上腕二頭筋における肘関節伸筋の理論的見解

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-04 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 犬丸, 敏康, 生田, 宗博, 清水, 順市, 柴田, 克之, 西村, 誠次, 小島, 久典 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/19541

原　著

金大医保つるま保健学会誌 Vol. 33(1)
57～63　2009

上腕二頭筋における肘関節伸筋の理論的見解

犬丸　敏康　　生田　宗博*　　清水　順市
柴田　克之　　西村　誠次　　小島　久典**

要　旨

上腕二頭筋は肘関節屈筋として認識されている。しかしながら、壁や床に手を押すといった末梢部が外部に固定され、抵抗を受けている状態では肘関節を伸展させるような逆説的な作用があると報告されている。その一方で逆説的な作用に関する報告のほとんどは関節モーメントと筋力の両面から検討されていないため、その作用が起きている状態での関節モーメントと筋力との関係に十分な見解がない。そこで本研究では、上腕二頭筋に肘関節の伸展作用がもたらされる可能性について、上肢の力ベクトル発揮時のモデル解析の手法を用いて調査し、関節モーメントと筋力の両面から上腕二頭筋の肘関節伸筋としての作用を理論的に検証した。

モデル解析では肩関節と肘関節の屈曲角度をそれぞれ30°、60°、90°と変化させた場合における関節モーメントと筋力の変化を調査した。その結果、肩関節の屈曲角度60°、肘関節の屈曲角度60°において力ベクトルが120°の場合には上腕二頭筋による筋モーメントが上腕三頭筋外側頭の筋モーメントよりもわずかに大きくなった。その上、この120°の力ベクトルの方向は肩関節に屈曲モーメント、肘関節に伸展モーメントが発生していた状態であった。このことから、力ベクトルが120°の方向においては上腕二頭筋が肘関節伸筋として働くことが可能であったといえる。

Key words

biceps brachii, two-joint muscle, elbow extensor, paradoxical action, theoretical model

緒　言

上腕二頭筋は長頭と短頭に分かれ、長頭は肩甲骨関節上結節、短頭は烏口突起から起始し、２頭合して橈骨粗面と前腕筋上内側に停止する。そのため、上腕二頭筋の収縮によって肩関節と肘関節の両関節に運動をもたらすことができる。成書によれば、上腕二頭筋は主に肘関節に働き、肘関節の屈曲、前腕の回外として作用するが、補助動筋として上腕二頭筋長頭により肩関節の屈曲、外転、内転に作用する[1]。しかしながら、これらは上腕や前腕、さらに末梢部の手に何も負荷がない状態での作用であり、壁や床に手を押すといった末梢部が外部に固定され、抵抗を受けている状態で同じ作用があるかについては釈然としない。Ikutaら[2]は末梢部が固定された状態として手でのプッシュアップ運動から、上腕二頭筋には抗重力に対して肘関節を伸展させる逆説的な作用があることを発見した。また、腓腹筋やハムストリングスは一般的に膝関節の屈曲に作用するが、立位のような足部が地面に固定された状態での下肢筋の研究から、Molbech[3]は数学的な模式図により腓腹筋やハムストリングスには膝関節伸展作用があることをモデル化した。さらにBlaimontら[4]は膝60°の直立モデルから膝関節0～60°屈曲位においてはハムストリングスに膝関節を伸展する作用があることを提唱している。このことから、末梢部が外部に固定されたような状態では、成書に記述された筋の作用とは異なった逆説的な作用が起こる可能性が高い。

一方、上腕二頭筋は肩関節と肘関節をまたがる二関節筋であるため、筋の収縮によって肩関節と肘関節の両関節にモーメントをもたらす。運動の作用と同様に関節モーメントで筋の働きを捉えると、上腕二頭筋は肘関節の屈曲モーメント、前腕の回外モー

金沢大学医薬保健研究域保健学系
*　生田活動能力回復研究所
** 大阪府立大学総合リハビリテーション学部

メントを発生させ、かつ、肩関節の屈曲、外転、内転モーメントを発生させることができると考えられる。しかし、これらの関節モーメントも末梢部が外部に固定されたような状態では変化すると考えられ、例えば末梢部の手で力を発揮しているような場面では、Ikutaら[2]によって実証された上腕二頭筋による肘関節の伸展作用が肘関節における伸展モーメントとして現れても不思議はない。しかしながら、Ikutaら[2]の研究を始めとして、Molbech[3]、Blaimontら[4]のいずれの研究においても関節モーメントと筋力の両面から検討されていないため、逆説的な作用が起きている状態での関節モーメントと筋力との関係に十分な見解がない。

我々は末梢部の手で力を発揮した際の実際の筋活動とそのモデル化による筋力の解析から、実際の筋活動とモデルから推定した筋力には類似した関係があり、一部の筋を除いて高い相関を得ることができた[5]。また、上肢の筋骨格モデルから二関節筋の筋活動の発現機序は単関節筋と同様である可能性が示唆され[6]、二関節筋である上腕二頭筋もこれに相当すると考えられる。しかし、これらの研究は上腕二頭筋の作用そのものに主眼を置いた研究ではないため、モデルの有能性を示唆するものの上腕二頭筋が肘関節を伸展させるか、否かについては回答がない。そこで本研究では、上腕二頭筋に肘関節の伸展作用がもたらされる可能性について、上肢の力ベクトル発揮時のモデル解析の手法を用いて調査し、関節モーメントと筋力の両面から上腕二頭筋の肘関節伸筋としての作用を理論的に検証した。

方　　法

1．関節モーメントによる検証

末梢部が外部に固定され、かつ、外部から抵抗を受けている状態として、一定の位置から手により力ベクトルが発揮された状態を想定すると、肩関節と肘関節に発生する関節モーメントは力ベクトルと関節位置により求められる。ここで課題を水平面内における力ベクトルの発揮に限定すると、力ベクトルと関節モーメントの関係は図１のように力ベクトルの発揮する方向から６つの条件に分類できる。①：肩関節伸展・肘関節伸展モーメント、②：肩関節屈曲・肘関節屈曲モーメント、③：肩関節屈曲・肘関節伸展モーメント、④：肩関節伸展・肘関節屈曲モーメント、⑤：肩関節屈曲・肘関節屈曲モーメント、⑥：肩関節伸展・肘関節伸展モーメントである。これらの分類のうち、肘関節に伸展モーメントが発生している条件は①、③、⑥の３つになる。このことから考えると、この３つの条件以外で肘関節に伸展が起きる可能性は低い。さらに、条件①と⑥は肩関節と肘関節の両関節に伸展モーメントが発生しているため、上腕二頭筋の付着部位から考えると、筋の起始部と停止部が伸張されている状態のため、受動的な筋力の発生のみとなる。このことから、条件①と⑥において能動的に上腕二頭筋に肘関節を伸展する筋力が発生する可能性は低い。従って、上腕二頭筋が肘関節を伸展させる作用をもたらす条件は関節モーメントから類推すると条件③のみに絞ることができる。そこで肩関節と肘関節の屈曲角度をそれぞれ30°、60°、90°と変化させた場合における末端部の手の力ベクトルにより発生する肩関節モーメントM_sと肘関節モーメントM_eをベクトル積を用いて式⑴、⑵から計算し、各関節角度の設定で屈曲モーメント＋、伸展モーメント－として$M_s>=0$と$M_e<0$となる範囲を検索した。

$$M_s = sp \times F \qquad (1)$$

$$M_e = ep \times F \qquad (2)$$

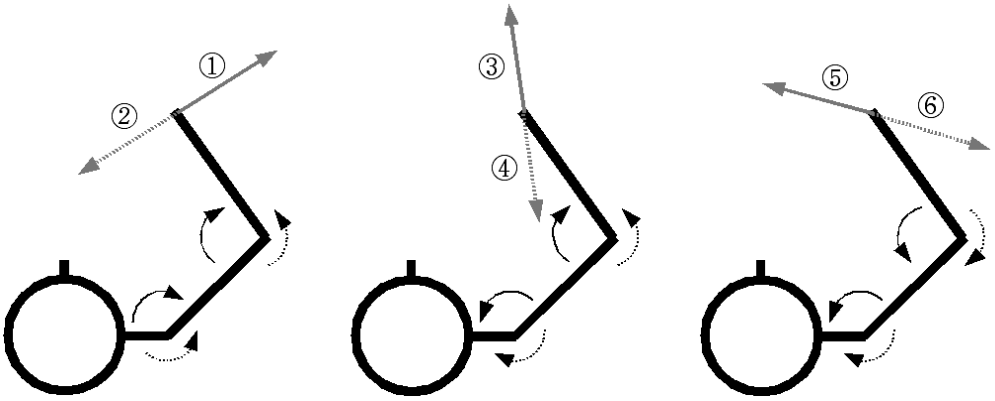

図１．力ベクトルと関節モーメントの関係
数字は力ベクトルの発揮する方向から分類した条件を示す。黒矢印は関節モーメントの方向、灰色矢印は力ベクトルを示す。

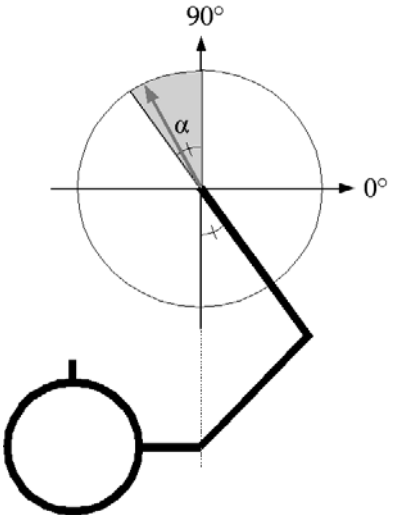

図２．図１の条件③を満たす力ベクトルの範囲
右方向を０°とすると範囲αは前腕の延長線と肩と手先を結ぶ線によってなす角で定義される。灰色矢印は力ベクトルを示す。

ここで、*sp*、*ep*はそれぞれ肩関節から手先位置までのベクトル、肘関節から手先位置までのベクトルを示し、*F*は手先力ベクトルを示す。×はベクトル積を示す。図２のように右方向を0°とすると条件③を満たす範囲αは押し出すような力が発揮され、かつ、力の方向が肩関節と肘関節の間を通るような力ベクトルの方向になる。

２．筋力による検証

関節モーメントからの検証と同様に肩関節と肘関節の屈曲角度をそれぞれ30°、60°、90°と変化させた場合における図１の条件③を満たし、かつ、上腕二頭筋の筋力が＋となる範囲を調査するため、Inumaruら[5]による上肢の筋骨格モデルを使用した。以下に簡単に筋骨格モデルを説明する。骨格は上腕部、および前腕手部の２セグメントから構成され、各セグメント長は上腕部0.3m、前腕手部0.35mとした。筋は大胸筋（PMA, 1）、腕橈骨筋（BRD, 2）、三角筋後部線維（DEL, 3）、上腕三頭筋外側頭（TLA, 4）、上腕二頭筋（BIC, 5）、上腕三頭筋長頭（TLO, 6）から構成される。各筋のパラメータである生理的断面積（*PCSA*）、モーメントアーム（*MA*）は五味[7]、Meekら[8]を参照し、最大筋力（$f_{\max}$）は*PCSA*にIkaiら[9]の最大筋応力62N/cm²を乗して求めた。

筋力の計算には最適化の乗数法[5]を用いた。乗数法の目的関数には筋力と筋電図のパターンがよく一致するといわれているCrowninshieldら[10]による筋応力の３乗の総和（式⑶）を選択した。末端部の手からの力ベクトルの大きさは20N、力ベクトルの方向は1°づつに設定した。式⑴より肩関節モーメント、式⑵より肘関節モーメントを求め、乗数法における等式の制約条件として関節モーメントと筋力モーメントの和がつりあう条件（式⑷、⑸）を設定し、非等式の制約条件として筋力が短縮方向（非負）のみとする条件（式⑸）を設定した。さらに、計算した筋力において各関節角度の設定で図１の条件③を満たし、かつ、BICの筋力が＋となる範囲（$f_5 >= 0$）を検索した。

$$\sum_i \left(\frac{f_i}{PCSA_i} \right)^3 \qquad (3)$$

$$f_1 MA_1 + f_3 MA_3 + f_5 MA_5 + f_6 MA_6 + M_S = 0 \qquad (4)$$

$$f_2 MA_2 + f_4 MA_4 + f_5 MA_5 + f_6 MA_6 + M_e = 0 \qquad (5)$$

$$0 \leq f_i \leq f_{\max i} \qquad (6)$$

ここでf_iは各筋の筋力を示す。式⑷は肩関節モーメントと肩関節の筋力モーメントの和が等しい、および、式⑸は肘関節モーメントと肘関節の筋力モーメントの和が等しいことを示す。

３．モデル解析での計算

関節モーメントおよび筋力による検証過程におけるモデル解析での計算は図３のフローチャートに従った。プログラミングはWindows XP（Microsoft）上のC++Builder 5.0 Professional（Borland）にてC++言語で記述し、データベースにはAccess 2000

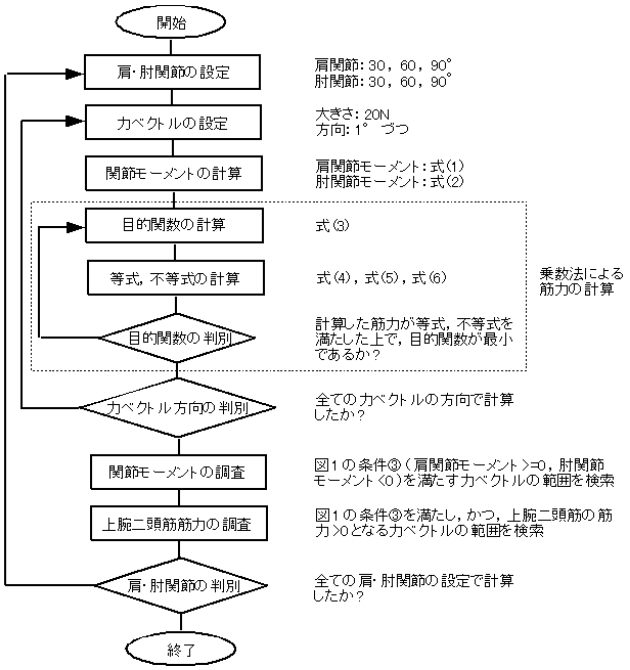

図３．モデル解析における計算のフローチャート

表１．肩関節と肘関節の屈曲角度をそれぞれ30°，60°，90°と変化させた場合における図１の条件③を満たす力ベクトルの方向．Ｓは肩関節の屈曲角度，Ｅは肘関節の屈曲角度を示す．

E＼S	30°	60°	90°
30°	47～59°	77～89°	107～120°
60°	63～89°	93～120°	123～149°
90°	80～119°	110～149°	140～179°

表２．肩関節と肘関節の屈曲角度をそれぞれ30°，60°，90°と変化させた場合における図１の条件③を満たし，かつ，BICの筋力が＋となった力ベクトルの方向．Ｓは肩関節の屈曲角度，Ｅは肘関節の屈曲角度を示す．

E＼S	30°	60°	90°
30°	59°	89°	119～120°
60°	88～89°	118～120°	148～149°
90°	118～119°	148～149°	178～179°

（Microsoft）を用いた。関節モーメントおよび筋力の計算はワークステーション（HP, xw6600）にて遂行した。

結　　果

表１に肩関節と肘関節の屈曲角度をそれぞれ30°、60°、90°と変化させた場合における図１の条件③を満たす力ベクトルの方向を示す。Sは肩関節の屈曲角度、Eは肘関節の屈曲角度を示す。表１から肘関節が90°のときに最も範囲が広くなり、肘関節が30°のときに最も範囲が狭くなった。範囲αは肩関節から手先位置を結ぶ線と肘関節から手先位置を結ぶ線とのなす角度であるため、肘関節により影響される。このことから、肘関節角度を大きくすれば上腕二頭筋が肘関節を伸展させる作用をもたらす条件③を満たす範囲が広くなるといえる。

表２に肩関節と肘関節の屈曲角度をそれぞれ30°、60°、90°と変化させた場合における図１の条件③を満たし、かつ、BICの筋力が＋となった力ベクトルの方向を示す。Sは肩関節の屈曲角度、Eは肘関節の屈曲角度を示す。最もBICの筋力が＋となる範囲が広かったのは肩関節の屈曲角度60°、肘関節の屈曲角度60°の場合であった。逆に肩関節の屈曲角度30°と60°、肘関節の屈曲角度30°の場合には狭くなり、肘関節の屈曲角度90°の場合には広くなる傾向があったが、関節モーメントにおける「肘関節角度を大きくすれば条件③を満たす範囲が広くなる」とまったく同様の結果とはいえなかった。最もBICの筋力が＋となる範囲が広かった肩関節の屈曲角度60°、肘関節の屈曲角度60°の場合の筋力を図４に示す。図４の横軸は図１の条件③を満たす力ベクトルの範囲で、縦軸は筋力値を示す。力ベクトルの範囲が118～120°において、BICの筋力は肘関節伸筋の二関節筋であるTLOの筋力よりも大きくなったが、肘関節伸筋の単関節筋であるTLAの筋力よりも下回った。そのため、筋力からみるとBIC＜TLAになり、肘関節伸筋はTLAの筋力のほうが大きいといえる。これは肩関節、肘関節がどの屈曲角度の場合でも同様であった。そこで、特にBICとTLA、TLOとの間に筋力差が少なかった肩関節の屈曲角度60°、肘関節の屈曲角度60°の場合の筋力にモーメントアームBIC=0.043m、TLA=0.02m、TLO=0.03mを各筋力に乗じて、伸展モーメントに寄与する値を算出した。図５に肩関節の屈曲角度60°、肘関節の屈曲

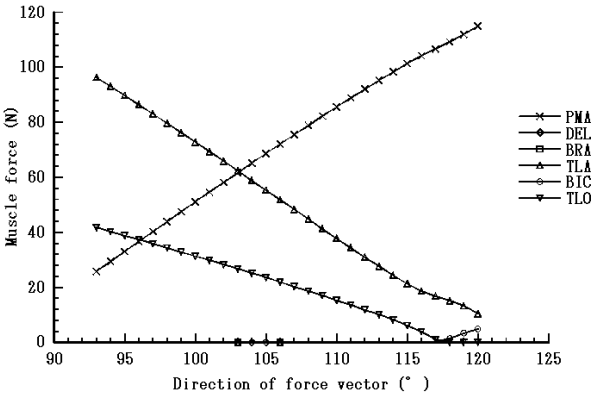

図４．肩関節の屈曲角度60°，肘関節の屈曲角度60°における筋力．
横軸は図１の条件③を満たす力ベクトルの範囲を示す．

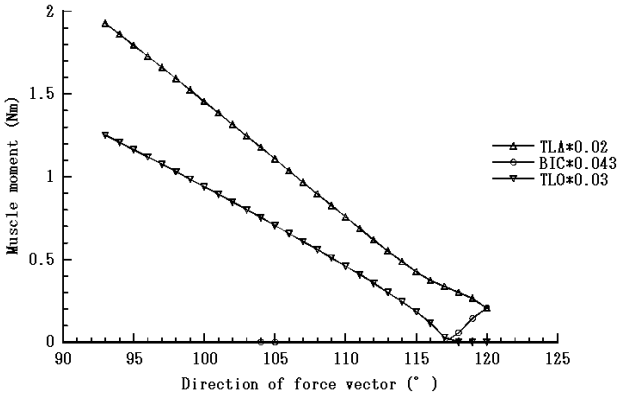

図５．図５に肩関節の屈曲角度60°，肘関節の屈曲角度60°におけるBIC，TLA，TLOの筋モーメント．
横軸は図１の条件③を満たす力ベクトルの範囲を示す．

角度60°の場合におけるBIC、TLA、TLOの筋モーメントの値を示す。これによると力ベクトルが120°の場合にBICによる筋モーメント（0.207001Nm）がTLAの筋モーメント（0.20692Nm）よりもわずかに大きくなった。

考　察

上腕二頭筋は肘関節屈筋として認識されている。これはLandinら[11]の肩関節挙上における上腕二頭筋の役割に関する報告にもあるように、肩関節での役割については動的な安定であると示したものの、肘関節での役割については（屈曲であるとして）当たり前のように扱っていたことからも了解できる。しかしながら、本研究のモデル解析によれば、肩関節の屈曲角度60°、肘関節の屈曲角度60°において力ベクトルが120°の場合にはBICによる筋モーメントがTLAの筋モーメントよりもわずかに大きくなった。その上、この120°の力ベクトルの方向は肩関節に屈曲モーメント、肘関節に伸展モーメントが発生していた状態であった。このことから、力ベクトルが120°の方向においてはBICが肘関節伸筋として働くことが可能であったといえる。

上腕二頭筋は二関節筋であり、肩関節と肘関節の両関節に作用する。古くから二関節筋には単関節筋とは異なる特有な作用が存在していると考えられている[12]。また、その後もエネルギー消費を押さえ、単関節筋による力を他関節に移行する等の二関節筋独自の役割について報告されている[13-18]。しかしながら、それらの研究の多くは単関節筋と二関節筋の役割の違いについて主眼が置かれているため、末梢部が外部に固定されたような状態としては十分に調査されていない。末梢部が外部に固定されたような状態での二関節筋の作用として、腓腹筋やハムストリングスを扱ったMolbech[3]、Blaimontら[4]、上腕二頭筋を扱ったIkutaら[2]の研究があり、それらのいずれもが成書に記載されている作用とは異なる逆説的な作用について言及している。本研究はIkutaら[2]の上腕二頭筋での逆説的な作用について、運動の課題は異なるがモデル解析から検討したものである。その結果、BICが肘関節の伸筋として働く逆説的な作用をもっていることが理論的に検証できた。このことから、Ikutaら[2]の見識には間違いがなかったといえよう。

モデル解析はパラメーター値に大きく作用され[19, 20]、最適化の計算においても目的関数の設定により出力される値が大きく異なる[21, 22]。また、本研究のモデル解析ではモーメントアームを一定値として扱っていたが、モーメントアームも角度によって異なることが知られている[23-25]。そのため、一概に本研究の結果が正しいとはいえないかもしれない。すなわち、肩関節の屈曲角度60°、肘関節の屈曲角度60°の設定で、しかも力ベクトルが120°といった方向のみにBICに肘関節伸展の作用があったという限局された状況のため、モーメントアームなどのパラメーターや目的関数の設定によってはこの力ベクトルの方向の範囲が広くなるかもしれないが、逆に狭くなる、なくなるといった可能性も十分に考えられる。その上、120°の力ベクトルは前腕手部のセグメントに平行に位置する方向で、かつ、肘関節のモーメントが伸展モーメントから屈曲モーメントに移行する方向であったため、この場合は肘関節に屈曲モーメントが発生しやすい場面であったことも否定できない。しかし、表２に示すように肘関節に完全に伸展モーメントが発生していた段階からすでにBICに筋力があった事実は、BICのみで肘関節を伸展させることは難しくとも、TLAといった本来の肘関節伸筋とともに協同で働くことで肘関節の伸展を達成できることが示唆される。

一方、ヒトによっては上腕二頭筋の付着部位も異なるため、実際のヒト被験者ではモデル解析と同じ条件で力ベクトルを発揮したとしても上腕二頭筋による肘関節の伸展は起こらない可能性もある。これについては今後、実際のヒト被験者によって関節モーメントや上腕二頭筋の筋活動等の面から詳細に検討したい。

リハビリテーションの治療過程において、筋の役割を捉えることは非常に重要である。しかしながら、一般の成書に記述されている筋の作用は末梢部に何も負荷がない状態での作用として捉えられており、末梢部が外部に固定されている状態で同じ作用があるかについては明確な回答がなかった。本研究では上腕二頭筋における肘関節伸筋の作用をモデル解析から証明できたが、上腕二頭筋以外にも成書とは異なる逆説的な作用が起きるとすれば、運動時の筋の働き方も捉え直す必要があろう。

文　献

1）森於菟，大内弘：筋学．解剖学１，金原出版，pp333-362，1982

2）Ikuta M, Shibata K, Someya F, et al: The proof of the main function of the muscle biceps brachii to make the elbow joint anti-gravitic extension motion. Memories Health Sci Med Kanazawa Univ 24: 31-38, 2000

3）Molbech S: On the paradoxical effect of some two-joint muscles. Acta Morphol Neerl Scand 4: 171－178, 1966
4）Blaimont P, Van Elegem P, Alameh M, et al: The action of the hamstrings in extension of the knee. Rev Chir Orthop Reparatrice Appar Mot 71: 99－101, 1985
5）Inumaru T, Ikuta M, Shibata K, et al: An optimization-based model for analyzing the exertion of force vector at the human. J Tsuruma Health Sci Soc 29: 69－76, 2005
6）犬丸敏康，生田宗博，柴田克之，他：単関節筋と二関節筋における筋活動の特性の比較－モデル研究－．金沢大学つるま保健学会誌30: 79－86, 2006
7）五味裕章：力制御中の筋活動優先方向を用いた最適規範モデルの評価．電子情報通信学会論文誌（D－Ⅱ）J84-D-Ⅱ: 728－736, 2001
8）Meek SG, Wood JE, Jacobsen SC: Model-based multi-muscle EMG control of upper-extremity prostheses. In Winters JM. Woo SL-Y. (ed), Multiple muscle systems: biomechanics and movement organization. Springer-Verlag, New York, pp360－376, 1990
9）Ikai M, Fukunaga T: Calculation of muscle strength per unit cross-sectional area of human muscle by means of ultrasonic measurement. Int Z angew Physiol einschl Arbeitsphysiol 26: 26－32, 1968
10）Crowninshield RD, Brand RA: A physiologically based criterion of muscle force prediction in locomotion. J Biomech 14: 793－801, 1981
11）Landin D, Myersb J, Thompsona T, et al: The role of the biceps brachii in shoulder elevation. J Electromyogr Kinesiol 18: 270－275, 2008
12）Cleland J: On the action of muscles passing over more than one joint. J Anat Physiol 1: 85－93, 1867
13）van Ingen Schenau GJ: From rotation to translation: Constraints on multi-joint movements and the unique action of bi-articular muscles. Hum Mov Sci 8: 301－337, 1989
14）Jacobs R, van Ingen Schenau GJ: Control of an external force in leg extensions in humans. J Physiol (Lond) 457: 611－626, 1992
15）van Ingen Schenau GJ, Pratt CA, Macpherson JM: Differential use and control of mono-and biarticular muscles. Hum Mov Sci 13: 495－517, 1994
16）Prilutsky BI, Zatsiorsky VM: Tendon action of two-joint muscles: transfer of mechanical energy between joints during jumping, landing, and running. J Biomech 27: 25－34, 1994
17）van Bolhuis BM, Gielen CCAM, van Ingen Schenau GJ: Activation patterns of mono－and bi－articular arm muscles as a function of force and movement direction of the wrist in humans. J Physiol (Lond) 508: 313－324, 1998
18）Prilutsky BI: Coordination of two－and one－joint muscles: functional consequences and implications for motor control. Motor Control 4: 1－44, 2000
19）Herzog W: Sensitivity of muscle force estimations to changes in muscle input parameters using nonlinear optimization approaches. J Biomech Eng 114: 267－268, 1992
20）Raikova RT, Prilutsky BI: Sensitivity of predicted muscle forces to parameters of the optimization-based human leg model revealed by analytical and numerical analyses. J Biomech 34: 1243－1255, 2001
21）Buchanan TS, Shreeve DA: An evaluation of optimization techniques for the prediction of muscle activation patterns during isometric tasks. J Biomech Eng 118: 565－574, 1996
22）van Bolhuis BM, Gielen CCAM: A comparison of models explaining muscle activation patterns for isometric contractions. Biol Cybern 81: 249－261, 1999
23）Murray WM, Delp SL, Buchanan TS: Variation of muscle moment arms with elbow and forearm position. J Biomech 28: 513－525, 1995
24）Ettema G, Styles G, Kippers V: The moment arms of 23 muscle segments of the upper limb with varying elbow and forearm positions: Implications for motor control. Hum Mov Sci 17: 201－220, 1998
25）Ramsay J, Hunter B, Gonzalez R: Muscle moment arm and normalized moment contributions as reference data for musculoskeletal elbow and wrist joint models. J Biomech 42: 463－473, 2009

Theoretical opinion of elbow extensor in the biceps brachii

Toshiyasu Inumaru, Munehiro Ikuta*, Junichi Shimizu,
Katsuyuki Shibata, Seiji Nishimura, Hisanori Kojima**

Abstract

The biceps brachii is recognized as an elbow flexor. However, it is reported that there is a paradoxical action to make elbow joint extension, when an end-effector have fixed outside and have received resistance. On the other hand, since most reports of a paradoxical action are not considered from both sides of joint moments and muscle forces, there is no sufficient view for the relation between joint moments and muscle forces in that action. In the present study, we investigated that the possibility of elbow extension by the biceps brachii using the technique of a model analysis in executing a force vector of the upper extremity, and verified theoretically the action of the elbow flexor in the biceps brachii from both sides of joint moments and muscle forces.

In this model analysis, we investigated joint moments and muscle forces in varied flexion angles of the shoulder and elbow joint with 30, 60, and 90 degrees, respectively. When the force vector was 120°, the muscle moment by the biceps brachii were increased more slightly than the muscle moment of the lateral head of the triceps brachii in the shoulder flexion angle at 60° and elbow flexion angle at 60°. Moreover, in this direction of the force vector of 120°, the flexion moment was generated in the shoulder and the extension moment was generated in the elbow. Therefore, it can be said that the biceps brachii was able to work as the elbow extensor where the force vector was 120°.