

力発揮調節の不安定性を改善する神経生理学的・ 力学的補償機構の解明

A clarification of neurophysiological and mechanical compensation mechanism for
improvement of instable motor output

1071009

研究代表者

京都大学大学院 人間・環境学研究科 准教授

神 崎 素 樹

[研究の目的]

意思通りに力や動きを正確に調節する能力、すなわち力発揮調節能力は我々の日常生活の正確な作業に必要不可欠である。この能力は加齢や不活動により著しく低下することが指摘されており、高齢者の QOL 問題にも深く関与している。この問題点は、医工学的な手法で運動機能を補償することで、解決することが可能と考えられる。本研究では、力発揮調節の不安定性を改善する神経生理学的・力学的補償機構を明らかにすることを目的とする。具体的には、(1) 力発揮調節時に力方向性が存在するか否か、(2) 協働筋の活動タイミングが力方向性に依存した力調節能力に及ぼす影響を検討した。

[研究の内容]

本研究は、実験 1 および実験 2 で構成されている。被検者は、健康な成人男性 5 名（年齢 21 ～ 37 歳）であった。両実験とも京都大学大学院人間・環境学研究科人間情報・動物実験倫理委員会の承認を受けて実施した（承認番号 20-H-11）。

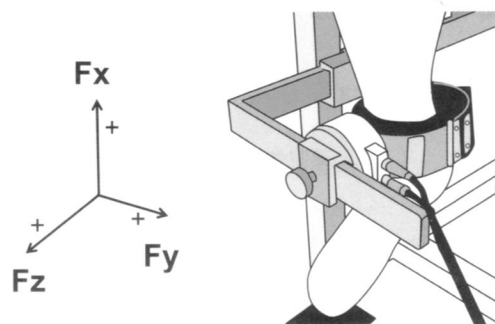


図1 3分力計による力発揮方向
Fx：上（+）下（-），Fy：内（+）外（-），
Fz：前（+）後（-）

1. 実験1：力発揮調節と力方向性

運動課題は、椅座位にて股関節および膝関節角度 90 度の等尺性膝伸展運動であった。

1.1. 収縮強度との関連

最大随意収縮張力 (MVC) の 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80% MVC の等尺性膝伸展課題を 5 秒間それぞれ 3 回ずつ行った。足首に装着した 3 分力計 (LSM-B-500 NSA 1, 共和社製) により膝伸展張力の 3 分力 (Fx：上下方向, Fy：内外方向, Fz：前後方向) を測定した (図 1)。なお、運動課題の目標張力は Fz とした。

収縮強度の増大とともに、Fx および Fy も増加した (図 2)。すなわち、Z 方向の増大とともに、上方向の力および外方向の力が直線的に増加することが定量できた。したがって、力発揮調節時にも目標とする力方向（この場合 Fz 方向）のみならず 3 次元に力が分散していることが明らかとなった。このことは力発揮調

節を評価するためには、力方向性も考慮に入れる必要があることを意味している。

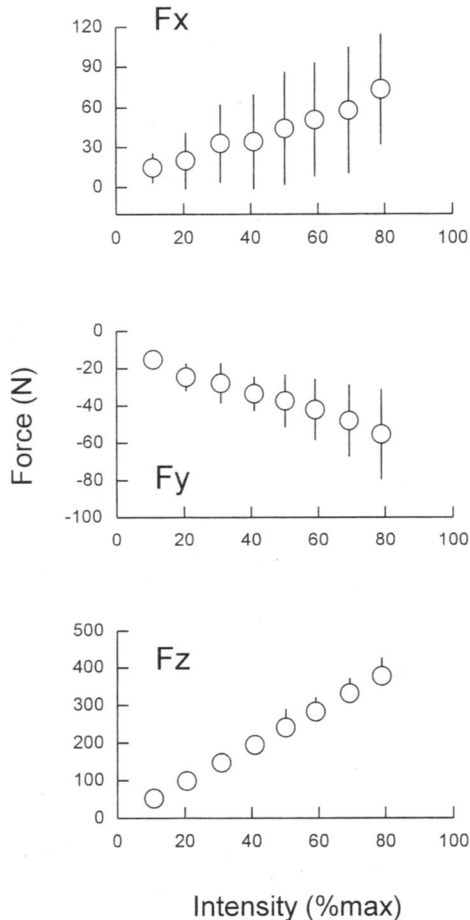


図2 収縮強度と力調節時の3分力

1. 2. 疲労に伴う変化

疲労による力発揮調節時の力方向性を検討するために、被検者に30% MVCの等尺性膝伸展運動を疲労困憊まで行わせた。運動開始直後、運動開始後30秒毎および疲労困憊時における5秒間の膝伸展張力の3分力を測定した。疲労に伴い（時間の経過に伴い）Fyは外方向から内方向に変化した（図3）。これは、外方向に貢献する外側広筋の疲労による収縮性が低下し、それを補うように内側広筋の活動が高まったことが起因していると考えられた。この結果より、疲労により膝伸展の力調節時の力方向性は変化すること、その変化は内外方向が顕著であることが明らかになった。

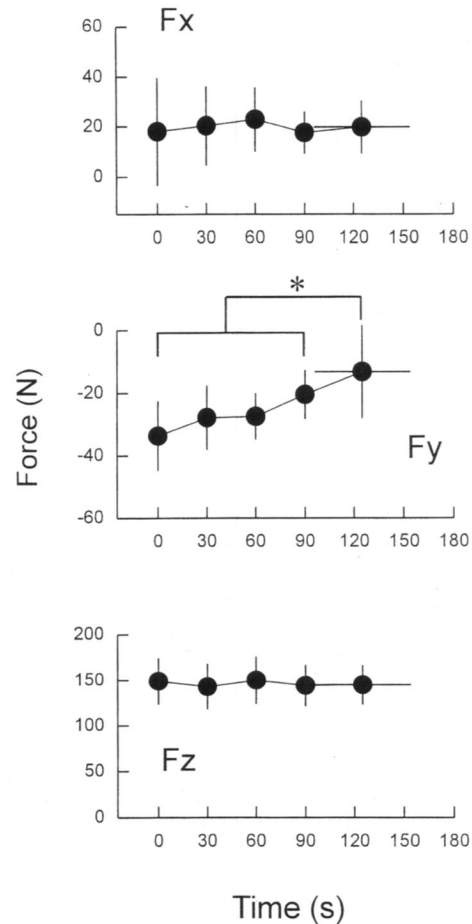


図3 疲労に伴う3分力の変化

2. 実験2：協働筋の活動タイミングと力方向性

被検者は椅座位にて股関節および膝関節角度90度に固定された。被験筋は膝伸展筋群とした。ワイヤー電極 ($\phi = 100 \mu\text{m}$) を大腿直筋 (RF), 外側広筋 (VL), 内側広筋 (VM) の運動点上から筋内に挿入し、これを刺激電極とした。電気刺激強度は最大M波出現の120%とした。刺激頻度は10 Hzとした。刺激パターンは次の8つとした。RFとVLに刺激を同位相 (1) および逆位相 (2) に与える, RFとVMに刺激を同位相 (3) および逆位相 (4) に与える, VLとVMに刺激を同位相 (5) および逆位相 (6) に与える, RFとVLとVMに刺激を同位相 (7) および逆位相 (8) に与える (図4)。各刺激パターンにおける膝伸展張力の3分力を測定した。分析区間は、

Fzが定常となった1秒間とし、張力変動の標準偏差 (SD) を求めた。

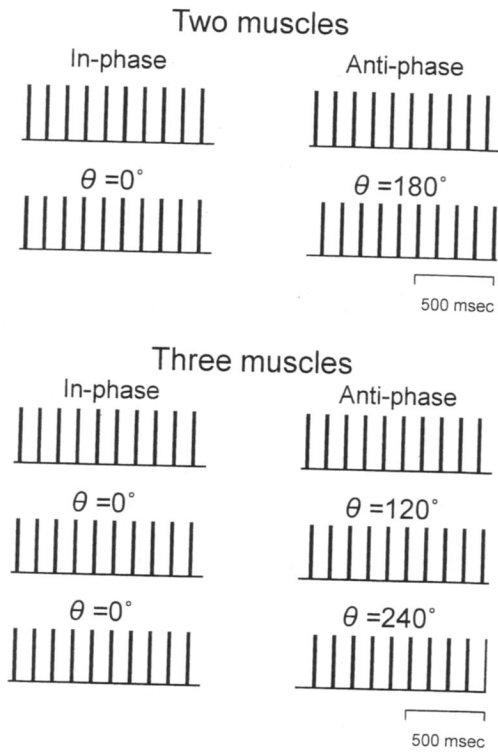


図4 2つの筋 (上) および3つの筋 (下) に電気刺激を与える場合の刺激パターン

同位相に刺激を与えた場合、いずれの力方向も張力の変動は大きく、逆位相に与えると変動は小さくなった (図5-8)。

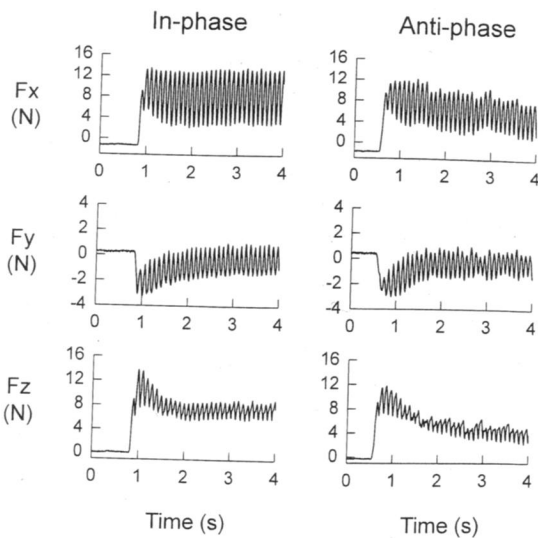


図5 RFとVLに電気刺激を与えた場合の膝伸展張力3分力の変化。左：同位相、右：逆位相

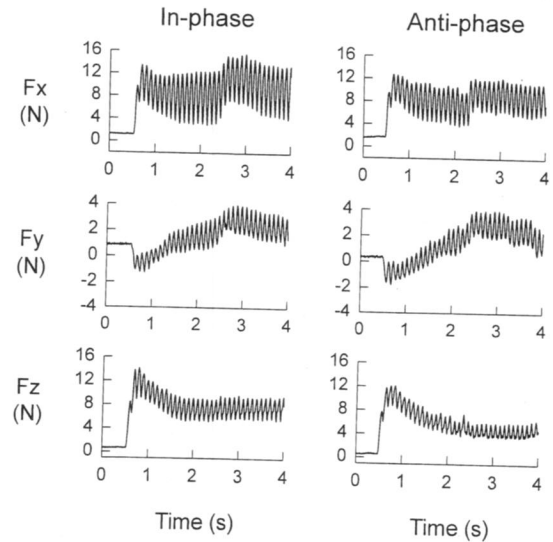


図6 RFとVMに電気刺激を与えた場合

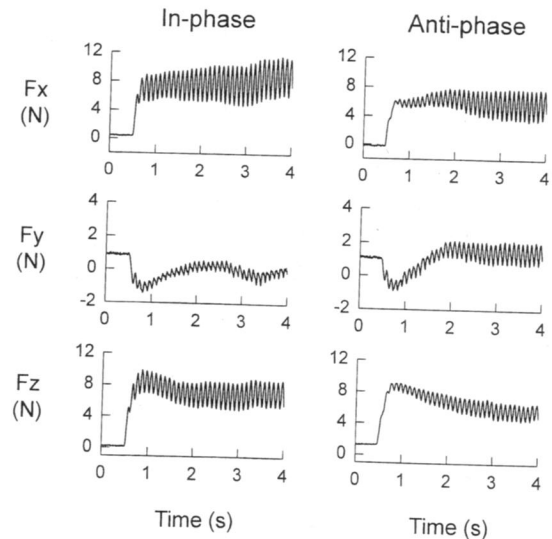


図7 VLとVMに電気刺激を与えた場合

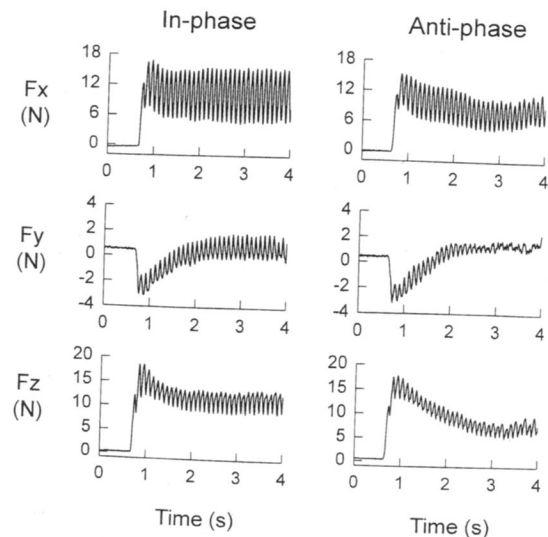


図8 RFとVLとVMに電気刺激を与えた場合

3 分力の変動の標準偏差を求め、5 名の被検者について平均値を求めた (図 9)。その結果、いずれの膝伸展分力でも同位相 (□) で刺激したときより逆位相 (■) で刺激したほうが、張力の変動は小さくなった。上下方向および内外方向より前後方向の変動の低下率が顕著であった。

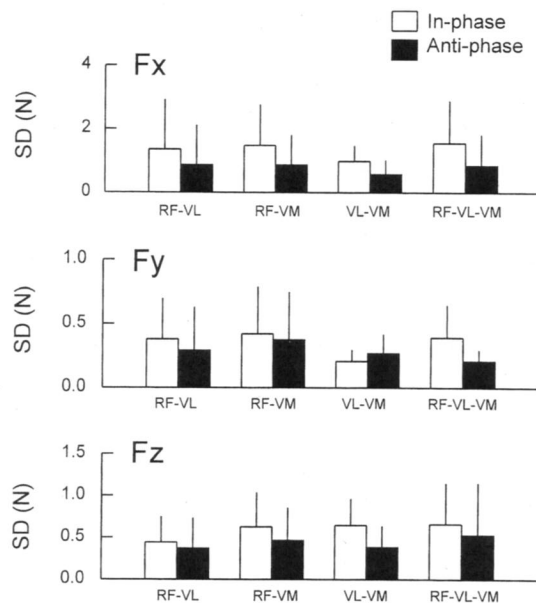


図 9 各刺激パターン時の Fx, Fy, Fz の標準偏差
□: 刺激を同位相で与えた場合, ■: 刺激を逆位相で与えた場合。値は被検者 5 名の平均±標準偏差

この結果は、協働筋の活動タイミングのずれが、膝伸展方向への力調節能力を向上させる神経生理学メカニズムの一つと考えられた。膝伸展動作の解剖学的特性は、RF の活動は上方向、VL の活動は外方向、VM の活動は内方向である。しかしながら、これら方向性の違う筋が同時に活動すると、張力の変動をむしろ高めてしまうこと、これらの筋が位相をずらして活動することで張力の変動を打ち消し合うことが明らかになった。これは、協働筋の力調節能力の力

学的特性と考えられ、力調節能力の不安定性は活動タイミングの一致が関与し、それを改善するためには活動タイミングをずらすことが重要と推察された。

[今後の研究の方向性、課題]

本研究は、力調節能力の評価として力方向性に着目し、力発揮能力は協働筋の活動タイミングが重要であることを見いだした。しかし、本研究の活動タイミングは電気刺激により人為的に作成したものである。したがって、ヒトの随意収縮に応用することが今後の課題である。その知見を基に、力調節能力の劣った高齢者に対し、力調節能力を向上させるデバイスを開発することが課題である。

[成果の発表、論文など]

発表

- (1) 神崎素樹：招待講演：静的活動時における運動単位の動員パターンの変動 ～ワイヤー電極法による検討～、日本体育学会東京支部第 36 回学会大会、東京大学、2009。

論文

- (1) Kouzaki M. et al.: Knee extension forces vector changes due to contraction intensities as well as fatigue. Will be submitted.
- (2) Kouzaki M. et al.: Force fluctuations depend on contraction timing between synergistic muscle activities. Will be submitted.

[謝 辞]

本研究を遂行するにあたり、(財)立石科学技術振興財団の研究援助を賜りました。ここに記して深い感謝の意を表します。