

〔総 説〕

筋力発揮率の計測意義と臨床応用

下 瀬 良 太¹⁾

Significance of the assessment and clinical application
of the rate of force development

SHIMOSE Ryota

抄 録

筋力の評価において最大筋力以外に筋力発揮率（RFD）の評価が推奨されている。RFDは筋力発揮開始時点から筋力上昇時における筋力変化の平均勾配から算出される指標であり、特に神経性因子を反映し、歩行などの日常生活動作との関連も強いものである。RFDは加齢とともに低下し、その低下は最大筋力の低下よりも早期に発生し、最大筋力の低下よりも大きい。また、疾患者のRFDは同年代の健常者よりも低下しており、介入により最大筋力の改善は認めていてもRFDは改善が不十分であることが多い。神経性因子を反映し有用な情報を得ることができるRFDであるが、臨床の中でのRFDは未だ十分な検討がされていない現状がある。そして、RFD改善のためにもリハビリテーションなどの効果的な介入が必要であるが、RFD改善のための介入内容について一定の見解が得られていない。より効果的なリハビリテーションを提供するためにも、RFDについて今後の研究が期待される。

キーワード：評価

筋力発揮率

神経性因子

リハビリテーション

1) 健康科学大学 健康科学部 理学療法学科

はじめに

近年の筋力の評価では、最大筋力の他に瞬発的な筋力発揮の指標となる筋力発揮率 (Rate of force development ; RFD) の評価も行うことが推奨されている¹⁾。RFD とは筋力上昇時の一定の時間間隔における筋力変化の平均勾配を算出した値である (図1)。RFD の評価が推奨される理由として、RFD はスポーツなどにおける動作や日常生活での動作との関連が最大筋力との関連よりも強いことと、最大筋力とは異なる生理学的意義を持つこと、そして神経筋機能の様々な変化に対して感度が高いことが知られている¹⁾。本稿では近年注目されている RFD の測定意義や計測方法および臨床応用について述べる。

Rate of force developmentの規定因子と測定意義

筋力とは神経性因子と筋性因子によって規定されるものであり、RFD も筋力の指標の1つであるため、神経性因子と筋性因子によって規定される。具体的には、神経性因子として運動単位の発火頻度などの神経性ドライブ²⁾、筋性因子として筋線維組成比³⁾や、力の伝達に参与する腱などの結合組織の硬さ (Stiffness)^{4,5)}、活動する筋の面積⁶⁾、および速筋線維の筋収縮速度⁷⁾によって RFD は規定されている。これらの因子の中で、神経性の因子が RFD には重要とされており、特に運動単位の発火頻度が非常に重要となる¹⁾。これは筋力出力時の運動単位の活動様式が筋力発揮から筋力上昇時の場面と最大筋力の場面と異なり、筋力上昇時の発火頻度は最大筋力発揮時の2倍以上であることが影響していると考えられる⁸⁾。また筋線維分布などの違いにより個人内でも RFD は各筋で異なることも報告されており、例えば、大腿四頭筋は前脛骨筋や下腿三頭筋および肘屈筋群よりも RFD が大きいことが報告されている⁹⁾。

RFD と最大筋力の測定意義の違いの一つとして計測している時間帯の違いがある (図1)。最大筋力に到達するためには300ms 以上の時間を要し、筋力発揮が比較的一定になった時間帯から算出されるが、RFD はその300ms より前の時間であり、筋力が上昇している時間帯での評価である。日常生活において、不意な重心動揺に対するバランス反応は最大筋力に到達する以前の時間での瞬間的な筋活動を必要とするため高い RFD が重要と言われている¹⁰⁾。実際に、歩行時の外乱に対して大きくバランスを崩した高齢者 (論文内で転倒したと定義) は転倒しなかった高齢者よりも下肢筋の RFD が低値であったことも報告されている¹¹⁾。また、スポーツ障害の一つである ACL 損傷はジャンプの着地後50ms 以内の時間で発生していること¹²⁾、歩行を初めとした日常生活動作での筋力発揮時間は通常で行われると300ms より短い時間の筋活動で行われていることを考慮すると、最大筋力に達する以前の区間の評価である RFD は歩行などのパフォーマンスとの関連のみならず、転倒予防や障害予防の観点からも非常に重要な指標となると考えられる。これまでも、RFD は様々なパフォーマンスとの関連が報告されており、膝伸展筋の RFD はジャンプの高さと関連があるという報告や¹³⁾、股関

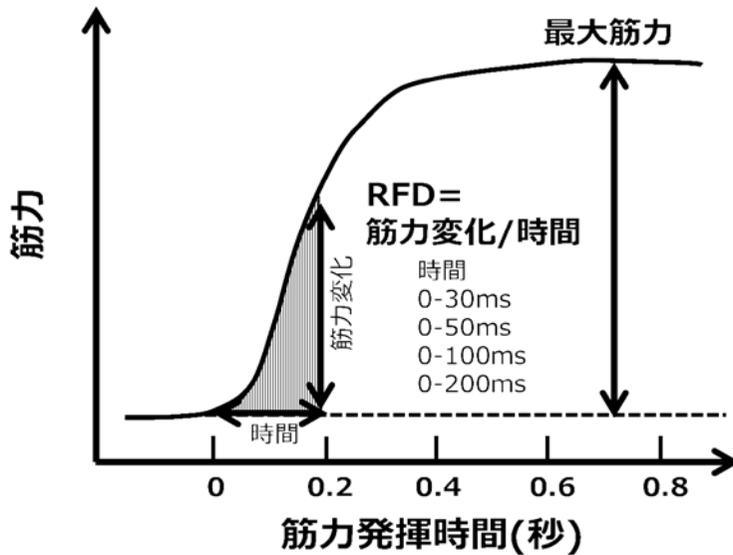


図1 筋力 - 時間曲線

筋力の評価として最大筋力と筋力発揮率（RFD）がある。RFD は一定時間間隔での筋力変化であり、その時間間隔は0-30、0-50、0-100、0-200ms で評価されることが多い。また最大筋力に到達するまでには300ms 以上の時間を要す。

節外転筋の RFD は片足立ちなどのバランス機能との関連を認めている一方で、股関節外転筋の最大筋力はバランス機能と関連を認めないという報告もある¹⁴⁾。これらの報告は、最大筋力だけでは捉えられない生理学的意義を持つ RFD を測定し、パフォーマンスとの関連を検討する重要性および必要性を示していると考えられる。

計測方法

RFD の測定は等尺性筋収縮時の筋力上昇時の一定の時間間隔で解析されることが多い。等速性筋収縮時の RFD の解析も可能であるが、筋力発揮中に筋の長さ変化を伴うこと、そしてその筋の長さ変化により神経性要因も変化するために、解釈が非常に複雑となるため、等速性筋収縮での RFD の検討は少ない。また、指示の違いにより RFD の値は変化するという報告があり¹⁵⁾、RFD 測定時の指示は「なるべく速く最大の力で」という一定の指示で行うことが推奨されている¹⁾。さらに、筋力発揮前の筋活動の状態により RFD は変化し、拮抗筋の活動（カウンタームーブメント）があると RFD は増加し^{16,17)}、一方で主動筋の活動があると RFD は低下する¹⁸⁾。これは収縮前の筋活動の状態により筋力上昇段階での運動単位の発火頻度が変化することが原因として考えられている¹⁸⁾。そのため、RFD 測定時は筋力発揮前の状態を統一することが重要であり、一般的には主動筋および拮抗筋の筋収縮を認めない状態から計測することが多い。RFD の算出方法は筋力上昇時での最大勾配の値を算出する方法もあるが、近年は

Aagaard ら²⁾の報告のあと、筋力発揮開始地点から30、50、100、200ms という時間間隔での平均勾配から算出されることが多くなった。これらの時間間隔において生理学的な意味は異なり、Andersen と Aagaard は筋力発揮から50ms 以内の筋力上昇時の極めて初期の RFD においては単収縮特性と関連が強く、筋力発揮から90ms 以降を含めた後期の RFD は最大筋力との関連が強いことが報告した¹⁹⁾。単収縮が一度の単発の電気刺激による筋の反応であることを考慮すると、初期の RFD においては、運動単位同期性や発火頻度に関連していることが推察され、一方で、90ms 以降の後期の RFD は最大筋力との関連が強いことから発火頻度よりは運動単位の動員数との関連が強いことが推察される。そのため、筋力上昇時での最大勾配だけでなく、上記時間間隔での解析での解析を行うことで、より詳細な筋力特性が評価できると考えられる。

加齢による変化

加齢により頸部屈伸筋²⁰⁾、大腿四頭筋²¹⁾、足底背屈筋²²⁾、前脛骨筋²³⁾、底屈筋²⁴⁾の RFD は低下し、握力²⁵⁾の RFD でさえも低下する。一般的に加齢に伴う筋力の低下が少ないとされる握力において、最大筋力よりも RFD の方が早い年代から低下することが示されたことから²⁵⁾、下肢の筋などは早い年代から RFD が低下していることが推察される。加齢により最大筋力は低下するが、その低下の程度は最大筋力の低下より RFD の低下の方が大きいとも言われている²³⁾。RFD の加齢による低下の原因は、運動単位の発火頻度（特に doublet と言われる運動単位の非常に高い発火頻度）の低下²³⁾や主動作筋と拮抗筋の相反する筋の同時収縮²⁰⁾および主動作筋の筋組成の変化³⁾が関与すると考えられている。現状では報告はないが、この RFD の低下は近年注目されているフレイルとの関連や早期発見につながる可能性も考えられる。

臨床応用

運動器疾患症例や中枢疾患症例の RFD についていくつかの報告がある。まず、変形性膝関節症に対して全人工膝関節置換術 (Total Knee Arthroplasty : TKA) を行った患者は術後6か月経過し、術側の膝伸展筋の最大筋力と RFD は手術前と同等まで改善しているが²⁶⁾、術側の膝伸展筋の最大筋力および RFD は非術側に比べ低下しており、術側の RFD は同年代の健常者よりも低下していることが報告されている²⁷⁾。また、Timed Up and Go test や階段昇降時間などのパフォーマンスが RFD と関連があることが報告された²⁶⁾。そして、TKA 術後は大腿四頭筋の RFD の左右非対称性は最大筋力の左右非対称性よりも大きく、その RFD の左右非対称性が日常生活での困難感と関連を認める報告もあり²⁸⁾、RFD 改善は日常生活の質も改善する可能性も示されている。また、前十字靭帯 (Anterior Cruciate Ligament : ACL) 損傷後の術後症例は術後6か月でスポーツ復帰を目的にしたリハビリテーションを行ったとしても、下肢伸展動作の最大筋力は回復するが下肢伸展動作の RFD は回復しないこと²⁹⁾、アキレス腱断裂によりアキレス腱縫合術を行った症例は、一般的なりハビリテーションを受けた術後平均6か

月（3か月から11か月）において、最大筋力は健常者と比較して差がない程度に回復していても、下腿三頭筋のRFDは術側および非術側ともに健常者と比較して低下を示すという報告もある⁵⁾。アキレス腱縫合術後のRFDの低下はアキレス腱のStiffnessや下腿三頭筋の筋力発揮と関連があり、その下腿三頭筋の筋力発揮は片脚ホッピングの距離などのパフォーマンスとの関連も認めていた⁵⁾。

脳血管障害の症例についても発症後6か月（平均6.5年：0.8-20.9年）経過した平均年齢44歳代（22-61歳）の歩行可能であるが中程度以上の運動麻痺を有した症例において麻痺側の下腿三頭筋のRFDは非麻痺側に比べ大きく低下していることが報告されている³⁰⁾。また歩行困難な症例を含む報告（平均年齢56歳）ではあるが、膝伸展筋のRFDの低下は、発症後平均3.5か月以降から生じており、非麻痺側の膝伸展筋のRFDは健常者よりも低下していることも報告されている³¹⁾。しかし、3.5か月以前の詳細なことやRFD低下の原因は不明な点が多いため、今後の研究が待たれる領域と考えられる。

上述したこれまでの臨床の報告から判断すると、日常生活動作について考えた際、最大筋力の評価だけでは筋力の評価は不十分であり、RFDを評価し、そしてRFDを改善するためのリハビリテーションも視点に入れることが今後非常に重要になると考えられる。

トレーニング効果

多くの報告で、高強度の筋力トレーニング^{2,32,33)}や高速度での筋力トレーニング³⁴⁾によりRFDの改善を示しており、低強度での筋力トレーニングではRFDの改善について効果は乏しいことが示唆される報告がある³⁵⁾。高強度および高速度でのトレーニング効果については神経性因子の改善によるとする報告が多く^{4,34)}、神経性因子の改善は筋肥大など筋性因子の改善よりもRFD改善に大きく寄与している³³⁾。また、バランストレーニングによってもRFDは改善することが報告されている³⁶⁾。これは感覚入力による運動単位の動員閾値および活動様式を変化させることでRFDの改善を求めている。しかし、バランストレーニングによるRFDの改善は高強度トレーニングによって得られるRFDの改善に及ばないことも報告されている³⁷⁾。上記内容をまとめると、RFDの改善のためには高強度または高速度の筋力トレーニングが重要であることが分かる。

一方で、高速度（180°/sの等速性運動膝伸展）での運動により最大筋力の改善は得られないが、0-90msといった筋力発揮初期の時間間隔でのRFDは改善し、それ以降の時間間隔では改善が得られなかったという報告³⁸⁾や高強度トレーニングと行った際も0-250ms間隔でのRFDのみ改善し、それ以前の時間間隔での改善はみとめなかったという報告³⁹⁾もあり、トレーニング方法によって改善するRFDの時間間隔が異なることも示されている。また、筋力トレーニング（50-80%最大筋力強度）を持続的トレーニング（30-90分サイクリング）と併用して行うとRFDの改善を認めないという報告⁴⁰⁾や、筋肥大（80%最大筋力強度）や最大筋力改善を求めるトレーニング（90%最大筋力強度）および瞬発力を高めるトレーニング（60%最大筋力強度で高速度トレーニング）

を混合した場合も RFD は改善しないという報告がある⁴¹⁾。これらの報告は今後 RFD 改善のためにトレーニング方法の再検討の必要性を示唆するものである。RFD の改善には実際の運動速度に関係なく、素早く行うという意識が重要であるという指摘もあり³⁹⁾、今後 RFD 改善を求めるときは、理学療法士など介入に携わる者がより詳細な指示をして介入を行うことの重要性を示していると考えられる。

まとめ

本稿では、近年筋力評価の指標として注目されている RFD について述べた。計測には配慮が必要であるが、RFD から得られる情報は非常に有用である。また有患者は同年代の健常者よりも RFD は低下しており、リハビリテーションを行い最大筋力は改善されていたとしても、RFD の改善は十分に得られていないという報告も散見される。このことから、今後のリハビリテーションの機能改善には RFD の改善も注目する必要があると考えられる。RFD 改善も視野に入れたリハビリテーションを展開し、より患者の機能回復につなげられるよう、RFD の研究は今後必要であると考えられる。

参考文献

- 1) Maffiuletti NA, Aagaard P, Blazevich AJ, Folland J, Tillin N, Duchateau J. (2016) : Rate of force development : physiological and methodological considerations. *Eur J Appl Physiol* 116, pp. 1091-116.
- 2) Aagaard P, Simonsen EB, Andersen JL, Magnusson P, Dyhre-Poulsen P. (2002) : Increased rate of force development and neural drive of human skeletal muscle following resistance training. *J Appl Physiol* 93, pp. 1318-26.
- 3) Korhonen MT, Cristea A, Alen M, Hakkinen K, Sipila S, Mero A, Viitasalo JT, Larsson L, Suominen H. (2006) : Aging, muscle fiber type, and contractile function in sprint-trained athletes. *J Appl Physiol* 101, pp. 906-17.
- 4) Bojsen-Møller J, Magnusson SP, Rasmussen LR, Kjaer M, Aagaard P. (2005) : Muscle performance during maximal isometric and dynamic contractions is influenced by the stiffness of the tendinous structures. *J Appl Physiol* 99, pp. 986-94.
- 5) Wang HK, Chiang H, Chen WS, Shih TT, Huang YC, Jiang CC. (2013) : Early neuromechanical outcomes of the triceps surae muscle-tendon after an Achilles' tendon repair. *Arch Phys Med Rehabil* 94, pp. 1590-8.
- 6) Suetta C, Aagaard P, Rosted A, Jakobsen AK, Duus B, Kjaer M, Magnusson SP. (2004) : Training-induced changes in muscle CSA, muscle strength, EMG, and rate of force development in elderly subjects after long-term unilateral disuse. *J Appl Physiol* 97, pp. 1954-61.
- 7) Methenitis S, Terzis G, Zaras N, Stasinaki AN, Karandreas N. (2016) : Intramuscular fiber conduction velocity, isometric force and explosive performance. *J Hum Kinet* 51, pp. 93-101.
- 8) Sale DG (1987). Influence of exercise and training on motor unit activation. *Exerc Sport Sci Rev* 15,

- pp. 95-151.
- 9) Behm DG, Whittle J, Button D, Power K. (2002) : Intermuscle differences in activation. *Muscle Nerve* 25, pp. 236-43.
 - 10) Aagaard P. (2003) : Training-induced changes in neural function. *Exerc Sport Sci Rev* 31, pp. 61-7.
 - 11) Pijnappels M, van der Burg PJ, Reeves ND, van Dieën JH. (2008) : Identification of elderly fallers by muscle strength measures. *Eur J Appl Physiol* 102, pp. 585-92.
 - 12) Krosshaug T1, Nakamae A, Boden BP, Engebretsen L, Smith G, Slauterbeck JR, Hewett TE, Bahr R. (2007) : Mechanisms of anterior cruciate ligament injury in basketball: video analysis of 39 cases. *Am J Sports Med* 35, pp. 359-67.
 - 13) de Ruyter CJ, Van Leeuwen D, Heijblom A, Bobbert MF, de Haan A. (2006) : Fast unilateral isometric knee extension torque development and bilateral jump height. *Med Sci Sports Exerc* 38, pp. 1843-52.
 - 14) Chang SH, Mercer VS, Giuliani CA, Sloane PD. (2005) : Relationship between hip abductor rate of force development and mediolateral stability in older adults. *Arch Phys Med Rehabil* 86, pp. 1843-50.
 - 15) Sahaly R, Vandewalle H, Driss T, Monod H. (2003) : Surface electromyograms of agonist and antagonist muscles during force development of maximal isometric exercises—effects of instruction. *Eur J Appl Physiol* 89, pp. 79-84.
 - 16) Grabiner MD. (1994) : Maximum rate of force development is increased by antagonist conditioning contraction. *J Appl Physiol* 77, pp. 807-11.
 - 17) Richartz C, Lévênez M, Boucart J, Duchateau J. (2010) : Initial conditions influence the characteristics of ballistic contractions in the ankle dorsiflexors. *Eur J Appl Physiol* 110, pp. 805-14.
 - 18) Van Cutsem M, Duchateau J. (2005) : Preceding muscle activity influences motor unit discharge and rate of torque development during ballistic contractions in humans. *J Physiol* 562, pp. 635-44.
 - 19) Andersen LL, Aagaard P. (2006) : Influence of maximal muscle strength and intrinsic muscle contractile properties on contractile rate of force development. *Eur J Appl Physiol* 96, pp. 46-52.
 - 20) Valkeinen H, Ylinen J, Mälkiä E, Alen M, Häkkinen K. (2002) : Maximal force, force/time and activation/coactivation characteristics of the neck muscles in extension and flexion in healthy men and women at different ages. *Eur J Appl Physiol* 88, pp. 247-54.
 - 21) Sundstrup E, Jakobsen MD, Andersen JL, Randers MB, Petersen J, Suetta C, Aagaard P, Krstrup P. (2010) : Muscle function and postural balance in lifelong trained male footballers compared with sedentary elderly men and youngsters. *Scand J Med Sci Sports* 20, pp. 90-7.
 - 22) Thelen DG, Schultz AB, Alexander NB, Ashton-Miller JA. (1996) : Effects of age on rapid ankle torque development. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci* 51, pp. 226-32.
 - 23) Klass M, Baudry S, Duchateau J. (2008) : Age-related decline in rate of torque development is accompanied by lower maximal motor unit discharge frequency during fast contractions. *J Appl Physiol* 104, pp. 739-46.
 - 24) Thompson BJ, Ryan ED, Herda TJ, Costa PB, Herda AA, Cramer JT. (2014) : Age-related changes

- in the rate of muscle activation and rapid force characteristics. *Age (Dordr)* 36, pp. 839-49.
- 25) Schettino L, Luz CP, de Oliveira LE, de Assunção PL, da Silva Coqueiro R, Fernandes MH, Brown LE, Machado M, Pereira R. (2014) : Comparison of explosive force between young and elderly women: evidence of an earlier decline from explosive force. *Age (Dordr)* 36, pp. 893-8.
 - 26) Winters JD, Christiansen CL, Stevens-Lapsley JE. (2014) : Preliminary investigation of rate of torque development deficits following total knee arthroplasty. *Knee* 21, pp. 382-6.
 - 27) Gapeyeva H, Buht N, Peterson K, Erelina J, Haviko T, Pääsuke M. (2007) : Quadriceps femoris muscle voluntary isometric force production and relaxation characteristics before and 6 months after unilateral total knee arthroplasty in women. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 15, pp. 202-11.
 - 28) Maffiuletti NA, Bizzini M, Widler K, Munzinger U. (2010) : Asymmetry in quadriceps rate of force development as a functional outcome measure in TKA. *Clin Orthop Relat Res* 468, pp. 191-8.
 - 29) Angelozzi M, Madama M, Corsica C, Calvisi V, Properzi G, McCaw ST, Cacchio A. (2012) : Rate of force development as an adjunctive outcome measure for return-to-sport decisions after anterior cruciate ligament reconstruction. *J Orthop Sports Phys Ther* 42, pp. 772-80.
 - 30) Fimland MS, Moen PM, Hill T, Gjellesvik TI, Tørrhaug T, Helgerud J, Hoff J. (2011) : Neuromuscular performance of paretic versus non-paretic plantar flexors after stroke. *Eur J Appl Physiol* 111, pp. 3041-9.
 - 31) Horstman AM, Gerrits KH, Beltman MJ, Koppe PA, Janssen TW, de Haan A. (2010) : Intrinsic properties of the knee extensor muscles after subacute stroke. *Arch Phys Med Rehabil* 91, pp. 123-8.
 - 32) Del Balso C, Cafarelli E. (2007) : Adaptations in the activation of human skeletal muscle induced by short-term isometric resistance training. *J Appl Physiol* 103, pp. 402-11.
 - 33) Häkkinen K, Kallinen M, Izquierdo M, Jokelainen K, Lassila H, Mälkiä E, Kraemer WJ, Newton RU, Alen M. (1998) : Changes in agonist-antagonist EMG, muscle CSA, and force during strength training in middle-aged and older people. *J Appl Physiol* 84, pp. 1341-9.
 - 34) Van Cutsem M, Duchateau J, Hainaut K. (1998) : Changes in single motor unit behaviour contribute to the increase in contraction speed after dynamic training in humans. *J Physiol* 513, pp. 295-305.
 - 35) Schmidtbleicher D, Haralambie G. (1981) : Changes in contractile properties of muscle after strength training in man. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 46, pp. 221-8.
 - 36) Gruber M, Gollhofer A. (2004) : Impact of sensorimotor training on the rate of force development and neural activation. *Eur J Appl Physiol* 92, pp. 98-105.
 - 37) Gruber M, Gruber SB, Taube W, Schubert M, Beck SC, Gollhofer A. (2007) : Differential effects of ballistic versus sensorimotor training on rate of force development and neural activation in humans. *J Strength Cond Res* 21, pp. 274-82.
 - 38) de Oliveira FB, Rizzato GF, Denadai BS. (2013) : Are early and late rate of force development differently influenced by fast-velocity resistance training? *Clin Physiol Funct Imaging* 33, pp. 282-7.
 - 39) Andersen LL, Andersen JL, Zebis MK, Aagaard P. (2010) : Early and late rate of force development:

- differential adaptive responses to resistance training? *Scand J Med Sci Sports* 20, pp. 162-9.
- 40) Häkkinen K, Alen M, Kraemer WJ, Gorostiaga E, Izquierdo M, Rusko H, Mikkola J, Häkkinen A, Valkeinen H, Kaarakainen E, Romu S, Erola V, Ahtiainen J, Paavolainen L. (2003) : Neuromuscular adaptations during concurrent strength and endurance training versus strength training. *Eur J Appl Physiol* 89, pp. 42-52.
- 41) Häkkinen K, Newton RU, Gordon SE, McCormick M, Volek JS, Nindl BC, Gotshalk LA, Campbell WW, Evans WJ, Häkkinen A, Humphries BJ, Kraemer WJ. (1998) : Changes in muscle morphology, electromyographic activity, and force production characteristics during progressive strength training in young and older men. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci* 53, pp. 415-23

Abstract

When assessing muscle function, it is recommended to measure not only the maximum voluntary contraction strength but also the rate of force development (RFD). RFD is derived from the average slope of the force development phase after the onset of muscle contraction. It is influenced by neural factors and better relates to performance in some activities of daily living, such as walking. With age, RFD declines earlier and to a greater extent than maximum voluntary contraction strength. Some patients have lower RFDs compared with age-matched healthy adults. Improving the RFD is more difficult than improving maximum voluntary contraction strength. Few studies about RFD, from which important information about neural factors can be gleaned, have been carried out in clinical settings. It is important to improve the RFD in rehabilitation strategies, but no consistent findings have been reported with respect to the training effects of RFD. Further investigation into RFD is necessary if it is to be used for more effective rehabilitation.

Key words : assessment

rate of force development

neural factor

rehabilitation