

カフ圧による上肢虚血時の身体イメージの急激な変化

乾 信之*, 升本 絢也**

(キーワード: 幻肢, 大径有髄線維, von Frey test)

I. 緒言

様々なスポーツ場面において動作目標の正確な位置を同定するために、視覚情報は重要な働きを担っている。それに対して、四肢の長さ・大きさと同様に四肢の位置関係を視覚的に確認せずに、我々は動作を遂行している。四肢の位置関係は筋、関節、皮膚からの求心性感覚情報と運動指令の遠心性コピーとの複合的な情報が中枢で情報処理されて知覚される(総説として Gandevia, 1996)。身体の大きさや四肢の位置関係は頭頂連合野を中心として形成され、Head and Holmes (1911-1912) によって身体図式 (body schema) と呼ばれた。一方、身体図式が意識化されたものを身体イメージ (body image) と称している。

手首伸筋の腱に対する振動刺激は手首の屈曲の運動錯覚を生じる (Goodwin et al., 1972)。これは、振動刺激によって伸筋の筋紡錘が興奮し、伸筋が伸展したように錯覚し、手首が屈曲したような運動錯覚を生じる。同様に、上腕二頭筋の腱を振動させると、腕が伸展したような運動錯覚を経験する。この時、手で自分の鼻に触れていると、腕の伸展に伴って自分の鼻が伸びいくかのような錯覚(ピノキオ錯覚)を経験する (Lackner, 1988)。このように、身体イメージは不変なものではなく、しかも感覚情報の入力がなくとも、複合的な情報によって簡単に修飾される。つまり、身体イメージは感覚情報と一対一の関係ではなく、高次に感覚情報を処理されたものであり、高速度の運動制御に役立つように常に更新されるものらしい。

したがって、身体イメージの可変性に関する先行研究に注目すると、Gross and Melzack (1978) の研究があり、彼らは健常な腕でもカフ圧を加えると無感覚になり、幻肢を実験的に作った。その結果、彼らは実際には伸展している腕がカフ圧に伴う末梢神経の麻痺に伴って屈曲すると報告した。また、腕神経叢を麻酔で遮断して幻肢を作ると、被験者は実際の上肢の位置と異なる場所に幻肢を感じ、その幻肢が自然と動いたと報告した (Melzack and Bromage, 1973)。幻肢は一般的に習慣的な位置と姿勢を採用し、四肢切断前の姿勢に類似した姿勢をとるといわれている (Ramachandran and Hirstein, 1998)。しかし、幻肢の姿勢の知覚研究は定性的なもののみであり (総説として Giummarra et al., 2007)、十分な定量化がなされていない。

一方、感覚神経は大径有髄線維、小径有髄線維、小径無髄線維に伝統的に分類される。そして、局所麻酔薬は最初に小径無髄線維を遮断し、最後に大径有髄線維を麻痺させる。それに対して圧迫によって止血すると、まず大径有髄線維が麻痺し、触覚と圧覚が同時に感じなくなり、さらに圧が高まって初めて小径無髄線維が伝導遮断に陥る (教科書として Keidel, 1975)。さらに、身体部位の大きさの知覚は痛覚に関与し、関節角度の知覚は筋と関節の受容器からなる固有感覚が関係しているといわれているが (Calford and Tweedale, 1991; Paqueron et al., 2003)、検討の余地が充分残されている。

したがって、カフ圧による上肢の虚血時に手指と手首の関節角度の知覚がどのように変化し、どの末梢神経がその変化に関与しているかを検討した。本研究は手の関節角度の知覚がカフ圧を加える直前の姿勢に依存して変化することを証明し、関節角度の知覚は大径有髄線維の麻痺に対応して変化することを証明する。つまり、四肢の関節角度の情報は身体図式の形成に用いられ、その図式は運動制御のために時々刻々と更新されていることを間接的に証明する。さらに、本研究の特徴は関節が動く手の木製モデルを用い、手指と手首の関節角度の知覚変化を定量化することである。

*鳴門教育大学生活・健康系コース (保健体育)

**鳴門教育大学大学院教科・領域教育専攻生活・健康系コース (保健体育)

II. 実験方法

1) 被験者

被験者は神経学的な病気がない10名の健康な男女成人である（年齢24–54歳）。すべての被験者から実験に関する同意を得た。また、この研究は Prince of Wales Medical Institute の倫理委員会から承認を得た。

2) 手続き

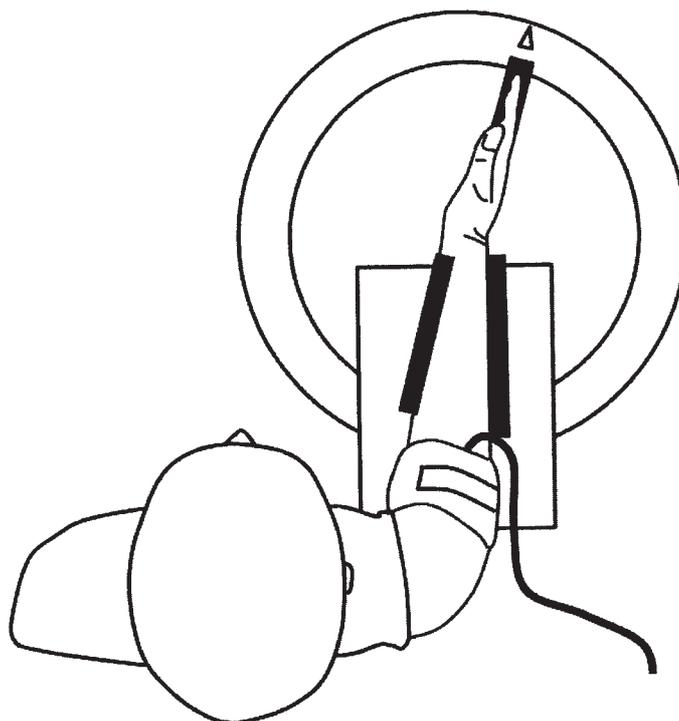


Fig.1 Experimental setup. Subjects were comfortably seated with hand held in a manipulandum that rotated in the flexion–extension plane about the wrist. During the main part of the study, the right forearm, hand and apparatus were covered so that they could not be seen by the subject. A wide cuff was positioned on the upper arm and connected to a regulated pressure source so that the cuffs could be simultaneously inflated to 300 mmHg in less than 1 s.

実験1では実験開始前10分間と実験中の手指と手首が極限まで伸展または屈曲されて固定され（図1）、屈曲位と伸展位の実験は別々の日に行った。実験中、被験者の右上腕部にカフ圧（300mmHg）を加え、肘の触覚と痛覚がなくなるまで圧を加えた（約40分間）。この時点で被験者の右手の運動は消失した。被験者が閉眼の状態、木綿のカーゼによる触覚検査、von Frey test（North Coast Medical, Inc., Morgan Hill, CA : USA）による触覚の閾値テストが拇指、手首、肘において、指の摘みによる痛覚検査が拇指と肘において3–5分の周期で行われた。その際、手の拇指、手首の近位部、肘の遠位部に直径1 cm以下の丸印をボールペンで付けた。触覚検査ではこれらの3箇所をランダムに触れて、どこに触れたかを被験者に口頭で答えさせた。von Frey testも3箇所をナイロン製の von Frey フィラメントでランダムに触れ、知覚できたかどうかを被験者に口頭で答えさせた。痛覚検査では験者が指で被験者の手首を除く2箇所をランダムに摘み、痛かったかどうかを被験者に口頭で答えさせた。

次に、被験者は右の手と前腕を紙箱で隠されたまま開眼し、関節が動く手の木製モデルを用いて幻肢の指と手首の関節角度の知覚変化を左手で再生した。このモデルの指は再生のために十分動かしたが、手首の可動性は再生に不十分であった。したがって、モデルの手首に針金のポインターを取り付け、被験者はこのポインターを用いて手首の角度の知覚変化を示した。その後、デジタルカメラ（Kodak 10X optical zoom, Easy share DX 6490, Tokyo, Japan）によって手のモデルの写真撮影を行った。

実験2では実験開始前10分間は手指と手首を屈曲位に固定したが、実験開始直前に伸展位に変え、幻肢の関節角度の知覚変化に及ぼす実験直前の姿勢変化の影響を検討した。その他の実験手順は実験1と同様である。

3) 装置と測定

上肢の虚血状態を作るために、Zimmer社(Dover, OH, USA)の止血システム(ATS-750, カフ圧力範囲: 50-475mmHg, 圧力精度: ± 5 mmHg)と止血帯(ATS750シングルカフ: 幅107mm, 長さ460mm)を用い、カフは300mmHgまで加圧した。この止血システムは四肢の外科手術を行う際に四肢の血流を一時的に止めるために使用するものであり、実験室内の空気を高性能圧縮ポンプによってカフに供給し、すべての制御は本体内部のマイクロプロセッサによって自動制御されている。

一方、手の美術用木製モデルにマジックで黒点が6箇所(示指の先端部, 遠位の指節間関節 DIP, 近位の指節間関節 PIP, 中手指節関節 MP, 中手骨底, 手首)付けられ、関節角度はソフトウェア Gimp (GNU Image Manipulation Program, freeware)を用いて計測した。モデルの指はすべて写真撮影されたが、関節角度の測定は示指のみで行った。例えば、モデル上の DIP の関節角度は示指の先端部, DIP, PIP の3点からなる角度とみなした。手首の角度は前腕と中手骨底の線を基準とし、鋭角は屈曲の方向, 鈍角は伸展の方向とみなした。

4) データ解析

カフ圧は肘の触覚と痛覚が消失するまで加えられたが、肘の触覚と痛覚が消失する時間は被験者によって異なり、28分から43分に分布した。したがって、データは40分間5分毎に標準化して分析した。

関節角度の知覚変化の統計的分析は4(関節) X 時間経過, 触覚の消失の分析は3(身体部位) X 時間経過, 痛覚の消失の分析は2(身体部位) X 時間経過の二要因の分散分析を用いた。さらに、2(触覚, 痛覚) X 2(拇, 肘) X 時間経過の三要因の分散分析を行った。主効果があった時には Tukey の HSD の検定によって、多重比較を行った。

Ⅲ. 結果

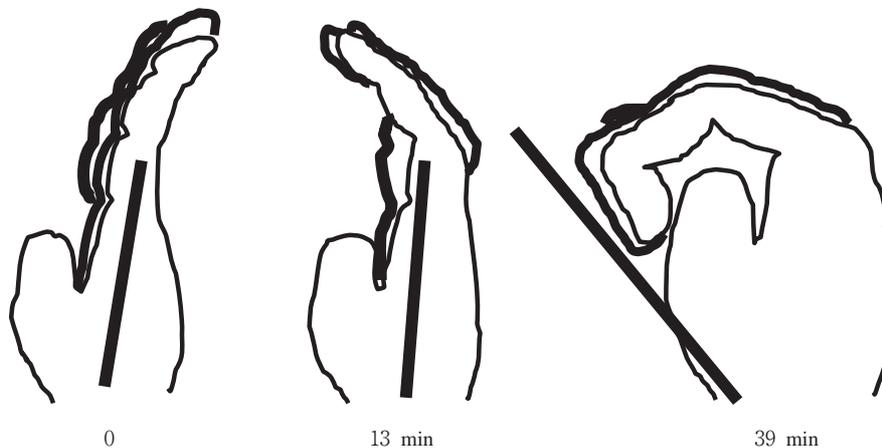


Fig.2 Changes in perceived joint angles using the wooden hand under the extension condition. A participant showed the perceived line of the knuckle of the index and the metacarpal base by moving pointer (thick straight lines) mounted in the wrist. Numbers showed passing times after the inflation of the cuff.

図3は伸展条件における幻肢の関節角度の知覚変化の平均値と標準偏差である。分析の結果、関節($p < 0.001$)と時間経過($p < 0.001$)に主効果がみられた。多重比較検定の結果、手首関節は他の関節よりも大きな角度に知覚された。4つの関節角度の知覚変化は時間経過と伴って伸展位から屈曲位へ変化した(図2参照)。特に、知覚された DIP, PIP, MP はカフ加圧後10分から25分まで急激に減少した。

図4は屈曲条件における幻肢の関節角度の知覚変化の平均値と標準偏差である。分析の結果、関節($p < 0.001$)と時間経過($p < 0.001$)に主効果がみられた。多重比較検定の結果、手首関節は他の関節よりも大きな角度に知覚された。4つの関節角度の知覚変化は時間経過と伴って屈曲位から伸展位へ変化した。特に、知覚された

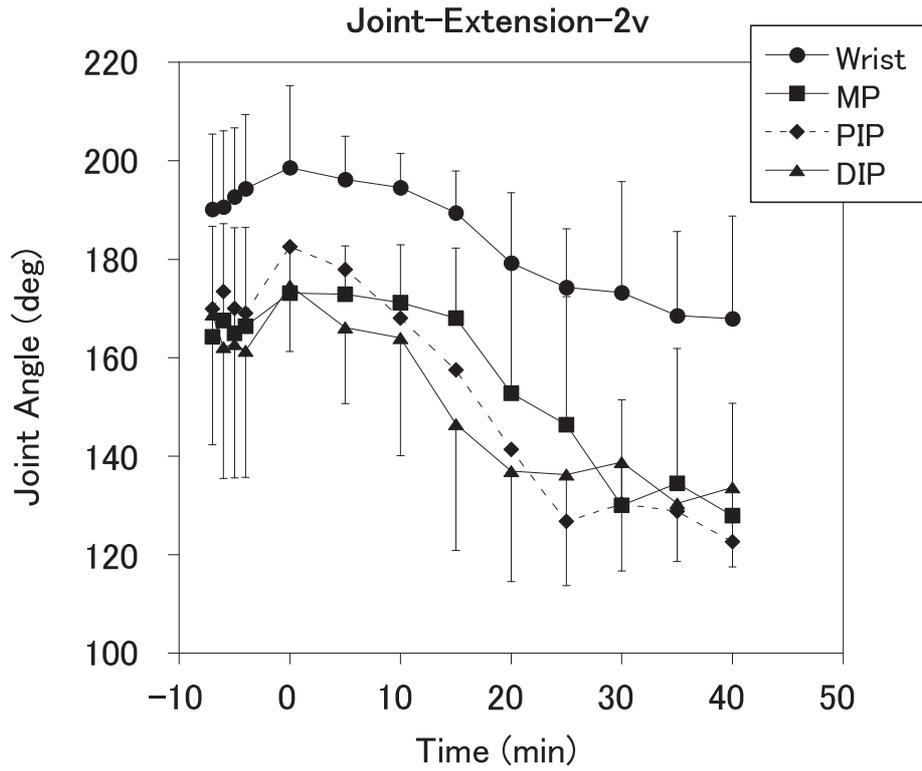


Fig. 3 Group data for the change in perceived joint angles of a phantom hand under the extension condition.

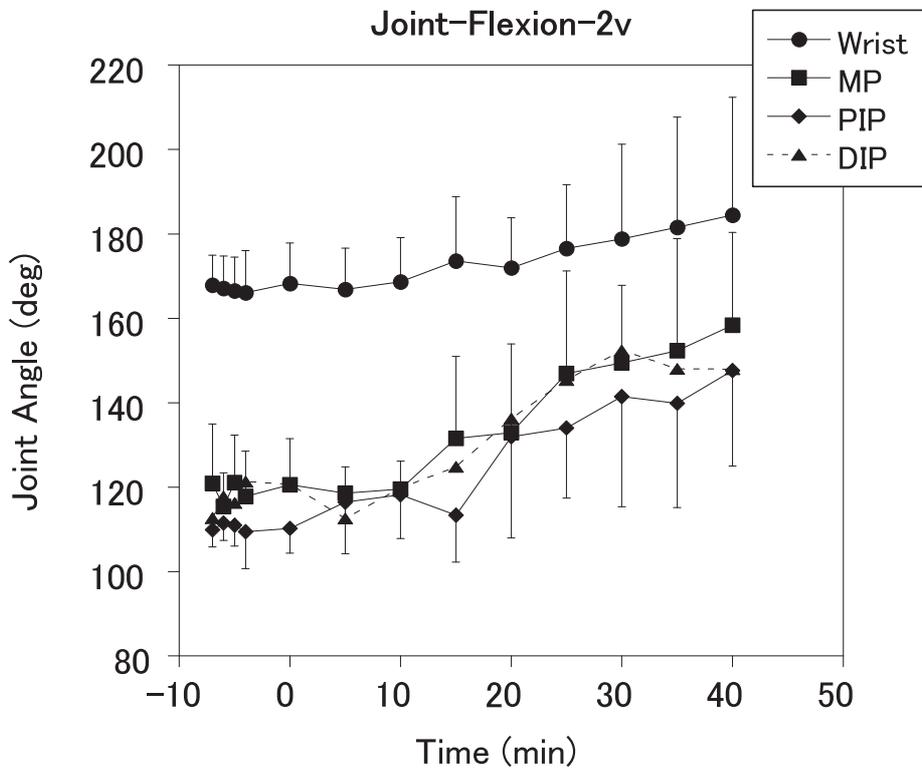


Fig. 4 Group data for the change in perceived joint angles of a phantom hand under the flexion condition.

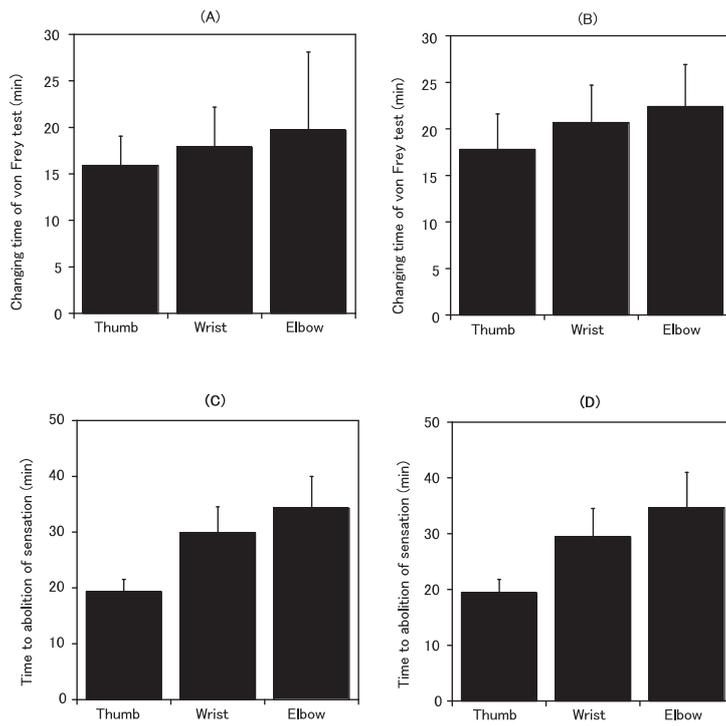


Fig.5 Group data for the changing time in von Frey test and the time to abolition of sensation elicited by touching by cotton under both the extension (A and C) and flexion (B and D) conditions.

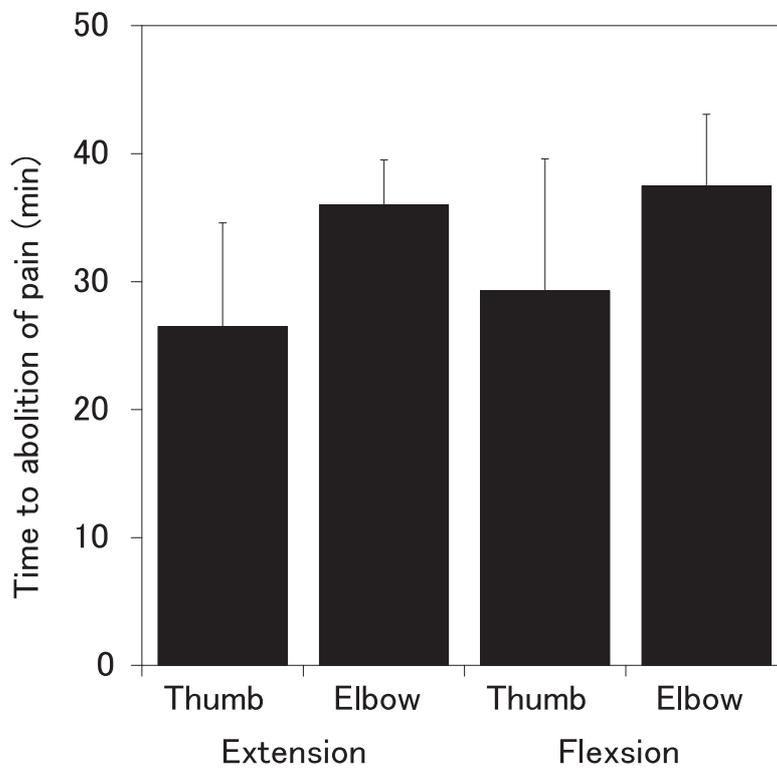


Fig.6 Group data for the time to abolition of pain elicited by firm pinching of the skin under both the extension and flexion conditions.

DIP, PIP, MP はカフ加圧後10分から25分まで増加した。

図5は伸展条件(A)と屈曲条件(B)の von Frey test において閾値変化の生じた時間の平均値と標準偏差である。伸展条件における拇指の閾値はカフ加圧後15.9分、手首のそれは17.9分、肘のそれは19.7分に変化し始めた。また、屈曲条件における拇指の閾値はカフ加圧後17.8分、手首のそれは20.7分、肘のそれは22.4分に変化し始めた。分析の結果、身体部位の主効果がみられた ($p < 0.05$)。多重比較検定によると、閾値変化の生じた時間は肘よりも拇指の方が早く、その閾値はカフ加圧後遠位から近位へ徐々に上昇した。

図5にはまた伸展条件(C)と屈曲条件(D)における触覚が消失する時間の平均値と標準偏差を示した。拇指、手首、肘の感覚はカフ加圧後それぞれ19分、30分、35分で消失した。分析の結果、身体部位の主効果がみられた ($p < 0.0001$)。多重比較検定によると、拇指は手首と肘よりも早く感覚の消失が生じた。つまり、触覚はカフ加圧後遠位から近位へ消失した。

図6は伸展条件と屈曲条件における痛覚が消失する時間の平均値と標準偏差を示した。伸展条件における拇指の痛覚はカフ加圧後26.5分、肘のそれは36.0分で消失した。また、屈曲条件における拇指の痛覚はカフ加圧後29.3分、肘のそれは37.5分で消失した。分析の結果、身体部位の主効果がみられた ($p < 0.0001$)。多重比較検定によると、拇指は肘よりも早く痛覚の消失が生じた。つまり、痛覚はカフ加圧後遠位から近位へ向かって消失した。さらに両条件共に、痛覚は触覚よりも遅れて消失した ($p < 0.01$)。“鋭い痛み”は小径有髄線維 ($A\delta$ 線維)で、“鈍い痛み”は小径無髄線維 (C 線維)で伝えられるといわれている(教科書として、Keidel, 1975)。カフ圧という方法から考えて、本実験で消失した痛覚はおそらく小径有髄線維によって伝えられていたものであるが、断定できない。

したがって、実験1はカフ加圧前の手の姿勢が幻肢の関節角度の変化に影響を与えることを示唆した。その時、幻肢の関節角度の知覚変化は拇指の触覚の麻痺に対応していた。

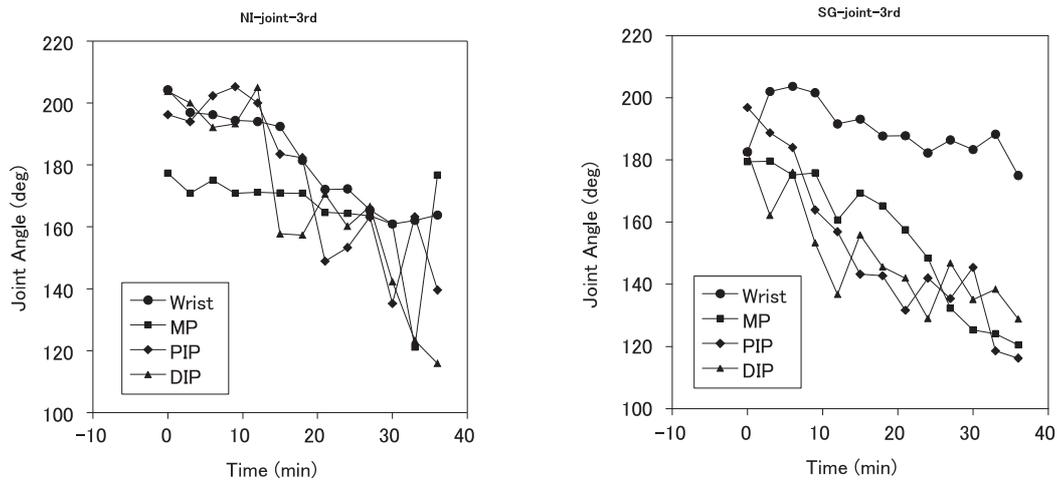


Fig.7 Changes in perceived joint angles of a phantom hand for two participants.

図7は実験2における2人の被験者の幻肢の関節角度の変化である。上図の被験者は拇指、手首、肘の触覚がカフ加圧後それぞれ24分、27分、33分で消失した間、手首、PPI, DIPの関節角度はカフ加圧後15分から35分にかけて急速に減少した。同様に、下図の被験者も拇指、手首、肘の触覚がカフ加圧後それぞれ18分、24分、30分で消失した間、MP, PPI, DIPの関節角度はカフ加圧後15分から実験終了まで急激に減少した。

これらの結果は4つの関節角度の知覚が上肢の虚血の進行に伴って伸展位から屈曲位へ変化することを示した。この知見は幻肢の関節角度の知覚変化の方向がカフ加圧直前の手の姿勢によって変化することを示した。

IV. 考 察

本研究の結果は幻肢の関節角度の変化の方向がカフ加圧直前の手の姿勢によって変化することを明らかにし、その変化は皮膚と固有感覚の受容器に関係する大径有髄線維の麻痺に対応していた。これらの結果は幻肢の形成に新たな知見をもたらした。第一に、幻肢の最終的な姿勢は感覚刺激が遮断される直前の姿勢に依存し、脳は感

覚入力に依存した身体図式を保持していた。第二に、すべての被験者は解剖学的に正常な姿勢の幻肢を知覚した。第三に、虚血によって手の感覚が消失した時、手の姿勢の知覚は現実の姿勢から幻肢の姿勢へ連続的に変化した。

しかしながら、手指と手首の関節角度の知覚はカフ加圧直前の姿勢に依存して変化した。そのメカニズムは推測の域を出ない。手首伸筋の腱に対する振動刺激は手首屈曲の運動錯覚を生じる (Goodwin et al., 1972) が、Kito et al. (2006)はこの振動刺激を停止すると手首が反対方向に伸展するかのような残存効果を見出した。この時、振動刺激によって動員された筋紡錘からの感覚情報は脳に伝達されていないが、被験者は残存効果を経験した。したがって、脳が求心性感覚情報を受容しないにも係わらず、知覚が惹起したことになる。さらに、この残存効果は振動刺激中に被験者がどの程度強い錯覚を経験したかに依存し、残存効果の量は先行する運動錯覚量の約70–80%になった。被験者が右手の屈曲運動錯覚および伸展運動の残存効果を経験している時に、左一次運動野の手領域に経頭蓋磁気刺激を加えて運動野の興奮性を評価すると、屈曲運動錯覚の経験中には手首屈筋の興奮性が伸筋のそれに比べて相対的に増加する。それに対して、残存効果としての手首伸展の経験中には、屈筋の興奮性のみが顕著に低下し、相対的に伸筋の興奮性が高まった。

同様な残存効果が本実験にも作用して、カフ加圧直前の姿勢が伸展位の時には、手指と手首の関節角度の知覚は屈曲位に変化し、カフ加圧前の屈曲位は伸展位に変化したと考えられる。つまり、カフ加圧前の屈曲位の時には手首の伸筋が伸展して求心性感覚情報を脳へ送る。しかし、カフ加圧によって手首の伸筋からも屈筋からも脳へ感覚情報はもたらされないが、残存効果として手首伸筋からの感覚情報の低下が相対的に著しく、手首屈筋からの感覚情報が相対的に増加する。その結果、幻肢の手首は伸展したように錯覚されたと考えられる。

一方、幻肢は一般的に解剖学的に正常の姿勢をとり、自発的に動くといわれている。しかし、少数例の幻肢は解剖学的に不可能な姿勢と運動を生じると報告されている。例えば、幻肢の腕が背中に突き刺さっている事例、手指が現実にはあり得ない捻れた姿勢をとる事例が報告されている (総説として Giummarra et al., 2007)。したがって、本研究の結果は幻肢が解剖学的に正常の姿勢をとることを定量的に証明した。

謝辞：本研究は部分的に平成21年度独立行政法人日本学術振興会科学研究費補助金 (基盤研究(C)21500544) によって支援されたものである。

文献

- Calford, M. B. and Tweedale, R. (1991) C-fiber provide a source of masking inhibition to primary somatosensory cortex. *Pro. R. Soc. Lond. B. Biol. Sci.* 243, 269–275.
- Gandevia, S. (1996). Kinesthesia: roles for afferent signals and motor commands. In L.B. Rothwell & J. T. Shepherd (Eds.) *Handbook of physiology, Section 12: Exercise: regulation and integration of multiple systems* (pp. 128–172). New York, NY: Oxford University Press.
- Giummarra, M. J., Gibson, S. J., Georgiou-Karistianis, N. and Bradshaw, J. L. (2007) Central mechanisms in phantom limb perception: the past, present and future. *Brain Res. Rev.*, 54, 219–232.
- Goodwin, G. M. D., McCloskey, D. I. and Matthews, P. B. C. (1972) The contribution of muscle afferents to kinaesthesia shown by vibration induced illusions of movement and by the effects of paralyzing joint afferents. *Brain* 95, 705–748.
- Gross, Y. and Melzack, R. (1978) Body image: dissociation of real and perceived limbs by pressure-cuff ischemia. *Exp. Neurol.*, 61, 680–688.
- Head, H. and Holmes, G. (1911–1912) Sensory disturbances from cerebral lesions. *Brain* 34, 102–254.
- Keidel, W. D. (1975) *Kurzgefasstes Lehrbuch der Physiologie*, 4. Auflage. Georg Thieme Verlag: Stuttgart.
- Kito, T., Hashimoto, T., Yoneda, T., Katamoto, S. and Naito, E. (2006) Sensory processing during kinesthetic aftereffect following illusory hand movement elicited by tendon vibration. *Brain Res.*, 1114, 75–84.
- Lackner, L. R. (1988) Some proprioceptive influences on the perceptual representation of body shape and orientation. *Brain* 111, 281–297.
- Melzack, R. and Bromage, P. R. (1973) Experimental phantom limbs. *Exp. Neurol.*, 39, 261–269.
- Paqueron, X., Leguen, M., Rosenthal, D., Coriat, P., Willer, J. C. and Danziger, N. (2003) The phenomenol-

ogy of body image distributions induced by regional anaesthesia. *Brain* 126, 702–712.
Ramachandran, V. S. and Hirstein, W. (1998) The perception of phantom limbs: the D. O. Hebb lecture. *Brain* 121, 1603–1630.

Acute perceptual distortion of the human body image produced by the pressure-cuff ischaemia of the upper arm

INUI Nobuyuki* and MASUMOTO Junya**

(key words : phantom limb, large myelinated diameter nerve, von Frey test)

The authors examined effects of the joint position before the ischaemia on alternation of the joint angle of a phantom limb. We further investigated which nerve fiber contributes to the alternation. While we first blocked participants' upper arm with cuff-inflation, we assessed changes in the perceived joint angles as well as in sensory test. In the second block of their upper arm, we further assessed changes in the perceived joint angles when the position of the hand was changed immediately before the inflation. These experiments showed that whereas the proximal and distal interphalangeal, metacarpophalangeal and wrist joints of the phantom limb steeply changed from extended position to flexed position at the start of extended position from 10 to 25 min after the start of the inflation, the four joints changed to the opposite direction at the start of flexed position. These findings revealed that perceived joint angles of a phantom hand were changed by the position of the hand immediately before the inflation. On the other hand, while threshold of von Frey test in the thumb was changed until mean 16 min after the start of the inflation, the touch sensation in the thumb was abolished until mean 19 min. From the results of two experiments, acute perceptual distortions of joint angle thus corresponded with paralysis of the large myelinated diameter nerve.

*School of Arts and Health Education, Naruto University of Education

**Graduate School of Education, Naruto University of Education