人体筋の力・速度関係に及ぼす短縮前状態の影響

金子 公 有*

(昭和52年7月4日受付)

The Effect of Different Previous States of Shortening on the Force-Velocity Relationship in Human Muscle

Masahiro Kaneko

The Laboratory of Exercise Physiology
Osaka College of Physical Education

Abstract

The force-velocity relationships were determined on six adult males by two methods providing different previous states of shortening; the maximum elbow flexions were made against a given load from (a) the state of isometric contraction (quick release method: QR) and from (b) the resting state (after load method: AL). The apparatus used was basically identical with one used by Wilkie (1950). The loads were prescribed by the fractions (%) of isometric tension (P_o) of the individual. The velocity was measured using a linear velocity transducer. The results obtained were as follows;

1) The velocities under the loads above 10% P_o were unexceptionally greater in AL when compared them intra-individually. On the contrary the maximum velocities with no weight were greater in QR with the exception of two subjects. Thus, the force-velocity relationship in QR was more concave than that in AL; a/P_o values in the mean were 0.43 and 0.26 for AL and QR, respectively.

2) The maximum mechanical power in QR was about 25% less than that in AL.

3) The amount of action potentials during shortening, which was obtained by integrating the EMG of brachial biceps muscle with surface electrodes, did not show any considerable differences between QR and AL methods.

4) The initial accelerations, from the onset to peak velocity, were always greater in QR due to less time occupied to reach its peak velocity.

5) Taking these results and references into consideration, it was discussed that the greater velocity in AL might be in part due to an delayed recoil of elastic energy stored at an early stage of shortening, as in a whip.

(Masahiro Kaneko: The Effect of Different Previous States of Shortening on the Force-Velocity Relationship in Human Muscle. *Jap. J. Phys. Educ.*, Vol. 22, No. 5, Jan. 1978, pp. 295~299)

*大阪体育大学体育生理学研究室

力・速度関係 (force-velocity relationship) は活動筋の動的特性を示す代表的な法則性であるが、その決定法はほとんどの場合 (動物の摘出筋の場合)、等尺性張力が最大に達した時点で突然筋を短縮させる方法 (急速解放法 quick release method) によっている。しかしながら、人体筋の力・速度関係を調べた Wilkie (1950)⁶⁾ の実験では、休息状態から直接一定の荷重に対して力を発揮するという方法 (以下、後荷重法 after load method という) が採用されている。すなわち、両方法の間には短縮前状態が一方が等尺性収縮、他方が休息状態というように極端に相違している。筆者 (1974, p. 78)⁶⁾ はかつて1被験者につき両者の方法で力・速度関係を調べ、急速解放法の方が同一荷重に対して速度が低いことを観察したが、もしも、このような短縮前状態が確かに短縮速度の大きさに影響を与えるものであるとすれば、筋収縮特性に関して何らかの説明がなされなければならないと考え、本研究において急速解放法と後荷重法による力・速度関係の差異を確かめるとともに、その要因を考察しようとした。

<方法>

健康成人男子6名 (20~24歳) (表1) を被験者として、図1の装置により実験した。すなわち、被験者は椅座位で上腕を体側方の水平台上に置いて固定し、肘関節を140°から70°まで最大努力で屈曲する。このとき、手頸部のベルトとワイヤーを介して連結された長いレバー (a) が前腕とほぼ平行状態で回転する。同時に長いレバーと直角に直結した短いレバー (b) も回転し、回転軸から10cmの点に吊された荷重 (W) が牽きあげられる。速度の検出には、無抵抗電磁コイル (Scheivitz

図1 実験方法 (説明本文)

図2 急速解放法 (QR) と後荷重法 (AL) の力曲線 (F) と速度曲線 (V) の比較

矢印は速度 (V) の計測時点。運動終末部の、力の上昇、速度の低下には、長いレバー (a) がストッパー (スポンジ付) に当たる際のアーチファクトが含まれている。

表1 被験者の特徴

Subject	Age (years)	Height (cm)	Weight (kg)	Forearm length (cm)	P ₀ * (kg)
OJ	21	174	56	24.2	23.8
SK	21	164	55	24.0	25.1
YM	20	154	60	23.2	30.4
YD	21	179	81	26.5	35.9
KN	20	176	70	25.3	42.4
MS	24	175	71	25.4	45.3

* P₀は等尺性最大筋力 (肘関節90°)。

製, 7L6VT-2) を用い、これを長いレバーの回転軸から6cmの高さにとりつけ、肘屈曲全過程の瞬時速度を記録し (図2に記録例)、肘関節角90°での速度 (ほぼ最高速度) を読みとって、手頸部での速度に換算した。なお、実験の前後に、コイル内の磁石棒を自由落下させ、重力加速度の積分による速度変化をもとに速度記録を校正した。またレバー (a) と手頸部間のワイヤーにストレンゲージ張力計を連結し、力・時間曲線を同時記録した。後荷重法では、長いレバーが140°の位置でスト

ッパーにより支えられた状態から、最大努力で肘を屈曲する。他方、急速解放法の場合は、図1(e)に示したように、ワイヤーによって長いレバーを140°の位置で固定し、被験者の等尺性筋力が最高になった時点でピンをたたきワイヤーを解放した。ただし被験者には肘屈曲が完了するまで最大努力を発揮するように示唆した。荷重は各被験者の等尺性最大筋力 (P_0 ; 肘関節角 90°で測定) の10, 20, 30, 40, 50, 60%を決め、各荷重で軽い方から3回ずつ、重い方から3回ずつ (series and reverse) 測定し、6回試行の平均値を得て個人の成績とした。なお、荷重をゼロ (0% P_0) にして、最大速度 (V_0) を同様の試行により測定した。

＜結果と考察＞

上記の方法で得られた力 (または荷重; P) と速度 (V) の関係を図3にプロットした。ここで、最大筋力 (P_0) と前腕長 (l) における個人差を消去するため、力を最大筋力に対する割合 (% P_0) に、速度を前腕長 (l) に対する割合 (l/sec) にそれぞれ変換し、個人別に記号を変えて示した。各個人について後荷重法 (白記号) と急速解放法 (黒記号) の速度を比較すると、無荷重を除くすべての荷重条件ですべての被験者が後荷重法において高い値を示した。これに対して無荷重下の最大速度では逆に、最大筋力の最も低い2被験者 (SK, OJ) を除く他の4名が急速解放法においてより高い値を示した。図3の手頸部における力 (または負荷) ・速度曲線 (双曲線) は、Hill の特性方程式⁹⁾：

$$(P+a)(V+b)=(P_0+a)b \quad \cdots \cdots (1)$$

(ただし P は力または負荷, V は速度, P_0 は等尺性最大筋力, a , b は定数) によったものであるが、このための定数 a , b は、全被験者の P と $(P_0 - P)/V$ の間の回帰方程式を得て決定した。なお手頸部における負荷 (load) は力に一致し、また測定された速度と対応する時点のもの故、機械的パワー (PV) を、(1)に基く

$$PV=bP[(P_0+a)/(P+a)-1] \quad \cdots \cdots (2)$$

によって決定し、この関係曲線も同図中に加えた。なおこのパワーは、相対負荷 (P/P_0) が、

$$P/P_0=(a/P_0)(\sqrt{1+P_0/a}-1)$$

図3 種々負荷 (力) 条件下での後荷重法 (白記号と実線: AL) と急速解放法 (黒記号と破線: QR) の速度の関係

負荷は相対負荷 (% P_0), 前腕速度は長 (l) に対する相対速度で表わした。各記号は被験者に対応する (○: OJ, □: SK, △: YM, ☆: YD, ◇: KN, ▽: MS)。負荷・速度曲線 (凹型) および負荷・パワー曲線 (凸型) は Hill の式により描いた。

表2 力・速度関係 (図3) における定数と最大機械的パワー

Method	a	b	a/ P_0	PVmax (watt)
After load	14.5	1.95	0.43	189.1
Quick release	8.8	1.21	0.26	151.0

注: 定数 a , b の単位は、それぞれ kg, m/sec である。

のとき最大となる。これら平均曲線に対応する数値を表2に示した。a/ P_0 の定数が示すように、急速解放の方が曲線の彎曲が著しく、最大パワー (PVmax) の出現する負荷 (P/P_0) が小さい。

このような差異を生ずる原因として、まず力学的な観点から力と速度の時経過を観察するため、図2にその典型例をあげた。荷重を与えた場合の他の記録は、持続時間と振幅の差を除けば、急速解放法と後荷重法の対応関係が30% P_0 の引用図に酷似していた。無荷重 (0% P_0) 条件における力曲

表3 各負荷(力)条件下での平均加速度
(全被験者の平均と標準偏差)

Load (%P ₀)	After load		Quick release	
	$\bar{x}$	S.D.	$\bar{x}$	S.D.
0	41.3	5.79	66.7	17.67
10	23.5	3.74	33.0	2.58
20	19.1	1.87	21.2	2.54
30	11.5	1.79	15.1	2.88
40	8.5	1.08	11.8	1.69
50	6.5	1.00	9.5	1.62
60	4.6	0.94	6.3	1.08

数値 ($\bar{x}$, S.D.) の単位は m/sec².

線は、特に短縮初期において急速解放法の方が著しく大きく、これが終末速度を高めた直接的要因であろうと思われる。一方、荷重条件下での終末速度が後荷重法においてより大きいことの直接的原因は、短縮後半における大きな力の発生にあると言える。また、速度曲線から短縮初期(短縮開始から最高速度まで)の平均加速度を調べると、全被験者において、どの負荷条件でも急速解放の方が大きな値を示す(表3に平均値を示した)。この結果は、図2の速度・時間曲線からも推定されたとおり、急速解放の方が最高速度に達するまでの時間が短いことに起因している。この点に関連して Wilkie (1950)⁹⁾ は、休息からの短縮(後荷重法)では、直列弾性要素があるために速度曲線の立ち上りが遅れることを証明している。また Hill (1950)⁴⁾ は「筋が休息状態から急激に短縮する場合に直列弾性要素に貯えられる弾性エネルギーは、最終速度を高めるのに使用され、収縮要素だけによる場合より大きな速度を生じさせる」と述べている。Cavagna et al. (1968)¹⁾ の強制伸張による場合ほど顕著でないにしても、本研究の腕屈曲においても、前腕やレバーの慣性と荷重に抗して、後荷重法の短縮初期に弾性エネルギーが貯えられ、これが運動の終末時に向けて放出され速度を高めたと考えることは、それほど不自然ではないと思われる。一方の急速解放法の場合にも、弾性エネルギーの貯蔵は等尺性収縮の状態で行われているはずである。しかしそれは力曲線と速度曲線のパターン(図2)からみて、短縮初期に放出されたと考えられる。無負荷条件を除くすべ

ての荷重条件下での速度が、後荷重法の方で大きくなる原因は、弾性エネルギーの貢献が短縮の遅い時点で(あたかも鞭のように)現われるところにあったのではないか。最大速度の差異もこの線に沿って説明され得るように思われる。すなわち、後荷重法では無荷重であるために貯えられる弾性エネルギーが最小であり、瞬間的な運動ゆえに収縮要素の活動が十分に表出し難い。これに対して、急速解放の場合は収縮要素が短縮前からすでに最高の活動状態(active state)にあり、また、Fenn (1938)⁸⁾ が論じているように、前腕は $d\omega/dt = P'_0/I$ (ただし、 ω は角速度、 I は前腕の慣性能率、 P'_0 は短縮前の等尺性筋力のモーメント)の角加速度で発射されるため、最大速度(V_0)が急速解放の方で大きくなる可能性が考えられる。このような説明は矛盾がないように思われるが、あくまでも推論であって確たる証拠はない。

図4 後荷重法(○; AL)と急速解放法(●; QR)の短縮中における上腕二頭筋の筋放電積分値の比較

次に、こうした力学的現象の背後にある生理的要因として、まず筋の興奮の度合いが後荷重法と急速解放法において相違したのではないかという疑問をもった。Mashima et al. (1972)⁷⁾ は蛙の摘出筋の興奮レベルを変えても、相対的な力・速度関係に組織的な変化は起こらないとしているが、人体筋においては随意収縮であるために、筋に到達する刺激条件が相違する可能性が考えられるからである。そこで3名の被験者を無作為に描出し、上腕二頭筋と上腕三頭筋の筋放電を表面電極法で導出・記録すると同時に、上腕二頭筋の筋放電を

積分回路を通して積分した。その結果、急速解放による短縮時の場合、被験者(MS)の0~40% P_0 の負荷において、また被験者(KN)では0% P_0 のみにおいて、それぞれ上腕二頭筋の筋放電に休止期(silent period)が観察された。しかしながら、短縮全過程の筋放電量(積分値)には、図4に示したとおり一定した明瞭な差異は認められず、むしろ急速解放の方が無荷重下で少なく、60% P_0 下で大きい。この傾向は速度の成績とは逆であって、速度差の原因の説明にはならない。このように本実験では、筋の興奮水準における両方法間の差を指摘することはできなかったが、この点に関してはなお詳細な筋電図分析が必要のように思われる。

<要約>

- 1) ヒトの肘屈筋群の力・速度関係($P \cdot V$ 関係)を成人男子6名について次の2つの方法で調べた：(1)休息状態から(後荷重法)(2)等尺性収縮から(急速解放法)、それぞれ最大努力で肘関節を屈曲する。装置はWilkie (1950)のものと同一機械的機構のものを用い、最大筋力(P_0 , 肘90°)の%で荷重を与えた。速度(肘90°)は直線型速度検出器によった。
- 2) 10% P_0 以上の負荷に対する速度は、全被験者において急速解放法の方が低く、無荷重下の最大速度では逆に、2名を除く全員において急速解放法の方が高い。したがって力・速度関係は急速解放法の方がより彎曲(a/P_0 比が小さい)し、最大パワーの出現する負荷(P/P_0)が小さい。また、最大パワーは急速解放法の方が約25%小さい。
- 3) 表面電極法により記録された上腕二頭筋の放電量(短縮全過程の積分値)には、両方法間に明らかな差が認められない。
- 4) 初期加速度(短縮開始から最高速度まで)は急速解放法の方がすべての負荷で大きく、これは最高速度に達するまでの時間が短いことに因る。
- 5) これらの結果と文献から、後荷重法における速度の優位は、短縮初期に貯えられる弾性エネルギーの短縮後半における放出(鞭のような働き)によるという推論を試みた。

本研究をすすめるに当たり、真島英信教授(順天堂大・医・生理)の暖かい激励とアドバイスをいただいた。また大阪体育大学の瀧本隆文氏の献身的な助力を得た。記して深謝の意を表します。

引用文献

- 1) Cavagna, G.A., B. Dusman and R. Margaria: Positive work done by a previously stretched muscle. *J. Appl. Physiol.* 24: 21—32, 1968.
- 2) Fenn, W.O. and B.S. Marsh: Muscular force at different speeds of shortening. *J. Physiol.* 85: 277—297, 1935.
- 3) Fenn, W.O.: The mechanics of muscular contraction in man. *J. Appl. Physics* 9: 165—177, 1938.
- 4) Hill, A.V.: The series elastic component of muscle. *Proc. Roy. Soc. B*137: 273—280, 1950.
- 5) Hill, A.V.: The heat of shortening and dynamic constants of muscle. *Proc. Roy. Soc. B*128: 136—195, 1938.
- 6) 金子公有：瞬発的パワーからみた人体筋のダイナミクス。杏林書院, 1974.
- 7) Mashima, H., K. Akazawa, H. Kushima and K. Fujii: The forcload-velocity relation and the viscous-like force in the frog skeletal muscle. *Jap. J. Physiol.* 22: 103—120, 1972.
- 8) Wilkie, D.R.: The relation between force and velocity in human muscle. *J. Physiol.* 110: 249—280, 1950.