TVRSJ Vol.19 No.4 pp.449-456, 2014

基礎論文

前腕圧迫による重量感提示時の上肢筋活動

満田 隆[*1]　　田中 伸治[*2]

Forelimb Muscle Activity When Presenting a Weight Sensation by Placing Pressure on a Forearm

Takashi Mitsuda[*1] and Shinji Tanaka[*2]

Abstract --- Applying constrictive force on the forearm using an air pressure cuff creates a weight sensation. To identify the source of phantom sensation, we compared the weight sensation and EMGs of the forelimb between when a wrist joint was rotated, an elbow joint was rotated, and both the joints were rotated. The result showed that participants did not felt the weight sensation when only a wrist joint was rotated. Increased activity of biceps brachii by placing pressure on the distal part of a forearm indicates that neither a mechanical constraint of a wrist joint rotation nor a constraint of forearm muscles by the cuff caused the weight sensation.

Keywords: force display, haptic interface, muscle activity, wearable system

1 はじめに

力覚提示装置は，ロボットのインタフェースやアミューズメント，教育，デザインなどさまざまな分野で応用されている．力覚提示は一般的に，使用者がロボットアームの先端を把持して，ロボットの駆動力によって力覚が提示される装置や，モーターで動くワイヤに取り付けられたハンドルを介して力覚が提示される装置を用いて行われることが多い．これらの装置では，装置を使用するために必要な事前準備（装置を使用者へ装着する作業やキャリブレーション）が不要であるため，誰もが簡単に使用できる．しかし，力覚を提示できる場所は，床や机上に固定された装置の可動範囲に限られる問題があった．これに対して，外部環境に固定することなく使用できる非接地型の力覚提示装置が多く提案されている[1]．非接地型の力覚提示装置は，把持型と身体装着型に分けることができる．

把持型としては，フライホイールによるジャイロモーメントを用いた装置[2]や，装置内部で運動するおもりの慣性力と知覚の非線形性を利用して牽引力や重量感を提示する装置[3,4]などが開発されている．これらの装置は把持するだけで利用できる長所がある反面，力覚の提示が必要ないときも，常に装置の重量が手にかかる問題がある．

つぎに身体装着型としては，外骨格型のロボットアームを上肢に装着する装置が古くから開発されている[5]．また，ロボットアームの代わりに軽量な受動要素を上肢に装着する装置[6]も開発されている．しかし，これらの装置では，手に提示する力の偶力を胴体など他の身体部位で受けなければならない．そのため，偶力によって装置がずれたり，偶力が装着者に違和感を与えないように，装置を胴体など身体の広い範囲に固定したり，全身型の装置にして偶力を足から地面に逃がすなど，身体装着上の工夫が必要となる．

また，力を直接的に提示するのではなく，指先を圧迫したり，せん断力を与えることで擬似的に力覚を提示する装置も開発されている[7-9]．これらの装置は小型で身体装着に適しているが，指先のみへの力提示であるため，腕を使って物体を持ち上げる際に上肢の筋で知覚される重量感は生じないと考えられる．

これに対して満田は空気圧カフを前腕の遠位部に装着して圧迫すると，重量感や力覚を疑似的に提示できることを示した[10]．前腕圧迫に用いる空気圧カフは軽量であるので，装置の重量がユーザの運動感を妨げることがない．カフを手に巻くだけなので装着も容易である．また，前腕の圧迫と手掌の圧迫を併用すると，より自然な感覚の力覚が提示できることを示した[11]．このことは，手指や手掌の圧迫だけでは提示できない上肢の筋で知覚される力覚が，前腕の圧迫によって生成される可能性を示している．しかし，指先や手掌の圧迫による力覚提示が実際に物体を把持するときの指や手掌にかかる圧力を模擬するのに対して，物体把持時に圧力のかかることのない前腕の圧迫が，なぜ力覚を生起するのかについては明らかにされていない．

そこで本研究では，前腕圧迫により重量感が生じるメカニズムの解明を目指して，1.前腕圧迫が上肢の手関節と肘関節のどちらに影響を与えて重量感を生成して

*1 立命館大学情報理工学部
*1 College of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University
*2 立命館大学大学院情報理工学研究科
*2 Graduate School of Information Science and Engineering, Ritsumeikan University

いるか，2.前腕圧迫により上肢の筋活動が変化するか，の二点を調査した．

手掌を上に向けて物を持ち上げる場合には，物体の重量によって手関節と肘関節に回転モーメントが生じる．図 1 に示すように，手関節を回転させる筋は前腕にあるため，カフの圧力によって筋が圧迫されて手関節回転に影響すると考えられる．一方，肘関節を回転させる筋は上腕にあるためカフとは接触しておらず，肘関節回転には直接的な影響はないと考えられる．

そこでカフの圧迫が手関節のみに影響を与えて重量感を生成しているかを検証するために，手関節のみを回転させる運動，肘関節のみを回転させる運動，手関節と肘関節の両方を回転させる運動のそれぞれにおいて，前腕遠位部の圧迫で生じる重量感を心理物理実験によって計測した．つぎに 3 つの運動において，実際に物体を持ち上げるときに生じる筋活動と，前腕を圧迫したときの筋活動を比較するために，図 1 に示す上肢の 5 つの筋の表面筋電を計測した．

本論文では心理物理実験の結果と，筋電計測の結果を示したのちに，両実験の結果から前腕圧迫によって生じる筋活動の変化と重量感の関係を考察する．

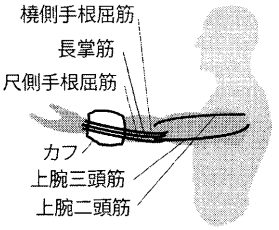

図 1 上肢の筋配置

Fig.1 Arrangement of upper limb muscles

2 重量感評価実験

2.1 実験方法

図2に示す重量提示装置を用いて，手関節の屈曲運動，肘関節の屈曲運動，手関節と肘関節の屈曲運動の3種類の運動で前腕圧迫により生じる重量感を評価した．以下，本論文ではそれぞれの運動条件を“手条件”，“肘条件”，“手肘条件”と呼ぶ．

重量提示装置のバー(アクリルパイプ，直径 20mm，長さ150mm，質量20g)がワイヤ(ナイロン，直径0.3mm)を介しておもりに接続され，バーを上下に動かすことでおもりの重量が知覚できる．被験者の両腕の前腕遠位部に，市販の血圧計用カフ(オムロン(株)，HEM-CUFF-S，幅 12cm，質量 140g)を手掌に接触しないように装着し，利き手のカフにのみ圧力を加えて前腕を圧迫した(図3参照)．被験者には，非利き手で重量提示装置のバーを動かしておもりの重量を知覚してもらい，利き手で重量提示装置と同じ素材，形状，質量のバーを握って，無負荷の状態で非利き手と同じ運動を行い，両者の感覚を比較してもらった(図 4 参照)．

手条件では，前腕を台座の上に載せて動かさないようにしながら，手を水平な状態から 40° 屈曲するよう手関節の回転だけでバーを上方に動かしてもらった(図2(a)参照)．肘条件では，肘関節が伸展して手が下方にある状態から，肘関節のみを 90° 屈曲してもらった(図2(b)参照)．このとき，手関節が回転しないように医療用ギプス材料で製作した手首関節固定具(質量100g)で手首を固定した(図 5 参照)．手肘条件では肘条件と同じ初期状態から，手関節と肘関節を自然に動かして，肘関節が 90° 屈曲するまでバーを上方に動かしてもらった(図 2(c)参照)．いずれの条件でも，被験者は椅子に深く腰掛けて上体を鉛直状態に保ち，肩関節を動かさないようにしてもらった．

手条件と手肘条件では，カフに圧力を加えないときには前腕に圧力がかからないよう，カフを皮膚と軽く密着するように前腕に巻きつけて固定した．肘条件では手首関節固定具の上から，同じく軽く巻きつけて固定した．カフの圧力は圧力センサ(KEYENCE, AP-34A, 表示分解能 0.2kPa)を用いて計測し，精密空圧レギュレータ(SMC, IR1000-01)によって手動で調節した．空気圧源にはエアコンプレッサーを用いた．

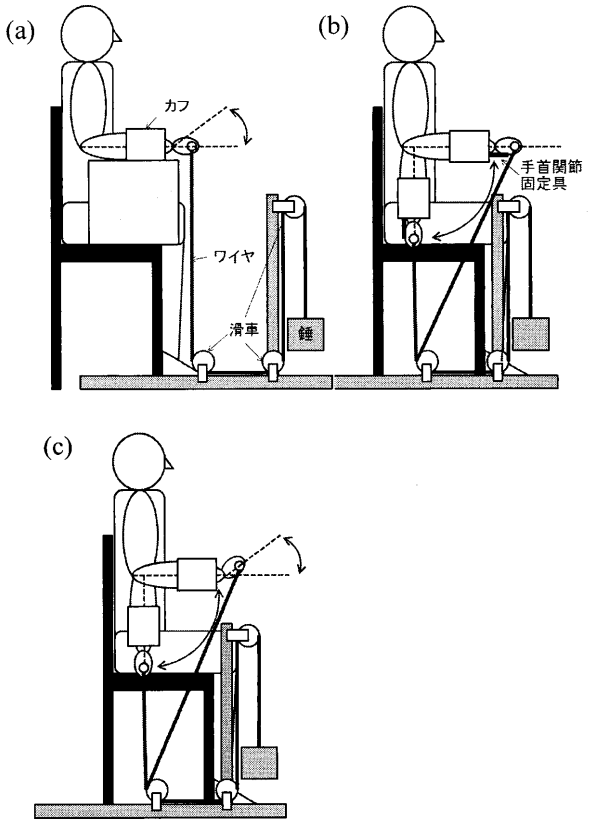

図 2 重量提示装置の構成 (a) 手条件 (b)肘条件 (c) 手肘条件

Fig.2 Configuration of a weight display system (a) hand condition (b) elbow condition (c) hand-elbow condition

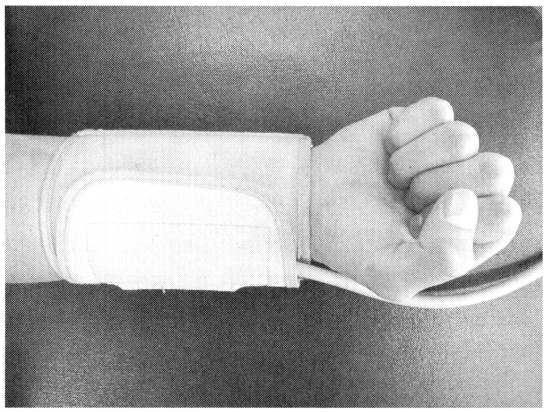

図 3 前腕に取り付けた血圧計用カフ
Fig.3 Blood pressure cuff attached on a forearm

図 4 重量感評価実験
Fig.4 A test for evaluating weight sensation

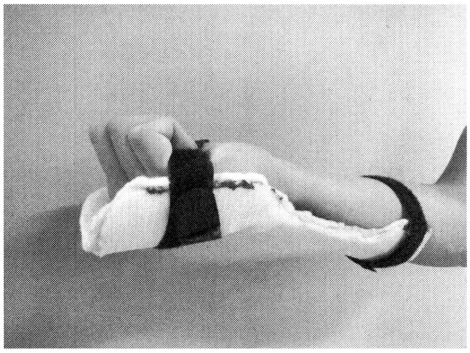

図 5 手首関節固定具
Fig.5 Fixation device for a wrist joint

被験者には右手と左手を交互に被験者のペースで自由に上げ下げを繰り返してもらい，どちらが重いかを答えてもらいながら，左右の重さが等しいと感じるまで上下法でおもりを 10g ずつ調整した．カフの圧力は 4kPa,6kPa,8kPa の 3 種類とし，圧力の提示順序をランダムに変えながら 4 回繰り返し，合計 12 試行の計測を行った．各試行では，まずカフを加圧して各圧力に設定したのちに計測を行った．計測中，カフの圧力は設定値の±0.2kPa に収まっていた．また，1 試行終了する毎にカフの圧力を大気圧に戻し，約 2 分間の休憩をはさんで疲れの影響が出ないようにした．以上の計測を 3 つの運動条件について順序効果の影響が生じないよう被験者毎に順番を変えて行った．

被験者は男性 8 名(23.9±0.9 歳)で，右が利き手の被験者は 6 名，左が利き手の被験者は 2 名であった．利き手は普段ボールを投げるときに使う手を口頭で被験者に答えてもらうことで定めた．

2.2 結果

被験者毎にカフの圧力とおもり質量の関係を求めた．各条件の結果を図 6 に示す．いずれの条件においてもすべての被験者でカフの圧力が大きいほどおもりの質量は大きかった．また，同じカフの圧力でも重量感が等しいと評価されたおもりの質量には個人差があることがわかった．個人差が生じた原因としては，腕や筋の形状の違いによる圧迫状態の差や，知覚感度の差などが考えられる．

これらの結果は，先の研究[10]で前腕に直接おもりを吊り下げて重量感を評価した実験結果と一致する．しかし，本実験で知覚された重量感は先の実験で知覚された重量感(2kPa, 430g; 4ka, 760g; 6kPa, 1070g)と比べて大変小さかった．手で物体を持ったときの重量感は，手掌にかかる圧力による感覚と，上肢の筋などで知覚される感覚が複合したものと考えられる．先の研究[10]では手掌に刺激を与えず，前腕を圧迫した腕と，前腕におもりを吊り下げた腕で重量感を比較したのに対して，本研究では，前腕を圧迫して手を動かした感覚と，おもりと繋がったバーを握って動かした感覚を比較した．重量を知覚する際には手掌にかかる圧力が大きな情報源となっていると考えられるが，本実験ではおもりを持つ手掌に圧力がかかり，前腕圧迫側の手掌には圧力がかからないことから，先の研究に比べて重量感が小さくなったと考えられる．前述したように，前腕と手掌を同時に圧迫することで，手掌のみを圧迫したときよりも自然な力覚が生じることが先の研究[11]により示されている．しかし，手掌を圧迫すると，被験者は手掌の圧力を用いて左右の手の感覚を比較すると考えられるので，圧迫による重量感のみを計測するために，本実験では手掌の圧迫を用いなかった．

つぎに，手条件で知覚された重量感は肘条件または手肘条件と比べて有意に小さかった(repeated measures ANOVA, 手条件 vs. 肘条件:$F(1,7)=20.4$, $p<.01$; 手条件 vs. 手肘条件:$F(1,7)=22.2$, $p<.01$)．一方，肘条件と手肘条件では重量感に有意な差はなかった(repeated measures ANOVA, $F(1,7)=1.9$, $p=.21$).

本実験では，肘条件で用いた手首関節固定具の質量や取り付けベルト，手首関節固定具による前腕の圧迫状態の変化などが肘条件の重量感に影響した可能

性がある．また，手条件と他の二つの条件では，ワイヤの動かし方が異なることから，同じ質量のおもりであっても慣性力やワイヤの傾きの違いにより牽引力は異なる．また，手条件では肘角度が変わると重量感も変化する可能性がある．したがって，各条件で得られた重量感の大きさの比較にはさらなる検証が必要である．

最後に，実験後にどのような感覚が得られたかを被験者に尋ねたところ，手条件では8人中7人が重量感とは違う圧迫による手首のだるさがあったと答えた．一方，肘条件と手肘条件では6人がおもりを持った手と同じ感覚が得られたと答え，2人が少し動かしにくい感じがしたと答えた．

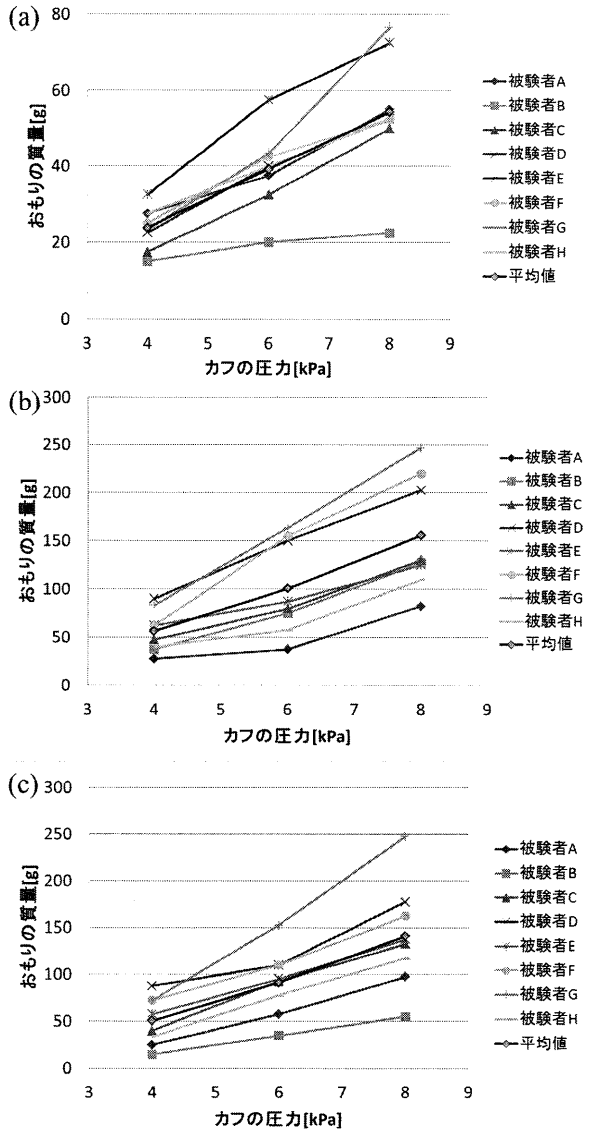

図6 前腕遠位部の圧迫によって知覚された重量
(a) 手条件 (b) 肘条件 (c) 手肘条件

Fig.6 Weight perceived by constrictive pressure on a distal forearm (a) hand condition (b) elbow condition (c) hand-elbow condition

3 筋電計測実験

3.1 実験方法

前腕遠位部の圧迫が筋活動に与える影響を調べるため，前節の重量提示装置を用いておもりを上下させるとき（重量実験）と，前腕を圧迫して無負荷の状態で同じ運動を行うとき（圧迫実験）の上肢の表面筋電を計測した．実験は前節の実験の被験者と同じ男性 8 名で行った．計測する筋は前腕腹側の筋(橈側手根屈筋，長掌筋，尺側手根屈筋)と上腕の筋(上腕二頭筋，上腕三頭筋)の 5 つとし，無線式生体アンプ（日本光電，WEB-5500）で計測した．重量実験と圧迫実験はともに利き手で行ってもらった．また，前節の実験と同じく，重量実験では加圧しないカフを装着して動作を行い，圧迫実験では重量実験と同じバーを握って無負荷の状態で動作を行ってもらった．

被験者には60bpmのメトロノームの音に合わせて，前節の実験の3種類の動作を行ってもらった．メトロノームは4拍子で3拍子目に高音が鳴り，高音が鳴るときに屈曲動作を行ってもらった．また，被験者間で動作に差が生じないよう，被験者の手首と肘に装着した角度センサ（Spectra Symbol, 4.5” Flex sensor）で計測した手関節と肘関節の角度をリアルタイムにグラフとしてディスプレイに表示し，被験者にはディスプレイを見ながら各関節が目標角度まで屈曲するように動作を行ってもらった．被験者には事前に練習を行ってもらってから筋電の計測を行った．

カフの圧力は0kPa, 4kPa, 6kPa, 8kPaの4種類とし，6回ずつ計測を行った．おもりの種類は手条件では20g, 40g, 60g の 3 種類とし，肘条件と手肘条件では 50g, 100g, 150gの3種類として，それぞれ6回ずつ計測した．計測は運動条件毎に重量実験と圧迫実験を連続して行った．すべての被験者は，まずカフの圧力が 0kPa の実験を行い，つぎに半数の被験者は 4kPa, 6kPa, 8kPa の圧迫実験ののちに重量実験を行った．残りの被験者は重量実験ののちに圧迫実験を行った．圧力の提示順とおもりの提示順は被験者毎にランダムに設定した．各被験者は3つの運動条件で重量実験と圧迫実験を同じ順序で行った．運動条件の順序は被験者毎に変えてカウンターバランスをとった．また，疲れや圧迫による感覚の変化の影響が出ないよう条件を変える毎に約 2 分間の休憩を挟んだ．

解析は屈曲時と伸展時の筋電積分値を各筋の最大随意収縮時の筋電積分値で正規化して行った．各筋の最大随意収縮時の筋電は実験の初めに計測した．

3.2 結果

3.2.1 手条件（屈曲時）

手条件で手関節を屈曲したときの筋電について，お

もりの質量と筋電の関係を図7に示す．エラーバーは被験者間の標準誤差を示す．おもりの質量，またはカフの圧力に対する筋電の変化を調べるために，Friedman's two-way ANOVA by ranks による検定を各筋に対して行った．各筋の棒グラフの上部の*印は，カフの圧力またはおもりの質量に対して筋電が有意に変化したことを示す(*, p<.05; **, p<.01; ***, p<.001)．また，各筋名の下に p 値を示す．

手首の屈曲を行う橈側手根屈筋，長掌筋，尺側手根屈筋のうち，橈側手根屈筋，長掌筋の筋電がおもりの質量によって有意に変化した．尺側手根屈筋は有意に変化しなかったが，上腕二頭筋と上腕三頭筋に比べて大きな筋電が見られた．一方，肘関節の屈曲を行い手関節には直接的に関係しないはずの上腕二頭筋の筋電も有意に変化した．筋活動の大きさは小さいので，手関節の屈曲に影響を受けて筋電が変化したか，無意識に上腕にも力が入ったためであると考えられる．

つぎにカフで前腕を圧迫したときの圧力と筋電の関係を図8に示す．おもりの質量に対して有意な変化を示した3つの筋のうち，長掌筋はカフの圧力に対しても有意に変化した．他の筋では圧力に対して有意な変化は見られなかった．

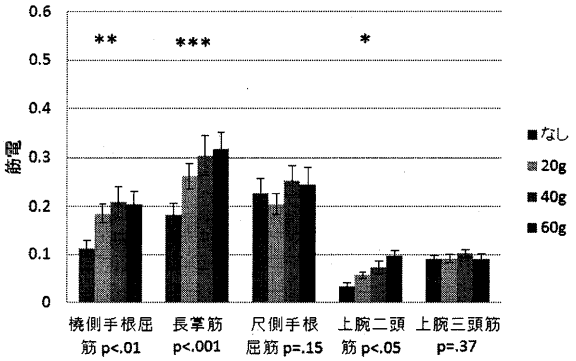

図 7 おもりを引き上げたときの筋電(手条件，屈曲運動)

Fig.7 EMGs when pulling up a weight (hand condition, flexion movement)

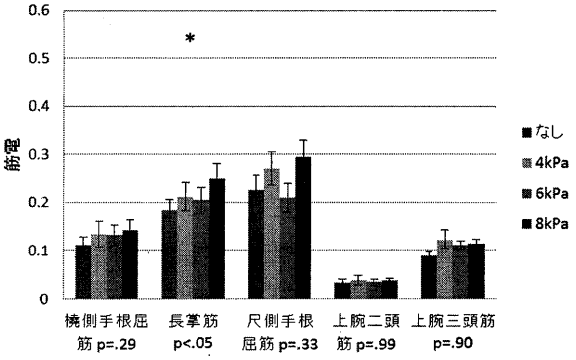

図 8 前腕を圧迫したときの筋電(手条件，屈曲運動)

Fig.8 EMGs when placing pressure on a forearm (hand condition, flexion movement)

3.2.2 肘条件(屈曲時)

肘条件で肘関節を屈曲したときの筋電について，おもりの質量と筋電の関係を図9に示す．肘関節の屈曲を行う上腕二頭筋の筋電はおもりの質量に対して有意に変化した．また，長掌筋の筋電にも有意な変化が見られたが，筋活動量は小さかった．手条件の場合と同じく肘関節の屈曲に影響を受けて筋電が変化したか，無意識に手首にも力が入ったためであると考えられる．

つぎにカフの圧力と筋電の関係を図 10 に示す．おもりの質量に対して有意な変化を示した上腕二頭筋の筋電は平均値で見ると 4kPa の場合を除いて，圧力とともに大きくなる傾向が見られたが，統計的には圧力による有意な変化はなかった．

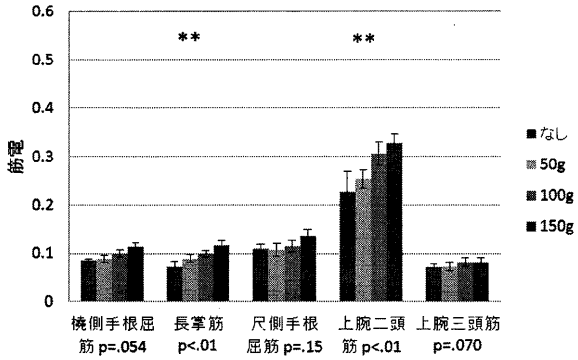

図 9 おもりを引き上げたときの筋電(肘条件，屈曲運動)

Fig.9 EMGs when pulling up a weight (elbow condition, flexion movement)

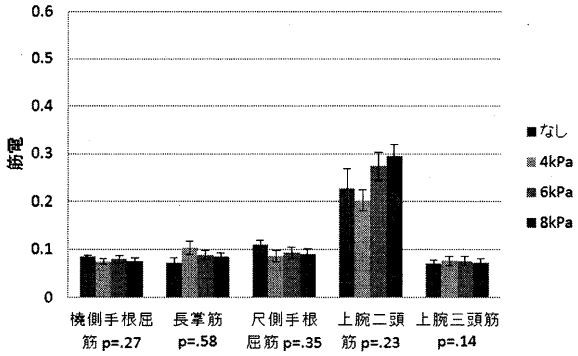

図10 前腕を圧迫したときの筋電(肘条件，屈曲運動)

Fig.10 EMGs when placing pressure on a forearm (elbow condition, flexion movement)

3.2.3 手肘条件(屈曲時)

手肘条件で手関節と肘関節を屈曲したときの筋電について，おもりの質量と筋電の関係を図 11 に示す．手関節の屈曲を行う 3 つの筋のうち，尺側手根屈筋のみでおもり質量に対する有意な変化が見られた．また，肘関節の屈曲を行う上腕二頭筋の筋電は平均値では圧力とともに増加したが，統計的に有意な変化はなかった．

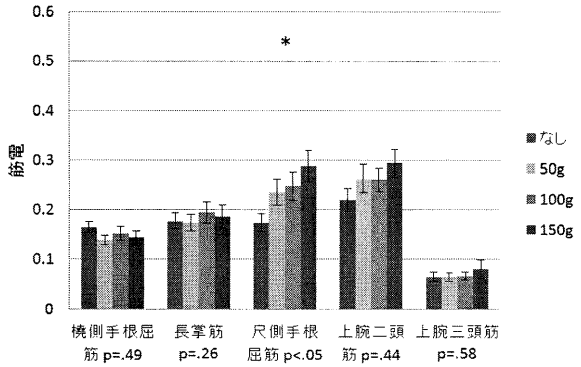

図 11 おもりを引き上げたときの筋電(手肘条件, 屈曲運動)

Fig.11 EMGs when pulling up a weight (hand-elbow condition, flexion movement)

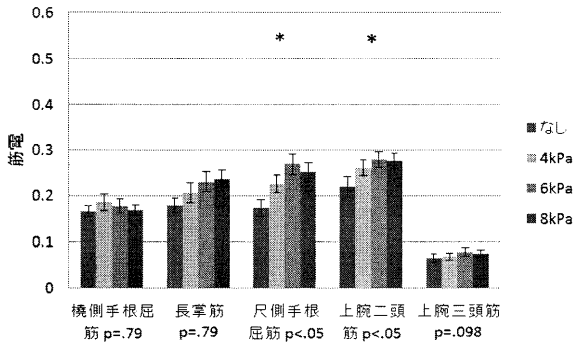

図 12 前腕を圧迫したときの筋電(手肘条件, 屈曲運動)

Fig.12 EMGs when placing pressure on a forearm (hand-elbow condition, flexion movement)

つぎにカフの圧力と筋電の関係を図 12 に示す. おもりを引き上げる場合と同じく, 尺側手根屈筋と上腕二頭筋の筋電が圧力とともに上昇し, 二つの筋電は圧力に対して有意に変化した.

3.2.4 伸展時

手肘条件における伸展時の筋電を図 13 と図 14 に示す. 重量実験と圧迫実験のいずれにおいても, 上腕三頭筋を除いて, 伸展時の筋電は屈曲時に比べて小さかった. 圧迫実験において橈側手根屈筋の筋活動が圧力に対して有意に変化したが($p<.05$), 変化量は小さかった. 手条件と肘条件においても伸展時の筋活動は屈曲時に比べて小さく, 屈曲時のように, おもりの質量または圧迫圧力によって大きく変動する筋活動は見られなかった.

3.2.5 筋電と重量感の関係

前腕圧迫で重量感が生じている時の筋電が, おもりを引き上げたときの筋電と一致するかどうかを見るために, 前腕圧迫時の筋電と重量感の関係を, おもり引き上げ時の筋電と重量の関係と比較した. 前腕圧迫時の重量感は重量感評価実験の結果を用いた. 肘条件における上腕二頭筋, 手肘条件における尺側手根屈筋と上腕二頭筋について両者をプロットしたものを図 15 に示す.

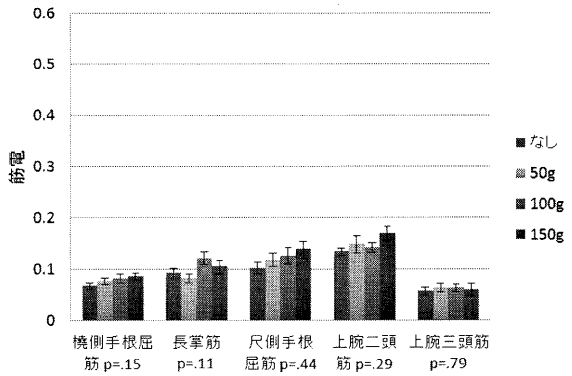

図 13 おもりを引き上げたときの筋電(手肘条件,伸展運動)

Fig.13 EMGs when pulling up a weight (hand-elbow condition, extension movement)

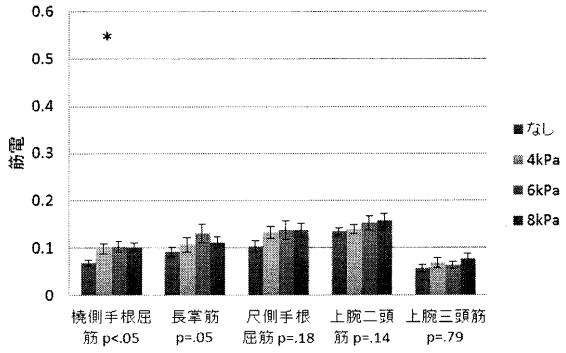

図 14 前腕を圧迫したときの筋電(手肘条件, 伸展運動)

Fig.14 EMGs when placing pressure on a forearm (hand-elbow condition, extension movement)

手肘条件における尺側手根屈筋と上腕二頭筋の筋電は, おもりを引き上げたときと前腕を圧迫して重量感を提示した場合とで, ほぼ同じ大きさの筋電が発生していることがわかる.

4 考察

本研究の目的は, 前腕圧迫により重量感が知覚されるメカニズムを明らかにするために, 1.手関節の回転運動と肘関節の回転運動のいずれが前腕圧迫の影響を受けているか, 2.前腕が圧迫されて重量感を知覚している際の上肢筋電が, 物体を持って実際の重量を知覚しているときの筋電と一致するか, を調べることであった.

まず前者については，手関節のみを回転する場合には重量感が得られず，肘関節か，手関節と肘関節の両方を回転する場合には重量感が得られることがわかった．この結果は，前腕遠位部に装着したカフが手関節の回転を機械的に拘束する，またはカフが前腕の腹側にある筋の運動を阻害して重量感を生じさせているのではないことを示している．

つぎに後者については，肘関節を屈曲させておもりを引き上げる際に活動する上腕二頭筋の活動が，前腕の圧迫によって増加することがわかった．この結果は前腕圧迫が手関節の回転ではなく，肘関節の回転に影響していることを示しており，重量感評価の実験結果と一致する．また，手関節のみを回転させる場合に，前腕圧迫によって前腕腹側にある橈側手根屈筋と尺側手根屈筋に有意な変化が生じず，長掌筋の筋電の変化量も小さかったことは，手関節のみの回転では重量感が生じなかった重量評価実験の結果と一致する．

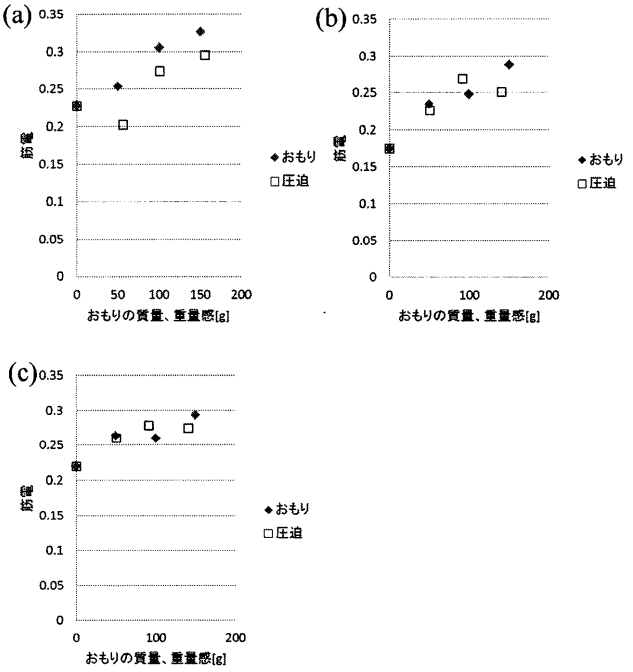

図 15 おもり引き上げ時の筋電と前腕圧迫時の筋電の比較 (a)肘条件，上腕二頭筋 (b)手肘条件，尺側手根屈筋 (c)手肘条件，上腕二頭筋

Fig.15 Comparison of EMGs between when pulling up a weight and placing pressure on a forearm (a)elbow condition, biceps brachii (b)hand-elbow condition, flexor carpi ulnaris (c)hand-elbow condition, biceps brachii

一方，手関節と肘関節を回転させた場合には前腕圧迫によって上腕二頭筋と尺側手根屈筋の筋活動が有意に増加した．手関節のみを回転させた場合には尺側手根屈筋の筋活動に有意な変化が生じなかったことから，手肘条件のときにだけ，カフが手関節を機械的に拘束したり，筋の運動を阻害したとは考えにくい．カフと接触しない上腕二頭筋の活動が増加したのと同様に，何らかの生理的作用によって尺側手根屈筋の筋活動が増加したと推測される．

筋活動の増加が手関節や肘関節の回転トルクの増加を伴っているとすると，各関節にかかる負荷は前腕圧迫によって変化しないので，増加した回転トルクを相殺する抗力が拮抗筋により働いていると考えられる．しかし，肘条件と手肘条件のいずれにおいても，上腕二頭筋の拮抗筋である上腕三頭筋の筋活動は前腕圧迫によって変化しなかった．この結果は先の研究[12]による下腿圧迫による下肢筋電の計測結果と一致する．先の研究では，本研究と同じくカフで下腿を圧迫することによって足を引き上げる感覚を提示している際に，カフと接触しない大腿二頭筋の筋活動が増加した．しかし，一方で，その拮抗筋である大腿直筋の筋活動は増加しなかった．肘関節の回転には上腕筋や肘筋なども作用するため，今回計測しなかった筋活動が変化して上腕二頭筋の筋活動増加による回転トルクを相殺した可能性がある．

以上は筋電に比例する筋張力が発生したことを前提とした考察であるが，血流阻害による筋疲労などの影響で，筋電は増加しても筋張力には変化が生じていなかった可能性もある[13][14]．また，圧迫による皮膚の機械的受容器への刺激が手の力覚を変化させて[15]，それに伴い筋活動が変化した可能性もある．このように筋電の変化が生じた原因には多くの可能性があり特定できていない．しかし，おもりを引き上げたときの筋電の大きさと，同じ重量感を知覚しているときの筋電の大きさはほぼ一致したので，筋電の増大が重量感と関係している可能性は大きいと考える．

本研究の重量感評価実験で知覚された重量は先の研究で計測された重量感に比べて大変小さかった．前述したように，手掌の圧力の有無が重量感に影響していると考えられるので，今後は手掌の圧力の有無による上肢の筋電（とくに上腕の筋電）を計測することで，重量感の知覚と筋活動の関係を明らかにしていきたい．また，今回の実験では手関節と肘関節のみに着目したが，肩関節の重量感への寄与も考えられることから，肩関節に関わる筋への影響調査も今後の課題である．

5 まとめ

本研究では，これまで全く未知であった前腕圧迫により重量感が生じるメカニズムの解明に向けて，手関節と肘関節の重量感生成への寄与を調べた．実験の結果，前腕遠位部を圧迫することによって重量感が知覚される現象は，手関節だけの回転では生じず，肘関節を回転させる場合に生じることが示された．また，前腕を圧迫して重量感を知覚している時には，おもりを引き上げるときに生じる上肢筋電と似た筋電が生じることが示さ

れた．今後は，前腕を圧迫するカフと接触していない上腕二頭筋の筋活動がなぜ増加したのか，そのメカニズムの解明が必要である．

参考文献

[1] 黒田嘉宏,仲谷正史,長谷川晶一,藤田欣也: 物理的刺激に基づく疑似力覚の提示と計算に関する研究動向, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 16(3), 379-390 (2011)

[2] 吉江将之,矢野博明,岩田洋夫: ジャイロモーメントを用いた力覚呈示装置, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 7(3), 329-337 (2002)

[3] 雨宮智浩, 安藤英由樹, 前田太郎: 知覚の非線形性を利用した非接地型力覚惹起手法の提案と評価, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 11(1), 47-57 (2006)

[4] 雨宮智浩, 前田太郎: 非対称振動を伴う物体の挙錘により生成ざれる重量錯覚, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 13(1), 59-68 (2008)

[5] M.Bergamasco, B.Allotta, L.Bosio, L.Ferretti, G.Parrini, G.M.Prisco, F.Salsedo, G.Sartini: An arm exoskeleton system for teleoperation and virtual environments applications. Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1449–1454 (1994)

[6] 満田隆, 久下幸子, 若林将人, 川村貞夫: 粒子内蔵型機械拘束要素の開発と身体装着型力覚呈示装置への応用, 計測自動制御学会論文集, 37(12), 1134-1139 (2001)

[7] 吉川恒夫, 菊植亮: 人間から人間への技能伝達のための指先圧迫機能を付加した力覚提示装置, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 5(1), 803-810 (2000)

[8] 稲葉豪, 藤田欣也: 指先圧迫による擬似反力提示装置の提案と試作, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 12(1), 95-102 (2007)

[9] 南澤孝太,深町聡一郎,梶本裕之,川上直樹,舘障: バーチャルな物体の質量および内部ダイナミクスを提示する装着型触力覚ディスプレイ, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 13(1), 15-23 (2008)

[10] 満田隆: 手首圧迫による擬似力覚の提示, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 12(4), 577-584 (2007)

[11] 満田隆: 手首と手掌圧迫による擬似力覚提示, 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 3B3-1, 979-980(2008)

[12] 満田隆, 芳谷博雄: 下腿遠位部圧迫による重量感の提示, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 18(3), 415-420 (2013)

[13] Y.Takarada, H.Takazawa, Y.Sato, S.Takebayashi, Y.Tanaka, N.Ishii: Effects of resistance exercise combined with moderate vascular occlusion on muscular function in humans. Journal of Applied Physiology, 88(6), 2097–106 (2000)

[14] M.Wernbom, J.Augustsson, R.Thomeé: Effects of vascular occlusion on muscular endurance in dynamic knee extension exercise at different submaximal loads. Journal of Strength & Conditioning Research, 20(2), 372–377 (2006)

[15] H.Chang, K.Chou, J.Lin, C.Lin, C.Wang: Immediate effect of forearm Kinesio taping on maximal grip strength and force. Physical Therapy in Sport 11, 122-127 (2010)

(2014 年 6 月 9 日受付)

[著者紹介]

満田 隆（正会員）

1998 年大阪大学大学院基礎工学研究科修了．2001 年岡山大学医学部助手，2004 年立命館大学情報理工学部准教授，2008 年同教授，現在に至る．選好判断過程および視覚運動変換に関する研究に従事．博士(工学).

田中 伸治（非会員）

2014 年立命館大学大学院情報理工学研究科修了．博士前期課程在籍中に本研究に従事．修士(工学).