発電機構を利用した高齢者向け 筋力測定およびトレーニング装置の開発*

柳原 聖^{*1}, 龍 勝之^{*2}, 三原徳馬^{*3}, 土屋健介^{*4}

Development of Measuring and Training System by Using Electric Dynamometer for Old Age People

Kiyoshi YANAGIHARA^{*1}, Katsuyuki RYU,
Tokuma MIHARA and Kensuke TSUCHIYA

^{*1} Ariake National College of Technology, Dept. of Mechanical Engineering
Higashi-hagio-cho 150, Omuta-shi, Fukuoka, 836-8585 Japan

New measuring and training method of muscle power for senior age, that utilizes small 'electric generator' instead of 'spring force', is described in this paper. Our study clarifies that this method can measure not only the muscle power, but also the reflection time and the muscle strength without any physical stress on senior aged subject. Meanwhile, another advantage of employing electric generator is that generator can electrically produce regeneration resistance as the load for rehabilitation. This paper also describes whether the developed system can be applied for physical training. With a view of physiotherapist, various investigations were executed. The evidences show the efficiency of the developed training method and the developed system.

Key Words : Medical and Welfare Assistance, Biomechanics , Muscle and Skeleton , Human Engineering , Measurement

1. 緒 論

著者らの所属機関が所在する福岡県大牟田市は高齢化率が 30%に迫っており、全国の市部の中でも急速な高齢社会を迎えつつある。このため高齢者の健やかな生活を支援することは地域の大きな課題となっている。

個人の健康を示す指標としては体力測定がある。文部科学省が平成 12 年にとりまとめた新体力テスト⁽¹⁾によると、高齢者 (65 歳以上) の体力測定においては、被験者の安全を考慮して ADL (Activity of Daily Living) テストが用いられている。このテストの筋力評価の一つとして握力測定がある。理由は統計的に握力が全身の筋力 (最大発揮力) に比例しているからである。現在、握力の測定においては、機器の使い易さなどからスメドレー式の握力計が利用されている。スメドレー式握力計はバネを利用してフックの法則に則りながら「物を手のひらで握る際の筋群の最大発揮力を同定する測定器」である。しかし、この測定法においては、筋力を発揮する際に極度の筋緊張をとめないながら力をこめてしまう動作 (努責動作) が生じてしまいがちで、高齢の被験者によっては負担を感じたり、場合によっては危険な事態も生じうる。

そこで、本研究においては、まずスメドレー式を高齢者に適用した際の被験者への負担を明らかにする。そして、フックの法則に依存したスメドレー式の測定手法を見直し、小型発電機を利用した計測手法を提案し、被験者への身体的負担の有無について明らかにする。さらに提案した小型発電機の回生抵抗を利用したトレーニング手法とその有効性を検証しながら、従来は計測という一つの機能しか提供できなかった体力測定用の機器に対して、メカトロニクス応用により新しい機能を提供できることを示す。

* 原稿受付 2010 年 8 月 9 日

^{*1} 正員, 有明工業高等専門学校 (〒836-8585 福岡県大牟田市東萩尾町 150)

^{*2} 有明工業高等専門学校専攻科 (現: 三菱重工(株)高砂製作所)

^{*3} 学生員, 有明工業高等専門学校専攻科

^{*4} 正員, 東京大学生産技術研究所

E-mail: kiyoshi@mame.me.ariake-nct.ac.jp

Fig. 1 Blood pressure changes in grasping force measure by using Smedley type dynamo.

2. 握力計測の被験者への身体的負担

スmedレー式握力計を利用した高齢者の握力計測において、その身体的負担を表した一例を図1に示す。図では、80歳男性と38歳男性を被験者の握力計測直前直後の血圧を示している。図から38歳男性被験者においては計測後の大きな血圧の変化は認められないが、80代男性においては最高血圧が握力計測後に上昇し、握力試験で生じた身体的負担が試験後も持続されてしまっていることがわかる。

そこで、高齢者の健康管理を支援するためには、より身体に負担をかけない軽い負荷による握力計測法が望まれる。本研究では、自動車の出力計測に用いられるシャシーダイナモの計測原理に着目して、小型の発電機を利用しながら物を把握するための動力を計測することを考えた。

Fig.2 Measuring system

Fig.3 Measured voltage (female Age 75 subject)

3. 小型発電機を利用した把握力測定法の提案

3・1 測定装置の概要

提案する測定装置の概要を図2に示す. 本実験においては市販の携帯電話充電用発電機 (株) ウィリアムテレコム製, ハンドヘルドダイナモメータ) を改造して利用した. このダイナモメータにはストローク量 20mm のレバーが付いており, 被験者が図2中のようにレバーを握り, PC にて提示される測定開始の合図とともにレバー部を出来る限り素早い動作で握ると, ラック&ピニオンを利用した機構によって動力が伝達される. この動力によって慣性モーメント $3 \cdot 10^{-4} \text{N} \cdot \text{m}$ のロータが回転し, その回転数に応じた電圧が生ずる.

ここで, レバーを速度 V でストロークさせた握力を F として, この動力 P が慣性モーメント I のロータを, トルク T , 角速度 ω で回転させた場合は, 次の関係が成り立つことになる.

$$P = T \cdot \omega = I \cdot \omega \cdot (d\omega/dt) = F \cdot V \quad (1)$$

このようにダイナモメータを利用すれば, 被験者の物を把握するための筋群の筋パワー (動力) に比例した電圧波形が得られることになる. この電圧波形を PC で記録し解析する. 測定は5歳から80歳までの男女7名に行う.

ところで, 動力は力×速度による物理量である. 従来の握力計では“力”にあたる最大発揮力のみが計測されていたが, 本実験装置ではパワー計測を行うことになる. よって, 握力ではなく手の把握動作による動力であるからこれを把握力と定義する. なお, 実験装置ではレバーをストロークさせるために最小で 5.49[N]の握力が必要である. 被験者への負担は低く, 血圧上昇を引き起こす努責動作を誘発することはない負荷と考えられる. ただし, 筋への負荷はほぼ一定とみなせるため, 筋収縮の速度を被験者が最大限発揮するような計測をしなければパワーの違いを確認できなくなる. そこで, 把握力計測においては出来る限り素早い動作でレバーをストロークさせるように被験者へ要請しなければならない.

3・2 実験結果

このようにして得られた把握力の一例を図3に示す. 測定開始が原点になるが, 開始から約 0.3s 遅れて電圧が上昇し, その後下降に転じていることがわかる. この 0.3s までの時間が被験者の反射能力を示すことになる. そして, 筋パワーに応じてロータが加速されるために加速度に応じて出力が得られる.

ダイナモメータはレバーをストロークさせ終わるとクラッチが切断されて動力が伝達されない構造になっている. このため被験者がレバーを握り込みロータの加速を終えると, ロータは蓄えられた慣性力のみで自転し, ダイナモ内部の機械的な抵抗に応じて減速しはじめ, 起電力も次第に減ってゆくことになる.

最初に5歳から80歳までの被験者の握力計による握力とダイナモメータ最大出力電圧の相関を調査した. 理由は本実験装置で計測されるデータは筋パワーであるが, 握力のほうが一般的な理解を促しやすく, 両者の相関から握力を推定できれば有益と考えられたからである. 結果を図4に示す. 図より良好な相関が得られており, 本実験装置で得られる最大出力電圧から, 被験者の握力を推定できる.

Fig.4 Gripping force V.S. Peak Voltage

Fig.5 Differential coefficient of measured voltage

(a) female age 75

(b) male age 80

Fig. 6 Blood pressure changes in grasping force measure by using newly developed hand-held dynamo.

ところで、図3の出力電圧の過渡状態は、筋パワーの変化を示しており、レバー操作負荷が一定と考えると被験者の筋収縮の速度変化を示していることになる。このとき電力の立ち上がりから最大値までの傾き、すなわち筋群の収縮における加速度が急峻であればあるほど、とっさの時に素早い筋収縮によって周囲の物などを掴める可能性が高いと考えられよう。図5では5歳から75歳までの5名の女性被験者の出力電圧の立ち上がり時の直線近似を行い、そのときの係数をまとめたものである。図中項目の数字は被験者の年齢を表し、Fは女性を意味する。把握力計測は両手左右で行い、それぞれの係数をRight, Leftで示している。図より75歳女性の把握力は11歳女性と同程度であることがわかる。ちなみに、両者の体重は11歳女性が294[N]に対して75歳女性は490[N]である。よって、75歳女性の場合はとっさの場合に手すりなどを掴んで転倒を防ごうとしても、自身の転倒モーメントを支えるほどの把握力を瞬間的に発揮できずに転倒に至る可能性が11歳女性よりも高いと考えられる。

3・3 提案した測定法の安全性の検証

最後に、提案した本測定法が被験者に与える負担を検証する。図6は実験直前直後の被験者の血圧を示したものである。75歳女性、80歳男性のいずれにおいても大きな血圧の変化はなく、負担が少ない測定法であることが示された。

Fig. 7 Illustration of measurement of regeneration resistance of generator

Fig.8 Lever stroke resistance V.S. circuit resistance

System provides
 1.Measuring mode and 2.Training mode.
 Mode 1: Measure voltage to measure muscle power
 Mode 2: Set regenerative resistance to train muscles

Fig.9 Illustration of developed system

4. 回生抵抗によるトレーニングモード機能の実現

4・1 回生抵抗とレバー操作負荷の確認

発電機は発電時に回生抵抗を生じさせることができる。この回生抵抗を上手く利用できれば、被験者の筋力に応じたトレーニング機能を実現できる。このようなトレーニング機能を実現するためには、発電機の回生抵抗によってどの程度入力部のレバーに負荷を生じさせることができるかを確認する必要がある。そこで、図7のように入力装置を治具で固定し、バネばかりを利用して準静的に入力部レバー引っ張ることで回生抵抗を計測した。結果を図8に示す。図から発電機に付与した抵抗が増加するに従い、レバー操作の初動負荷が7.2Nから徐々に減少しており、約20Ωの抵抗値で5Nの初動負荷に収束していることが理解できる。したがって発電機に0から20Ωの抵抗を付与すれば被験者の筋の能力に応じて5Nから7.2Nの間で任意の負荷を生じさせられることが理解できる。つまり、発電機に接続する抵抗を制御すれば、被験者の筋の能力によって負荷を選択できる装置が実現できることになる。図9は、図1の計測システムに加えて回生抵抗の制御装置を付加して製作した高齢者用把握動作機能維持訓練システムである。このシステムでは発電電圧の計測による把握力の動的計測のためのモードと、レバー操作時に回生抵抗を生じさせて筋パワーを鍛錬するためのモードを選択できる。次節以降はこのトレーニングモードについて有効性を検証する。

4・2 高齢者筋パワー向上効果の検証

高齢者への筋パワートレーニング効果を検証するにあたっては、過度の負荷を筋に与えずに無理のない範囲で継続的な機能向上を図れる機器が望ましい。体力テスト実施においては収縮期血圧160mmHg未満、拡張期血圧95mmHg未満、脈拍数100拍/min以下であることが基準として記載されている⁽¹⁾。よって本研究においてもその基準に準拠できる運動負荷を検討した。その結果、図8の結果を基に発電機に接続する抵抗値を被験者の使用後の意見なども参考にして4段階選び、レバー操作のための負荷強度として普通(∞Ω)、やや強い(19Ω)、強い(8.5Ω)、すごく強い(0Ω)を設定した。

被験者は、この4段階の負荷強度をその日の体調にあわせて選び、瞬発的な筋パワーをトレーニングできるようにレバーを素早くストロークさせて把握動作のトレーニングを行う。負荷の設定としては強度を最初に「すごく強い」に設定して、疲労によって「強い」などより軽い強度の設定へ変えても構わないことにした。そして、それぞれの強度で一日に何回レバーを操作したかを積算し記録した。このようなトレーニング手法を用い

Fig.10 Lever strokes per day of 81 age female subject in grasping training of left hand

て 59 歳女性と 81 歳女性に対して、把握力向上を目的とした 28 日間のトレーニング実験を行った。81 歳女性左手の一日あたりのレバー操作回数を記録したものが図 10 になる。なお、この実験においては 81 歳被験者と 59 歳被験者の平静時の収縮期血圧はそれぞれ 110, 118mmHg であり、1 回のレバー操作後に血圧に変化がなく、努責動作をとまなわないう軽度の負荷であることを確認し実験を行っている。

この図においては、最前列のデータが 4 段階の負荷のうち最も強い強度を選択してレバー操作をした回数になり、後列のデータになるほど前列より弱い強度を設定してレバー操作した回数になる。最後列は一日の総レバー操作回数になる。図をみると、トータルレバー操作回数が、日を迫る毎に増加しており、またその日ごとの内訳を見るとそれぞれの設定強度において操作回数が日々増加しているのがわかる。レバー操作の回数が増えていることは、筋パワーのみならず筋力や筋持久力の向上がなされている可能性が高い。

文献^{(2),(3),(4),(5)}によれば、低い負荷のトレーニングであっても動作のスピードあるいは動作ピッチの増大を心がければ最大発揮力は増大するとの報告がある。よって、前記のような筋パワー向上を主眼とした操作回数の増加が、筋力の向上に繋がっている可能性がある。そこで、このことを他の計測方法でも裏付けられるようにするため、トレーニング開始から一週間毎の被験者の握力を市販の握力計により計測した。結果を図 11 に示す。ここでは、比較のため 59 歳女性に同様の試験を行った結果も示している。結果を見ると、左右それぞれの握力に対してのトレーニング効果に関して若干の程度差は認められるが、概ね訓練開始時から 1 週間目で握力が大きく向上し、そのあと微増している。

Fig.11 Gripping force changes every week from the start of this experiment (measured with Smedley dynamo.)

4・3 リハビリテーションへの適用

このようなトレーニング手法を右手前腕のしびれにより握力の低下が認められていた 83 歳男性に適用した。この男性は 2008 年の夏頃から肘部管症候群によって右手第 4 指、第 5 指に軽度の麻痺が生じてその後手術を受けた。図 12 は手術後に前節と同様のトレーニングをリハビリとして行い、1 日毎のレバー操作回数を記録したものである。一般に適切な運動処方術後の筋力回復を促進する^{(6),(7)}。当然、レバー操作回数の向上が見込まれており、図 10 と同様にレバーの操作回数は日を迫る毎に増加した。ここでも開発した装置による計測と平行して従来の握力計による測定も行ったが(図 13)、手術により筋力が一時的に減少したあと、術後は本リハビリの効果により回復傾向が促進されていると考えられる。

Fig.12 Lever strokes per day of 83 years old male subject in grasping rehabilitation of right hand

Fig.13 Gripping force of left hand of 83 years old male subject per day by Smedley type dynamometer

(a) after 20 days from operation ('09 Aug. 12) (b) after 2 months with rehabilitation ('09 Oct. 14)

Fig.14 MRI Images before and after rehabilitation from operation

そこで、この男性被験者の右前腕部について MRI による断層写真を撮影し、リハビリの効果について確認することにした。図 14 (a)が手術後 20 日ほど経過したときで、(b)がリハビリ開始から 2 ヶ月経過したときのものである。MR I 画像は肘部から手首方向に対して 10cm のところの断面を比較している。比較においては画像解析ソフトウェア OsiriX によって把握動作機能に必要な前腕の内側の筋肉（杵線内部）の断面積を求めている。図から筋肉の断面積は増加しており、トレーニングの効果が示唆される。

5. 結 論

高齢者に身体的負担をかけずに、筋力（本研究では握力）を簡便に計測し、またトレーニングするために小型発電機を利用した把握力計測法およびトレーニング装置を提案した。得られた結果を下記に記す。

- (1) 小型発電機を利用した計測法の場合は、フックの法則に依存した従来の方法と比較して長い時間努責動作をとみなわないので高齢者への身体的負担がない。
- (2) ハンドヘルドダイナモメータの出力電圧(筋パワー)と被験者の筋力（握力）は良好な相関を示し、出力電圧から握力を推定できる。
- (3) 提案した測定計で、筋力のみならず筋パワーの動的な変化を把握することができる。
- (4) ハンドヘルドダイナモメータに 0~20Ω の外部抵抗を接続すると回生抵抗を変化させることが可能であり、5~7.2[N]の範囲で任意にレバー操作負荷を生じさせることができる。
- (5) (4)の負荷を利用して高齢被験者に継続的なトレーニングを行ったところ、筋断面積の増加とともに筋力の向上が認められた。

謝 辞

実験装置製作にご協力いただいた矢部川電気工業（株）阪本一平様、リハビリテーションプログラムなどの作成において理学療法士の視座からご助言を賜った大牟田市立総合病院 江郷功起様、計測実験においてご協力いただいた大牟田市グループホームふれあいの皆様に深謝申し上げます。

本研究は年度科学研究費基盤研究(c) 課題番号 20500499 「安全性を考慮した高齢者健康支援のための体力計測技術に関する研究」により行われました。

文 献

- (1) 文部科学省編，新体力測定，4 版(2006)，ぎょうせい。
- (2) 金久博明，“筋出力とトレーニング”，体育の科学，Vol. 39, No. 4 (1989), pp. 274-285.
- (3) Jonsson, B., *Biomechanics X-B (1987)*, pp.615-620, Human Kinetic Publisher.
- (4) 金子公有，瀧本隆文，田路秀樹，末井健作，“人体筋の力・速度・パワー関係に及ぼすトレーニング効果”，体力科学，Vol. 30 (1981)， pp.86-93.
- (5) Hellenbrant, F.A., Houz, S.J., “Methods of muscle training”, *The influence of pacing Phys. Ther. Rev.*, Vol. 38 (1958), pp. 319-322.
- (6) 日本機械学会編，機械工学便覧応用システム編 γ 9 医療・福祉・バイオ機器，初版（2008），p. 218，日本機械学会
- (7) 杉 晴夫編，運動生理学，改訂第 3 版(2003)，p. 57，南江堂。