短時間負荷条件下の円筒物体把握における最大保持力径について*

加 茂 美 冬^{*1}, 森 本 茂^{*2}
八 高 隆 雄^{*3}, 山 本 圭 治 郎^{*4}Diameter of Cylinder with Maximum Holding Force
under Rapid Loading ConditionsMifuyu KAMO, Shigeru MORIMOTO,
Takao YAKOU and Keijiro YAMAMOTO

The aim of this study is to investigate the relation between diameter of cylindrical object and holding force under the condition of rapid increment of load. The holding force was in a range from 100 to 300 N at the diameter of cylinder between 15 and 60 mm. The maximum force was obtained from the cylinder with a diameter of 20 and 25 mm. In the comparison with the results from the static holding condition, the present results showed that the larger force was appeared at the thinner cylinder. When electromyogram was recorded from the grasping muscles during constant loading, the integrated value of the electromyogram showed the minimum value at the cylinder diameter at which the maximum force was obtained. Experimental results show the existence of the optimum diameter to transmit the muscle force to the cylindrical object with good efficiency.

Key Words: Human Engineering, Human Interface, Measurement, Grasping of Cylindrical Object, Rapid Loading Condition, Holding Force, Sensory Evaluation, Electromyogram, Hand Dimension, Contact Area between Hand and Object

1. 緒 言

物体を把握する場合の物体と手の間には最も力を伝達しやすい太さ⁽¹⁾や最も握りやすい太さ⁽²⁾が存在することが明らかになってきた。これらの研究は、機械のハンドルや道具の柄の太さの設計を目的としているものであり、手と物体の間では負荷速度は急に変わらない、いわゆる静的な力伝達を対象としている。しかし、使用する道具によっては短時間に負荷が変化するものも少なくない。タガネやハンマなどの生産工具のみならず、野球のバットやテニスラケットなどでも短時間における力の伝達が重要である。

本報では、5秒以内の短い時間内に最大値に達するような短時間負荷の下における物体と手の間の力の伝達について従来の把握(600秒以上の時間を要する把握、以下静的把握とする)と比較するとともに、筋電図を介して把握時の筋活動について検討を行った。

2. 実 験 方 法

被験者は、神経筋疾患をもたない健康な24~45歳の成人5名とし、右手(優位側)を被験手とした。被験者にはあらかじめ研究の目的、方法について説明し、実験に参加することに対する同意を得た。図1に手の模式図を示す。また、図1に示した各部位の各被験者の手の大きさは表1のとおりであった。すべての実験を行ったのは表1中の*印で示した5名中2名の被験者であった。

把握実験の方法は前報⁽¹⁾同様とし、被験者は図2に示す状態で円筒を垂直に把握保持した。円筒物体は、アクリル製で長さ30cm、直径5~60mmの範囲で5mm間隔のものをを用いた。被験者には、把握中、前腕の回転や手関節の背屈や尺屈等が起こらないように指示した。把握時の保持力は、円筒を把握した状態で垂直下方に負荷を加え、負荷に耐えられなくなった時点での負荷量で定義した。短時間負荷は牽引することによって与え、把握力はほぼ1秒以内で最大値の90%以内の範囲に達し、その後5秒以内に耐えられなくなった。また、静的負荷は前報⁽¹⁾同様に円筒にバケツを下げ、その中へ水を注ぐことにより行った。

表面筋電図は、図3に示すように骨間筋(volar

* 原稿受付 1997年9月17日。

*¹ 正員, 横浜国立大学教育人間科学部(〒240-0067 横浜市保土ヶ谷区常盤79-2)。*² 横浜国立大学教育人間科学部。*³ 正員, 横浜国立大学工学部(〒240-0067 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)。*⁴ 正員, 神奈川工科大学工学部(〒243-0292 厚木市下荻野1030)。

Table 1 Dimensions of subject's hand

Subj.	L1	L2	L5	L10
MK	167	95	72	73
SM	181	102	79	90
SA	172	96	76	74
SYU	188	107	81	85
YN	188	108	80	90

unit: mm

L1: hand length, L2: palm length

L5: middle finger length, L10: hand breadth

Fig. 1 Hand dimensions determined

Fig. 2 Experimental set up

Fig. 3 Schematic illustration of EMG recording positions in hand and forearm

AP: adductor pollicis
 VI: volar interossei
 FPL: flexor pollicis longus
 FDS: flexor digitorum sublimis

interossei: VI), 母指内転筋(adductor pollicis: AP)と浅指屈筋(flexor digitorum sublimis: FDS), 長母指屈筋, (flexor pollicis longus: FPL)から記録した。筋電位は, 直径 5 mm の Ag/AgCl 皿電極を用

Fig. 4 Process of EMG analysis

いた双極誘導法によって求めた。このときの電極間距離は 15~20 mm であった。導出電位は, 周波数帯域 3~10 kHz にて差動増幅(ダイアメディカルシステム, DPA 400 C)し, FM カセットレコーダ(TEAC, R-31)に記録した。その後, A/D コンバータを通してパーソナルコンピュータに入力し, 積分値を算出した(BIMUTAS, キッセイ)。算出手順は, 図 4 に示すように, 把握開始 3 秒後からの 5 秒間の筋電図(Raw EMG)を全波整流(Full-wave rectified EMG)した後, 1 秒ごとに積分値を算出した。それらを平均した値を求めて把握時の筋の活動水準の指標 (IEMG)とした。

3. 結果および考察

3.1 短時間および静的把握時の最大保持力径

バケツに水を注ぐ静的条件下の円筒保持力は, ある特定の径で最大値を示すことが知られている⁽¹⁾。本実験の被験者 2 名の円筒径 (D) に伴う保持力 (F) の変化を図 5 に示す。その結果, 保持力の最大値は被験者 MK においては $D=40$ mm, 被験者 SM においては $D=35$ mm であった。これは, 前報⁽¹⁾での $D=35\sim42$ mm とほぼ一致した範囲にある。上述の 2 名の被験者 MK と SM の短時間把握時の保持力 (F) の変化を示したのが図 6 である。この場合にも, 保持力はある

Fig. 5 Effect of grasping diameter D on holding force F under static loading

Fig. 6 Effect of grasping diameter D of holding force F under rapid loading

特定の径で最大値を示した。しかし、短時間把握での保持力の最大値が発現する径をみると、被験者 MK においては 25 mm, SM においては 20 mm であり、静的条件よりも 15 mm 細かった。被験者全員の最大保持力径は 20 から 25 mm であった。次に、保持力を両条件で比較すると、保持力は、静的条件では 75~125 N の範囲にあり最大値は 120~125 N に分布した。それに対して、短時間把握では 100~300 N の範囲で 200~300 N の間に最大値がみられた。すなわち、短時間把握では静的把握より約 2 倍近い大きな力が発揮でき、円筒径の違いが保持力に大きく影響している。同様な傾向はすべての被験者に共通していた。この傾向については静的および短時間把握で結果は同様である。また、図 5 と 6 の比較から、短時間負荷条件では静的な場合よりも保持力の個人差が大きく現れることがわかる。

Fig. 7 Relationship between SD scale value and grasping diameter D under static loading

Fig. 8 Contact area between hand and cylindrical object A and grasping diameter D under static loading

以上のことから、発揮できる力は、短時間把握では、静的把握に比べて大きく、把握する円筒径は、より細い径で最大値を示すことが明らかとなった。

3・2 短時間および静的把握における円筒保持力の差の原因 静的把握においては、最大保持力と手-物体間の接触面積の最大値が一致することが確認されている⁽¹⁾。図 5 および 6 におけるのと同じ被験者に対する、握りやすさの感性評価 (SD scale value) の結果を図 7 に、手-円筒間の接触面積 (A) の結果を図 8 に示した。ここで、図 7 の縦軸は前報と同様な SD 法⁽²⁾によって求めた評価であり、-3 (非常に握り難い) から 3 (非常に握りやすい) までの 7 段階で主観的な握りやすさを示している。図には、太い径から順に握り始めた場合と細い径から順に握り始めた場合の 2 回の計測の平均値を示してある。把握時の手と物体の接触面積は、前報⁽¹⁾と同様に円筒の表面に墨を塗り、把握後、墨のついた手の写真を撮り、求めた。その結果、

図7および8に示すとおり最大値は被験者MKにおいては $D=40$ mm, 被験者SMにおいては $D=35$ mmでみられ, 3・1節で示した静的な条件での最大保持力径と一致することが確認できる。接触面積は, 手の皮膚からの感覚入力の数に対応していると考えられ, このことが, 接触面積が最も大きくなる円筒径が, 最も握りやすい径および静的把握での最大保持力径と一致することの要因の一つとなっていると考えられている⁽¹⁾。しかしながら, 短時間把握では, 最大保持力径は被験者MKにおいては25 mm, 被験者SMにおいては20 mmであり, 最も握りやすい径や接触面積が最大となる円筒径とは一致せず, それより細い。また, 円筒との接触面積(A)と短時間把握における保持力(F)の間には依存性が認められない(図9)。したがって, 静的より短時間負荷条件で最大保持力径が細くなることは, 短時間把握のほうが発揮する力に対する皮膚からの感覚情報の寄与率が低いことに起因している可能性がある。

静的把握における最大保持力径は, 最も小さい力で円筒を保持できる径と一致する⁽¹⁾。この場合では, 保持力を前腕部(図3参照)筋の収縮に伴う太さ変化から計測している⁽¹⁾。この方法は簡便で有効である反面, 把握に関与する手内筋(骨間筋や母指内転筋などの手の平の筋, 図3参照)の発揮する力の評価が困難であること, 分解能が十分高いとはいえないことなどの問題点がある。そこで, 手内筋を含め手の各筋の情報を分けて取り出し, しかも計測精度の高い表面筋電図を用い, 短時間把握の特性を調べた。図10に, 被験者MKにおいて得られた結果を示す。結果は各径で得

られた積分値を最大保持力径の積分値で規格化して表している。また, 負荷は, 最大保持力の10%とし, この力を約0.5秒で負荷し10秒間保持した。負荷保持直後から5秒間の筋電図について積分値を求めている。実験では, 図3に示した4箇所から測定したが, 四つの筋とも最大力保持径の把握時に積分値が最小値を示している。積分値の大きさは各筋ごとにかなり差があるが, このことは, 一定の重さの円筒を把握したとき, 最大の力が保持できる径で筋の活動水準が最も低くなることを示している⁽⁹⁾。すなわち, 最大保持力径を把握するときの筋の把握に対する筋の寄与率が最も低いことを反映しているものといえる。特に, 母指内転筋APは, 最大保持力径より太い径においては径の増大に伴い著しい増加を示しているが, 最大保持力径より細い径においてはその増加が小さく, 最大保持力径での値と大きな差が見られない。母指内転筋APは, 母指の内転に作用する筋であるが, 静的把握においては円筒径が細いと母指以外の4指を中心とした把握形態をとることによって考えられる⁽¹⁾。この傾向は今回の被験者においても認められた。把握する円筒径によって把握に関わる各指ごとの割合が変化することが, 筋電図積分値の変化の差異として現れていると考えられる。

以上の結果から, 把握にかかわる各筋の寄与が異なるものの, 短時間把握においても, 最大保持力径は発揮筋力が最も小さい円筒径と一致することが確かめら

Fig. 9 Relationship between holding force under rapid loading F and contact area between hand and cylindrical object under static loading

Fig. 10 Changes in integrated value of electromyographic signals (IEMG) against diameter of cylindrical object under rapid loading

Fig. 11 Relationship between diameter of holding force and dimensions of hand under rapid loading

れた。したがって、前報⁽¹⁾の結果と合せて考えると静的把握および短時間把握のいずれの場合にも、最も効率よく指の筋活動を行うことができる把握が、最も大きな力を発揮できる把握となることが明らかとなった。

3・3 短時間把握での最大力保持径の個人差について

最大保持力径は、手と円筒の接触面積に関係することから手の大きさに依存している可能性がある。本実験の被験者の手の大きさは、表1に示すように、各パラメータにおいて最も大きい者と小さい者の間に9から25 mm という大きな差があった。5人全員の最大保持力径と手の大きさのパラメータとの関係を図11に示す。被験者全員の手の大きさの各種パラメータと最大保持力径 (D_{max}) の間に明らかな関係は見ら

れなかった。最大保持力径が手の大きさに依存しないことは、最大保持力径の決定には、手の大きさといった解剖学的な因子より、各個人の過去の履歴に由来する把握動作様式の差異あるいは動作様式が同様であっても神経系の適応の差異といった因子が強くかかわっている可能性がある。しかし、手の大きさにかかわらず被験者全員の最大保持力径が20から25 mmであったことから、短時間に大きな力を発揮する場合に使用する道具の径は、個人差を考えずに画一的な径であってもよい可能性がある。その反面、図6に示すように径が5 mm 異なるだけで、保持力が約40 N 低下する場合があることから考えると、画一的とは逆に精密に個人に適合した握り径を設定する必要があるであろう。

4. 結 語

円筒物体把握における径と保持力の関係を明らかにすることを目的として、5秒以内の短い時間内に最大値に達するような短時間負荷条件の下における保持力について調べた。

(1) 短時間把握での最大保持力径は手の大きさによらず20~25 mm の範囲にあり、保持力は100~300 N に達した。これらは、静的把握と比較すると、保持力は約2倍大きく、最大保持力径は約半分の太さであった。

(2) 一定負荷の下での把握時の手の筋から導出した筋電図の積分値は、最大保持力径において最も小さく、最大保持力径では、筋力が効率よく円筒物体に伝達されているものと思われた。

(3) 最大保持力径は手-円筒間の接触面積および握りやすさに関係しなかった。

文 献

- (1) 八高隆雄・荒川進・高田一, 手-円筒物体間の力伝達, 機論, **60**-573, C(1994), 1721-1726.
- (2) 八高隆雄・山本圭治郎・小山昌洋・兵頭和人, 円筒物体把握における握り易さの感性評価, 機論, **62**-602, C(1996), 3999-4004.
- (3) 小林茂夫, 表面筋電図の測定, 処理, 分析, *Jpn. J. Sports Science.*, **2**(1983), 671-685.