

スクワット支援機の開発

Development of squatting assist device

○張 揚 (大分大) 吉規 悠太 (大分大)
 永利 益嗣 (大分大) 三浦 篤義 (大分大)
 山内 潤一郎 (首都大) 今戸 啓二 (大分大)
 You CHO, Oita University Yuta YOSHIKI, Oita University
 Masuji NAGATOSHI, Oita University Atsuyoshi MIURA, Oita University
 Junichiro YAMAUCHI, Tokyo Metropolitan University
 Keiji IMADO, Oita University

Abstract: Squat training has high effect on strengthening lower extremity muscle groups. But it is difficult for the elderly with lower extremity strength weakened to do a squat training. So, we developed a simple squatting assist device by which anyone can squat easily. The device uses the Scott-Russel mechanism combined with rubber belts and a geared motor to obtain vertical assist movement for squatting subject. The speed of the device can be changed easily according to the demand of a subject. Assist force was evaluated by the ground reaction force. The device might be useful for the elderly to strengthen their lower extremity muscle groups and postural control ability.

Keywords: Squat, Power assist, Scott-Russel mechanism

1.はじめに

高齢者では下肢筋力が低下すると、立ち上がりが困難になるほか、転倒し、骨折に至ることで臥床生活になる危険性が増す。適切な運動をしなければ、筋・骨格系・呼吸循環系、神経系などの器官・組織は退化する。一般に加齢に伴い運動能力は低下し、運動不足がちとなることで、体全体の機能は次第に低下していく。高齢者にとって健康的で活動的な生活を維持するためには、適切な運動が必要であり、筋トレなどで筋力アップする必要がある。なかでもスクワットは大腿四頭筋、大殿筋などの下半身の筋力アップのできる優れた運動である。しかしながら、筋力の衰えた高齢者がスクワットすることは負担が大きく困難な場合が多い。我々は筋力が弱い人でもスクワットによる筋トレを支援する装置を開発している⁽¹⁾⁽²⁾。ギヤドモータを速度制御することで、遅い運動から速い運動までソフト的にカバーできる。本研究では運動中の床反力と頭部の鉛直方向速度より下肢筋力パワーを求め、毎分当たりの消費エネルギーを評価した。本論文はその概要について報告する。

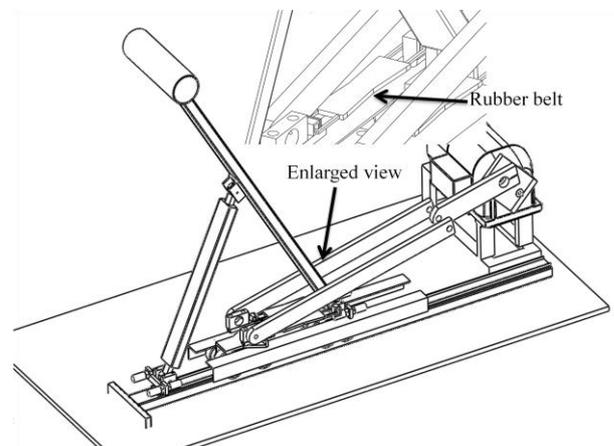


Fig.1 Model of squatting assist device

2.実験方法

図1に支援機の構造を示す。駆動には出力200Wのギヤドモータを用いた。モータの回転はクランク機構で往復動に変換し、ゴムベルトを介したスコットラッセル機構により座面の上下動に変換した。ゴムベルトは被験者の不安定な運動を吸収させるためにある。図2に実験法を示す。被験者は体重57kg、身長1.68m、年齢23歳の健常男性である。被験者は直径65.5mmの樹脂パイプの周囲にスポンジを巻いた座面に体重の一部を預け、支援機の動きに同期してスクワットする。被験者は赤外線反射板を貼り付けたヘルメットを被り、レーザードップラー振動計によりスクワット速度V、床反力計で床反力Fを測定した。

そしてゴムベルトを4本に設定し、モータの回転数は40r/minと60r/minの2種類について座面が一番高い時を起点とし、3試技分のスクワットデータを記録した。

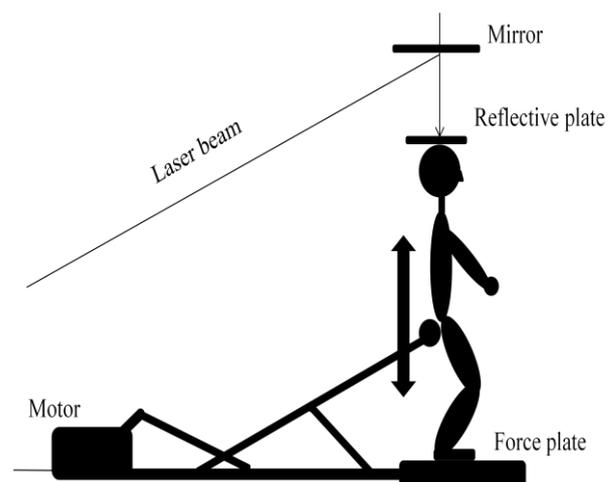


Fig.2 Experimental methodology

3. 実験結果と考察

図3と図4に実験結果を示す。

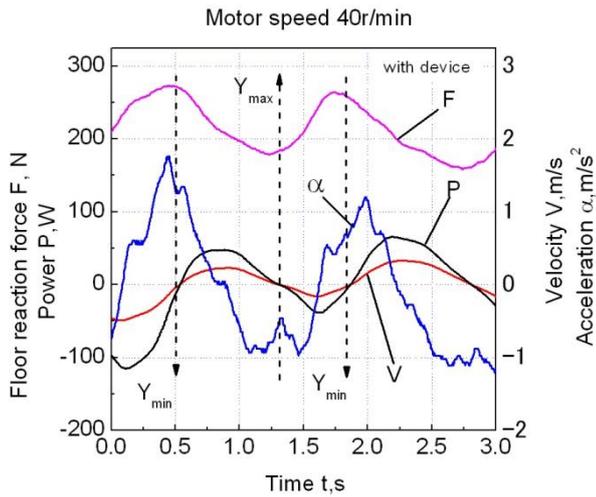


Fig.3 Time-Power relation and Time-Force relation and Time-Velocity relation and Time-Acceleration

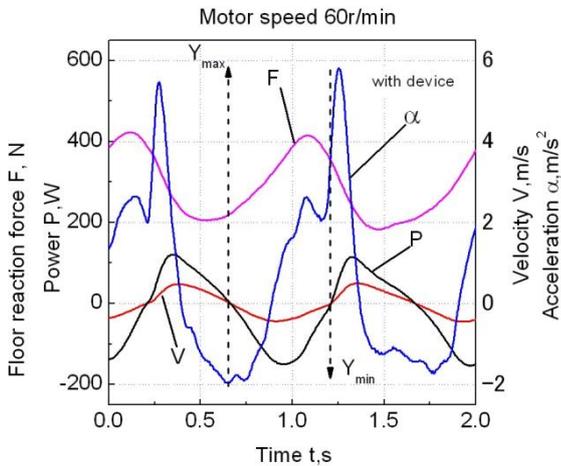


Fig.4 Time-Power relation and Time-Force relation and Time-Velocity relation and Time-Acceleration

図3と4により、座面変位 Y が最小 Y_{\min} の時、床反力 F が最大値となり、加速度 α も最大値となる。一方、座面変位 Y が最大 Y_{\max} の時、床反力 F が最小値となり、加速度 α も最小値となる。そして座面変位最大と最小の時速度が 0 であるため、パワー P は 0 となる。図より Y_{\max} から Y_{\min} 、即ちスクワットのしゃがみこみに伴い床反力 F は増大し、加速度 α は正の方向に増大する。逆に、立ち上がりに伴い、床反力 F は減少するが、パワーは立ち上がりの途中で最大となる。

モータの回転数 40r/min で支援機を使った場合、消費エネルギーは 0.84 kJ/min であったが、60r/min では 2.02 kJ/min と 1.18 kJ/min 増加した。実験データを考察するため、スクワット運動を振幅 a 、角速度 ω の正弦波でモデル化した場合の速度 V と加速度 α は、

$$V = a\omega \cos \omega t \quad \alpha = -a\omega^2 \sin \omega t \quad (1)$$

となる。重力加速度を g 、被験者の質量を m とすると、モデルによる床反力 F は、

$$F = m(g + \alpha) = m(g - a\omega^2 \sin \omega t) \quad (2)$$

となる。(1)、(2)よりスクワットに必要なパワー P は、

$$P = FV = ma\omega(g - a\omega^2 \sin \omega t) \cos \omega t \quad (3)$$

となる。1周期について(3)で表わされるパワー P が正となる範囲を時間で積分すると、一回のスクワットで消費されるエネルギー W_s が求まる。 W_s に1分間当たりのスクワット回数に乗じれば1分間当たりの消費エネルギーが分かる。被験者 A の体重 57kg、振幅 $a=0.1\text{m}$ 、 $g=9.8\text{m/s}^2$ を代入し、 $N=40\text{r/min}$ と $N=60\text{r/min}$ でスクワットを一分間行うことによるモデルによる消費エネルギーを求める。結果は $N=40\text{r/min}$ では $W=4.46\text{kJ}$ 、 $N=60\text{r/min}$ では $W=6.68\text{kJ}$ となる。実際に被験者 A の支援機無しでスクワットした際の床反力 F と速度 V より消費エネルギーを算出すると、3.50kJ となりモデルの方が実験値より約 25%程度大きくなる。

ここで図5に速度60r/minのときの単純モデルによる速度 V 、加速度 α 、床反力 F 、パワー P の時間的変化を示す。

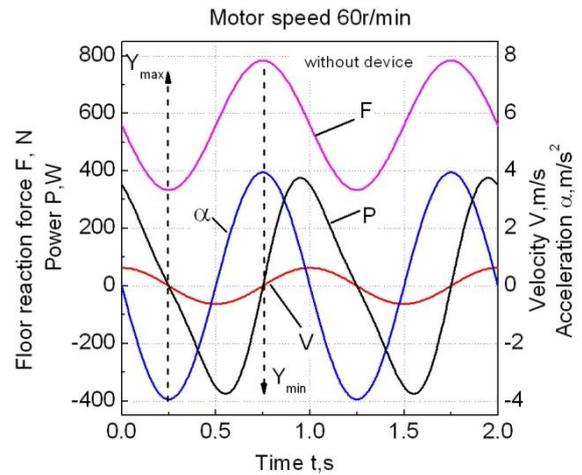


Fig.5 Time-Power relation and Time-Force relation and Time-Velocity relation and Time-Acceleration

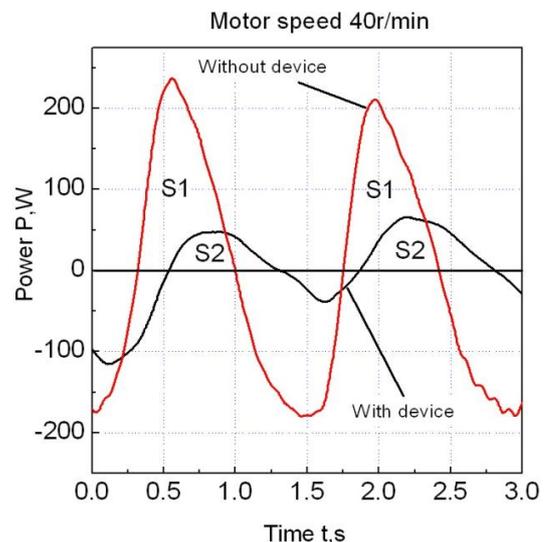


Fig.6 Time-Power relation

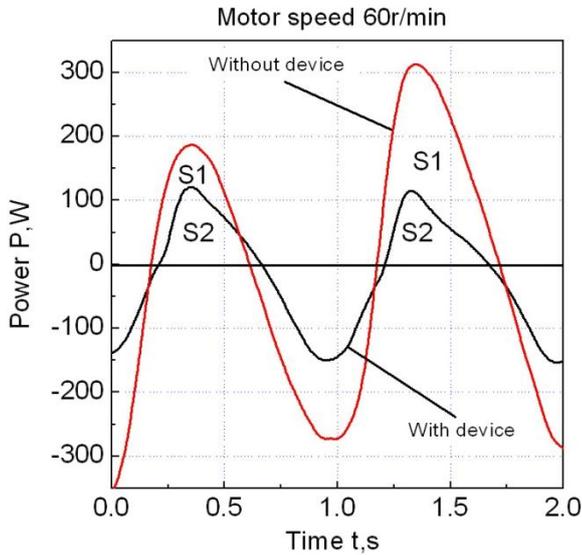


Fig.7 Time-Power relation

図6, 7にモータ回転数 $N=40\text{r/min}$ と 60r/min とした時の支援機の有無によるパワーの違いを示す。それぞれの波形と $P=0$ で囲まれた面積のうち、正の部分は消費エネルギーとなる。図中の S1 は支援機を使わない時の消費エネルギーで、S2 は支援機を使う時の消費エネルギーである。S1 と S2 の差が支援機に負担された消費エネルギーとなる。そして図を見ると 40r/min より 60r/min のほうが面積の差が小さいことがわかる。このことから、 60r/min の時支援機負担された消費エネルギーが減少したことがわかった。また、図6,7と同様の結果から消費エネルギーの平均値を求めた。モータ回転数 40r/min で、支援機を使った場合、消費エネルギーは 0.90kJ であったが、支援機を使わない時は 3.50J となった。従って1分間当たり 2.60kJ のエネルギーを支援機により受けていることになる。即ち、支援機は74%の消費エネルギーを負担しており、被験者は必要なエネルギーの僅か26%のエネルギーでスクワットをしていることになる。図7では $N=60\text{r/min}$ の場合、支援機を使った時の消費エネルギーは 2.27kJ であったが、支援機を使わない時の消費エネルギーは 5.42kJ であった。よって、支援機を使った場合 3.15kJ の消費エネルギーが減少したことがわかる。このことから、支援機は58%の消費エネルギーを負担しており、自己負担率は42%となることがわかった。以上の結果を表1にまとめて示す。表1を図で表すと図8となる。

Table 1 Mean energy required to squat 1 min. (Subject's weight $m=57\text{ kg}$)

	40 r/min	60 r/min	rate(60/40)
Model, kJ/min	4.46	6.68	1.50
Experimental value, kJ/min	3.50	5.42	1.55
With Assist, kJ/min	0.90	2.27	2.51
Device support rate	0.74	0.58	0.78
Self support rate	0.26	0.42	1.62

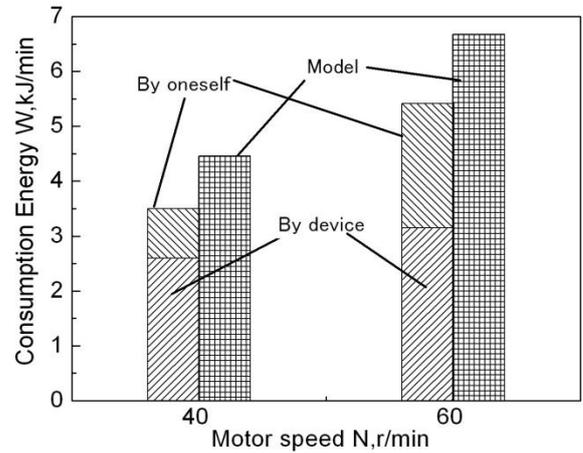


Fig.8 Consumption energy and motor speed relation

つぎに(3)で求まるモデルの運動に必要なパワーの大きさについて考察する。(3)の時間的変化を体重 $m=57\text{kg}$ について計算した結果を図9に示す。図より 40r/min と 60r/min でのパワー P の最大値はそれぞれ 238W , 375W となる。一方、モータの定格出力は 200W であるため、最も大きなパワーが必要な時点において、理論上支援機が支援可能なパワーはそれぞれ 84% , 53% となる。従って、回転数が大きくなるほど、支援機による支援可能な割合は小さくなる。そのため表2から分かるように、 60r/min での支援機の負担割合は、 40r/min と比較して小さくなる。このことは先ほど実験結果から述べたことと一致している。

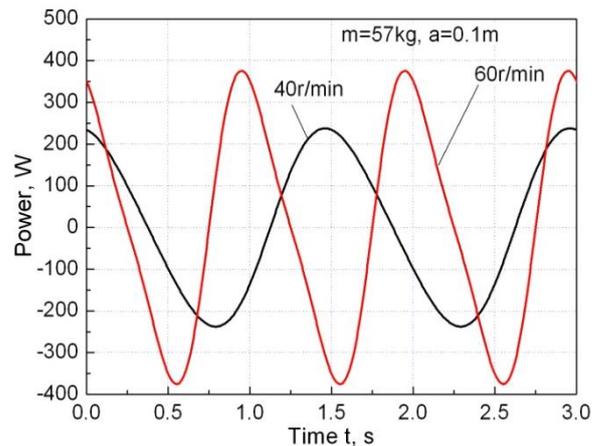


Fig.9 Time-Power relation

4. 結論

スクワット速度の増加に伴い消費エネルギーは増加する。スクワット速度の増加に伴い装置による支援率は低下し、自己負担率は増加した。体重と同じ質量が調和振動する単純モデルと実験値を比較した結果、単純モデルによる消費エネルギーは、実験値より約25%程度大きくなった。

5. 参考文献

- (1) 今戸 他：スクワット支援装置の開発，生活生命支援医療福祉工学系学会連合大会 2010 講演論 (WWLS2010) CD-ROM, 1D2-1 p.117-118.
- (2) 張 他：関西支部 第88期定時総会講演会講演論文集, 2013, 1019 GS-2 p.10-20.