把握面の滑り易さと摘み力との関係からみた物体保持中の摘み力制御について

川合 悟* 木下 博** 生田 香明** 山本 高司***

EFFECTS OF VARIED SURFACE CONDITIONS ON REGULATION OF GRIP FORCE DURING HOLDING TASKS USING A PRECISION GRIP

SATORU KAWAI, HIROSHI KINOSHITA, KOMEI IKUTA and TAKASHI YAMAMOTO

Abstract

The effects of the surface friction of a grasped object on the regulation of grip force during holding tasks using a precision grip were investigated. Using a force transducer-equipped grip apparatus, the grip force and load force acting on the object were measured continuously while surface materials (silk, wood, suede and sandpaper) and load weights (0.98 N, 1.96 N, 2.94 N, 4.90 N and 9.81 N) were varied. From the recorded data, the average static grip force, slip force, safety margin force and static friction coefficient were evaluated.

It was found that both the slip force and safety margin force increased as the slipperiness of the object surface increased. Significant interactions between surface type and weight were observed in the slip force and static friction coefficient. The interaction effect resulted from the fact that the frictional relationships with the fingers changed according to both weight and surface conditions. This was considered due to the viscoelastic nature of finger skin. An increase in the safety margin force with surface slipperiness was considered due to psychological reaction, probably fear of dropping the object. Unexpected changes in surface conditions caused a greater safety margin force than trials without a surface change, which might also have been associated with psychological reaction to uncertainty of the new surface condition. A relatively large inter-subject variation was found in the slip force and safety margin force relative to slippery surfaces.

(Jpn. J. Phys. Fitness Sports Med. 1995, 44 : 519~530)

key words : Surface, Motor control, Grip force, Precision grip, Static friction coefficient

1. 緒 言

指先で物体を摘む運動中に発揮される力情報は、ヒトや類人猿にのみ発達した指先の微細操作を可能ならしめる末梢・中枢神経系機構を探る貴重な手がかりとして近年注目を浴びようになってきた^{1,2,3,4,5,6,7)}。

小物体を指先で摘み保持する際に発揮される摘み力は、物体表面の「滑り具合」や「重量」などの物理的条件と生体側の心理・生理学的要因に基づいて調節されることがよく知られている^{8,9)}。

Westling & Johansson⁷⁾は、この摘み力を(1)物体

を保持し続けるのに必要な最小限の力 (Slip Force) と(2)物体が不意に指先から滑り落ちるのを防ぐ安全策として発揮されている力 (Safety Margin Force) とに分けることができると報告している。前者は物体の物理的特性によって必然的に決定される力であり、指先の皮膚表面と物体の把握面との間の滑り具合(摩擦係数)に依存する。一方、後者は主に保持者の随意性に依存した力である。

物体重量と摘み力との関係に関する先行研究¹⁰⁾において、Slip Force と Safety Margin Force は重量の増加に伴ってほぼ直線的に増大するが、不意の重量変化では Safety Margin Force が同じ重量

* 帝塚山短期大学
〒631 奈良市学園南3-1-3

** 大阪大学健康体育部
〒560 豊中市待兼山町1-1

*** 中京大学体育学部
〒470-03 豊田市貝津町床立101

Tezukayama Junior College, 3-1-3 Gakuen-minami, Nara City, Nara,
631 Japan

Faculty of Health and Sports Science, Osaka University,
Machikaneyama-cho, Toyonaka City, Osaka, 560 Japan

School of Physical Education, Chukyo University, 101 Tokodachi,
Kaizu-cho, Toyota City, Aichi, 470-03 Japan

での場合より明らかに大きくなること, Slip Force と Safety Margin Force にはかなり大きな個体差がみられることなどが明らかにされている。

物体の把握面状況が握み力に及ぼす影響については, 把握面が滑り易いときほど握み力が大きくなり, Slip Force も大きくなること^{4,7)}, Safety Margin Force は把握面の状況に関わらずある程度一定に保たれること^{7,9)}, 指先の感覚入力を局部麻酔で遮断すると Safety Margin Force が把握面状況に関わらず大きくなること^{4,7)}などが明らかにされている。

しかし, 異なる把握面における指先の滑り具合, 予期せずして変化した把握面への握み力の適応, および把握面と握み力との関係の個体差についてはほとんど調べられていない¹¹⁾。また, Slip Force を決定する指先の静的摩擦係数が, 重量の増加に伴って曲線的に減少し, 特に軽い重量での変化が大きいことが報告されているが^{10,12)}, どのような把握面状況においても, このような関係がみられるのかについては検討されていない。また, Safety Margin Force が把握面の滑り易さと重量との関係において変化するのか¹⁰⁾あるいは, ほぼ一定であるのか^{7,9)}についても十分な検討がなされていない。

本研究は, 小物体の握み運動中の握み力に異なる把握面が及ぼす影響について探究することを目的とした。すなわち, まず最初に Slip Force, Safety Margin Force, 指先・把握面間の摩擦係数などの握み力に関連する指標と持ち上げる物体の重量との関係が異なる把握面状況においてどのようになるのかについて検討し, 次に前試技の把握面状況の影響が現試技の握み力, 特に Safety Margin Force にどのように反映され, さらに適応調節されていくのかについて検討した。

Ⅱ. 方 法

A. 被検者

被検者は, 19～20歳で, 右利きの健常な男子(8名)と女子(2名)であった。

B. 実験手順

拇指および人差指の握み力および持ち上げ力の測定には, 先行研究^{10,11)}と同様の実験把握装置を用いた。すなわち, 握み力は把握装置の握み部分と接続された鋼製圧力板により, また持ち上げ力は, 把握装置の底部と重量調節箱を接続した鋼製圧力板によって検出した。把握装置の重量は, 装置の底部に取り付けられた重量調節箱の負荷重量を交換することによって調節した。把握装置の滑り具合は, 拇指および人差指が接触する把握面の滑り具合を変化させることによって調節した。把握面は, 直径 25 mm のアクリル製の円盤で, 異なる滑り具合の素材を貼付したプレートが磁石によって容易に着脱し, 固定できるようにした。把握面はいずれの素材も暗褐色に統一し, 実験室内は把握面が識別できない程度に暗くした。さらに1試技の終了ごとに把握装置と被検者との間にスクリーンを置き, 把握面の交換を気づかれないようにすることによって把握面変化に対する被検者の予測の影響を最小限にした。

実験開始前に被検者の両手を石鹸で洗浄し, さらに右手指先については消毒用アルコールで表面の皮脂分をできるだけ取り除いた。また発汗の影響を除くために試技ごとに乾いたペーパータオルによって指先を拭かせた。実験機の前に被検者を座らせ, 把握装置が拇指と人差指で握み易いように椅子の高さを調節した。右手首および右肘は机上のマットの上に載せ, 把握装置の握み部分と指の位置とが同じ高さになるようにした。

本研究での運動課題は, 肘をマットの上に載せた状態で, 把握装置をほぼ一定の速度(日常の物を握み上げる速度: 約 100 mm/sec)で机上より約 20 mm の高さに持ち上げ, 約15秒間保持した後, 把握器を「降ろすように」の合図によって机上に戻す試技と, 約15秒間保持した後, 把握器を「滑らすように」の合図によって拇指と人差指の力を徐々に緩め, 把握装置を滑り落とす試技であった。被検者への指示内容によって運動が変化する可能性があるので説明は最小限に留め統一した。

同一把握面で繰り返し持ち上げる運動課題では, 各把握面素材で, 0.98 N, 1.96 N, 2.94 N,

4.90 N および 9.81 N の 5 種類の負荷重量で行わせた。把握面素材には、最も滑り易い素材としてシルク、最も滑りにくい素材としてサンドペーパー (400 番)、それらの中間としてウッド (ラワン材) およびスエードを用いた。各重量での持ち上げ回数はそれぞれ 6 回とし、各々の把握面での持ち上げ総試技数は 30 回となった。各重量での試技のうち 3 回は把握装置を滑り落とさせて Slip Force を測定した。なお、サンドペーパーだけは、繰り返し滑り落とすと皮膚の摩滅が予想されたので、4.90 N および 9.81 N の負荷についての Slip Force の測定は 2 回に留めた。疲労を防ぐために、毎試技後に軽い重量では 10~20 秒間、また重い重量では 30~60 秒間の休息をとった。

また、不意の把握面変化に関する運動課題では、5 名の被検者について重量を一定 (1.96 N) にし、サンドペーパー面で 3 回、続いてシルク面で 5 回、サンドペーパー面で 7 回、さらにシルク面で 5 回の繰り返し試技を行わせた。その際、把握面が変化すること、繰り返しの回数の情報は被験者には報らせなかった。

C. データの収録装置

把握器からの応力信号は、先行研究^{10,11)}と同様に、ストレインアンプ (株日本電気三栄, 6M 67 型) にて増幅し、データレコーダ (株 TEAC, RD 101 T 型) に一旦収録した。その後、A/D 変換器 (株カノープス, ADX-98E 型, 変換分解能: 12 ビット, 信号取り込み周波数: 200 Hz) を介してデジタル信号化し、パーソナルコンピュータ (株 NEC, PC 9801-DA) に収録し、分析処理を行った。

D. データ分析

先行研究¹⁰⁾と同様の方法で、各試技のデータから (1) 安定時平均摘み力 (STGF), (2) 安定時平均持ち上げ力 (STLF), (3) Slip Force, (4) Safety Margin Force の各指標を算出した (図 1)。すなわち、STGF および STLF は、持ち上げ最大摘み力 (PGF) 出現後、摘み力がほぼ安定した 10 秒後から 5 秒間の摘み力と持ち上げ力の平均値を求めた。また、Slip Force は、先行研究^{7,10,11)}と同様に、指先の摘み力を徐々に緩めた時に持ち上げ力が急速に減少する直前の摘み力と定義し、Safety

Fig. 1. Output signals from the experiment. Grip force from the index finger and load force as a function of time for a sample trial (weight of the grip apparatus = 1.96 N, grip surface = sand-paper). A: holding phase (time: 10~15 sec) followed by replacing phase (time > 15 sec). B: dropping phase (time: 17~18 sec). STGF: average static grip force, STLF: average static load force, Slip Force: the minimal grip force to maintain hold in the grip apparatus, Safety Margin Force: difference between the STGF and slip force.

Margin Force は STGF と Slip Force との差によって求めた (図 1)。

これらの指標に加えて、PGF および STLF の 2 分の 1 (片指分の持ち上げ力) を Slip Force で除した値から静的摩擦係数を算出した。本研究では、すべて人差指の摘み力を用いた。

各条件における 6 回の試技 (ただし Slip Force については 2~3 回) から各指標の平均値と標準偏差を算出して、各個人のデータとし、さらにそれらの値から各条件での全被検者の平均値および標準偏差を算出した。

各指標の統計的な比較は、把握面素材差と重量の影響については、対応のある二元配置分散分析法を用いて、前試技と異なる把握面素材が現試技に与える影響については、平均値の差の検定法 (T-test) を用いた。

Ⅲ. 結 果

A. 把握面素材間の差異

1. STGF, Slip Force および Safety Margin Force への把握面差の影響

表 1 は、各把握面素材の STGF, Slip Force お

Fig. 2. Grip force adaptation to different surface conditions in relation to different weights. A : average static grip force (STGF). B : average slip force. C : average safety margin force. The weights examined were 0.98 N, 1.96 N, 2.94 N, 4.90 N and 9.81 N.

および Safety Margin Force の各重量ごとの全被検者の平均値、標準偏差および分散分析の結果を示している。

STGF は、いずれの重量においてもシルクで最も大きく、ウッド、スエードおよびサンドペーパーの順に小さくなった。各把握面の STGF と重量との間には、ほぼ直線関係が認められた(図 2-A)。把握面素材差と物体重量の両要因間の交互作用効果(表 1 : Surface * Weight)、把握面(Surface)および重量(Weight)の主要因効果はす

べて統計的に有意であった(表 1)。交互作用が認められた理由は、滑り易い把握面の方が滑りにくい把握面より、重量の増加に伴い STGF が大きくなることによるものであった。個々の重量間での交互作用については、サンドペーパーとシルク間において 9 条件中 5 条件で把握面差の有意性を示す結果($p < 0.05$)が認められた。

Slip Force は、STGF と同様にいずれの重量においてもシルクで最も大きく、ウッド、スエード、サンドペーパーの順に小さくなった。すべての素

Table 1. Mean, standard deviations (in parentheses), and results of ANOVA for selected parameters for each surface condition.

Weight (N)	STGF				Slip Force				Safety Margin Force			
	Silk	Wood	Suede (N)	Sandpaper	Silk	Wood	Suede (N)	Sandpaper	Silk	Wood	Suede (N)	Sandpaper
0.98	2.85 (1.24)	2.45 (1.36)	2.06 (0.91)	1.19 (0.51)	1.00 (0.52)	0.77 (0.44)	0.46 (0.13)	0.29 (0.13)	1.84 (0.91)	1.69 (1.14)	1.60 (0.86)	0.90 (0.45)
1.96	5.24 (2.95)	3.97 (1.81)	3.16 (1.14)	1.96 (0.73)	2.60 (1.67)	2.00 (1.13)	1.19 (0.29)	0.73 (0.43)	2.64 (1.71)	1.97 (0.80)	1.97 (1.05)	1.24 (0.57)
2.94	7.59 (4.11)	6.04 (2.46)	4.74 (1.58)	3.02 (1.07)	4.26 (2.46)	3.34 (1.94)	2.09 (0.53)	1.28 (0.49)	3.33 (2.21)	2.70 (1.32)	2.65 (1.44)	1.74 (0.92)
4.90	11.85 (7.08)	9.78 (4.41)	8.19 (2.87)	5.26 (1.66)	7.25 (3.98)	6.12 (3.42)	4.77 (1.97)	2.94 (1.03)	4.60 (3.80)	3.65 (2.00)	3.42 (2.58)	2.32 (1.13)
9.81	23.18 (9.99)	18.49 (6.11)	14.55 (3.48)	10.82 (3.33)	15.94 (7.63)	13.01 (5.45)	9.46 (3.20)	6.72 (2.66)	7.25 (4.04)	5.48 (2.98)	5.08 (3.34)	4.11 (3.04)
(F-value)												
Surface		20.394 **				18.174 **				6.555 **		
Weight		95.177 **				95.220 **				22.031 **		
Surface * Weight		2.254 *				2.726 **				0.330 NS		

** $p < 0.01$, * $p < 0.05$.

材の Slip Force と重量との間には、ほぼ直線関係がみられた(図2-B)。

把握面差と物体重量の両要因間の交互作用効果、把握面差および重量差の主要因効果はすべて有意であった(表1)。交互作用が認められた理由は、滑り易い把握面の方が滑りにくい把握面よりも、重量の増加に伴って Slip Force が大きくなることによるものであった。個々の重量間での交互作用については、サンドペーパーとシルク間において9条件中6条件で把握面差の有意性を示す結果($p < 0.05$)が認められた。

Safety Margin Force も、他の指標と同様にいずれの重量においても、シルクで最も大きく、ウッド、スエードおよびサンドペーパーの順に小さくなり、すべての素材で重量の増大に伴いほぼ直線的に増加した(図2-C)。把握面と重量間の交互作用効果は認められなかったが、把握面および重量の主要因効果はいずれも有意であった(表1)。

2. 各素材の静的摩擦係数

図3は、Slip Force と $\frac{1}{2}$ Load Force とから推定した各把握面の静的摩擦係数の全被検者の平均値を重量との関係で表わしたものである。

静的摩擦係数は、重量の増加に伴って減少したが、いずれの重量においてもサンドペーパーで最も大きく、スエード、ウッドの順に小さくなり、

Fig. 3. Curves fitted to average static friction coefficient for different surface conditions in relation to different weights.

シルクで最小となった。各把握面の静的摩擦係数と重量との関係は曲線的であり、特に 4.90 N より小さい重量範囲での曲線の変化が顕著で、4.90 N 以上の重量ではほぼ同値を示した。重量変化に伴う静的摩擦係数の変化は、サンドペーパーの方がシルクやウッドよりも大きかった。

表には示していないが、把握面と重量の両要因間の交互作用効果、把握面および重量の主要因効果はすべて統計的に有意($p < 0.01$)であった。交互作用効果が認められた理由は、滑りにくい把握面の方が滑り易い把握面より軽い重量で静的摩擦係数が大きくなることによるものであった。

B. 前試技の把握面素材の影響

図4は、滑りにくい把握面(サンドペーパー)から滑り易い把握面(シルク)、および逆の場合の Safety Margin Force への影響について調べた結果を表わしている。

把握面を滑り易くさせた試技(図中(SP)SK: Trial 4)とその次の試技(Trial 5)、さらに再度把握面を滑り易くさせた試技((SP)SK: Trial 16)の値は、それぞれ 2.15 ± 0.52 N (AV $\pm$ SD), 2.26 ± 0.56 N および 2.18 ± 0.53 N となり、把握面を一定にして繰り返した試技の値((SK)SK: 1.43 ± 0.44 N)に比べて有意に大きかった。把握面変化で大きくなった Safety Margin Force は、そのままの把握面で試技を繰り返すと、徐々に小さくなる傾向がみられ、2回または3回の試技を経て、把握面を一定にして繰り返した時の値((SK)SK)と有意差がみられなくなった。

一方、前試技に比べて把握面が滑りにくくなった際の Safety Margin Force((SK)SP: 1.66 ± 0.76 N)は、把握面を一定に繰り返した試技の値((SP)SP: 1.04 ± 0.50 N)より有意に大きかった。さらに、そのままの把握面で試技を繰り返すと、2回目で把握面を一定にした試技で得られた値((SP)SP)と有意差がみられなくなった。

いずれの場合においても把握面変化直後の Safety Margin Force は大きくなったが、その後の把握面変化の影響は、滑り易くなる場合の方が、滑りにくくなる場合に比べて持続する傾向がみられた。

Fig. 4. Safety margin force in relation to changes in surface condition. Data were averaged from five subjects. Vertical bars indicate plus one standard deviation. The object weight was 1.96 N. (SP) SK indicates a silk surface following after a sandpaper surface, while (SK) SP indicates a sandpaper surface following after a silk surface. The lower horizontal dotted line ((SP) SP) indicates the average safety margin force of repeated trials with a constant sandpaper surface, and the upper dotted line ((SK) SK) indicates that with a constant silk surface. * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$.

持ち上げ時の PGF や STGF の異なる把握面に対する適応変化も、Safety Margin Force で観察された結果と類似するものであった。

C. 異なる把握面での STGF, Slip Force および Safety Margin Force の個体差

図 5 は、サンドペーパー面およびシルク面の試技(物体重量: 2.94 N)における各被検者の STGF

Fig. 5 Inter-subject variability for STGF, safety margin force, and slip force under different surface conditions. A: results for sandpaper. B: results for silk. The object weight was 2.94 N. Vertical bars indicate plus one standard deviation.

(平均値と標準偏差), Slip Force(平均値と標準偏差)および Safety Margin Force(平均値)を示しており, 図左側より STGF の小さい被検者から順に並べられている。

個体間にみられた Slip Force の最小と最大の範囲は, サンドペーパー面 (0.85 N から 2.18 N) に比べて, シルク面 (1.66 N から 8.84 N) では約 5 倍, 図示していないが, ウッド面 (1.34 N から 6.68 N) ではサンドペーパー面の約 4 倍, スエード面 (1.28 N から 3.09 N) では約 1.4 倍となり, 把握面が滑り易くなるにつれて Slip Force の個体差が大きくなる傾向がみられた。

把握面状況によって各個人の Slip Force が相対的にどのように変化するかを調べるために把握面間での単純相関を求め, 重量が 2.94 N での結果を表 2 に示した。

シルクとウッド, ウッドとスエード, ウッドとサンドペーパー, スエードとサンドペーパーの各両把握面間で有意な相関関係がみられ, 滑り易い把握面で Slip Force が大きい者は滑りにくい把握面でも大きくなる傾向が認められた。このような関係は他の重量においても同様に認められた。

Safety Margin Force の個体間の最小と最大の範囲は, サンドペーパー面 (0.85 N から 4.03 N) に比べて, シルク面 (1.67 N から 8.44 N) では約 2 倍, ウッド面 (0.91 N から 5.67 N) で約 1.5 倍, スエード面 (0.77 N から 5.07 N) で約 1.4 倍となり, Slip Force の場合と同様に, 個体差は総体

的に把握面が滑り易くなると大きくなる傾向がみられた。

把握面変化と個人の Safety Margin Force の単純相関の結果(表 2)では, シルクとウッド, ウッドとスエード, ウッドとサンドペーパー, スエードとサンドペーパーのそれぞれの把握面間で有意な相関関係がみられ, Safety Margin Force を大きく発揮している被検者は, 把握面状況に関わらず相対的にこの力を大きく発揮している傾向がみられた。

V. 考 察

A. 異なる把握面と指先の静的摩擦係数との関係について

各把握面の静的摩擦係数は, 先行研究と同様に^{10,12)}重量の増加に伴って曲線的に減少した(図 3)。また, すべての重量でシルク, ウッド, スエード, サンドペーパーの順に小さくなり, 把握面と重量間での有意な交互作用効果が示すように, 重量が軽い時ほど把握面の差異が大きく認められた。有意な交互作用効果は, 重量変化に伴う摩擦係数の変化がサンドペーパー面でウッドやシルク面よりも大きいことによるものであった。しかし, このような曲線的な変化がすべての把握面素材で観察されたこと, また, すべての重量条件で把握面素材の滑り易さの順位が変化しなかったことは, この曲線的な変化が把握面素材側よりは指先側の特性の影響を受けたためと考えられる。

指先の皮膚の滑り具合が, このような特性を示す主な理由は, 皮膚が粘弾性特性を有するためと考えられる。Daly & Odland¹³⁾ は, 縦や横方向に張力を加えた時および真空カップの減圧によって得られる生体皮膚の応力-歪関係を調べた結果, いずれの方法を用いてもその関係は曲線的変化を示し, 皮膚がゴムなどの粘弾性物質に類似した特性であることを明らかにした。彼らは, このような曲線的変化について初期の小さな応力領域 (<0.5 MPa)での皮膚の大きな歪みは, 真皮に含まれる弾性性のエラスチン線維の影響であり, 大きな応力領域 (>0.7 MPa)でのそれが小さくなるのは, 硬いコラーゲン線維がエラスチン線維の弾

Table 2. Correlation between each surface condition.

Force		Silk	Wood	Suede	Sandpaper
STGF	Silk	-----	0.867**	0.374	0.468
	Wood		-----	0.654*	0.707*
	Suede			-----	0.958**
Slip Force	Silk	-----	0.951**	0.559	0.498
	Wood		-----	0.731*	0.690*
	Suede			-----	0.691*
Safety Margin Force	Silk	-----	0.656*	0.447	0.456
	Wood		-----	0.844**	0.798**
	Suede			-----	0.904**

**p<0.01, *p<0.05.

性領域を越えて関与するためであろうと推察している。Greenspan & McGills¹⁴⁾も、探針を用いて生体皮膚の凹みと応力との関係を調べ、同様の結果を報告している。

Nielsen¹⁵⁾は、このような粘弾性を有する材料の摩擦係数は、温度、すべり速度、荷重、表面の性質(粗滑)、接触面積、潤滑剤の有無などの因子に依存すると報告している。本研究の交互作用に関する結果は、これらの要因の中でも、ヒトの皮膚の摩擦係数が荷重と表面の性質の両因子の関係で比較的複雑に変化することを示すものと考えられる。

粘弾性素材と接触する物体表面間の摩擦係数が、どのような物理的作用によって変化するかについては、ゴムなどの高分子材料において盛んに研究されており^{16,17,18)}、本研究において指先皮膚の摩擦係数が物体重量の影響を受けた原因も、これら粘弾性を有する素材の結果から推察することが可能かも知れない。

Schallamach¹⁶⁾は粘弾性特性を有するゴム素材の摩擦係数を測定する際、ゴムより硬い素材と接触させると、ゴムが裂けたり摩耗することを観察している。このような現象は、相対的に硬い方の素材表面の突起部が柔軟な素材表面上を溝を作るように滑ることによって生ずる摩擦力(引っ掻き抵抗^{17,19,20)})によるものであろうと報告している。また、Bernhart¹⁸⁾は柔軟な素材ほどこの引っ掻き抵抗の影響を受け易く、その静的摩擦係数が大きくなると報告している。

Nielsen¹⁵⁾は、ゴムなどの粘弾性素材では、2つの表面に密着する量(接触面積)が広がるほど摩擦係数が大きくなることを報告している。ヒトの皮膚が粘弾性特性を有するのであるならば、接触面積も考慮する必要があるかも知れない。

接触面積が、把握面と重量間での交互作用に及ぼす影響を検討するために、摘み力と接触面積との関係をインクパッドとデジタル力量計で調べ、そのデータから各把握面での静的摩擦係数測定時の接触面積を推定し^{10,22)}、Slip Forceで除すことによって把握面間で比較できるように正規化した。

Fig. 6. Relationship between static friction coefficient and contact area. Average data from nine subjects. The contact area was normalized by slip force. Object weight conditions are indicated by arrows.

図6は、各把握面について Slip Force で正規化された接触面積と静的摩擦係数との関係を示している。

いずれの把握面においても、重量が小さくなるにつれて正規化された接触面積は増大し摩擦係数も大きくなる傾向がみられ、特にサンドペーパー面で顕著にみられた。すなわち、把握面と重量との交互作用には、接触面積が関係していることを示す結果が得られた。接触面積が増大すると摩擦係数が大きくなる理由は、皮膚表面と物体把握面での凝着性の高まりが、滑り力へ対抗する摩擦力(剪断抵抗^{19,20)})を大きくするためであろうと考えられる²¹⁾。

B. 異なる把握面と Safety Margin Force との関係

Safety Margin Force は、滑り易い素材ほど大きくなり、把握面の状況に強く依存することが明らかになった。また、把握面および重量の交互作用効果は認められなかったが、重量の主要因効果が有意となり、物体重量の増大に伴って Safety Margin Force が大きくなることが明らかになった。これらの結果は、この力が重量や把握面に関係なくほぼ一定であるという報告^{7,9)}よりは、重量や把握面状況に伴って増大するという報告¹⁰⁾

を支持するものであった。

Safety Margin Force は、保持中の摘み力 (STGF) から指先の物理的特性に関連する Slip Force を除いた力であるので、個人の随意的な調節が反映していると考えられる^{7,8)}。この力が把握面差に強く依存するという本研究の結果は、安定保持中の摘み力 (STGF) が Slip Force だけによって決定されているのではなく、随意的な力の影響をも強く受けながら設定されていることを示すものである。滑り易さに応じて Safety Margin Force が大きくなった理由は、物体が不意に指先から滑り落ちてしまうことへの心理的不安によるものと考えられる。すなわち、滑り易い把握面では一旦滑りが始まると、滑り速度も大きくなり¹⁹⁾、物体を滑り落としてしまう確率が高くなるので、滑りを発生させまいとする心理がより強く働くことは十分に考えられる。Safety Margin Force が心理的影響を強く受けることは、物体の見た目の大きさが大きくなることによって³⁾、また物体重量が不意に変化することによって¹⁰⁾、この力が有意に大きくなることから十分に推察される。

さらに、2つの感覚刺激の強さが、異なっていると識別できる最小差 (弁別閾) は、与えられる刺激の強さにほぼ比例して大きくなることが知られている (Weber の法則^{23,24)})。これに従えば、滑りにくい把握面で識別できる把握面の微細な変化情報が、滑り易い把握面になると識別しにくくなると予想され、より慎重な対応が必要になると考えられる。重量差識別能力が劣る者ほど Safety Margin Force が大きかったとする報告は¹¹⁾、上述の考察を支持するものと考えられる。

C. 把握面変化への適応について

把握面が変化した直後の Safety Margin Force は、同一把握面での繰り返し試技に比べ有意に大きくなること、同一把握面での試技の値に再び調節されるためには、2～3回の試技を要すること、シルク面の方がサンドペーパー面に比べて前試技の影響が持続する傾向のあること、の3点が明らかとなった。

把握面が変化した直後の試技で Safety Margin

Force が大きくなる理由は、予測した把握面と実際の把握面との差が、保持者に摘み力を過大にさせるほど大きな心理的不安を引き起こさせたことによるものと推察される。同様の現象は不意の重量変化の結果において観察されている¹⁰⁾。Johansson & Westling^{4,5)} は、接触する把握面の粗滑状況と指先の触覚受容器からの求心性信号との関係を調べた結果、サンドペーパーのような粗い面と接触している場合には、シルクのような滑らかな面と接触しているよりも高頻度のインパルスが観察されることを報告している。また、両面の差異に基づく指先の摘み力発揮のための筋活動変化が把握面に接触した後の 70 ms 前後よりみられることも明らかにしている。

しかし、本研究の結果は、保持者が把握面を十分に認知しているにも関わらず、15秒間の調節時間でも Safety Margin Force を適切な水準にまで低下させることができなかったことを示すものであった。さらに、サンドペーパーからシルク面へ不意に変化した時のように把握面が滑り易くなった場合には、Safety Margin Force が把握面変化後の数回の試技において大きいままであったという結果は、中枢神経機構において予め記憶された把握面情報を現在の把握面情報で完全に塗りかえるためには、少なくとも3回程度の試技経験あるいは45秒間程度にわたる入力信号を必要とするものと考えざるを得ない。従って、出力信号と求心性入力信号との差がもたらすと考えられる心理的不安も、数回の試技を通して除去されると考えられる。

シルクへの適応がサンドペーパーへの適応より難しいという結果は、滑り易い把握面では心理的不安がより強くなることによるものとみられる。

異なる把握面への摘み力の適応が中枢の神経系機能のどの部位によって行われているのかについては、サルを用いた実験から徐々に解明されつつある。すなわち、Picard & Smith²⁵⁾ は、大脳皮質運動野および第1次感覚野の細胞活動と把握面との関係について調べた結果、把握面の滑り易さに応じた細胞活動の変化と摘み力の調節がみられたと報告している。また、Dugas & Smith¹⁾ は、小

脳皮質プルキンエ細胞の活動が把握面差に反映することを報告しており, さらに Espinoza & Smith²⁾ は, 不意の把握面変化がプルキンエ細胞の活動を一過性に増加させ, それが2~3回の繰り返し試技とともに減少することを報告している. 本研究でのヒトによる握み運動中の把握面への適応過程にも, これらの皮質部位が関わった可能性は極めて高いといえる.

D. 握み力調整能の個体差

Slip Force および Safety Margin Force の個体差は, いずれも滑り易い素材ほど顕著となった. また, 滑り易い把握面でこれらの値が大きい者は, 滑りにくい把握面でも大きな値をとる傾向のあることが明らかとなった. これらの結果は, 重量が重くなるほど個体差が顕著となり, 個人の Safety Margin Force が各重量間で有意な相関関係を示したという結果¹⁰⁾と類似するものであった.

Slip Force の個体差は, 皮膚の摩擦係数差によるものであり¹⁰⁾, それは皮膚の粘弾特性とそれに伴う接触面積^{10, 12, 21)}, 発汗および脂質成分量^{26, 27, 28)}などの要因が関与するものと考えられる. 本研究では各被検者の皮膚の粘弾特性や発汗機能について調べるところまでは至らなかったが, 同年齢の青年においても皮膚の粘弾性に大きな個体差が認められること²⁹⁾や, 発汗, 発脂質機能にも個体差が大きいこと²⁸⁾はよく知られている. これらの要因と摩擦係数との関係は, 皮膚や皮下組織の弾性が低い場合には, 軽度の圧力で皮膚が大きく変位し接触面積も大きくなる²²⁾ため把握面との摩擦係数も高くなると考えられている. 木下たち³⁰⁾は, 指先の汗や脂質発散機能が劣り, 皮膚表面も硬化すると考えられる高齢者では, 青年より指先の摩擦係数が低いことを報告している. 従って, 皮膚表面での発汗や脂質量が多い者ほど摩擦係数も高くなると考えられる. 事実, Buchholz et al.³¹⁾は, 指先を水で濡らすと皮膚接触面積の増加によって, 摩擦係数が1.5倍程度高くなると報告している.

以上のことから, 滑り易い把握面で Slip Force の個体差がより顕著となるのは, これらの要因の特性が滑り易い把握面との対応においてより明確

になるためと考えられる.

さらに Safety Margin Force, すなわち Slip Force の上に発揮されている余剰分の握み力がシルク面でサンドペーパー面より大きな個体差を伴った理由は, 滑り易い把握面ほど物体を滑り落とすことへの心理的な不安が個人によってより顕著に現われるためと推察される. このことは, 不意の把握面変化によって Safety Margin Force が大きくなったという本研究での結果からも, 被検者に心理的な不安が高まるとこの力が大きくなることは確かなようである. また, Westling & Johansson⁷⁾, 木下たち¹¹⁾ および Cole³²⁾ は, Safety Margin Force が個人の指先の感覚機能や運動機能とも関係があることを報告しており, このような末梢神経系および中枢神経系機能の個体差が把握面差の対応において心理的不安を引き起こす要因であった可能性も十分に考えられる.

V. 結 論

拇指と人差指を用いた精密把握運動において, 空間保持中の握み力の制御に及ぼす把握物体の滑り易さの影響について検討した. すなわち, 異なる把握面状況と物体重量の変化が, 握み力の構成要素である Slip Force と Safety Margin Force の各々に及ぼす影響, ならびに不意の把握面変化が Safety Margin Force へ及ぼす影響およびその適応過程を検討した.

(1) Slip Force も Safety Margin Force も共に把握面の滑り易さに伴って増大した. Slip Force と静的摩擦係数においては, 把握面の滑り易さと物体重量との間に有意な交互作用効果が認められたが, これは重量と把握面の滑り易さの両者に依存して, 粘弾性特性を有する指先の摩擦状況が変化するためと推察された. 把握面の滑り易さに応じて Safety Margin Force が増大した理由は, 物体を落とすまいとする心理的な影響および握み力の増大に伴う弁別閾値の変化が関係しているものと推察された.

(2) 不意に把握面が変化した場合の Safety Margin Force は, 同一把握面での繰り返し試技で発揮されるそれよりも有意に大きくなった. 特に滑

り易くなった把握面状況に適応するためには、2～3回の持ち上げ試技が必要であった。

(3) Slip Force も Safety Margin Force も共に把握面が滑り易くなるほど個体差が顕著となった。

本研究の一部は、平成5年度および6年度帝塚山学園特別研究補助金により行われた。

(受付 平成6年12月14日)

引用文献

- 1) Dugas, C., & Smith, A. Responses of cerebellar purkinje cells to slip of a hand-held object. *J. Neurophysiol.*, (1992), **67**, 483-495.
- 2) Espinoza, E., & Smith, A. Purkinje cell simple spike activity during grasping and lifting objects of different textures and weights. *J. Neurophysiol.*, (1990), **64**, 698-714.
- 3) Gordon, A. M., Forssberg, H., Johansson, R. S., & Westling, G. Visual size cues in the programming of manipulative forces during precision grip. *Exp. Brain Res.*, (1991), **83**, 477-482.
- 4) Johansson, R. S., & 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.*, (1984), **56**, 550-564.
- 5) Johansson, R. S., & Westling, G. Signals in tactile afferents from the fingers eliciting adaptive motor responses during precision grip. *Exp. Brain Res.*, (1987), **66**, 141-154.
- 6) Müller, F., & Dichgans, J. Dyscoordination of pinch and lift forces during grasp in patients with cerebellar lesions. *Exp. Brain Res.*, (1994), **101**, 485-492.
- 7) Westling, G., & Johansson, R. S. Factors influencing the force control during precision grip. *Exp. Brain Res.*, (1984), **53**, 277-284.
- 8) Johansson, R. S. How is grasping modified by somatosensory input? In., Humphrey, D. R., & Freund, H. J., *Motor Control: concepts and issues*. Dahlem Konferenzen, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, (1991), 331-355.
- 9) 木下 博. 手指による摘み運動の制御に関わる感覚・運動機構, システム・制御・情報, (1992), **36**, 581-590.
- 10) 川合 悟, 木下 博, 生田香明. 物体重量の変化と摘み力との関係からみた精密把握運動の摘み力制御について, 体力科学, (1994), **43**, 247-258.
- 11) 木下 博, 生田香明, 川合 悟. 指先の微細操作機能の個体差について, 小野スポーツ科学, (1994), **1**, 39-52.
- 12) Comaish, S., & Bottoms, E. The skin and friction: Deviation from Amonton's laws, and the effects of hydration and lubrication. *Br. J. Derm.*, (1971), **84**, 37-43.
- 13) Daly, C. H., & Odland, G. F. Age-related changes in the mechanical properties of human skin. *J. Invest. Derm.*, (1979), **73**, 84-87.
- 14) Greenspan, J. D., & McGills, L. B. Stimulus features relevant to the perception of sharpness and mechanically evoked cutaneous pain. *Somatosensory Mot. Res.*, (1991), **8**, 137-147.
- 15) Nielsen, L. E. (小野木重治訳), 高分子と複合材料の力学的性質, 初版, 摩擦, 化学同人, 東京, (1975), 216-223.
- 16) Shallamach, A. Friction and abrasion of rubber. *Wear*, (1957), **1**, 384-417.
- 17) Bowden, F. P., & Tabor, D. (曾田範宗訳), 固体の摩擦と潤滑, 第4版, 非金属材料の摩擦, 丸善株式会社, 東京, (1994), 146-168.
- 18) Bernhardt, E. C. Scratch resistance of plastics. *Modern Plast.*, (1948), **26**, 123-186.
- 19) 岡本純三, 中山景次, 佐藤昌夫. トライボロジー入門, 第3版, 表面・接触・摩擦, 幸書房, 東京, (1994), 8-24.
- 20) 笹田 直, 塚本行男, 馬淵清資. バイオトライボロジー, 初版, 潤滑と摩擦・摩擦, 産業図書, 東京, (1988), 17-21.
- 21) 山羽和夫, 高野英彦, 尾崎省太郎. 人間の指の物理的特性, バイオメカニズム, (1970), **3**, 28-36.
- 22) 川合 悟, 小林久幸, 中村秀夫. 指先の力発揮に伴う皮膚接触面積の変化, 帝塚山短期大学紀要, (1994), **31**, 204-213.
- 23) 福田邦三. 精神の生理学, 第4版, II. 感覚, Weber の法則, 杏林書院, 東京, (1976), 46-53.
- 24) 大築立志. たくみの科学, 初版, 動きの繊細さ, 朝倉書店, 東京, (1989), 139-144.
- 25) Picard, N., & Smith, A. Primary motor cortical activity related to the weight and texture of grasped objects in monkeys. *J. Neurophysiol.*, (1992), **68**, 1867-1881.
- 26) Cua, A. B., Wilhelm, K. P., & Maibach, H. I. Frictional properties of human skin: relation to age, sex and anatomical region, stratum corneum hydration and transepidermal water loss. *Br. J. Derm.*, (1990), **123**, 473-479.
- 27) Ogawa, T. Thermal influence on palmar sweating and mental influence on generalized sweating in man. *Jap. J. Physiol.*, (1975), **25**, 525-536.
- 28) 光井武夫. 新化粧品学, 初版, 肌質の基本概念, 南山堂, 東京, (1990), 28.
- 29) Grahame, R. A method for measuring human skin

- elasticity in vivo with observations on the effects of age, sex and pregnancy. *Clinical Sci.*, (1970), **39**, 223-238.
- 30) 木下 博, 生田香明, 有働正夫. 高齢に伴う指先の微細運動制御機能の変化について, 大阪ガスグループ財団研究報告集, (1992), **5**, 79-84.
- 31) Buchholz, B., Frederick, L. J., & Armstrong, T. J. An investigation of human palmar skin friction and the effects of materials, pinch force and moisture. *Ergonomics*, (1988), **31**, 317-325.
- 32) Cole, K. J. Grasp force control in older adults. *J. Motor Behavior*, (1991), **23**, 251-258.