

Study on Mechanical Work in Vigorous Walking and Ventilatory Threshold during Treadmill Waling against a Horizontal Impeding Force

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-05 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/40439

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.



学 位 論 文 要 旨

学位論文名

活動的歩行の機械的仕事およびトレッドミル水平負荷牽引歩行の
換気性作業閾値に関する研究

Study on Mechanical Work in Vigorous Walking and Ventilatory Threshold during
Treadmill Waling against a Horizontal Impeding Force

金沢大学大学院自然科学研究科

生命科学専攻 動態生理学講座

学籍番号 0923032501

氏 名 東 章 弘

Abstract

The purpose of this study was to compare mechanical work during vigorous walking (which utilizes greater arm swing and step length) with that during normal walking, and to compare the ventilatory threshold (VT) between treadmill walking against a horizontal impeding force (horizontal load walking) and cycle ergometer exercise. Six adult men performed normal and vigorous walking on a treadmill at different walking speeds. At all speeds, external work during vigorous walking was greater than that during normal walking, and the individual difference ($\Delta = \text{vigorous walking} - \text{normal walking}$) in total work was significantly correlated with that in oxygen uptake. On the other hand, seven adult men performed horizontal load walking (velocity: 1.11 m/sec) and cycle ergometer exercise (pedaling frequency: 60 rpm) for the assessment of VT. Oxygen uptake at VT during horizontal load walking was greater than that during cycle ergometer exercise, whereas the opposite was noted for the work rate at VT. Thus, it was suggested that increased mechanical work (particularly total work) during vigorous walking would increase the metabolic cost. Furthermore, it was assumed that the muscle mass recruited for exercise would be considerably greater for horizontal load walking than for cycle ergometer exercise because pedaling requires fewer muscles (lower extremities).

I. 緒言

歩行は人間の基本的な移動運動形態のひとつであり、歩行周期の中に両足が接地している安定的局面、すなわち二重支持期を有するとともに、速い歩行では同速度における走行(jogging)に匹敵するエネルギーを消費することが可能であり、且つ、歩行の衝撃力(床反力)は同速度での走行と比較して小さい。これらの理由から低体力者や高齢者を含むあらゆる年齢層の健康運動の手段として歩行が広く受け入れられている。しかしながら、速歩によって健康運動を実践することは低体力者や高齢者にとっては負担であり、リスクを伴う可能性がある。このような課題を解決する方法のひとつが歩き方の工夫である。すなわち、運動の効果を高める上で、速度の増加を伴うことなく、腕振りや歩幅を大きくするような動作を取り入れる方法(活動的歩行)が提案され、活動的歩行の酸素摂取量は普通の歩行よりも大きいことが知られている。本研究では、その動作の機序について機械的仕事の観点から明らかにすることを試みた。

一方、トレッドミル上での水平負荷牽引(以下、トレッドミル水平負荷法と略記する)による移動運動は、推進に必要な筋群をターゲットとし、水平移動を阻害する負荷に抗することによって筋活動を高める負荷運動であり、この方法によっても速度の増加を伴わずに歩行の運動量を高めることができる。トレッドミル水平負荷法は移動運動の機械的効率を算出することを目的として開発され、人間の移動運動時の筋の効率的特性が議論されてきたが、本研究では、このトレッドミル水平負荷法が自転車エルゴメーター作業のようなエルゴメトリー(ergometry: 運動力測定)になりかわり、且つ、トレーニング手段としても活用できる可能性の検討を試みた。すなわち、自転車エルゴメーター作業による運動負荷試験において測定されるような換気性作業閾値が検出さ

れば、それを目安としたトレッドミル水平負荷法による歩行(トレッドミル水平負荷牽引歩行)によって安全で有効な身体トレーニングを行うことができる可能性が期待される。

このように、「自らの動きによって活動性を高める歩行」(活動的歩行)と「外的負荷によって活動性を高める歩行」(トレッドミル水平負荷牽引歩行)という2つの視点から速度増に依存しない(普通速度での)歩行技法に関する基礎的な情報を得ることは、あらゆる年齢層、体力水準の人びとの安全に配慮した身体トレーニング法の開発に対して重要な資料の提供となる。

本研究の目的は、腕振りや歩幅を大きくして歩く活動的歩行動作の機序を機械的仕事の観点からバイオメカニクスの観点から明らかにすること、ならびにトレッドミル水平負荷牽引歩行の運動生理学的な特徴を換気性作業閾値の観点から明らかにすることであった。

II. 検討課題

本研究では以下の2つを検討課題とする。

1. 活動的歩行と自然歩行の機械的仕事と酸素摂取量を比較すること。

活動的歩行と自然歩行の機械的仕事と酸素摂取量を比較し、その差異がどのような機序によって導かれるのかを検討する。また、活動的歩行の機械的仕事の個人差と酸素摂取量の個人差との関連から、活動的歩行の機械的仕事が酸素摂取量に与える影響について検討する。

2. トレッドミル水平負荷牽引歩行と自転車エルゴメーター作業の換気性作業閾値を比較すること。

トレッドミル水平負荷牽引歩行時と自転車エルゴメーター作業時の換気性作業閾値(VT)を求め、その時の酸素摂取量、心拍数、および水平負荷牽引による仕事率について比較する。また、トレッドミル水平負荷牽引歩行時のVTの再現性を明らかにし、トレーニング手段としてのトレッドミル水平負荷牽引歩行の実用可能性を検討する。

III. 研究方法

1. 活動的歩行動作が機械的仕事と酸素摂取量に及ぼす影響

1)被験者

被験者は、健康づくりのための運動指導に従事している男性6名であった[年齢：28.5 ± 3.9歳，身長：1.68 ± 0.49 m，体重：64.5 ± 7.2 kg (平均 ± 標準偏差)]。

2)実験方法

実験手順

被験者は、トレッドミル上にて、1.11, 1.53, および1.94 m/sec (4.0, 5.5, および7.0 km/hr)の速度で普通の(自然な)歩行(Normal walking; 自然歩行)と活動的歩行(Vigorous walking)を行った。自然歩行においては動作について特別な指示を与えなかったが、活動的歩行においては運動指導者である各々の被験者がエクササイズウォーキングを指導する上で師範するような大きな腕の振りや歩幅を意識し、且つ、腕を大きく振る際に肘を適度に曲げるよう指導した(図1)。機械的仕事の分析のためのビデオ撮影と酸素摂取量の測定のためのトレッドミル歩行は別々に行った。前

者については、歩行時間は3分とし、被験者の右側方10mの位置に設置したビデオカメラによって最後の15秒間に矢状面の動きを30 frames/secで撮影した。後者については、歩行時間は5分間とし、最後の1分間の酸素摂取量を測定した。

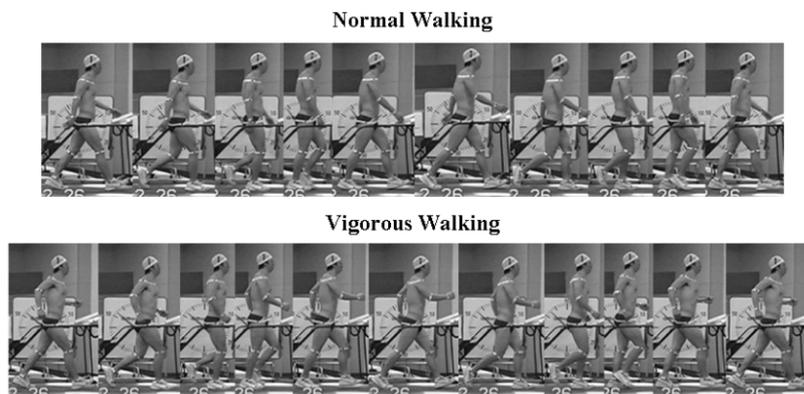


Figure 1. Representative photograph sequences of normal walking (upper panel) and vigorous walking (lower panel).

機械的仕事関連変量の算出

機械的仕事はドレッドミル歩行中の被験者を右側方からビデオ撮影した画像から分析した。ビデオの画像は640×480 pixelでパソコンに取り込み、歩行の完全な3サイクルを30 frames/sec毎にデジタル化し、頭・頸部、体幹、上腕、前腕、手、大腿、下腿、および足をセグメントとする身体各部位のマーカー位置を矢状面の2次元座標として求めた。各座標は残差分析法に従う4次のButterworth low-pass digital filterにより平滑化し、身体重心(COM)、外的仕事($W_{EXTERNAL}$)、および内的仕事($W_{INTERNAL}$)を算出し、それらの総和を総仕事(W_{TOTAL})とした。また、歩行時のCOMの矢状面の動きを振り子モデルとして捉え、 $W_{EXTERNAL}$ 、水平方向の仕事($W_{FORWARD}$)、および鉛直方向の仕事($W_{VERTICAL}$)から、以下の式によって振り子の効率($E_{RECOVERED}$)を求めた。

$$E_{RECOVERED} (\%) = \frac{W_{FORWARD} + W_{VERTICAL} - W_{EXTERNAL}}{W_{FORWARD} + W_{VERTICAL}} \times 100.$$

歩行動作の評価

歩行動作として、上肢については歩行の1サイクルにおける肩関節角度(屈曲-伸展)の変域(ROM)と1サイクルにおける肘関節の平均角を変数とし、下肢については歩幅を比較のための変数とした。

酸素摂取量の測定

被験者は、5分間の歩行の際、最後の1分間の呼気ガス分析によって酸素摂取量(絶対値, L/min)を測定された。なお、絶対値を単位重量(体重)と単位距離で除して、相対値(VO_2 , mL/kg·m)を求めた。

3)結果および考察

活動的歩行における動作の特徴は、すべての速度において主に上肢の動きにおいて観察されたが、歩幅の増大については 1.11 m/sec においてのみに観察された。異なる速度での活動的歩行と自然歩行の機械的仕事の差異は、 $W_{EXTERNAL}$ においてはすべての速度において顕著であったが、総仕事は 1.11 m/sec と 1.53 m/sec において顕著であった。速歩(1.94 m/sec)では、自然歩行時と活動的歩行時の W_{TOTAL} の差異が小さくなる傾向がうかがえた。活動的歩行時の $W_{EXTERNAL}$ の増大は COM の振り子的なエネルギーの変換効率の減少が主要な原因であると考えられ、力学的なメカニズムとして活動的歩行の非効率的な側面が捉えられた。

Table 1. Mechanical work variables in each walking condition and speed.

Variable	Speed, m/sec	Condition				Comparison		
		Normal walking		Vigorous walking		z	P	ES
		M	SD	M	SD			
$W_{EXTERNAL}$, J/kg·m	1.11	0.445	0.082	0.709	0.269	2.20	.028	.90
	1.53	0.728	0.104	0.981	0.118	2.20	.028	.90
	1.94	1.114 ^a	0.102	1.416	0.221	2.20	.028	.90
$W_{FORWARD}$, J/kg·m	1.11	0.500	0.056	0.483	0.056	1.15	.249	.47
	1.53	0.888	0.049	0.889	0.097	0.31	.753	.13
	1.94	1.278 ^a	0.182	1.255 ^a	0.177	0.73	.463	.30
$W_{VERTICAL}$, J/kg·m	1.11	0.402	0.060	0.533	0.145	2.20	.028	.90
	1.53	0.651	0.085	0.702	0.108	0.73	.463	.30
	1.94	0.801	0.169	0.823	0.174	0.73	.463	.30
$W_{INTERNAL}$, J/kg·m	1.11	0.286	0.032	0.315	0.058	1.36	.173	.56
	1.53	0.539	0.165	0.559	0.099	0.52	.600	.21
	1.94	0.854 ^a	0.239	0.820 ^a	0.105	0.11	.917	.05
W_{TOTAL} , J/kg·m	1.11	0.731	0.092	1.024	0.324	2.20	.028	.90
	1.53	1.266	0.239	1.541	0.192	1.99	.046	.81
	1.94	1.968 ^a	0.312	2.236	0.261	1.78	.075	.73
$E_{RECOVERED}$, %	1.11	51.1	5.0	32.1	15.7	1.99	.046	.81
	1.53	52.8	5.7	37.8	10.5	2.20	.028	.90
	1.94	46.1	4.2	31.5	12.3	2.20	.028	.90

n = 6

^a Significantly different between 1.11 m/sec and 1.94 m/sec, $P < 0.05$

また、自然歩行をベースラインとして求めた活動的歩行の機械的仕事の個人差は、すべての速度において W_{TOTAL} が VO_2 の個人差との強い関連を示す一方(図 2)、1.11 m/sec では $W_{EXTERNAL}$ と、1.94 m/sec では $W_{INTERNAL}$ と有意な相関を示した。すなわち、1.11 m/sec では主に COM の動き ($W_{EXTERNAL}$ や $W_{VERTICAL}$) の個人差が VO_2 の変動に影響したが、速歩(1.94 m/sec)ではむしろ四肢の動き ($W_{INTERNAL}$) の個人差が VO_2 の変動に関与したと考えられた。なお、活動的歩行時の VO_2 の変動の 7~9 割を W_{TOTAL} が説明することが明らかとなった。振り子モデルとして捉えたエネルギー変換効率 ($E_{RECOVERED}$) が低いということは、それを補う筋活動が要求されることを意味するため、活動的歩行ではそれに伴うエネルギー代謝が促進されると考えられた。このように、いず

れの速度においても活動的歩行の機械的仕事関連変量がエネルギー消費量に影響を与えている側面がうかがえるが、速歩でなくともエネルギー消費量を高めることは可能であり、その機序が機械的仕事の増大、とりわけ振り子の効率の減少に伴う W_{EXTERNAL} の増大と関連していることが示唆された。したがって、安定して実施できる普通速度での活動的歩行は、COMの振り子のエネルギー変換効率を低減し、筋活動を高めることによって酸素摂取量を大きくする運動であると捉えられた。

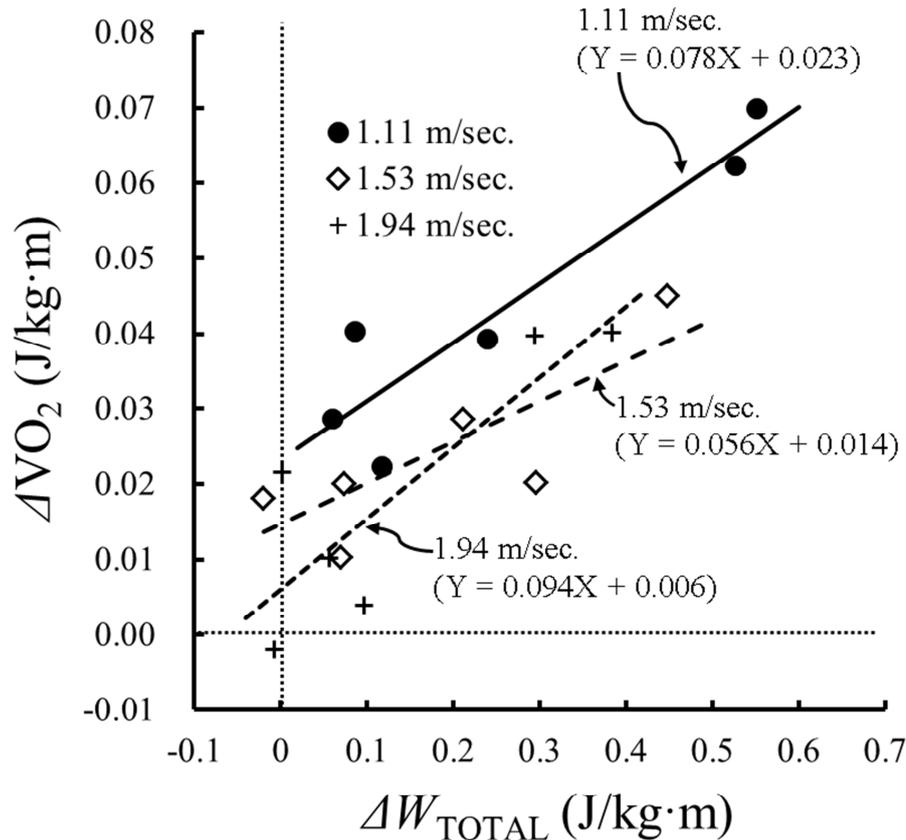


Figure 2. Relationship between ΔW_{TOTAL} (X) and ΔVO_2 (Y) at 1.11, 1.53, and 1.94 m/sec. Correlation coefficients were .93, .82, and .85, respectively ($n = 6$, all $P < .05$).

2. トレッドミル水平負荷牽引歩行の換気性作業閾値

1) 被験者

被験者は、健康運動指導に携わり、且つ、歩行に影響を及ぼし得る整形外科的疾患のない健康な成人男性7名であった[年齢: 30.9 ± 7.0 歳, 身長: 170.4 ± 8.8 cm, 体重: 66.1 ± 14.1 kg (平均±標準偏差)].

2) 実験方法

実験手順

被験者はトレッドミル上で、腰部に付けたベルトから水平後方に滑車を介してワイヤーで錘を

牽引し、1.11 m/sec (4 km/hr) の速度で歩行した(図3)。検者は、被験者の歩行中に1つ150 gの砂袋の錘を6秒毎に逐次追加していくことによって、1分間に16.7 Wずつ増加する細かな刻み幅での漸増負荷となる水平負荷を課していった。トレッドミル水平負荷牽引歩行の手順としては、最初の3分間は無負荷の歩行とし、測定開始4分後から負荷を与え、各被験者の年齢予測最高心拍数(220-年齢)の85%(85%HRmax)に至るまで負荷漸増を継続した。トレッドミル水平負荷牽引歩行時の漸増負荷の勾配は10分程度の負荷作業時間で85%HRmaxとなるよう予備実験においてあらかじめ決定した。なお、自転車エルゴメーター作業においては、機器内蔵のコンピュータ制御によるランプ式負荷を与え、負荷勾配は20 W/minとした。ペダル回転数は60 rpmとした。

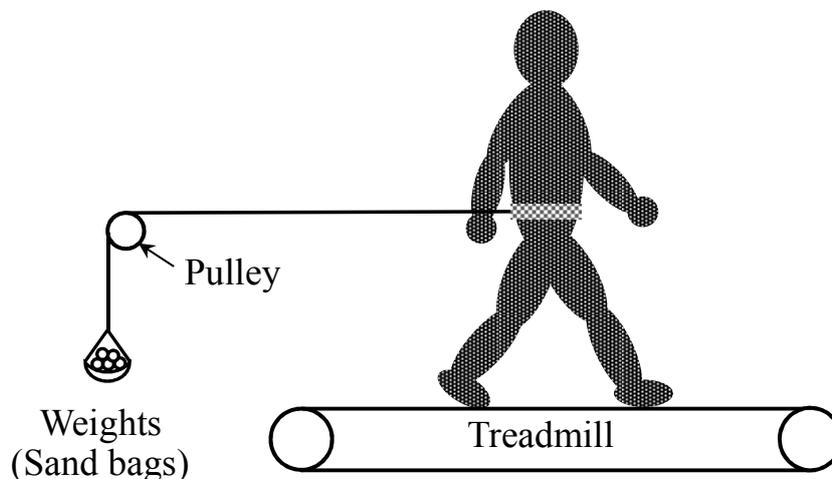


Figure 3. Schematic diagram of the experimental set-up

分析方法

運動中の呼気ガスはブレス-バイ-ブレス方式で採取して、換気量(\dot{V}_E)、酸素摂取量($\dot{V}O_2$)、二酸化炭素排出量($\dot{V}CO_2$)、終末期呼気酸素分圧($P_{ET}O_2$)、終末期呼気二酸化炭素分圧($P_{ET}CO_2$)を連続的に測定し、同時に心拍数を記録した。なお、 \dot{V}_E 、 $\dot{V}CO_2$ の急激な上昇、 $P_{ET}CO_2$ の変化を伴わない $P_{ET}O_2$ の上昇、 $\dot{V}_E/\dot{V}CO_2$ の変化を伴わない $\dot{V}_E/\dot{V}O_2$ の上昇から換気性作業閾値(Ventilatory threshold, VT)を求めた。トレッドミル水平負荷牽引歩行でのVTの測定は2回行い、VTにおける酸素摂取量($\dot{V}O_2@VT$)、心拍数(HR@VT)と仕事率(WR@VT)について2試行分のデータを平均した。被験者には、実験中は一貫して無負荷時の歩行と同じような姿勢を保つように指示し、負荷の増加によって極端な姿勢の変更を伴わないよう注意させた。また、自転車エルゴメーター作業についても上限を85%HRmaxとした最大下運動でのランプ式負荷漸増法によってVTを測定した。

3)結果および考察

トレッドミル歩行において、水平後方に細かな刻み幅での漸増負荷を課し、呼吸応答を連続して測定した結果、トレッドミル水平負荷牽引歩行のVTが検出された。 $\dot{V}O_2@VT$ 、HR@VT、およびWR@VTを自転車エルゴメーター作業時と比較したところ、 $\dot{V}O_2@VT$ はトレッドミル水平負荷

牽引歩行時の方が大きかったが、WR@VTは自転車エルゴメーター作業時の方が大きかった。また、HR@VTには有意差は認められなかった(図2)。したがって、トレッドミル水平負荷牽引歩行のVTは自転車エルゴメーター作業時よりも小さな仕事率で出現するが、VTでの酸素摂取量は自転車エルゴメーター作業時よりも大きかった。その差異は、作業姿勢とそれに関連して運動に貢献する筋群の違いから生ずると推察された。すなわち、トレッドミル水平負荷牽引歩行は自転車エルゴメーター作業よりもより多くの筋群が貢献する全身性作業の運動であり、その

Table 2. Comparisons of oxygen uptake, heart rate, and work rate at ventilator threshold (VT) between horizontal load walking and cycle ergometer exercise.

Variable	Horizontal load walking		Cycle ergometer exercise	
	M	SD	M	SD
$\dot{V}O_2@VT$, L/min	1.705*	0.350	1.431	0.287
$\dot{V}O_2@VT$, mL/kg·min	26.06*	3.88	21.94	4.07
HR@VT, beats/min	127.7	6.6	120.1	8.5
WR@VT, W	95.2*	25.2	123.7	21.0

n = 7
* P < 0.05

ためにVTにおいて大きな酸素摂取量が導かれたと考えられる。一方、トレッドミル水平負荷牽引歩行のVTの再現性は高く、これまでに報告されている自転車エルゴメーター作業に比肩するものであることが示された。これらのことから、トレッドミル水平負荷牽引歩行は安全で有効なトレーニング水準としてのVTを設定することが可能な再現性の高いエルゴメトリーであることが示唆された。

IV. 総括

歩行は、元来、長く移動できる推進手段として、身体重心の位置エネルギーと運動エネルギーの効率的な授受による振子的なメカニズムによって筋活動が省力化された移動運動である。しかしながら、健康増進を目的に付加運動としてより多くのエネルギーを消費することが歩行に求められ、速歩が奨励されてきた歴史的経緯の延長上で、歩き方の工夫、すなわち、活動的歩行動作が考案された。活動的歩行動作は速歩でなくとも運動量を高めることができる歩き方である。すなわち、大きな腕振りと歩幅の拡大によって身体重心のなす機械的仕事を増大させ、エネルギー代謝を増加させることが可能である。バイオメカニクスの説明するならば、活動的歩行は、普通速度においては身体重心の振子的なエネルギー変換効率を低くして大きな外的仕事を導き、結果として筋活動を増大させる。したがって、速い動きの制限があるような低体力者や高齢者には、普通速度での活動的歩行はより安全な運動手法(歩行方法)として推奨できるといえる。

一方、日常生活における歩行の多くは水平歩行である。水平歩行は人間の生活における基本的な活動様式のひとつである。トレッドミル水平負荷牽引歩行は前方への推進を阻害する負荷を課す手法によって、動きの変更を伴わずにエネルギー消費量を高めるエルゴメトリーである。この運動では特別なテクニックは要求されず、ただ水平負荷に抗して歩くことで運動量を高めることが可能となる。それを適度なトレーニングとする負荷の目安としての換気性作業閾値においては、自転車エルゴメーター作業時の換気性作業閾値と比較すると大きな酸素摂取量が導かれることが

明らかとなった。トレッドミル水平負荷牽引歩行は自転車エルゴメーター作業に比べて多くの筋群が貢献する全身作業性の運動であることがその原因のひとつであると推察された。したがって、トレッドミル水平負荷牽引歩行は、高度なテクニックや素早い動きが要求されない特徴を有した安全で有効な換気性作業閾値レベルでの全身作業性トレーニングを可能とする手法であることが提案できる。

これらのことから、普通の歩行速度における運動量を高めるトレーニング方法としての活動的歩行のバイオメカニクス的な特徴が機械的仕事の観点から、トレッドミル水平負荷牽引歩行の運動生理学的な特徴が換気性作業閾値の観点からそれぞれ明らかとなった。健康社会の実現を目指した身体運動技法の関心が高まる中、「活動性を高める歩行」に関するこれらの知見は基礎的資料としてトレーニング計画や運動処方立案に役立てられることが大いに期待される。

学位論文審査報告書（甲）

1. 学位論文題目（外国語の場合は和訳を付けること。）

活動的歩行の機械的仕事およびトレッドミル水平負荷牽引歩行の換気性作業閾値に関する研究

2. 論文提出者 (1) 所 属 生命科学 専攻
あずま あきひろ
(2) 氏 名 東 章弘

3. 審査結果の要旨（600～650 字）

歩行の運動量を高めるためには速度の増加が必要であるが、腕振りや歩幅を大きくするなどの活動的歩行やトレッドミル上で水平付負荷を牽引して歩行するトレッドミル牽引負荷歩行により、速度を増加させることなく多くのエネルギーを消費することが可能であると予測される。そこで本論文では、活動的歩行の特徴を機械的仕事の観点からバイオメカニクスの、トレッドミル水平負荷牽引歩行の特徴を換気性作業閾値の観点から運動生理学的に明らかにしている。その結果、活動的歩行は身体重心の振り子のエネルギー変換効率を低くして大きな外的仕事を導くことで、筋活動を増大させる運動であるとわかった。一方、トレッドミル水平負荷牽引歩行は、換気性作業閾値時の酸素消費量が大きく、有効な全身作業性のトレーニング法として有効であった。本論分で示された活動的歩行やトレッドミル牽引負荷歩行に関する新たな知見は、健康で活力ある社会を支援するための運動処方として非常に有効であり新規性に富むと考えられたため、論文審査会では博士学位の授与に相当すると評価された。

4. 審査結果 (1) 判定 (いずれかに○印) ○合格 ・ 不合格
(2) 授与学位 博士 (理学)