

上肢課題中のつまみ力の変化に関する研究

Research on the change of pinch force during upper extremity task

小島 久典¹, 犬丸 敏康²

¹大阪府立大学総合リハビリテーション学類, ²金城大学医療健康学部

Hisanori Kojima¹, Toshiyasu Inumaru²

¹Osaka Prefecture University, Faculty of Comprehensive Rehabilitation

²Kinjo University, Faculty of Health Sciences

キーワード：つまみ力, 両側, 上肢

Key words : Pinch Force, Bilateral, Upper Extremity

抄録

リハビリテーションの対象となる上肢・手指の機能障害において基本的な運動のひとつにつまみ動作がある。これらの治療プログラムの実施には、手指の表在・深部感覚の評価や手指の動きの評価が重要である。しかし基礎的データを基にした治療プログラムの開発と介入方法の報告は少ない。また、つまみ動作の治療プログラムに必要なつまみ動作時の対象物の形状、作業活動中におけるつまみ力の変化に関して同時に行った報告は少なく、関係性は明らかになっていない。そこで、手指の基本的動作の一つであるつまみ持ち上げ動作に着目し、つまむ対象物の形状、つまむ対象物と把持時間、母指と示指のつまみ力の力の方向の関係性を明らかにすることを目的とし、3軸力覚センサーを使用し、つまみ動作計測装置を開発し実験を行った。その結果、作業中のつまみ持ち上げ課題では把持時間は摩擦力の高い平面形状が長時間把持でき、合力の大きさは摩擦力の低い、形状がつまみにくいものが大きいことが示された。また、把持力が低下する過程において摩擦抵抗の低いものは緩やかに変化するが、把持時間が短い特徴が示された。これらの結果は、新たな治療プログラムの開発の基礎となる重要な情報であることが示唆された。

1. 緒言

リハビリテーションは脳血管障害による上肢・手の麻痺や外傷による手指の運動機能の障害に対し、障害後早期から継続的に実施される。そしてリハビリテーションは患者の基本的能力・ADL能力の向上に貢献する⁽¹⁾。中でもリハビリテーションの一分野である作業療法は、麻痺による上肢・手指の運動機能障害に、木工、金工、クラフトなど幅広い作業活動を介して治療訓練プログラムが行われる。これらの治療訓練プログラムは、対象物をつかむ・離す・押す・押さえるといった基本的な運動の獲得を目的としたプログラムから、箸の操作や書字動作、衣服の着脱など応用的な動作の獲得を目的としたプログラムが行われている⁽²⁾。

作業療法の対象となる上肢・手指の機能障害に

おいて基本的な運動のひとつにつまみ動作がある。このつまみ動作は治療プログラムの範疇ではいわゆる巧緻動作であり、つまみ、把持し、離すという一連の動きを様々な種類のペグボードなどを使用して治療を実施する。これらの治療プログラムの実施には、手指の表在・深部感覚の評価や手指の動きの評価を考慮したプログラムが重要である。そして、食事などの日常生活動作においては母指と示指の両側同時操作を行う必要がある。しかし、プログラム実施の際、感覚障害の程度や手指の動きの状態や両側の上肢操作をどのように治療プログラムに反映させるかはセラピストの経験に委ねられており、基礎的データを基にした治療プログラムの報告は少ない。

これらつまみ動作における基礎的な先行研究として Westling⁽³⁾らはつまみ持ち上げ動作時のつまみ力コントロールへの影響要素を明らかにするた

め実験を行い、摩擦力の状況がつまみ力に影響を与えていることを明らかにした。また、Flanaganら⁽⁴⁾、Johanssonら⁽⁵⁾はつまみ持ち上げ動作における材質の違いによる実験を行い、重さの知覚は材質に依存することを明らかにしている。さらにJenmalmら^(6,7)はつまむ対象物の形状における視覚と体性感覚の適合状況の実験を行い、つまみ力の安定には視覚と体性感覚のフィードフォワードが重要であることを明らかにしている。これらの先行研究によりつまみ持ち上げ動作時におけるつまみ力コントロールと摩擦力の関係性などは明らかにされているが、作業療法におけるつまみ動作時の対象物の形状、作業活動中における両側同時操作中のつまみ力の変化に関する報告は少なく、関係性は明らかになっていない。これらの関係を明らかにすることは様々なアクティビティを治療プログラムに導入する作業療法において、科学的背景となる重要な情報であり、作業療法のエビデンスにつながる重要な基礎的データとなる。

我々はこれまでに健常成人を対象に示指押し力のコントロールに関する実験を行ってきた^(8,9,10)。その結果、微細な押し力の維持は誤差が大きく、日常的な運動を行っているとき誤差が少ないことを明らかにした。しかし、つまみ力などの複数の手指の動作ではなく単独手指による動作を対象としているため、更に両側操作による手指の力の変化を明らかにする必要がある。そこで、手指の基本的動作の一つであるつまみ持ち上げ動作に着目し、つまむ対象物の形状、つまむ対象物と把持時間、母指と示指のつまみ力の力の方向の関係性を明らかにし、新たな作業療法プログラムのと介入方法の検討の基礎とすることを目的とし実験を行った。

また、本実験に使用する実験器材は先行研究では、Westlingら⁽³⁾はつまみ幅を30mmに固定し行っているが、各被験者の手指の形状特性に合わせることを出来る器材ではなく、つまみ幅を考慮する必要性もある。また、重さの変化とつまみ力の情報が主であり、つまみ力、負荷の重さ、形状、把持時間の同時計測の報告は少ない。そこで我々は3軸力覚センサーを使用し、つまみ動作計測装置を開発し実験を行った。

2. 方法

実験機器の概要を図1に示す。被験者に椅子座位をとらせ、肩関節中等度屈曲位、肘関節中等度屈曲位とした。肘を被験者の肘の高さに合わせた机上に載せた。そして前腕中間位にて、手関節中等度背屈位、手指ニュートラルポジションにて、前方のつまみ力測定機器をつまみ、持ち上げるとした。つまみ力の大きさを被験者に提示するために、正面へ19型液晶モニタディスプレイ(MITSUBISHI Co.: RDT-193E, JAPAN)を設置した。さらに机上に体幹の前方20cm、机上中央から左側へ20cmの位置にオコナーペグボードを配置した。

つまみ力の実験では既製のピンチメータを使用した実験が多い。また、Johansonら⁽⁵⁾は持ち上げる負荷を調整できる実験機器を使用しているが、つまみ力の幅が調整可能なものや3軸のセンサーを使用したつまみ力の実験報告は少ない。そこで3軸センサーにより3軸方向の力、また、受圧部の接触素材を変えることが可能であり、長さ調節も可能なつまみ力測定機器を製作した(図2)。

製作したつまみ力測定機器は本体部(KAWABATA Co., JAPAN)と両側の力覚センサー一部からなる。本体部はステンレス製で縦15mm、横15mm、長さ50mmの立方体であり、スライド式で長さ調節(最低60mm、最長90mm)が可能である。センサーは力覚センサー(TEC-GIHAN Co., JAPAN: 縦20mm、横20mm、厚さ5mm)を使用し、本体部の両側に4点ネジにて固定した。力覚センサー部の定格容量はX・Y: 250N, Z: 500N, 定格出力はX・Y: 900 μ e, Z: 1600 μ e, 非直線性: 1%RO以内、ヒステリシス: 1%RO以内である。

力覚センサー部にはポリエチレン素材(MUTO Co., JAPAN)を使用し、縦10mm横10mm厚さ5mmの受圧部を作成し中央の力覚センサー部を覆うように固定した。作製した受圧部の上には様々な素材が固定可能である。今回はサンドペーパーを固定した。さらに上方から下方へ向かい広がるように30度の角度をつけた受圧部を作成し使用した。さらに、本体にワイヤーを取り付け、本体下部に持ち上げる際の負荷となるウエイトを吊り下げられるようにした。ウエイトは細かな重さの調節を可能とするために水量の調整が出来る水を入れた

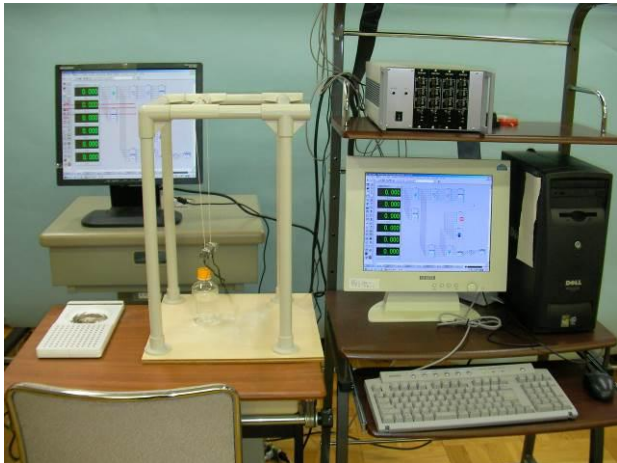


図1 実験機器の概要

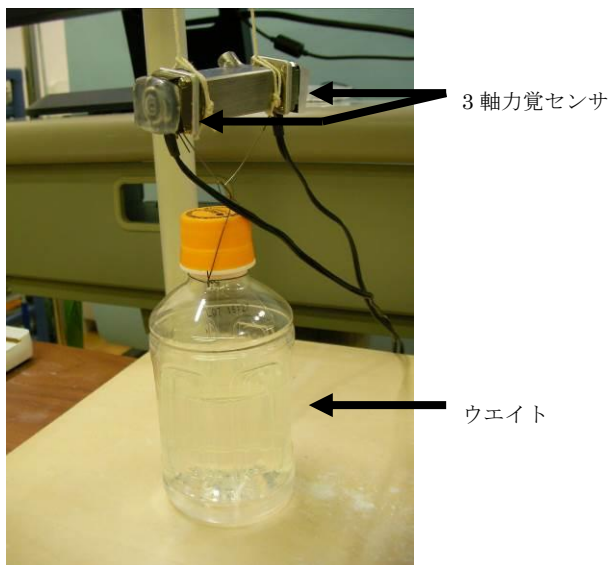


図2 実験機器の詳細

ペットボトルを使用した。水の量を調整することで1g単位の負荷の調整が可能である。

センサーからの波形はBNC-BOXを介し、ストレインアンプ（TEC-GIHAN Co.: DSA-03A, JAPAN）に接続した。さらにストレインアンプから出力された波形はAD変換器を介し、デスクトップPCに入力した。記録用ソフトウェアはDASYLab 4.0Jを使用した。サンプリング周波数は100Hzとした。つまみ力の最大記録時間は480secとした。示指受圧面が1Nを越えた時点から計測が開始され、持続的な負荷のためにつまみ力計測機器が滑り落ち、示指受圧面が0.3N以下となった時点まで計測終了とした。

つまみ力測定中の課題はオコナーペグボード

（酒井医療 Co., JAPAN）を使用し、つまみ上げている最中に出来るだけ早くペグをさすよう教示した。同時につまみ持ち上げている意識をさせないためにペグボードに集中するよう教示した。

対象は、男性4名、女性8名、計12名とした。年齢 22.55 ± 2.31 歳とした。各群とも問診により全被験者右利きで上肢・手指に痛み、しびれ、変形、安静時振戦のないことを確認し、ヘルシンキ宣言に基づき、実験内容の説明を実施し、口頭と書面による同意を得て実験を実施した。

実験を実施する直前に、母指と示指の指腹部と触圧刺激部の摩擦抵抗を一定にするために、20sec以上の手洗いを実施した。

つまみ持ち上げる際の重さは、先行研究⁵⁾では最大800g程度の錘をつまみ上げるとしているが、被験者間の標準化を図るため最大つまみ力の10%とした。

受圧部の種類はポリエチレン素材のみのノーマル、ポリエチレン素材の受圧部に#100のサンドペーパーを取り付けたもの（以下、ノーマルサンド）、ポリエチレン素材で滑り落ちやすいように下方へ向けて30度の角度のついた角度付のもの（以下、ハノジノーマル）、30度の角度と#100のサンドペーパーを取り付けたもの（以下、ハノジサンド）の4種類とした。各受圧部の種類ごとに最大つまみ力の10%の錘を持ち上げるとした。なお、ノーマルの受圧面には皮脂と汗による摩擦抵抗の変化を防ぐため、ベビーパウダーを塗布した。実験を実施するにあたり疲労の影響をなくすために、受圧部1種類計測するごとに10分以上の休憩を入れ、疲労感の無いことを確認し実験を継続した。さらにつまみ持ち上げ中にはつまみ動作における意識をさせないためにオコナーのペグボードを非利き手にて行った。

統計処理は把持時間を各形状ごとに一元配置分散分析後、多重比較分析（Bonferroni）を用い、1%の有意水準にて検討した。また、最大つまみ力までの時間を各形状ごとの平均値を二元配置分散分析後、多重比較分析（Bonferroni）を用い、1%の有意水準にて検討した。母指Z軸、示指Z軸の最大つまみ力の平均値を形状ごとに二元配置分散分析後、多重比較分析（Bonferroni）を用い、1%の有意水準にて検討した。把持力においては、把持力最終時点から前5sec間の各力の方向の平均

値を二元配置分散分析後，多重比較分析 (Bonferroni) を用い，1%の有意水準にて検討した。さらに母指 Z 軸，示指 Z 軸の最終 2 秒間の力を時間と力の相関係数を算出し比較した。各力の合力を次式 1) にて算出し，形状ごとに一元配置分散分析後，多重比較分析 (Bonferroni) を用い，1%の有意水準にて検討した。統計処理には SPSS 12.0J を使用した。

$$\sqrt{x^2 + y^2 + z^2} = \text{各指の合力} \quad \dots 1)$$

3. 結果

4 種類の形状別の把持時間を比較検討した結果を図 3 に示す。その結果，10%の負荷ではノーマルとノーマルサンド，ノーマルとハノジノーマル，ノーマルサンドとハノジノーマル，ノーマルサンドとハノジサンド，ハノジノーマルとハノジサンドの把持時間に有意な差が認められた ($p < 0.01$)。4 種類の把持形状ではノーマルサンド，ノーマル，ハノジサンド，ハノジノーマルの順で把持時間が短くなった。

一方，4 種類の形状別の持ち始めから最大値までの時間を母指 Z 軸，示指 Z 軸を比較検討した結果を図 4 に示す。最大値までの時間において有意差は認められなかった ($p > 0.01$)。さらに母指 Z 軸，示指 Z 軸それぞれの最大値における形状間の比較においても有意差は認められなかった ($p > 0.01$)。

把持力最終時点から前 5 秒間の各方向の力を各形状，母指・示指ごとに比較した結果を図 5 に示す。その結果，母指ではハノジノーマル Z 軸とノーマル X 軸に有意差が認められ ($p < 0.01$)，母指ではハノジノーマル Z 軸が最も強く力が発揮されていた。また，示指でも同様にハノジノーマル Z 軸とノーマル X 軸に有意差が認められ ($p < 0.01$)，ハノジノーマル Z 軸が最も強く力が発揮されていた。

母指，示指それぞれの各力の合力を形状間で比較検討した結果を図 6 に示す。その結果，母指ではノーマルとノーマルサンドに有意差が認められ

($p < 0.01$)，ノーマルの合力が有意に大きかった。ノーマルサンドとハノジサンドにおいても有意差が認められ ($p < 0.01$)，ハノジサンドの合力が有意に大きかった。示指では，ノーマルサンドとハノジノーマルに有意差が認められ ($p < 0.01$)，ハノジノーマルの合力が有意に大きかった。さらに，ノーマルサンドとハノジサンドに有意差が認められ ($p < 0.01$)，ハノジサンドの合力が有意に大きかった。

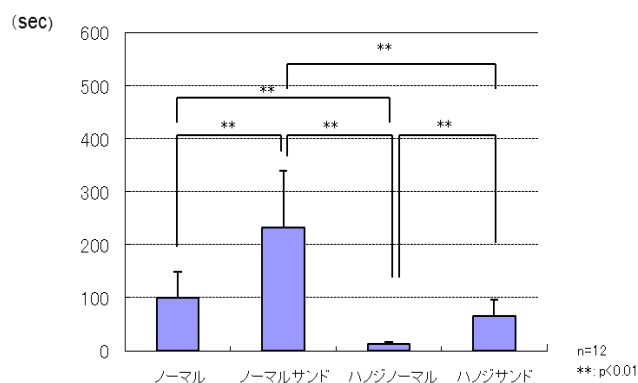


図 3 把持時間形状毎の比較

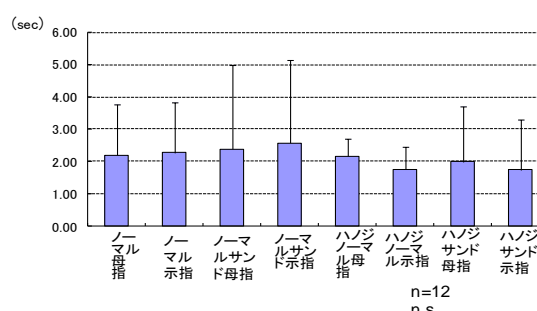
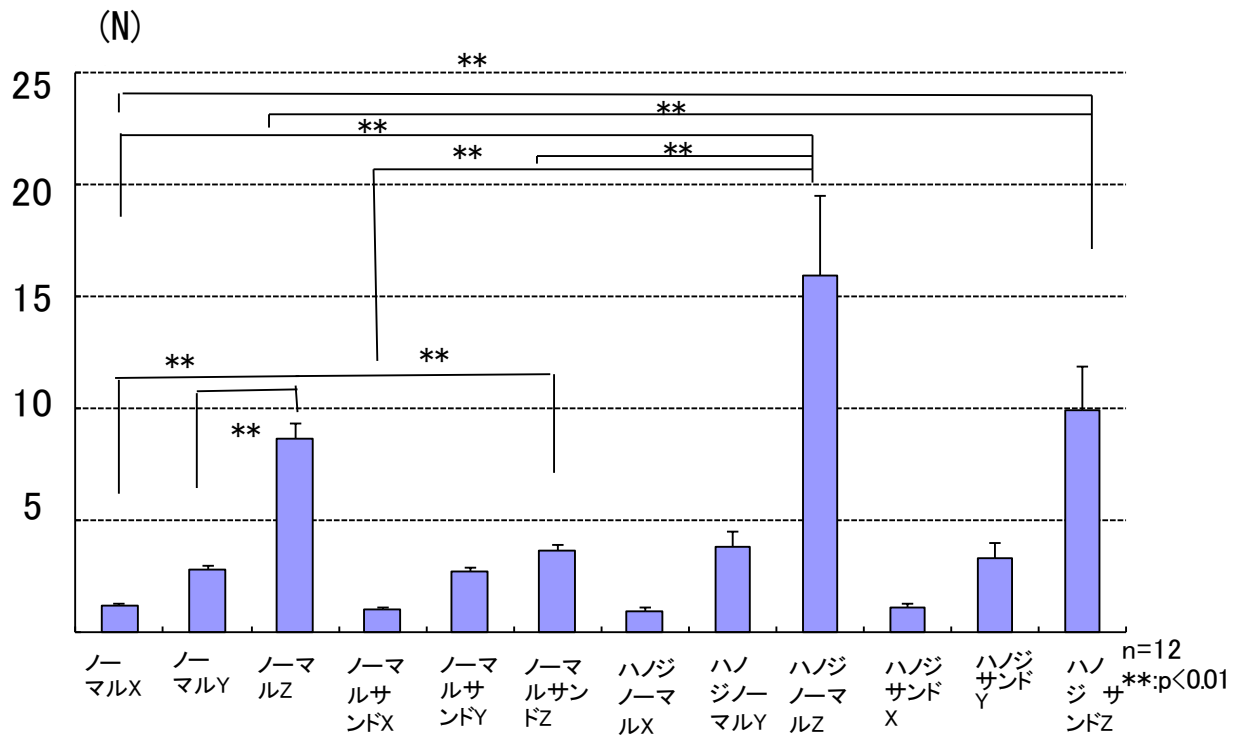


図 4 把持力最大値までの時間

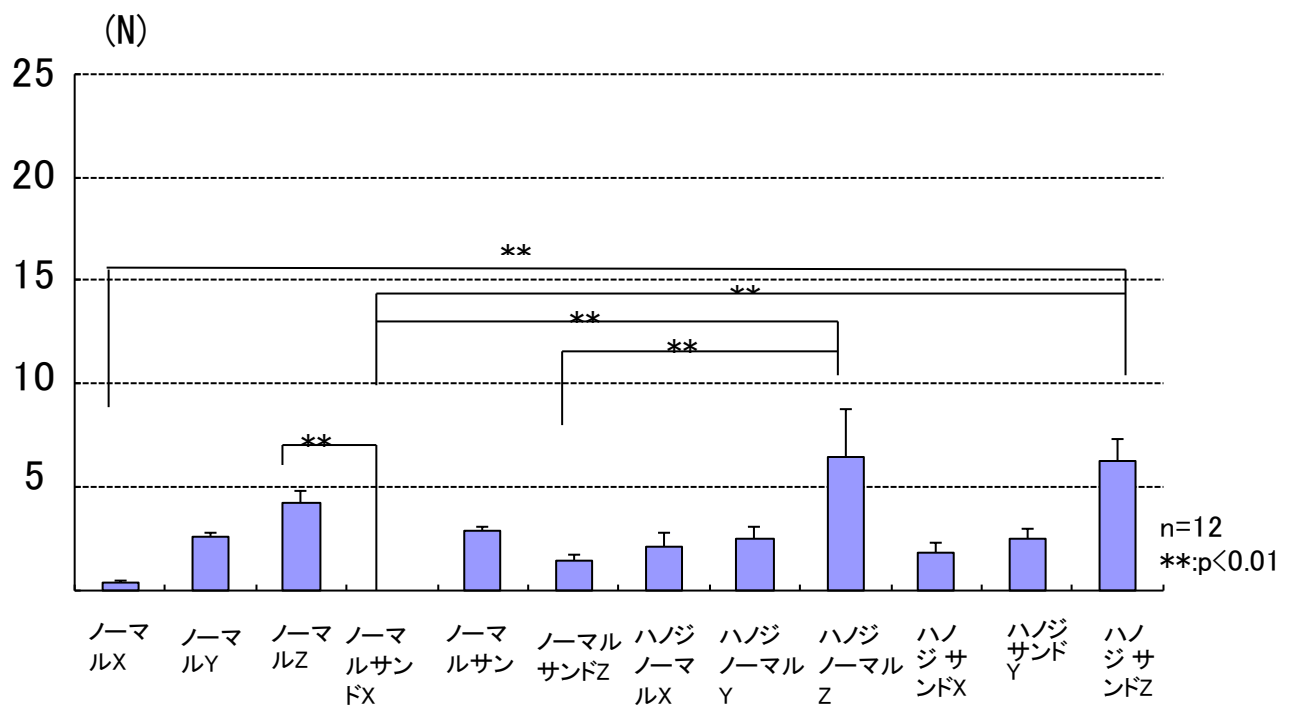
4. 考察

今回，健常若年者を対象にアタッチメント付き 6 軸力覚センサーを使用したつまみ力計測装置を開発し，作業課題中における，最大つまみ力の 10%を負荷としたつまみ持ち上げ課題を行った。解析として把持時間，最大値までの時間，計測最終 5 秒間の 6 軸の力，6 軸の母指・示指の各力の合力を把持接触面の形状の違いから比較検討した。

把持時間においてはノーマルサンド，ノーマル，ハノジサンド，ハノジノーマルの順で，ノーマルサンドの把持時間が最も長かった。これは接触部位が平面かつ摩擦抵抗が高く把持しやすかったもの



a. 母指 XYZ の力



b. 示指 XYZ の力

図5 把持力最終5sec間における母指・示指XYZの力

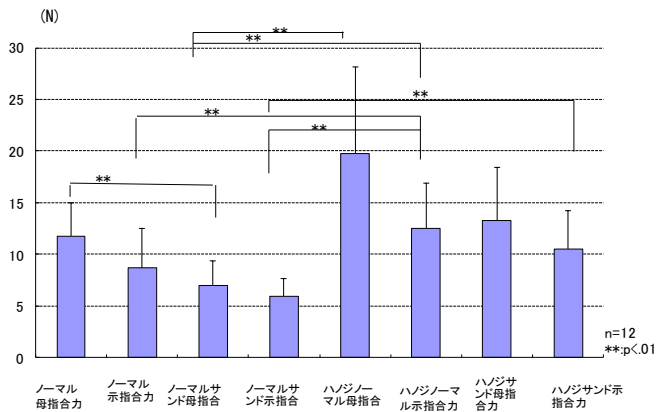


図6 形状間母指合力と示指合力

と思われる。特徴的な点として形状がハノジの場合、把持時間が短くなっている。Edinら⁽¹¹⁾は平面の対象物の把持実験を行い、指先の力は安定のために体性感覚の入力が重要であると述べている。しかし、本結果では形状による影響も大きく、ハノジサンドのように摩擦抵抗が高かったとしても、母指、示指の対抗力の方向が一致していないため、負荷を維持することができず把持時間が短くなったものと思われる。これらの結果から把持時間においては摩擦抵抗よりも母指と示指の対抗力の方向が一致しやすい接触面が把持時間を長くすることができるものと考えられる。これらのことから両側操作のプログラムではつまむベクトルの一致した対象物の把握が重要と考えられる。

最大値までの時間では母指・示指共に各形状間に有意差は認められなかった。これはつまみ持ち上げ課題を実施した時に、負荷に適した力の適応調節にスリップを予防するためのオーバーシュート⁽¹²⁾が発揮されていたことが考えられる。形状や摩擦抵抗が異なっても、最大値までの反応時間は変わらず、その後の適切な把持力にいたるまでの時間に違いがある可能性が考えられる。また、ハノジノーマルは把持しにくいために、最大値にいたるまでの時間が早くなるものと予想された。しかし、結果としてノーマルの接触面などと変わらなかったのは、被験者がつまみ力の10%の負荷がどの程度のものか予測できず、オーバーシュート⁽¹²⁾がされたものと考えられる。

母指・示指の対抗力のZ軸の最大値では形状間で有意差が認められなかった。摩擦抵抗の低いノーマルの接触面では強く発揮されることが予測さ

れた。しかし結果では有意差は認められず、形状や摩擦抵抗が変化しても、負荷が予測できない場合、本来の適切な力の発揮よりも大きな力が発揮されたものと考えられる⁽¹²⁾。形状によってZ軸よりもY軸の最大値に影響を及ぼしていた可能性も考えられる。

計測最終5sec間の6軸の力では、母指・示指共にハノジノーマルのZ軸が最も強く発揮された。ハノジノーマルは摩擦抵抗が低く、形状も対抗力が一致していないため把持時間が最も短かった。これは対抗力の一致しない形状のためにY軸の力が上昇したが維持できず、意識的にZ軸の力を強く発揮しなければならなかったものと考えられる。Maiら⁽¹³⁾は、把持力の維持には視覚が重要であると述べている。今回の実験では作業中のつまみ持ち上げ課題であったため、視覚よりも体性感覚フィードバックにより落とさないようフィードバックコントロールによりZ軸の力が強くなったものと思われる。

6軸の母指・示指の各力の合力においては、母指の合力が大きく発揮された。また、母指・示指共にハノジノーマル、ハノジサンド、ノーマル、ノーマルサンドの順に合力が大きかった。力の発揮はハノジノーマルで母指と示指の対抗力が一致していないことや、摩擦抵抗が低いため最も強く発揮する必要があったものと思われる。次に強く発揮されたのは摩擦抵抗が高いハノジサンドの合力であり、平面の形状よりもハノジ形状の合力が高くなった。つまみ力の発揮は摩擦抵抗の違いにより強さが変化するが⁽¹⁴⁾、これらの結果から把持力の発揮は摩擦抵抗よりも形状に依存することが考えられる。

5. 結論

これらの実験結果より、作業中のつまみ持ち上げ課題では把持時間は摩擦力の高い平面形状が長時間把持できるが、合力の大きさは摩擦力の低い、形状がつまみにくいものが合力が大きいことが示された。そして、つまむ際の母指・示指のベクトルの方向は一致していない場合、より大きな力を発揮する必要があり、反対側の作業への意識がそれになってしまう可能性が認められ、ベクトルの方向が合致する対象物を操作することが適切な両側上肢

操作につながるものと思われる。

これらの結果は、作業課題中におけるつまみ力発揮の先行研究は少なく、上肢の活動の治療を対象とした作業療法において新たな治療プログラムの開発の基礎となる重要な情報であることが示唆された。

6. 謝辞

実験に協力して下さった皆様に深謝致します。

参考文献

- 1) Janet H. Carr, Roberta B. Shepherd: Stroke rehabilitation guidelines for exercise and training to optimize motor skill. , Butterworth Heinemann, 2003
- 2) Simon B.N. , Morgan M. : Occupational therapy for stroke rehabilitation, Chapman and Hall, 1990
- 3) Westling G., R.S.Johansson : Factors influencing the force control during precision grip. Exp Brain Res. 53(2) :277-284, 1984
- 4) Flanagan JR, Wing AM, Allison S, et al: Effects of surface texture on weight perception when lifting objects with a precision grip. Percept Psychophys 57(3):282-90, 1995
- 5) Johansson RS, Westling G: Roles of glabrous skin receptors and sensorimotor memory in automatic control of precision grip when lifting rougher or more slippery objects. Exp Brain Res. 56(3):550-64, 1984
- 6) Jenmalm P, Johansson RS, et al: Visual and somatosensory information about object shape control manipulative fingertip forces. J Neurosci. 17(11):4486-99, 1997
- 7) Jenmalm P, Dahlstedt S, Johansson RS: Visual and tactile information about object-curvature control fingertip forces and grasp kinematics in human dexterous manipulation. J Neurophysiol. 84(6):2984-97,2000
- 8) Kojima H, Inumaru T, Ikuta M: Control of the index finger pushing force. JJAOT 22: 485, 2003(in Japanese)
- 9) Kojima H, Inumaru T, Ikuta M: The influence of the hand joint in index finger pushing force. JJAOT 23: 608, 2004(in Japanese)
- 10) Kojima H, Inumaru T, Ikuta M: The influence of the daily exercise and age-related changes in index finger pushing force. JJAOT 24: 563, 2005(in Japanese)
- 11) Edin BB, Westling G, Johansson RS: Independent control of human finger-tip forces at individual digits during precision lifting. J Physiol. 450:547-64, 1992
- 12) Johansson RS, Westling G: Coordinated isometric muscle commands adequately and erroneously programmed for the weight during lifting task with precision grip. Exp Brain Res. 71(1):59-71, 1988
- 13) Mai N, Avarello M, Bolsinger p: Maintenance of low isometric forces during prehensile grasping. Neuropsychologia. 23(6):805-12, 1985
- 14) Cole KJ, Johansson RS: Friction at the digit-object interface scales the sensorimotor transformation for grip responses to pulling loads. Exp Brain Res. 95(3):523-32, 1993

(受理日 : 2014 年 11 月 14 日)