.86)
$\dot{V}O_2$ (l/min)	0.169(0.035)	1.136(0.203)	1.881(0.362)
$\dot{V}O_2$ (ml/kg/min)	3.15 (0.65)	21.5 (5.58)	35.5 (8.93)
HR (beats/min)	77.6 (10.7)	139.6 (13.6)	180.2 (7.4)
LA (mmol/l)	1.3 (0.3)	2.5 (0.5)	8.6 (2.1)
RPE central point	0.0 (0.0)	4.6 (0.5)	9.4 (1.3)
RPE arm point	0.0 (0.0)	4.6 (1.5)	9.6 (1.5)
% $\dot{V}O_{2max}$ (%)	9.1 (1.8)	60.7 (5.3)	100.0 (0.0)
SPEED (km/h)	0.0 (0.0)	17.0 (2.7)	24.0 (2.9)

Values are mean (SD) ; n=5.

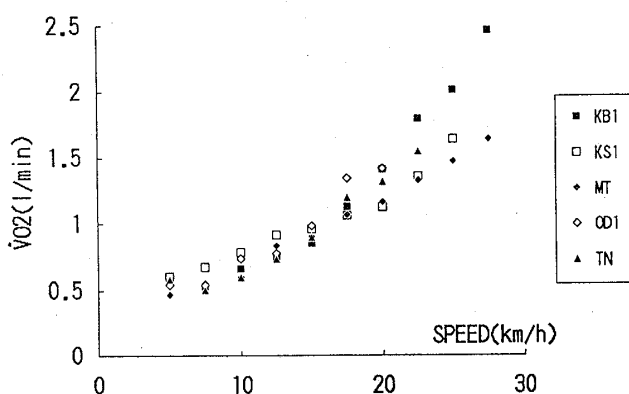
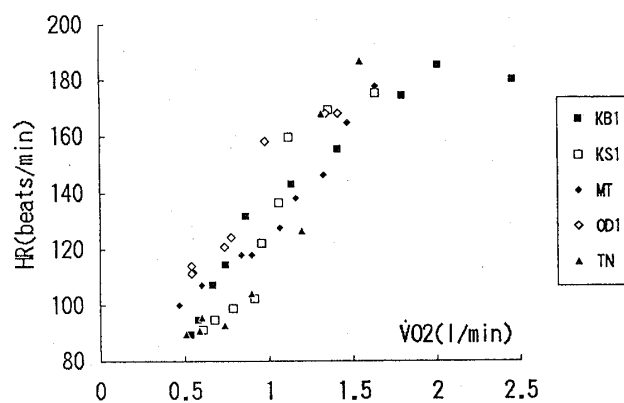
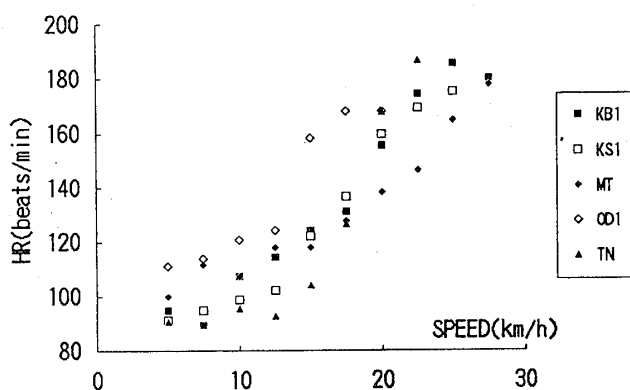
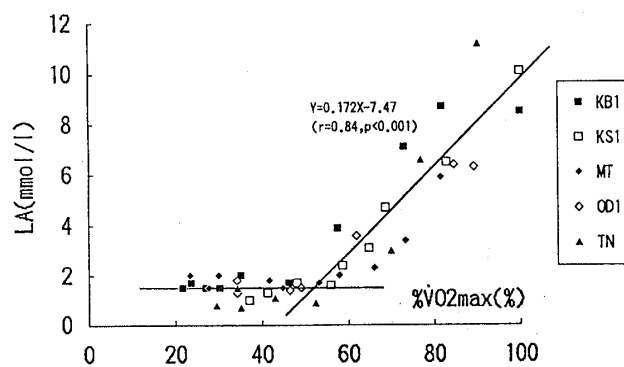
Fig. 1. Relationship between $\dot{V}O_2$ and speed.Fig. 3. Relationship between HR and $\dot{V}O_2$.

Fig. 2. Relationship between HR and speed.

Fig. 4. Relationship between LA and % $\dot{V}O_{2max}$.

対する $\dot{V}O_2$ は個人差が小さかったが、その他の測定項目については個人差が大きかった。

$\dot{V}O_2$ と HR の関係は VT 付近までは直線的であり、それ以上では HR が $\dot{V}O_2$ に対して急増し、 $\dot{V}O_2$ よりも先に頭打ちになるという状況がうかがえた(図3)。

% $\dot{V}O_{2max}$ と LA の間には、 $LA > 2.0$ mmol/l

では、 $LA = 0.172 \times \% \dot{V}O_{2max} - 7.47$ ($r = 0.84$, $p < 0.001$) という直線関係があるが、 $\dot{V}O_2$ に対する LA は個人差が大きかった。 $LA \leq 2.0$ mmol/l では、 $\dot{V}O_2$ や % $\dot{V}O_{2max}$ にかかわらず LA はほぼ一定であった(図4)。

HR と LA の関係は、 $LA \leq 2.0$ mmol/l では、

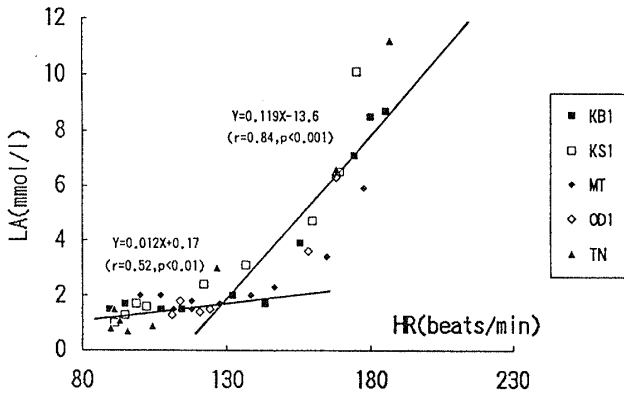


Fig. 5. Relationship between LA and HR.

LA=0.012×HR+0.17 (r=0.52, p<0.01), LA>2.0 mmol/l では, LA=0.119×HR-13.60 (r=0.84, p<0.001) と直線回帰できた(図5).

健常者1名に対して, トレッドミル上のランニングをあわせて行ったところ, 車椅子走行での

$\dot{V}O_2\max$ はランニングでの値の約1/3で, VTにおける $\dot{V}O_2$ は約1/4であった. よって, VTでの $\% \dot{V}O_2\max$ はランニング(57.9%)のほうが車椅子走行(42.2%)よりも高かった. ランニングでは速度が増すほど $\dot{V}O_2$, $\% \dot{V}O_2\max$, HRの増加の割合は小さくなっていくのに対して, 車椅子走行ではその割合が大きくなった. 速度あたりの $\dot{V}O_2$ は車椅子走行のほうがランニングよりも小さかった(図6). 同じ $\dot{V}O_2$ でのHRやLAは車椅子走行のほうがランニングよりも高いが, $\% \dot{V}O_2\max$ とHRやLAの関係をみるとその差は小さかった.

2回の測定を受けた3名のうち走行中の生理学的応答に変化がみられた対象者は週2回トレーニングしている1名のみで, $\dot{V}O_2\max$ は12.2%増

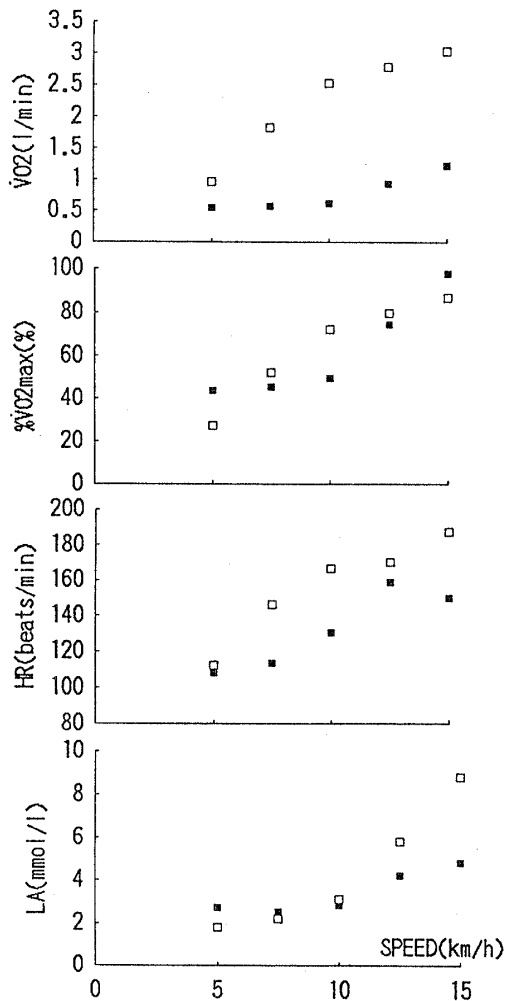


Fig. 6. Physiological responses with speed during racing-wheelchair pushing (■) and treadmill running (□) in an able-bodied subject.

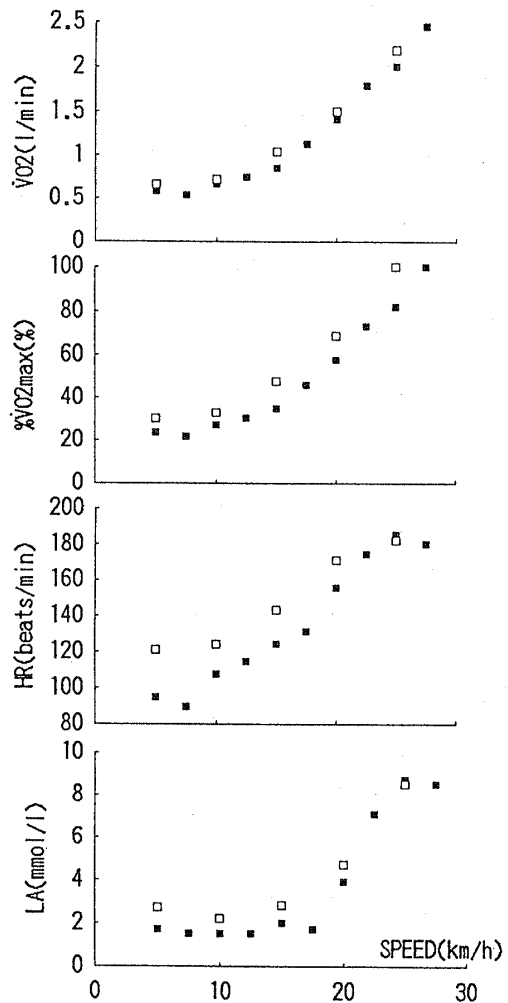


Fig. 7. Physiological responses with speed during the first test (□) and after two months (■) in a paraplegic subject.

加し, HRmax, LAm_{ax} には変化がなかった. VT においては, $\dot{V}O_2$ は 15.7% 増加し, LA は 12.5% 減少し, 速度も 15.0 km/h から 20.0 km/h に向上した. VT での % $\dot{V}O_{2max}$ と HR はほぼ変化がなかった. 速度に対する $\dot{V}O_2$ は若干小さくなったという程度であったが, 速度に対する % $\dot{V}O_{2max}$, HR, LA は大きな減少がみられた(図 7).

B. トラック, ロードでのレース用車椅子走行における生理学的特徴

1500 m 走における 4 名の $\dot{V}O_2$, % $\dot{V}O_{2max}$, HR, 速度の平均値はそれぞれ, 1.402 ± 0.179 l/min, $73.1 \pm 7.3\%$, 174.5 ± 3.0 beats/min, 17.39 ± 1.80 km/h であり, 5000 m 走については, 1.245 ± 0.086 l/min, $66.0 \pm 13.3\%$, 175.0 ± 4.1 beats/min, 16.59 ± 1.31 km/h であった. すべての走行が各々の VT を超える強度であった. トラック 1 周(160 m)ごとの速度を算出し, その速度と各測定項目の変化のパターンをみると, 多くの場合, 速度の増減にともない $\dot{V}O_2$ は変化するが, HR

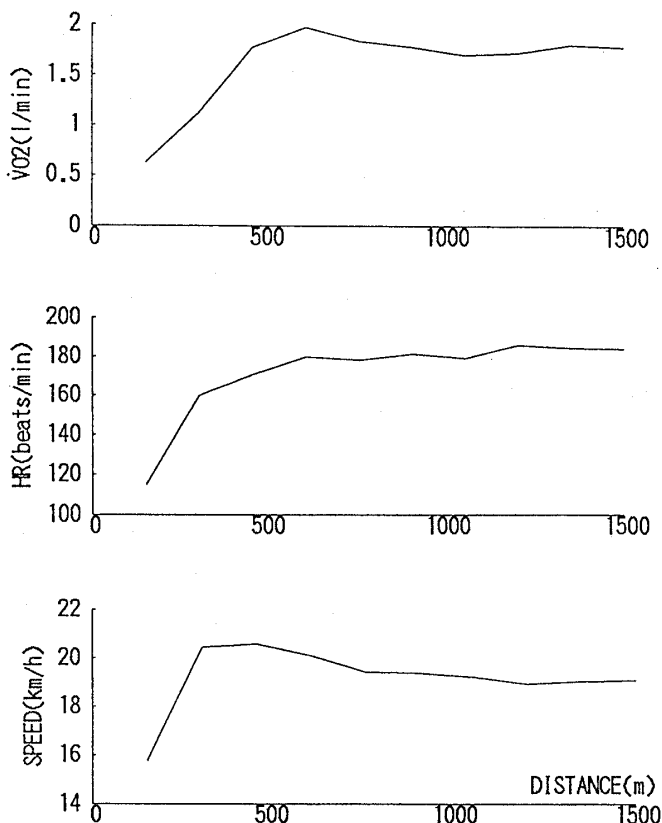


Fig. 8. Changes in $\dot{V}O_2$, HR and speed during the 1500-m wheelchair race in a paraplegic subject.

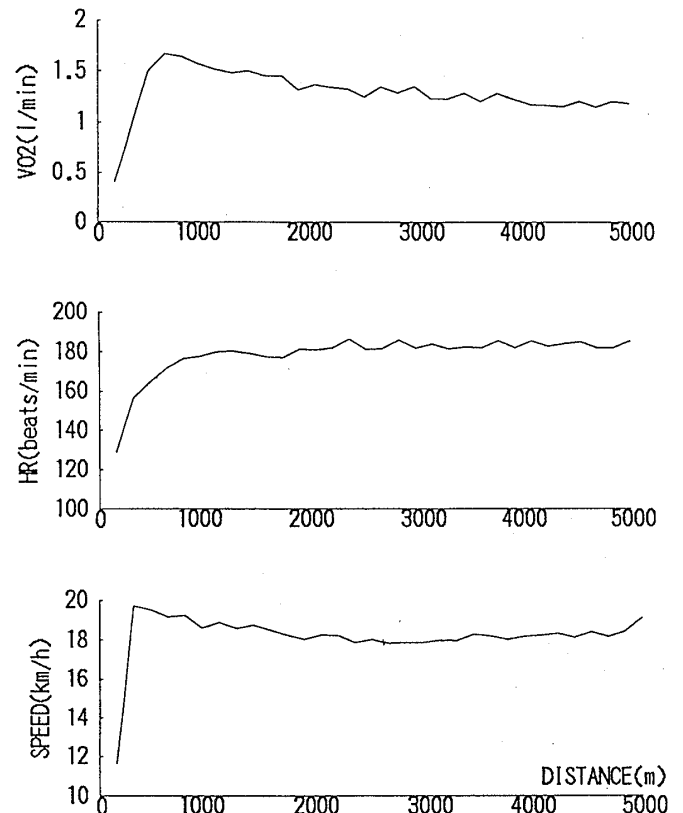


Fig. 9. Changes in $\dot{V}O_2$, HR and speed during the 5000-m wheelchair race in a paraplegic subject.

は $\dot{V}E$ の変動に似ており, 速度増減のパターンにともなった変化をみせなかった. $\dot{V}O_2$ と速度が一定または減少し HR が徐々に高くなる例と, $\dot{V}O_2$ と速度が徐々に減少し HR が一定である例がみられた(1 名の対象者について, 1500 m, 5000 m 走行中の $\dot{V}O_2$, HR, 速度の変化を図 8, 9 に示す). ロードでの 5000 m 走行中(実際の大会)の HR はトラック走行よりも全員高く, HRmax あたり(ローラー上の測定による)での走行であった. 速度もロードでのほうが速かった.

ハーフマラソン中の時間経過にともなう $\dot{V}O_2$ と HR の変化を対象者 1 名について図 10 に示す. % $\dot{V}O_{2max}$ が 72.1% (VT では 54.1%) という高い強度で約 1 時間の走行をしていた. その間, 最初と最後を除けば, HR は 180 beats/min 付近でほぼ一定であった. $\dot{V}O_2$ はラストスパートの際には $\dot{V}O_{2max}$ 付近であったが, 後半では前半よりも小さくなっていった. 同じ対象者について, 公園内ジョギングコースでの 21 km 走行における, 1 周(2100 m)ごとの速度と HR の平均値を算出す

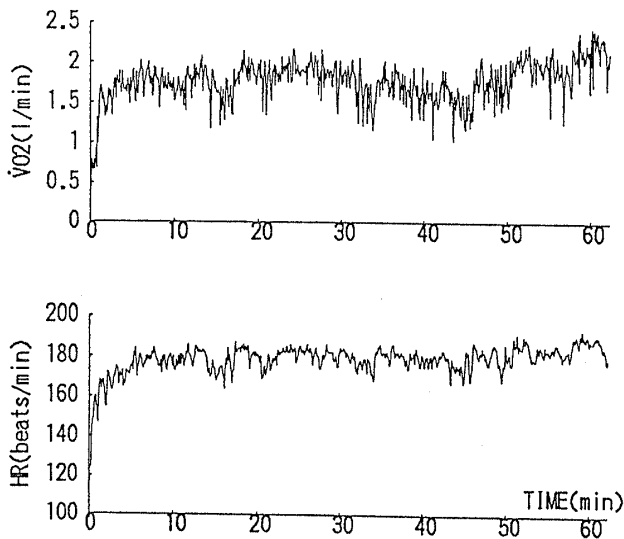


Fig. 10. Changes in $\dot{V}O_2$, and HR during the wheelchair half-marathon in a paraplegic subject.

ると、後半の速度は低下し、HR はほぼ一定であった。つまり、後半は HR 1 拍に対して進む距離は小さくなっており、このことは他の対象者についても同様であった。

IV・考 察

A. ローラー上のレース用車椅子走行における、最大、最大下運動時の生理学的特徴

対麻痺者の除脂肪体重は小さいという報告もあり¹⁰⁾、安静時代謝は小さいと考えられるが、今回の測定では安静時代謝を論じるほどの測定条件は整っていない。

最大運動時の生理学的応答については、エルゴメータを用いた腕クランキング^{16,22,32)}や車椅子駆動^{9,41)}、トレッドミルやローラーを用いた車椅子走行^{11,15,17,21,27,48,49)}での研究が多くなされている。車椅子駆動は、左右対称の運動で腕が後ろにある間の動作は無駄になることより腕クランキングよりも同じ仕事率での生体への負担は大きく、最大運動時の仕事率は小さいといわれている^{19,40,51)}。Glaser et al.¹⁹⁾は $\dot{V}E_{max}$ や $\dot{V}O_{2max}$ は車椅子駆動と腕クランキングでは有意差はないが、HRmax や LAmax は有意に腕クランキングが高いと報告している。一方で、Gass et al.¹⁸⁾は、トレッドミル車椅子走行での $\dot{V}O_{2max}$ と HR は腕クランキングよりも有意に高く、トレッドミル

車椅子走行のほうが活動筋が多いことをその原因と考察している。今回の最大運動時の生理学的応答をトレッドミル車椅子走行での報告と比較すると、 $\dot{V}O_{2max}$ については、Veeger et al.⁴⁹⁾のパラリンピック出場レベルの選手(陸上競技以外も含む)の2.23 l/min よりも小さく、Hartung et al.²¹⁾の運動習慣のある対麻痺者の1.66 l/min よりも大きかった。日本人と欧米人の体格の差を考慮し、これらを体重割りでみると、本研究では35.5 ml/kg/min、Veeger et al.⁴⁹⁾と Hartung et al.²¹⁾の値はそれぞれ32.9 ml/kg/min と23.6 ml/kg/min となり、今回の値が最も大きかった。Veeger et al.⁴⁹⁾は測定の際、バスケットボール選手はその競技用車椅子、それ以外の選手は普段用車椅子を用いてトレッドミル走行を行っており、Hartung et al.²¹⁾はトレッドミルで普段用車椅子を用いており、今回のようにレース用車椅子を用いた運動形態が最も $\dot{V}O_{2max}$ が高められると考えられる。HRmax については、Veeger et al.⁴⁹⁾は175 beats/min、Hartung et al.²¹⁾は173 beats/min としており、今回の平均値180.2 beats/min のほうが高かった。運動形態の違いもその要因のひとつであるが、対象者の平均年齢が今回のほうが低いことも影響しているであろう。対象者の特性や測定での運動形態による結果の違いは大きいので、本研究では実際の車椅子レースに近い形での測定を行ったのであるが、十分に比較検討できるだけの資料はなく、今後の課題である。

脊髄損傷者の VT での生理学的応答についての報告は少ないが、日本人についてもいくつかの報告^{29,47)}があり、VT (それら報告ではその点が AT と表現されている)での $\dot{V}O_2$ は $\dot{V}O_{2max}$ の66~68%とされている。今回の測定結果では60.7%であったが、それは本研究での $\dot{V}O_{2max}$ のほうが大きいことによる違いであると考えられる。VT での HR は先行研究⁴⁷⁾では125.8 beats/min で、HRmax の75.9% (HRmax は165.8 beats/min) であり、今回の測定では HRmax は180.2 beats/min、VT での HR は139.6 beats/min で、77.5%となり、HRmax に対する割合はほぼ同じであった。

対麻痺者を対象とした研究では、エルゴメータを用いた腕クランキングでの仕事率と $\dot{V}O_2$ には健常者と同様に直線関係があるといわれているが^{16, 22, 40, 48)}、車椅子駆動での仕事率と $\dot{V}O_2$ は直線関係ではなく、仕事率が大きくなるほど $\dot{V}O_2$ の増加の割合は大きくなる⁴⁰⁾と報告されている。トレッドミルでの車椅子走行については、速度が増すほど $\dot{V}O_2$ の増加の割合は大きくなる²⁷⁾とされている。そして健常者のランニングにおいては、速度と $\dot{V}O_2$ には直線関係がある、または、速度が増すほど $\dot{V}O_2$ の増加の割合は大きくなる、などの報告がある¹²⁾。このように仕事率や速度と $\dot{V}O_2$ の関係は運動形態によって異なるようであるが、今回の測定結果でも、速度と $\dot{V}O_2$ は直線関係でなく、 $\dot{V}O_2$ は二次関数的に増加した。速度に対する $\dot{V}O_2$ の個人差は少なく、車椅子走行テクニックのレベルの差が小さかったと考えられる。実際にトラックやロードを走行する場合に $\dot{V}O_2$ の測定は困難であるから、実験での結果を応用できればよいのだが、 $\dot{V}O_2$ と速度の関係はレース用車椅子の性能、選手の走行テクニック、天候や路面などの状況によって変わってくるので難しいであろう。しかし、トレーニング用のローラーも各メーカーで実走に近いものを開発しているので、実験に用いる場合もその特性を十分に理解して利用すれば、有用なデータが得られるようになっていくだろう。

仕事率や速度と HR の関係についての報告では、対麻痺者のエルゴメータを用いた腕クランキングや車椅子駆動での仕事率と HR には直線関係があるとされており^{40, 48)}、Conconi et al.⁶⁾ は健常者のランニングについて、速度と HR は LT (その報告ではその点が AT と表現されている) までは直線関係で、それ以上では HR の上昇の割合は減少するとしている。今回の測定では VT 付近までは速度が増すほど HR の上昇の割合は大きくなるが、それを超える速度では HR の上昇の割合は逆に減少するという傾向がみられた。HRmax 付近を除けば VE と HR は似たような上昇の仕方をするので、速度と HR を測定するだけで、その曲線の変曲点から VT を予測することができ

るかもしれない。トレーニング効果の確認のためにも、速度と HR の測定を行い、その関係を知ることは有効であろう。

$\dot{V}O_2$ と HR の関係は運動形態によって違いがあるが、一般に上肢作業は下肢作業よりも同じ $\dot{V}O_2$ での HR は高いことが知られており、上肢作業においても $\dot{V}O_2$ と HR は直線関係であるという報告もいくつかある^{1, 2)}。Vokac et al.⁵⁰⁾ の報告では、健常者の脚サイクリング中の $\dot{V}O_2$ と HR は直線関係であるが、腕クランキングでは、HRmax 付近までは $\dot{V}O_2$ に対して HR は直線的に上昇するが、 $\dot{V}O_2$ よりも先に頭打ちになり、HR はあまり上昇せず $\dot{V}O_2$ だけが大きくなる。そして、脚サイクリングと比較して同じ $\dot{V}O_2$ のときの HR は高いとされている。今回の測定結果では、 $\dot{V}O_2$ に対して VT 付近までは HR は直線的に上昇し、それを越えたところからは HR の $\dot{V}O_2$ に対する急激な上昇がみられ、先に頭打ちになり HRmax 付近では $\dot{V}O_2$ だけが大きくなった。この関係は先に述べた Vokac et al.⁵⁰⁾ の腕クランキングの結果と通じるところがある。このような現象があるため、HRmax あたりでの $\dot{V}O_2$ は予測し難いといえよう。

% $\dot{V}O_{2max}$ と HR の関係については、 $\dot{V}O_2$ との関係とは異なり、必ずしも上肢作業のほうが下肢作業よりも同じ % $\dot{V}O_{2max}$ での HR が高いという報告ばかりではないが、やはり同様に直線関係であるといわれている⁴²⁾。本研究では、% $\dot{V}O_{2max}$ に対しての HR は $\dot{V}O_2$ に対するよりは若干、曲線部分がならされて直線的になったが、その直線回帰式は有効に使えるほどのものではないと考えられた。

下肢作業での $\dot{V}O_2$ と LA の関係については、健常者について数多くの報告がある^{4, 8, 20, 25)}。腕クランキングと脚サイクリングの比較をしている Bevegard et al.¹⁾ の報告では、同じ $\dot{V}O_2$ での LA は腕クランキングのほうが高く、LT での $\dot{V}O_2$ は小さい。つまり、上肢作業は LA が高くなりやすいということであるが、健常者の LT での % $\dot{V}O_{2max}$ は対麻痺者よりも小さい¹⁶⁾ という報告もあり、今回の VT における % $\dot{V}O_{2max}$ につ

いてもそうであったが、健常者の上肢作業における負担は常に上肢を使っている車椅子生活者と同様ではないと思われる。また、今回の測定結果では、LA が 2.0 mmol/l 以下の場合にはほぼ一定で、それを超える場合には $\dot{V}O_2$ に対する LA は個人差が大きかった。% $\dot{V}O_{2max}$ に対してはそれよりも個人差が小さく、% $\dot{V}O_{2max}$ と LA の間には有意な相関関係があることより、今回の測定での LA 値は相対的な負担度を表しているといえる。

HR と LA の関係においても、LA が 2.0 mmol/l 以下とそれを超える場合に分けて直線回帰できた。健常者の持久性競技能力と乳酸関連の指標には密接な関係があるといわれており⁴³⁻⁴⁵⁾、車椅子レースにおいても同様であると考えられる。今回の結果は測定 of 簡単な HR から LA を予測することの可能性を示しており、トレーニングに役立てることができると考えられる。しかし、本研究では対象者数が少ないため、その関係式の信頼性に不安があり、今後のデータ収集により式を改める必要がある。

加えて、今回の測定では、対象者 3 名について 2 か月間のトレーニングによるレース用車椅子走行中の生理学的応答の変化をみたのだが、対象者が少ないため、トレーニング効果といえるかどうかは疑問である。しかし結果として、週 1 回のトレーニングを行った 2 名には変化がみられず、週 2 回のトレーニングを行った 1 名においては $\dot{V}O_{2max}$ や VT での $\dot{V}O_2$ に変化がみられた。持久性競技におけるトレーニング効果について健常者では数多くの報告があり、Bunc et al.⁵⁾ は VT を 1 年をとおして縦断的にみて、VT での $\dot{V}O_2$ は変化しないが、VT での速度は向上すると報告している。変化のみられた今回の対象者 1 名については、VT での速度は 15.0 km/h から 20.0 km/h に向上した。そして $\dot{V}O_{2max}$ には 12.2%、VT での $\dot{V}O_2$ には 15.7% の向上がみられた。速度に対しての $\dot{V}O_2$ は若干小さくなったという程度であったが、% $\dot{V}O_{2max}$ は大きく減少した。速度に対する HR は減少したが、HRmax や VT での HR には変化がみられなかった。LAmax は変化しなかったが、速度に対する LA や VT での

LA は減少した。トレーニングをはじめてまだ数か月であり、レース用車椅子の走行テクニックなども著しく向上する時期であったことも要因であろう。一方、同様にはじめて数か月であっても、週 1 回のトレーニングでは各測定項目に変化がみられないという例もあった。しかし対象者が少ないので、今回の結果を考察することには無理があるだろう。

B.トラック、ロードでのレース用車椅子走行における生理学的特徴

車椅子レースの競技成績と関わる持久性能力の生理学的指標に関する報告はほとんどない。Lakomy et al.²⁷⁾ はトレッドミルを用いて、対麻痺者 10 名について、レース用または普段用車椅子での漸増運動負荷テストを行い各被検者の $\dot{V}O_2$ と速度の関係式をつくり、速度から 5000 m 走行中の $\dot{V}O_2$ を算出している。それによれば、トレッドミルでの 5000 m 走行中の $\dot{V}O_2$ は 1.50 l/min、% $\dot{V}O_{2max}$ は 76.3%、速度は 14.8 km/h であった。 $\dot{V}O_{2max}$ と 5000 m 走のタイムについては有意な相関関係があり、レース用車椅子を使用した被検者においてはさらに高い相関関係がみられた。漸増運動負荷テストでの速度が 14.4 km/h (4.0 m/sec) のときの $\dot{V}O_2$ をその被検者の経済性とし、5000 m 走のタイムとの関係もみており、両者には関係があるが有意ではなかった、と報告している。

車椅子レースは当然車椅子を用いるため、それを操作するテクニックや車椅子の調整などがレース結果を非常に大きく左右する。走行フォームの分析なども大変重要で、必要なのであるが、競技成績はいかなる生理学的指標と関係が深いのか、そしてどのような測定項目に注目してトレーニング経過をみていけばよいのか、ということも興味深い問題である。本研究の対象者の中にも今後も走行中の HR を測定しながらトレーニングしたいという要望もあり、また最近では車椅子に取り付ける速度計に心拍計が連動しているものもでてきた。今回は対象者数が少なく、競技成績と生理学的指標との関係をみることは難しいので、1500 m 走、5000 m 走、ハーフマラソンの競技としての

特徴をみることにとどまった。1500 m 走での平均の $\dot{V}O_2$ は 1.402 l/min, % $\dot{V}O_{2max}$ は 73.1%, 5000 m 走では 1.245 l/min, 66.0% であり, HR については 174.4 beats/min, 175.0 beats/min とほぼ同じであった。HRmax 付近では HR がほぼ一定で $\dot{V}O_2$ は増加していくというローラー上の走行での結果と同様に, 1500 m 走と 5000 m 走では, HR はほぼ同じであるが $\dot{V}O_2$ には違いがあった。緒方³⁵⁾の報告では, ハーフマラソン中の HR を測定したところ無酸素的な要素がみられた例もあり, 1500 m 走や 5000 m 走のような高い強度の走行では, 当然, 無酸素的な要素があると考えられる。よって HR から $\dot{V}O_2$ や % $\dot{V}O_{2max}$ を求めることは難しい。しかし, トレーニングの場において, その走行での負担度やトレーニング効果などをみる際には, HR の測定だけでも十分なのではないだろうか。

1500 m 走, 5000 m 走についてトラック 1 周 (160 m) ごとの速度と $\dot{V}O_2$, HR の変化をみると, 1500 m 走では, 後半の速度低下の大きい対象者については後半の $\dot{V}O_2$ が前半よりも少なく, HR はほぼ一定または徐々に上昇するというパターンであった。後半の速度があまり低下しない対象者については, $\dot{V}O_2$ がほぼ一定で HR はだんだん高くなった。5000 m 走では後半の速度は低下し, HR はほぼ一定で $\dot{V}O_2$ はだんだん小さくなるというパターンが多かった。 $\dot{V}O_2$ は速度の増減にほぼともなった変化をするが, HR はそれともなう変化をしないといえる。そして $\dot{V}E$ は HR と似たような変動であった。これらのこともローラー上の測定と矛盾していない。

ロードでの 5000 m 走と比較して, トラックでの 1500 m 走, 5000 m 走の速度や HR が低かったが, その原因はロードレースが実際の大会であったからということと, トラックが 1 周 160 m と短く, スピードがだしにくいことがあげられる。

ハーフマラソンでの対象者は 1 名 (トレーニングをはじめて数か月の選手) で, $\dot{V}O_2$ は 1.773 l/min, % $\dot{V}O_{2max}$ は 72.1%, HR は 178.8 beats/min という最大に近いレベルで約 1 時間の走行をしていることが分かった。この時の平均速度は

20.24 km/h であった。そしてローラー上のテストの際, この対象者は LA が 20.0 km/h で 3.9 mmol/l, 22.5 km/h で 7.1 mmol/l であった。もしローラー上の走行とハーフマラソンの実走における LA と速度の関係が同様のものならば, この場合はちょうど LA が急上昇する直前の OBLA 強度あたりで走行していると考えられるが, 車椅子マラソンの生理学的特徴は明らかでなく, 実走での LA 測定が望まれる。時間の経過にともなう変化をみると, 最初と最後を除いて HR はほぼ一定であるのに対し, 後半の $\dot{V}O_2$ は前半に比べて小さくなっていった。ラスト約 10 分間の HR はそれまでより高くなり, ラスト 4~5 分間は $\dot{V}O_2$ が $\dot{V}O_{2max}$ 付近にまで達していた。この走行の際の速度変化をとらえることができなかったため, 3 名の対象者について別のコースでの 21 km 走行を行い, 1 周 (2100 m) ごとにラップをとった。1 周ごとの速度と HR の平均値を算出したところ, 後半 (ラストスパートは除く) になると HR 1 拍に対して進む距離が小さくなっていった。

1500 m 走, 5000 m 走, ハーフマラソンはすべて VT を超える高い強度の走行であることが分かった。走行中の特徴として, 特に 5000 m 走とハーフマラソンでは, HR が一定で $\dot{V}O_2$ や速度が減少していくという様子がみられた。しかし, 対象者数を増やせば, 逆に $\dot{V}O_2$ や速度が一定で HR が上昇していく走行もでてくると思われる。ローラー上の測定では各速度での走行時間が 5 分間で, ハーフマラソンのラストスパート部分にあたるような短い時間であるため, 時間による影響はないのだが, 実走では全体の走行時間が長いから, HR や $\dot{V}O_2$ の応答も複雑になってくる。どのようなレース展開を行うかによっても当然違ってくるであろう。以上のような HR や $\dot{V}O_2$ の変動は持久性競技としての特徴と考えられるが, そのメカニズムを探ることは今後の課題となった。

V. 要 約

本研究では, レース用車椅子走行中の生理学的応答を知ることを目的として, 脊髄損傷者 (T4~L1) 男性 5 名を対象にふたつの実験を行った。

第一の実験では、ローラー上でのレース用車椅子走行を行った。最大下運動と最大運動における生理学的応答をみるため、換気量($\dot{V}E$)、酸素摂取量($\dot{V}O_2$)、心拍数(HR)、血中乳酸濃度(LA)、主観的運動強度(RPE)を測定した。換気性作業閾値(VT)での $\% \dot{V}O_{2max}$ は $60.7 \pm 5.3\%$ であった。速度に対して $\dot{V}O_2$ は二次関数的に増加し、HRはS字状に上昇した。HRは $\dot{V}O_2$ に対してVT付近までは直線的に上昇したが、その後急激な上昇がみられ、 $\dot{V}O_2$ よりも先に頭打ちとなり、その後は $\dot{V}O_2$ のみが増加した。第二の実験では、トラックやロードで、レース用車椅子での1500 m走、5000 m走、ハーフマラソン中の $\dot{V}E$ 、 $\dot{V}O_2$ 、HRを測定し、その競技としての特徴を探る試みを行った。1500 m、5000 m走行中の $\% \dot{V}O_{2max}$ はそれぞれ $73.1 \pm 7.3\%$ と $66.0 \pm 13.3\%$ (4名)であり、ハーフマラソンにおいては 72.1% (1名)であった。これらの結果は、車椅子の持久性競技選手が各々のVTを超えるような高い強度でのレースを行っていることを示している。

謝 辞

稿を終えるにあたり、本研究の実験にご便宜をはかってくださいました障害者スポーツ文化センター横浜ラポールの皆様に深謝いたします。そして、惜しまぬご協力をいただきました車椅子マラソンの選手の方々に心より感謝いたします。また、ご指導くださいました宮下充正教授をはじめ、東京大学体育学・スポーツ科学研究所の先生方に感謝の意を表します。

(受理日 平成9年9月5日)

文 献

- 1) Bevegard, S., Freyschuss, U., and Strandell, T. Circulatory adaptation to arm and leg exercise in supine and sitting position. *J. Appl. Physiol.*, (1966), **21**, 37-46.
- 2) Bobbert, A. C. Physiological comparison of three types of ergometry. *J. Appl. Physiol.*, (1960) **15**, 1007-1014.
- 3) Borg, G., Ljunggren, G., and Ceci, R. The increase of perceived exertion, aches and pain in the legs, heart rate and blood lactate during exercise on a bicycle ergometer. *Eur. J. Appl. Physiol.*, (1985), **54**, 343-349.
- 4) Buchanan, M. and Weltman, A. Effects of pedal frequency on $\dot{V}O_2$ and work output at lactate threshold (LT), fixed blood lactate concentrations of 2 mM and 4 mM, and max in competitive cyclists. *Int. J. Sports Med.*, (1985), **6**, 163-168.
- 5) Bunc, V., Heller, J., Moraavec, P., and Spynarova, S. Ventilation threshold and mechanical efficiency in endurance runner. *Eur. J. Appl. Physiol.*, (1989), **58**, 693-698.
- 6) Conconi, F., Ferrari, M., Ziglio, P. G., Droghetti, P., and Codeca, L. Determination of the anaerobic threshold by a noninvasive field test in runners. *Exercise Physiol.*, (1982), **52**, 869-873.
- 7) Conley, D. L. and Krahenbuhl, G. S. Running economy and distance running performance of highly trained athletes. *Med. Sci. Sports Exerc.*, (1980), **12**, 357-360.
- 8) Costill, D. L., Thomason, H., and Roberts, E. Fractional utilization of the aerobic capacity during distance running. *Med. Sci. Sports Exerc.*, (1973), **5**, 248-252.
- 9) Coutts, K. D., Rhodes, E. C., and McKenzie, D. C. Maximal exercise responses of tetraplegics and paraplegics. *J. Appl. Physiol.*, (1983), **55**, 479-482.
- 10) Cowell, L. L., Squires, W. G., and Raven, P. B. Benefits of aerobic exercise for the paraplegic: a brief review. *Med. Sci. Sports Exerc.*, (1986), **18**, 501-508.
- 11) Crews, D., Wells, C. L., Burkett, L., and Hopkins, V. M. A physiological profile of four wheelchair marathon racers. *Physician Sportsmed.*, (1982), **10**, 134-143.
- 12) Daniels, J. T. A physiologist's view of running economy. *Med. Sci. Sports Exerc.*, (1973), **17**, 332-338.
- 13) Davies, C. T. M. and Thompson, M. W. Aerobic performance of female marathon and male ultramarathon athletes. *Eur. J. Appl. Physiol.*, (1979), **41**, 233-245.
- 14) Davis, G. M. Exercise capacity of individuals with paraplegia. *Med. Sci. Sports Exerc.*, (1993), **25**, 423-432.
- 15) Eriksson, P., Lofstrom, L., and Ekblom, B. Aerobic power during maximal exercise in untrained and well-trained persons with quadriplegia and paraplegia. *Scand. J. Rehab. Med.*, (1988), **20**, 141-147.
- 16) Flandrois, R., Grandmontagne, M., Gerin, H., Mayet, M. H., Jehl, J. L., and Eyssette, M. Aerobic performance capacity in paraplegic subjects. *Eur. J. Appl. Physiol.*, (1986), **55**, 604-609.
- 17) Gass, G. C. and Camp, E. M. Physiological characteristics of trained Australian paraplegic and tetraplegic subjects. *Med. Sci. Sports Exerc.*, (1979), **11**, 256-259.
- 18) Gass, G. C. and Camp, E. M. The maximum physiological responses during incremental wheelchair and arm cranking exercise in male paraplegics. *Med. Sci. Sports Exerc.*, (1984), **16**, 355-359.
- 19) Glaser, R. M., Sawka, M. N., Brune, M. F., and Wilde, S. W. Physiological responses to maximal effort wheelchair and arm crank ergometry. *Exer-*

- cise Physiol., (1980), **48**, 1060-1064.
- 20) Green, H. J., Hughson, R. L., Orr, G. W., and Ranney, D. A. Anaerobic threshold, blood lactate, and muscle metabolites in progressive exercise. *Exercise Physiol.*, (1983), **54**, 1032-1038.
 - 21) Hartung, G. H., Lally, D. A., and Blancq, R. J. Comparison of treadmill exercise testing protocols for wheelchair users. *Eur. J. Appl. Physiol.*, (1993), **66**, 362-365.
 - 22) Hjeltnes, N. Oxygen uptake and cardiac output in graded arm exercise in paraplegics with low level spinal lesions. *Scand. J. Rehab. Med.*, (1977), **9**, 107-113.
 - 23) Hjeltnes, N. and Vokac, Z. Circulatory strain in everyday life of paraplegics. *Scand. J. Rehab. Med.*, (1979), **11**, 67-73.
 - 24) Hoffman, M. D. Cardiorespiratory fitness and training in quadriplegics and paraplegics. *Sports Medicine*, (1986), **3**, 312-330.
 - 25) Ivy, J. L., Withers, R. T., Van Handel, P. J., Elger, D. H., and Costill, D. L. Muscle respiratory capacity and fiber type as determinants of the lactate threshold. *Exercise Physiol.*, (1980), **48**, 523-527.
 - 26) Kawakami, Y., Nozaki, D., Matsuo, A., and Fukunaga, T. Reliability of measurement of oxygen uptake by a portable telemetric system. *Eur. J. Appl. Physiol.*, (1992), **65**, 409-414.
 - 27) Lakomy, H. K. A., Campbell, I., and Williams, C. Treadmill performance and selected physiological characteristics of wheelchair athletes. *Brit. J. Sports Med.*, (1987), **21**, 130-133.
 - 28) Morgan, D. W., Baldini, F. D., Martin, P. E., and Kohrt, W. M. Ten kilometer performance and predicted velocity at $\dot{V}O_2$ max among well-trained male runners. *Med. Sci. Sports Exerc.*, (1989), **21**, 78-83.
 - 29) 水口正人. 脊髄損傷者の運動耐容能に関する検討—車椅子エルゴメータとアームエルゴメータの比較—, *日本パラプレジア医学会雑誌*, (1992), **5**, 158-159.
 - 30) Myers, K. D. Pushing a wheelchair -FAST! S'NS, (1991) November/December, 51-54.
 - 31) 日本車椅子スポーツ研究会. 車椅子マラソン—大分国際車椅子マラソンの10年をかえりみて—, (財)日本身体障害者スポーツ協会, (1993).
 - 32) Nilsson, S., Staff, P. H., and Pruett, E. D. R. Physical work capacity and the effect of training on subjects with long-standing paraplegia. *Scand. J. Rehab. Med.*, (1975), **7**, 51-56.
 - 33) Noble, B. J., Borg, G. A. V., Ceci, R., and Kaiser, P. A category-ratio perceived exertion scale: relationship to blood and muscle lactates and heart rate. *Med. Sci. Sports Exerc.*, (1983), **15**, 523-528.
 - 34) Nozaki, D., Kawakami, Y., Fukunaga, T., and Miyashita, M. Mechanical efficiency of rowing a single scull. *Scand. J. Med. Sci. Sports*, (1993), **3**, 251-255.
 - 35) 緒方 甫. 車椅子スポーツからみたりハビリテーション医学, *リハビリテーション医学*, (1991), **28**, 3-10.
 - 36) 大川裕行, 田島文博. 車椅子マラソン選手の速度およびフォームの測定, 車椅子スポーツの調査研究報告書, (財)日本身体障害者スポーツ協会, (1995), 29-34.
 - 37) 小野 隆, 伊藤智式, 高石鉄雄, 安田好文, 矢部京之助. 車椅子トラック競技成績とPWCとの関係, 第5回日本車椅子スポーツ研究集会抄録集, (1995), 70.
 - 38) Pendergast, D., Cerrethelli, P., and Rennie, D. W. Aerobic and glycolytic metabolism in arm exercise. *J. Appl. Physiol.*, (1979), **47**, 754-760.
 - 39) Powers, S. K., Dodd, S., Deason, R., Byrd, R., and Mcknight, T. Ventilatory threshold, running economy and distance running performance of trained athletes. *Res. Q. Exerc. Sport*, (1983), **54**, 179-182.
 - 40) Sawka, M. N., Glaser, R. M., Wilde, S. W., and Von Lührte, T. C. Metabolic and circulatory responses to wheelchair and arm crank exercise. *J. Appl. Physiol.*, (1980), **49**, 784-788.
 - 41) Skrinar, G. S., Evans, W. J., Ornstein, L. J., and Brown, D. A. Glycogen utilization in wheelchair-dependent athletes. *Int. J. Sports Med.*, (1982), **3**, 215-219.
 - 42) Stenberg, J., Astrand, P. -O., Ekblom, B., Royce, J., and Saltin, B. Hemodynamic response to work with different muscle groups, sitting and supine. *J. Appl. Physiol.*, (1967), **22**, 61-70.
 - 43) Tanaka, K., Matsuura, Y., Kumagai, S., Matsuzaka, A., Hirakoba, K., and Asano, K. Relationships of anaerobic threshold and onset of blood lactate accumulation with endurance performance. *Eur. J. Appl. Physiol.*, (1983), **52**, 51-56.
 - 44) Tanaka, K., Matsuura, Y., Matsuzaka, A., Hirakoba, K., Kumagai, S., Sun, S. O., and Asano, K. A longitudinal assesment of anaerobic threshold and distance running performance. *Med. Sci. Sports Exerc.*, (1984), **16**, 278-282.
 - 45) Tanaka, K. and Matsuura, Y. Marathon performance, anaerobic threshold, and onset of blood lactate accumulation. *J. Appl. Physiol.*, (1984), **57**, 640-643.
 - 46) Tesch, P. A. and Lindeberg, S. Blood lactate accumulation during arm exercise in world class kayak paddlers and strength trained athletes. *Eur. J. Appl. Physiol.*, (1984), **52**, 441-445.
 - 47) 塚越和巳, 大久保春美, 鬼澤智子, 丸山恭子. 脊髄損傷者の Anaerobic Threshold について—信頼性と妥当性について—, *医療体育*, (1993), **12**, 7-9.
 - 48) Van Der Woude, L. H. V., Hendrich, K. M. M., Veeger, H. E. J., Van Ingen Schenau, G. J., Rozendal, R. H., De Groot, G., and Hollander, A. P. Manual wheelchair propulsion: effect of power output on physiology and technique. *Med. Sci. Sports Exerc.*, (1988), **20**, 70-78.
 - 49) Veeger, H. E. J., Yahmed, M. H., Van Der Woude, L.

- H. V., and Charpentier R. P. Peak oxygen uptake and maximal power output of Olympic wheelchair-dependent athletes. *Med. Sci. Sports Exerc.*, (1991), **23**, 1201-1209.
- 50) Vokac, Z., Bell, H., Bautz-Holter, E., and Rodahl, K. Oxygen uptake/heart rate relationship in leg and arm exercise, sitting and standing. *J. Appl. Physiol.*, (1975), **39**, 54-59.
- 51) Wicks, J. R., Oldridge, N. B., Cameron, B. J., and Jones, N. L. Arm cranking and wheelchair ergometry in elite spinal cord-injured athletes. *Med. Sci. Sports Exerc.*, (1983), **15**, 224-231.
- 52) 山本行文. 車椅子マラソンのトレーニングについて—競技者として—, 身体障害者スポーツのトレーニングに関する調査研究報告書, (財)日本身体障害者スポーツ協会, (1995), 123-127.