

転倒を防ぐ鍵である、“素早い姿勢のリカバリー”を可能にする 骨格筋の弾性特性解明

立命館大学 スポーツ健康科学部
講師 福谷 充輝

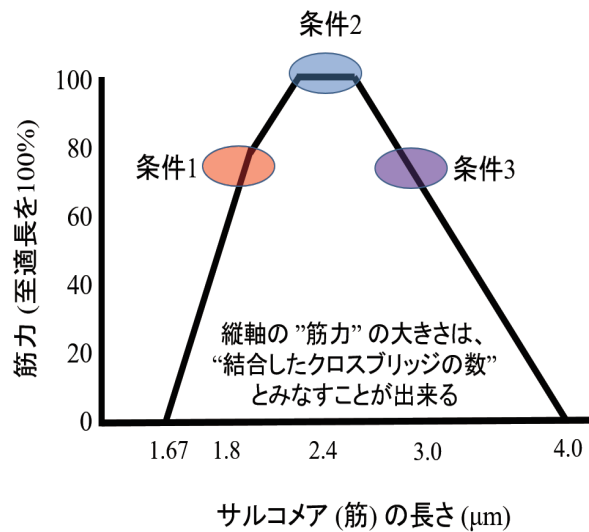
はじめに

高齢者の転倒は、頭を打つといった直接的な問題だけでなく、転倒によって骨折した結果、運動が出来なくなり、体力が急激に低下するという大きな問題を有している。この問題に関し、姿勢のリカバリーが転倒を予防する重要な鍵だと考えられる。健常成人の歩行を観察すると、彼らも何かの障害物につまずくことはある。しかしながら、そのような人は姿勢を崩してもすぐに姿勢を戻す（リカバリーする）ことで転倒を免れている。一方で高齢者は、一度姿勢を崩してしまうとリカバリーすることが出来ずそのまま転倒してしまうことがある。つまり、「歩行中に姿勢を崩さない」ということだけでなく、「崩れた姿勢をすぐにリカバリーする」ことも転倒予防において重要である。このリカバリーが困難な理由として時間的な制約が挙げられる。通常歩行の1歩は0.5秒間程度といたごく短時間で完遂されるため、姿勢を崩してからそれをリカバリーするまでに1秒間もかかるようでは、転倒を免れることは困難である。つまり、崩れた姿勢をリカバリーするためには0.1秒以下といった非常に素早い反応が求められる。このような反応を達成する手段の一つとして、骨格筋の弾性が挙げられる。弾性による力は物体が引き伸ばされたと同時に時間遅れ無しで発生するため、姿勢が崩れた瞬間、すなわち特定の筋が引き伸ばされた瞬間に弾性力が働き、姿勢を元に戻すような力を加えることが可能である。そこで本研究では、崩れた姿勢の素早いリカバリーに貢献しうる、骨格筋の弾性特性が何によって生じているのかを明らかにすることで、新しい視点での転倒予防対策に繋げることを目的とした。

結 果

筋の弾性特性は、筋を急激に引き伸ばしたときの力応答から算出されるスティフネスで検証することが出来る。収縮中の筋を引き伸ばすと、伸長量に応じた筋力の増大が生じる。このときの筋力の増大は、何個のクロスブリッジが結合しているかで決まると考えられている (Morgan et al. 1978)。しかしながら近年、筋細胞のフレームとしての役割を持つタイチンも筋の弾性に貢献していることが示されており (Leonard and Herzog 2010)、申請者もタイチンの弾性特性をヒト生体レベル、細胞レベルで検証してきた (Fukutani and Herzog 2019)。このタイチンが歩行中の素早い姿勢のリカバリーに必要と考えられる骨格筋の弾性に貢献しているのかを検証するため、条件1：結合したクロスブリッジ数が少なくタイチン

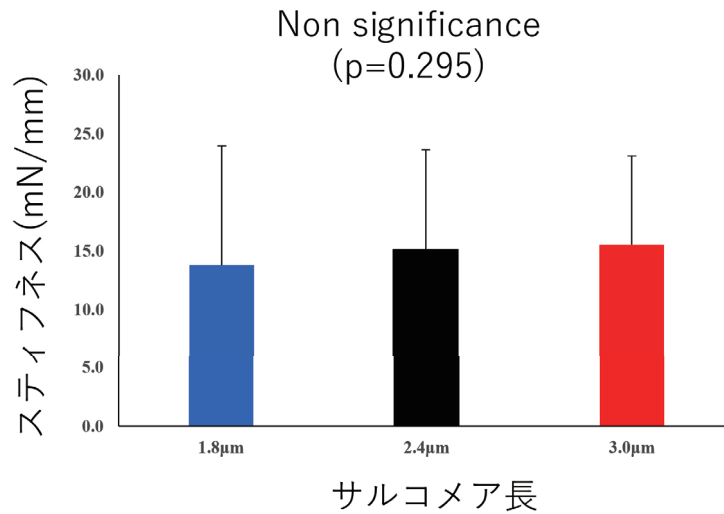
図1 サルコメア長と、その時の筋力 (= 結合したクロスブリッジ数) の関係



がたるんだサルコメア長である $1.8 \mu\text{m}$ 、条件2：結合したクロスブリッジ数が最大でタイチンがたるんだサルコメア長である $2.4 \mu\text{m}$ 、条件3：結合したクロスブリッジ数が少なくタイチンが引き伸ばされたサルコメア長である $3.0 \mu\text{m}$ 、の3条件でステイフネステストを実施した (図1)。もしステイフネスの値が結合したクロスブリッジの数のみによって決まるのであれば、ステイフネスは条件2において最大であり、条件1と条件3は、条件2よりもステイフネスが小さいはずである。一方、結合したクロスブリッジの数だけでなくタイチンの弾性もステイフネスに貢献するのであれば、タイチンの影響はサルコメア (タイチン) が伸長された時に大きくなるため、条件3のステイフネスは条件1よりも大きく、さらには条件2を上回る可能性もある。この検証を行うため、ウサギから大腰筋を摘出し、グリセロールを50%含んだ水溶液に2週間以上浸すことで筋細胞膜を破壊し、筋細胞内に試薬を送り込むことが出来る状態にした。この状態の大腰筋から、単一の筋細胞を物理的に抽出し、筋力計およびモーターに固定した。このときのサルコメア長を計測するため、ヘリウムネオンレーザーを筋サンプルに照射し、レーザーの回折像からサルコメア長を算出し、サルコメア長を $2.4 \mu\text{m}$ にセットした。条件1は、この状態から筋サンプルを25%短縮させることで、条件3は、25%伸長させることでサルコメア長を調節した。これら3つの異なるサルコメア長を初期状態とし、筋サンプルにカルシウムイオンを加えることで筋収縮を誘発した。発揮筋力が定常状態に達したことを確認した後に、ステイフネステスト、すなわち、 0.5ms で筋細胞の長さの0.2% (1サルコメアにつき 4.8nm) の伸長を実施した。この時に得られた筋力の変化を長さ変化で除すことでステイフネスを算出し、この値をサルコメア長が異なる3条件で比較した。

計測の結果、サルコメア長が異なる3つの条件間において、等尺性収縮筋力は条件1において $0.33 \pm 0.25\text{mN}$ 、条件2において $0.44 \pm 0.24\text{mN}$ 、条件3において $0.52 \pm 0.19\text{mN}$

図2 各サルコメア長におけるスティフネスの値



となり、統計的な有意差は認められなかったが、筋の力-長さ関係でも示されるように、条件1においては他の条件よりも小さい傾向がみられた。スティフネスの値に関しては、条件1において13.8 ± 10.2mN、条件2において15.1 ± 8.5mN、条件3において15.5 ± 7.6mNとなり(図2)、等尺性収縮と同様、有意差は認められなかった。

考 察

本研究では、骨格筋の弾性特性がクロスブリッジのみ、もしくはクロスブリッジだけでなくタイチンによって得られているのかどうかを検証するため、異なるサルコメア長におけるスティフネスを比較した。その結果、スティフネスは、いずれの条件においても有意差は認められなかった。本実験で計測したサンプル数はN=13であるため、サンプル数が少なすぎるといえるわけではなく、サンプル間の値の変動が大きいことが、有意差が得られなかった原因と考えられる。傾向としては、1.8 μm条件は2.4 μm条件、および3.0 μm条件よりも小さく、2.4 μm条件、および3.0 μm条件間では同程度になるような結果であった。1.8 μm条件が他の条件よりもスティフネスが小さいという結果は妥当なものだと考えられる。なぜならば、この条件では結合したクロスブリッジの数が少なく、タイチンも引き伸ばされていない状態だと考えられるからである。一方、2.4 μm条件、および3.0 μm条件間ではスティフネスが同程度という結果に関しては、もし結合したクロスブリッジの数のみがスティフネスに貢献しているのであれば、結合したクロスブリッジの数が低下する3.0 μm条件においてスティフネスは小さくなるはずであるが、スティフネスは条件2と3で同程度だったという本研究の結果は、結合したクロスブリッジ以外の何か別の要素、すなわちタイチンがスティフネスに貢献したと考えれば説明がつく。すなわち、骨格筋の弾性特性に、結合したクロスブリッジの数だけでなく、タイチンも貢献している可能性が示唆された。

要 約

本研究によるステイフネス測定の結果から、骨格筋の弾性特性には、結合したクロスブリッジだけでなく、タイチンも貢献している可能性が示唆された。骨格筋の弾性が強い（弾性係数が大きい）ということは、転倒のような不測の事態で骨格筋が急激に引き伸ばされた時に、引き伸ばされる方向とは逆方向に縮むような力が大きくなるということであり、崩れた姿勢のリカバリーに貢献する可能性がある。つまり、クロスブリッジの弾性係数、タイチンの弾性係数を大きくするような方法を見出すことが出来れば、姿勢のリカバリー能力向上に繋がる可能性がある。

文 献

1. Morgan DL, Proske U, Warren D. J Physiol. Measurements of muscle stiffness and the mechanism of elastic storage of energy in hopping kangaroos. 282: 253–261. 1978.
2. Leonard TR, Herzog W. Regulation of muscle force in the absence of actin-myosin-based cross-bridge interaction. Am J Physiol Cell Physiol. 299 (1) : C14-20. 2010.
3. Fukutani A, Herzog W. Current Understanding of Residual Force Enhancement: Cross-Bridge Component and Non-Cross-Bridge Component. Int J Mol Sci. 20 (21) . 5479. 2019.