

## 手の把握動作に関する生体力学的解析\*

高野 剛\*<sup>1</sup>, 山本 仁\*<sup>2</sup>, 原 利昭\*<sup>3</sup>

## Biomechanical Analysis of Grasp Motion Characteristics

Tsuyoshi TAKANO, Hitoshi YAMAMOTO and Toshiaki HARA

This paper is concerned with biomechanical analysis of the motion characteristics for grasping a solid cylinder. Contact pressure and surface electromyogram (surface EMG) of muscle flexor digitorum superficialis during grip motion were measured using a contact pressure measurement system with pressure-sensitive conductive rubber sensors and an electromyograph, respectively. In addition, direct linear transformation (DLT) technique with a video camera system is used to analyze three-dimensional joint motion of fingers. It was found that the tips of middle finger, ring finger and thumb are mainly used to stably grip the cylinder. The experimental results also showed that grip pressure increased with an increase in the weight of the cylinder with a constant diameter.

**Key Words:** Biomechanics, Human Engineering, Muscle and Skeleton, Bio-Motion, Human Interface, Contact Pressure, Pressure Sensor, Grip Motion, Surface EMG

## 1. 緒言

人間と動物の大きな違いは道具を使うかどうかであり、類人猿も道具らしきものを使うことが知られているが、根本的に人間のそれと同じではないようである。特に、ボノボなどの類人猿であっても物の握り方のみに着目すれば、手指の使い方が根本的に異なっているようである。即ち、物体の形状に応じて瞬間的に安定な握りが出来るのは人間だけである。この様に、手の骨格や構造が類似していても、生理学的運動機能は同じではなく、脳の情報処理メカニズムと手の動作機能の関連性が大きく関係している。例えば、物体を把握する場合、手で物に触れることによって硬さ、形状、重量など物体固有の情報を感じ受容器によって取り込むと同時に脳で判断し、把握に要する動作の最適制御を行っている。しかし、手を使った高度な制御を必要とする作業、特にハンドル等によって機械や装置を操作する作業では、最適な握り状態を得るだけで

なくハンドルの握り感覚も作業効率などに影響を与えることが少なくない。即ち、握り部分の形状や材質、感触によっても握り感覚に影響を与え、作業時のストレス蓄積の原因にもなる。この様に、物体を握る動作の解析は基本的ではあるが重要であり、感覚・感性をも取り入れた把握動作解析は、これまでのところでは極めて少ないようである。

手の把握機能に関する研究の中でも、解剖学的な機能に関する研究は古くから行われている。また、力学的観点からの把握機能に関して、木下ら<sup>(1)</sup>による持ち上げ作業に伴う把握時の各指の機械的、運動学的研究、Radwinら<sup>(2)</sup>による全指を使った静的ピンチ動作時の各指の力に関する研究およびGurramら<sup>(3)</sup>による動的負荷に伴う指屈筋の握り圧力と筋電位に関する研究などが見られる。これらは拇指と他の4指により挟む形態のピンチ把握 (Pinch prehension) を対象とした研究が殆どであり、全指を使って手掌を物体に接触させる把握形態、即ち、全手掌把握 (Full Palmer prehension) を対象とした解析例は少なく、未だ十分な結果が示されていないようである。

そこで本研究では、人間が手で物を持つ動作の基本

\* 原稿受付 1996年4月10日。

<sup>1</sup> 正員, 新潟大学大学院 (〒950-21 新潟市五十嵐2の町8050)。<sup>2</sup> 学生員, 新潟大学大学院。<sup>3</sup> 正員, 新潟大学工学部。

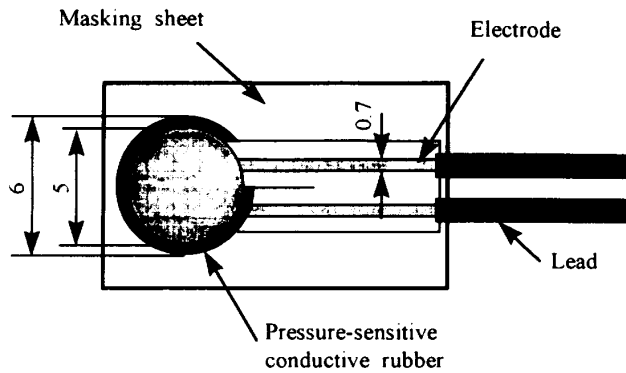


Fig. 1 Geometry of pressure sensor

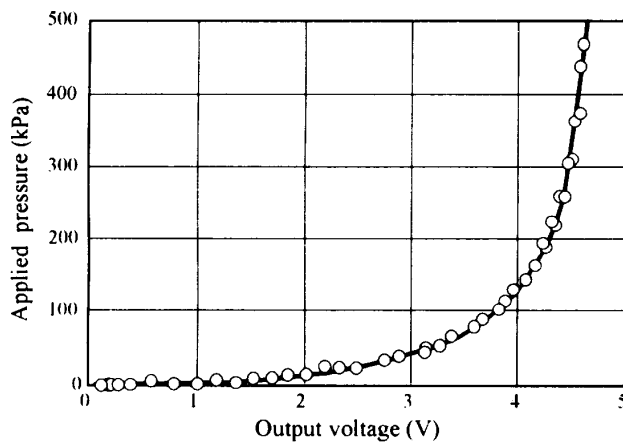


Fig. 2 Applied pressure-output voltage characteristics of pressure sensor

である円筒物体の把握動作を生体力学的観点から総合的に解析するために、手指掌と円筒間の接触圧力を感圧導電ゴムセンサを用いて測定した。さらに、把握動作に関係する指屈筋の表面筋電図（Surface Electromyogram：以下Surface EMG）およびビデオ撮影法とDLT法（Direct Linear Transformation technique）により得られる各指の3次元関節運動を求め、円筒の直径および重さを変えた場合の把握動作を生体力学的に解析した。

## 2. 実験方法

**2.1 手指掌圧力の測定方法** 本研究で用いた円筒把握時の手指掌圧力測定システムは、図1に示す感圧導電ゴムを利用した圧力センサによって構成される。この圧力センサは、直径6mm、厚さ約0.5mmの感圧導電ゴムシート材を電極で挟み込み、さらにその上をフィルムで覆った構造となっている。この圧力センサの厚さは、約0.9mmと比較的薄く、柔軟性に富み、手指掌への配置が容易であるなど、手指掌圧力を測定する上で最良のセンサと思われる。

圧力センサの基本特性を求めるためにインストロン

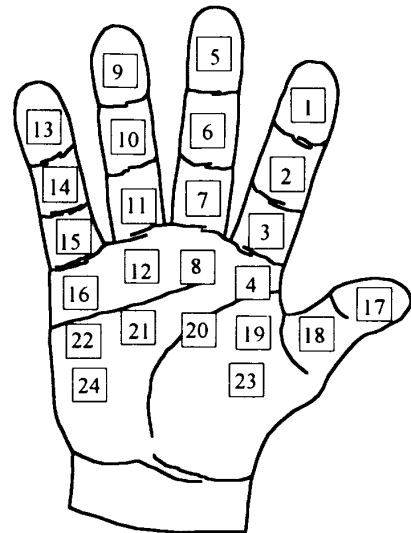


Fig. 3 Location of pressure sensors

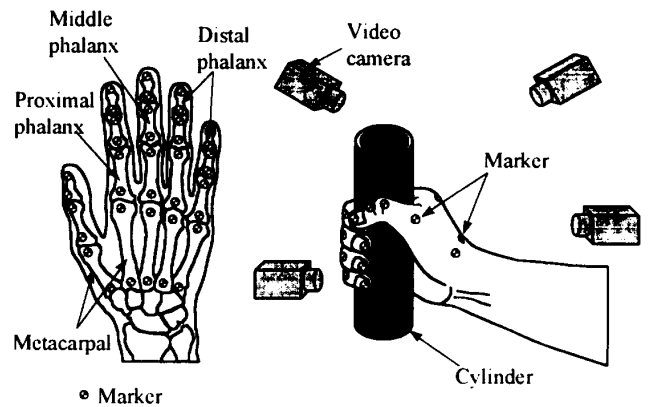


Fig. 4 Marker location and four video camera system

型万能試験機（島津製作所製：AUTOGRAPH AG-25TD）により圧縮負荷を与え、個々の圧力センサの作用圧力と出力電圧との関係を求めた。図2は結果の一例であり、圧力センサの作用圧力と出力電圧特性を示す。

手指掌圧力測定システムでは各圧力センサから得られた出力値を、A/Dコンバータを介してパーソナルコンピュータに入力し、圧力値に変換する方式を採用している。把握時の手指掌圧力を測定する際、図3に示すように、各被験者の右手手指掌部の皮膚表面上に圧力センサ24個を伸縮自在の医療用テープ（住友スリーエム（株）製：Steri-Drape 1050）を用いて固定した。

**2.2 指関節運動の測定** 円筒物体の把握に伴う各指関節の屈曲運動を測定するために、図4に示すように各被験者の拇指、示指、中指、環指および小指の中手骨、基節骨、中節骨および末節骨の近位端と遠位端の手背側の皮膚表面上にマーカーを配置し、ビデオカメラにより4方向から把握動作を撮影した。この4方向ビデオ同時撮影法により個々のマーカーの2次元

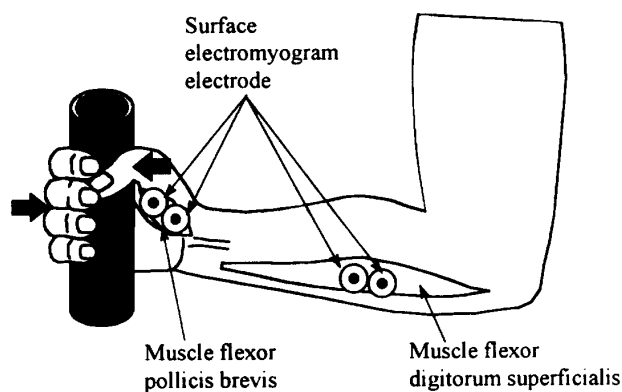


Fig. 5 Location of surface electromyogram electrode

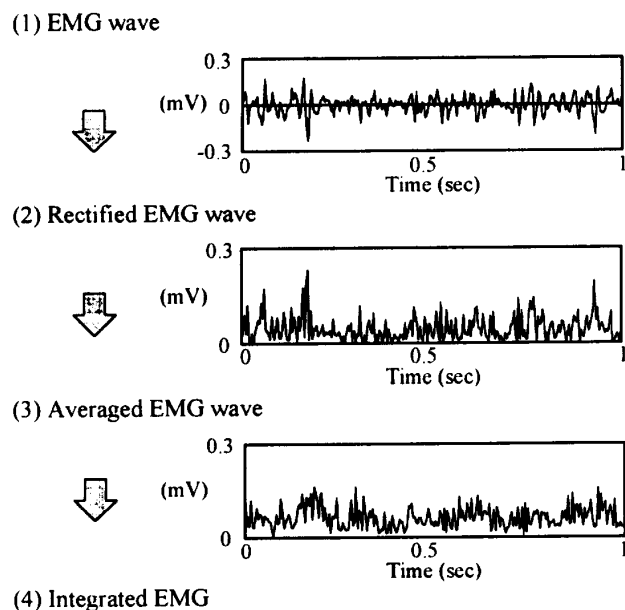


Fig. 6 Transaction of surface EMG output wave

座標を求め、さらにDLT法 (Direct Linear Transformation technique) を用いて3次元座標に変換して各指関節の屈曲角度を算出した。

**2.3 筋出力の測定** 筋出力を測定するために表面筋電図 (Surface EMG) を利用した。表面筋電図を測定する際、被験者の筋群の皮膚表面上に20~30mm離れた2個の表面筋電位電極 (日本電気三栄 (株) 製ディスプレイザブル電極: Biorode) により導出される筋活動電位を差動増幅器 (日本電気三栄 (株) 製: ポリグラフ366生体電気用増幅ユニット4124) に接続して双極誘導により表面筋電位を得た。次いで、筋電位出力をA/Dコンバータを介してパーソナルコンピュータに入力し、解析を行った。円筒把握における筋出力は各指の屈曲運動に依存することから、拇指と他の4指による対立運動を形成する短拇指屈筋および浅指屈筋を測定対象とし、図5に示すように各被験者の右手掌

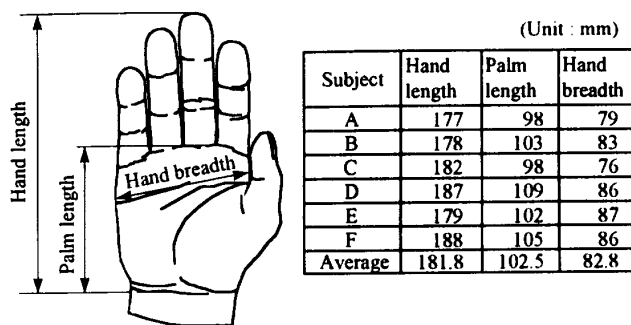


Fig. 7 Property of subject hand measurements

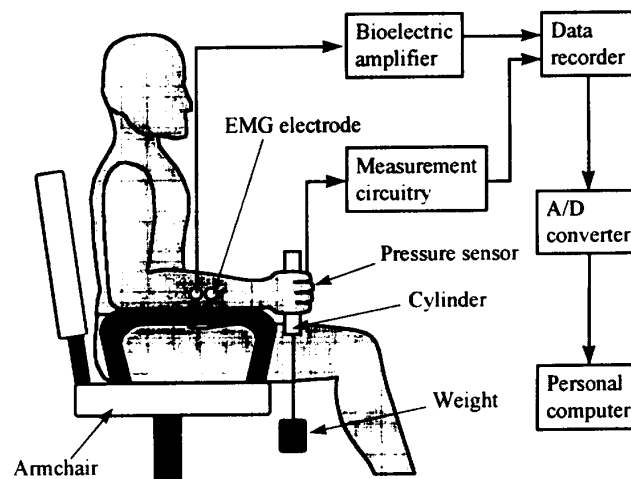


Fig. 8 Experimental set up

側の拇指球内側部と前腕の腹側筋の皮膚上に表面筋電位電極を配置した。円筒を把握して3秒経過後に約1秒間の筋電位を測定し、筋電位の解析にあたっては、従来の報告<sup>(4)</sup>でも広く用いられている被験筋の筋活動度の指標となる筋電図積分量 (Integrated Electromyogram: 以下Integrated EMG) を利用した。この筋電図積分量を求めるに当たっては、図6に示すように表面筋電図から筋電位波形の絶対値を取り、同一条件で3回測定した筋電位の平均値に基づいて平均筋電図波形を算出した。次いで平均筋電図波形を積分して筋電図積分量を求めた。

**2.4 把握時の圧力測定** 実験では、年齢22~26歳の健康な成人男性6名を被験者とした。各被験者の手の寸法を測るために、図7に示すように標準化された人体寸法計測項目<sup>(5)</sup>に従って手長、手掌長および手幅の各部の寸法を測定した。これら被験者より得た各部の平均寸法は、従来の日本人の成人男性の測定資料<sup>(6)~(8)</sup>における平均値、即ち、手長182.1mm、手掌長102.9mm、手幅84.8mmの各値に極めて良く一致する。測定を簡単化するために、上腕二頭筋などによる対象物体の持ち上げ力が作用せず、把握に必要な筋群による把握力のみが作用する条件を考慮して図8に示

すように、被験者の前腕を肘掛け上に置き、肘関節をほぼ直角に曲げた座位で測定を行った。この時、手根関節は中間位に維持し、パイプが垂直方向となるように把握した。また、握り部分の直径を18mm、26mm、38mm、48mm、60mm、73mmとした塩化ビニール製パイプそれぞれに、19.6N、39.2N、58.8Nの作用荷重を与えた場合の手指掌部圧力を測定した。

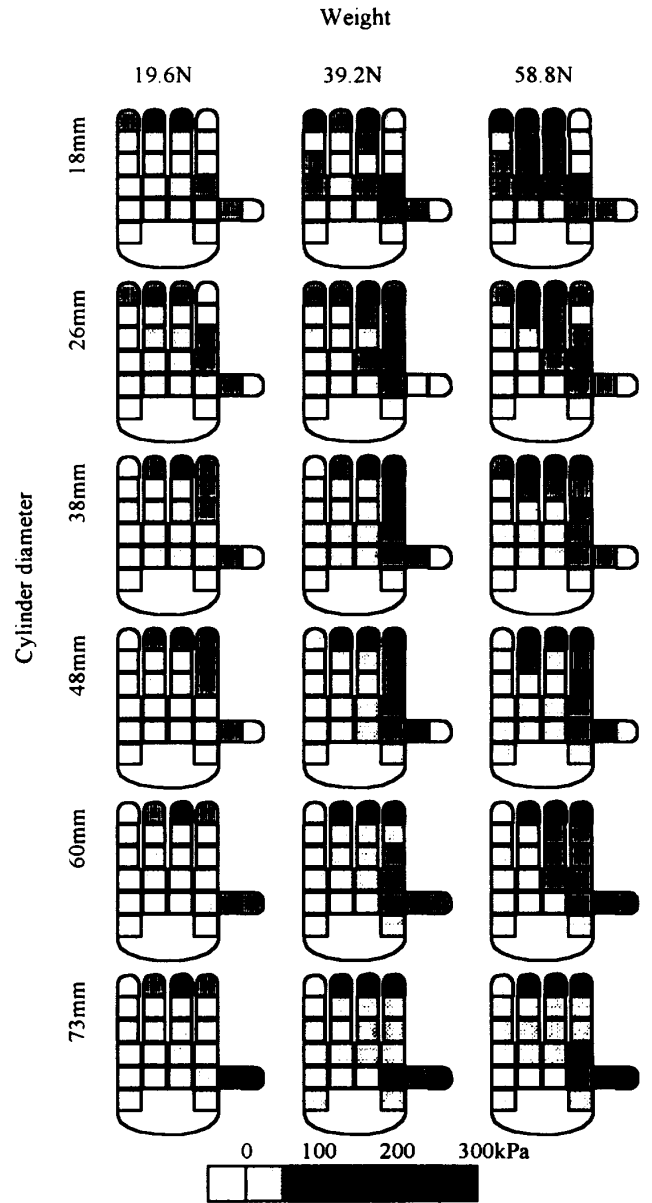
3. 結果および考察

3.1 手指掌圧力分布の特性 図9は、被験者6名による円筒の直径および作用荷重をそれぞれ変えた場合の手指掌部の平均接触圧力分布を示す。直径が26mm以下の場合、中指の末節部および示指の中手骨遠位端の掌部に100kPa以上の比較的高い圧力を生ずるが、手指掌部全体として50kPa以下の比較的低い圧力を生ずる。即ち、作用荷重の増加と共に特定の各圧力集中部のみで圧力の増加が確認された。また、円筒直径が48mm以上の場合、作用荷重の大きさに殆ど関係なく比較的高い圧力が拇指の基節部に生じ、直径の増加と共に末節部方向へ移動する傾向が見られる。さらに、直径が60mm以上の場合、拇指、示指、中指、環指の末節部に圧力が集中することが確認された。このことから、直径が小さい場合、拇指を除く4指と掌部で中指を中心に円筒外周面を巻くように把握するために各指全体と掌部での圧力分布はほぼ一定になるが、これより直径が大きくなると巻き込むように把握することが不可能になると共に拇指の支援による他の4指と掌部が円筒外周面を包み込むような把握状態に変わることが考えられる。さらに、直径が60mm以上では、各直径において示指、中指および環指の末節部と拇指による円筒外周面を挟み込む把握状態に変化するため、拇指の基節部から末節部へと高圧力部位が移動し、拇指以外の指の末節部で圧力集中を生じたものと思われる。

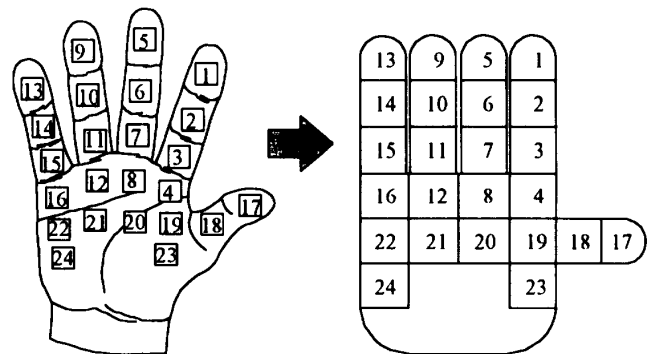
また、掌部では直径の変化に伴う圧力集中の傾向は見られないが、直径が60mm以上になると掌中央にほぼ接触しない部位を生じた。即ち、中手骨があたかもアーチを形成して掌部を横方向に横断するような状態を生ずるため円筒外周面に接触しない部位が掌中央部に生じたと思われる。

当然のことではあるが、それぞれの直径において重さが増加すると圧力も全体的に増加するが、圧力が集中して発生する部位に殆ど変化が見られないことから重さが異なっても同じ直径の円筒を握る場合の把握動作状態はほぼ変化しないと思われる。

次に、把握動作時の各指の力の配分がどの様になされているかを検討するために、全測定点における接触



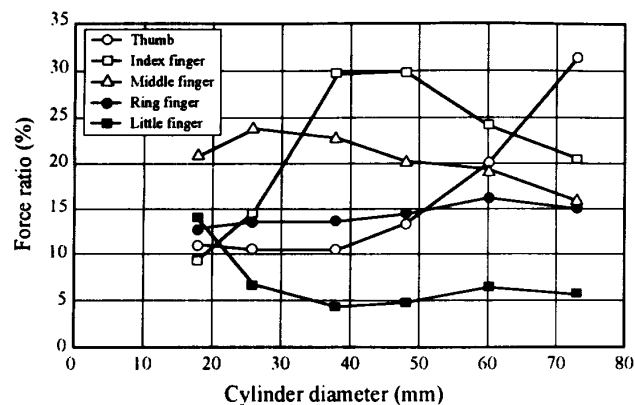
(a) Grip pressure display



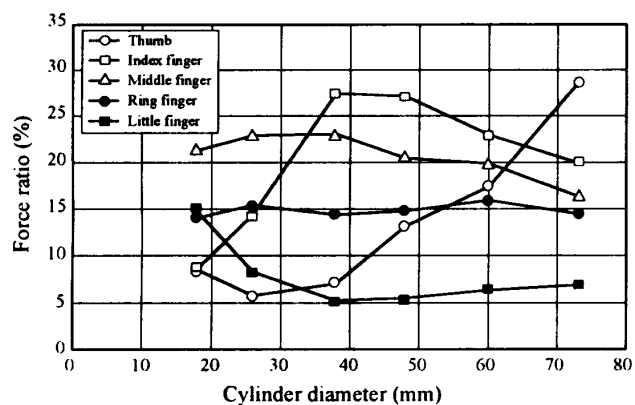
(b) Configuration of contact area

Fig.9 Characteristics of grip pressure distribution

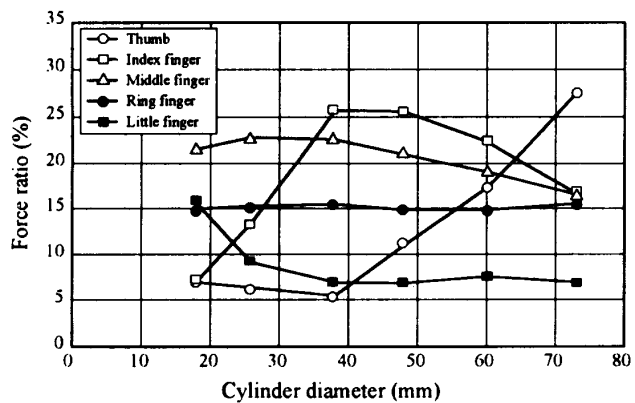
圧力から求めた手指掌部での力の総和に対する各指における力の総和割合を図10に示す。当然、センサから得られる圧力値は手指掌部全域をカバーするものでは



(a) Applied force : 19.6N



(b) Applied force : 39.2N



(c) Applied force : 58.8N

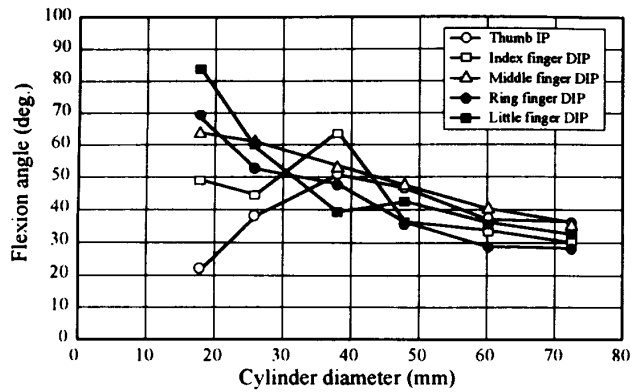
Fig. 10 Ratio of force detected on each finger to total force to grasp the cylinder

ないが、ここでは近似的に図9(b)の右側の状態をイメージして手指掌部の力の配分割合を考慮した。直径が同じ場合、円筒の重さが増しても各指が負担する力の割合は殆ど変化しないことが確認される。従って、前述したように同一直径を握る場合、円筒の重さにほぼ関係なく把握状態は変化しないことが確認される。さらに、円筒直径が30mm以下の場合には、拇指が負担

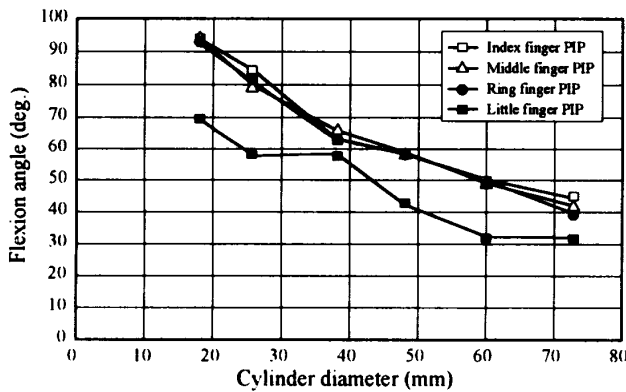
する把握力の割合は小さく、拇指を除く4指が把握動作の殆どを支配していることが解る。また、直径が40~50mm前後における各指の把握力負担割合は、拇指で5~15パーセント、示指で25~30パーセント、中指で25~20パーセント、環指で15パーセント、小指で5パーセントであり、円筒の重さによりこれらの負担割合は多少変動するが、定性的にはほぼ一定で安定した握り動作状態にあることを示している。一方、直径が50mm以上の場合には、示指および中指での負担割合はいずれの重さに対しても5~10パーセント減少するのに対し、拇指による負担割合は10~30パーセント急激に増加する。このことは、円筒外周面を完全に包み込む把握形態が不可能になったため、代わって拇指と他の指の対立運動による円筒外周面を挟み込む把握形態に変化したことを示している。

3.2 指関節屈曲角度の特性 各指関節での屈曲角度は、円筒の重さが増しても殆ど変化せず、一定であったことから円筒直径の変化による各指関節の運動特性を明確にする必要がある。そこで、例えば円筒の重さが19.6Nの場合の被験者6名による円筒直径と各指関節屈曲角度の平均値の関係を図11に示す。これによれば直径が増加するのに伴って拇指を除く4指の中手指節関節 (Metacarpophalangeal joint : 以下MCP関節)、近位指節間関節 (Proximal interphalangeal joint : 以下PIP関節) および遠位指節間関節 (Distal interphalangeal joint : 以下DIP関節) と拇指のMCP関節の屈曲角度は、殆ど直線的に減少する傾向が確認された。同時に、拇指の指節間関節 (Interphalangeal joint of thumb : 以下IP関節) では、直径の増加と共に屈曲角度も増加し、直径が約40mm前後において屈曲角度は最大となるが、直径が更に大きくなると、他の指の場合と同様の傾向を示すことが確認された。このことから、直径が小さい場合には、拇指を除く4指が把握動作の殆どを支配し、それに伴って拇指のIP関節およびMCP関節の屈曲角度が減少することが予想される。更に、直径が増加して約30mm前後になると、拇指が把握動作に直接関与し始めるため他のDIP関節、PIP関節、MCP関節およびIP関節で屈曲角度が一様に減少するものと考えられる。

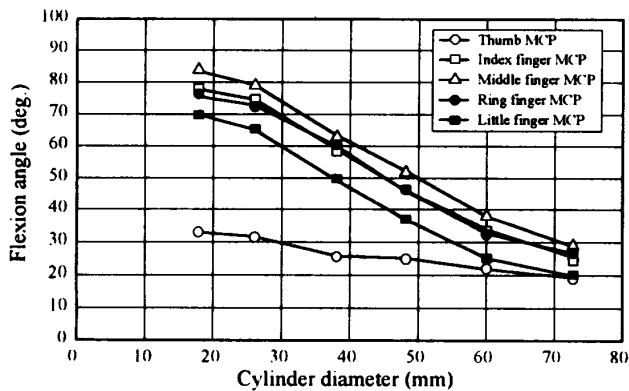
3.3 筋電図積分量の特 各被験者によって筋電位の出力電位レベルが大きく異なることから個々の被験者について解析を行った。例えば、被験者Dによる円筒の直径および重さの変化に対する浅指屈筋および短拇指屈筋より得た筋電図積分量の変化を示せば、図12のように表示される。浅指屈筋および短拇指屈筋は、共に円筒の重さが増加するに従って筋電図積分量



(a) Distal interphalangeal joint motion



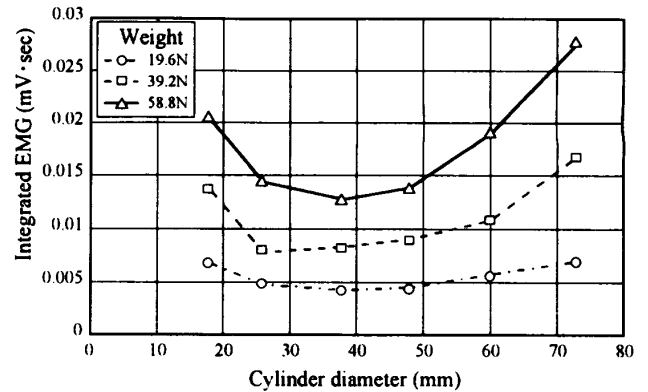
(b) Proximal interphalangeal joint motion



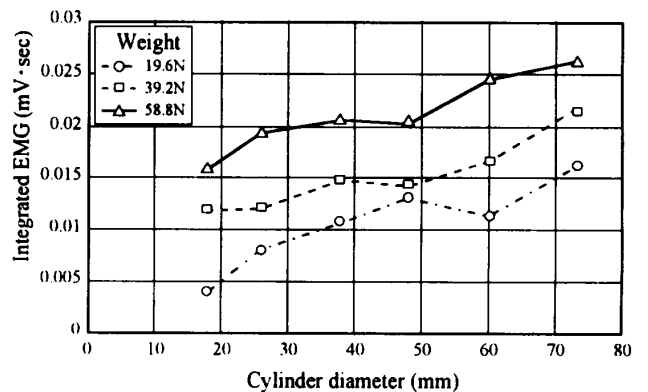
(c) Metacarpophalangeal joint motion

Fig. 11 Flexion angle of each finger joint

も増大する傾向が認められる。また、浅指屈筋は、円筒の重さに拘わらず直径が30~50mm前後において筋電図積分量が最小となり、この直径より大きくても小さくても筋電図積分量は増大する傾向が確認された。また、短拇指屈筋は、直径の増加に比例して筋電図積分量も大きくなる傾向が確認された。これらの傾向は、他の被験者においても同様に確認された。この様な傾向は把握形態に起因し、直径が30mm以下の比較的小さ



(a) EMG in muscle flexor digitorum superficialis



(b) EMG in muscle flexor pollicis brevis

Fig. 12 Variation of integrated electromyogram

な物を握る場合、拇指が把握動作に直接関与しないので拇指を除く4指と手掌部が把握動作を支配することを意味している。従って、4指の各関節が大きく屈曲した状態で円筒外周面を巻き込むように把握力を発揮するために筋電図積分量は、浅指屈筋において増大し、短拇指屈筋では小さくなる。また、直径が50mm以上の場合、拇指と他の4指による円筒外周面を完全に包み込む状態での把握動作が不可能となることから拇指および他の指の末節部による挟み込む把握動作状態となるため円筒直径の増加に伴って浅指屈筋および短拇指屈筋が共に筋電図積分量の増大を示すと思われる。

#### 4. 結 言

円筒物体の把握動作において手指掌の接触圧力、表面筋電位および指関節屈曲角度を測定することによって手の把握動作を生体力学的に解析し、以下の知見を得た。

1. 把握形態は、直径が30mm以下の場合、拇指を除いた4指と手掌部による円筒外周面を巻き込む把握形態を示す。直径が30~50mmの場合、全指と手掌部によ

- る円筒外周面を完全に包み込む把握形態となるが、さらに、直径が増加して50mm以上の場合には、拇指と4指による円筒外周面を挟み込む把握形態に移行して安定な把握状態を維持する。
2. 手指掌の接触圧力、指関節屈曲角度および筋電図積分量から、円筒の直径が40mm前後において最も力を入れた状態で握り易くなることが示された。
  3. 円筒の直径が同じであれば、円筒の重さが変化してもほぼ同じ把握状態を維持し、握りの安定性を失わない。

#### 参考文献

- (1) Hiroshi Kinoshita, Satoru Kawai and Komei Ikuta, Contributions and co-ordination of individual fingers in multiple finger prehension, *Ergonomics*, 38-6(1995), 1212-1230.
- (2) Robert G. Radwin, Seoungyeon Oh, Todd R. Jebsen and John G. Webaster, External finger forces in sub-maximal five-finger static pinch prehension, *Ergonomics*, 35-3(1992), 275-288.
- (3) R. Gurrarn, S. Rakheja and G. J. Gouw, A study of hand grip pressure distribution and EMG of finger flexor muscles under dynamic loads, *Ergonomics*, 38-4(1995), 684-699.
- (4) 例えば, Jean Claude Cnockaert, Ghislaine Lensele and Emile Pertuzon, Relative contribution of individual muscles to the isometric contraction of a muscular group, *J. Biomechanics* 8(1975), 191-197.
- (5) 日本人間工学会生体計測部会, 生体計測の標準化に関する報告書, *人間工学*, 6-1(1970), 25-41.
- (6) 航空医学実験隊, 航空自衛隊員の身体計測値-装備品等設計のための人間工学的資料-, (1980).
- (7) 日本規格協会, 日本人の体格調査報告書-既製衣料の寸法基準作成のための-, 日本規格協会, (1978-1981).
- (8) 保志 宏, 河内まき子, 日本人成人男子112名の54項目生体計測値とそれらの示数ならびに相関係数, *解剖学雑誌*, 53-3(1978), 238-247.