①

学位論文（博士）

手の把握動作に関する生体力学的解析

Biomechanical analysis of gripping motion

高野　剛

新潟大学大学院 自然科学研究科 博士後期課程
生産科学専攻

手の把握動作に関する生体力学的解析

— 目次 —

第１章　緒論 …… 1

第２章　手の解剖学と生体力学 …… 11
２．１　緒言 …… 11
２．２　手と上肢の機能と運動 …… 11
２．２．１　手と上肢の解剖学的運動定義 …… 11
２．２．２　手と上肢の筋・骨格および関節 …… 16
２．２．３　手指の機能と把握動作 …… 23
２．３　結言 …… 38

第３章　手の把握動作の解析手法 …… 39
３．１　緒言 …… 39
３．２　手指掌圧力の測定方法 …… 40
３．２．１　手指掌圧力測定システム …… 40
３．２．２　圧力センサと較正方法 …… 52
３．３　把握力の測定方法 …… 56
３．３．１　把握力測定システム …… 56
３．３．２　握力計の較正方法 …… 57
３．４　指屈筋力の測定方法 …… 58
３．４．１　筋電図 …… 58
３．４．２　筋出力測定・解析システム …… 61
３．５　手指掌接触面積の測定方法 …… 63
３．５．１　コンピュータ画像処理 …… 63
３．５．２　接触面積測定システム …… 71
３．６　手指掌摩擦係数の測定方法 …… 72
３．６．１　圧電素子式３成分動力計 …… 72
３．６．２　摩擦係数測定システム …… 74
３．７　関節運動の測定方法 …… 76

３．７．１　関節運動測定・解析システム …… 76
３．８　結言 …… 89

第４章　手の把握動作機能の生体力学的解析 …… 90
４．１　緒言 …… 90
４．２　握り感覚の計測 …… 90
４．３　円筒物体の把握動作の解析 …… 92
４．３．１　実験方法 …… 92
４．３．２　結果および考察 …… 97
４．４　円筒物体の握り易さの解析 …… 127
４．４．１　実験方法 …… 128
４．４．２　結果および考察 …… 132
４．５　結言 …… 160

第５章　テニスラケットの把握動作に関する解析 …… 162
５．１　緒言 …… 162
５．２　実験方法 …… 163
５．３　結果および考察 …… 166
５．４　結言 …… 179

第６章　結論 …… 180

付録１　DLT 法の基本原理 …… 183
付録２　官能検査法と SD 法 …… 187

参考文献 …… 191

謝辞 …… 197

第１章　緒論

先進技術の導入と徹底した品質管理を背景にした製品の低コスト化，高品質化，高付加価値化による経済の活性化は，“バブル”崩壊とともに産業の空洞化が加速度的に進んだ日本にとって，極めて重要且つ真剣に取り組むべき課題となっている．これまで，急速な高度成長を続けてきた日本経済にとって様々な問題を抱え過ぎてなかなか立ち直りのきっかけが掴めない状況は，深刻で，最高の危機的様相を呈しているとも言われている．このような状況にあって，製品開発での高付加価値化にはもはや限界があり，ユーザーが製品に付加価値を見出す時代になっている．即ち，極めて簡単且つ原始的とも思えるデザインのプラスチック製床清掃用具が，ユーザーによって，軽い，故障しない，使い易い点に付加価値が見出され，この製品一つだけでも１００億円の市場規模になっていることがその典型例であろう．しかしながら，ユーザーが製品に付加価値を見出すと言ってもやはり，その背景には製品の作り手が最大限の付加価値化を考慮していることも事実であり，ユーザーの多種多様化する好みや嗜好を的確に把握して製品設計に活かすことが重要であることに変わりはない．ユーザーの好みや嗜好を製品設計に反映する従来の手法として，年齢別や性別などを考慮したパネリストまたはテスターの心理学的，主観的申告に基づく評価を得るための官能検査法が一般的に知られている．近年では，これら官能検査法をデータベース化する工夫もなされ，例えば建築，被服や自動車関連業界ではいくつかの「ヒット商品」も生み出されている．この手法は，人間の感性としての「快適さ」を分析すると共に感性関連のイメージを物理的なデザイン要素に翻訳し，感性に合った製品設計を行う手法[(1)~(6)]である。例えば，HULIS（Human Living System：住宅イメージ設計支援システム），FAIMS（Fashion Image System：服装イメージ設計支援システム）や IKDES（Interior Kansei Design System：自動車内装イメージ設計支援システム）と呼ばれる「感性工学システ

ム」もその例である．しかしながら，このシステムも，心理学的な観点からの感性のみが解析の中心であることに変わりはなく，評価対象としての物理的条件を入力項目，官能評価結果としての「快適さ」を出力項目と見なして両者を統計的処理とコンピュータ処理によって関連づけたデータベースが主体になっている．従って，入力と出力項目の関連性を科学的に解析した手法ではなく，「製品開発の支援システム」として必ずしも十分な評価が得られていないようである．即ち，人間工学，あるいは，生体力学的な解析結果を十分考慮していないと思われる．

一方，平均寿命が延び，社会が高齢化するに伴い，定年延長や定年後の再就職，スポーツによるレクリエーション活動等，高齢者にとっての積極的な社会参加が可能になっている．余り知られていないが高齢者は，生涯，社会の構成員であることを実感することによって生き甲斐を持ち，自分の年齢に合った能力で家庭内でも有用な構成員でありたいと深く願っている．しかし，高齢者を取り巻く社会の生活環境は未だ十分ではなく，例えば，職場や家庭で使う機械や道具をとって見ても，コンピュータ制御などによる高性能・高品質化がなされ，操作方法は殆ど高齢者用に配慮されていない．しかし，いわゆる社会的弱者と呼ばれる人々に対する生活環境は次第に広く認識されるようになり，社会的に対処・解決すべき課題として国民の深い理解を得るに至っている．その一つに，国家規模で取り組む通産省の大型プロジェクトとして 1994 年度から 10 年間の予定でスタートした「人間の心の仕組みの解明」プロジェクトがある．ここでは脳の情報処理メカニズム，意志・意欲のメカニズムなど，感性という言葉で表現される「ヒトの心」の解明が研究対象であり，これまで立ち遅れてきた人間の感覚・感性を定量化する技術開発に直結するものと期待されている．即ち，人間を取り巻くあらゆる生活環境における機械や道具等の使い易さ，快適性等も心理学的側面だけでなく，物理的・工学的側面からの研究も，当然行われる．特に，物理的・工学的側面からの研究とは，生体の持つ機能の客観的

な解明を目的とするバイオエンジニアリング（生体工学）に他ならない．バイオミメティクス（生体模倣工学）やバイオメカニクス（生体力学）は，工学的な技術を利用して，生体のメカニズムや生体の優れた機能を解析する学術分野であり，その研究領域は急速な拡大を示している．また，これらの研究成果は医療技術の高度化のみならず，工業分野においても広く応用され，著しい成果を上げるとともに社会的に大きく貢献している．

このような観点から，人間の置かれた生活空間を生体力学的に考えた場合，人間－機械系，または人間－道具系のインターフェイスでは，手は極めて重要な役割を果たしている．ヒトの手は，解剖学的に他の動物に比べて拇指の可動範囲が広いため，物体を握る場合，物体の形状を瞬時に判断し，安定な握りを可能にする他の動物には見られない特性を有している．これは脳の情報処理メカニズムと手の動作機能が深く関係していることに由来しており，例えば，物体を把握する場合，手で物体に触れるだけで硬さ，形状，重量など物体固有の情報を，皮膚の受容器が持つ温覚，冷覚，痛覚，触覚などの体性感覚をフルに活用して瞬間的に取り込むと同時に大脳で判断し，把握動作の最適制御を行っている．このようなヒトの手の優れた機能を利用して機械を操作したり，道具を使用したりするためには“使い易さ”と共に“握り易さ”も十分考慮して機械や道具の設計を行う必要がある．特にハンドル等によって機械や装置の微妙な操作や高度の制御を必要とする作業では，最適な握り状態を得るだけではなく，ハンドルの握り感覚も作業効率などに大きく影響することが知られている．即ち，握り部分の形状や材質によっては，握り感覚が大きく異なり，作業時のストレス蓄積の原因となることもある．従って，このような感覚・感性をも取り入れた手の把握動作の解析は，基本的ではあるが極めて重要ではある．しかし，従来からこのような感覚的概念は，研究対象として取り上げられることは少なく，その理由として感覚的要素を十分に取扱う手法が確立されていないかったこともあげられる．従って，これら手に関する感覚・

感性をあつかった報告例は殆ど見られず，未だ十分研究されていないようである．

以上のことから，本研究は使い易い，使い心地の良い機械や道具を設計する上で特に重要なインターフェイス部における感覚を含めた手の握りについて生体力学的に解析し，その意義と解析結果の応用可能性を明示することを目的としている．

一般に，円筒物体を握る動作では，手によって円筒物体に伝達される力を考えると，把握に必要な筋力および把握力，手指掌と円筒間の接触面積および摩擦係数等が重要である．従って，このような把握動作に関係した物理量を実験的に求め，円筒物体を握る感覚との関連性を生体力学的手法の中に官能検査法を取り込んで調べることにより，円筒物体の把握動作に関する“脳の情報処理メカニズム”を解明するための基礎的データが得られる．そこで，人間は感情に左右されると物の握り方が変わることおよび物の握り方によって感情を表現すること等に着目し，物体を握る動作に伴って生ずる接触圧力を測定すれば，握りによる感覚・感性の解析も可能と考えられる．

ヒトの手の把握動作に関する従来の研究では，解剖学的な観点から把握機能を調べた研究例が多い．しかし，運動学的あるいは力学的な観点から把握機能を研究した例もあり，静的な把握動作を対象とした研究では，Radwin らが導電性ポリマーを利用した力センサ[15]を用いて５指の末節骨部により静的に挟む，いわゆるピンチ把握時の個々の指の力や把握への貢献割合に関する解析例[16]を示している．江原らは静的な把握力制御に関する解析例[17][18]を，動的な把握動作を対象として木下らは３指，４指，５指によるピンチ把握の持ち上げ動作における各指の把握への貢献割合や個々の指力の働きに関する解析例[19][20]や２指，３指，４指，５指による円筒物体の円周部を指先端部で挟んで持ち上げる動作時の個々の指の配置や指力に関する解析例[21]を，中沢らは２指のピンチ把握により持ち上げたり置いたりする動作に関する把持力制御に関する解析例[22]~[24]を，Buchhplz

らは種々の材料と手掌皮膚間の摩擦とこれに及ぼすピンチ力（挟み力）と手掌部の水分の影響に関する解析例[25]を，Frederick らは３指で錘付き立方体を運搬する際のピンチ力と摩擦の関係に関する解析例[26]をそれぞれ示している．しかし，これらの多くは，拇指と他の４指によって挟む形態のピンチ把握を対象とし，さらに，極めて小さい把握力に対する把握動作機能を扱った研究である．これに対し５指と手掌部を使った静的全手指掌把握に関して，Fransson らは把握力に及ぼす把握幅と把握形態の影響を解析[27]し，Lee らは DLT 法を用いて円筒物体を握る指関節角度と感圧紙を用いた最大指力の解析[28]を行い，Ayoub らは筋電図を用いて最適円筒ハンドルサイズを検討している[29]．しかし，静的な全手掌把握を対象とした研究例は極めて少ないようである．

また，指屈筋などによる把握力の正確な測定を試みた研究として，Ohtsuki は歪ゲージを利用した張力計により把握時の個々の指力割合と筋電図による指屈筋の変化[30]や把握力と筋電図積分量の関係[31]についてそれぞれ解析している．Kumar らは摘む，ピンチ把握および力を伴う把握動作時の把握力と筋力の測定精度を解析[32]し，Fairfax らはリハビリテーションなどに必要な筋の等尺性収縮による把握力の正確な測定に関する解析[33]を，Milerad らは筋電図を用いて上肢の肢位が正確な把握力を必要とする手作業に与える影響についての解析[34]を，Janda らは筋電図を用いた把握力の解析[35]を，Armstrong らは手と腕の位置および把握力の記録方法に関する研究[36]を，Lindahl らは歪ゲージを利用した把握力計とコンピュータ表示式把握力解析システムを用いて健常者の把握力をデータベース化する研究[37]をそれぞれ行っている．

振動環境下の把握動作を対象として，Gurram らは５指の先端部に FSR（Force sensing resistors）式力センサを貼付し，20～1000Hz で振動するハンドルの動的負荷に伴う指屈筋によるグリップ圧力分布と筋電位に関する解析[38]を行い，Radwin らは力を要する道具ハンドル部の把握に及ぼす振動の影響を解析[39]している．また，Burstrom

らは手と腕における振動エネルギの吸収[40][41]を，Hutton らは木材伐採などにおけるチェーンソー把握時の振動特性[42]を，Maeley らはドリルによる穴開け作業における振動周波数および手関節角度が及ぼす把握力への影響[43]をそれぞれ研究している．

手の機能を解析するための数学的モデルが研究されている．例えば，Leijnse らは解剖学的拘束を伴う指の運動に関するモデル研究[44]を，Buchholz らは把握能力を評価するための手の運動学モデルに関する研究[45][46]を行っている．

その他，“握り易さ”などの心理学的な観点からの研究は，主として人間工学等の分野で数多く行われているが，官能評価のみに基づく研究が大半を占めている．

これに対して，“握り易さ”などの感覚を生体力学的な観点から取り扱った研究例は少なく，八高らによるヒトの感覚を評価尺度に用いるための握り易さの感性評価[47]~[51]や握り易さに関係する把握力を支配する因子の解析例[52]~[55]が見られるだけのようである．

本研究の目的である手の把握動作機能を運動学的，力学的観点から解析するためには，手指掌面と把握物体間の接触圧力や各指関節の運動を如何に正確に且つ関連づけて測定するかが極めて重要であり，これらの主な測定方法を示すと以下のようになる．

①接触圧力の測定方法

(1)感圧紙

感圧紙は，加圧力の作用により発色するフィルムにより接触圧力を測定する方法であり，「プレスケール」の商標で富士写真フィルム(株)社より市販されている．この測定原理は，図１－１に示すように，A，C の２枚のフィルムを重ねて接触部に挿入し，圧力が作用すると，A フィルム表面のマイクロカプセルが圧力の作用領域のみ破壊し，カプセル内の無色塗料が流出し C フィルム表面の顕色剤と化学反応を起こして発色することを利用している．従って，その色濃度を測定することにより手軽に作用圧力分布が得られること，厚

図１－１　感圧紙（プレスケール）の測定原理

図１－２　小型ロードセルの測定原理

さが約 200 μm と非常に薄く接触状態に与える影響が少ない等の利点を持つことから接触圧力分布の測定に広く用いられている．負荷過程における最大圧力値のみが測定可能であること，しかもその精度は一般に悪いことや対象物との摩擦に弱いこと，また，しわになり易く，複雑な表面形状に適合しないなどの問題点がある．

(2)小型ロードセル

小型ロードセルでは，図１－２に示すように荷重や圧力を円環状のハウジングに張られたダイヤフラムの変形として歪ゲージ等で測定する．精度的に優れており一般にも広く用いられているが，硬く，薄くできないため，ダイヤフラム面に力が伝達されない可能性もあり，曲率を有する接触界面への応用は困難である．また，接触面でこの小型ロードセルを埋め込む等の工夫が必要であり，分布を求めることは極めて困難である．

(3)圧電素子

フッ化ポリビニリデン（PVF_2）や圧電セラミックス等の圧電素子は機械的に圧力や張力を作用させると表面に瞬間的に分極電荷が現れる材料である．この特性を利用して接触圧力の測定を行う．圧電素子だけでは瞬間的な圧力変化しか測定できず，静的な圧力の測定には特別な回路が必要である．また，硬く，形状的にも比較的大きく厚いため，一般的に接触面に埋め込み使用され，接触面に凹凸が生じ易く，本来の接触状態を損なう場合が多い．

(4)歪ゲージ

歪ゲージは，ゲージグリッド部が歪むことにより生じる電気抵抗値の変化量を測定するものである．これを接触物体の一方に貼付することにより，作用負荷による歪み量を直接測定することができる．較正実験により，この歪み量から荷重値を算出することは可能である．しかし，ゲージを貼付する際に直接，接触界面内に貼付することは不可能であり，その周囲に工夫して貼付する必要がある．また，圧力分布が求められない等の問題点がある．

②関節運動の測定方法

(1)電気角度計

電気角度計（Electrogoniometer）を，図１－３に示すように多節の

リンクをポテンショメータを介して組み合わせた構造から成る測定システムはゴニオメータまたは空間リンケージシステムとも呼ばれ，ポテンショメータの角度変化により，相対運動を算出する．リンクの自由度により，３自由度と６自由度があるが，３自由度では関節間の回転のみを測定するのに対し，６自由度では回転および並進運動の測定が可能となる．角度変化を電気的なデータとして処理するため経時的な測定が可能であるが，指骨により構成される指関節においては，骨が小さく，各関節間距離が小さいため角度計自身の形状および重さによって運動が制限され，生理的条件下での測定は困難になる場合もある．

(2)３次元測定機

測定対象となる骨に参照点を取り付け，その参照点の座標を３次元測定機により直接計測することにより関節運動を算出する．高精度な測定が可能であるが，プローブによる参照点座標が煩雑なことや運動体に取り付けて経時的な測定ができないという問題点がある．

図１－３　６自由度電気角度計

以上のように，これらの力学的および運動学的な測定方法には，それぞれ制約があり，使用に当たって解決すべき問題点も多い．これらを考慮して，本研究では，接触圧力の測定には，比較的薄く，柔軟性に富み，接触界面への影響が少なく，経時的な変化の連続測定が可能な感圧導電ゴムを圧力変換素子として用いた．また，関節運動の測定には，非接触により多数の関節運動を同時に測定可能なDLT（Direct Linear Transformation）法を応用した多方向同時ビデオ撮影法も用いた．

本論文は，「手の把握動作に関する生体力学的解析」と題して，全６章から構成される．

第１章「緒論」では，本研究に関連する社会的背景について論述し，手の把握動作機能を感覚・感性を同時に取り扱って，運動学的，力学的に評価する重要性について述べ，本論文の意義と概要について述べている．

第２章「手の解剖学と生体力学」では，手の把握動作を解析する上で必要な知識として手と上肢の機械的および解剖学的な機能について，解剖学的な運動定義やその構造である骨格・関節・筋について詳述する．

第３章「手の把握動作の解析手法」では，手の把握動作の解析に用いた手指掌圧力，把握力，筋力，手指掌接触面積，手指掌摩擦係数，関節運動の各測定システムについて詳述する．

第４章「手の把握動作機能の生体力学的解析」では，把握動作機能の基本解析として，握り感覚の計測方法，円筒物体の把握動作の解析，円筒物体の握り易さの解析について詳述する．

第５章「テニスラケットの把握動作に関する解析」では，把握動作解析の応用例として，テニスにおけるストローク動作時のラケット把握動作について詳述する．

第６章「結論」では，本論文で得られた結果の総括と研究の展望について述べる．

第２章　手の解剖学と生体力学

２．１　緒言

ヒトの手は，解剖学的に他の動物と比べて拇指の可動範囲が広いためどのような形状の物体を握る場合においても確実に捉えることが可能な特性を有し，また，物体を握る動作と共に皮膚の受容器の持つ温覚，冷覚，痛覚，触覚などの感覚情報も瞬時に得る機能を備えている．このような握り感覚を含めた手の物体把握機能を生体力学的に解明するには，解剖学的および機械的に複雑な構造をしている手の機能を理解することが必要である．

本章では，手による物体把握動作の解析において必要な手と上肢に関する解剖学的用語，方位用語，解剖学的運動定義，解剖学的構造，把握動作[(7)~(9)]などについて詳述する．

２．２　手と上肢の機能と運動

２．２．１　手と上肢の解剖学的運動定義

(1)人体の解剖学的正位および方位用語

ヒトの最も基本となる肢位は，図２－１に示す「解剖学的正位」であり，ヒトが両足を揃えて顔，眼，手指掌を正面側へ向けて直立する肢位である．この解剖学的正位において人体を通過する３つの直交面が定義される．すなわち，人体を前後に分割する前額面または冠状面（Coronal Plane），左右に分割する矢状面または正中面（Sagittal Plane），上下に分割する横断面または水平面（Horizontal Plane）である．人体を前額面で分割する正面方向を前方（Anterior），背面方向を後方（Posterior）という，また，人体の中央を通る正中矢状面で分割する場合，正中矢状面に近い方向を内側（Medial），遠い方向を外側（Lateral）という．さらに，横断面で分割する場合，頭尾方向の相対的な位置関係は上方または頭側

図２－１　人体における解剖学的正位と方位用語

図２－２　手における方位用語

（Superior），下方または尾側（Inferior）と呼ばれるが，特に上肢および下肢の場合には，同様な意味で遠位（Distal），近位（Proximal）がそれぞれ用いられる．なお，手においては特に，図２－２に示すように前方および後方の代わりに掌側（Palmar），背側（Dorsal）を用いる．また，内外側の代わりに拇指側を橈側（Radial）小指側を尺側（Ulnar）という名称をそれぞれ用いる．
さらに，一般に呼ばれる親指は，拇指（Thumb）または第１指，人差し指は，示指（Index Finger）または第２指，中指は，中指（Middle Finger）または第３指，薬指は，環指（Ring Finger）または第４指，小指は，小指（Little Finger）または第５指という名称を用いる．

(2) 手と上肢の運動定義

肩関節の運動定義は，図２－３に示すように上肢の体幹に対する横方向の動きを外転（Abduction），内転（Adduction）といい，前後方向の動きを屈曲（Flexion），伸展（Extension）という．また，水平面内における動きを水平伸展（Horizontal Extension），水平屈曲（Horizontal Flexion）と呼ぶ．

肘関節の運動定義は，図２－４に示すように前腕の上腕に対する前後方向の動きを屈曲（Flexion），伸展（Extension）という．前腕の捻れる動き（回旋運動）を回外（Supination），回内（Pronation）という．手関節の運動定義は，図２－５に示すように掌背側方向の動きを掌屈（Palmar Flexion），背屈（Dorsal Flexion）といい，橈尺側方向の動きを橈屈（Radial Deviation），尺屈（Ulnar Deviation）と呼ぶ．指関節の運動定義は，図２－６に示すように掌側方向の動きを屈曲，背側方向への動きを伸展といい，中指を基準軸として，基準軸から離れる動きを外転（Abduction），基準軸に近寄るまたは交叉する動きを内転（Adduction）という．また，拇指が回転して，示指，中指，環指および小指と向き合う動きを拇指の対立運動と呼ぶ．

図２－３　肩関節の運動定義

図２－４　肘関節の運動定義

図２－５　手関節の運動定義

図２－６　指関節の運動定義

2．2．2　手と上肢の筋・骨格および関節

(1)手と上肢の骨格と関節

ヒトの上肢の骨格は，図２－７に示すように上腕骨（Humerus）および前腕骨の橈骨（Radius）と尺骨（Ulna）により構成される．この上腕骨頭（Caput Humeri）と肩甲骨（Scapula）により肩関節が形成される．上腕骨小頭（Capitulum Humeri）と橈骨頭窩（Fovea Capitis Radii）により腕橈関節（Articulatio Humeroradialis），上腕骨滑車（Trochlea Humeri）と尺骨の滑車切痕（Incisura Trochlearis）により腕尺関節（Articulatio Humeroulnaris），橈骨の関節環状面（Circumferentia Articularis Radii）と尺骨の橈骨切痕（Incisura Radialis）により上橈尺関節（Articulatio Radioulnaris Proximalis）のそれぞれ３つの関節が形成され，これらにより肘関節が形成される．また，尺骨頭（Caput Ulnae）と橈骨の尺骨切痕

図２－７　上肢の骨格と関節

図２－８　手の骨格と関節

（Incisura Ulnaris）により下橈尺関節（Articulatio Radioulnaris Distalis）が形成される．

手の骨格は，図２－８に示すように前腕骨の橈骨と尺骨の先に４個ずつ２列に並んだ８個の小骨からなる手根骨（Carpale）があり，舟状骨，月状骨，三角骨および豆状骨の４つから成る近位手根骨（Ossa Carpi Proximalia）の列と，大菱形骨，小菱形骨，有頭骨および有鉤骨の４つから成る遠位手根骨（Ossa Carpi Distalia）の列がある．これらの近位手根列，橈骨と関節円板により近位手根関節，すなわち，橈骨手根関節（Articulatio Radiocarpea）が形成される．また，近位手根列と遠位手根列により遠位手根関節，すなわち，手根中央関節（Articulatio Mediocarpea）が形成される．これらの関節と下橈尺関節の３つより手関節が形成される．

遠位手根列の先に掌面を形成する中手骨（Metacarpal）が５本伸び，その先に基節骨（Proximal Phalanx），中節骨（Middle Pha-

lanx），末節骨（Distal Phalanx）の指骨（指節骨）により拇指，示指，中指，環指および小指の５指が形成される．拇指では，手根骨と中手骨により拇指手根中手関節（Carpometacarpal Joint of Thumb：CMC 関節），中手骨と基節骨により拇指中手指節関節（Metacarpophalangeal Joint of Thumb：MCP 関節），基節骨と末節骨により拇指指節間関節（Interphalangeal Joint of Thumb：IP 関節）が形成される．また，拇指以外の４指においては，中手骨と基節骨により中手指節関節（Metacarpophalangeal Joint：MP 関節），基節骨と中節骨により近位指節間関節（Proximal In-terphalangeal Joint：PIP 関節），中節骨と末節骨により遠位指節間関節（Distal Interphalangeal Joint：DIP 関節）が形成される．近位指節間関節（PIP 関節）および遠位指節間関節（DIP 関節）を単に指節間関節（IP 関節）と呼ぶ場合もある．

手指掌面には，図２－９に示すように遠位手掌皺，中央手掌皺，近位手掌皺，指手掌皺および指節間指屈曲皺があり，手指掌面の区

図２－９　手指掌面

別がされている．手掌面を近位手掌皺により隔てられた橈側には，拇指球があり内包する拇指球筋群により隆起している．また，尺側には小指球筋群を内包する小指球がある．指部と手掌部を区別する指手掌皺の近位部には，中手骨の骨頭による隆起が見られる．

(2) 手と上肢の筋

前腕の手掌側面には，図２－10 に示すように浅層の手掌側筋として尺骨側には，長掌筋（Palmaris Longus），橈側手根屈筋（Flexor Carpi Radialis），尺側手根屈筋（Flexor Carpi Ulnaris），浅指屈筋（Flexor Digitorum Superficialis）があり，橈骨側には，腕橈骨筋（Brachioradialis），長拇指屈筋（Flexor Pollicis Longus）がある．また，手掌中には，短拇指外転筋（Abductor Pollicis Brevis），短拇指屈筋（Flexor Pollicis Brevis）がある．さらに，図２－11 に示すように深層の手掌側筋として深指屈筋（Flexor Digitorum Profundus）がある．

前腕の背側面には，図２－12 に示すように浅層の背側筋として尺骨側には，肘筋（Anconeus），尺側手根伸筋（Extensor Carpi Ulnaris），小指伸筋（Extensor Digiti Minimi）があり，橈骨側には，腕橈骨筋（Brachioradialis），長橈側手根伸筋（Extensor Carpi Radialis Longus），短橈側手根伸筋（Extensor Carpi Radialis Brevis），長拇指外転筋（Extensor Carpi Ulnaris），総指伸筋（Extensor Digitorum），短拇指伸筋（Extensor Pollicis Brevis），長拇指伸筋（Extensor Pollicis Longus）がある．また，図２－13 に示すように深層の背側筋として尺骨側には，示指伸筋（Extensor Indicis），橈骨側には，回外筋（Supinator ）がある．

手の把握機能に深く関わる主要な筋群は，拇指の屈曲運動に関わる長拇指屈筋，伸展運動に関わる長拇指伸筋と短拇指伸筋があり，また，外転運動には長拇指外転筋が，内転運動には拇指内転筋斜頭と拇指内転筋横頭が関係する．拇指以外の示指，中指，環指，小指の４指の屈曲運動には浅指屈筋と深指屈筋が関係し，伸展運動には

図２－10　前腕の浅層の手掌側筋

図２－11　前腕の深層の手掌側筋

図２－12　前腕の浅層の背側筋

図２－13　前腕の深層の背側筋

図２－14　手掌中の筋

小指伸筋，示指伸筋と総指伸筋が関係する．

手指の複雑・巧妙な運動を行うためには複数の筋が必要であるが，手掌中という限定された範囲内で多くの筋を内含することは困難であり，従って，前腕中にも筋を内含する必要がある．前腕筋群は，手掌中において，それぞれ長い腱となり，腱鞘という潤滑液に待たされた鞘に包まれ中手骨や指骨に至る．また，筋は手根部を通過する際，手掌側は屈筋支帯，背側は伸筋支帯という筋膜性の帯を通り，手掌中を通過する腱が浮き上がらないように押圧固定し，運動の円滑さを保持している．これら前腕筋群は，主として力の必要な運動において働く．一方，微妙な指の運動は，手掌中の小さな筋の働きによる．図２－14 に示すように手掌中の筋は，中手筋，拇指球筋群，小指球筋群に大別される．中手筋の内，指の内転時に作用する掌側骨間筋は，示指，環指および小指の中手骨とそれぞれに対応した基節骨に至り，外転時には背側骨間筋が作用している．虫様筋は中手指節関節（MP 関節）を屈曲するように働き，また，指節間関

節（IP 関節）に関しては伸展するように働く．

拇指の内転運動には，短拇指屈筋，拇指対立筋，拇指内転筋がそれぞれ作用し，外転運動には，短拇指外転筋が作用する．手指の運動において拇指は，他の４指と対向した位置を取ることが可能である．これを前述したように拇指の対立運動という．対立運動は，物体の把握動作には欠かすことのできない運動であり，手によって成される微妙な動作は，この拇指の対立運動なしではあり得ない．この対立運動には，拇指の対立筋が主に作用するが拇指球筋群の補助も必要である．対立位から戻る復位には，短拇指伸筋，長拇指伸筋，長拇指外転筋により行われる．小指球筋群は，小指の外転時に作用する小指外転筋，中手指節関節（MP 関節）の屈曲に関わる短小指屈筋，小指を対立位とする小指対立筋からなる．

２．２．３　手指の機能と把握動作

(1) 手指の機能

ヒトの手は物体を握るために，その形状を変化する必要がある．例えば，図２－15 に示すようにガラス板のような平らな面の上では，手が広がり，拇指球，小指球，中手骨の骨頭，指骨の掌側面でガラス板と接触して平坦になる．しかし，手指掌の下外側面のみは，ガラス板と接触しない．しかし，大きな物体を握る場合には，手の異なる方向に走っているアーチに従って手は変化する．

手の横方向に走っているアーチは，手根の凹に一致する手根アーチである．これは遠位では中手骨の骨頭により形成されている中手骨アーチへと続いている．また，手の縦方向に走っているアーチは，手根から広がり中手骨と指骨によってそれぞれの指１本１本に形成されている中手指節アーチである．このアーチは手指掌面で凹み，それぞれのアーチの要は中手指節関節（MP 関節）に存在する．拇指と示指，中指，環指および小指の各４指の指骨掌側面が互いに向き合う対立運動では，拇指と各４指により手の斜め方向に形成される４つのアーチが形成される．

図２－15　手とガラス板の接触部分

手が窪むと，前方に凹形の深い溝が形成される．この溝は，手根骨の豆状骨に触れることのできる小指球の底から第２中手骨の骨頭まで伸びており，“生命線”として知られている手掌皺とほぼ一致する．これはまた円筒形の物体を完全に握りしめた場合に円筒形物体軸の向く方向と一致している．

基節骨，中節骨，末節骨の３つの指骨と中手指節関節（MP 関節），近位指節間関節（PIP 関節），遠位指節間関節（DIP 関節）の３つの関節により連結された多運動性機構は，中手骨に支持された基本要素を構成し，この基本要素が５つ組み合わされて手指は形成されている．しかし，拇指の形成要素である第１中手骨と大菱形骨により形成される拇指手根中手関節（CMC 関節）は，非常に大きな可動域を有することから独立して扱われる．

中手指節関節（MP 関節）は，３つの運動自由度を有する球関節に属している．中手骨の骨頭は，図２－16 に示すように半球形ですべての方向に凸状の形状であり，背側面よりも，よく使用される掌側面においてより凸状を有している．基節骨の基部は，すべての方向において凹状の形状である．関節面は，中手骨の骨頭の関節面

図２－16　中手指節関節（MP 関節）の要素

図２－17　中手指節関節（MP 関節）の掌側板

のなす角度が約 180° であるのに対して，基節骨の基部の関節面のなす角度は約 20～30° であり，かなり狭い．このことにより中手骨に対して基節骨の大きな移動を可能にしている．

中手指節関節（MP 関節）の関節包の掌側面は，図２－17 に示すように厚い線維軟骨により強固に補強されている．この線維軟骨を掌側板といい，指の伸展の強力な制動機構と関節接触面を増大させ，関節軟骨が受ける応力を減少させる役割を果たしている．中手指関節（MP 関節）の動きは，掌側板と中手骨頸部の間に位置する関節包が柔軟性を保ってはじめて十分な動きが可能となる．

中手指節関節（MP 関節）の側副靱帯は，図２－18 に示すように中手骨の骨頭における関節の屈伸運動軸に対して背側に付着し，また，基節骨の基部では前外側面または前内側面に付着している．このため側副靱帯は伸展位で弛緩し，屈曲位で緊張する．従って，指は屈曲位において安定し，例えば，ハンマーの柄を握る動作などに解剖学的な安定性が得られ，力強い握り締めが促進される．しかし，伸展位や軽度の屈曲位においては，側副靱帯の弛緩に伴う中手指節関節（MP 関節）の遊びが生じるために，例えば，ボールを握る動作などにおいては指自体が回転し，手の形状適応が可能となる．

図２－18　中手指節関節（MP 関節）の側副靱帯

近位指節間関節（PIP 関節）と遠位指節間関節（DIP 関節）の２つの指節間関節は，１つの運動自由度のみを有する蝶番関節に属する．指節骨の骨頭は，図２－19 に示すように滑車形状であり，指節骨の基部は，隆起して分割された２つの凹形状である．関節面は，指節骨の骨頭の関節面のなす角度が約 180° であるのに対して，指節骨の基部の関節面のなす角度は約 90° である．指節間関節（IP 関節）の関節包の掌側面は，図２－20 に示すように中手指節関節（MP 関節）と同様に厚い線維軟骨の掌側板により強固に補強されている．

指節間関節（IP 関節）は，図２－21 に示すように指節骨の骨頭および基部における関節の屈伸運動軸に関する側副靱帯の付着部の位置より，側副靱帯の指節骨線維束は伸展位において緊張し，屈曲位で極めて僅かに弛緩する．このことより指節間関節（IP 関節）は，側方安定性が保証されている．

中手指節関節（MP 関節）の可動域は，球関節に属すことから屈曲－伸展運動，外転－内転運動および軸回旋運動の３方向への運動が可能である．図２－22 に示すように屈曲－伸展運動において屈曲は，平均で約 90° の可動域を有している．示指から小指にいく

図２－19　指節間関節（IP 関節）の要素

図２－20　指節間関節（IP 関節）の掌側板

図２－21　指節間関節（IP 関節）の側副靭帯

に従って約 10° づつ増加し，橈側の指より尺則の指は大きく屈曲することが可能である．自分の意思により行う自動運動と他の補助により行う他動運動に拘わらず屈曲可動域は一定である．伸展は，自動運動において約 30° であり，他動運動において約 70° である．

外転－内転運動および軸回旋運動は，既に述べたように伸展位，または，軽度な屈曲位においてのみ可能である．内転－外転運動は，側方運動性が殆どない中指を基準軸として，指を開く運動の場合が

外転運動であり，基準軸に近づく，または基準軸と交叉する運動の場合が内転運動である．伸展時における自動および他動運動の外転－内転運動の全可動域は示指において約 40°，小指において約 30° である．また，この外転－内転運動は，常に軸回旋運動を伴った運動である．外転では内旋運動を伴い，内転では外旋運動を伴う．

指節間関節（IP 関節）の可動域は，蝶番関節に属すことから屈曲－伸展運動のみであり，図２－23 に示すように近位指節間関節（PIP 関節）において自動および他動運動による屈曲は，約 100° であり，自動および他動運動による伸展は，約 0° である．遠位指節間関節（DIP 関節）において自動および他動運動による屈曲は，約 70° であり，自動運動による伸展は，約 5° であり，他動運動による伸展は，約 30° である．

指の運動を指の多関節機構の中で捉えると，屈筋腱と伸筋腱による運動系として考えることができる．指の運動系が屈筋腱と伸筋腱

図２－22　中手指節関節（MP 関節）の可動域

図２－23　指節間関節（IP 関節）の可動域

のみに依存するとすれば，指はそれ自体を個々の構成要素について無秩序に折り畳まれ把握動作が不可能となる．また，中手指節関節（MP 関節）の矢状回旋軸に関して安定しないために指は，外側または内側へ編位することになる．従って，屈筋腱と伸筋腱のみによってなされる運動が指の機能的な平衡を獲得するためには，中手骨と指節骨の掌側面に基部のある線維性トンネルの腱により伝達され，力の方向変換を可能にしている骨線維鞘の滑車効果が必要である．また，骨線維鞘における腱の滑走は，滑膜鞘により容易となる．骨線維鞘による屈筋腱と伸筋腱の解剖学的な配置は，これら腱の滑走と安定性を与え，指の不規則な運動を防止している．この伸筋と屈筋のみによる運動系は，骨間筋，虫様筋，支靱帯による自動および他動の繊維複合体により，さらに完全で均等の協調化が図られる．

指の屈曲機構は，解剖学的にも単純な機構であり，図２－24 に示すように中節骨の掌側面に付着する浅指屈筋腱と末節骨の掌側面

図２－24　指の屈曲機構

図２－25　指の伸展機構

に付着し，浅指屈筋腱と交叉する深指屈筋腱から構成される．しかし，伸展機構は，大変に複雑な機構であり，図２－25 に示すように基節骨の背側面に付着する線維，中節骨の背側面に付着する中央索線維，末節骨の背側面に付着する側索線維から構成される総指伸筋腱，中手骨より起始し，基節骨の基部に付着し，総指伸筋の中央索線維および側索線維に合流している骨間筋，骨間筋に付着している虫様筋から構成されている．また，関節の屈伸軸に対する伸筋機構の構成要素の配置は，運動機能を規定する上で重要である．骨間筋と虫様筋は，中手指節関節（MP 関節）軸に対して掌側に，近位指節間関節（PIP 関節）軸に対しては背側に位置し，支靭帯は，近位指節間関節（PIP 関節）軸に対して掌側に，遠位指節間関節（DIP 関節）軸に対しては背側に位置している．

虫様筋は，図２－26 に示すように中節骨と末節骨を伸展位にさせ，かつ骨間筋の基節骨に対する作用と大変よく似た機能を有する．また，指の機能をより発揮するために指を解放する目的で深指屈筋腱を末梢に引く二次的な役割を有している．さらに，虫様筋は自動制御理論的な側面として，屈筋と伸筋の２つの拮抗する運動系を結合し，その緊張は個々の運動機構の緊張に依存する．また，関節，靭帯，筋，腱，皮膚における多様な受容器として他動および自動運

図２－26　虫様筋の機能

動の際に身体の変位の認識や運動に対する抵抗を可能とする「筋の知覚」とも呼ばれる固有受容器（深部知覚）に支配されている．これらのことより虫様筋は，屈筋と伸筋の２つの運動機構を調整する緊張計としての情報器官であり，繊細な行為を導く自動制御器官と考えられる．

N. Wiener により 1949 年に提唱されて以来，人工知能，脳理論，認知心理学の分野に分かれて発展を遂げて認知科学として再び統合されたサイバネティックス（Cybernetics）の認知とフィードバックの理論からみれば，指から入力される情報は，図２－27 に示すように皮膚にある受容器，靭帯と関節包にある受容器および虫様筋の神経腱器官などの筋内にある受容器から指の位置，その周囲状況との関係の情報信号を絶えず高次中枢へ伝達している．これにより動

図２－27　サイバネティックスの認知とフィードバック制御の理論からみた指の動作

作の実施のための筋群への情報が出力され，フィードバック制御が行われている．

指先は大変に知覚器官として富み，繊細な触覚器官であり，自動制御理論上は，指の位置と外部状況との関係についての情報信号を，手から高次中枢器官に送り出す働きをする．指先における圧迫や滑りの触覚器官は，その状態が正しく保たれているときのみ，多様な情報を伝達することができる．指先の支持対抗器官が，圧迫による影響を安定，且つ，正しく受けるときのみ，これは正しく触覚器官としての働きをする．しかし，末節骨は，安定した支持を与えるには，あまりにも細い．一方，爪は強固で蓋のごとく広い表面を持ち，指骨と解剖学的な連結を有し，指先において埋まり込んでいるため，指先の弾性組織のつぶれや側方滑りを防止する強固な組織である．それゆえ，爪の存在は，指先の触覚器官から送られる信号を情報収集する上で極めて重要な要素である．

(2) 手指の把握動作

物体を把握する場合，拇指は殆どの把握動作に関与している．拇指が関与しない把握動作は，タバコを持つ時に示指と中指との間で行われるような，２本の指の間に物体を挟み込む把握動作のみである．拇指が多種の把握動作に関与する理由は，拇指は手掌や他の４指に比べ前方に位置し，他の４指の中手指節関節（MP 関節）と違い拇指の中手指節関節（MCP 関節）は，広い自由度を持つことより，拇指を他の指の方へ動かす対立運動を行うことができるからである．この拇指の対立運動により，拇指と他の指との間に物体を挟み込む把握や物体を手指掌全体で力強く握り包む把握が行われている．手指の把握動作を分類すると以下のようになる．

①動作状態による分類

A．静的把握（static grip）：物体の把握保持

B．動的把握（dynamic grip）：物体を把握して活動

②動作形態による分類

A．摘む動作（digital grip）：ピンチ把握

(1) 2 指間摘み：2 指間把握

a)指尖摘み（prehension by terminal opposition）

b)指頭摘み（prehension by subterminal opposition）

c)指頭－側面摘み（prehension by subterminolateral opposition）

d)指間－側面摘み（interdigital latero-lateral rehension）

(2)多指間摘み（pluri-digital grip）：多指間把握

a) 3 指間摘み（tridigital grip）

b) 4 指間摘み（tetradigital grip）

c) 5 指間摘み（pentadigital grip）

B．掴む動作（palmar grip）：手指掌把握

(1)手指掌掴み（digito-palmar prehension）：手指掌把握

(2)全手指掌掴み（full palmar prehension）：全手指掌把握

a)円柱形掴み（cylindrical palmar perhension）

b)球形掴み（spherical palmar prehension）

c)球形 5 指間手掌掴み（spherical pentadigital palmar prehension）

このよに手指の把握動作は，物体を握り保持する静的把握動作と物体を把握し，活動する動的把握に大別される．また，把握動作は，物体を「摘む」動作と「掴む」動作にも大別することができる．摘む動作は，数本の指の先端で物体を挟み持つ動作（ピンチ動作）であり，掴む動作は，５本の指を屈曲させて物体を握り持つ動作（手指掌把握）である．

摘む動作は，図２－28 および図２－29 に示すように，把握に関与する指の数により区別される．２本の指を用いて行う２指間摘み（２指間把握）動作は，指先，指頭あるいは指頭，側面接触のいずれで生じるかにより，指尖摘み，指頭摘み，指頭－側面摘み，指間－側面摘みの４つに分けられる．指尖摘みは，薄い物を把握する場合やピンのように極細かい物体を摘み上げるよう場合に行われる，

図２－28　手指の２指間摘み動作

図２－29　手指の多指間摘み動作

繊細で最も精巧な摘みである．この把握を行う場合，拇指は，示指または中指の指頭先端と接触し対立する．指頭摘みは，主として拇指と示指の末節の腹の部位を用いて摘む把握であり，２指間摘みでは，最もよく用いられる．指頭－側面摘みは，コインを把握するときのように示指の末節骨（第１指節）または中節骨（第２指節）の側面と拇指先端を用いて摘む把握である．指間－側面摘みは，拇指を必要としない唯一の把握形態で２指間摘みであり，一般に示指と中指の間で行われる．

拇指とその他の指が関係する多指間摘み（多指間把握）動作は，基本的に精巧である２指間摘みより力強い把握である．また，把握に使用する指の本数が多くなるほど力強く，大きな物を把握することが可能となる．

次に掴む動作の指と手掌の両者が関与する手指掌掴みにおいては，図２－30 に示すように拇指が関与するか否かで，手指掌掴み（手指掌把握）と全手指掌掴み（全手指掌把握）の２つに区別することができる．

指手掌掴みは，副次的な把握形態であるが，例えばハンドル操作においてハンドル位置を保持する場合等によく使用される．屈曲した指と手掌の間に小さな直径の物体が把握され，拇指は関与しない．この把握では，手掌面の近位の手根部近くで物体を保持しようとすると握りが固定されないため物体は容易に抜けてしまう．この把握では，物体の長軸は斜方向の手掌の窪み軸とは一致しない．この手指掌掴みは，グラスコップのような大きな円筒物体を把握するときにも使用されるが，物体の直径が大きくなればなるほど握りは弱くなる．

全手掌掴みは，手指掌の全体を使用し，円筒物体を包み込む把握であり，重量のある比較的大きな物体を力強く握ることができる．この把握では，物体の長軸は斜方向の手掌の窪み軸，すなわち，小指球から示指の底部に向かって斜走する軸と一致する．手軸や前腕軸に対して存在するこの軸の斜走性は，道具の握り柄の斜走性とほ

図２－30　手指の指掌掴みと全手掌掴み動作

ぼ一致する．従って道具本体に対して柄の取付け角が 100～110°を形成している場合が多い理由である．

２．３　結言

本章では，手の把握動作機能の解析において必要な解剖学的および生体力学的な知識として，手と上肢の解剖学上で独自に用いられる方位用語，解剖学的な運動定義，筋・骨格および関節の構造や解剖学的および生体力学的な手指の機能と把握動作に関して詳述した．

第３章　手の把握動作の解析手法

３．１　緒言

手の物体把握動作における人間－物体系のインターフェイスとして手指掌面と物体間の接触状態を力学的に示す接触圧力，すなわち，手指掌圧力をどのように測定を行うかが重要となる．そこで，物体把握における手指掌圧力を簡便な方法により連続的に測定するために感圧導電ゴムを圧力変換素子（トランスデューサ）として利用することが最適であると考えられる．この感圧導電ゴムを利用した手指掌圧力測定システムおよび把握力測定システムの作製を行った．また，手の物体把握動作における把握力の基である筋力の測定のために表面筋電図を利用し，筋活動指標となる筋電図積分量を応用した筋出力測定・解析システムを構築した．手指掌面と物体間の接触面積を測定するためにコンピュータのビットマップ画像データによる面積算出方法を用いた接触面積測定システム，および　手指掌面と物体間の摩擦係数を測定するために切削力の測定等に広く用いられている３成分動力計を利用した摩擦係数測定システムの構築を行った．さらに，手および上肢の動作における関節運動を３次元的に測定・解析するために DLT（Direct Linear Transformation）法を応用した多方向同時ビデオ撮影法を用いた．DLT 法はスポーツ工学分野における運動解析等やリハビリテーション分野における歩行解析等に広く用いられており，経時的な関節運動の変化を非接触で測定可能であり，また，測定対象に取り付けるマーカーは極めて軽量であるため運動を制限しないなどの利点を有しており，把握動作における関節の運動解析には極めて適した手法と考えられる．

本章では，手の把握動作の測定と解析方法として用いた手指掌圧力測定システム，把握力測定システム，筋出力測定システム，接触面積測定システム，摩擦係数測定システムおよび関節運動測定・解析システムについて詳述する．

3．2　手指掌圧力の測定手法

本節では，手指掌面と物体間の接触圧力の測定に用いた感圧導電ゴムの圧力変換素子としての構造および特性について，また，手の把握動作の測定・解析に用いた手指掌圧力測定システムについて説明する．

3．2．1　手指掌圧力測定システム

(1)導電性ゴムの種類と感圧導電ゴムの導電機構

導電性ゴムは，絶縁体である高分子材料のシリコンゴムをベースポリマーとして導体であるカーボンブラック（炭素の微粒子）や金属粉粒体等を混入して導電性を持たせたものである．従って特徴として導電性を有しながらゴム特有の柔軟性，薄膜性等を有し，大面積化が容易であり，衝撃，座屈等によっても破損しない優れた特徴を持っている．これらの導電性ゴムは，その電気抵抗変化の特性により以下の３種類に分類される．

(1) 常時導電性タイプ（常時導電性型）

(2) 加圧と同時に電気抵抗値が激減するタイプ（ON-OFF 機能型）

(3) 加圧に応じて電気抵抗値が比例的に変化するタイプ（抵抗変化型）

なお，これら３種類の導電性ゴムの作用圧力－電気抵抗値の特性を図３－１に模式的に示す．

常時導電性型の導電性ゴムは，電子部品の接続コネクタ，電力ケーブルの放電防止や IC の静電防止等に用いられ，横浜ゴム㈱，日本合成ゴム㈱，興国ゴム㈱等で製品化されている．ON-OFF 機能型の導電性ゴムは，その優れたスイッチング特性を利用して小型電子機器のキーボードやスイッチ等の接点材料として用いられ，日本合成ゴム㈱，興国ゴム㈱，沖電線㈱等において製品化されている．また，抵抗変化型の導電性ゴムは，ロボットハンドやマニピュレータの触覚センサ等に応用され，横浜ゴム㈱，イナバゴム㈱により開発

されている．

本研究における手指掌圧力の測定には，電気抵抗値が比例的に変化する厚さ約 0.5mm の抵抗変化型の感圧導電ゴムシート材（イナバゴム㈱社製：イナストマー）を使用した．

絶縁体であるシリコンゴムが導電性を有するようになるのは，シリコンゴムに導体のカーボンブラック粒子を混入した複合体にするからである．このカーボンブラックは，タイヤなど各種ゴム製品の補強剤，または，塗料など広く利用されている材料である．
ゴムに混入したカーボンブラック粒子は，図３－２に示すようにゴム内部において粒子は単独に存在するのではなく３次元的な鎖状構造（ストラクチャー）を形成する．

感圧導電ゴムの導電機構は，図３－３に示すようにゴム表面に圧力が作用しない場合，厚み方向の電気抵抗値は数ＭΩでほぼ絶縁状

図３－１　各種導電性ゴムの作用圧力－抵抗特性

図３－２　カーボンブラック粒子の鎖状構造

図３－３　感圧導電ゴムの導電機構

態にある．しかし，表面に圧力が作用するとゴムの厚さ（体積）が変化することでゴム内部のストラクチャーが互いに接触するようになり，電気抵抗値が減少する．さらに圧力が増加するとストラクチャー同志の接触割合が増加するため，電気抵抗値は数Ωまで減少する．また，これらの変化は可逆的である．従って感圧導電ゴムは，作用圧力に対して電気抵抗値が比例的に変化する特性を利用せれば作用圧力を電気量に変換することが可能となる．

本研究で圧力センサとして用いた抵抗変化型感圧導電ゴム（イナバゴム㈱社製：イナストマー）の作用負荷－電気抵抗特性を図３－４に示す．また，電子顕微鏡による写真を図３－５に示す．

抵抗変化型感圧導電ゴムの組織構造は，図３－６に示すように非導電性エラストマーとして通常のシリコンゴムを用い，粒子径10～300μｍのエラストマー粒子および粒子径10～150μｍの中空状

※測定領域：3.5×3.5㎜の四角形（面積：12.25㎟）

図３－４　抵抗変化型感圧導電ゴムの作用圧力と抵抗値の関係

図３－５　抵抗変化型感圧導電ゴムの電子顕微鏡写真

図３－６　抵抗変化型感圧導電ゴムの組織構造
（イナバゴム㈱社製のイナストマー）

弾性微小球体を混入してベースポリマーとしている．このベースポリマーに粒子径 1～400 μ m の導電性粒子を加え，混合分散させることにより導電性を付与している．

非導電性エラストマーのシリコンゴムに混入するエラストマー粒子は，結果的にゴムの弾性率を表し，このエラストマー粒子を混合分散させることにより非導電性エラストマーのポリマーアロイ化，すなわち海と島の構造を構築し，導電性粒子の配合に起因して増加するゴム全体の硬さを緩和するとともに，ゴムの弾性率を増加させ脆さを防止することが可能となる．さらに中空状弾性微小球体は，真球状で比較的粒子径が揃っており，弾性ならびに衝撃吸収性にも優れているため，これをシリコンゴム中に混合分散させることにより，エラストマー粒子と同様に導電性粒子の配合に起因して高くなる感圧導電ゴム材の硬さを低下させるとともに耐久性，衝撃強度を向上させることができる．

非導電性エラストマーに混入するエラストマー粒子および中空状弾性微小球体の大きさ，材質，配合量を適当に選択することにより，感圧導電ゴム材の硬さを容易に調整することが可能であり，これにより感圧導電ゴムの受圧感度の設定が容易となる．

さらに，抵抗変化型感圧導電ゴム（イナバゴム㈱社製：イナストマー）は，混入する球状炭素粒子などの導電性粒子の表面に粒子径 0.05～0.2 μ m の絶縁性粒子を 30～70％の面積分率で付着させたものを用いているため，抵抗変化範囲の設定も容易である．以上のことから低圧力高感度から高圧力低感度まで受圧感度を自由に設定できる抵抗変化型感圧導電ゴムとなっている．

(2) 抵抗変化型の感圧導電ゴムの特性

感圧導電ゴムを圧力変換素子として利用するにあたり不可欠な特性について，基礎的実験結果およびメーカーの資料により得た感圧導電ゴムの諸特性について述べる．

A. 粘弾性特性

感圧導電ゴムは，本質的に粘弾性を有するため，作用圧力の増大期であるか減少期であるかによって電気抵抗値が異なり，図３－７に示すように作用圧力－電気抵抗の特性においてヒステリシスが存在する．また一定の作用荷重下においても図３－８に示すように時間の経過と共に出力電圧は若干大きくなるクリープ現象が見られる．これらは感圧導電ゴムの導電機構で既に述べたように，加圧による素材の厚み（体積）が減少し，これまで接触のなかったカーボン粒子の接触量が多くなる変化を示すが，一定の作用荷重下でもベースポリマー等の変形による素材の厚みが減少するのに時間的遅れが存在することに起因していると思われる．これらのヒステリシスおよびクリープ現象を考慮して本研究では，圧力測定時の前後において基準圧力を作用させた場合の作用負荷－電気抵抗特性を測定し，これによる較正値の平均を圧力値とする方法を採用した．

図３－７　抵抗変化型感圧導電ゴムのヒステリシス特性

図３－８　抵抗変化型感圧導電ゴムのクリープ現象

B. 周波数応答性

サイクリックな変動負荷が作用した場合の感圧導電ゴムのセンシング追従性，即ち，周波数応答性を検討するためにコンピュータ制御電気油圧サーボ式材料疲労試験機（㈱島津製作所製：Computer Control System Shimadzu Servopulser）によりサイクリックな変動負荷を抵抗変化型感圧導電ゴムに与え，疲労試験機のロードセル出力信号に対する感圧導電ゴムの出力信号を測定した結果を図３－９に示す．図はサイクリック変動負荷周波数が 20Hz の場合の周波数応答特性を示す．本研究に用いた抵抗変化型感圧導電ゴム（イナバゴム㈱社製：イナストマー）は，約 20Hz 程度までの変動負荷に対して十分な応答特性を有している．

C. 耐久性

負荷と除荷を繰り返す場合，感圧導電ゴムの作用負荷－電気抵抗特性を維持できるのかは実用上極めて重要なことである．抵抗変化型感圧導電ゴム（イナバゴム㈱社製：イナストマー）にインストロ

※サイクリック負荷周波数:20Hz

図３－９　抵抗変化型感圧導電ゴムの周波数応答性
（イナバゴム株式会社製のイナストマー）

ン型万能試験機（㈱島津製作所製：Shimadzu Autograph AG-25TD）により 0.8kgf/cm ^{2}の圧力を負荷状態１秒間，除荷状態３秒間，負荷速度１ cm/sec の条件で連続耐久試験を行った結果， 50,000 回に及ぶ負荷試験後でも作用負荷－電気抵抗特性に異常は見られなかった．

D. 電流依存性

導電性粒子をシリコンゴム中に分散した感圧導電ゴムにおける電気抵抗値は，加圧された組織内での粒子相互の接触抵抗が大きく寄与しているため，抵抗値が印加する電圧，または電流密度で変化すると考えられる．抵抗変化型感圧導電ゴム（イナバゴム㈱社製：イナストマー）のメーカー提示による電気的特性は，表３－１に示す通りの安全性を考慮した基準値である．この感圧導電ゴムを本研究に採用するにあたり行った基礎実験においては，500mA の電流を 20

表３－１　感圧導電ゴムの電気的特性
（イナバゴム株式会社製のイナストマー）

最大許容電圧	３０　（Ｖ）
使用推奨電圧	３～６　（Ｖ）
最大許容電流	２０　（ｍＡ）
使用推奨電流	５　（ｍＡ）
無負荷抵抗値	５００　（ｋΩ）
最大負荷抵抗値	１０００　（Ω）

図３－10　抵抗変化型感圧導電ゴムの温度依存性
（イナバゴム㈱社製のイナストマー）

分間通電させた場合でも発熱は見られず，無負荷時の電気抵抗値も 10ＭΩ以上の値を示した．

E. 温度依存性

感圧導電ゴムは，温度によって作用負荷－電気抵抗特性が変化す

る．抵抗変化型感圧導電ゴム（イナバゴム㈱社製：イナストマー）をR 2.5 の球状電極兼押棒により加圧した場合の温度と作用負荷－電気抵抗特性の関係を図３－10 に示す．温度の上昇に伴い感度が鈍くなる傾向にあり，０～40℃の室温付近においても作用負荷－電気抵抗特性の変化が見られる．従って十分な精度を維持するためには，作用圧力－出力電圧の関係を示す圧力センサの較正実験時および圧力測定時の室温を一定に維持することと感圧導電ゴム自体の発熱に注意を払う必要がある．また，－10℃～＋100℃の許容温度範囲では作用負荷－電気抵抗特性に恒久的な変化は生じないこと，また，低温では応答性が遅くなることが知られている．

(3)手指掌圧力測定システム

本研究で用いた圧力センサは，加圧力を感圧導電ゴムシートの厚さ方向の抵抗変化により測定するものであるが，感圧導電ゴムの電気抵抗値を直接読み取ることは困難である．従って，圧力センサからの出力信号を電圧値の変化データとして出力する必要がある．そこで圧力センサの抵抗変化を電圧変化に変換する専用の測定回路を必要とする．この専用測定回路による圧力センサの電圧出力データを A/D コンバータ（㈱コンテック社製：高速汎用型 A/D 変換ボード AD12-16T(98)H）を介してパーソナルコンピュータ（日本電気㈱社製：PC9801NS/R）に取り込み接触圧力値へ変換およびデータ記録等を行う手指掌圧力測定システムを構築した．

圧力センサの専用測定回路は，図３－11 に示すように感圧導電ゴムに固定抵抗を直列に接続し，これを基本回路として，この基本回路を測定点の数だけ並列に接続している．

ここで電源電圧（Vcc）をE（V），電流をI（A），感圧導電ゴムの電気抵抗を Rx（Ω），固定抵抗を R（Ω），導電性ゴムの電位差を E_1（V），固定抵抗の電位差を E_2（V）とすると，各抵抗を直列に接続した場合には，電流Iは，どの点においても等しいから

図３－11　感圧導電ゴムセンサ用の測定回路

$$\frac{E_1}{Rx}=\frac{E_2}{R} \quad \text{----------} \quad (3.1)$$

したがって，

$$\frac{E_2}{E_1}=\frac{R}{Rx} \quad \text{----------} \quad (3.2)$$

ここで，$E_1+E_2=E$ を代入し整理すると，出力電圧 E_2 は，

$$E_2=\frac{R}{Rx+R}E \quad \text{----------} \quad (3.3)$$

となる．

すなわち感圧導電ゴムが加圧されて電気抵抗 Rx が減少すると出力電圧 E_2 は，電源電圧Eに漸近するように増加していく，また，固定抵抗 R の大きさを変化させることによって，センサの測定圧力範囲を測定対象に合わせてある程度任意に設定することが可能であり，センサの測定面積（抵抗値）が変化して測定圧力範囲が変化した場合にも，容易に調整が可能である．前式が示すように出力電

図３－12　作用圧力－出力電圧特性

圧 E_2 は感圧導電ゴムの抵抗値 Rx と固定抵抗Ｒの比に基づいて変化することから，一般に Rx＞R であること考慮すると，固定抵抗 R の値を大きくした場合，出力電圧 E_2 も大きくなり，低圧力作用時すなわち感圧導電ゴムの抵抗値が比較的大きい範囲における感度は敏感となる．また，逆に固定抵抗 R の値を小さくした場合，出力電圧 E_2 が小さくなるので，感圧導電ゴムの低圧力時の感度は悪くなるが，高圧力作用時までの測定が可能となる．

例として図３－12 に同じ圧力センサに異なる固定抵抗を接続し測定した場合の作用圧力－出力電圧の関係を示す．曲線が立ち上がるときの傾きが変化していることが確認できる．

３．２．２　圧力センサと較正方法

(1)手指掌用圧力センサ

手指掌表面と物体表面間の接触圧力を測定する圧力センサに要求

される条件として以下のことが挙げられる．

(1)手指掌は生体中でも靭帯，腱，筋，皮膚など軟部組織が比較的複雑に積層しており，組織は全体的に厚く柔らかである．この柔らかな組織による加圧力が手指掌圧力であるから，この柔らかく複雑な形状の接触面に沿ってセンサが配置できるようにセンサも柔軟性に富むことを必要とする．

(2)比較的低い圧力範囲の測定感度が取れることを必要とする．

(3)接触界面の接触状態に影響を及ぼさないほど十分にセンサが薄いことを必要とする．

(4)手指掌の指先端や指節などの狭い部位にもセンサが配置できるようにセンサ形状，大きさが自由に選択できることを必要とする．

以上の点を考慮した圧力センサが必要である．

そこで，本研究では，図３－13 に示すように感圧導電ゴムを用いた圧力センサを製作した．この圧力センサの構造は，厚さ 0.5mm の高感度低圧用の抵抗変化型感圧導電ゴムシート（イナバゴム㈱社

図３－13　手指掌用圧力センサの構造

製：イナストマー）を 3.0mm×3.0mm の正方形に裁断し，幅 3.0mm 長さ 20mm 厚さ 78 μ m で電極線幅 1.0mm 電極線間隔 1.0mm の金箔プリントフィルム電極の上に配置した．さらにその上からセンサの保護を考慮して熱を加えると収縮する厚さ 0.1mm の熱収縮チューブにより被覆した構造となっている．受圧面積，すなわち測定領域は 3.0mm×3.0mm（面積：9.0mm^2）の正方形の大きさである．

(2) 手指掌用圧力センサの較正方法

測定した圧力センサの電圧値から圧力値を算出するためには，個々の圧力センサの基本特性である作用圧力と出力電圧との関係をあらかじめ求めておく必要がある．本研究においては，この作用圧力と出力電圧の関係を求めるために図３－14 に示すような較正実験装置を使用して行った．

較正実験の方法は，圧力センサ全面に圧力を作用させるために圧力センサを２枚の厚さ 10mm，直径 100mm の柔軟性ゴム（スポンジゴム）間に挟み込み，直径 100mm の鋼製圧縮治具（鋼製パンチ）を介してインストロン型万能試験機（島津製作所㈱社製：AUTOGRAPH AG-25TD）により圧縮負荷を与えた．ここで，圧力センサへの作用圧力は万能試験機のクロスヘッドに取り付けたロードセルの荷重値を柔軟性ゴムの断面積で除した値（公称応力値）とした．なお，本方法においては，圧力センサに均等に圧力が作用しているか，あるいは荷重作用時の変形による柔軟性ゴムの断面積の変化が懸念されることから，低圧用感圧紙（富士写真フィルム㈱社製：プレスケール）を用いて圧力センサと柔軟性ゴム間の接触圧力分布を測定した結果，前述した問題は影響しないことを確認した．このように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，感圧導電ゴムセンサによる接触圧力の定量的計測を可能とさせた．

以上の較正実験により得られた圧力センサの較正曲線の一例を図３－15 に示す．なお，圧力センサの製作の際に生ずる電極面積の誤差や感圧導電ゴム材の製造の際にシリコンゴム粒子とカーボンブ

図３－14　圧力センサの較正実験装置

図３－15　圧力センサ較正曲線

ラック粒子との混合不均一部による性能の不均一が生ずることから個々の圧力センサの較正曲線は一致しない．従って圧力センサの較正実験は，全ての圧力センサについて行う必要があり，圧力測定時の出力電圧値は，個々の圧力センサの較正曲線より圧力値へ換算する必要がある．

3．3　把握力の測定方法

本節では，把握動作における把握力の測定に用いた感圧導電ゴムを利用して製作した円筒型握力計の構造および把握力測定システムについて説明する．

3．3．1　把握力測定システム

円筒物体の把握力を測定するために，図3－16に示す感圧導電ゴムを利用した円筒型握力計を製作した．この円筒型握力計は，長さ200mmの塩化ビニール製パイプを中心部に有し，その周囲を厚さ

図3－16　円筒型握力計の構造

約0.2mmの2枚の銅箔電極で挟んだ厚さ約0.5mmの感圧導電ゴムシート材を巻き，その上を更に厚さ約0.5mmのアルミニウム製薄板で覆った構造から成る．これらの円筒型握力計を握り部分の直径が18mm，26mm，38mm，48mm，60mmの5種類を製作した．また，この円筒型握力計は，手指掌圧力測定システムと同様に専用の測定回路により電圧値データを出力する．この電圧出力データをA/Dコンバータ（㈱コンテック社製：高速汎用型A/D変換ボードAD12-16T(98)H）を介してパーソナルコンピュータ（日本電気㈱社製：PC9801NS/R）に取り込み出力値（把握力値）へ変換を行う把握力測定システムを構築した．

3．3．2　握力計の較正方法

この握力計の出力特性を求めるために，図3－17に示すように各円筒型握力計の長軸方向が水平となるようにワイヤーで吊し，握

図3－17　円筒型握力計の較正方法

り部分の周囲に幅 50mm，厚さ約 0.5mm の塩化ビニール製の帯を1回巻き付け，帯の両端を1つに結び，重さ 9.8N，19.6N，29.4N，39.2N，49.0N，58.8N の錘をそれぞれ吊り下げる方法を採用した．これにより作用荷重－出力電圧の関係を調べた．

3．4　指屈筋力の測定方法

本節では，把握動作における筋力の測定に用いた表面筋電図を利用した筋出力測定・解析システムおよび筋出力の指標として広く用いられている筋電図積分量について説明する．

3．4．1　筋電図

(1)筋収縮の仕組みと筋電図

高度な技術を駆使して作られているマニピュレータやロボットハンドは非常に精巧に造られているが，自重に比べて比較的軽い物体しか把握できない．しかし，人間は体重と同程度の物体を持ち上げることが可能である．さらに，堅い物体，柔らかい物体，壊れ易い物体等の物体の状態を瞬時に判断し，容易に把握することが可能である．これは，脳を含む高位中枢の制御情報処理の優れた機構だけでなく，活動する筋が粘弾性に富むという優れた性質があってはじめて可能となる．以上のような観点から，筋の特徴は次のように挙げられる．

(1)出力対重量比が大きい．

(2)非常に小さなサイズでも機能する．

(3)中枢は多数の筋線維を並列的に駆動して筋全体の張力を細かに制御し，同時に筋の粘弾性を調節している．

このような特徴を持つ筋の構造を図3－18に示す．筋の両端は腱を介して骨に付着し，長軸方向に走行している多数の筋線維より構成されている．この筋繊維も縦に貫通している直径約1μmの筋原線維より構成されている．電子顕微鏡で観察すると，筋原線維の

図3－18　筋の構造

内部には太いミオシンフィラメントと細いアクチンフィラメントの2種類があり，図に示すように相互に規則正しい配列をし，明暗の縞模様が見られる．この横紋のうち，明るい部分をI帯，暗い部分をA帯と呼ぶ．I帯の中央にZ膜があり，筋原線維がZ膜によって円盤状に仕切られている．Z膜からZ膜までを筋節といい，筋節は収縮の最小単位である．筋節の長さは筋の長さと比例して変化する．

筋が収縮するときA帯の長さは変化せず，I帯の長さが短くなる．

つまり，フィラメントの長さは変化せず，細いアクチンフィラメントが太いミオシンフィラメントの間に滑り込むことによって収縮が起こる．これはA. F. Huxley によって示された滑走説である．

筋の収縮により筋細胞が活動すると，それに伴って微弱な電気を発生する．この発生する電位が筋電位であり，時間的変化を測定したものが筋電図（Electromyogram：EMG ）である．

正常な骨格筋の筋電位の発生は次のようにして起こる．脊髄の中にある運動神経細胞が反射や脳からの刺激によって興奮すると運動神経軸索を伝わって神経筋接合部に達し，神経終末から化学伝達物質であるアセチルコリンが放出される．アセチルコリンは神経筋接合部の筋線維側にある終板に作用して，その部分の膜のイオンに対する透過性を変え，その結果より活動電位が発生する．終板は通常筋線維の中央部にあるので活動電位は終板から筋線維の末端へ向かって両側に伝播して行く．活動電位の伝導速度はヒトでは３～６m/sであるとされている．

筋線維を取り巻く電気伝導性を持つ媒質は容積導体と呼ばれる．筋電位とは筋線維の膜を通して流れるイオンによる電流が容積導体内を流れることによって生じる電場を計測したものである．膜電流は筋線維の外側からみた場合，興奮部位の周囲から興奮部位に向かって流入する．従って外側からみた場合，興奮部位の近傍はマイナスの電位を示す．筋線維の興奮は一本一本が独立に起こるのではなく，一つの運動神経細胞によって支配された運動単位に属する多数の筋線維群が同期的に興奮する．これら一群の筋線維の興奮によって生じる電位を運動単位活動電位と呼ぶ．一つの筋肉は機能的には多数の運動単位によって構成されており，通常の随意収縮下において，それぞれの運動単位は独立に興奮する．従って，この結果生じる筋電位信号はこれらの運動単位活動電位の時間的，空間的な加算波形となる．この筋電位の電圧範囲は 10 μ V～10mV 程度の低レベルであり，それに含まれる周波数は 2Hz～2kHz の低周波領域である．

(2) 筋電図の測定

筋電図の測定において筋線維の電気活動を誘導するには，脳波の測定と同様の皿電極を用いる方法と，針電極を用いる方法とで使用する電極によって２種類の方法がある．皿電極を用いる方法は，対象筋群の皮膚表面に電極を配置して誘導するため表面筋電図（Surface Electromyogram： Surface EMG）と呼ばれている．

針電極を用いて筋電位を測定する方法では，電極を筋線維のごく近傍に置くことによって単一の運動単位の活動電位や単一筋線維の活動電位を検出できる．この場合の解析項目は運動単位活動電位の振幅や持続時間，発射パターンあるいは不随意的な筋放電の有無等である．しかしこの方法は被験筋に針電極を刺すため，被験者に苦痛を与える点が弱点である．

筋肉全体の大まかな収縮状態を知るためには，皿電極を皮膚上に配置し，筋電位を測定する表面筋電図が用いられる．この場合には電極の検出範囲が広くなるため，通常，多数の運動単位活動電位を同時に検出することになり，筋電位は一種のランダム信号となる．ただし，弱い収縮下で，導出された筋電位の波形を見ながら被験者が自分で収縮力を制御すると，単一運動単位活動電位が検出されることもある．通常の表面筋電図計測では，直径 5～10mm の銀－塩化銀電極を用いる．そして，この電極を目的とする筋肉上の皮膚表面に 20～30mm 離して２個配置し，それぞれを差動増幅器の入力に接続し双極誘導とすることにより表面筋電位が得られる．筋電位の測定を行う場合，筋収縮によって電極を配置した皮膚と被験筋がずれてしまい筋活動が十分導出されない場合や他の筋の活動が混入する場合が生じるため，電極配置の位置は，十分に考慮して決めなくてはならない．

３．４．２　筋出力測定・解析システム

物体把握における筋力の測定のために表面筋電図を利用した筋出力測定・解析システムを構築した．筋出力は，被験筋群の皮膚表面

上に 20～30mm 離した2個の表面筋電位電極（日本電気三栄㈱社製：ディスポーザブル電極 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㈱社製：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る方法である．この筋電位出力を A/D コンバータ（㈱コンテック社製：高速汎用型 A/D 変換ボード AD12-16T(98)H）を介してパーソナルコンピュータ（日本電気㈱社製：PC9801NS/R）に入力して解析を行う筋出力測定・解析システムである．図3－19 にシステムの概略を示す．

筋電位の解析には，従来の報告[10]でも広く用いられている被験筋群の筋活動度の指標となる筋電図積分量（Integrated Electromyogram : Integrated EMG）を利用する方法を採用した．筋電図積分量の算出方法は，図3－20 に示すように得られた表面筋電図の出力波形から筋電位出力波形の絶対値を取り，絶対筋電図波形を得る．

図3－19　筋出力測定・解析システム

図3－20　表面筋電位出力波形の処理

次に同一条件で3回測定した筋電位出力波形の平均値に基づいて平均筋電図波形を算出した．この平均筋電図波形を積分して筋電図積分量を求めた．

3．5　手指掌接触面積の測定方法

本節では，把握動作における手指掌面と物体表面間の接触面積の測定に用いたコンピュータ画像処理[11]を利用した接触面積測定システムについて詳述する．

3．5．1　コンピュータ画像処理

画像情報には，赤色とか黄色といった色情報，丸いとか四角いといった形態情報のほかに，高さや厚みのように奥行情報が含まれま

る．さらに，ビデオ画像のように時間的な要素がこれらに加わると，画像情報は莫大な量となる．写真においては，レンズにフィルタを取り付けたり，シャッター速度を工夫することで，同じ被写体をさまざまな形で表現可能となる．コンピュータにおいても，これと同様のことを計算によって実現される．コンピュータによる画像処理の定義は，極めて広く，画像濃度変換や階調変換などを画像処理と呼ぶ場合もあれば，これらを利用して形状の計測やペイントソフトによる描画も含めて，画像に関するあらゆる作業を画像処理と呼ぶ場合もある．従って，ここでは，ある画像に対して何らかの処理を施して，新しい結果を得ることを画像処理と定義する．画像処理によって得られる結果は，新しい画像だけではなく，原画像の被写体となった物体の形状を数値として取り出すこと，すなわち，座標表示が可能である．後述する，３．７節の「関節の３次元運動と測定方法」においては，この形状の数値化を利用して取り込んだ２次元画像の２次元座標を計測し，さらに DLT 法による３次元座標を構築する方法を用いている．

(1)デジタル画像

コンピュータによる画像処理を行うには，画像をコンピュータに入力する必要がある．写真やビデオ映像などは，すべてアナログ画像であり，そのままではコンピュータで扱うことができない．コンピュータで扱う画像は，すべてデジタル画像である．デジタル画像は，画素（ピクセル：pixel）と呼ばれる小さな点の集まりで構成されている．家庭用ビデオカメラ（8mm ビデオカメラや S-VHS ビデオカメラなど）で撮影した映像はアナログ信号であり，デジタル化しなければ，コンピュータで画像処理は不可能である．そこで A/D（アナログ／デジタル）変換が必要となる．A/D 変換は，連続するアナログ画像を，画素の単位に分割する作業（標本化）と分割したそれぞれの画素の濃淡を，コンピュータで処理できる数値に変換する作業（量子化）の２つの作業が行われる．また，画素は，デジタル画像を構成する最小単位であるから１画素は方眼紙の中の１マスに相当する．各画素は，カラー情報を含む濃度情報を持っている．この濃度情報は，画像の分解能に関わっている．画素自体は絶対的な大きさの情報を持っていない．しかし，画素の大きさによって，画像の解像度が変化する．通常，画素のアスペクト比（縦横比）は１：１であるが，１：１以外の場合もある．

さらに画素は，方眼紙の１マスに相当することから，そのマス目の大きさに相当するものが解像度である．解像度は，横方向のドット（dot：点）数と縦方向のドット数で表す．方眼紙の場合は，1mm ごとに目盛りのある方眼紙や 5mm ごとに目盛りの方眼紙もあるように画像にも 256 画素×256 画素の画像もあれば，512 画素×512 画素の画像もある．画像を細かく分割すればするほど解像度も高くなり精細になる．この画像の分割数を決定する作業を前述したように標本化と呼ぶ．アナログ画像は連続した濃淡情報を持っているが，この連続した値をどのように分解するかによって，画像の分解能は変化する．つまり，濃度分解とは，画像の濃淡の深みを，数値で表現することで，各画素の持つ濃淡情報を数値化する作業であり，量子化と呼ぶ．画像の最も単純な量子化は，各画素に白（0）か黒（1）のどちらかの値を持たせることであり，この画像をモノクロ２値画像と呼ぶ．白と黒の２値を表すには１ビット（bit：binary digit の略）で足り，ビット数を増すと，白から黒に変化する間の階調を細かくすることが可能となる．人間の目では，濃度を識別する能力に限界があり，通常よく使われる分解能は，８ビット 256 階調程度ある．これは，白から黒の間を 256 段階に分解して表現するものである．

また，アナログデータ（ビデオテープやレコードなど）とデジタルデータ（CD や CD-ROM など）の特性の違いは，アナログデータを繰り返しコピーすると，次第に画質や音質が劣化しますが，デジタルデータは，何度コピーしても画質や音質の劣化は発生しない．しかし，画像が劣化しないデジタル画像の方が，アナログ画像より

も優れているとは，一概にいえない．デジタル画像を２倍に拡大すると，画素自体が縦横それぞれの方向に２倍に拡大される．つまり，１画素の面積は４倍に拡大されることになる．このとき画像の解像度は変化しないから，拡大率が大きくなればなるほど，画像の粗さが目立ち，画質が低下することになる．一方，アナログ画像では，画素で構成されていないことから，何倍に拡大しても画質の低下は発生しない．

コンピュータ画像処理では，色を R（赤），G（緑），B（青）成分の組み合わせで表現する．RGB の各成分に，それぞれ 8 ビットの情報を持たせることで，最近の画像処理ボードでは，1670 万色（256×256×256：フルカラー）を表現可能となっている．色数と解像度により，画像処理ボードのメモリ量は決定される．640×480×8 ビット（256 色）＝300KB，640×480×16 ビット（64K 色）＝600KB，600×480×24 ビット（16M 色）＝900KB，1024×760×8 ビット（256 色）＝760KB，1024×760×16 ビット（64K 色）＝1520KB，1024×760×24 ビット（16M 色）＝2280KB，である．従って，2MB のメモリで表現できる解像度は 1024×760，色数は 65536 色であり，フルカラー（1670 万色）を表現するためには，4MB のメモリが必要である．また，1670 万色中 256 色表示可能という場合は，RGB 成分の組み合わせを表現しているのではなく，コンピュータに 256 色のカラーパレットが用意されており，パレットを構成する各色に 1670 万色中の１色を割り当てて，色を表現する方法である．

(2)画像入力装置と２次元画像フォーマット

コンピュータによる画像処理を行うには，画像を入力する画像入力装置が必要である．画像入力装置としてビデオキャプチャーやスキャナーなどの機器がある．ビデオキャプチャーボードは，家庭用ビデオカメラからの 30 フレーム／秒の動画を取り込む画像入力機器である．また，イメージスキャナーには，写真プリントなどを読

み込む反射型スキャナーと写真フィルムなどを読み込む透過型スキャナーがある．反射型スキャナーの場合は，原稿に光を当て，その反射を CCD ラインセンサーで感知して原稿を読み取る．コピー機や FAX もこれと同様の原理である．透過型スキャナーの場合は，フィルムに光を当て，そこから透過してくる光を CCD ラインセンサーで感知して読み取る原理である．

また，入力画像には，様々なノイズやムラが含まれている．従ってこれらのノイズやムラの除去処理を行うために，画像入力装置には，濃度変換を行うためのルックアップテーブル（LUT：入力対出力画像の変換テーブル）が内蔵されている．この LUT には，リニア，レベルスライス，等輝度線，階調変化，レベルスライス＋リニア，等輝度＋リニア，拡大強調，中間輝度レベル強調，ガンマ補正などの種類がある．

画像入力装置により，コンピュータに取り込まれた画像データは，ファイル形式に変換される．その際に一般的に用いられる画像フォーマット（ファイル形式）の種類を表３－２に示す．

(3)画像計測

画像計測とは，画像から特徴的な形を抽出したり，濃度の分布などを数値で表したりする処理である．例えば，顕微鏡でプレパラート上の血液（画像）を観察し，赤血球（形状という特徴）の数をカウント（抽出）することも画像計測であり，気象観測衛星から見た地表（画像）から，植物の群生地域（濃度という特徴）だけを抽出することも画像計測である．画像計測を大別すると，形状計測，濃度計測，パターン認識に分類される．ここでは，本研究で用いた形状計測について詳述する．

形状計測とは，画像から形状における特徴を抽出する処理である．その計測手順は，図３－21 に示すように，①画像入力装置により画像の取り込みを行う．この際に，画像入力装置のルックアップテーブル（Lookup table：LUT）により，画像のノイズやムラの除去処理を施す．②濃度ムラの

表３－２　画像フォーマット（ファイル形式）の種類

BMP	ビットマップ（bitmap）画像のドットパターンをそのまま画像ファイルとして保存する形式である．
DIB	MS-Window 3.0 から採用された，機種依存のないビットマップファイルである．
EPS	Encapsulated PostScript File 代表的な PostScript グラフィック形式で，異なるアプリケーション間や異機種間で画像データを交換するために使用される．モノクロ２階調画像の白を透明として扱う．
GIF	CompuServe Graphic Interchange Format 画像データの転送や異機種間でデータを交換するために使用される．データが圧縮されており，電話回線でのファイル転送時間を最小にするように設計されている．
JPEG	Joint Photographic Experts Group 制止カラー画像を圧縮して転送交換するためのフォーマットで，余分なデータを破棄して圧縮するためファイルサイズは小さいが，解凍しても元の画像と同一にならない．
PCX	Zsoft 社が開発したフォーマットで，異なるアプリケーション間での画像データの交換に使用される．
PCD	Eastman Kodak 社が開発したフォーマットで，Kodak Photo CD で使用されている．
TIFF	Tagged-Image File Format Machintosh の Apple 社と Aldus 社などが中心となって提案したカラーイメージフォーマットで，異なるアプリケーションや異機種間で画像データの交換に使用される．
TGA	Targa Truevision ビデオボードを組み込んだシステムでの使用を目的としたフォーマットで，MS-DOS のカラーアプリケーションで，一般的に使用されている．

図３－21　画像計測における形状計測の計測手順

ある画像からムラを除く処理であるシェーディング補正を行う．このシェーディング補正の原理は，全体的な明暗の変化を表した明暗分布画像で元の画像を除算，あるいは減算して，全体の明るさの補正を行う．つまり，不均一な照明下で撮影された原画像を，同じ照明下で撮影した白紙の画像で除算，または減算することにより，均一の照明下で撮影した画像へ変換する．また，原画像に対応する明暗分布画像が得られない場合には，原画像に対して最大値フィルタを施し，次に平均値フィルタを施して明暗画像を作成する方法を用いる．次に，③多段階の階調を持つ濃淡画像から，特定範囲の濃度領域を白（1）に，残りの領域を黒（0）にする２値化処理を施す．この際に特定領域は，連続している必要はなく，分散していても構わない．ただし，p-タイル法やモード法の場合には，特定濃度領域は連続している必要がある．カラ

一画像を２値化するには，まず，カラー画像をモノクロ画像化する必要がある．このときに，色相環を利用し，注目する対象の色を最も明るくし，対象の色相から離れるにしたがって黒くすることにより，濃淡画像を作成する．さらに，④対象物だけを抽出して，より適切な画像計測ができるように，画像修正の２値画像処理を施す．この画像修正には，膨張，収縮，孤立点除去，微小粒子除去，超大粒子除去，穴埋め，細線化，円形分離などがある．最後に，⑤ラベリングによって抽出宇された画素を計測する処理の２値画像計測を行う．例えば，対象物の面積は，同じラベル番号ののついた画素の数を集計することで求められる．線長は，画素間の距離を計算して求める．画像中の対象物の個数は，対象物についたラベルの最大番号により求められる．２値画像計測では，計測された結果には，デジタル誤差が含まれていることに注意しなければならない．対象物を構成する画素数が少ないほど，誤差は大きくなり，面積を計算するには，対象物を構成する画素数が最低30画素以上，周囲長の計測には 100 画素程度が必要である．これより小さな対象物では，計測誤差の中に対象物の特徴が埋没してしまい形状の識別が不可能となる．

面積計測の基本は，１画素の面積であり，対象物の面積は，

１画素の面積＝１画素の１辺の長さ×１画素の１辺の長さ

対象物の面積＝画素数×１画素の面積

で求められる．

線長計測の基本は，１画素の１辺の長さであり，斜めの長さは，縦横の長さの$\sqrt{2}$倍である．従って，対象物の長さは，

$$=\left(\text{上下左右方向の個数}+\text{斜め方向の個数}\times\sqrt{2}\right)\times\text{１画素の１辺の長さ}$$

により求められる．

１画素当たりの実寸法を求めることを実寸法換算といい，求めるには，スケール（物差し）を入力し，スケール上の２点を指定し，この２点間の実寸法から，１画素当たりの実寸法を得る．例えば，指定した２点間の距離が 500 画素，実寸法が 50mm の場合，換算値は，50mm／500 画素となり，0.1mm／画素となる．

実寸法換算では，スケール上の２点を指定するときに発生する誤差と，画像入力時に発生するデジタル誤差が問題になるが，この誤

差を少しでも回避するために，面積の既知なる正方形の板（板スケール）を入力し，１画素の面積を算出することにより，対象物の面積等を求める方法を用いる．

３．５．２　接触面積測定システム

円筒物体の把握における手指掌面と円筒物体表面間の接触面積を正確に測定するため図３－22に示すように，それぞれの直径を有する各円筒物体の表面に紙を巻き付け，各被験者の手指掌の表面にインクを塗る方法を採用した．この方法により各直径の円筒物体を把握した際に得られる“手形プリント”をイメージスキャナー（セイコーエプソン㈱社製：GT-9000）を介してパーソナルコンピュータに取り込み，これにより得られた２次元画像データ（BMP ファイル型式）を基に，画像の２値化処理により２値画像を得た後，画面上に黒色で表示される手形プリント部分の画素（ピクセル：Pixel ）数を積算するプログラム処理を利用して画像計測による面

図３－22　接触面積測定システム

積計算処理を行うことにより手指掌面と円筒物体表面間の接触面積を求めた．

３．６　手指掌摩擦係数の測定方法

本節では，把握動作における手指掌面と物体表面間の摩擦係数の測定に用いた３成分動力計を利用した摩擦係数測定システムについて説明する．

３．６．１　圧電素子式３成分動力計

旋盤等による切削加工におけるバイトに作用する３方向の切削力の測定などに広く用いられる３成分動力計の構造は，図３－23に示すように，一般的に，力変換器（フォーストランスデューサ：Force transducer）を内蔵する４つの柱部により，剛体のプレートを支持する構造である．従って，それぞれの柱部にかかる力の配分がわかり，プレートの垂直な作用力：Fzの支持力と作用点が計算できる．また，柱部の曲がりによりプレートに平行な作用力，つまり水平力：Fx，Fyも計測できる．原理は，プレートを支える力：Fa（柱部１と２の受け持つ力），Fb（柱部３と４の受け持つ力）の合

図３－23　３成分動力計の原理と構造

成力を表すと，

$$Fa + Fb = Fz \quad \text{----------} \quad (3.4)$$

となり，また，力のモーメントを表すと，

$$Fa \times La + Fb \times Lb = Fz \times Lx \quad \text{----------} \quad (3.5)$$

となる．(3.4)式と(3.5)式より，

$$Fz = Fa + Fb, \quad Lx = \frac{Fa \times La + Fb \times Lb}{Fa + Fb} \quad \text{----------} \quad (3.6)$$

となり，合成後の力の成分：Fzと作用点の位置：Lxが計算できる．同様に，合成後の力の成分：Fz の作用点の位置：Ly および水平力の成分：Fx，Fyと作用点の位置も計算できる．

３成分動力計には，歪ゲージの変位を利用した３軸ロードセル式と圧電位（ピエゾ効果）の原理により測定する圧電素子式がある．３軸ロードセル式の３成分動力計は，前述したプレート支持の各柱部に金属支柱を用い，その周囲の４面に歪ゲージを貼付し，その金属支柱の微少な歪みを電気的に検出する方法である．４面の歪ゲージの和によって圧縮力，すなわち垂直力：Fz の計測ができる，また，前後方向，あるいは左右方向の差によって曲げ力，すなわち水平力：Fx，Fy の計測ができる．圧電素子の圧電位（ピエゾ効果）は，水晶，ロッシェル塩，チタン酸バリウムなど圧電素子の結晶が無負荷状態において原子は規則正しく配列し，電気的には中性の状態であるが，特定の方向からの圧力作用時に原子の配列に移動が起こり，分極が発生する．これらの電荷は，加えた圧力に比例して発生することから，これを測定することにより力を測定できる．３軸ロードセル式の３成分動力計は，使用する歪ゲージの特性から，最大許容荷重と測定範囲の組み合わせに大きく依存し，用途に合わせた選定が重要となる．しかし，これに対して圧電素子式の３成分動力計は，圧電素子の有する広範囲測定レンジ特性により，大きな許容荷重においても高精度の測定範囲が得られる利点を有している．

本研究には，手指掌面と物体表面間の摩擦係数を測定する目的として３成分動力計を用いることから，プレートに作用する垂直力の

大きさに対して極めて小さな水平力の変化を正確に計測する必要があることから圧電素子式の３成分動力計（キスラー㈱社製：9257B ）を用いることにした．この３成分動力計は，プレートに刻印された矢印方向に水平方向（X と Y）の力（Fx と Fy）が作用する場合に，負の電荷が発生するように設定されている．また，プレートに垂直方向（Z）の圧縮力（Fz）が作用する場合にも，負の電荷が発生するように設定されている．これらの圧電素子式の３成分動力計からの負の電荷信号は，チャージアンプにより正の出力電圧に変換される．

３．６．２　摩擦係数測定システム

物体を把握する場合の手指掌面と円筒物体表面間の摩擦係数を測定するにあたって，円筒物体の把握時において直接測定することが不可能なことから３成分動力計（キスラー㈱社製：9257B ）を用いた方法を採用して摩擦係数測定システムを構築した．

物体を把握する手指掌面と物体表面間の摩擦を考える上で，図３－24 に示すように，物体に作用する水平力：W，最大静止摩擦力：fo，摩擦面に垂直に働く垂直力：Fg，また，静止摩擦係数：μ とした場合に，

$$fo = \mu \times Fg \quad \text{----------} \quad (3.7)$$

また，

$$\tan\phi = \frac{fo}{Fg} = \frac{\mu \times Fg}{Fg} = \mu \quad \text{----------} \quad (3.8)$$

となる．この式の関係を物体の把握時とした場合，把握力は， Fg に，また把握した物体の重量は， W に，最大摩擦力は，fo に，手指掌面と物体表面間の摩擦係数は，μ に相当することになる．従って，物体の把握時を式によって表すと，

$$fo = \mu \times Fg \quad \text{----------} \quad (3.9)$$

となる．ここで，(3.9)式の μ を実験的に求めることにより，物体把握における手指掌面と物体表面間の摩擦係数を得ることできる．

図３－24　静止摩擦と物体把握

図３－25　手指掌面と円筒物体表面間の摩擦係数の測定

従って，摩擦係数を求めるために，図３－25 に示すように３成分動力計を用い，のプレート面の垂直力：Fz と水平力：Fx と Fy の

$(Fx^2+Fy^2)^{1/2}=\mu$ Fz 関係より平均最大摩擦係数μ求めればよいことになる．ただし，ここで Fx，Fy，Fz は互いに直交する３軸方向の分力をそれぞれ表すものとする．実際の測定は，３成分動力計プレート上に，それぞれの直径の円筒物体を円筒軸に沿って２つに切断した 1/2 円筒体を固定し，その上に重量が 9.8N，19.6N，29.4N，39.2N の錘を手背側面上にのせた手を水平方向に動かした場合の平均最大摩擦係数μを，チャージアンプからの各 Fx，Fy，Fz の出力信号を A/D コンバータ（㈱コンテック社製：高速汎用型 A/D 変換ボード AD12-16T(98)H）を介してパーソナルコンピュータ（日本電気㈱社製：PC9801NS/R）に入力して計算により求める摩擦係数測定システムを構築した．なお，この測定の際に，発汗などによる接触境界面に介在する水分などの影響を出来るだけ取り除く必要がある．そこで，メチルアルコール等による脱脂処理などは行っていないが，一般的な把握状態を考慮して同一な測定条件を得るために被験者には，手指掌を石鹸洗浄すると共に，水洗いし，乾燥後，短時間内に測定を行うようにした．

３．７　関節運動の測定方法

本節では，上肢および指関節運動の３次元測定に用いた DLT 法（Direct Linear Transformation）法を応用した多方向同時ビデオ撮影法による関節運動測定・解析システムについて，測定手順を詳述する．

３．７．１　関節運動測定・解析システム

本研究では，上肢および指関節運動の３次元測定に DLT（Direct Linear Transformation）法を応用した多方向同時ビデオ撮影法による関節運動測定・解析システムを構築した．この測定・解析システムは，各関節を構成する個々の部位に配置されたマーカーを多方向からビデオ撮影する多方向同時ビデオ撮影システムと得られる２次

元画像を DLT 法により３次元座標を規定し，各マーカーの座標系間の相対運動を測定・解析する画像処理システムから構成されている．以下に，関節運動測定・解析システムによる測定手順および計測精度について述べる．また，DLT 法の基本原理については，付録１に詳述した．

(1) 測定手順

以下に多方向同時ビデオ撮影法の測定手順について述べる．

①ビデオマーカーの設置

測定対象となる関節を構成する各部位の皮膚表面上にビデオマーカーを取り付ける．例えば，指関節の場合には，１つの指関節において構成する２つの指節骨の基部（近位端）および骨頭部（遠位端）の合計４箇所に，骨軸に沿ってマーカーは取り付ける．

②カメラ配置

対象関節の可動域に合わせて，２台以上の 8mm ビデオカメラ（ソニー㈱社製：CCD-TR3）を設置する．この際にビデオカメラは，すべての対象関節のあらゆる可動域において，すべてのカメラが同時にマーカーを認識できるように配置を行わなければならない．

③空間較正

ビデオカメラ配置を決定した後，空間較正を行う．コントロールポイントを配置したリファレンスフレームを計測空間に設置する．リファレンスフレームは，図３－26 に示すようにコントロールポイントとして台座上に多数の発泡スチロールの球体を配置した構造であり，各コントロールポイントの３次元座標値は，予め測定しておく．リファレンスフレーム設置後，すべてのビデオカメラでリファレンスフレームのすべてのコントロールポイントを撮影する．なお，空間較正の終了後は，ビデオカメラの設置位置，焦点距離および絞りは変更できない．

図３－26　リファレンスフレーム

④撮影

対象関節に設置したマーカーの運動を，すべてのビデオカメラで同時に撮影する．なお，解析は同時刻に撮影した画像によって行われるため，すべてのカメラの同期をとる必要がある．そこで本研究では，ビデオ撮影中に計測空間内で LED（Light-emitting diode：発光ダイオード）を点灯させ，その瞬間のフレームを基準時間として，多数台のカメラの同期を行った．

⑤マーカーの３次元化処理

各ビデオカメラにより撮影されたリファレンスフレームのコントロールポイントおよび対象関節の設置マーカーの投影面座標を測定する．これらの投影面座標の測定は，図３－27 に示すように，ビデオテープに記録された各カメラの画像を画像入出力ボード（マイクロテクニカ㈱社製：MT-98-CVFM）を介してパーソナルコンピュータ（日本電気㈱社製： PC-9801）画面上に表示した後，各ポイントのディスプレイ上の座標をマウスを用いて入力することにより

図３－27　関節運動測定・解析システム

図３－28　実空間座標とビデオカメラの投影面上座標の関係

行う．

付録に示した DLT 法の基本原理を参考として，図３－28 に示す

ように実空間座標とビデオカメラの投影面上座標の関係を式で表すと，

$$\begin{pmatrix} U-U_0 \\ V-V_0 \\ -F \end{pmatrix} = -\frac{F}{L}\cdot[R]\begin{pmatrix} X-X_0 \\ Y-Y_0 \\ Z-Z_0 \end{pmatrix} \quad \text{----------} \quad (3.10)$$

となる．また，各カメラ定数をまとめて変数：U，V，X，Y，Z について整理すると以下の式が得られる．

$$\begin{cases} A_1X+A_2Y+A_3Z+A_4-C_1XU-C_2YU-C_3ZU-U=0 \\ B_1X+B_2Y+B_3Z-B_4-C_1XV-C_2YV-C_3ZV-V=0 \end{cases} \quad \text{----} \quad (3.11)$$

また，２台以上のカメラで既知なるコントロールポイントを６点以上撮影し，それぞれの投影面座標を求め，(3.11)式に代入することにより，

$$\begin{cases} (A_1-C_1U)X+(A_2-C_2U)Y+(A_3-C_3U)Z-A_4-U=0 \\ (B_1-C_1V)X+(B_1-C_2V)Y+(B_3-C_3V)Z+B_4-V=0 \end{cases} \quad \text{---} \quad (3.12)$$

が得られる．投影面座標の測定後，測定したリファレンスフレームのコントロールポイントの投影面座標と３次元座標を，(3.11)式に代入し，連立させて解くことにより，各カメラの A_1～A_4，B_1～B_3，C_1～C_3 の 11 個の未知数を算出する．さらに，これらの未知数と関節に設置した各マーカーの投影面座標を(3.12)式に代入し，連立して解くことで対象の各マーカーの３次元座標を求めることが可能となる．

(2)計測精度

以下に多方向同時ビデオ撮影法による３次元座標の測定において，

その計測精度に影響を及ぼす因子について述べる．

①計測空間

DLT 法における計測精度は，計測空間を撮影した投影面座標系の分解能に大きく依存するため，計測空間の増大に伴い誤差の絶対値は増加する．従って，精度よく測定を行うためには計測空間を必要，最小限の範囲にとどめる必要がある．

②カメラ台数

前述したように，DLT 法は数値計算的には多元の連立一次方程式の解法問題に帰着する．従って，多数の一次方程式を用いて最小２乗法を応用して解くことにより，計算精度を向上させることができる．

このことから，カメラ台数の増加は，(3.11)式に示した一次方程式の本数を増加させることになり，その結果，計算精度を向上させることになる．さらには，多方向から撮影することにより，一部のカメラにおいて，マーカーが死角に入る場合が生じた場合も，他のカメラによってカバーできるという利点もある．

③カメラ配置

得られた連立方程式に独立でないものが含まれる場合，それにより一次方程式の本数が未知数の数より少なくなれば計算は不可能となる．また，未知数の数より多い場合でも，最小２乗法を用いた解法では独立でない，あるいは，それに近い状態の方程式の存在は計算精度を落とすことになる．カメラ配置においては，この点を十分に留意しなければならず，２台のカメラの光軸が一致（光軸角度０°あるいは 180°）するか，それに近くなるような配置は，方程式の独立が保てないという理由から避けなければならない．

さらに，マーカーの３次元的座標をカメラ投影面上の２次元座標から求めるという性格上，光軸方向の計測精度は他の方向に比べて極めて悪い．これらを考慮しても，各カメラの光軸が一致，あるい

は，それに近くなる配置は避けなければならない．一般には，光軸が直交するように配置すれば理想的であるとされるが，光軸同士のなす角度が30°程度であれば精度的には問題ない．

④コントロールポイントの数および配置

前述したように，空間較正においては最低6点のコントロールポイントがあれば11個の未知数を算出することは可能であるが，カメラ台数の場合と同様に，(3.10)式で与えられる一次方程式の本数を多くして計算精度を向上させる意味からできるだけ多くのコントロールポイントを配置して空間較正を行うことがよい．

なお，空間較正で使用するコントロールポイントの数が十分であっても，その配置により方程式の独立性が失われる場合もある．すなわち，2点のコントロールポイントが重複，または，それに近い状態で撮影された場合，方程式の独立性は失われることになる．このことから，コントロールポイントを配置する際は，計測空間に均等に分散されるような配置を行わなければならない．

⑤カメラのレンズ収差

図3－28に示したように，マーカーからの光線はレンズを通してカメラ投影面に入射するが，このとき理想光学系においては，(3.10)式に示すワールド座標系と投影面座標系の関係は，あらゆる入射角度において一定である．しかし，実際には光軸付近においては理想光学系と同様に扱えるものの，この域からのズレが大きくなるのに伴い，これら座標系の関係にズレが生じてくる場合がある．このズレは収差と呼ばれ，多くの要因はレンズの歪みによるレンズ収差である．レンズ収差は，高精度で製作された測量用レンズであれば広角レンズにおいても5～10 μm以下であるが，本研究で使用するような一般用レンズでは50 μmに及ぶ場合もあり，測定の際には，これらの影響を明らかにしておく必要がある．

図3－29　レンズ歪曲収差

レンズ収差は一般に5種類に分類されているが，最も影響が大きいのは歪曲収差である．これは，レンズ中心からの距離によって倍率が変化することにより，図3－29に示すように投影像が樽型，または，糸巻型に歪みをもつことである．　以上に示した要因のうち，カメラの配置角度，コントロールポイント数およびレンズ収差の影響について検討するために，3次元測定機を用いて基礎実験を行った．実験は各条件について以下の手順で行った．

①3次元測定機のテーブル上にリファレンスフレーム（計測空間：X×Y×Z=200×200×200mm）を設置し，コントロールポイントの座標値を3次元測定機により測定する．

②ビデオカメラを配置し，リファレンスフレームを撮影する．

③撮影後リファレンスフレームを取り除き，計測空間内にマーカーを配置した測定用フレームを設置する．

④各マーカーの座標値を3次元測定機により測定する．

⑤ビデオカメラにより，測定用フレームを撮影する．

⑥マーカーの座標値を算出し，各条件における3次元測定機による座標値との誤差の比較を行った．

なお，レンズ収差の補正は，図3－30に示すように座標が既知の点（グリッド）を多数配置した平面に対して平行になるようにビデオカメラを設置し，グリッドを撮影した画像からレンズ収差の補正

図３－30　レンズ収差の補正

係数を各カメラ毎に算出することにより行った．このとき，平面上に規定されたグリッド座標系：(X,Y)と投影面座標系：(U,V)は平行であり，それぞれの原点（主点）とレンズ座標系：(X',Y',Z')が同一直線（光軸）上にあるとすれば，理想光学系においては，

$$\begin{cases} x = -\lambda_u \dfrac{C}{\ell} \cdot \bar{u} = C_u \cdot \bar{u} \\ y = -\lambda_v \dfrac{C}{\ell} \cdot \bar{v} = C_v \cdot \bar{v} \end{cases} \quad \text{----------} \quad (3.13)$$

ここでレンズ収差を考慮して，投影面座標系：(U,V)における測定値およびレンズ収差による補正値をそれぞれ(u, v)，(Δu,Δv)とすると，上式は，

$$\begin{cases} x = C_u(u + \Delta u) \\ y = C_v(v + \Delta v) \end{cases} \quad \text{----------} \quad (3.14)$$

ここで，(Δu, Δv)はレンズ中心からの距離：$r = u^2 + v^2$，および補

正係数：(k_1, k_2)を用いて，

$$\begin{cases} \Delta u = u(k_1 r^2 + k_2 r^4) \\ \Delta v = v(k_1 r^2 + k_2 r^4) \end{cases} \quad \text{----------} \quad (3.15)$$

とした．従って，(3.14)式は以下のように表される．

$$\begin{cases} x = -C_u u(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4) = 0 \\ y = -C_v v(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4) = 0 \end{cases} \quad \text{----------} \quad (3.16)$$

これに各グリッドの座標：(x, y)，およびその投影面座標の測定値：(u, v)を代入して逐次近似解法にて解くことにより(k_1, k_2)を算出した．なお，補正時の投影面の一例を図３－31 に示した．図中において格子は，理想光学系におけるグリッドの位置，黒点は，そ

図３－31　補正前後の投影面座標

の投影面座標における測定値をそれぞれ表している．

補正は，以上の方法によりそれぞれのカメラについて求めた補正係数：k_1，k_2 を用いて(3.15)式より($\Delta u, \Delta v$)を算出し，コントロールポイントおよびマーカーの投影面画像の計測値に加算することにより行った．

図３－32 にカメラ設置角度の変化における，３次元測定機での

図３－32　カメラ角度による計測誤差への影響

図３－33　コントロールポイント数による計測誤差への影響

測定値に対する計測誤差の変化を示す．カメラは２台使用し，その水平方向の設置角度は 30°，60°，90° に設定した．なお，空間較正時に用いたコントロールポイントは各条件ともに 18 点である．X，Y 軸方向において測定誤差の変化を見ると，設置角度を狭くするのに伴い誤差が有意に増大する傾向が見られた．特に，この傾向はＹ軸方向において顕著であり，設置角度が狭い場合においては光

図３－34　レンズ収差による計測誤差への影響

軸方向の精度が極度に低下することを示している．なお，Ｚ方向においては設置角度の変化による大きな変化は見られなかった．以上の結果を考慮して，本研究においてはビデオカメラの設置角度を常に90°近くに設定することを留意した．また，このときのＸ，Ｙ，Ｚの各方向における計測誤差は共に0.2±0.15mm以下であった．これは計測空間の約0.1%程度であり十分な精度であると思われた．

図３－33に空間較正時にコントロールポイントの数を変化させた場合の計測誤差の変化を示す．カメラは２台使用し，その水平方向の設置角度は90°とした．

各方向において計測誤差の大きな変化はほとんど見られないが，６点の場合のＸ軸方向のデータのばらつきや，Ｚ軸方向の誤差の増大より，コントロールポイント６点での空間較正は望ましくないことが理解できる．よって，本研究においてはこれらの結果を考慮し，12～18点のコントロールポイントを用いて空間較正を行った．

また，図３－34にレンズ収差補正前後における計測誤差の変化について示す．これより，Ｘ，Ｙ，Ｚいずれの方向においても補正前後における計測誤差には有意な変化は見られなかった．これはレンズの焦点距離を最長（65mm，35mmフィルム換算で470mm）にして行ったために光線がほぼ近軸域において入射されたことによるもの

と思われ，このような撮影条件においてはレンズ収差の影響は無視できると考えられた．従って，本研究では常にレンズの焦点距離を最長にして測定を行い，レンズ収差の影響は無視することとした．しかしながら，カメラ配置の都合上やむを得ず焦点距離を短くして撮影する場合には光線の入射角が近軸域を離れる場合があることから，これらの補正を行う必要があると思われる．

３．８　結言

本章では，手の把握動作の測定と解析方法について，手指掌圧力測定システムおよび把握力測定システムの圧力変換素子として利用した感圧導電ゴムに関して，その構造と特性を詳述し，そのシステムについて述べて．また，筋出力測定システムに用いた表面筋電図の原理および筋出力の指標となる筋電図積分量について詳述し，そのシステムについて述べた．コンピュータ画像処理を応用した接触面積測定システムと３成分動力計を用いた摩擦係数測定システムについて詳述した．さらに，関節運動測定・解析システムの測定原理と計測誤差について詳述した．

第４章　手の把握動作機能の生体力学的解析

４．１　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はいる．しかし，類人猿では物の握り方のみに着目すれば，手指の使い方が人間と根本的に異なっているようであり，物体の形状に応じて瞬間的に安定な握り方が出来るのは人間だけである．このよう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．このことは，N. Wiener が 1949 年に提唱して以来，人工知能，脳理論，認知心理学の分野に分かれて発展を遂げ，認知科学として再び統合されたサイバネティックス（Cybernetics）とフィードバック制御理論からも，脳と動作機能の基となる筋の関連性がクローズアップされている．ヒトが物体を把握する場合，手で物体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瞬時に大脳へ送り，把握動作の最適化を筋群等に指令している．このようなヒトの手の優れた把握機能は，人間－機械系や人間－道具系のインターフェイスを考える上で極めて重要であり，これらを生体力学的に解析して得られる知見は極めて広い分野に応用される．

本章では，手の把握動作機能を解析する上での基本として，円筒物体の把握動作を手指掌圧力，把握筋出力，指関節屈曲運動等により生体力学的に解析し，手指掌面と円筒物体表面間の力の伝達状態から握り易さを支配する物理的因子の解析手法ならびに解析結果の意義などについて詳述する．

４．２　握り感覚の計測

ヒトの手が得る感覚として，手指掌面の皮膚と皮下組織に存在す

る受容器による体性感覚，すなわち温・冷覚，痛覚，触覚，圧覚などの感覚情報がある．これらの感覚情報は，物体を把握する場合に統合されて「握り易い」や「握りにくい」などの握り感覚を判定するため高次中枢での感性に変化する．このような握り感覚を計測する手法として官能検査法の一つである SD（Semantic differential）法[56][60]がある．官能検査法の概要[56]～[59]および本研究に用いた SD 法については，付録２に詳述した．

なお，図４－１に示すように，物体把握における「表面感覚」，「太さ感覚」，「重さ感覚」，「保持感覚」，「握り感覚」の感覚から成る５項目を７段階に表現する握り感覚官能検査票を作成した．ここで，特に円筒物体把握時の各被験者の主観的申告結果を重視した．

図４－１　円筒物体の把握における官能検査票

4．3　円筒物体の把握動作の解析

本節では，ヒトの手の把握動作機能を生体力学的観点から解析するために，手の把握姿勢と負荷方向の差異を考慮した6つの条件下で，円筒物体の直径と重量を変えた場合を手指掌圧力測定システム，筋出力測定・解析システムと関節運動測定・解析システムを用いて測定した．これにより，手指掌面と円筒物体表面間の接触圧力，また，把握動作に関係する指屈筋の表面筋電位および把握動作における各指関節運動の3次元計測結果およびその意味するところを詳述する．

4．3．1　実験方法

(1)被験者および測定条件

被験者として，年齢 22～26 歳の成人健常男性6名を考慮した．各被験者の手の寸法を，図4－2に示すように，標準化した人体寸法計測項目[61]に従って第3指手長，手掌長および手幅の寸法を測定した．これら各被験者より得た各部の平均寸法は，従来より用いられている日本人の成人男性の測定資料[62]~[64]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

(単位：mm)

被験者	第3指手長	手掌長	手幅
A	177	98	79
B	178	103	83
C	182	98	76
D	187	109	86
E	179	102	87
F	188	105	86
平均値	181.8	102.5	82.8

図4－2　各被験者の手および指の寸法計測項目と測定値

良く一致する．

実験を単純化するため，図4－3に示すように，円筒物体に対して6方向からの静的な負荷がそれぞれ作用する状態を考慮した．これら荷重の作用方向によって条件を設定することとし，以下のようにした．円筒物体を把握する手の前額面において作用方向が尺側方向の場合を条件A，橈側方向の場合を条件B，また，手の矢状面において背側方向に作用する場合を条件C，掌側方向の場合を条件D，手の遠位方向の場合を条件E，近位方向の場合を条件Fとした．

各負荷の作用方向の条件においては，円筒物体の把握姿勢を上腕二頭筋等による対象物体への持ち上げ力や引っ張り力等が作用せず，把握に必要な前腕腹側筋の指屈筋による把握力のみが作用する条件を考慮した．そのために，図4－4に示すように負荷の作用方向の条件A～Dの測定は，水平な肘掛け付きの椅子を用いて，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着座姿勢で円筒物体を把握する状態で行った．この際，条件Bにおいては，前腕が

図4－3　円筒物体の把握時の負荷の作用方向の条件

図４－４　負荷の作用方向の条件による把握姿勢

引き上げられることを考慮して，伸縮自在のストラップベルトにより，前腕を肘掛けに固定して測定を行った．また，負荷方向の条件ＥとＦの測定には，上肢の手関節および肘関節が完全に伸展した立位姿勢で円筒物体を把握する状態で行った．

これら６つの負荷の作用方向の条件において，円筒物体として，各直径が 18mm，26mm，38mm，48mm，60mm の塩化ビニール製パイプに対して，重さが 19.6N，39.2N，58.8N の錘により作用重量を変えた場合の全手指掌把握（全手指掌掴み）による把握動作を対象として各測定を行った．

(2) 手指掌圧力の測定

円筒物体の把握動作における手指掌圧力の測定には，前述した手指掌圧力測定システムを用いた．測定に際して，図４－５に示すように感圧導電ゴム利用の手指掌用圧力センサ 24 個を，各被験者の

図４－５　手指掌用圧力センサの配置

手指掌面の皮膚表面上に厚さ約 0.07mm の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．

(3) 指関節運動の測定

円筒物体の把握における各指関節の屈曲運動の３次元計測には，前述した関節運動測定・解析システムを用いた．測定には，図４－６に示すように各被験者の手背側面における拇指，示指，中指，環指，小指の中手骨，基節骨，中節骨，末節骨の基部（近位端）と骨頭部（遠位端）の皮膚表面上にマーカーを配置した．４方向に設置した４台の 8mm ビデオカメラ（ソニー㈱社製：CCD-TR3）により，手指の把握動作を撮影する多方向同時ビデオ撮影システムにより，個々のマーカーの２次元画像を得た．この得られた２次元画像を基に，画像処理システムにより，２次元座標を求め，さらに DLT（Direct Linear Transformation）法により，３次元座標に変換して各指関節の屈曲角度を算出した．

図４－６　マーカーの配置と多方向同時ビデオ撮影

(4) 筋出力の測定

円筒物体の把握動作における筋出力を測定するために，前述した筋出力測定・解析システムを用いた．円筒物体の把握における筋出力は，各指関節の屈曲運動に依存することから，手指の把握動作の基本である拇指と他の４指による対立運動を形成する短拇指屈筋と浅指屈筋を測定対象に考慮した．従って，図４－７に示すように各被験者の右手掌側の拇指球内側部と前腕の腹側筋の皮膚上に，各被験筋群に対して 20～30mm 離した２個の表面筋電図電極（日本電気三栄㈱社製ディスポーザブル電極：Biorode）を配置した．測定は，円筒物体を把握して３秒経過後に約１秒間の筋電位を測定した．得られた筋電位の解析には，従来の報告[10]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 EMG）を用いることとし，得られた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．

図４－７　表面筋電図の電極の配置

４．３．２　結果および考察

(1) 筋電図積分量の特性

円筒の負荷方向の条件Ａ～Ｆにおける個々の被験者の結果は，筋電位の出力電位レベルの差異はあるものの，ほぼ同一であり，定性的に一致した結果であったことから個々の被験者について負荷の作用方向の条件別に解析を行った．

結果の一例として，被験者Ａによる条件Ａにおける円筒直径と作用重量の変化に対する短拇指屈筋および浅指屈筋より得た筋電図積分量の特性を図４－８に示す．短拇指屈筋と浅指屈筋は，共に円筒の作用重量が増加するに従って筋電図積分量も増加する傾向が認められる．また，浅指屈筋は，作用重量に拘わらず直径が 38mm 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加する傾向が確認される．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る．このことより直径が 26mm 以下の比較的小さな物体を握る場合，拇指が把握動作に直接関与せず，拇指を除く４指と掌部が把握動作を支配すると思われる．従って，拇指以外の４指の各指関節が大きく屈曲した状態であることから，浅指屈筋の活動が大きいため筋電図積分量は大きく，短拇指屈筋では小さくなる．また，直径が 48mm 以上の場合，拇指の把握動作への関与が始まることから直径の増加に伴って浅指屈筋と短拇指屈筋の筋電図積分量は，共に増加を示すと思われる．

条件Ｂにおいては，図４－９に示すように，条件Ａの場合と同様に短拇指屈筋と浅指屈筋は，共に円筒の作用重量が増加すると筋電図積分量も増加する傾向が確認される．また，浅指屈筋は，作用重量に関係なく，直径が 38mm 前後において筋電図積分量が最小となり，短拇指屈筋では，直径の増加に伴って筋電図積分量も増加する傾向が確認される．この場合も，条件Ａの場合と同様に直径が 26mm 以下の場合，拇指が把握動作に直接関与せず，拇指以外の４指と掌部により把握力を発揮するため，浅指屈筋の筋電図積分量は大きく増加し，短拇指屈筋では小さくなる．また，直径が 48mm 以上の場合，直径の増加に伴って拇指と他の４指の両者により把握力が発揮されるため，浅指屈筋と短拇指屈筋の筋電図積分量が共に増加を示すと思われる．

条件Ｃにおいては，図４－10 に示すように基本的には，条件ＡとＢの場合と同様に円筒の作用重量が増加すると筋電図積分量も増加する傾向が確認される．しかし，浅指屈筋においては，直径に関係なく，筋電図積分量の変化は極めて少ないことが確認される．また，短拇指屈筋も直径が 38mm 以下おいて筋電図積分量は，低い値を示すことが確認できる．これは上向きの掌面に円筒物体を乗せるように把握するため，直径の増加に関係なく，浅指屈筋の活動は，常時，低いことから筋電図積分量は小さく，直径が 38mm 前後から拇指の把握動作への関与が始まることから，短拇指屈筋の筋電図積

(a) 短拇指屈筋の筋電図積分量

(b) 浅指屈筋の筋電図積分量

図４－８　条件Ａにおける筋電図積分量の特性

(a) 短拇指屈筋の筋電図積分量

(b) 浅指屈筋の筋電図積分量

図４－９　条件Ｂにおける筋電図積分量の特性

(a) 短拇指屈筋の筋電図積分量

(b) 浅指屈筋の筋電図積分量

図４－10　条件Ｃにおける筋電図積分量の特性

分量が直径の増加と共に大きくなると考えられる．

条件Dにおいては，図４－11 に示すように，短拇指屈筋および浅指屈筋は，共に円筒の作用重量が増加するに従って筋電図積分量も増加する傾向が認められる．また，短拇指屈筋は，直径の増加に比例するように筋電図積分量は大きくなり，その値も条件A，B，Cに比べて大きいことが確認される．浅指屈筋では，作用重量に関係なく，直径が 38mm 以下において筋電図積分量が，ほぼ一定の最小値となり，38mm 以上においては，直径の増加に伴って大きくなることが確認される．これは直径が 38mm 以下においては，拇指の基節骨部に円筒物体が乗るように把握すると思われ，拇指以外の４指の活動は低く，浅指屈筋の筋電図積分量は小さく，短拇指屈筋は直径の増加と共に大きくなる考えられる．また，直径が 38mm 以上では，他の４指の把握動作への関与が始まるため，浅指屈筋の筋電図積分量も大きくなると思われる．

条件Eにおいては，図４－12 に示すように，短拇指屈筋は，直径が 38mm 以下において筋電図積分量が，ほぼ一定の最小値となり，38mm 以上においては直径の増加に伴って大きくなることが確認される．また，浅指屈筋では，作用重量の増加に伴って筋電図積分量も大きくなり，作用重量に関係なく，直径が 26mm から 38mm において最小値となることが確認される．これは直径が 38mm 以下において，拇指は把握動作に殆ど関与しないため，短拇指屈筋の筋電図積分量が小さくなり，拇指以外の４指が把握動作を支配するため浅指屈筋の筋電図積分量が大きくなると思われる．また，直径が 38mm 以上においては，拇指の把握動作への関与が始まるため短拇指屈筋の筋電図積分量も大きくなる考えられる．

条件Fにおける短拇指屈筋と浅指屈筋の筋電図積分量の変化を図４－13 に示す．他の条件と同様に作用荷重の増加に伴って筋電図積分量も増加する傾向が見られる．浅指屈筋においては，直径の変化に対して筋電図積分量は殆ど変化せず，ほぼ一定値を示し，また，短拇指屈筋においては，直径の増加に伴って筋電図積分量も大きく

(a) 短拇指屈筋の筋電図積分量

(b) 浅指屈筋の筋電図積分量

図４－11　条件Dにおける筋電図積分量の特性

(a) 短拇指屈筋の筋電図積分量

(b) 浅指屈筋の筋電図積分量

図４－12　条件Ｅにおける筋電図積分量の特性

(a) 短拇指屈筋の筋電図積分量

(b) 浅指屈筋の筋電図積分量

図４－13　条件Ｆにおける筋電図積分量の特性

なる傾向が確認される．これは，拇指と他の４指により形成されるアーチに円筒物体を乗せるように把握するため，浅指屈筋の活動は，直径の増加に関係なく，常時，低いことから筋電図積分量は小さく，短拇指屈筋の筋電図積分量が直径の増加と共に大きくなると考えられる．

また，各条件における浅指屈筋と短拇指屈筋の筋電図積分量は，他の被験者においても同様の変化特性を示した．

(2) 手指掌圧力分布の特性

各被験者の手指掌面に貼付した圧力センサの位置を基に，各測定点分布の模式表示を図４－14 に示す．図４－15 には，負荷の作用方向の条件Ａにおける被験者６名の円筒直径および作用重量をそれぞれ変えた場合の手指掌面と円筒物体間の平均手指掌圧力分布を示す．直径が 26mm 以下の場合，中指の末節骨部，第２中手骨の骨頭部，拇指の基節骨部および拇指球の掌部に比較的高い圧力を生じていることが確認される．また，作用重量の増加に伴ってこれらの各圧力集中部を中心に圧力の増加が確認される．さらに，円筒直径が 38mm 以上になると，これらの圧力集中部の他に示指の末節骨部，

図４－14　手指掌圧力測定点の模式表示

中節骨部，基節骨部にも高い圧力が生じることが確認される．また，直径の増加と共に拇指の基節骨部の高圧力部は末節骨部方向へ移動する傾向が見られ，さらに直径が大きくなって 60mm の場合には，拇指，示指，中指，環指の末節骨部に圧力が集中することが確認される．このことから直径が小さい場合，拇指を除く４指と掌部により中指を中心に円筒外周面を巻くように把握するため，各指の掌側面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

図４－15　条件Ａにおける手指掌圧力分布の特性

図４－16　条件Ａにおける各指および掌部の把握負担割合の特性

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 では，各作用重量において示指，中指および環指の末節骨部と拇指による円筒外周面を挟み込むような把握状態に変化するため，拇指の基節骨部から末節骨部へと高圧力部位が移動し，拇指以外の指の末節骨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 になると掌部中央に接触しない部位を生じた．これは，中手骨の並びが形成するアーチ（中手骨アーチ）が掌部を横方向に横断するような状態で生ずるため円筒外周面に接触しない部位が掌部中央に生じたと考えられる．

当然のことではあるが，それぞれの直径において作用重量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作用重量が異なっても，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，把握動作における各指および掌部の負担割合がどのようになされているかを検討するために，全測定点での手指掌圧力から求めた手指掌部での力の総和に対する各指と掌部での負担割合を図４－16 に示す．当然，圧力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ないが，ここでは近似的に，図４－14 の右側に示すように模式的な手をイメージして手指掌部の負担割合を考慮した．直径が同じ場合，作用重量が変化しても各指と掌部の把握負担割合は，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の円筒物体を握る場合，作用重量に関係なく，各指による把握動作状態は変化しないことが確認される．各作用重量において，直径の増加に従って掌部の負担割合は減少し，拇指を含む指部の負担割合は増加を示している．また，拇指の負担割合は，直径が 38mm 以下の場合では，ほぼ一定で変化を示さず，これ以上の直径においては負担割合が増加していることが確認される．これ

らは，前述したように直径が小さい場合，拇指を除く４指と掌部が把握動作の大半を支配し，円筒外周面を巻き込む把握状態であることを示している．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り，拇指の支援による他の４指と掌部による円筒外周面を包み込む把握状態に変化することを示している．さらに，直径が大きくなると，円筒外周面を完全に包み込む把握状態が不可能になり，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状態に変化することを示している．

条件Ｂにおける円筒直径，作用重量に対する手指掌圧力分布の特性を図４－17 に示す．条件Ａの場合と同様に，直径が 26mm 以下の場合，中指の末節骨部，第２中手骨の骨頭部，拇指の基節骨部および拇指球の掌部に比較的高い圧力が生じ，作用重量の増加に伴ってこれらの各圧力集中部を中心に圧力の増加が確認される．直径が 38mm 以上になると，これらの圧力集中部の他に示指の末節骨部，中節骨部，基節骨部で高い圧力が生じることが確認される．また，直径が 60mm の場合には，拇指，示指，中指，環指の末節骨部に圧力が集中することが確認される．これらは条件Ａの場合と同様に直径が小さい場合に拇指を除く４指と掌部により円筒外周面を巻き込むように把握し，これより直径が大きくなると拇指の支援による他の４指と掌部による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，直径が大きくなり 60mm では，示指，中指および環指の末節骨部と拇指による円筒外周面を挟み込むような把握状態に変化するためと思われる．

次に，把握動作における各指および掌部の把握負担割合を図４－18 に示す．条件Ａの場合と同様に円筒の作用重量が変化しても各指と掌部の把握負担割合は，殆ど変化しないことが確認される．各作用重量において，直径の増加に従って掌部の負担割合は減少し，指部の負担割合は増加を示している．また，拇指の負担割合は，直径が 38mm 以下の場合には，殆ど変化を示さず，これ以上の直径では負担割合が増加していることが確認される．これらは直径が小さ

い場合，拇指以外の４指と掌部が把握動作の大半を支配し，円筒外周面を巻き込むように把握していること示している．さらに直径が大きくなると巻き込む把握することが不可能になり，拇指の支援による全５指と掌部による円筒外周面を包み込む把握状態に変化することを示している．さらに，直径が大きくなると，円筒外周面を完全に包み込む把握状態が不可能になり，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状態に変化することを示している．

図４－17　条件Ｂにおける手指掌圧力分布の特性

図４－18　条件Ｂにおける各指および掌部の把握負担割合の特性

条件Ｃにおける円筒直径，作用重量に対する手指掌圧力分布の特性を図４－19に示す．直径が26mm以下の場合，中指の末節骨部，第２中手骨の骨頭部および拇指の基節骨部に比較的高い圧力を生じていることが確認される．また，作用重量の増加に伴ってこれらの各圧力集中部を中心に圧力の増加が確認される．さらに，直径が38mm以上になると，これらの圧力集中部の他に，第３中手骨の骨頭部にも高い圧力が生じることが確認され，作用重量が増加するとこの第３中手骨の骨頭部を中心に各中手骨の骨頭部において圧力の上昇が確認される．これは直径の変化に対して，常時，拇指と各指の対立運動により形成される凹状のアーチに円筒物体を乗せる状態で把握が行われ，中指を中心として円筒外周面を軽く巻き込むように把握し，拇指の支援により円筒物体の転がりを防ぐ把握状態であると考えられる．従って，作用重量が増加すると掌部を横断する各中手骨の骨頭部において圧力上昇が確認される．

次に，把握動作における各指および掌部の把握負担割合を図４－20に示す．各直径において，作用重量が増加すると掌部の把握負担割合は増加する傾向を示すことが確認される．これは，前述したように把握状態に起因していると思われ，円筒物体を拇指と各指による対立運動により形成されるアーチの窪みに包むように４指により円筒外周面を軽く巻き込むような把握を行い，拇指の支援により円筒物体の転がりを防ぐ把握を行っているため，作用重量の増加に従って掌部の把握負担割合が増えると考えられる．従って，直径の変化にも，また，作用重量の変化にも殆ど関係なく，ほぼ一定の把握状態を保っていると考えられる．

条件Ｄにおける円筒直径，作用重量に対する手指掌圧力分布の特性を図４－21に示す．直径が26mm以下の場合，中指，環指および小指の末節骨部と拇指の基節骨部に比較的高い圧力を生じていることが確認される．また，作用重量の増加に伴ってこれらの各圧力集中部を中心に圧力の増加が確認される．さらに，直径が38mm以上になると，これらの圧力集中部の他に示指の末節骨部と掌部の第３

および第４中手骨の骨頭部にも高い圧力が生じ，作用重量の増加と共に，これらの部位を中心に圧力の上昇が確認される．このことから直径が小さい場合には，拇指の基節骨部に円筒物体を乗せるように，中指，環指，小指により円筒外周面を軽く巻き込むような把握状態を行っていると思われる．さらに，直径が 38mm 以上になると，直径の増加に伴って４指の末節骨部により円筒外周面を掌部方向へ押し付けるように強く巻き込むような把握状態に変化するため，第

図４－19　条件Ｃにおける手指掌圧力分布の特性

図４－20　条件Ｃにおける各指および掌部の把握負担割合の特性

3および第4の中手骨の骨頭部において圧力上昇が見られると思われる．

次に，把握動作時の各指および掌部の把握負担割合を図4－22に示す．円筒直径の増加と共に掌部の把握負担割合も増加することが確認され，作用重量が増加しても，これらの把握負担割合は，殆ど変化しないことが確認される．このことより，前述した直径の増加に伴って円筒外周面を巻き込むような把握状態から掌面に押し付

図4－21　条件Dにおける手指掌圧力分布の特性

図4－22　条件Dにおける各指および掌部の把握負担割合の特性

けるような把握状態へと変化するため，掌部の把握負担割合が増加を示すと思われる．また，作用重量の増加においても同一の直径の把握では，把握状態に変化は見られないと考えられる．

条件Eにおける円筒直径，作用重量に対する手指掌圧力分布の特性を図４－23 に示す．直径が 26mm 以下の場合，中指および環指の基節骨部と中節骨部に比較的高い圧力が生じ，作用重量の増加に伴ってこれらの圧力集中部を中心に圧力の増加が確認される．さらに，直径が大きくなるに従ってこれらの圧力集中部は，示指，中指，環指の末節骨部へと移動することが確認される．これは把握状態の変化に起因すると思われる．即ち，直径が小さい場合に拇指以外の４指による円筒外周面を巻き込むような把握状態が，直径の増加に伴って拇指と各指の間隔が広がることにより，拇指と他の４指による挟み込むような把握状態へと変化するためと思われ，そのため直径の増加に伴って圧力集中部が中指および環指の基節骨部から示指，中指，環指の末節骨部へと移動すると考えられる．

次に，把握動作における各指および掌部の把握負担割合を図４－24 に示す．作用重量に関係なく，直径の増加に伴って掌部の把握負担割合は，僅かではあるが増加を示すことが確認される．これらは直径の増加に伴って円筒外周面との接触領域が大きくなることに起因して掌部の把握負担割合が増加を示すと考えられる．また，作用重量の増加と共に環指の把握負担割合も増加する傾向が確認される．これは巻き込むような把握状態から挟み込むような把握状態へと変化する際に，環指の末節骨部が関与してくることに起因していると思われる．

条件Ｆにおける円筒直径，作用重量に対する手指掌圧力分布の特性を図４－25 に示す．各直径において，第２中手骨の骨頭部および拇指の基節骨部に比較的高い圧力を生じていることが確認される．また，作用重量の増加に伴ってこれらの各圧力集中部を中心に圧力の増加が確認される．さらに，直径が 38mm 以上になると，これらの圧力集中部の他に，第３中手骨の骨頭部にも高い圧力が生じるこ

とが確認され，作用重量が増加するとこの第３中手骨の骨頭部を中心に各中手骨の骨頭部と中指および示指の末節骨部において圧力の上昇が確認される．これは直径の変化に対して，常時，拇指と各指の対立運動により作り出される凹状のアーチ部に円筒物体を乗せる状態で把握が行われ，中指を中心として４指と拇指により円筒外周面を軽く巻くような把握状態せあると考えられる．従って，第２および第３中手骨の骨頭部に圧力集中部が発生すると思われる．

図４－23　条件Ｅにおける手指掌圧力分布の特性

図４－24　条件Ｅにおける各指および掌部の把握負担割合の特性

次に，把握動作時の各指および掌部の把握負担割合を図４－26に示す．各作用重量に対して，直径が 38mm 前後において掌部の把握負担割合は，最も大きくなる．また，直径および作用重量に関係なく，掌部の把握負担増加は，常時，40～50 パーセントと大きいことが確認される．これらは前述したように把握状態に起因していると思われ，円筒物体を拇指と各指による対立運動により形成されるアーチの窪みに乗せ，拇指と４指により円筒外周面を軽く巻くよ

図４－25　条件Ｆにおける手指掌圧力分布の特性

図４－26　条件Ｆにおける各指および掌部の把握負担割合の特性

うな把握状態のため，掌部の把握負担割合が常に大きくなると考えられる．従って，直径の変化にも，また，作用重量の変化にも殆ど関係なく，ほぼ一定の把握状態を保っていると考えられる．

(3) 指関節屈曲角度の特性

円筒物体の把握における各指関節の運動は，負荷の作用方向の違いによる条件Ａ～Ｆにおいて，各指関節の屈曲角度の差異は見られず，また，円筒物体の重量が変化しても，屈曲角度は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，被験者６名による円筒物体の直径と各指関節の屈曲角度の平均値の関係を図４－27，図４－28，図４－29に示す．なお，図の中のエラーバーは，各円筒直径における標準偏差（SD：Standard Deviation）を表している．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（MP 関節），近位指節間関節（PIP 関節）および遠位指節間関節（DIP 関節）と拇指中手指節関節（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る．同時に，拇指指節間関節（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 38mm 前後において屈曲角度は最大値となるが，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る．このことから直径が 26mm 以下の小さい場合には，拇指を除く４指が把握動作の殆どを支配し，それに伴って拇指指節間関節（IP 関節）および拇指中手指節関節（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 26mm 以上になると，拇指が把握動作に直接関与し始めるため他の遠位指節間関節（DIP 関節），近位指節間関節（PIP 関節），拇指中手指節関節（MCP 関節）および拇指指節間関節（IP 関節）で屈曲角度が一様に減少すると考えられる．また，図４－30 に円筒物体の長軸方向から見た各直径と各マーカー間を直線により結んだ手指のスティックピクチャーを示す．この図が示すように拇指と他の４指の対立運動は，直径の増加に応じて開くことが確認される．

図４－27　円筒直径と遠位指節間関節の屈曲運動の関係

図４－28　円筒直径と近位指節間関節の屈曲運動の関係

図４－29　円筒直径と中手指節関節の屈曲運動の関係

図４－30　円筒直径とスティックピクチャー

(4)考察のまとめ

負荷の作用方向の差異による6条件における円筒直径，作用重量に対する手指掌圧力，指関節屈曲運動，筋電図積分量の実験結果の考察をまとめると以下のようになる．

1. 負荷の作用方向による各条件における円筒直径の変化に対しては，表4－1に示すように，円筒直径の大きさ応じて把握状態に変化が見られる．
2. 円筒物体を把握する手の前額面において尺側方向に負荷する場合（条件A）と橈側方向に負荷する場合（条件B）の把握動作は，どちらの負荷状態でも円筒直径の増加に伴って円筒外周面を巻き込む把握状態，包み込む把握状態，挟み込む把握状態へと変化を示し，両者の把握状態に差異は見られない．
3. 円筒物体を把握する手の矢状面において背側方向に負荷する場合（条件C）と手の近位方向に負荷する場合（条件F）の把握動作は，円筒直径の増加に伴って，常時，拇指と他の4指で形成されるアーチの窪みに円筒外周面を乗せる把握状態であり，両者の把握状態は，極めて類似している．
4. 手の矢状面において掌側方向に負荷する場合（条件D）の把握動作は，円筒直径の増加に伴って拇指基節骨部に円筒外周面を乗せ，4指と掌部により円筒外周面を軽く巻き込む把握状態，強く巻き込む把握状態へと変化を示す．
5. 手の遠位方向に負荷する場合（条件E）の把握動作は，円筒直径の増加に伴って円筒外周面を巻き込む把握状態，挟み込む把握状態へと変化を示す．
6. 負荷の作用方向による各条件において円筒の作用重量の変化に対しては，把握状態の変化は見られない．

表4－1　各条件における円筒直径と把握状態の関係

	小 ← 円筒直径 → 大 18mm　26mm	38mm	48mm　60mm
条件A	拇指以外の4指と掌部により円筒外周面を巻き込むような把握状態	拇指を含む5指と掌部により円筒外周面を包み込むような把握状態	拇指と他の4指の対立運動により円筒外周面を挟み込むような把握状態
条件B	拇指以外の4指と掌部により円筒外周面を巻き込むような把握状態	拇指を含む5指と掌部により円筒外周面を包み込むような把握状態	拇指と他の4指の対立運動により円筒外周面を挟み込むような把握状態
条件C	拇指と他の4指の対立運動により形成される掌部を横断する凹状のアーチに円筒外周面を乗せるような把握状態		
条件D	拇指基節骨部に円筒外周面を乗せ，他の4指と掌部により円筒外周面を巻き込むような把握状態		
条件E	拇指以外の4指と掌部により円筒外周面を巻き込むような把握状態	拇指と他の4指による対立運動により円筒外周面を挟み込むような把握状態	
条件F	拇指と他の4指の対立運動により形成される掌部を横断する凹状のアーチに円筒外周面を乗せるような把握状態		

4．4　円筒物体の握り易さの解析

本節では，円筒物体の“握り易さ”を支配する物理的な因子を明らかにするために，第3章「手の把握動作測定と解析方法」で前述した筋出力測定・解析システム，把握力測定システム，接触面積測定システムおよび摩擦係数測定システムを用いて，直径および作用重量の異なる円筒物体を把握する場合の筋力，把握力，手指掌面と

物体表面間の接触面積および摩擦係数等の力学的物理量を測定し，同時に SD 法による握り感覚の主観的申告に基づく官能検査結果との関連性の検討を行った結果について詳述する．

4．4．1　実験方法

(1)被験者および測定条件

被験者には，年齢 22～26 歳の成人健常男性 10 名を考慮した．得られる測定データが各被験者の手のサイズに大きく依存することに配慮し，出来るだけ統一的な条件下で扱うことを考慮して各被験者の手の寸法を図４－31 に示すように標準化された人体寸法計測項目[61] に基づいて第３指手長，手掌長，手幅，握り最大径および握り内径の各部位を測定した．これにより得られた各被験者の各部位の手の寸法結果を表４－２に示す．ここで 10 名の被験者より得られた第３指手長，手掌長および手幅等の平均値は，従来の日本人の成人男性を対象にした測定資料[62]~[64]の平均値に極めて一致する．

実験を単純化するため，４．３節の「円筒物体の把握動作の解析」と同様に，図４－32 に示すように円筒物体に対して，６方向

図４－31　手および指の人体寸法計測項目

表４－２　各被験者の手および指の寸法測定値

(単位：mm)

被験者	第3指手長	手掌長	手幅	握り最大径	握り内径
A	185	105	85	89	41
B	178	103	83	84	40
C	186	106	89	89	39
D	182	98	76	77	32
E	177	98	79	88	39
F	179	102	87	84	34
G	187	109	86	91	38
H	178	104	80	80	34
I	188	105	86	85	37
J	181	107	83	83	37
平均値	182.1	103.7	83.4	85	37.1

図４－32　円筒物体の把握時の負荷の作用方向の条件

図４－33　負荷の作用方向の条件による把握姿勢

の静的な負荷がそれぞれ作用する場合を考慮した．また，これらの負荷の作用方向による条件も，同様に条件Ａ～Ｆに分け，把握姿勢も同様に図４－33に示す条件とした．

(2)把握力の測定

円筒物体の把握動作における把握力をの測定には，前述した把握力測定システムを用いた．測定に際しては，各負荷の作用方向の条件において，18mm，26mm，38mm，48mm，60mm の各円筒型握力計の握り部分の直径に対して，作用重量を 19.6N，39.2N，58.8N に変えることにより，握力計の位置を維持したときの全手掌把握（全手指掌掴み）による把握動作の把握力を測定した．

(3)握り感覚の測定

各被験者の円筒物体の把握動作に伴う握り感覚の主観的申告結果

を得るために４．２節「握り感覚の計測方法」で前述したように SD（Semantic Differential）法による「表面感覚」，「太さ感覚」，「重さ感覚」，「保持感覚」，「握り感覚」の感覚から成る５項目を７段階に表現する握り感覚官能検査票による官能検査を把握力の測定と並行して行った．

(4)筋出力の測定

円筒型握力計の把握動作における筋出力の測定には，４．３節の「円筒物体の把握動作の解析」の筋出力の測定と同様に短拇指屈筋と浅指屈筋を対象として筋出力測定システムを用いて行った．測定は，各被験者において各直径の円筒型握力計を把握して３秒経過後に約１秒間の筋電位を導出して記録し，同一条件において各３回の測定を行った．３回の平均値より筋電図積分量を求めて解析を行った．

(5)手と物体間の接触面積の測定

円筒物体の把握動作における手指掌面と円筒物体表面間の接触面積を正確に測定するため，前述した接触面積測定システムを用いて行った．測定は，各被験者において円筒型握力計の 18mm，26mm，38mm，48mm，60mm の各握り部の直径と同じ直径を有する各円筒物体を用いて，同一条件において各３回の測定を行い，３回の平均値を用いて解析を行った．

(6)手と物体間の摩擦係数の測定

円筒物体を把握する場合の手指掌面と円筒物体表面間の摩擦係数の測定は，円筒物体の把握時に直接測定することが不可能なことから，前述した摩擦係数測定システムを用いて行った．測定には，各被験者の発汗などによる接触境界面に介在する水分などの影響を出来るだけ取り除く必要がある．しかし，メチルアルコール等による脱脂処理などは行わず，一般的な把握状態を考慮して同一な実験条

件を得るために各被験者は手指掌を石鹸洗浄すると共に，水洗いし，乾燥後，短時間内に測定を行った．また，各測定条件において５回の測定を行い，その平均値を求めることにより解析に用いた．

４．４．２　結果および考察

(1)握り感覚の特性

負荷の作用方向の条件Ａ～ＦにおけるSD法による10名の被験者の主観的申告に基づく円筒物体把握時の円筒直径および作用重量に対する「表面感覚」，「太さ感覚」，「重さ感覚」，「保持感覚」，「握り感覚」の各項目に関する感覚の評価結果は，「表面感覚」については，使用した全ての円筒型握力計の表面がアルミニウム製と統一されていたことから，全被験者のSD法の官能評価結果は一定であり，意味を持たない項目であった．また，「太さ感覚」と「重さ感覚」については，各測定条件における全被験者のSD法の官能評価結果は，直径と作用重量の変化に対して，定性的に一致する変化結果であった．「保持感覚」と「握り感覚」については，被験者10名のSD法の官能評価結果の平均値を図４－34～図４－39を示す．ここで，SD法の官能評価の指標値は，＋３を「非常に握り易い」，＋２を「かなり握り易い」，＋１を「やや握り易い」，０を「どちらでもない」，－１を「やや握りにくい」，－２を「かなり握りにくい」，－３を「非常に握りにくい」とそれぞれ定義し，７段階に分類した．

条件Ａにおける保持感覚の評価結果では，円筒の作用重量が増加すると保持易さは低下し，作用重量に関係なく，直径が38mm前後において最も保持し易いと感じていることが確認される．握り感覚の評価結果では，円筒の作用重量が増加すると握り易さは低下し，作用重量が58.8Nの場合には，直径が38mmの場合を除いて，評価指標値がマイナスの握りにくい評価範囲に入っている．また，作用重量に関係なく，直径が38mm前後において最も握り易いと感じていることが確認される．

(a)保持感覚の評価

(b)握り感覚の評価

図４－34　条件ＡにおけるSD法による官能評価結果

(a)保持感覚の評価

(b)握り感覚の評価

図4－35　条件BにおけるSD法による官能評価結果

条件Bにおいては，条件Aの場合と同様に保持感覚の評価結果では，円筒の作用重量が増加すると保持し易さは低下し，作用重量にすると保持易さは低下し，作用重量が 19.6N の場合に，直径に関係なく，直径が 38mm 前後において最も保持易いと感じていることが確認される．また，握り感覚の評価結果では，作用重量に関係なく，直径が 38mm 前後において最も握り易いと感じていることが確認され，作用重量の増加と共に握り易さも低下を示すが，条件Aに比較して作用重量が 58.8N の場合の直径が 38mm 以下においても握りにくい評価範囲ではないことが確認される．

条件Cにおける保持感覚の評価結果では，円筒の作用重量が増加すると保持易さは低下し，作用重量が 19.6N の場合に直径 26mm から 38mm が最も保持し易いと感じているが，作用重量の増加に伴って最も保持し易い直径が 26mm へと変化することが確認される．握り感覚の評価結果では，作用重量に関係なく，最も握り易い直径が 38mm であることが示され，直径が 48mm 以上においては，全て評価指標値がマイナスの握りにくい評価範囲に入っていることが確認される．

条件Dにおいての保持感覚の評価結果は，円筒の作用重量が増加すると保持易さは低下を示し，作用重量が 19.6N の場合に直径が 38mm で最も保持し易いと感じているが，作用重量の増加に伴って最も保持し易い直径が 26mm へと変化することが確認される．また，握り感覚の評価結果は，円筒の作用重量が 19.6N と 39.2N で，直径が 26mm と 38mm の場合を除いて，全て握りにくい評価範囲であることを示した．また，作用重量の増加と共に最も握り易い直径が 38mm から 26mm へと小さい方へ移行することが確認される．

条件Eにおいての保持感覚の評価結果は，円筒の作用重量が増加すると保持易さは低下し，作用重量が 19.6N の場合に直径が 26mm から 38mm の場合に最も保持し易いと感じているが，作用重量の増加に伴って最も保持し易い直径が 38mm へと変化することが確認される．握り感覚の評価結果では，作用重量が増加すると各直径にお

(a)保持感覚の評価

(b)握り感覚の評価

図４－36　条件Ｃにおける SD 法による官能評価結果

(a)保持感覚の評価

(b)握り感覚の評価

図４－37　条件Ｄにおける SD 法による官能評価結果

(a)保持感覚の評価

(b)握り感覚の評価

図４－38　条件Ｅにおける SD 法による官能評価結果

(a)保持感覚の評価

(b)握り感覚の評価

図４－39　条件Ｆにおける SD 法による官能評価結果

いて握り易さは低下を示し，作用重量が小さい場合には，最も握り易い直径は 26mm であるが，作用重量の増加に伴って直径の大きい方へ移行する傾向があることが認められる．また，作用重量に関係なく，直径が 48mm 以上においては，握りにくい評価範囲に入っていることも確認される．

条件Fにおいての保持感覚の評価結果は，円筒の作用重量が増加すると保持易さは低下し，作用重量が 19.6N の場合に直径が 26mm の場合に最も保持し易いと感じているが，作用重量の増加に伴って最も保持し易い直径が 38mm へと変化することが確認される．また，握り感覚の評価結果は，作用重量が増加すると握り易さは低下を示し，作用重量が小さい 19.6N の場合には，直径 26mm が最も握り易いと感じているが，作用重量の増加に伴って直径の大きい方へ移行し，作用重量が 58.8N の場合では，直径 38mm が最も握り易いと感じていることが確認される．

各条件における円筒の握り易さを示す握り感覚の SD 法の官能評価結果をまとめると，表４－３に示すようになる．なお，表の中には，握り感覚の SD 法の評価値により表示し，また，各条件において最も評価値が大きい円筒直径の部分，即ち，最も握り易い直径の部分に網掛けで表示した．また，最も握り易い評価値の等しい場合は，２つの直径の部分に網掛け表示した．

条件Ａ，条件Ｂおよび条件Ｃにおいては，円筒の作用重量に関係なく，最も握り易い直径は 38mm である．条件Ｄの場合は，円筒の作用重量の増加と共に最も握り易い直径は 38mm から 26mm へ移行する．条件Ｅの場合は，作用重量の増加と共に最も握り易い直径は 26mm から 38mm へ移行する．条件Ｆの場合も，作用重量の増加と共に最も握り易い直径は 26mm から 38mm へ移行する．

表４－３　各条件における円筒直径と握り感覚の SD 法の官能評価結果の関係

			小 ← 円筒直径 → 大				
			18mm	26mm	38mm	48mm	60mm
条件Ａ	重量	19.6N	-0.33	2.0	2.33	1.0	-0.33
		39.2N	-0.67	1.33	1.67	0.67	-0.67
		58.8N	-1.67	0	0.67	-0.33	-2.0
条件Ｂ	重量	19.6N	0.67	2.33	2.67	2.0	-0.33
		39.2N	0.67	1.67	2.0	1.0	-0.66
		58.8N	0	0.67	1.33	0.33	-1.33
条件Ｃ	重量	19.6N	0.67	2.33	2.67	0	-1.0
		39.2N	0.33	1.67	2.0	-0.67	-1.33
		58.8N	-1.0	0.67	1.0	-1.33	-1.67
条件Ｄ	重量	19.6N	-1.33	1.33	2.33	-0.33	-0.67
		39.2N	-1.33	0.33	0.33	-1.0	-2.0
		58.8N	-2.67	-0.33	-1.33	-1.67	-2.67
条件Ｅ	重量	19.6N	1.67	3.0	2.67	0.33	-0.33
		39.2N	1.33	2.33	1.67	0	-0.33
		58.8N	0	1.33	1.33	-0.33	-1.33
条件Ｆ	重量	19.6N	0.66	2.33	2.0	1.33	0
		39.2N	0	1.0	1.0	0.67	0
		58.8N	-0.67	0	0.67	0.33	-0.67

(2) 筋電図積分量の特性

各測定条件における個々の被験者の筋電図積分量の結果は，筋電位の出力電位レベルの差異はあるものの，ほぼ同一であり，定性的に一致した結果であったことから個々の被験者について負荷の作用方向の条件別に解析を行った．

結果の一例として，被験者Aによる負荷の作用方向の条件Aにおける円筒直径と作用重量の変化に対する短拇指屈筋と浅指屈筋より得た筋電図積分量を把握筋群の筋出力として，両者の筋電図積分量の和を取ることにした．その筋電図積分量の和を図４－40に示す．直径の大きさに関係なく，円筒の作用重量が増加するに従って筋電図積分量も大きくなる．また，直径が 26mm から 38mm において筋電図積分量は最小値を示す傾向が確認される．このような傾向は，既に前節で述べたように円筒直径に対する把握状態の変化に起因するためである．即ち，直径が 26mm 以下の比較的小さな円筒物体を把握する場合，拇指以外の４指と掌部で円筒外周面を巻き込むように把握力を発揮することから，拇指以外の４指の各指関節が大きく屈曲した状態であるため筋電図積分量は大きくなる．また，直径が 38mm 以上の場合は，全５指と掌部による円筒外周面を完全に包み込む把握状態が不可能となることから，拇指と４指の対立運動による挟み込む把握状態となるため，直径の増加に伴って筋電図積分量

図４－40　条件Aにおける短拇指屈筋と浅指屈筋の総和による筋電図積分量

は増加を示すと考えられる．従って，直径が 26mm から 38mm において全５指と掌部により円筒外周面を完全に包み込む把握状態であり，この把握状態が最も小さな筋力で把握していることを意味する．

条件Bにおける短拇指屈筋と浅指屈筋の筋電図積分量の和を図４－41 に示す．直径の大きさに関係なく，作用重量が増加するに従って筋電図積分量も大きくなり，作用重量により少し異なるが，定性的には直径が 26mm から 38mm において筋電図積分量が最小値を示す．これも条件Aの場合と同様に把握状態に起因する結果である．即ち，直径の増加に対して，円筒外周面を巻き込む把握状態から，包み込む把握状態，さらに，挟み込む把握状態と移行することに起因すると考えられる．従って，直径が 26mm から 38mm の場合に，全５指と掌部による円筒外周面を完全に包み込む把握状態が可能であり，最も小さな筋力で把握していることを示している．

条件Cの場合の筋電図積分量の和を図４－42 に示す．他の条件と同様に作用重量が増加すると筋電図積分量も増加する傾向が確認

図４－41　条件Bにおける短拇指屈筋と浅指屈筋の総和による筋電図積分量

図４－42　条件Ｃにおける短拇指屈筋と浅指屈筋の総和による筋電図積分量

される．また，直径が 26mm の場合に，筋電図積分量が最小値を示すことことから，直径 26mm 前後において最も小さな筋力で把握が行われていることを意味している．

条件Ｄの場合の筋電図積分量の和を図４－43 に示す．円筒の作用重量が増加するに従って筋電図積分量も増加する傾向は他の条件と同様である．また，直径が 26mm 前後において筋電図積分量が最小値を示すことが確認される．4.3.2 項の(3)筋電図積分量の特性で既に前述したように拇指以外の４指が把握動作へ深く関与を始める直径 38mm 以上では，筋電図積分量が急激に増大ためである．従って，直径が小さい程，筋力も小さいことを示している．

条件Ｅの場合の筋電図積分量の和を図４－44 に示す．他の条件と同様に作用重量が増加すると筋電図積分量も増加する傾向が確認される．また，作用重量が小さい場合には，直径が 26mm の場合に，筋電図積分量が最小値を示すが，作用重量が増加するに従って，この最小値は 38mm へと移行することが確認される．従って，最少の筋力で円筒物体を把握する状態は，直径 26mm から 38mm であること

図４－43　条件Ｄにおける短拇指屈筋と浅指屈筋の総和による筋電図積分量

図４－44　条件Ｅにおける短拇指屈筋と浅指屈筋の総和による筋電図積分量

図４－45　条件Ｆにおける短拇指屈筋と浅指屈筋の総和による筋電図積分量

を示している．

条件Ｆの場合の筋電図積分量の和を図４－45 に示す．作用重量の増加に対する筋電図積分量の増加は，他の条件と同様の傾向であることが確認される．また，直径の増加に，ほぼ比例するように筋電図積分量も増加する傾向が確認される．従って，直径が小さい程，小さな筋力で把握していることを意味している．

また，各条件における短拇指屈筋と浅指屈筋の筋電図積分量の和の変化特性は，他の被験者においても同様に認められた．

(3) 手指掌の接触面積の特性

図４－46 に，接触面積測定システムにより得られた各円筒直径における手指掌の接触手形プリントの一例として被験者Ａの場合を示す．また，図４－47 に，被験者 10 名による各円筒直径における手指掌の接触領域の平均値と直径の関係を示す．なお，図の中のエラーは，各直径における標準偏差（SD : Standard Deviation）を表している．直径が大きくなると共に接触領域も増加するが，直径が

48mm 以上では逆に接触領域は減少する傾向が見られた．これは，前節「円筒物体の把握動作の解析」における各指関節の屈曲角度と直径の関係で既に前述したように，直径が小さくなる程，拇指以外の４指において，遠位指節間関節（DIP 関節），近位指節間関節（PIP 関節）および中手指節関節（MP 関節）の屈曲角度は大きくなり，各指の基節骨と中節骨の掌側面における接触領域は小さくな

図４－46　手指掌面と円筒物体表面間の接触手形プリント

図４－47　手指掌面と円筒物体間の接触面積と円筒直径の関係

ることを示している．また，直径の増加と共に円筒物体の円周が大きくなるため，拇指以外の４指の各指関節の屈曲角度が減少すると共に基節骨と中節骨の掌側面の接触領域は，直径が 48mm まで増加を示す．他方，直径が 48mm を越えると掌部を横断するように横方向に走る中手骨の並びが形成するアーチ（中手骨アーチ）の影響により手掌面中央の一部が非接触状態となり，接触領域が減少すると考えられる．

(4) 手指掌の摩擦係数の特性

図４－48 に，３成分動力計による摩擦係数測定システムにより得られた手指掌面と物体表面間の摩擦係数，垂直力および接触面積の関係を示す．手指掌面の摩擦係数は，垂直力が増加すると減少し，接触面積の増加に伴って大きくなる傾向が認められる．このことは，図４－49 に示すように，垂直力が小さい場合には，手指掌部の軟

図４－48　摩擦係数と垂直力および接触面積の関係

図４－49　摩擦係数と垂直力および接触面積の関係

図４－50　摩擦係数と接触圧力の関係

部組織の圧縮変形は小さく，同時に手指掌表面での接触面積も小さくなるため，水平方向に力が作用しても横方向に自由に変形し得ることを示している．逆に，垂直力が大きくなると圧縮による軟部組織の変形も大きくなり，手指掌表面での接触面積が増加するため横

方向への変形が拘束されると考えられる．従って，手指掌面の摩擦係数は垂直力と接触面積に深く依存することがわかる．

また，図４－50 に垂直力を接触面積で単純に除して得られる接触圧力と摩擦係数の関係を示した．接触圧力が増加すると共に摩擦係数は減少し，2.0 に漸近するが，この状態では手指掌における軟部組織の横方向への変形が限界に達していると思われる．従って，手指掌の摩擦係数は接触圧力にもかなり依存することが認められた．

(5)把握力の特性

負荷の作用方向の条件Ａ～Ｆにおける把握力と円筒直径および円筒の作用重量の関係を図４－51～図４－56 に示す．なお，図のエラーバーは，各円筒直径における標準偏差（SD：Standard Deviation）を表している．各条件における結果には，共通した特性として，いずれの直径に対しても，作用重量が増加すると共に把握力は，

図４－51　条件Ａにおける把握力の特性

図４－52　条件Ｂにおける把握力の特性

図４－53　条件Ｃにおける把握力の特性

図４－54　条件Ｄにおける把握力の特性

図４－55　条件Ｅにおける把握力の特性

図４－56　条件Ｆにおける把握力の特性

ほぼ一定の割合で増加する傾向が見られる．また，直径の増加に伴い把握力も増加し，直径が 38mm 前後において最大値を示す．さらに直径が増加すると再び把握力は減少する傾向が認められる．これは把握力が手指掌面と円筒物体表面間の接触境界面の状態に深く関係するため手指掌の接触面積と直径の関係が上に凸の曲線で与えられることと，摩擦係数が垂直力と接触面積に深く関係して接触圧力に大きく依存することに起因するためと思われる．

(6)握り易さに関係する因子

握り感覚の SD 法による官能評価の結果，負荷の作用方向の条件Ａにおいては，作用荷重に関係なく，直径が 38mm 前後で最も握り易いことが判った．この直径は，短拇指屈筋と浅指屈筋の筋電図積分量の和が最小となり，把握力が最大となる直径にそれぞれ一致する．これは，握り易い直径において把握のための筋力の伝達効率が最も高くなることを意味している．この結果は，八高ら[47]が歪ゲージを利用して製作した前腕部の太さ計を用いて，本研究の条件Ａ

とほぼ同様の測定条件で円筒物体の保持力と手指掌の接触面積から求めた最も力を伝達し易く，握り易い直径 35mm 前後の結果にほぼ一致する．

また，手指掌面と円筒表面間の接触面積は，直径が約 48mm 前後で最大となり，八高ら[47]が導いた握り易い直径と接触面積が最大になる直径は一致するとした結果に極めて近いが，八高らは，手指掌面と円筒表面間の接触面積の測定には，円筒物体の表面に墨を塗り，それを把握することにより手に付着した黒い接触部分を紙にプリントし，その面積をプラニメータを用いて測定している．この測定方法では，２度のプリントにより大きな誤差を生じ，また，手指掌面を平面として取り込むため，実際の手指掌面と円筒表面での接触部分と異なる場合が大きい．さらに，八高らは手指掌面と円筒表面間の摩擦係数の影響を考慮していない．

円筒重量をW，摩擦係数をμ，把握力をFとした場合，把握した円筒物体が手から落ちないためには，$W \leqq \mu F$を満足する必要がある．そこで，図４－51 に示した把握力を図４－47 に示した各円筒直径における手指掌面と円筒表面間の平均接触面積で除して求めた接触圧力と直径および作用重量の関係を図４－57 に示す．接触圧力は，直径が太くなるに従って僅かに低下する傾向が確認できる．

さらに，図４－50 に示した手指掌面と円筒表面間の摩擦係数と接触圧力の関係を用いて，計算により得られた接触圧力と直径の関係より，手指掌面と円筒表面間の摩擦係数と直径および作用重量の関係を求めると図４－58 の結果が得られる．

ここで得られた摩擦係数μと$W \leqq \mu F$の関係より，円筒物体を保持するのに必要な最小の把握力を求め，図４－51 に示した条件Ａにおける把握力と直径および作用重量の関係を考慮すると図４－59 の結果を得る．図の中の直線はいずれも$W = \mu F$より得られる結果を示している．条件Ｂの場合も，条件Ａの場合と同様の方法により求めた最小保持力・把握力と直径および作用重量の関係を図４－60 に示す．図の中の点線は，いずれも$W = \mu F$より得られる結果を示している．

図４－57　条件Ａにおける計算による接触圧力の特性

図４－58　条件Ａにおける摩擦係数と円筒直径および重量の関係

図４－59　条件Ａにおける最小保持力・把握力と円筒直径および重量の関係

図４－60　条件Ｂにおける最小保持力・把握力と円筒直径および重量の関係

条件Ａと条件Ｂの場合には，円筒物体が手から落ちないための条件は，Ｗ≦μＦを満足する必要がある．しかし，条件Ｃから条件Ｆにおいては，同様に円筒物体が手から落ちないための条件は，摩擦係数μに依存しないため，Ｗ≦Ｆを満足する必要がある．従って，Ｗ≦Ｆの関係より，円筒物体を保持するのに必要な最小の把握力は，Ｗ＝Ｆとなることから，これらの最小保持力を条件Ｃから条件Ｆにおける把握力と直径および作用重量の関係に併せると図４－61～図４－64 に示すようになる．図の中の点線は，いずれもＷ＝Ｆより得られる結果を示している．

図４－59～図４－64 に示した各条件にける最小保持力・把握力と直径および作用重量の関係からは，直径が約 38mm 前後において必要な最小の把握力と実際の把握力の差は，作用重量に関係なく最も大きくなり，最も余裕感を持って円筒物体を握っていることがわかる．この直径は，握り易い直径に一致することから，握り易さは

図４－61　条件Ｃにおける最小保持力・把握力と円筒直径および重量の関係

図４－62　条件Ｄにおける最小保持力・把握力と円筒直径および重量の関係

図４－63　条件Ｅにおける最小保持力・把握力と円筒直径および重量の関係

図４－64　条件Ｆにおける最小保持力・把握力と円筒直径および重量の関係

余裕を持って握ることとほぼ等価の関係にあると考えられる．さらに，円筒が次第に太さを増して行く過程で拇指先端部が円筒表面に接触し，把握に関与し始める時の直径が最も握り易い直径となる．従って，握り易さを感ずる握りとは，拇指以外の４指と掌部の他に，拇指先端部の加わった手指掌全体で円筒を包み込む把握状態であると考えられる．このことから，最も握り易い直径は，図４－31 に示した手の人体寸法計測項目の拇指と示指の先端部が触れた状態で作られる円の内側直径である握り内径（拇指－示指）に一致することになる．従って，手の握り内径の寸法を握り易さの指標として用いることが重要である．

(7)考察のまとめ

以上の実験結果を求めると，円筒物体の握り易さを支配する力学的因子を明らかにするために，負荷の作用方向の差異による６条件における円筒物体の直径と重量を種々変えた場合の SD 法による官能評価，筋電図積分量，手と物体間の接触面積および摩擦係数，把

握力の実験結果の考察をまとめると，

1. 円筒直径が 38mm 前後において筋電図積分量は最小を示し，把握力は最大を示す．この直径における把握動作は，5指と掌部により円筒外周面を完全に包み込む把握状態である．
2. 手指掌面と円筒物体表面の接触面積は，円筒直径が 48mm 前後において最大を示し，この接触面積と把握力から求めた接触圧力は，直径の増加に伴って低下する．
3. 手指掌面と円筒物体表面間の摩擦係数は，軟部組織の硬さと変形度の影響を強く受け，把握力，接触面積，接触圧力に大きく依存する．
4. 円筒直径が 38mm 前後において把握力とその伝達効率は最大となり，SD 法による官能評価の最も握り易い直径と一致する．
5. 人体寸法計測項目の拇指と示指の先端部が触れて作られる円の内径である手の握り内径（拇指－示指）は，SD 法による官能評価の最も握り易い直径と一致する．

4．5　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機能を生体力学的に解析した．また，円筒物体の握り易さを支配する力学的因子を明らかにするために，円筒物体の直径と作用重量を種々変えた場合の力学的パラメーターを実験的に求め，以下の知見を得た．

1. 円筒物体を把握する手の前額面において尺側方向に負荷する場合（条件Ａ）と橈側方向に負荷する場合（条件Ｂ）の把握動作は，どちらの負荷状態でも円筒直径の増加に伴って円筒外周面を巻き込む把握状態，包み込む把握状態，挟み込む把握状態へと変化を示し，両者の把握状態に差異は見られない．
2. 円筒物体を把握する手の矢状面において背側方向に負荷する場合（条件Ｃ）と手の近位方向に負荷する場合（条件Ｆ）の把握動作は，円筒直径の増加に伴って，常時，拇指と他の４指で形成されるアーチの窪みに円筒外周面を乗せる把握状態であり，両者の把握状態は，極めて類似している．
3. 手の矢状面において掌側方向に負荷する場合（条件Ｄ）の把握動作は，円筒直径の増加に伴って拇指基節骨部に円筒外周面を乗せ，４指と掌部により円筒外周面を軽く巻き込む把握状態，強く巻き込む把握状態へと変化を示す．
4. 手の遠位方向に負荷する場合（条件Ｅ）の把握動作は，円筒直径の増加に伴って円筒外周面を巻き込む把握状態，挟み込む把握状態へと変化を示す．
5. 負荷の作用方向による各条件において円筒の作用重量の変化に対しては，把握状態の変化は見られない．
6. 円筒直径が 38mm 前後において筋電図積分量は最小を示し，把握力は最大を示す．この直径における把握動作は，5指と掌部により円筒外周面を完全に包み込む把握状態である．
7. 手指掌面と円筒物体表面の接触面積は，円筒直径が 48mm 前後において最大を示し，この接触面積と把握力から求めた接触圧力は，直径の増加に伴って低下する．
8. 手指掌面と円筒物体表面間の摩擦係数は，軟部組織の硬さと変形度の影響を強く受け，把握力，接触面積，接触圧力に大きく依存する．
9. 円筒直径が 38mm 前後において把握力とその伝達効率は最大となり，SD 法による官能評価の最も握り易い直径と一致する．
10. 人体寸法計測項目の拇指と示指の先端部が触れて作られる円の内径である手の握り内径（拇指－示指）は，SD 法による官能評価の最も握り易い直径と一致する．

第５章　テニスラケットの把握動作に関する解析

5.1　緒言

スポーツを科学的に解析することは，スポーツ技術の客観的評価やプレーヤー技術の向上にとって重要であるだけでなく，スポーツ傷害[(65)~(67)]のメカニズムを解明し，その防止法を考慮する上でも極めて重要である．特に，ラケットスポーツと呼ばれ，テニス，ゴルフおよび野球に代表されるように人間が用具を手に握り，ボールを打つスポーツでは，インパクトに伴うボールのコントロールがスポーツの上手下手を決定する要因の一つと言われている．従って，この種のスポーツにおいては，スポーツ用具の性能が重要視されて研究・開発が盛んに推進されている．これらの研究は，用具単体による機械的特性を調べた報告例[(68)~(73)]が大半である．また，この種のスポーツにおける人間側からの視点による研究は，プレーヤーの動作に関する報告例[(74)~(76)]などが数多く見られる．しかし，テニスをはじめとするこれらのスポーツでは，コーチもプレーヤーも用具を如何に握るかが極めて重要な点と認識しているが，握りにおけるグリップ感覚は脳の情報処理メカニズムに深く関係するため測定は極めて困難であり，未だ未知の部分が多いようである．従って，握り状態を科学的に究明した研究例[(77)(78)]は少なく，特に，ボールコントロールに深く関連性を有するテニスラケット，ゴルフクラブ，バット等のグリップ圧力および把握について用具コントロール動作的な観点から詳細に検討した研究例は極めて少ない．

本章では，本研究の解析手法の応用例として，テニスにおいてプレーヤーは，ラケットを「どのように握り」，ボールを「どのように制御」する動作を行っているのか，即ち，テニスのストローク動作におけるボールコントロールに対応して見られるラケットコントロール動作およびラケット把握動作を生体力学的に解析することを目的としている．ここでは，ストローク動作時のラケット把握動作

に深く関係するラケットグリップ部表面を握る手指掌圧力，即ち，グリップ圧力に着目し，ストローク動作に伴うこれらの動的変化を，第３章「手の把握動作測定と解析方法」で前述した手指掌圧力測定システムの感圧導電ゴムセンサを用い定量的かつ連続的に測定した．また，熟練プレーヤーのフォアハンドストローク動作におけるボールコントロールのためのラケットおよび上肢の動きを前述した関節運動測定・解析システムを用いて３次元的に測定を行い，ストローク動作におけるボールコントロールに対応して見られるラケットコントロール動作およびラケット把握動作を解析する手法と得られた結果について詳述している．

5．2　実験方法

測定には，表５－１に示すように年齢 23～28 才（平均年齢 25.3 才），テニス経験歴６～12 年（平均経験歴 9.2 年）を有する男子熟練テニスプレーヤー６名を被験者として考慮した．

表５－１　被験者のテニス経験歴と年齢

被験者	年齢	テニス経験歴
A	28	9 年
B	24	9 年
C	26	11 年
D	27	12 年
E	23	8 年
F	24	6 年
平均値	25.3	9.2 年

(1)グリップ圧力およびボールインパクト点の測定方法

ラケットの把握動作による手指掌面とラケットハンドルのグリップ部表面のグリップ圧力の測定には，前述した手指掌圧力測定システムを用いた．また，本実験では，ストローク動作中の動的なグリップ圧力の測定を行うが，前述したように本手指掌圧力システムの感圧導電ゴムを利用した圧力センサは，約20Hz程度の変動サイクリック負荷までの周波数応答特性を有しており，テニスストローク動作中におけるラケット把握時のグリップ圧力変化を測定する上で十分と思われる．

この圧力センサを，図５－１に示すように，16個の圧力センサを各被験者の手指掌表面に伸縮自在の医療用テープ（Steri-Drape 1050：住友スリーエム㈱製）により配置して固定した．また，図５－２に示すように，ラケットフレームのスロート部内側に歪ゲージを貼付し，この歪ゲージから得られる出力波形によりボールのインパクト時の確認を行った．

図５－１　手指掌用圧力センサの配置

図５－２　歪ゲージの貼付位置

図５－３　ビデオマーカーの配置

(2)ラケットおよび上肢の運動測定

図５－３に示すように，ラケットフレームとグリップエンドの５ヶ所および被験者の左右の肩関節と股関節，右肘関節と手関節の内外側の８ヶ所にマーカーを取付けて測定した．実験では，同一のラケット（RD-7 Mid-Size Plus：ヨネックス㈱製）を使用し，握り方をイースタングリップスタイルに統一した．また，対面コートのベースライン中央から約 10m/s の初速度で打ち出したボールをフォアハンドストロークのフラット，トップスピンおよびスライスによって返球する場合を測定した．なお，ストローク動作におけるラケットおとび上肢の運動は，前述した４方向から４台の 8mm ビデオカメラを設置する４方向同時ビデオ撮影法による関節運動測定・解析システムを用いて２次元画像より３次元座標に変換して求めた．

５．３　結果および考察

(1)ラケットの把握動作の特性

硬式テニス経験歴９年の被験者Ａによるフォアハンドストロークのフラット，トップスピンおよびスライスの各ストローク動作におけるグリップ圧力の時間的変化の一例を図５－４～図５－６に示す．また，フラット，トップスピンおよびスライスの各ストローク動作のインパクト点におけるグリップ圧力を図５－７に示す．

フラットの場合には，ストローク全般にわたって小指，環指，中指，示指，拇指の各末節骨，示指の中節骨と基節骨，第２中手骨の骨頭および拇指球の各掌側面でのグリップ圧力は比較的小さく，ラケットハンドルのグリップ部表面を柔らかく包むように把握していることがわかる．また，フォワードスイングにおいてインパクトの約 0.2 秒前から小指，環指，中指の各末節骨および拇指球の掌側面で主としてグリップ圧力の急激な上昇が確認された．インパクトの約 0.1 秒後にグリップ圧力は最高となり，その後，低下してインパクトの約 0.3 秒後のフォロースルーには殆どゼロとなった．このこ

図５－４　フラットのフォアハンドストローク
におけるグリップ圧力特性

図５－５　トップスピンのフォアハンドストローク
におけるグリップ圧力特性

図５－６　スライスのフォアハンドストローク
におけるグリップ圧力特性

図５－７　インパクト点におけるグリップ圧力

とから，インパクト時のグリップ部に伝わる衝撃力に備えて小指，環指および中指の末節骨部によってラケットを把握し，堅固な握り方に移行する様子が確認された．また，トップスピンおよびスライスの場合もフラットの場合と同様に，ストローク全般にわたりグリップ部表面を手指掌面で包み込むように把握し，インパクトに備えて小指，環指および中指の末節骨部によって堅固な握り方に移行することが確認された．

これらの握り方の結果から，プレーヤーはラケットのスイングとインパクトを考慮して把握力をコントロールしていると思われる．

そこで，図５－４～図５－６の場合と同じ被験者Ａによるフラット，トップスピンおよびスライスの全測定点におけるグリップ圧力の総和から求めた把握力とラケット先端部の速度（ラケットヘッド速度）の関係を図５－８に示す．ラケット把握は，ストローク動作におけるスイングに伴うラケットヘッド速度に対応するように把握力をコントロールしていると思われる．また，インパクトの瞬間を想定してグリップに伝わる衝撃力に耐えるように把握力を急激に増

図５－８　総合グリップ力とラケットヘッド速度の関係

加させていると考えられる．

他の被験者においても，これらのストローク動作中のグリップ圧力変化特性は，同様であり，このことから，熟練プレーヤーのラケット把握は，ほぼ同じであると思われる．

(2) ラケットのコントロール動作の特性

関節運動測定システムより得られた３次元座標系の座標軸を，図５－９に示すように定義した．図５－10～図５－12にボールをコントロールするためのラケットおよび上肢の動きを示した．縦軸には，同一被験者Ａのストロークにおけるラケット先端，右手関節，右肘関節および右肩関節の各部位のＸ軸，Ｙ軸，Ｚ軸における座標変化

図５－９　３次元座標系の座標軸の定義

を示した．

図５－10に示すフラットの場合には，インパクトの約0.1秒前のフォワードスイング後半から，ラケット先端と手関節は共に下から上に移動し，これら２つには高低差がなく，ほぼ同じ移動であり，ラケット軸を水平に維持してスイングしていると思われる．

図５－11に示すトップスピンの場合には，インパクトの約0.1秒前のフォワードスイング後半から，ラケット先端は手関節より低い位置に移動した後，急激に振り上げられるようなスイングでインパクトしていると思われる．

スライスの場合は，図５－12に示すように，インパクトの約0.5秒前のテイクバックから約0.1秒前のフォワードスイング後半まで，ラケット先端は肩関節を越える位置からインパクトの約0.1秒後まで下降を続けた後，上昇する．即ち，急激にラケットを振り下ろしてインパクトしていると思われる．

図５－10　フラットのフォアハンドストロークにおける各点の運動特性

図５－11　トップスピンのフォアハンドストロークにおける各点の運動特性

図５－12　スライスのフォアハンドストロークにおける各点の運動特性

また，図５－14～図５－16には，上肢の各関節角度変化と体幹の回旋運動を示した．なお，各関節部の角度は以下のように考慮した．図５－13に示すように，ラケット先端とグリップエンドのマーカーを結ぶ直線および手関節と肘関節の各内外側マーカー間の各中点間を結ぶ直線のなす角度を手関節角度，手関節と肘関節の各内外側マーカー間の各中点および肩関節のマーカーを結ぶ直線がなす角度を肘関節角度，更には肘関節の内外側マーカー間の中点，肩関節および股関節のマーカーを結ぶ直線がなす角度を肩関節角度とそれぞれ定義した．また，左右の肩関節のマーカーを結ぶ直線と左右の股関節のマーカーを結ぶ直線がなす角度を体幹の回旋角度とした．

図５－14に示すフラットの場合には，インパクトの約0.6秒前のテイクバック後半からインパクトの瞬間まで，手関節角度は約110度を維持し，また，インパクトの約0.2秒前のフォワードスイング後半からは，肘関節角度も約140度を維持することから，ラケット軸を水平に維持し，体幹を回旋しながら上肢を振り上げていると考えられる．また，インパクト後のフォロースルーにおいては，肘を伸ばしながらラケットを振り上げるスイングを行っていることがわかる．

図５－15に示すトップスピンの場合には，インパクトの約0.1秒前のフォワードスイング後半から，手関節を尺屈させながら肘関節を屈曲させる顕著な特徴が見られた．また，フォロースルーでは，フラットの場合と同様の傾向が見られるが，急激にラケットを振り上げていることがわかる．

スライスの場合には，図５－16に示すように，インパクトの約0.1秒前のフォワードスイングから手関節角度を約110度に維持しながら肘関節を急激に伸展している．フラットおよびトップスピンの場合とは異なり，インパクトに向けてラケットを急激に振り下ろし，フォロースルーでは，肩関節の外転・水平屈曲よりもむしろ体幹の大きな回旋が顕著であった．

以上の結果より，フラットの場合には，手関節を固定し，ボール

を回転させることなく水平に打ち出すようなスイングしている．この時，インパクトに向けてラケット軸を水平になるようコントロール動作していることがわかる．トップスピンの場合には，ボールにドライブ回転を与えるためにインパクト前後で下方より上方へラケットを急激に振り上げるコントロール動作が見られることがわかる．スライスの場合には，ボールに逆ドライブ回転を与えるためにインパクト前後でラケットを上から下に急激に振り下ろし，体幹を回旋させるコントロール動作であることがわかる．

他の被験者においてもこれらのストローク動作中のラケットおよび身体各部位の動きの変化特性は同様な傾向を有し，熟練プレーヤーは，ほぼ同じようにラケットコントロール動作をしていると考えられる．

図５－13　関節角度の定義

図５－14　フラットのフォアハンドストローク
における各関節運動の特性

図５－15　トップスピンのフォアハンドストローク
における各関節運動の特性

図５－16　スライスのフォアハンドストローク
における各関節運動の特性

５．４　結言

熟練プレーヤーによるフォアハンドストロークにおけるラケット把握動作とラケットコントロール動作をグリップ圧力および３次元的動作解析により調べ，以下の知見を得た．

1. 熟練プレーヤーは，ストローク動作全般にわたりグリップを小指，環指，中指および手掌で柔らかく包むように握り，インパクト時には，堅固で安定した握り方をしている．
2. フラットの場合には，手および肘関節角度を一定に維持し，インパクトに向けてラケット軸を水平になるコントロール動作を行っている．
3. トップスピンの場合には，肘関節を屈曲させてラケットを下から上へ急激に振り上げるコントロール動作を行っている．
4. スライスの場合には，肘関節を伸展させてラケットを上から下に急激に振り下ろすコントロール動作を行っている．

第６章　結論

本研究では，使い易い，使い心地の良い機械や道具を設計するに当っての重要な要素である手による握り状態を，握りの感覚を含めて生体力学的に解析することの重要性を提案し，手の把握動作機能を明示することを目的として，手の把握動作機能を解析する上での基本例として，円筒物体の把握動作を手指掌圧力，把握筋出力，指関節屈曲運動から解析して得られた結果を明示した．また，共に手と円筒物体間の力の伝達状態から握り易さを支配する物理的因子を解析する手法について詳述した．さらに，把握動作解析の応用例として，テニスのストローク動作におけるボールコントロールに対応して見られるラケットコントロール動作およびラケット把握動作を解析する手法と得られた結果について詳述した．

第４章においては，円筒物体の負荷の作用方向による６条件の把握姿勢における手指掌面と円筒物体の接触圧力，表面筋電位および指関節屈曲運動を測定することによって手の把握動作機能を生体力学的に解析した．また，円筒物体の握り易さを支配する力学的因子を明らかにするために，円筒物体の直径と重量を種々変えた場合の力学的パラメーターを実験的に求め，以下の知見を得た．

1. 円筒物体を把握する手の前額面において尺側方向に負荷する場合（条件Ａ）と橈側方向に負荷する場合（条件Ｂ）の把握動作は，どちらの負荷状態でも円筒直径の増加に伴って円筒外周面を巻き込む把握状態，包み込む把握状態，挟み込む把握状態へと変化を示し，両者の把握状態に差異は見られない．
2. 円筒物体を把握する手の矢状面において背側方向に負荷する場合（条件Ｃ）と手の近位方向に負荷する場合（条件Ｆ）の把握動作は，円筒直径の増加に伴って，常時，拇指と他の４指で形成されるアーチの窪みに円筒外周面を乗せる把握状態であり，両者の把握状態は，極めて類似している．
3. 手の矢状面において掌側方向に負荷する場合（条件Ｄ）の把握動作は，円筒直径の増加に伴って拇指基節骨部に円筒外周面を乗せ，４指と掌部により円筒外周面を軽く巻き込む把握状態，強く巻き込む把握状態へと変化を示す．
4. 手の遠位方向に負荷する場合（条件Ｅ）の把握動作は，円筒直径の増加に伴って円筒外周面を巻き込む把握状態，挟み込む把握状態へと変化を示す．
5. 負荷の作用方向による各条件において円筒の作用重量の変化に対しては，把握状態の変化は見られない．
6. 円筒直径が 38mm 前後において筋電図積分量は最小を示し，把握力は最大を示す．この直径における把握動作は，５指と掌部により円筒外周面を完全に包み込む把握状態である．
7. 手指掌面と円筒物体表面の接触面積は，円筒直径が 48mm 前後において最大を示し，この接触面積と把握力から求めた接触圧力は，直径の増加に伴って低下する．
8. 手指掌面と円筒物体表面間の摩擦係数は，軟部組織の硬さと変形度の影響を強く受け，把握力，接触面積，接触圧力に大きく依存する．
9. 円筒直径が 38mm 前後において把握力とその伝達効率は最大となり，SD 法による官能評価の最も握り易い直径と一致する．
10. 人体寸法計測項目の拇指と示指の先端部が触れて作られる円の内径である手の握り内径（拇指－示指）は，SD 法による官能評価の最も握り易い直径と一致する．

第５章においては，熟練プレーヤーによるフォアハンドストロークにおけるラケット把握動作とラケットコントロール動作をグリップ圧力および３次元的動作解析により，以下の知見を得た．

1. 熟練プレーヤーは，ストローク動作全般にわたりグリップを小指，環指，中指および手掌で柔らかく包むように握り，インパクト時には，堅固で安定した握り方をしている．
2. フラットの場合には，手および肘関節角度を一定に維持し，インパクトに向けてラケット軸を水平になるコントロール動作を行っている．

3. トップスピンの場合には，肘関節を屈曲させてラケットを下から上へ急激に振り上げるコントロール動作を行っている．
4. スライスの場合には，肘関節を伸展させてラケットを上から下に急激に振り下ろすコントロール動作を行っている．

本研究の目的である機械や道具のインターフェイス部の設計上，極めて重要な要素である“握り易さ”を支配する物理的因子を生体力学的に解析する手法について詳述した．今後，本研究で提唱した解析手法を各種機械や道具の開発および設計に応用されることが望まれる．

付録１　DLT 法の基本原理

DLT（Direct Linear Transformation）法の基本原理[(12)~(14)]は，２台以上のカメラの投影面に映ったマーカーポイントの２次元的な座標から実空間の３次元座標を求める手法である．付録－図１に示すように実空間上の任意の１点Ｐのビデオカメラの投影面上の点をＱとする．実空間に任意の実空間座標系（ワールド座標系）を設定し，Ｐおよびレンズ中心：Ｏのワールド座標をそれぞれ(X,Y,Z)，(X_0,Y_0,Z_0)とする．また，Ｐを含む光軸に垂直な面とレンズの中心との距離をＬ，ビデオカメラの投影面とレンズ中心の距離をＦとする．ビデオカメラの投影面上にも座標軸系を設定する．

この際に座標の単位は，実空間座標で用いる座標の単位と同じである必要がある．また，Ｐのビデオカメラの投影面上の像：Ｑの座標を(U,V)，光軸とビデオカメラの投影面の交点の座標を(U_0,V_0)とするとベクトルOP，OQは次式で表される．

付録－図１　実空間座標とビデオカメラの投影面上座標の関係

$$\begin{cases} \overline{OP} = [R]\begin{pmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{pmatrix} \\ \overline{OQ} = \begin{pmatrix} U - U_0 \\ V - V_0 \\ -F \end{pmatrix} \end{cases} \quad \text{----------} \quad (1.1)$$

ここで，[R]はワールド座標系からレンズ中心座標系への回転を表すマトリックスである．この２つのベクトルは互いに同一直線上にあり，さらに長さの比がＬ：Ｆであるから，

$$\overline{OQ} = -\frac{F}{L}\overline{OP} \quad \text{----------} \quad (1.2)$$

よって，(1.1)，(1.2)式より

$$\begin{pmatrix} U - U_0 \\ V - V_0 \\ -F \end{pmatrix} = -\frac{F}{L}\cdot[R]\begin{pmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{pmatrix} \quad \text{----------} \quad (1.3)$$

となり，これを各成分別に分解すると，

$$\begin{cases} U - U_0 = -\frac{F}{L}\{m_{11}(X - X_0) + m_{12}(Y - Y_0) + m_{13}(Z - Z_0)\} \\ V - V_0 = -\frac{F}{L}\{m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{23}(Z - Z_0)\} \\ -F = -\frac{F}{L}\{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)\} \end{cases} \quad \text{----} \quad (1.4)$$

が得られる．ここで，mij(i,j=1,2,3)は[R]の成分である．(1.4)の第３式をＬについて解き，第１，２式に代入すれば，

$$\begin{cases} U - U_0 = -F\dfrac{m_{11}(X - X_0) + m_{12}(Y - Y_0) + m_{13}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \\ V - V_0 = -F\dfrac{m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{23}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \end{cases} \quad \text{-----} \quad (1.5)$$

が得られる．従って，カメラ定数である mi および(X_0,Y_0,Z_0)，(U_0,V_0)が求められれば，２台以上のカメラで同じ点を測定して２組以上の(U,V)を求め，(1.5)式に代入することによって４本以上の(X,Y,Z)に関する方程式が得られ，これらを連立して解くことにより(X,Y,Z)が求められることになる．しかしながら，これらの定数を直接測定することは極めて困難であるため，DLT 法では，これらのカメラ定数を直接求めず，ワールド座標系での座標値が既知である点（コントロールポイント）の像の(U,V)を測定することにより，連立方程式の定数を求める手法を用いる．

(1.5)式において，カメラ定数を適当にまとめて変数：U，V，X，Y，Zについて整理すると，

$$\begin{cases} U = \dfrac{A_1X + A_2Y + A_3Z + A_4}{C_1X + C_2Y + C_3Z + 1} \\ V = \dfrac{B_1X + B_2Y + B_3Z + B_4}{C_4X + C_2Y + C_3Z + 1} \end{cases} \quad \text{----------} \quad (1.6)$$

すなわち，

$$\begin{cases} A_1X + A_2Y + A_3Z + A_4 - C_1XU - C_2YU - C_3ZU - U = 0 \\ B_1X + B_2Y + B_3Z - B_4 - C_1XV - C_2YV - C_3ZV - V = 0 \end{cases} \quad \text{----} \quad (1.7)$$

が得られる．従って，２台以上のカメラでコントロールポイントを６点以上撮影し，それぞれの投影面座標(U,V)を求め，(1.7)式に代入することにより A_1～A_4，B_1～B_3，C_1～C_3までの 11 個の未知数に関

する12本以上の1次方程式が得られ，これらを連立して解くことにより未知数を求めることができる．実際に連立方程式を解く際はこれらの方程式のうち11本を用いればよいが，一般には，測定誤差の影響を極力少なくするために，与えられたすべての方程式を用いた最小2乗法による解法によって計算を行う．

ここまでの手順は空間較正と呼ばれる．なお，空間較正後においては，これらの係数が変化するため，カメラの設置位置，焦点距離，絞り等は変更できない．

A_1～A_4，B_1～B_3，C_1～C_3までの11個の係数が求められると，(1.7)式はU，V，X，Y，Zについての方程式となる．ここで，2台以上のカメラで任意のマーカーポイント：P(X,Y,Z)を同時刻に撮影し，その投影面座標が(U,V)であるとすると，(1.7)式を変形した．

$$\begin{cases}(A_1-C_1U)X+(A_2-C_2U)Y+(A_3-C_3U)Z-A_4-U=0\\(B_1-C_1V)X+(B_1-C_2V)Y+(B_3-C_3V)Z+B_4-V=0\end{cases} \quad \text{---} \quad (1.8)$$

より，1点のマーカーポイントについてX，Y，Zの3つの未知数に対する4本以上の一次方程式が得られる．これらを連立して解くことによりマーカーポイントの3次元座標(X,Y,Z)を求めることができる．

付録2　官能検査法とSD法

人間の感覚器官を使って行う検査・評価方法を，官能検査法という．この官能検査の領域は，機械部品のサビやキズ，メッキ製品の色やツヤ，自動車塗装の仕上がり具合，自動車の騒音の不愉快さ，車両の乗り心地，板金の凹凸，扇風機や洗濯機の騒音の大きさ，テレビ映像の鮮明さ，レンズのキズやくもり，椅子の座り心地，印刷物のムラやズレなどのように，その業種も，また検査対象も極めて広範囲にわたっている．

しかしながら，これらの様々の検査も，その内容を詳細にみると，いずれも，次の2つの型に分類される．第1は，人間の感覚器官を測定機として，品物の特性を測定したり，差を検出したりする場合であって，これを分析型官能検査という．第2は，消費者の嗜好を調査する場合のように，人間の特性を測定しょうとする場合であって，こらを嗜好型官能検査という．従って，人間の感覚器官を使って品物の特性を知ろうとするのが分析型官能検査であるのに対して，品物を使って人間の特性を知ろうとするのが嗜好型官能検査である．

品物や刺激などの質的や量的な特性を，言葉，数字，グラフなどの手段を使って，なるべく正確に，そして詳細に描写することは，官能検査では最も基本的で重要な技術であって，記述法と呼ばれている．この記述法では，特に定めた型式にこだわる必要はなく，むしろ自由に工夫をこらすべきである．その代表的な手法として，心理学の分野で開発された方法のSD（Semantic differential）法，と官能検査の分野で開発された方法のプロフィール（Profile）法およびQDA（Quantitative descriptive analysis）法がある．

プロフィール法は，アーサーD.リトル株式会社，フレイバー研究室のS. E. Cairncrossらによって1950年に，発表[57]され，それ以後，多くの人によって，それぞれ一部改変されながら広く使用されてきた方法である．この方法は，識別能力に優れた4人あるいは，それ以上の訓練されたパネリストで行う．個室に各パネリストが分かれ

て各特性について評価する個室法による．その後，すべてのパネリストにより意見交換する円卓法である．この方法には，尺度が不完全で距離尺度として扱えない．パネリストの信頼性がチェックできない．データが統計的に解析されない．円卓法による結論であることから発言力の差により偏る危険性があるなどの欠点がある．QDA法は，米国スタンフォード研究所のH. Stoneらによって1974年に開発[58]され，プロフィール法の欠点を改良した方法である．

SD法は，1957年にイリノイ大学のC. E. オズグッドによって言葉の意味を測定するために考案[59]された方法である．SD法では，刺激として提示されるものをコンセプトと呼んでいる．しかしながら現在では，単に言葉的概念ばかりでなく，官能検査では，色，形，音，味，匂いなどの具体的な感覚的刺激がコンセプトとして用いら

付録－図2　SD（ Semantic Differential ）法の一例

れている．コンセプトのもつ内容を多元的に表現するために，付録－図2に示すように，上品な－下品な，女性的－男性的，無難な－奇抜な，などの反対語を両極におく5～7段階の評価尺度を10～30個程度を用い，コンセプトの印象を各尺度上に評価する．これらの尺度をセマンティックスケール（Semantic scale）という．セマンティックスケールは，コンセプト群の性質，調査の目的，被験者の性質などによって変えなければならない．そこで予め，少数の被験者に対して調査の対象とするコンセプト群を提示し，自由連想による形容詞を答えさせ，その中から同じ意味をもつ言葉を整理した後，反対語を作り易く，意味がはっきりしている形容詞を，広い範囲の印象をカバーできるように選択してスケールを作る．評価の結果を利用するには，まず尺度の各段階に1～7点，－3～＋3点などの数値を与えて，被験者の各評価を数値化する．このようにして数値化された評価値は，次のように様々な角度から統計的に処理する．

①コンセプトそれぞれについて，評価項目ごとに全被験者の評価値を基にして，その平均値を計算し，これを尺度の上にプロットして線分で結んで直観的にわかり易く示す．

②コンセプトを2個ずつ組み合わせると，2個のコンセプトの評価値は，各評価項目ごとに対になっているから，これを基にして相関係数を計算し，その大きさによってコンセプト間の類似性を分析することができる．

③評定項目を2個ずつ組み合わせると，各々の評価項目の相互間にも相関係数が計算できるから，これらの相関係数の集りから出発して，因子分析を行い，コンセプト群のもつ内容の基本的な構造を探る．その結果，良い－悪い，快－不快などの評価項目が関連する価値の因子，強い－弱い，重い－軽いなどの評価項目が関連する力量性の因子，はやい－おそい，騒がしい－静かななどの評価項目が関連する活動性の因子などが見出される．このような場合，付録－図3に示すように，各々のコンセプトは，価値，力量性，活動性という3つの因子を直交軸とした，3次元の空間の中

の１点として表示することができる．この空間を意味空間という．

付録－図３　SD 法の意味空間

参考文献

(1) 長町三生，感性工学，海文堂出版社，(1989).

(2) 長町三生偏，快適科学，海文堂出版社，(1992).

(3) 長町三生ほか，自動車の感性工学，自動車研究，11(1) (1989)，2-6.

(4) 長町三生，自動車の感性工学的アプローチ，自動車技術，43(1) (1989)，94-100.

(5) 長町三生，感性工学と新製品開発，日本経営工学会誌，41(413) (1990)，66-71.

(6) 長町三生，感性工学のおはなし，日本規格協会，(1995).

(7) 越知淳三訳，解剖アトラス，文光堂社.

(8) Castaing J. Santini J. J.（井原秀俊ほか２名訳），関節・運動器の機能解剖 上肢・脊柱偏，共同医書出版社，(1986).

(9) Kapandij I. A.（荻島秀男，嶋田智明訳），カパンディ関節の生理学，Ｉ．上肢，医歯薬出版社，(1986).

(10) Jean Claude Cnockaert et al，Relative contribution of individual muscles to the isometric contraction of a muscular group，Journal of Biomechanics 8 (1975)，191-197.

(11) 谷尻豊寿，パソコンによる最新画像処理入門，技術評論社，(1996).

(12) 池上康男ほか，DLT 法，日本バイオメカニクス学会誌，10-3 (1991)，191-195.

(13) John H. Challis et al，Accuracy assessment and control point configuration when using the DLT for photogrammetry，Journal of Biomechanics 25-9 (1992)，1053-1058.

(14) Richard N. Hinrichs et al，NLT and extrapolated DLT:3-D cinematography alternatives for enlarging the volume of calibration，Journal of Biomechanics 28-10 (1995)，1219-1223.

(15) T. R. Jensen et al，A Conductive polymer sensor for measuring external finger force，Journal of Biomechanics，24-9 (1991)，851-858.

(16) R. G. Radwin et al，External finger forces in submaximal five-finger static pinch prehension，Ergonomics，35-3 (1992)，275-288.

(17) 江原信郎，関本康久，人間の段階的握力制御能力，日本機械学会講演論文集(Ｉ)，95-1 (1995)，526-530.

(18) 江原信郎，関本康久，人間の段階的な把握力制御能力，日本機械学会講演論文集(Ｉ)，95-8Vol.B (1995)，385-387.

(19) H. Kinoshita et al, Contributions and co-ordination of individual fingers in multiple finger prehension, Ergonomics, 38-4 (1995), 684-699.

(20) H. Kinoshita et al, Individual finger forces acting on a grasped object during shaking actions, Ergonomics, 39-2 (1996), 243-256.

(21) H. Kinoshita et al, Grip posture and forces during holding cylindrical objects with circular grips, Ergonomics, 39-9 (1996), 1163-1176.

(22) 中沢信明ほか２名，物体の移動動作における人間の把持特性，日本機械学会講演論文集(Ｉ)，940-26Vol.B (1994)，89-91.

(23) 金　一煥ほか２名，人間の把持力制御特性の実験的考察，人間工学，29-2 (1993)，95-102.

(24) 中沢信明ほか２名，人間の把持特性の実験的考察，人間工学，32-5 (1995)，223-229.

(25) B. Buchhoz et al, An investigation of human palmar skin friction and the effects of materials pinch force and moisture, Ergonomics, 31-3 (1988), 317-325.

(26) L. J. Frederick, T. J. Armstrong, Effect of friction and load on pinch force in a hand transfer task, Ergonomics, 38-12 (1995), 2447-2454.

(27) C. Fransson, J. Winkel, Hand strength: the influence of grip span and grip type, Ergonomics, 34-7 (1991), 881-892.

(28) J. W.Lee, K. Rim, Measurement of finger joint angles and maximum finger forces during cylinder grip activity, Journal of Biomedical Engineering, 13-2 (1991), 152-162.

(29) M. M. Ayoub, P. Lo Presti, The determination of an optimum size cylindrical handle by use of electromyography, Ergonomics, 14-4 (1971), 509-518.

(30) T. Ohtsuki, Inhibition of individual fingers during grip strength exertion, Ergonomics, 24-1 (1981), 21-36.

(31) T. Ohtsuki, Decrease in grip strength induced by simultaneous bilateral exertion with reference to finger strength, Ergonomics, 24-1 (1981), 37-48.

(32) S. Kumar, M. Simmonds, The accuracy of magnitude production of submaximal precision and power grips and gross motor efforts, Ergonomics, 37-8 (1994), 1345-1353.

(33) A. H. Fairfax et al, Variability of grip strength during isometric contraction, Ergonomics, 38-9 (1995), 1819-1830.

(34) E. Milerad, M. O. Ericson, Effects of precision and force demands grip diameter and arm support during manual work: an electromyographic study, Ergonomics, 37-2 (1994), 255-264.

(35) D. H. Janda et al, Objective evaluation of grip strength, Journal of Occupational Medicine, 29-7 (1987), 569-571.

(36) T. J. Armstrong et al, A methodology for documenting hand positions and forces during manual work, Journal of Biomechanics, 12 (1979), 131-133.

(37) O. A. Lindahl et al, Grip strength of the human hand-measurements on normal subjects with a new hand strength analysis system (Hastras), Journal of Medical Engineering & Technology, 18-3 (1994), 101-103.

(38) R. Gurram et al, A study of hand grip pressure distribution and EMG of finger flexor muscles under dynamic loads, Ergonomics, 38-4 (1995), 684-699.

(39) R. G. Radwin et al, Power hand tool vibration effects on grip exertions, Ergonomics, 30-5 (1987), 833-855.

(40) L. Burstrom, R. Lundstrom, Absorption of vibration energy in the human hand and arm, Ergonomics, 37-5 (1994), 879-890

(41) L. Burstrom, The influence of biodynamic factors on the absorption of vibration energy in the human hand and arm, Nagoya Journal of Medical Science, 57 (1994), 159-167.

(42) S. G. Hutton et al, The vibration characteristics of chain saws and their influence on vibration white finger disease, Ergonomics, 36-8 (1993), 911-926.

(43) R. J. Marley, J. E. Fernandez, Psychophysical frequency and sustained exertion at varying wrist postures for a drilling task, Ergonomics, 38-2 (1995), 303-325.

(44) J. N. A. L. Leijnse et al, Biomechanics of the finger with anatomical restrictions-the significance for the exercising hand of the musician, Journal of Biomechanics, 25-11 (1992), 1253-1264.

(45) B. Buchholz, Thomas J. Armatrong, A kinematic model of the human hand to evaluate its prehensile capabilities, Journal of Biomechanics, 25-2 (1992), 149-162.

(46) B. Buchhoz et al, Anthropometric data for describing the kinematics of the human hand, Ergonomics, 35-3 (1992), 261-273.

(47) 八高隆雄ほか３名，円筒物体把握における握りやすさの感性評価，日本機械学会論文集(C 編)，62-602 (1996)，261-266.

(48) 八高隆雄ほか２名，握り易さの感性評価，日本機械学会講演論文集，940-59(H) (1994)，93-97.

(49) 高橋勝美ほか４名，柄の握り易さの感性評価（握り方による差異），日本機械学会講演論文集(１)，95-8 Vol.B (1995)，381-384.

(50) 高橋勝美ほか４名，握り易さの感性評価と手関節運動範囲との関係，日本機械学会講演論文集(Ⅰ)，96-5 Vol.A (1996)，281-284.

(51) 八高隆雄ほか４名，握り易さの感性評価と姿勢との関係，日本機械学会講演論文集(Ⅰ)，99-5 (1996)，285-288.

(52) 八高隆雄ほか３名，手－円筒物体間の力の伝達，日本機械学会論文集(C 編)，60-573 (1994)，1721-1726.

(53) 八高隆雄ほか２名，手のにぎり力を支配する因子，日本機械学会講演論文集(Ⅰ)，940-26 Vol.B (1994)，409-410.

(54) 山本圭治郎ほか５名，長時間把握時における感覚と筋電特性，日本機械学会講演論文集(Ⅰ)，95-1 (1995)，461-462.

(55) 高橋勝美ほか４名，柄の握り易さと力発揮特性，日本機械学会講演論文集，95-45 (1995)，162-165.

(56) 佐藤　信，官能検査入門，日科技連出版社，(1978).

(57) Cairncross S. E. et al, A new approach to flavor problems, Food Technol., 4 (1950), 308-311.

(58) Stone H. et al, Sensory evaluation by quantitative descriptive analysis, Food Technol., Nov. (1974), 1-40.

(59) Osgood C. E. et al, The measurement of meaning, Univ. Illinois Press, (1957).

(60) 斉藤幸子，セマンティックディファレンシャル(SD)法，人間工学，14-6 (1978)，315-325.

(61) 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.

(62) 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).

(63) 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).

(64) 保志　宏ほか１名，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.

(65) C. J. Snijders et al, Provocation of epicondylalgia lateralis (tennis elbow) by power grip or pinching, Medicine and Science in Sports and Exercise, 19-5 (1986), 518-523.

(66) A. C. Rettig, Wrist problems in the tennis player, Medicine and Science in Sports and Exercise, 26-10 (1994), 1207-1212.

(67) J. R. Blackwell, K. J. Cole, Wrist kinematics differ in expert and novice tennis platers performing the backhand stroke : Implications for tennis elbow, Journal of Biomechanics, 27-5 (1994), 509-515.

(68) 松久　寛ほか５名，モード解析によるテニスラケットの最適設計，日本機械学会論文集(C 編)，60-577 (1994)，189-194.

(69) 土井雅博，中村　明，ニューラルネットワークを用いたスポーツ用具評価法の研究，日本機械学会講演論文集，96-5 Vol.A (1996)，505-507.

(70) 太田　博他３名，テニスラケットのダイナミックス，日本機械学会講演論文集(Ⅳ)，940-30 (1994)，505-507.

(71) 川副嘉彦，テニスラケットの衝撃・振動吸収特性，日本機械学会講演論文集(Ⅰ)，96-1 (1996)，353-354.

(72) 神田芳文，川副嘉彦，テニスにけるボール・ラケット系の衝突現象の解析，日本機械学会論文集(C編)，61-582 (1995)，597-605.

(73) E. M. Hemmig et al, Transfer of tennis racket vibrations onto the human forearm, Medicine and Science in Sports and Exercise, 24-10 (1992), 1134-1140.

(74) E. Sprigings et al, A three-dimensional kinematic method for determining the effectiveness of arm segment rotations in producing racquet-head speed, Journal of Biomechanics, 27-3 (1994), 245-254.

(75) B. Elliott et al, A three-dimensinal cinematographic analysis of the tennis serve, International Journal of Sport Biomechanics, 2 (1986), 260-271.

(76) B. Elliott et al, A three-dimensinal cinematographic analysis of the fastball and curveball pitches in baseball, International Journal of Sport Biomechanics, (1986), 20-28.

(77) 本谷　猛ほか3名，テニスラケットグリップ部の摩擦力測定，日本機械学会講演論文集，930-69 (1993)，183-186.

(78) 川副嘉彦ほか3名，テニスのフォアハンド・ドライブにおけるラケット・ハンドルと手首関節の衝撃振動，日本機械学会講演論文集(Ⅰ)，96-15 (1996)，255-256.

謝　辞

本研究の遂行に際し，主指導教官である新潟大学工学部，原　利昭教授には終始多大なる御指導，御鞭撻を賜り，心より深く感謝申し上げます．同じく新潟大学工学部，長谷川富市教授，谷藤克也教授，高野英資教授，田辺裕治助教授ならびに新田　勇助教授には本論文の作成に当たり，有益なる御意見と御批評を賜り，ここに深く感謝申し上げます．

平成7年度新潟大学大学院修士課程修了の山本　仁君（現，矢崎部品株式会社），同じく大学院博士前期課程の植木一範君，佐川純一郎君，安念良訓君，ならびに新潟大学工学部機械システム工学科材料力学研究室の宮島雅博技官，同研究室に在籍されている皆様方をはじめ，同研究室の先輩諸氏には大変お世話になり，ここに深く感謝致します．

本研究の遂行に際し，感圧導電ゴムのご提供を頂きましたイナバゴム株式会社の岡本照男氏には，ここに深く感謝申し上げます．また，公私ともに大変お世話になりました新潟工業短期大学の下田茂学長，坂本　信助教授ならびに新潟工業短期大学の諸先生方に心より深く感謝申し上げます．