

カテゴリー

神経科学, 解剖・運動学

タイトル

主要な運動感覚センサーとしての筋紡錘のエビデンス~muscle thixotropy チキソトロピー~

The proprioceptive senses: their roles in signaling body shape, body position and movement,
and muscle force PubMed へ

Proske U et al : Physiol Rev. 2012 Oct;92(4):1651-97

内容

目的

・筋のチキソトロピーの議論は、しばしば固有受容器のレビューから見逃されているが、筋紡錘チキソトロピー性状は、運動感覚に関する実験データの解釈に誤りをもたらすことが多い。

・錐内筋のチキソトロピーは、主要な運動感覚センサーとしての筋紡錘のサポートとして重要なエビデンスを提供する。

Muscle thixotropy とは？

・(補足)「thixotropy チキソトロピー(シキソトロピーとも呼称)」

- ・時間依存性の剪断減粘性である。振盪(揺れ動かす)、攪拌(かき回す)、剪断または他の方法で応力を加えた場合に時間依存性の粘性が低くなる。より粘稠な状態に戻るために一定の時間がかかり、安定した姿勢が維持されると、剛性は次の秒間に徐々に再生される。

- ・よく併記されるものとしてダイラタンシーdilatancyがある。粉粒と水の系に急激に外力を加えて変形をおこさせると、表面付近の水が内部の粒子間隙(かんげき)に吸い込まれて固くなる現象である。

- ・筋肉のチキソトロピーの特性は、骨格筋を一時的に硬化させることによって姿勢動作における解決策を提供することができる。

- ・チキソトロピーは、錐内筋線維および錐外筋線維両方の筋線維を含む休息筋のサルコメアにおけるアクチンとミオシンとの間の長期にわたる安定した(動きのない)架橋の存在から生じる。

- ・これらの橋の存在は、伸張の開始時の筋肉の摩擦によって生じる硬直、短距離弾性成分 SREC によって示される。

- ・SREC に付随することは、フィラメント静止張力 (FRT) と呼ばれる張力の持続的な上昇である。筋肉が短縮されると、橋の存在によって硬化されたサルコメアに作用する圧縮力は、橋の大部分を切り離すには不十分であり、短くなった長さを完全に引き剥がすことはできない。このようなチキソトロピー状態は、筋肉がそのままの限り、長期間持続することがある。

※チキソトロピーは、休息している間、筋は堅くなり、伸長または短縮に抵抗する。クロスブリッジに内在するマイナーな弾性を超える筋肉の長さの変化がある場合、この「摩擦・吸着力」は低いレベルに落ち、姿勢が戻ってくると剛性が回復する（この現象は1929年にDennyBrown ;彼はそれを固定剛性と呼んだ）。チキソ性硬化は安静時の安定性を確保するが、妨げられない動きを可能にし、したがって骨格筋が完全に異なる姿勢および動的役割を果たすことを可能にする。

※運動中、短距離弾性成分（SREC）はより小さく、ほぼ一定の摩擦抵抗に変換される。その後、安定した姿勢が維持されると、剛性は次の秒間に徐々に再生される。チキソトロピーとして知られるこの現象は、筋肉の剛性を長さの変化に非常に強く依存させる。運動すると、実質的に筋肉の剛性が低下し、したがって共振周波数が低下する。

※筋肉の剛性の変化は、速い動作中の柔軟性とスピード、安静時の正確さと安定性という相反する要件を解決します。

参照※Physiological tremor reveals how thixotropy adapts skeletal muscle for posture and movement

Carlijn A. 2016 Published by the Royal Society

・チキソトロピーの振る舞いは短いおよび中間の筋肉の長さにおいて顕著である。ほとんどの腱器官は受動的なストレッチに対して高い閾値を有する。筋肉は腱器官が維持された活動を生成す

るためには長い長さに伸ばされなければならない。長い長さではチキントロピー効果は小さいか、またはない。

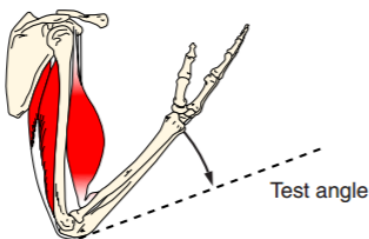
・筋肉が収縮および長さの変化の履歴に応じて緩んだり緊張したりする中間の長さがあります。

「緩み」が意味するのは、その筋が2つの付着間の距離よりも効果的に長くなるため、緩みが余儀なくされることです。緩みは、筋肉をより長い長さで筋を収縮させることによって、数秒間リラックスさせた後、元の長さに短くすることで導くことができる。

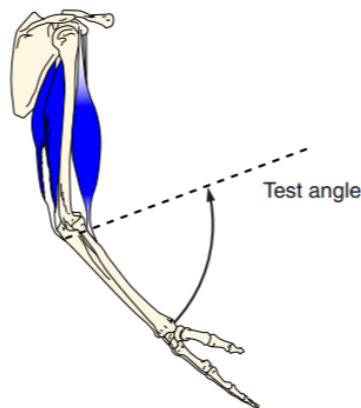
補足) 錘内筋線維は引き伸ばされると興奮信号を発生し、張力が長さの形で感知され、結果緩もうとする。縮んでいるときは大人しい。

筋を調節するために使用される方法①および筋紡錘放電速度に対するその効果を下図に示す。

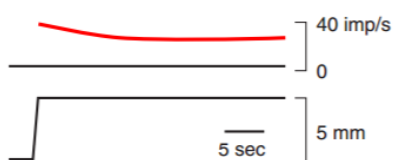
A Flexion conditioning



C Extension conditioning



B



D



(Proske U et al : 2012)

PubMed <

①屈筋と伸筋が描かれた図式の人間の前腕が示されています。

屈筋コンディショニング (A、赤) :前腕が屈曲し、肘屈筋を短時間収縮させ、一度筋がリラックスしたら、受動的な前腕は試験角度に置かれる。

伸筋コンディショニング (C、青) :前腕を伸ばし、肘伸筋を収縮させ、リラックスした前腕を試験角度に置く。

②実験:前腕図の下のトレース B および D は、ヒトの肘関節で使用されるものに匹敵する筋肉コンディショニングを受けた後の麻酔した猫のヒラメ筋における 2 種類の筋紡錘の放電の略図を示す。

結果:

B 赤)ヒラメ筋が 5mm 短縮された時のコンディショニング収縮によって、緩みが除去された麻酔した猫のヒラメ筋に対して、

D 青)ヒラメ筋が 5mm 伸張された後のコンディショニング収縮にて緩みが筋に導入されると、40pulses/秒の筋紡錘休止放電は 10pulses/秒に低下する。

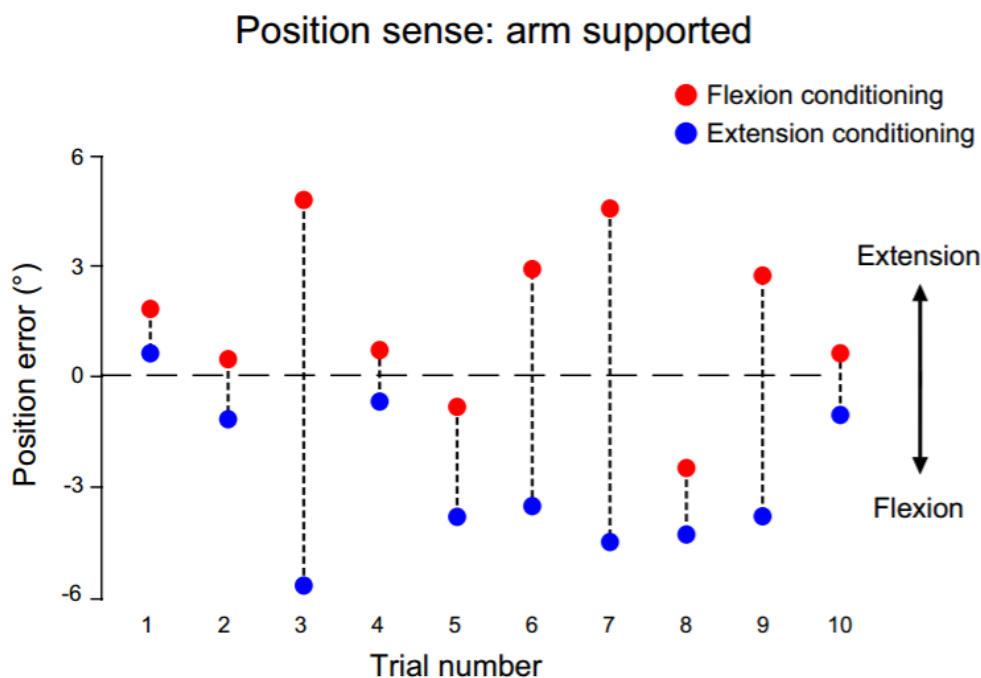
・これは、錐内筋の張力が低下することを意味し、したがって、筋紡錘の感覚端に錐内筋線維が及ぼすストレスは低減される。筋紡錘の放電率は低下する。

・筋肉が自発的に収縮し、錐内筋および錐外外収縮の両方を含むと、筋紡錘のたるみが除去され、放電率が上昇する。

・シンプルに筋肉を収縮させて弛緩リラックスさせるだけで、筋肉の長さを変えずに、筋紡錘のバックグラウンド放電率を変えることができます。

手足の位置感覚の変化に関する実験

・実験: 【下図】



(Proske U et al : 2012) [PubMed](#) へ

・前腕における人間の位置感覚に対する筋肉コンディショニングの影響をマッチングタスクで測定した。

・1人の被験者からの10回の連続した試行が示されている。

・基準の腕の屈曲または伸展のコンディショニング収縮の後、リラックスされた腕を実験者が試験角度で支持体上に置いた。

・その試験の効果による位置を示すために、被験者は目隠しされた状態で他の腕を試験の腕と一致する位置に動かした。

・誤差は、2つのアームの位置の差として計算され、伸展方向の誤差は正であり、屈曲の方向の誤差は負である。

(赤色の記号)屈筋コンディショニング後の位置エラー、(青色の記号)伸筋コンディショニング後の位置エラー（図参照）。

・トライアルは、2つの形態のコンディショニングの間で交互に行われ、測定の各ペアは点線で結合されています。破線はゼロ誤差を示す。

結果:屈筋コンディショニングは、伸筋調整後の誤差と比較して、伸展の方向に系統的に誤差を導く。

1つの腕の肘屈筋が弛んだり張ったりするように調整されていると、腕の位置の知覚が 5° 変化することがある。

・他同様の実験において:一方の側の肘屈筋が弛緩し、他方の側が緊張しているように、2つの腕が反対方向に調整されている場合、それは被験者の腕全運動範囲の $1/4$ 程の 20° の平均一致誤差につながることを意味する。

・腕の位置のこのような大きな違いにもかかわらず、尋問には、目隠しされた被験者は、腕が正確に整列していると主張する。このように2つの腕を調整することによってこのような大きな誤差が生じるという事実は、脳が両方の腕の位置情報を聴いていることを示唆しており、おそらくその腕からの差信号に応答していると考えられます。

多くの実験において

- ・受動的ではなく能動的（280）な位置感覚がより正確であるという頻繁に引用された報告は、おそらくチキソトロピーを有する。チキソトロピーは受動的な特性であるため、受動的な手足の位置感覚および運動感覚といった固有感覚の影響が特に重要である。
- ・しかしながら、チキソトロピー影響は、最大 5~10%の自発収縮（168,200）で持続する可能性がある。
- ・試験筋を規定された状態に置くための四肢の位置感覚に関する多くの実験の失敗は、データの一部の解釈の不確実性を招いている。
- ・意図しない動きがあれば筋紡錘の感度が変わり、結果が変わる可能性があります。さらに、被験者の腕のチキソトロピー状態は、被験者が実験的試験の直前に何をしていたかに依存し、その後の測定の間大きな被験者間差が生じる危険性がある。
- ・実験の目的が無負荷の四肢の位置感覚と、四肢が荷重を支えているときの感覚を比較することである場合、負荷を支えるために使用される自発収縮は、無負荷測定中の筋紡錘の既存のたるみを取り除き、負荷の中央効果とは無関係の位置誤差が生じる可能性がある。

今後において

- ・チキソトロピーは、振動などの外部刺激を使用することなく受動肢の位置感覚を操作する既知の方法を提供する。

・チキソトロピーのコンディショニングを評価して、これが位置感覚において漸進的変化を生じるかどうかを見るための試みは今まで行われていない。

・チキソトロピーは、パーキンソン病患者（240,428）および高齢者のような、固有感覚障害を有すると疑われる対象の研究のための有用なツールである。

私見・明日への臨床アイデア

・人には特有の物質・構造があり、その特性を念頭に置くことで考え方に幅が広がると思われた。

・チキソトロピーは、姿勢不良等無意識の体の感覚のズレを生むと思われ、その調整は筋出力や位置覚の改善に繋がると思われる。

・チキソトロピーの性質(時間依存性や粘性)を考えると、人の筋への触り方もゆっくり・優しく触ると、早く・強く触るのでは物質に差が出る。評価や治療に繋がる性質である。

・固縮や運動失調等特有の症状において、チキソトロピーの特性による姿勢・運動の差も出てくると想像される。

氏名 Syuichi Kakusyo

職種 理学療法士
