

## 4 自 主 研 究



# 高齢者を対象にした足漕ぎ電動アシスト4輪車の評価

## Evaluation of pedaling electric assistance four-wheel vehicle for elderly people

李 虎奎 赤澤康史 原 良昭 北川博巳

LEE Hokyoo, AKAZAWA Yasushi, HARA Yoshiaki, KITAKAWA Hiroshi

### キーワード：

パーソナル・モビリティ、移動支援、下肢、運動障害、身体負担、運動療法

### Keywords:

Personal Mobility, Transportation Support, Lower-limb, Motor impairment, physical load, Exercise therapy

### Abstract:

In order to cope with the unprecedented aging society, elderly persons need to support themselves and maintain their health. Although there are many electric vehicles such as electric wheelchairs or senior cars, few of them maintain the health of elderly person. They sometimes restrict elderly person sphere of activity of daily living. From such a background, we suggest a four-wheel type electric power-assistant personal mobility for care prevention. In order to check the performance of mobile support equipment, we have experimented for twenty healthy elderly people (male 8 and female 12) subjects using this equipment. The purpose of this experimental is to evaluate the physical load of user by the oxygen uptake values while they are running a flat road course and an 8% slope course respectively. Our conviction that the new personal mobility is useful for persons of advanced age was confirmed on the basis of utility evaluation and measurement of load in operating the new personal mobility. These results can be used for the development of mobility support equipment and evaluation methods.

### 1 はじめに

加齢や障害のために下肢機能が低下し、歩行が困難あるいはできなくなった人は、生じた体の機能の障害を回復させるためのアプローチや残った機能の活用や補助具を活用し、できるだけ支障なく日常生活を送れるように技術的手段が講じられることが必要不可欠である。

下肢機能が低下した人たちの日常的な移動を支援する機器としては、杖、歩行器、車いすなどがあり、下肢機能の程度や生活条件に合わせて選択して使用する。

杖や歩行器は、歩行を補助する用具であり、比較的長い距離移動する場合は、身体的負担が大きいこともある。また、場合によっては、転倒のリスクがある。

車いすは、歩行がかなり困難あるいは不可能になった人が使う歩行代替用具といえる。ところで、車いすは、基本的には下肢を動かすことなく移動する機器である。下肢機能が少しでも残っているのであれば、日常生活の中で下肢を動かすことは、下肢機能維持および健康維持のためにも重要であるので、外出支援機器として車いすを選択することが必ずしも最適とはいえない<sup>1)</sup>。

近年、足で駆動して走行する車いすがいくつか開発され、片麻痺者の移動支援機器として、また機能維持機器として有効であるということが報告されている<sup>2)</sup>。しかし、これらはいずれも屋内使用を想定したデザインであり、坂道なども存在する街への外出に適しているとは必ずしも言えない。

本研究では、歩行機能が低下した高齢者等の外出を支援するために、下肢を動かしながら、安全・安心かつ身体的負担の小さい4輪型電動アシスト式移動支援機器を用い、前期・後期高齢者を対象に平坦道路および勾配が8%のスロープを走行する際、身体的負担を計測する。身体負担を評価する酸素摂取

量は、老若男女の体力や健康に関する重要な体力指標として位置づけられる<sup>3)</sup>。身体活動量が増加すると、動作を成立させる筋収縮のエネルギーを生成するために、血管伝導性が上昇する<sup>4)</sup>。エネルギーの生成には酸素が必要となることから、身体への酸素の取り込み量が増加する。運動強度の増加に伴い、酸素摂取量は比例的に増加することから生理的な負担度を評価することが可能である。

本実験では、乗員の身体的負担（酸素摂取量）変化を調べ、運動療法で推奨している身体負担との関係および乗員が呈示したタスクを安全に走行可能か否かについて検討し、高齢者の移動支援機器としての評価を行った。

## 2 システムの概要

本実験に用いた足漕ぎ電動アシスト4輪車を図1に示す。この装置は加齢により、筋力が衰えて歩行能力の低下したり運動感覚機能や瞬発力などが低下したりした高齢者が安全で楽に移動・外出できるように支援するため開発した機器である。通常の自転車のように足を使って駆動しながら走行する方式にしている。本機は従来の2輪型自転車と異なり、ゆっくり発進・走行してもふらつくことがなく、停止しても転倒リスクが少ない上、乗車のまま休憩可能という特徴を持つ。



図1 4輪型電動アシストパーソナル・モビリティ  
Fig. 1 Four-wheel electric power-assisted personal mobility

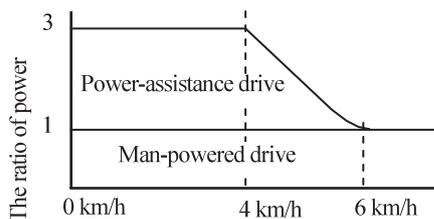


図2 アシスト力の制御方法  
Fig. 2 Control method of power assistance

走行速度制御はペダルを踏む力とアシスト力の比率（アシスト比）で決定するシステム方式である。制御システムは電動車いすの規格を参考にして、アシスト比を調整できるようにした。すなわち、発進から速度4 km/hに達するまでは、ペダルを漕ぐ力1に対して最大で2の力をアシストすることができる。4 km/hを超えるとアシスト力が徐々に減少し、6 km/hではアシスト力が0になるように調整している（図2）。

アシスト力比は3種類の走行モードを設定し、ユーザの内的条件（運動機能・能力）や外的環境に応じて選択することが可能である。例えば、運動機能が低下したユーザがアシスト力を強く設定した場合は、入力（ペダルを漕ぐ力）が弱くてもアシスト力が強いいため急坂の登坂時や強風時などの環境でも走行が楽になる。また走行モードを変えることによりエルゴメーターを用いたトレーニングマシンのように使用することも可能である。

## 3 走行実験

### 3.1 実験方法

装置のサドル高がペダリング運動時の被験者の生体に及ぼす神経・生理学的な影響や関節に及ぼす力学的な影響について考慮すべきである。サドル高を低くすると、膝関節がより屈曲した状態でペダリング運動を行うことになり、膝関節への負担を増大させることが予想される。実験中の障害を未然に防ぐため、各被験者の体型や姿勢に違和感がないようにサドル高の調整を行った。すなわち、サドルの高さは、被験者の膝関節が60°以上になるよう調整を行った（図3と表1）。

被験者に、走行距離1.22kmの平坦路を時速6 kmで、走行距離120mの勾配8%のスロープを時速4 kmで走行してもらう。平坦路の走行時間は12分30秒であり、スロープは1分50秒である。走行時には一定速度を維持するようペダリング運動を行うように口頭で指示した。この条件のもとで、ペダル回転力に対して2倍アシスト力を付加するモード（アシスト力ありモード：以下Aモード）とアシスト力なしモード（以下Nモード）の2種類について実験を行った。また、体幹角度が一定になるようにハンドルの位置を調節し、被験者が実験中どの条件時でもハンドルの同じ位置を握れるようにした。

平坦路走行実験は、兵庫県立総合リハビリテーションセンターの身体障害者自動車運転訓練場で行った。走行実験は、横断勾配の影響が小さい運転

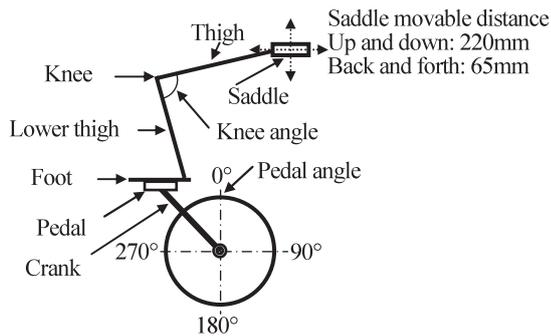


図3 足漕ぎする時の膝の角度  
Fig. 3 The angle of a knee when rowing a pedal

表1 被験者が乗車した時の膝の角度  
Table 1 The angle of knees joint in the subjects seating position

Pedal angle	Left knee angle	Right knee angle
0°	60°	90°
90°	60°	90°
180°	90°	60°
270°	90°	60°

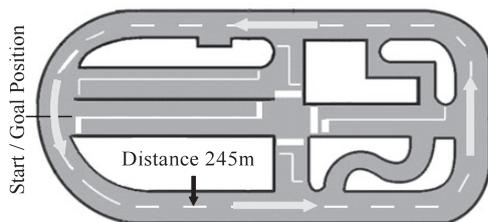


図4 自動車訓練コース  
Fig.4 Car training course imitative chart



図5 スロープコース  
Fig.5 Overview image of slope course

訓練外周コース（図4）で行った。1周の距離は245mである。

スロープ走行実験は、兵庫県立総合リハビリテーションセンターのスポーツ交流間（体育館）に設置された縦断勾配8%の避難路（図5、図6）を使って行った。

いずれの走行実験においても、走行速度を一定とするために、ハンドル型電動車いす（SUZUKI LT4F）を先導させ、先導車に追走するよう被験者に口頭で指示した（図7）。

### 3.2 被験者

本実験を遂行するため当研究所の倫理審査会の承認を得た。また参加された被験者には実験内容を十分に説明し、事前同意を得た。

被験者は病歴がない高齢男性8名、女性12名（平均年齢73.6±6.3歳、平均体重56.4±10.4kg、平均身長155.7±8.7cm）である。

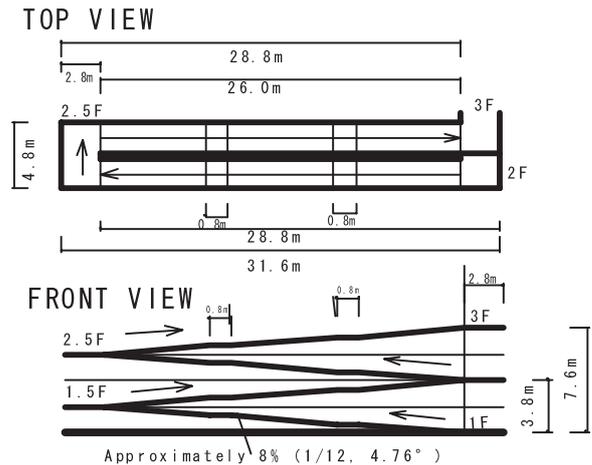


図6 スロープコースの仕様  
Fig. 6 Profile of slope course



(a) Car training course (b) Slope course

図7 実験の様子  
Fig.7 Overview image of experiment

### 3.3 酸素摂取量計測

本実験で、酸素摂取量の計測は携帯型呼吸代謝測定装置（MedGraphics® VO2000）を用いた。酸素分析計の計測精度±0.01%以内で、10秒毎の平均酸素摂取量を計測した。酸素摂取量は、各実験とも、走行実験前後5分間の安静時のデータも収集した。

### 4 実験結果

本実験に参加した被験者20名に対して呈示したタスクを安全・安心に走行可能か否かについて検討し、結果を表2に示す。平坦路のAモード、Nモードともに被験者全員が遂行できた。

表2 被験者の実験結果  
Table 2 Experimental result of subjects

Subject	Sex	Age	Level course		Slope course	
			Non-assistance (time)	Assistance (time)	Non-assistance (time)	Assistance (time)
A	F	70	12:23	12:21	2:08	2:03
B	M	87	12:22	12:20	2:03	2:01
D	M	72	12:20	12:19	1:52	1:51
E	F	75	12:25	12:28	-(8m)	12:05
F	F	75	12:28	12:27	2:01	2:59
G	M	70	12:29	12:28	2:07	2:02
H	F	84	12:38	12:34	-	-(60m)
I	F	75	12:30	12:29	-(90m)	2:05
J	F	79	12:26	12:25	1:58	1:56
K	F	68	12:27	12:27	1:55	1:52
L	F	66	12:25	12:23	1:53	1:51
M	F	75	12:23	12:22	1:55	1:54
N	F	67	12:29	12:28	1:57	1:55
O	M	67	12:28	12:26	1:55	1:53
P	M	71	12:27	12:26	1:50	1:49
Q	F	65	12:28	12:27	1:52	1:51
R	F	66	12:27	12:27	1:49	1:48
S	M	82	12:29	12:28	1:53	1:52
T	M	80	12:22	12:22	1:48	1:47
U	M	79	12:23	12:22	1:47	1:47

スロープのAモードは19名の被験者が走行可能であったが、被験者Hは60mを走行した後、身体的な違和感があるとのことで実験を中断した。Nモードでは、被験者HはAモードときに中断したため走行しなかった。被験者Eは8mを走行した後に実験中断、被験者Iは90mを走行した後に中断したが、それ以外の被験者17名はアシスト力がなくても走行が可能であった。

走行動作負担を客観的に評価するために、走行速度、VO<sub>2</sub>データの分析を行った。本論文では、走行速度、VO<sub>2</sub>については、1名分の代表的データを示した。

被験者が自動車運転訓練場で、6 km/hで先導するハンドル型電動車いすを追走した時に計測された速度および勾配8%の避難スロープを4 km/hの速度で走行した際の速度を図8に示す。両方ともに先導する車いすとほぼ同じ速度が計測された。

平坦路を走行した時の酸素摂取量 (Oxygen uptake以下VO<sub>2</sub>)の経時的变化を図9に示す。Aモードを図9(a)に、Nモードを図9(b)に示す。安静時のアシスト力の有・無モードによる被験者の身体的負荷を示すVO<sub>2</sub>はおよそ0.3 (ml/10sec)を示しており、走行をし始めた同時に0.8 (ml/10sec)上昇し、走

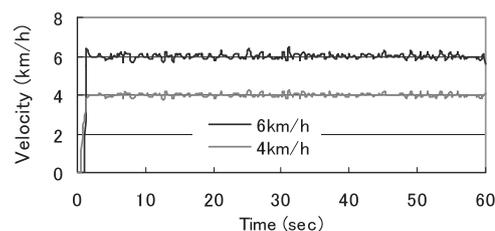


図8 平坦路とスロープコースの走行速度  
Fig. 8 Running velocity of level and slope

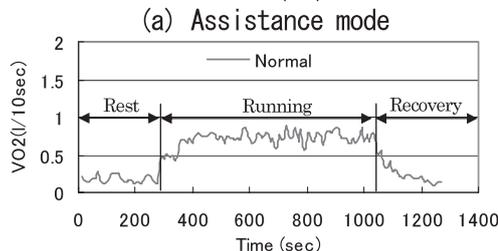
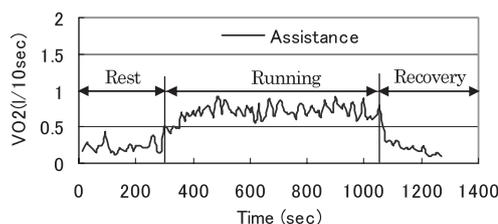


図9 平坦路の酸素摂取量  
Fig. 9 Oxygen uptake on level course

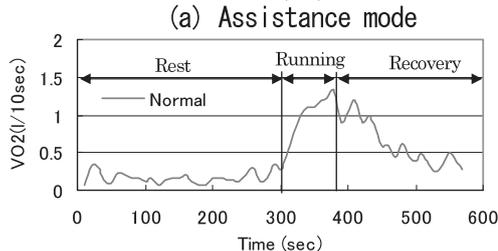
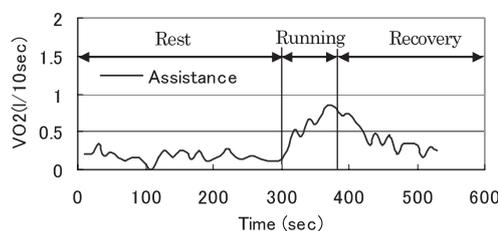


図10 スロープの酸素摂取量  
Fig. 10 Oxygen uptake on slope course

行が終わるまでほぼ一定のVO<sub>2</sub>を示した。走行後から安静時のVO<sub>2</sub>に戻るときの時間もほぼ同じである。

図10に勾配が約8%のスロープを4 km/hで走行した時のVO<sub>2</sub>を示す。Aモードを図10(a)に、Bモードを図10(b)に示す。

Aモードは、走行開始とともにVO<sub>2</sub>が漸増し約40

秒後（走行距離約45m）に安静時のVO<sub>2</sub>の2倍程度になったが、平坦路を走行した際とはほぼ同じ程度まで増大することが見られた。安静時のVO<sub>2</sub>に戻るのに要する時間は平坦路を走行した時とほぼ同じである。

NモードのVO<sub>2</sub>は走行開始時から直線的かつ急激に増加し、120mを完走するまで増大し続けた。完走した時のVO<sub>2</sub>は安静時のVO<sub>2</sub>の3倍を超えるほど増大した。安静時のVO<sub>2</sub>に戻る時間はAモードのほぼ2倍になった。

被験者17名分の平坦路およびスロープ走行実験におけるVO<sub>2</sub>の平均値と標準偏差の計算結果を表3に示し、それをグラフ化したものが図13である。

表3に示した安静時のVO<sub>2</sub>平均値・標準偏差が1.37±0.4 (l/min) である。平坦路をAモードで6 km/hで走行したときのVO<sub>2</sub>は2.96±0.7 (l/min)、BモードのときのVO<sub>2</sub>は3.25±0.6 (l/min) であり、平均値はNモードのほうがわずかに大きい値になった。

スロープ走行の場合は、NモードのVO<sub>2</sub>が有意に増大することが明らかである。VO<sub>2</sub>は1.6倍に増大している。

表3 被験者17名の酸素摂取量  
Table 3 Subjects' oxygen uptake (n=17)

Experimental condition		Oxygen uptake
Rest		1.37±0.4
Level course	Assistance	2.96±0.7
	Normal	3.25±0.6
Slope course	Assistance	2.72±0.4
	Normal	4.31±0.6

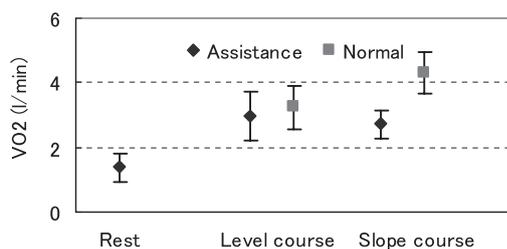


図11 安静時、平坦路、スロープの酸素摂取量  
Fig. 11 Oxygen uptake on rest, level course and slope course

## 5 考察

収集したVO<sub>2</sub>データをもとに、65～87歳の男・女性健康高齢者が、移動支援機器を用いて、平坦路や勾配8%のスロープを走行するときの身体的な負担について検討した。

表3に示した17名の安静時のVO<sub>2</sub>平均値・標準偏

差が1.37±0.4 (l/min) であったが、Aモードで平坦路を6 km/hで走行したときのVO<sub>2</sub>は2.96±0.7 (l/min) であり、NモードのときのVO<sub>2</sub>は3.25±0.6 (l/min) であった。平坦路では、AモードとNモードとでVO<sub>2</sub>の平均値についてはわずかな差があるものの有意差（危険率5%）はない。

勾配8%の均一なスロープを時速4 km/hで走行する実験は、運動強度が一定である実験条件を設定することによって、VO<sub>2</sub>に関するより正確な定量的データが収集できる<sup>5)</sup>。

勾配8%のスロープ走行実験においては、Aモードは、走行開始から約45m走行までVO<sub>2</sub>は漸増し、安静時の約2倍になり、その後は緩やかに増大する傾向を示した（図10 (a)）。単位距離あたりのペダル回転数は平坦路を6 km/hで走行したときの66%であることを考慮すれば、VO<sub>2</sub>の増大は、身体の内部的な仕事によるものより外部的な負荷による影響<sup>6)</sup>に起因したと考えられる。運動強度が一定で、均一速度で走行することは一定負荷になり、安定域に達するまではVO<sub>2</sub>が連続かつ直線的な増加傾向<sup>7)</sup>を示したと考えられる。

一方、Nモードは、走行距離120mを完走するまでVO<sub>2</sub>は直線的に増加し続け（図10 (b)）、最終的に、VO<sub>2</sub>は安静時の3倍にまで増大した。勾配8%（約4.5°）程度のスロープを移動支援機器で走行するとき、アシスト力がないと、身体的な負荷が非常にハードなレベルまで到達すると考えられ、高齢者や心血管系疾患を有する人の場合は、安全性の面から考えると好ましくない<sup>3)</sup>と考えなければならない。

電動アシスト力でのスロープ走行は、平坦路を走行するのと同程度の負担であることから、低強度の有酸素運動になると推測することができる<sup>8)</sup>。有酸素運動トレーニングは、健康維持・増進または心血管系疾患や脳血管障害者の歩行能力を向上させるという強い根拠があり<sup>9)</sup>、また有酸素性を向上させる有益な訓練法である<sup>10)</sup>。

高齢者や心血管系疾患を有する人の身体運動とトレーニングの運動処方では、生理学的根拠に基づいて個人に適した運動の種類、運動強度、頻度、持続時間を決定する必要がある<sup>11)</sup>。運動強度は危険因子の保有者、心血管系疾患の疑いのある者、身体性の低い者、虚弱な高齢者などの運動の危険度の高い者に対しては、VO<sub>2</sub>および心拍数を用いた身体負担の40%程度の低強度の運動負荷が適切であるといわれている<sup>8)</sup>。

本研究で提案した移動支援機器は、勾配8%のスロープにおいても利用者の身体的負担が少なく円滑な走行が可能であることが走行実験によって客観的

に示された。さらに、歩行機能が低下した高齢者、脳血管障害等による運動機能障害を有する人たちの日常的な外出支援機器として有効であると思われる。また、外出することにより足腰の適度な運動になり、身体機能の維持・向上に寄与することが期待できる。

## 6 おわりに

本研究では、足腰を動かすことができるものの、運動機能の低下によって歩行が困難になった高齢者や運動機能障害を有する人たちの外出を支援するため、前・後期高齢者を対象に平坦路と勾配8%のスロープを走行するときの身体的負担の評価尺度となる酸素摂取量を計測し分析した。得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 本実験で呈示した平坦路走行は被験者全員が安全に遂行できたが、勾配8%のスロープでは3名の被験者が身体的違和感により実験を中断した。
- 2) 平坦路を6 km/hで、走行距離1.2kmを12分30秒間走行するときのVO<sub>2</sub>は、Aモード・Nモードで有意差はなかった。
- 3) 提案した移動支援機器は、アシスト力を使った場合は、勾配8%スロープにおいても利用者の身体的負担が少なく円滑な走行が可能であることが走行実験によって客観的に示された。
- 4) 本機のような移動支援機器は、歩行機能が低下した高齢者、脳血管障害等による運動機能障害を有する人たちの日常的な外出支援機器として有効である。また、外出することにより足腰の適度な運動になり、身体機能の維持・向上に寄与することが期待できる。

## 謝 辞

本研究を推進する際、ご協力頂きました被験者の皆様、また実験装置にご協力頂きました株式会社カワムラサイクルに深く謝意を表す。

## 参考文献

- 1) Nihei M., Inoue T., Mochizuki M., Yamaki C., Kusunaga T., Fujie M. and Asakatsu G.: Proposition of Development Concept of Mobility Aids Based on Psychological Model of Older Persons, JSME C, 73-725, pp. 226-273, 2007.
- 2) 元田英一、太田一重、木村宏樹、佐藤鉄朗、片麻痺用足こぎ車椅子の開発、第24回日本義肢装具学会学術大会講演集、pp124-125, 2008.
- 3) Ministry of Health, Labour and Welfare of Japan: Exercise and Physical Activity Guide for Health Promotion 2006, Exercise Guide 2006.
- 4) Sheriff, D.D., Rowell, L.B. and Scher, A.M.: Is Rapid Rise in Vascular Conductance at Onset of Dynamic Exercise Due to Muscle Pump?, Am J. Physiol. 265-4, pp. 1227-1234, 1993.
- 5) Myers, J., Buchanan, N., Walsh, D., Kraemer, M., McAuley, P., Hamilton-Wessler M. and Froelicher, V.F.: Comparison of the Ramp Versus Standard Exercise Protocols, J Am Coll Cardiol. 17-6, pp. 1334-1342, 1991.
- 6) Minetti, A.E., Pinkerton, J. and Zamparo, P.: From Bipedalism to Bicyclism: Evolution in Energetics and Biomechanics of Historic Bi-cycles, Proc. of the Royal Society B 268, pp. 1351-1360, 2001.
- 7) Whipp, B.J., Davis, J.A., Torres, F. and Wasserman, K.: A Test to Determine Parameters of Aerobic Function During Exercise, J. Appl. Physiol. 50-1, pp.217-221, 1981.
- 8) American College of Sports Medicine Position Stand. The Recommended Quantity and Quality of Exercise for Developing and Maintaining Cardiorespiratory and Muscular Fitness, and Flexibility in Healthy Adults., Med Sci Sports Exerc. 30-6, pp. 975-991, 1998.
- 9) Saunders, D.H., Greig, C.A., Young, A. and Mead, G.E.: Physical Fitness Training for Stroke Patients, Cochrane Database Syst Rev 2004 (1) : CD003316.
- 10) Pang, M.Y., Eng, J.J., Dawson, A.S. and Gylfadottir, S.: The Use of Aerobic Exercise Training in Improving Aerobic Capacity in Individuals with Stroke : a meta-analysis, Clin Rehabil, 20-2, pp. 97-111, 2006.
- 11) Yun, J.Y.: Exercise Testing and Prescription, Hanyang Medical Reviews, Vol. 29, No.1, pp. 20-27, 2009.