

報 告

持ち上げ運動制御過程に影響を及ぼす物体の大きさ知覚とその内部モデル*

森岡 周^{1) #} 太場岡英利²⁾ 片岡保憲³⁾
越智 亮⁴⁾ 八木文雄⁵⁾

要旨

本研究の目的は持ち上げ運動制御過程に影響を及ぼす物体の大きさ知覚とその内部モデルについて検証することである。健康女性20名を対象とした。大きさは異なるが重さは等しい二つの容器(大と小)を用意した。大小容器の持ち上げは交互に行い、各5試行で構成した。持ち上げ時の僧帽筋、三角筋、上腕二頭筋、腕橈骨筋の活動を表面筋電図により記録し、持ち上げ開始から1秒間の積分値を求めた。また試行後に重さの違い、持ち上げ前の重さの予測について被験者に内省を求めた。1試行目:小容器持ち上げ時、A群(大→小)では上腕二頭筋と腕橈骨筋の活動に有意な増加を認めた。一方、B群(小→大)では大容器持ち上げ時に三角筋と上腕二頭筋の活動に有意な減少を認めた。2～5試行目: A群、B群ともに試行の進行に伴い両者の差が減少した。1試行後に小容器が重いと判断した者が殆どであり、大きさ-重さの錯覚が認められた。また、持ち上げ前では大容器が重いと予測した者が殆どであり、その理由は大きさの違いに起因するものであった。被験者は物体の大きさの知覚と内部モデルから小容器が軽いと予測したが、主観的な重さの感覚フィードバックにより、その予測を修正したために、このような結果が得られたと考えられる。

キーワード 運動制御, 大きさ-重さの錯覚, 内部モデル

はじめに

日常生活において視覚的、触覚的に弁別可能で使い慣れている道具を操作するとき、その物体の重さに該当する力を予測することができる。例えば、コップなど日常生活でよく使う物体を最初に持ち上げるとき、重さに関連する触覚情報がフィードバックされる前から物体の重

さを予測し、指先や上肢全体の適切な力を生成することができる¹⁻⁵⁾。この予測は、たとえ今まで操作したことのない店先のコップにおいても可能である。また、その物体を見ただけで持ち上げの可否の予測も可能である。さらに、その物体を自分自身がどのような姿勢で持ち上げるか、片手で操作できるか、あるいは両手を使用すべきかなどといった脳内での表象や運動イメージ⁶⁾の形成も可能である。これはヒトが普段の日常生活で使い慣れている物体から獲得した内部モデル⁷⁻¹⁰⁾を選択するために視覚情報を用いていることを意味している。つまり、大きさ-重さの関係に基づく内部モデルを用いて、予め物体の重さに対してフィードフォワードに適当な力や必要な筋収縮量を用意している可能性を暗示している。Gordonら⁴⁾は、日常生活における道具の持ち上げは、過去の経験による記憶に基づいて行われているとし、この内部モデルは大きさなどの視覚情報が過去の経験とともに運動プログラムに統合されることによって形成されるとしている。すなわち、内部モデルは学習によって獲得される記憶であると考えられている¹¹⁾。

一方、物体の大きさに応じた重さの予測を誤ったとき

* Perception of Object Size and Internal Model that Influence the Control Process for Lifting

1) 畿央大学健康科学部理学療法学科

(〒635-0832 奈良県北葛城郡広陵町馬見中4-2-2)

Shu Morioka, RPT, PhD: Department of Physical Therapy, Faculty of Health Science, Kio University

2) 愛宕病院リハビリテーション科

Hidetoshi Tabaoka, RPT: Department of Rehabilitation, Atago Hospital

3) 高知大学大学院医学系研究科医科学専攻

Yasunori Kataoka, RPT: Medical Science Course, Kochi Medical Graduate School

4) 星城大学リハビリテーション学部

Akira Ochi, RPT: Faculty of Rehabilitation, Seijoh University

5) 高知大学医学部認知・行動神経科学教室

Fumio Yagi, PhD: Department of Behavioral Neuroscience, Kochi Medical School

E-mail: smorioka@kio.ac.jp

(受付日 2004年7月1日 受理日 2005年6月4日)

は、上肢の力あるいは筋収縮に誤差が発生するために、うまく操作ができない場合が生じる。これに相当する現象として大きさ-重さの錯覚 (size-weight illusion) が挙げられる。この大きさ-重さの錯覚は100年以上前から知られている知覚現象¹²⁾である。例えば、同じ重さで大きさが違う物体を持ち上げるとき、小さい方が重いと感じる¹³⁻¹⁵⁾にも関わらず、大きな物体に対して大きな力を発揮し、小さな物体に対しては小さな力を発揮してしまう^{4) 16) 17)}。実はこれらの実験^{4) 16) 17)}は、どれも軽量の小箱の掴みと持ち上げ課題であり、より重いと感じた小さな小箱に対して、小さな力を発揮した結果を解釈すると、この随意運動の制御に関しては、あくまでも運動イメージや内部に蓄えられた記憶、すなわち内部モデルに基づいたもので、体性感覚野を介する感覚の直接的フィードバックは必ずしも必要でない¹⁸⁾ことを示唆している。したがって、リーチングにおける弾道運動後のすばやい掴み運動制御と考えられ、あくまでもフィードフォワード制御のみで行為が達成されたことが考えられる。しかしながら、より大きな物体の持ち上げで、持ち上げ速度が必然的に遅くなる場合は、その過程の最中に物体の重さについての意識¹⁹⁾が生じること、すなわちフィードバック制御が追加されることが推測される。

運動が上達することは、意識的な運動学習を通して運動制御の精度を上げることである。なかでも上肢は道具を滑らかに操作するために存在している身体といっても過言ではなく、理学療法において、その円滑な運動制御を患者に学習させるためには、この内部モデルの生成を求める必要がある。あるいは、正確な運動を制御できない患者に対しては、フィードバック情報を用いて内部モデルが更新²⁰⁾されるように理学療法プログラムを構築すべきである。こうした認知的な運動制御や運動学習に関する基礎科学に基づいたリハビリテーションを求める動きが最近になって盛んになってきた²¹⁾。しかし、理学療法学においてはその制御過程に迫った研究は極めて少ない。

そこで本研究では、視覚による物体の大きさから想起できる重さの知覚と経験に基づいた運動記憶による重さについての内部モデルが、その物体を持ち上げるために必要な筋活動量を予測するが、重さに対する主観的な感覚フィードバックによって筋活動量が即座に調整され、内部モデルが更新されるといった一連の運動制御過程について、大きさは異なるが等しい重さの二つの容器を持ち上げる課題を用いて検証する。

方 法

1. 被験者

18~26歳の健常女性20名を被験者とした。その詳細は、平均年齢 20.2 ± 2.3 歳、平均身長 156.9 ± 2.8 cm、

平均体重 51.2 ± 3.5 kgであった。いずれの被験者も本実験課題遂行に支障となる視力や上肢運動機能の異常は見られなかった。なお、すべての被験者に対して、本実験の説明を行い、参加の同意を得た。

2. 手順

大きさの異なる2種類の容器を用意した。容器の大きさは、小：直径23.0 cm × 高さ21.0 cm、重量400.0 g、大：直径31.0 cm × 高さ28.5 cm、重量800.0 gであった。なお、この容器は日常生活で頻繁に使用されるプラスチック製のバケツを加工したものであり、色は薄灰色であった。容器の総重量は鉛(1本400.0 g)を用いて両者を同量にし、その重量は被験者の体重の約10%とした。なお、力が均等に加わるように鉛は布で包み、バケツ中心に円状(直径20.0 cm)に設置した。容器内が見えないように蓋を被せ、容器の大きさと色以外の視覚入力を与えないように周辺環境を配慮した。小容器下に高さ7.5 cmの加工した箱を置き、両方の握り手の高さを統一した。また、体幹運動が起こらないように容器の握り手中心に紐を結び、その紐の最上部にプラスチック製で握り幅12.0 cmの握り手を新たに取り付けした。

被験者は容器の前に立ち、両方の容器の大きさを判断した後、容器から15 cm離れた位置に足尖を合わせ、利き手で握り手を軽く把握した。その把握の際、肘関節角度は30°屈曲位、前腕は90°回外位になるように握り手から容器までを連結している紐の長さを調整した。なお、後述する手掌に取り付けたNorswitch II (Noraxon社製・EM-134)に握り手を接触させないように把握を指示した。足位は閉脚位を維持させ、両足内側縁が接触した位置の延長線が容器の中心となるように立つように指示した(図1)。

持ち上げ運動は肘関節30°屈曲位から約90°まで約2秒で行わせ、その後、1秒間その位置で保持させ、測定者の合図によって容器を降ろさせた。なお、電子メトロノーム(YAMAHA ME-200, テンポ: 30回/分)を利用して、実際に握り手を握らず、すなわち、容器を持ち上げない肘関節屈曲運動(肘関節屈曲30°→90°)を10回練習させた。被験者には常に滑らかな動きで一定の速度で持ち上げること、持ち上げに際し握り手は不自然に握り締めないこと、手関節を中間位に維持することの指示を与え、あくまでも肘関節屈曲運動にて持ち上げるように心掛けさせた。

大容器の持ち上げ後、小容器の持ち上げ(大→小)をA群、小容器の持ち上げ後、大容器の持ち上げ(小→大)をB群に各々10名ずつ配置した。いずれの被験者も大小容器の交互持ち上げを1試行とし、課題は5試行で構成した。

なお、大きさと重さに関する情報は被験者には一切与

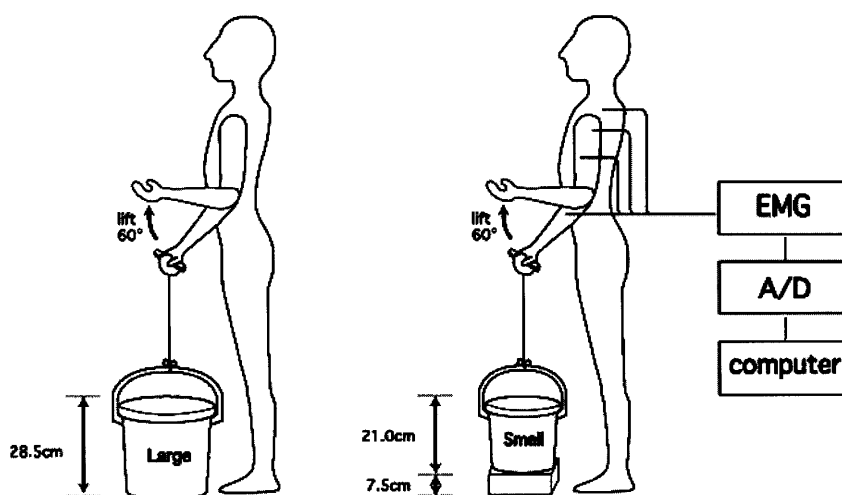


図1 持ち上げ運動課題の模式図

えず、それらの手がかりとなる測定者からの助言や被験者間の情報交換は禁止した。また実験中、手掌の発汗の影響を最小限にするため室内は約20℃に維持した。1試行から2試行までのインターバルは、後述する被験者の内省を記述するために約5分間とし、2試行から5試行までのインターバルは設けなかった。

3. データ収録

筋電図の測定にはMyoSystem1200 (Noraxon社製)を用いた。表面電極貼付部位は、利き腕の僧帽筋上部線維、三角筋中部線維、上腕二頭筋、腕橈骨筋の4筋の筋腹部とした。電極はペースト付ディスプレイを用い、十分な皮膚処理後に貼付し、双極誘導にて筋放電を導出した。なお、アース電極は肘頭に貼付した。また、容器の離床のタイミングを見るために、手掌(第三中手骨末端)にNorswitchを取り付けた。Norswitchは、外部入力ボードNorBNC (Norxon社製・EM135)を介し筋電計と同期させた。

一方、1試行後と5試行後に「容器の重さに違いを感じましたか(違いがあったのならどちらが重かったですか)」、「持ち上げる前に重さに違いがありましたか(どちらが重いと思いましたか)」、また、「なぜそのように思いましたか」の質問を与え、被験者に内省を求めた。

4. データ分析

データの解析には、MyoResearch2.11を使用し、電極から導出されたアナログ信号をA/D変換、ならびにサンプリング周波数1000Hzにてパーソナルコンピュータに取り込んだ。全波整流、ならびに平滑化を行い、握り手がNorswitchに接触した後の持ち上げ最初の1秒間の積分値(IEMG)を求めた。さらに被験者に最大等尺性収縮を行わせ、その1秒間のIEMGを求め、その値を

100%として正規化(%IEMG)した。

SPSS 12.0J for Windowsを使用し、対応のある平均値の差の検定(paired t-test)を用いて、大容器と小容器持ち上げ時の各筋の%IEMGの値を統計処理した。なお、検定は両側検定とし、有意水準は5%未満とした。

また、本運動課題の主動作筋である上腕二頭筋の%IEMGの時間分析を試みた。その実際は1試行時および5試行時の持ち上げ開始から0.05秒ごとに1.00秒まで計20箇所にもーカーを入れ、各々の0.05秒間の%IEMGを抽出し、その平均値を用いてグラフ化した。

結 果

1. 1試行時の%IEMG

小容器の持ち上げ時の%IEMGにA群では上腕二頭筋と腕橈骨筋に有意な増加が認められた($p < 0.05$)。一方、B群では大容器の持ち上げ時の%IEMG値に三角筋中部線維と上腕二頭筋に有意な減少($p < 0.05$)が認められた(表1)。

2. 1試行後の内省報告

「容器の重さに違いを感じましたか」という問いに対して、小さい方が重いと判断(回答)した者が14名(A群8名、B群6名)、等しいと判断した者が6名(A群2名、B群4名)であり、大きい方が重いと判断した者はいなかった。一方、「持ち上げる前に重さに違いがあると思いましたか」という問いに対して、大きい方が重いと判断した者が13名(A群8名、B群5名)、等しいと判断した者が5名(A群1名、B群4名)、何も考えていなかったと回答した者が2名(A群1名、B群1名)で小さい方が重いと判断した者はいなかった。大きい方が重いと判断した理由は「大きさの違い」によるものがすべてで、同じ重さであると判断した理由は「容器内が空であると思った」というものであった。

表1 1試行時の% IEMGの比較 (小容器vs.大容器)

Muscles	Mean ± SD					No.
	A group					
	large	small	difference	p		
Trapezius	15.5 ± 7.0	16.0 ± 4.9	0.5	0.78		7/10
Deltoid	20.2 ± 13.5	23.3 ± 13.5	3.1	0.18		7/10
Biceps brachi	44.1 ± 21.1	52.6 ± 18.2	8.5	0.002 *		10/10
Brachioradialis	43.5 ± 13.4	49.2 ± 16.0	5.7	0.04 *		8/10

Muscles	Mean ± SD					No.
	B group					
	large	small	difference	p		
Trapezius	15.2 ± 7.0	15.5 ± 7.3	0.3	0.70		7/10
Deltoid	21.9 ± 14.0	26.4 ± 18.9	4.5	0.04 *		8/10
Biceps brachi	47.6 ± 15.1	52.2 ± 14.9	4.6	0.02 *		9/10
Brachioradialis	43.4 ± 17.4	45.1 ± 14.2	1.7	0.52		8/10

A group : large → small, B group : small → large, large : 大容器持ち上げ時の% IEMG (%), small : 小容器持ち上げ時の% IEMG (%), difference : largeとsmallの差, p : p-value, No. : smallの% IEMGが増加した被験者数.

Trapezius : 僧帽筋上部線維, Deltoid : 三角筋中部線維, Biceps brachi : 上腕二頭筋, Brachioradialis : 腕橈骨筋.

* p < 0.05.

3. 2～5試行時の% IEMG

A群では2試行目の上腕二頭筋, B群では2試行目の三角筋に有意差が認められたが, その他は有意差が認められず, 試行の進行に伴って両者の差は減少した(表2)。

4. 5試行後の内省報告

5試行後に小容器が重いと判断した者が14名(A群6名, B群8名), 等しいと判断した者が5名(A群3名, B群2名), 大容器が重いと判断した者は1名(A群)であった。

5. 1試行時および5試行時の上腕二頭筋の% IEMGの変化

1試行時: 両群ともに持ち上げ開始から0.05秒間の% IEMGでは, 小容器持ち上げ時が低値を示したが, 開始後0.25秒から0.30秒までの間では, 小容器持ち上げ時が高値を示した。5試行時: 開始後0.05秒間では, 小容器持ち上げ時が低値であったが, その後は大きな差異がみられなかった(図2)。

考 察

実験結果から, 同じ重量でありながらも大容器より小容器の持ち上げ時において筋活動が大きく発揮されることが判明した。また, 被験者の内省から, 小容器が主観的に重いと判断された。一方, 容器の持ち上げの順序には全く影響されないことも判明した。従来, 二つの物体の材質と重量が同じとき, 小さな物体は大きな物体より重いと判断される大きさ-重さの錯覚が生じる。したが

表2 2～5試行時の% IEMG値の比較 (小容器vs.大容器)

Muscles	Mean ± SD			
	A group		B group	
	large	small	large	small
Trapezius	16.0 ± 5.2	16.1 ± 6.0	14.1 ± 5.3	14.1 ± 6.6
Deltoid	21.3 ± 11.1	23.3 ± 11.5	20.3 ± 8.6	24.4 ± 9.7 [#]
Biceps brachi	46.2 ± 19.3	48.2 ± 19.9 [#]	44.2 ± 12.9	45.8 ± 13.6
Brachioradialis	46.4 ± 14.7	47.1 ± 12.4	46.0 ± 14.3	48.0 ± 14.1

Muscles	Mean ± SD			
	A group		B group	
	large	small	large	small
Trapezius	16.4 ± 6.7	16.2 ± 6.8	14.3 ± 6.9	13.5 ± 7.1
Deltoid	23.9 ± 12.9	25.2 ± 14.5	23.1 ± 12.0	23.8 ± 13.9
Biceps brachi	47.1 ± 21.1	47.7 ± 19.7	46.8 ± 12.7	48.9 ± 15.3
Brachioradialis	45.5 ± 17.0	49.9 ± 14.2	49.1 ± 19.5	49.6 ± 14.9

Muscles	Mean ± SD			
	A group		B group	
	large	small	large	small
Trapezius	16.4 ± 6.9	16.2 ± 6.8	12.4 ± 6.1	12.8 ± 7.9
Deltoid	23.8 ± 11.2	22.8 ± 10.1	22.3 ± 12.7	23.7 ± 13.9
Biceps brachi	45.5 ± 18.2	47.1 ± 19.0	48.7 ± 15.5	50.5 ± 13.6
Brachioradialis	49.3 ± 14.4	50.2 ± 12.4	48.2 ± 13.3	48.9 ± 11.5

Muscles	Mean ± SD			
	A group		B group	
	large	small	large	small
Trapezius	17.1 ± 9.2	16.5 ± 7.8	13.8 ± 7.4	14.2 ± 8.0
Deltoid	22.7 ± 11.7	21.9 ± 10.9	23.7 ± 12.4	24.3 ± 13.4
Biceps brachi	45.1 ± 15.9	46.3 ± 17.1	48.4 ± 12.5	48.4 ± 13.8
Brachioradialis	49.5 ± 17.6	48.9 ± 15.8	49.9 ± 14.6	50.7 ± 10.0

A group : large → small, B group : small → large, large : 大容器持ち上げ時の% IEMG値 (%), small : 小容器持ち上げ時の% IEMG値 (%), Trapezius : 僧帽筋上部線維, Deltoid : 三角筋中部線維, Biceps brachi : 上腕二頭筋, Brachioradialis : 腕橈骨筋.

[#] p < 0.05.

って, 重量知覚は必ずしも実際の物理的な重さと一致していない。

これまで大きさ-重さの錯覚は, 予測している重さと実際に物体を触った後の体性感覚情報が異なるときに起こる²²⁻²⁴⁾, あるいは重さに関して見かけと実際の感覚入力 mismatches²⁵⁻²⁷⁾とされてきた。しかし, 最近, Flanaganら¹⁶⁾は極めて軽量の物体を把持して持ち上げる作業中の握み力(grip force)と持ち上げ力(load force)を同時に測定することで, これら二つが同期していることを見出し, ヒトは内部モデルを用いて力を予測し, 物体の持ち上げ運動の制御を行っていることを示した。

物体を持ち上げる時, 中枢神経系の内部前向きモデルに基づき対象の感覚フィードバック量の予測が行われる。この予測は遠心性コピー²⁸⁾や随伴発射²⁹⁾と呼ば

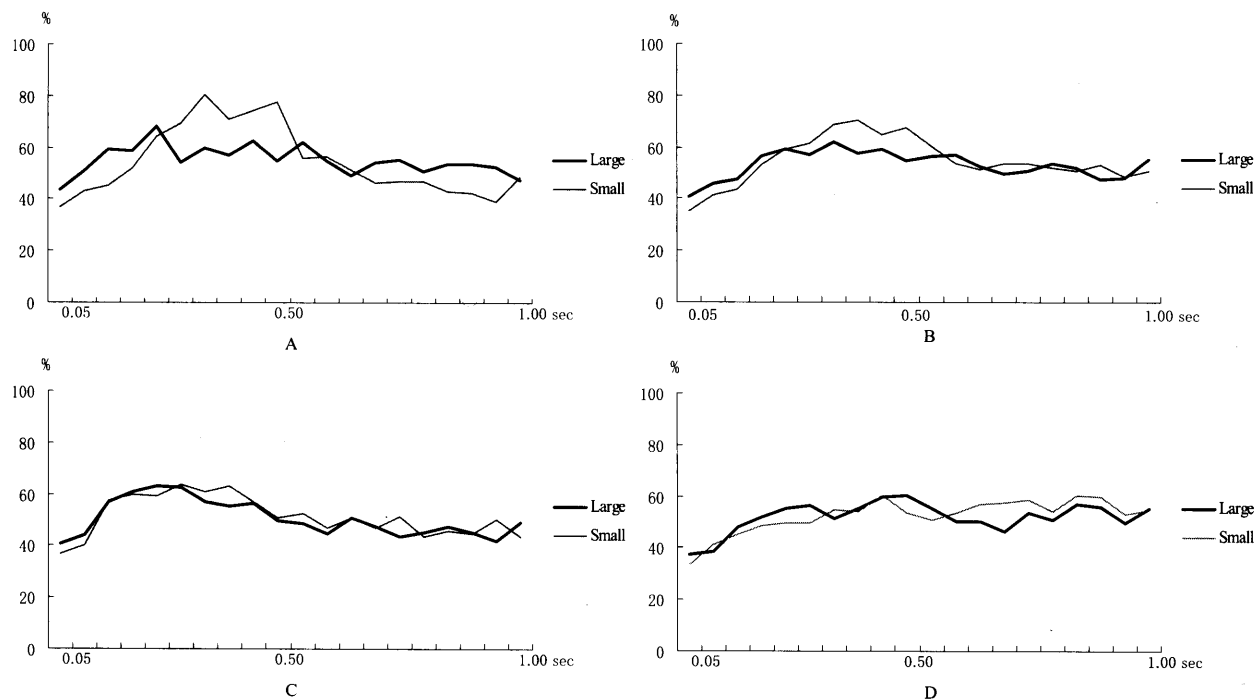


図2 1試行時および5試行時の上腕二頭筋の% IEMGの変化

持ち上げ運動の主動筋である上腕二頭筋の% IEMGの平均値の変化(持ち上げ開始から1.00秒まで)。A: A groupの1試行時。B: B groupの1試行時。A, B共に持ち上げ開始から0.05秒の間ではsmall(小容器)持ち上げ時が低値を示したが、0.20~0.25秒の間ではLarge(大容器)持ち上げ時よりもsmall持ち上げ時が高値を示している。C: A groupの5試行時。D: B groupの5試行時。開始から0.05秒間ではsmall持ち上げ時が低値であったが、その後は大きな差異が認められない。

れ、これが実際の感覚フィードバックと比較照合され、重さが判定される。Gordonら⁵⁾は、視覚情報から大きい物体は重いという過去の経験によって得られた記憶に基づき、大きな物体を掴む際、より大きな掴み力を発揮することを明らかにし、この瞬時の運動制御の中核は小脳であるとした。また、等しい重量の大きな箱と小さな箱を掴み上げる時の掴み力と持ち上げ力が測定された結果、大きさ-重さの錯覚が認められていても、大きな箱を掴み上げる時が、より大きな力を発揮している¹⁶⁾。この結果は川合らの報告¹⁷⁾と一致している。これは視覚情報から大きな箱が小さな箱よりも重いと予測し、それに対応した筋出力が発揮されたためと考えられている。しかしながら、これらいくつかの実験に用いられた物体の重さは55~830gと本実験よりも極めて軽く、新たな運動単位が動員される前に掴み上げ行為が達成してしまうために、あくまでもフィードフォワード制御のみで操作できたことが推測される。

一方、本実験結果では、小容器の持ち上げ時に筋活動量の増加を認めた。これは外部視覚情報と内部モデルから、被験者は小容器の重さが軽いと予測したが、主観的な重さの感覚フィードバック情報との間に誤差が生じ、それが小脳を中心とした中枢神経系で比較照合(フィードバック誤差学習モデル)³⁰⁻³³⁾され、持ち上げ課題達成のために新たな運動単位の動員が図られることによって修正されたことが考えられる。したがって、被験者の

小容器が重いという内省からも、持ち上げ運動時の上肢筋活動量は、物体の大きさの知覚と過去の経験と記憶によって生成された内部モデルによって予測されたが、内的な意識である「重い」という主観的な感覚情報のフィードバックにより、即座に筋活動が修正されることが明らかになった。これは、持ち上げ運動の主動筋として作用する上腕二頭筋の% IEMGの変化を示した図2からも断定することができる。すなわち、持ち上げ開始直後では、小容器持ち上げ時の% IEMGが大容器のそれに比べ低いですが、時間と共にその増加は顕著となり、途中で逆転しているという結果である。Libetら³⁴⁾は感覚情報が体性感覚野に到達するまでには0.1秒かかり、それが皮質内過程を経由して意識に至るまでには0.3秒程度かかることを明らかにした。本結果においても0.05秒の時点では過去の記憶に基づく内部モデルによって、大きい容器の持ち上げ時の筋活動が大きかったが、0.25秒の時点でそれは逆転した。これは大きさ-重さの錯覚によって重さの意識が生じ、フィードバックに基づいて筋活動が修正されたことが考えられる。

一方、試行の進行に伴い、両容器持ち上げ時の筋活動量が一致、あるいは筋活動の修正のスピードが速くなる傾向を認めたことは、正確な重さを筋感覚で知覚し、学習したことが考えられる。しかしながら、筋活動量が一致しはじめたにも関わらず、大きさ-重さの錯覚が残存した者が殆どであった。前出のFlanaganら¹⁶⁾も大き

さー重さの錯覚は掴み上げの試行を繰り返した後、掴み力が同一になっても残存していることから、さらに上位の認知レベルで起こっていると考察している。これは、絶対尺度評価法を用いた心理実験でも同じ結果であり、純粋に知覚的、認知的な過程と感覚運動的過程は別物である³⁵⁾ことを示している。そしてこの事実は、小さな物体は軽いという意味的な知識 (semantic knowledge)³⁶⁾や概念推進型処理²⁵⁾における文脈によって得られた心像³⁷⁾が重さの知覚に影響を及ぼすことを示唆している。

内部モデルは、もともと速く正確な運動制御メカニズムを理解する上で提案された概念ではある。しかし現在は、人間の hoch 認知機能に至るまでの広い領域における重要な概念へと発展している¹¹⁾。したがって、意味的な知識といった認知機能も内部モデルの範疇とするならば、本実験における5試行時の0.05秒の時点で、大容器により大きな筋収縮を引き起こしたことは、筋感覚の調整のみで内部モデルが更新されたとは断定できない。これに関しては、視覚入力を除いた実験モデルを用いて明らかにすべきであろう。

物体を持ち上げる作業は、その大きさや重さ、またそれを行うのに適した姿勢や持ち上げる速さなどを脳で認識した上で行われる。そして、持ち上げる物体の大きさや重さを正しく認識、すなわち重さの知識がなければ、それに対する姿勢をとることや、筋活動が正しく行われないために、不適切な反射作用による異常な筋緊張を引き起こし、痛みを生ずるという知覚的な原因による腰痛発生の可能性も示唆されている³⁸⁾。このように、今後、物体の大きさと重さの関係によって、力学的のみならず知覚的な観点から、腰痛の発生原因を明らかにすることができるかもしれない。

本研究によって、物体の大きさ知覚と過去の経験によって得られた内部モデルが上肢の持ち上げ運動制御における筋活動量の予測に影響を与えていることと、主観的な重さの感覚により筋収縮が修正される、すなわち、フィードフォワードとフィードバックの両方の過程が明らかにされた。しかしながら、実際に脳内の空間的な処理過程や、その処理過程における時間性が解決すべき問題として残る。今後は脳の運動準備電位の導出が必要であると考えている。さらに、意味的な知識が重さを改変するのであれば、物体の大きさ以外にも形についての手がかり³⁹⁾⁴⁰⁾や色、素材などに対して個人が持つ共感覚メタファー⁴¹⁻⁴⁴⁾なイメージや意味記憶⁴⁵⁾が影響を与えるに違いない。故に、これらの主観的な重さに対する影響因子について明確化すべきであろう。一方、中枢神経障害によって内部モデルの生成がどのように変化するかについて、いくつかの研究にて明らかにすることにより、中枢神経障害に対する運動学習理論について提案して行く必要があると考えている。

文 献

- Westling G, Johansson RS: Factor influencing the force control during precision grip. *Exp Brain Res* 53: 277-284, 1984.
- Johansson RS, Westling G: Roles of glabrous skin receptors and sensory motor memory in automatic control of precision grip when lifting rougher or more slippery objects. *Exp Brain Res* 56: 550-564, 1984.
- Gordon AM, Forssberg H, *et al.*: The integration of haptically acquired size information in the programming of manipulative forces during precision grip. *Exp Brain Res* 83: 483-488, 1991.
- Gordon AM, Forssberg H, *et al.*: Visual size cues in the programming of manipulative forces during precision grip. *Exp Brain Res* 83: 477-482, 1991.
- Gordon AM, Westling G, *et al.*: Memory representation underlying motor commands used during manipulation of common and novel objects. *J Neurophysiol* 69: 1789-1796, 1993.
- Jeannerod M: The representing brain: Neural correlates of motor intention and imagery. *Behav Brain Sci* 17: 187-245, 1994.
- Ito M: Neurophysiological aspects of the cerebellar motor control system. *Int J Neurol* 7: 162-176, 1970.
- Kawato M: Internal models for motor control and trajectory planning. *Curr Opin Neurobiol* 9: 718-727, 1999.
- Kawato M, Furukawa K, *et al.*: A hierarchical neural-network models for control and learning of voluntary movement. *Biol Cybern* 57: 169-185, 1987.
- Kawato M, Gomi H: A computational model of four regions of the cerebellum based on feedback-error learning. *Biol Cybern* 68: 95-103, 1992.
- 今水 寛: 計算理論・脳機能計測・実験心理学の融合。認知科学への招待。大津由紀雄 (編), 研究社, 2004, pp189-204.
- Murray DJ, Ellis RR, *et al.*: Charpentier (1891) on the size-weight illusion. *Percept Psychophys* 61: 1681-1685, 1999.
- Wolfe HK: Some effects of size on judgments of weight. *Psychol Rev* 5: 25-54, 1898.
- Nyssen R, Bourdon J: Contribution to the study of the size-weight illusion by the method of P. Koseleff. *Acta Psychol* 11: 467-474, 1955.
- Ellis R, Lederman SJ: The role of haptic versus visual volume cues in the size-weight illusion. *Percept Psychophys* 53: 315-324, 1993.
- Flanagan JR, Beltzner MA: Independence of perceptual and sensorimotor predictions in the size-weight illusion. *Nat Neurosci* 3: 737-741, 2000.
- 川合 悟, 生田香明・他: 視覚から得られる物体の「大きさ」情報が精密把握運動時の握力制御におよぼす影響。体力科学 50: 513-520, 2001.
- 岩村吉見: 神経心理学コレクション。タッチ。医学書院, 2001, pp115-146.
- 李阪直行 (編): 意識の科学は可能か。新曜社, 2002, pp1-63.
- 道免和久, 吉田直樹: 運動学習にかかわる小脳の働き。体育の科学 52: 949-955, 2002.
- 今水 寛: 運動学習における小脳の役割。総合リハ 32: 859-865, 2004.
- Charpentier A: Experimental study of some aspects of weight perception. *Arch Physiol. Normales Pathologiques* 3: 122-135, 1981.

- 23) Wolpert DM, Ghahramani Z, *et al.*: An internal model for sensorimotor integration. *Science* 269: 1880-1882, 1995.
- 24) Jordan MI, Rumelhart DE: Forward models: supervised learning with a distal teacher. *Cogn Science* 16: 307-354, 1992.
- 25) Ross HE: When is a weight not illusory? *Q J Exp Psychol* 21: 346-355, 1969.
- 26) Davis CM, Roberts W: Lifting movements in the size-weight illusion. *Percept Psycho Phys* 20: 33-36, 1976.
- 27) Granit R: Constant errors in the execution and appreciation of movement. *Brain* 95: 451-460, 1972.
- 28) von Holst E: Relations between the central nervous system and the peripheral organs. *Br J Anim Behav* 2: 89-94, 1954.
- 29) Sperry RW: Neural basis of spontaneous optokinetic responses produced by visual inversion. *J Comp Physiol Psychol* 43: 482-489, 1950.
- 30) Shidera M, Kawano K, *et al.*: Inverse-dynamics model eye movement control by Purkinje cells in the cerebellum. *Nature* 365: 50-52, 1993.
- 31) Gomi H, Shidera M, *et al.*: Temporal firing patterns of Purkinje cells in the cerebellar ventral paraflocculus during ocular following responses in monkeys I. Simple spikes. *J Neurophysiol* 80: 813-831, 1998.
- 32) Kitazawa S, Kimura T, *et al.*: Cerebellar complex spikes encode both destinations and errors in arm movements. *Nature* 392: 494-497, 1998.
- 33) Kawato M, Furukawa K, *et al.*: A hierarchical neural-network model for control and learning of voluntary movement. *Biol Cybern* 57: 169-185, 1987.
- 34) Libet B, Wright Jr EW, *et al.*: Subjective referral of the timing for a consciousness sensory experience; A functional role for the somatosensory specific projection system in man. *Brain* 102: 193-224, 1979.
- 35) 前掲書18), pp147-165.
- 36) Ellis RR, Lederman SJ: The "golf-ball" illusion: Evidence for top-down processing in weight perception. *Perception* 27: 193-202, 1998.
- 37) 山鳥 重: 神経心理学コレクション. 記憶の神経心理学. 医学書院, 2002, pp152-172.
- 38) Butler D, Anderson GB, *et al.*: The influence of load knowledge on lifting technique. *Ergonomics* 36: 1489-1493, 1993.
- 39) Johansson RS, Westling G: Tactile afferent signals in the control of precision grip. In: Jeannerod M (ed): *Attention and Performance*. Erlbaum, Hillsdale, 1990, pp677-713.
- 40) Jenmalm P, Johansson RS: Visual and somatosensory information about object shape control manipulative fingertip forces. *J Neurosci* 17: 4486-4499, 1997.
- 41) 瀬戸賢一: メタファー思考. 意味と認識のしくみ. 講談社現代新書, 1995, pp148-166.
- 42) Wolff P, Gentner D: Evidence for role-neutral initial processing of metaphors. *J Exp Psychol Learn Mem Cogn* 26: 529-541, 2000.
- 43) Cytowic RE: 共感覚者の驚くべき日常. 形を味わう人, 色を聴く人. 山下篤子 (訳), 草思社, 2002, pp288-293.
- 44) Gossenbacher PG, Lovelace CT: Mechanisms of synesthesia: cognitive and physiological constraints. *Trends Cogn Sci* 5: 36-41, 2001.
- 45) 前掲書37), pp2-25.

〈Abstract〉

**Perception of Object Size and Internal Model that Influence
the Control Process for Lifting**

Shu MORIOKA, RPT, PhD

Department of Physical Therapy, Faculty of Health Science, Kio University

Hidetoshi TABAOKA, RPT

Department of Rehabilitation, Atago Hospital

Yasunori KATAOKA, RPT

Medical Science Course, Kochi Medical Graduate School

Akira OCHI, RPT

Faculty of Rehabilitation, Seijoh University

Fumio YAGI, PhD

Department of Behavioral Neuroscience, Kochi Medical School

The present study aims to verify the perception of object size and the internal model that influence the control process for lifting. Twenty healthy females participated in the study. Two containers of the same weight, but unequal sizes (large and small) were prepared. Two containers were lifted alternately in 5 trials. Using a surface electromyography, activities of trapezius muscle, deltoid muscle, biceps brachii muscle, and brachioradialis muscle were recorded while lifting the container and the integral values were calculated for one second from the start of lifting. After each trial, the subjects' feeling about difference in weight and their prediction of weights before lifting were described. In the first trial, when lifting the small container, a significant increase was observed in biceps brachii muscle and brachioradialis muscle in group A (starting with the large container). And when lifting the large container, a significant decrease was observed in deltoid muscle and biceps brachii muscle in group B (starting with the small container). From the second to the fifth trials: the difference got smaller with trial in both group A and group B. After the first trial, most subjects determined the small container was heavy. Also, before lifting, most subjects predicted the large container would be heavy because of the difference in size. It can be explained that those results were obtained because; 1) the subjects predicted the small container would be light from the perception of object size and internal model, but 2) the predictions were cross-checked and modified by the sensory feedback on their subjective weight.