生体負担度評価のための携帯形ピンチ力測定装置の開発

非会員 茂吉 雅典 (大同工大)
非会員 横山 清子 (名古屋市立大)
正員 渡辺 與作 (豊田高専)
正員 高田 和之 (大同工大)

Development of Portable Pinch Strength Dynamometer for Evaluation of Physical and Mental Work Load

Masanori MOYOSHI, Non-Member(Daido Institute of Technology)
Kiyoko YOKOYAMA, Non-Member (Nagoya City University)
Yosaku WATANABE, Member(Toyota National College of Technology)
Kazuyuki TAKATA, Member(Daido Institute of Technology)

Pinch strength is the muscular strength exerted by the fingertips when an object is grasped between two fingers. Since daily work provides many instances in which the hands are used, decreased pinch strength can be considered a symptom of fatigue. This paper describes the development of a portable pinch strength dynamometer. It can be used during a short break while on the job, driving a car, and so on. Two boards with an air chamber sandwiched in between them are pinched between two fingers, and a gauge measures the pressure inside the air chamber. An examination of the device's accuracy showed that it is able to produce accurate pinch strength measurements. The following two experiments were conducted.

1. To measure the pinch strength of a driver and fellow passengers of a car, and the rider of a motorcycle during short breaks while coming and going on a 2000 km trip.

2. To measure the pinch strength of 14 workers in a watch assembly plant during working hours for one week including a holiday.

With these data, the measurement of the physical and mental work load and fatigue by the dynamometer is expected.

キーワード：ピンチ力、携帯形ピンチ力測定装置、生体負担、疲労評価、長距離運転

1. まえがき

ピンチ力とは、指先で物を掴む動作などに働く指先の筋力である。ピンチ力測定は、手指に損傷を受けた患者の治療効果の判定⁽¹⁾や振動工具による振動障害の症状診断⁽²⁾などに応用されている。

日常生活、労働、自動車運転などにおいて手先を使う機会は非常に多い。したがって、長時間の労働や自動車運転などを行うことによる報告例もある⁽¹⁾⁽³⁾。そこで、本研究では労働あるいは、自動車運転における短い休憩時間などに気軽にかつ簡便な操作でピンチ力を測定できる携帯形の装置の開発を行った⁽⁴⁾⁽⁵⁾。ピンチ力と肉体および精神疲労の度合い、生体負担度^{(6)~(9)}との関連が明らかになれば、簡便な携帯形のピンチ力測定装置は、疲労による自動車事故や労務事故防止の目的で有効に利用できることが期待される。

本論文では、2. で開発したピンチ力測定装置の概要を、3. で開発装置の精度検討を行った結果を、4. では、本研究により開発した装置を用い、往復約 2000 [km] の自動車および自動二輪車運転時の小休憩時のピンチ力測定と、時計の組立工場において 14 名の従業員を対象とした勤務時間経過によるピンチ力変化の推移の測定条件を、5. では測定結果と考察について述べている。

2. 携帯形ピンチ力測定装置の原理

ピンチ力測定装置として市販されているものは、リハビリテーションの目安として使用される安価なものから、手指筋機能の障害や疲労の検査を目的とする高精度の測定装置まで数種類がある。筆者らは、いかなる場所においても簡単にピンチ力が測定できることを目的とし、簡便な構造で、小型・軽量の携帯形装置を開発した。図 1 (a)に開発装置の写真を、

図1(b)にその断面図を示す。黒いシリコンラバー製の空気室Bは、CおよびDと標記された2枚のアルミ板で挟まれている。空気室に用いているシリコンラバーは、血圧計のカフの素材として用いられるものであり、空気圧による伸縮の劣化に強い材料である。2枚の板CとDは、Tで示す部分でちょうつがいにより接続されている。ピンチ力の測定点は、M、M'と示す部分である。指でつまむ位置が変化しないように、板には測定点を明記している。C面の上の部分には、電源、駆動スイッチ、制御スイッチの他にAと示すポンプ部（空気挿入用コンプレッサとそれを駆動するDCモータ）などの制御回路がある。制御回路の電気回路図を、図2に示すが、ポンプを駆動・制御する駆動スイッチS₁、制御スイッチS₂および駆動電源となる電池で構成されている。駆動電源として用いる電池は、単3電池が4本であり、駆動時の消費電力は0.87[W]である。このような回路構成であるため、市販のピンチ力測定装置のようにスプリングや半導体などの経年変化や温度特性を考慮した精密な電子部品を搭載しているものと比較して振動、湿度、温度などの測定環境に動作精度が依存しないという利点がある。装置の大きさは、上部板が220[mm]×100[mm]、空気室に空気が入った状態でM、

図1(a) 携帯形ピンチ力測定装置
Fig. 1.(a) Portable pinch strength dynamometer.

図1(b) 測定時のピンチ力測定装置の断面図
Fig. 1.(b) Cross section of pinch strength dynamometer during measurement.

図2 空気挿入ポンプ制御部の電気回路
Fig.2. Electrical circuit of pressure controller.

M'の部分の高さ $L=50$ [mm]となる。重量は電池を含めて1.05[kg]である。一方、測定を目的とした市販の装置の例においては、大きさ250[mm]×225[mm]×115[mm]、重量は2.2[kg]であるので、開発装置は重さで約1/2、体積は1/6である。駆動電源に関しても従来市販のものはAC100[V]か、独自のバッテリーが必要で、測定時の消費電力は約4[W]である。したがって、開発装置が長時間の測定に耐えることができ、携帯形として適していることがわかる。

ピンチ力の測定原理は、まず、無負荷の状態では図2の駆動スイッチS₁を動作させて空気室に空気を送入する。空気室が膨らみ、上下の板が開き図1(b)のM、M'で示す部分Lの高さが50[mm]となると制御スイッチS₂が動作し空気室への空気の送入が停止される。これ以上空気室に空気が送入されないようにするために、この時点で駆動スイッチS₁を切断する。このとき、図1(a)のPで示す圧力計の表示はゼロとなるよう設計されている。図1(b)のM、M'で示す測定端を2本の指で挟むことにより、空気室の上下に力が加わり、空気室内の空気圧が増大することになる。空気圧により上下の板を持ち上げる力と指で挟む力が釣り合ったときの空気圧を圧力計Pで測定する。板を押す位置は固定しているので、圧力計で測定した空気圧と板を押さえる力、すなわち、ピンチ力は比例する。この比例関係に関する検討結果は3.で述べる。

3. ピンチ力測定装置の精度の検討

開発した測定装置のゲージ圧 P [Pa]とピンチ力 W [N]との関係をみるため、開発した測定装置の測定端Mに重さの異なる6種類の荷重 W [N]を、各5回ずつ加え、それぞれの荷重に対するゲージ圧 P [Pa]を測定した。

図3は、各荷重に対する5回のゲージ圧の測定値を示し、直線はこの6点に対して最小自乗法で求めたものである。この図から、測定ピンチ圧 P と荷重 W との間に直線関係があることがわかる。各荷重に対する測定精度は、相対誤差が0.8[%]以内となり、測定時のばらつきは十分に小さ

いものであった。また、ここではピンチ圧とピンチ力との相対的なことを問題としており回帰直線が原点を通らないのは誤差とみてよい。

図3 ピンチ圧とピンチ力の関係
Fig. 3. Relationship between pinch pressure and pinch strength.

次に、測定ピンチ圧 P とピンチ力 W との関係を求める。
図4は、測定装置の一端に荷重 W が加えられている状態での横断面、すなわち図1(b)を模式的に示したもので、上部板 C に作用する力は、測定点 M に加わる点荷重 W と空気室による分布圧である。また、上部板のみの重さは約 0.7[kg] 、空気室と上部板との接触面積は上部板の面積よりやや小さく $210\text{[mm]} \times 90\text{[mm]}$ であり、 W が 0[N] のとき、ゲージ圧 P はゼロを示すように設計されている。板 C の質量は小さく無視できるので、上部板 C の静的つり合い条件式は式(1)のようになる。

図4 ピンチ圧の測定原理
Fig. 4. Model of pinch strength dynamometer.

$$Wl - \int_0^l apx dx = 0 \qquad \dots\dots\dots(1)$$

$$\therefore W = \frac{P}{2} A \qquad \dots\dots\dots(2)$$

ここに、 A は板 C の面積で、 $A = a \ell$ で本装置では $A = 0.21 \times 0.90 = 1.89 \times 10^{-2} \text{[m}^2\text{]}$ である。したがって、

$$W \text{ [N]} = 9.45 \times 10^{-3} \times P \text{ [Pa]} \qquad \dots\dots\dots(3)$$

となる。図3において最小自乗法により求めた実験式は、

$$W = 8.92 \times 10^{-3} \times P + 3.76 \qquad \dots\dots\dots(4)$$

であり理論式(3)と一致しているとみてよい。

以上のことから、本装置は、測定回数に対する測定値のばらつきは小さく、かつ、測定値はピンチ圧であるが、負荷荷重、すなわちピンチ力と直線関係にある。また、測定値と理論値がよく一致していることを確かめることができた。

4. ピンチ力測定実験

簡便な携帯形ピンチ力測定装置を利用することによって、疲労による自動車事故や疲労による労務事故防止に役立てたいとの開発目的に添って、開発装置を用いて次に示す二つの条件による測定を行った。

<4・1> 長距離運転時の測定実験

走行距離：岐阜県各務原市から熊本県人吉市まで、往復約 2000[km] の高速道路の走行、走行実験回数：2回往復
被験者：1回目-自動車運転者1名、自動車同乗者3名
2回目-自動車運転者1名、自動二輪車運転者1名
(自動車運転者:男性48歳、自動二輪車運転者:男性22歳)
走行時間：1回目-往路1日(17.5時間)、休憩2日、復路1日(18.5時間)
2回目-往路1日(22時間)、休憩2日、復路1日(18.5時間)

<4・2> 組立工場における測定実験

時計の組立工場における労働時間経過に対するピンチ力測定実験を行った。測定期間は月曜日から日曜日までの1週間である。勤務は月曜から土曜日の終日作業である。休日である日曜日にも同時刻に測定した。作業環境は騒音 70[dB(A)] 以内、照度 1200[lx] 以上、室温湿度は空調によって一定に保たれた作業環境である。
被験者：従業員のボランティア14名(47歳～63歳、平均=54.2歳 女性)
勤務時間：9時～17時(昼休憩12時～13時)
測定回数：(4回/日) $\times$ 7日 = 28回/人、
測定場所：岐阜県 加茂郡A精器岐阜工場

5. 結果と考察

<5.1> 長距離運転時の測定実験

図5(a)は、2回目の走行実験における運転者の往路、図5(b)が復路における右手親指と人さし指間のピンチ圧の時間変化を示した結果である。自動車と自動二輪車は伴走し、休憩も同一場所、同一時間に行った。図5(a)と図5(b)の自動車と自動二輪車を比較すると変化の傾向が類似していることがわかる。例えば、往路の時刻17:15と18:00とを比較すると、これは食事休憩の前後であるが、この休憩により両被験者ともピンチ力が増加している。また、自動二輪車の時刻15:31は、運転者が腕に疲労を感じ休憩を行ったときであるが、ピンチ力が急激に低下している。いずれの運転者も運転後半にピンチ力が減少している。さらに、復路において、両

被験者のピンチ力が測定最後に増加しているのは、長距離走行を終える直前の自宅に帰着するという精神的影響であると考えられる。

図5 ピンチ力の時間変化

Fig.5. Time course of pinch strength.

(a)second trip (forward), (b)second trip(backward).

図6は、2名の1回目走行の往復時、2回目走行の往復および日常生活時の1日の測定結果で、左手親指と人差指間のピンチ力の平均値を示している。(a)の被験者は、1回目2回目ともに自動車の運転を行った。(b)の被験者は、1回目は(a)の運転する自動車に同乗し、2回目は自動二輪車を運転した。棒グラフ下の数字は実験回数を、Aは往路、Bは復路、Dは比較対照のために日常生活時を表す。Dの日常生活時は、時刻 6:30、13:05、20:30 の3回測定した。1回目の実験の往路、すなわち棒グラフ (1A) は、時刻 6:30、12:20、17:20、21:25、24:00、の5回測定を行った。1回目の復路 (1B) は、時刻 7:30、12:55、17:00、21:30、翌日 2:05 の5回測定を行った。2回目の実験における測定時間は図5に示したとおりである。(a)の結果は、日常生活時と比較して、自動車運転時には、ピンチ力の平均値が減少していることがわかる。復路と日常生活時との間でt-検定を行った結果、1回目2回目ともに5〔%〕の棄却率で有意差がみられた。また、1回目と2回目おののにつき、往路と復路のピンチ力をt-検定により比較すると、いずれも往路と復路の間に5〔%〕の棄却率で有意差がみられた。さらに、1回目の実験と2回目の実験に関しては、t-検定で1〔%〕の棄却率で有意差がみられた。

図6 各種条件下でのピンチ力

(a)自動車運転者 (b)2回目の実験での自動二輪車運転者

1A:1回目実験の往路 1B: 1回目実験の復路
2A:2回目実験の往路 2B: 2回目実験の復路
D: 日常生活

図中矢印上の数値は有意差の棄却率を示す

Fig.6. Pinch strength under five conditions.

(a)motorcar driver, (b)motorcycle rider in second trip.

1A:first trip(forward), 1B:first trip(backward).
2A:second trip (forward), 2B:second trip(backward).

これは、2回目の実験は自動車と自動二輪車との併走であり、自動車の運転者であった被験者は大きな精神的な負担を感じており、それがピンチ力の低下という結果に現れたと考えられる。一方、(b)に関しては、1回目の実験は自動車への同乗であり、ほとんど手指を使用しないため、日常生活時、自動二輪車運転時と比較して大きいピンチ力を示している。したがって、1回目の実験では往復の差異はほとんどみられないが、2回目の実験においては、往路と比較し復路の方がややピンチ力が減少しているが、t-検定においては有意差はみられなかった。

5.2 組立工場における測定実験 時計の組立工場は、微細な部品を手作業で組み付けるため、手指に対する負担が大きい。そこで、ピンチ力による作業負担の評価の可能性を検討した。ピンチ力は、おのおの手の親指と人差し指の間、および、親指と中指の間の計4種類を測定した。

解析においては、左右各手の親指と人差し指の間、および、親指と中指の間の2種類のピンチ力の和を各手のピンチ力とした。

今回の測定は、14名の被験者を対象として、週7日間、1日4回ずつ実施した。したがって、測定データの変動については、被験者、曜日、および、測定時刻の3要素が存在する。各要素が測定データに与える効果を分散分析により解析した。その結果、左右いずれの手についても、被験者と測定時刻は、 p 値0.0001以下で高度に有意となった。就労日である月曜日から土曜日の曜日については、右手に関してのみ p 値0.03で有意となった。以降の解析では、被験者の個人差による要因はブロック因子とみなした。

図7は右手と左手に関して、測定時刻に対する、被験者14名全曜日のデータの平均値を示したものである。この平均値の差に関して、Scheffeの多重比較法により、棄却率5〔%〕で有意差を検定した。その結果、右手は、9時と13時の間、および12時と17時の間には有意差が認められなかった。9時と13時を1グループ、12時17時を1グループとする、2グループ間には有意差が認められた。すなわち、右手のピンチ力については、午前、午後いずれも作業開始時に対し、作業終了時のピンチ力が有意に低下していることがわかる。左手に関しても午前、午後いずれも作業開始時に対して、終了時のピンチ力が有意に低下している。9時より13時の方がピンチ力が低下していることから、昼食休憩をとってもピンチ力は完全に回復していないことを示している。

図7 測定時刻に対するピンチ力の変動

Fig. 7. Time course of pinch strength.

次に、曜日に対する変動を、効果が有意となった右手について解析した。図8は、曜日に対して、被験者14名の4回の測定時刻の右手のピンチ力の平均値を示したものである。木、金、土曜日のピンチ力が月、火、水曜日より大きくなっている。そこで、月、火、水曜日を1グループ、木、金、土曜日を1グループとして、対比平方和を求めて、その有意差を検定した結果、 p 値0.001で週の後半である木、金、土曜日のピンチ力が週の前半に対して有意に増加しているという結果が得られた。

時計の組立工場における手指の作業負担を、ピンチ力より測定し解析した結果、以下のような評価を行うことがで

図8 測定曜日に対する右手のピンチ力の変動

Fig. 8. Changes in right pinch strength during a week.

きた。1)作業前に対して、左右いずれの手指のピンチ力も作業後において有意に低下した。2)一般的に利き手である右手に関しては、昼食休憩により午前中の作業開始時のピンチ力に回復するが、左手に関しては、午前中の作業開始より午後の作業開始時の方が低下する。したがって、作業に伴う手指の負担は左手の方が重いと考えられる。3)曜日に対する変動は、右手のピンチ力のみに現れる。これにより、作業中の手指の負担は左手の方が重い、翌日の作業に影響を残すほど重くはないと考えられる。4)曜日に関する右手のピンチ力は、週の後半の方が前半より有意に大きくなっている。これはについては、作業に対する慣れ、「休日が近い」という精神的なやる気などを反映していると考えられる。

6. むすび

本論文では、自動車運転時および労働時の生体負担度の測定を目的とし、どのような場所でも簡便に測定が可能な携帯形のピンチ力測定装置の開発に関する報告を行った。装置の原理は、空気室の上下の板を2本の指で押さえることによる簡便なもので、このピンチ圧をピンチ力とみなしても良いとの結論を得た。また測定における再現性についても誤差0.8〔%〕以下と小さく十分実用に耐え得るものであった。また二つの実験について次のことがいえる。

実験1、長距離運転中の小休憩時に、運転者および同乗者のピンチ力を本装置により測定した。その結果、ピンチ力の変化に関する運転者と同乗者の差異、運転者に関する時間経過、および、往路に対する復路の減少傾向を確認することができた。

実験2、時計の組立工場14名における日内変動および週内変動を分散分析を用いて検討を加えた。その結果、いくつかの興味ある事実が判明した。

また、実験1のピンチ力に対し実験2でのピンチ力は約1/2であるが、これは男女の差によるものであるか、作業種の差であるかの確定はできない。

これらの結果より開発装置は携帯形であり、構造も単純

なため長時間の携帯による精度低下も少なく、今回の実験のような長距離自動車・自動二輪車運転や工場などの測定環境が良好でない場合においてもピンチ力が簡便に測定でき、生体負担度評価に利用できる可能性を示唆できた。

今後、各種の場面において、生体負担度、疲労評価を行う他のパラメータとの比較を含め、さらに、検討を加えたいと考えている。最後に、本研究の一部は、財団法人佐川交通社会財団より平成7年度「交通安全調査研究振興助成金（一般研究助成）」の援助を受けて行われた。記して謝意を表する。

（平成8年4月23日受付）

文 献

- (1)松田正治：「把握およびピンチ機能の臨床的検査法」，整形外科，11(10)，699～701，昭35.
- (2)三浦豊彦：「振動工具による振動障害の診断について」，労働科学，46(7)，399～421，昭45.
- (3)肘付邦憲：「手指のピンチ力測定」，労働科学，49(11)，633～636，昭48.
- (4)野牧久人，茂吉雅典，横山清子，吉岡貴芳，渡辺與作，高田和之：「ピンチ圧による生体負担度評価の提案」，平成6年度電気関係学会東海支部連合大会，639.平6.
- (5)森川雅智，茂吉雅典，横山清子，吉岡貴芳，渡辺與作，高田和之：「ピンチ圧による生体負担度評価」，平成7年度電気関係学会東海支部連合大会，667.平7.
- (6)R. I. Kitney and O. Rempelman: The study of heart-rate variability, Oxford university Press, 1980.
- (7)高田和之，渡辺與作，掛布英辰：「心拍動の自己回帰モデルによる生体負担度の評価」，医用電子と生体工学，22(2)，97～102，昭59.
- (8)大須賀美恵子：「自律系生理指標を用いたMWLの評価にむけて」，計測自動制御学会論文集，28(8)，979～986，平5.
- (9)早野順一郎，山田眞巳，藤波隆夫，横山清子，渡辺與作，高田和之：「心拍変動と自律神経機能」，生物物理，28(4)，198～202，昭63.

茂吉 雅典（非会員）1946年11月20日生まれ。74年3月愛知工業大学第二部電気工学科卒業。87年4月大同工業大学電気工学科助手。現在同大学講師。主に生体情報工学，教育工学などの研究に従事。電子情報通信学会，日本エム・イー学会，日本人間工学会，計測自動制御学会，日本顎口腔機能学会，日本物理教育学会，日本教育システム情報学会会員。

横山 清子（非会員）1959年12月2日生まれ。82年3月名古屋工業大学情報工学科卒業。84年3月同大学大学院修士課程情報工学専攻修了。同年豊田工業高等専門学校電気工学科助手，92年同助教授。94年名古屋市立女子短期大学助教授。96年名古屋市立大学芸術工学部助教授。主に生体情報処理，人間工学などの研究に従事。工博。電子情報通信学会，情報処理学会，日本エム・イー学会，日本人間工学会会員。

渡辺 與作（正員）1938年5月3日生まれ。64年3月千葉大学文理学部物理学科卒業。同年豊田工業高等専門学校電気工学科助手，80同教授。主に生体情報処理，人間工学などの研究に従事。工博。電子情報通信学会，計測自動制御学会，日本エム・イー学会，日本人間工学会，日本物理教育学会会員。

高田 和之（正員）1931年10月27日生まれ。55年3月名古屋大学工学部電気学科卒業。64年4月豊田工業高等専門学校電気工学科助教授，75年同教授。95年4月大同工業大学教授。主に生体情報，特に心拍と血圧に関する時系列解析，人間工学，教育工学などの研究に従事。工博。電子情報通信学会，計測自動制御学会，日本エム・イー学会，日本人間工学会，日本自律神経学会，日本体力医学会会員。