人体筋の力・速度・パワー関係に おける年齢差

淵 本 隆 文 (大阪体育大学)

金 子 公 宥 (大阪体育大学)

(昭和55年6月6日 受付)

Force, Velocity and Power Relationships in Different Age Groups

Takafumi Fuchimoto¹
Masahiro Kaneko¹

Abstract

To investigate age differences in mechanical power output of human muscle the force-velocity relationships have been examined on 87 males consisting of 4 different age groups: 23, 20, 21, and 23 subjects for the ages of 10, 13, 15, and 19 years respectively. With the use of a modified Wilkie's apparatus the velocities were measured at right angle during elbow flexion by after-load method. The loads applied were 10 to 60% of the maximum isometric strength. The maximum shortening velocity was also measured with no load. All the data were fitted to Hill's characteristic equation:

$$(P + a)(V + b) = (P_0 + a)b$$

where P is load or force, V is velocity, P_0 is isometric strength, a and b are constants. The results obtained are as follows:

- 1) Force-velocity relations calculated after correcting the effect of inertia of the forearm and apparatus were well fitted to Hill's equation in different age groups ($r > 0.994$).
- 2) The ratios of a/P_0 , which characterize P-V relation, were almost constant (0.40–0.45) regardless of age, and thus the maximum power (PV_{max}) appeared under the load of about 35% P_0 .
- 3) In the values of P_0 , PV_{max} and the velocities under various loads their increments in 10–15 years of age were approximately 90% of total increment in 10–19 years of age. This increment (i.e., 90%) was found to be considerably less than that of simple reaction time quoted.
- 4) The velocities/forearm length have also developed with age, suggesting that the improvement in velocity at any load could not merely be due to the growth of muscle length, but due to the qualitative development in muscle function.
- 5) From these results, it was concluded that the age difference in muscle power should be attributed more to the muscular function rather than the nervous function.

¹ Laboratory of Exercise Physiology, Osaka College of Physical Education, Ibaraki, Osaka (567)

(Takafumi Fuchimoto and Masahiro Kaneko, "Force, Velocity and Power Relationships in different Age Groups", *Jap. J. Phys. Educ.*, 25—4 : 273—279, March, 1981)

身体の諸器官はそれぞれ特有の過程を経て発達し⁷⁾, 反応時間などの神経機能は幼少期に, 筋力などの筋機能は思春期に, それぞれ著しく発達すると解説されている^{8), 9)}. しかしながら, 神経・筋の協調機能による筋パワー(瞬発力)については, その発達過程が十分明らかとはいえない。

本研究では, 肘関節屈曲運動における筋収縮の力・速度およびパワーが, 発育過程の児童生徒においてどのような変化を示すかを探ろうとした。

方 法

1. 被験者: 無作為に抽出した健康な男子児童生徒87名(10歳23名, 13歳20名, 15歳21名, 19歳23名)で, 彼らの身体的特徴と前腕の慣性モーメントは表1の通りである。

2. 装置と実験手順: 実験には, Wilkie¹⁰⁾と同機構の腕エルゴメーター(図1)を用いた。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, 手頸のベルトとワイヤーを介して連結された長いアーム(a)が, 前腕とほぼ平行状態で回転する。同時に長いアームと直角に直結した短いアーム(b)も回転し, 回転軸から10cmの点に吊された荷重(W)が牽き上げられる。引き上げられた荷重は, 一方向回転ギアのストッパーで落下を阻止される。なお実験に当っては, 補助者が被験者の両肩を抑えて, 体幹の動揺を阻止し

た。

荷重負荷は, 肘関節90°における最大筋力(P_0 : 3回の平均値)の0, 10, 20, 30, 45, 60%とし, 最初に無負荷(0% P_0)から60% P_0 まで順次負荷を増してゆき, 次に60% P_0 から順次負荷を軽くする方法(series and reverse)で, 各負荷に対する(肘関節90°通過時点の)速度を4回ずつ測定した。なお疲労の影響を避けるため, 牽引毎に1分以上の休息をおいた。

3. 記録法: アーム(a)の回転軸から6cmの点に, 直線無抵抗電磁コイル(Shaevitz Engineering Velocity-transducer Type 7L6VT-Z)を連結して速度を検出し, これを手頸部の水平速度に

図1 実験装置. a; 長いアーム, b; 短いアーム, c; ソケット, d; ストッパー, e; 腋下固定板, w; 荷重

表1 被験者の形態および前腕と装置の慣性モーメント

age	N	height		weight		forearm† length (l)		forearm inertia (I)		device inertia (I')
yrs		cm		kg		m		kg · m		kg · m
		$\bar{X}$	SE	$\bar{X}$	SE	$\bar{X}$	SE	$\bar{X}$	SE	
10	23	132.9	1.36	29.05	1.07	.181	.002	.0166	.0029	.0272
13	20	155.3	1.35	43.37	1.66	.221	.002	.0294	.0067	.0272
15	21	165.8	1.46	54.78	2.19	.235	.002	.0395	.0084	.0272
19	23	171.8	.89	62.30	1.27	.240	.002	.0486	.0110	.0272

† 前腕長は, 尺骨の肘頭から基状突起までの長さ。

図2 (左): 力と速度の年齢別平均値(白丸)と標準誤差の2倍(縦線).
プロットを結ぶ曲線はHillの方程式に基づく理論曲線.
(右): 相対負荷(% P_0)に対する年齢別の力・速度曲線(上に凹型)
および力・パワー曲線(上に凸型). 矢印は最大パワー.

換算した. なお, 速度計の較正は重力加速度によった. さらに, 手頸部とアーム(a)を連結するワイヤーにストレイン・ゲージ張力計を挿入して牽引力を記録すると共に, アームの回転軸にエレクトロゴニオメーターを取り付けて肘関節の角変位を記録した.

4. 力・速度関係の決定: 実験成績はすべて, 次式で示される A.V. Hill の力・速度関係式⁴⁾

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

(但し, P は荷重または力, V は速度, P_0 は等尺性最大筋力, a , b は定数)

によって処理した. このためには, 最大筋力を測定した関節角(90°)と同じ関節角で速度を計測する必要がある¹⁾, 本研究では, ゴニオメーターの記録を基に, この計測点を一致させ, 各荷重(または力)に対する速度の関係を導いた.

5. 慣性負荷の補正: 本研究では, 筋の弛緩状態から負荷を牽引する後荷重法(After load method)を用いたため, 前腕, 装置および荷重の慣性が影響し, 特に軽い負荷では, 速度が牽引終了までに最高に達し得ないこと, および外部負荷がゼロでも慣性負荷が常に負荷となっていることが考えられた. そこで筋の理論速度を知るため, D.R. Wilkie の方法¹⁰⁾で, 慣性の影響を除去する補正

計算を行なった. すなわち, 式(1)を変形した次式

$$P = (P_0+a)b/(V+b) - a \cdots \cdots (1')$$

において, 加速期には, 前腕と装置および荷重の質量(M)¹⁾の影響で真の作用力は次式で表わされる.

$$P = F + M \cdot dv/dt \cdots \cdots (2)$$

(但し, P は力, F は荷重, M は質量)

式(1')に式(2)を代入すると,

$$(P_0+a)b/(V+b) - a - F = M \cdot dv/dt \cdots \cdots (3)$$

となり, この微分方程式を解けば, 時間 t に伴う速度変化の式が得られ, その式(3)に $t = \infty$ を代入すれば,

$$(\beta \cdot x)/V_1 = -(1nz + 1 + \alpha/z) \cdots \cdots (4)$$

(但し, $\alpha = (P_0 - F)/(P_0 + a)$, $\beta = (F + a)^2 /$

$(P_0 + a)Mb$; M は前腕, 装置, 荷重の手頸部における等価質量, $V_1 = b(P_0 - F)/(F + a)$; 理論速度, $z = 1 - V/V_1$, x は牽引距離, a と b は実験データに直接 Hill の方程式をあてはめて求めた仮の特性方程式の定数) となって, 理論的最大速度(V_1)を求める式が得られる. このうち, V_1 , α , β , x は仮の特性方程式の定数 a , b と荷重 F , 牽引距離 x , 質量 M から求められる. 従って, 実験値を, Z とそれから求められる V/V_1 で割れば理論速度の概算が得られる. この方程式によ

表2 各年齢群の等尺性最大筋力 (P_0), 最大速度 (V_0), 力・速度関係の定数 (a , b) と a/P_0 比, および最大パワー (PV_{max}) とその出現条件 (P/P_0 , V/V_0).

age yrs	P_0 kg	V_0 m/sec	a kg	b m/sec	a/P_0 (b/V_0)	PV_{max} watt	P/P_0	V/V_0
10	10.96	3.02	4.30	1.18	.39	39	.35	.34
13	18.59	4.08	8.30	1.77	.45	92	.36	.35
15	22.30	4.61	9.20	1.88	.41	123	.35	.35
19	23.65	4.83	10.20	2.08	.43	141	.35	.36

図3 手頸部における速度の年齢による変化(左)と、10歳と19歳の差を100とした相対的变化(右)。

て、新しくプロットされたデータに対する定数 a , b を求め、これを用いてさらに同じ手順を4, 5回繰り返す手続きをふんで理論速度を定めた。この補正計算は、全被験者につき、すべてマイクロコンピューター (WANG 2200B) で行なった。

結 果

各被験者における力と速度の測定値 (慣性の補正済み) を Hill の特性方程式(1)に当てはめたところ、その適合性を示す相関係数が平均 $r = 0.9981$ (最小0.9938~最大0.9999) となり、全被験者に

おいて0.1%水準で有意性が認められた。

図2(左)に、年齢ごとの力と速度の平均値(白丸)および標準誤差の2倍(縦線)を示した。なお、プロットを結んだ曲線は、平均値を Hill の方程式に当てはめて描いた理論曲線である。いずれの年齢群においても、測定値は Hill の方程式によくあてはまり、曲線の彎曲度を示す a/P_0 の定数は、各年齢ともあまり変わらず、0.39~0.45の範囲にあった(表2)。

図2(右)は、最大筋力を100%とした相対負荷に対する速度の関係(凹型)と、次式

図4 (左): 最大筋力 (P_0), 最大速度 (V_0), 前腕長当りの最大速度 (V_0/l), 最大パワー ($PV \max$) の年齢による変化。
(右): 10歳と19歳との差を100%とした相対的变化. 単純反応時間 (RT) は参考資料⁹⁾より引用.

$$PV = bP \left(\frac{P_0 + a}{P + a} - 1 \right) \dots\dots\dots(5)$$

で求めたパワー (PV) の関係 (凸型) である. 各相対負荷に対する速度は, 高年齢群ほど大きく, 従ってパワーも高年齢群ほど大きい. しかしながら, 最大パワーが出現する力の条件 (P/P_0 ; 同図中の矢印) は, いずれの年齢においても最大筋力の約35%であり, 速度の出現条件 (V/V_0) も最大速度の約35%であった (表2).

図3 (左) は, 各負荷条件下での速度が, 年齢によってどのように変化するかを示したものであり, いずれの負荷条件においても, 各年齢間に有意な差が認められた. 図3 (右) は, 10—19歳間における速度の差を100%として, 各負荷条件における速度の相対的増加量を比較したものである. この相対的増加量を, 1年当りの増加率 (%/year) でみると, 0, 10, 20, 30, 45, 60% P_0 の負荷に対する各速度の増加率は, 10—13歳間でそれぞれ 19.5, 17.1, 19.8, 21.6, 20.4, 18.6 %/year, 13—15歳間で 14.7, 15.3, 12.8, 14.1, 13.0, 8.8 %/year となり, 10歳から15歳までの増加率

の大きさは, 30% P_0 に対する増加率が最も大きく, 次いで 0% P_0 , 45% P_0 , 20% P_0 , 10% P_0 , 60% P_0 の順となった.

図4 (左) に, 最大筋力 (P_0), 最大速度 (V_0), 前腕長当りの最大速度 (V_0/l), および最大パワー ($PV \max$) を年齢との関係で示した. なお, V_0/l は筋長の個人差を消去する意図から, 手頭における最大速度を各被験者の前腕長 (l) で割った指数である. これらのいずれにおいても, 各年齢間に有意な差が認められた. また10歳と19歳間の増加量を100%として, 10—15歳間における1年間当りの平均増加率をみると, P_0 が最も大きく (17.9 %/year), 以下 V_0 (17.6 %/year), V_0/l (17.0 %/year), $PV \max$ (16.5 %/year) の順であった. なおこれらの10—15歳間における増加率はいずれも, 同図中に引用⁹⁾した単純反応時間 (RT) のそれ (20 %/year) より明らかに小さかった (図4, 右).

論 議

最大パワーの発達に10—15歳間で著しいという

本研究結果は、金子⁵⁾が慣性車輪を用いて測定した脚伸展パワーの発達傾向と類似している。しかし慣性車輪法と異なって、後荷重法による本研究の成績は、パワーの直接的要因である力と速度の法則的關係（力・速度關係）の考察を可能にする。しかし、力・速度關係を摘出筋の実験成績と照合し得るものとするには、人体筋（in situ）における負荷条件を「筋自体に及ぼす負荷」に限定する必要がある。前腕と装置の慣性を補正したのはこのためである。事実、全被験者についての力・速度關係は、慣性の補正を行って筋自体にかかる負荷を算出した場合の方が、Hillの方程式によりよく適合した。このことは、力・速度關係における慣性補正の必要性¹⁰⁾とその妥当性を示唆している。

力・速度關係における定数 a/P_0 （数学的には關係曲線の彎曲度、生理学的には等尺性筋力に対する内部抵抗の相対的な大きさ）は、本研究の場合 0.39～0.45 となり、成人で測定した金子⁵⁾の 0.45、D.R.Wilkie¹⁰⁾の 0.20～0.48 の値とよく一致した。また、最大パワーの発現する力と速度の条件がどの年齢においてもほぼ等しい（35% P_0 、35% V_0 ）ことも、 a/P_0 がほぼ一定という事実によって説明できる。R.Close²⁾は、ラットの發育に関する研究において、短縮速度が誕生時の 2 倍以上に増加しても、 a/P_0 はほとんど変わらないことを見出している。このような事柄を考え合わせると、筋の収縮力や短縮速度は年齢によって変化しても、筋の基本的特性を示す力・速度關係のパターンは変化しないもののように思われる。

筋の短縮速度は、一般に筋が長いほど大きい⁹⁾。したがって、本質的な筋の収縮特性を知るには、単位筋長当りの速度（速度を筋長で割った値）を算出することが望ましい。しかし、肘関節屈筋群は長さの異なる複数の筋で構成されており、また解剖学的な起始・停止を見分けることも生体では困難である。そこで本研究では、便宜的に筋長が前腕長に比例すると仮定して、手頸部での速度を前腕長 (l) で除した筋長当りの速度指数 (V/l , l/sec) を算出した。このようにして得られた（筋長当り）最大速度 V_0/l は、慣性の補正もなされているので、筋が全く無負荷の状態で短縮した単位筋

長当りの最大速度を表わしているとみてよい。この V_0/l 値は、 V_0 と同様に年齢と共に増加しており（図 4）、したがって、手頸部における最大速度の発達は、筋長の増加だけによるのではなく、（筋節における短縮速度のような）本質的な筋の収縮機能の発達を反映したもの、と解することができる。

本研究に先立って筆者らは、負荷が小さいときの速度ほど神経機能に、負荷の大きいときの速度ほど筋機能にそれぞれ依存し、したがって負荷の小さいときの速度ほど比較的年少の時期に著しい発達を示すのではないかと仮定した。しかしながら、最大速度 (V_0 , V_0/l) の発達は、引用した単純反応時間の発達より明らかに遅いというだけでなく、最大筋力の発達よりも遅れる（図 4、右）という結果になった。これは、筋パワーとそれに直接關係する力と速度の要素の発達が、神経機能よりもむしろ、最大筋力に關係するような筋機能の発達に大きく依存することを示唆している。

要 約

人体筋の機械的パワーにおける年齢差を知るため、10、13、15、19歳の4つの異なる年齢群から、それぞれ23、20、21、23名（計87名）の男子を無作為に抽出して、肘関節屈曲運動の力・速度關係を調べた。実験には Wilkie と同機構の装置を用い、後荷重法で等尺性最大筋力の 0—60% の負荷を与え、肘関節 90° における手頸部の速度を測定した。得られたデータをすべて Hill の特性方程式

$$(P+a)(V+b) = (P_0+a)b$$

（但し、 P は荷重または力、 V は速度、 P_0 は等尺性最大筋力、 a と b は定数）に当てはめて分析し、以下の結果を得た。

1) 前腕と装置による慣性の影響を消去して得た力・速度關係 ($P \cdot V$ 關係) は、年齢の異なるいずれの被験者群の場合も、Hill の方程式によく適合した ($r > 0.994$)。

2) $P \cdot V$ 關係の特徴（彎曲度）を示す a/P_0 比は、年齢に關係なくほぼ一定値 (0.40—0.45) を示し、したがって最大パワーも、年齢に關係なく約 35% P_0 の負荷条件下で出現した。

3) 等尺性最大筋力, 最大パワーおよび種々の負荷条件下における速度は, 10—15歳間において, 10—19歳間の増加量の約90%の増加を示した。しかしこの相対増加量(90%)は, 単純反応時間(引用資料)の増加より明らかに少なかった。

4) 前腕長当りの速度(V_0/l)も加齢と共に増加し, このことから, 筋短縮速度の改善が単に筋長の発達によるものではなく, 筋機能の質的発達によるものでもあることが示唆された。

5) 以上の結果から, 筋パワーの加齢による発達は, 神経機能よりはむしろ, 筋機能に依存すると結論した。

注

注1) 前腕と装置の質量の求め方: 金子⁵⁾の報告した慣性モーメント($0.0395\text{kg} \cdot \text{m}^2$)を基に, Wilkie¹⁰⁾の方法で各被験者の慣性モーメント(I)を求め, これに次式で求めた装置の慣性モーメント(I')

$$I' = mgh (T/2\pi)^2$$

(但し, T は周期, h は回転軸から重心までの距離, m は質量, g は重力加速度)を加え, それを前腕長の自乗で除することによって得た。

引用・参考文献

- 1) Abbott, B.C. and Wilkie D.R., "The relation between velocity of shortening and the tensionlength curve of skeletal muscle," J. Physiol., 120: 214—23, 1953.
- 2) Close, R., "Dynamic properties of fast and slow skeletal muscle of rat during development," J. Physiol., 173: 74—95, 1964.
- 3) Close, R., "The relation between intrinsic speed of shortening and duration of the active state of muscle", J. Physiol., 180: 542—59, 1965.
- 4) Hill, A.V., "The heat of shortening and the dynamic constants of muscle", Proc. Roy. Soc., B126: 136—95, 1938.
- 5) 金子公宥, 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.
- 6) 木村邦彦, ヒトの発育, メヂカルフレンド社, 1969. pp.203—4.
- 7) Scammon, R.E., "The measurement of man", in (ed. Harrison, J.A.) 173—215, University Mineapolis: Mineapolis, 1930.
- 8) 高石昌弘・猪飼道夫, 身体発達と教育, 第一法規出版, 1967. pp.165—207.
- 9) 東京都立大学身体適性学研究室, 日本人の体力標準値第2版, 不昧堂, 1975. p.209.
- 10) Wilkie, D.R., "The relation between force and velocity in human muscle", J. Physiol., 110: 249—80, 1950.